

# FÍSICA

## duodécimo grado

# **FÍSICA**

**duodécimo grado**



# FÍSICA

## duodécimo grado

Lic. Carlos Enrique Sifredo Barrios

Lic. Alberto A. Santana Mora

Lic. Carlos M. Barroso González

M. Sc. Francisco González Veitía





Este material forma parte del conjunto de trabajos dirigidos al Tercer Perfeccionamiento Continuo del Sistema Nacional de la Educación General. En su elaboración participaron maestros, metodólogos y especialistas a partir de concepciones teóricas y metodológicas precedentes, adecuadas y enriquecidas en correspondencia con el fin y los objetivos propios de cada nivel educativo, de las exigencias de la sociedad cubana actual y sus perspectivas.

Ha sido revisado por la subcomisión responsable de la asignatura perteneciente a la Comisión Nacional Permanente para la revisión de planes, programas y textos de estudio del Instituto Central de Ciencias Pedagógicas del Ministerio de Educación.

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización previa y por escrito de los titulares del *copyright* y bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, así como su incorporación a un sistema informático.

### **Material de distribución gratuita. Prohibida su venta**

#### **Edición y corrección:**

- Lic. Amada Díaz Zuazo

#### **Diseño, cubierta, ilustración:**

- Instituto Superior de Diseño

#### **Emplane:**

- Eliezer Guzmán Lajud

#### **Instituto Superior de Diseño:**

Anelís Simón Sosa ■ María Paula Lista Jorge ■ Sara Sofía Delgado Méndez ■ Isell Rodríguez Guerra ■ Daniela Domínguez Ramírez ■ Amanda Serrano Hernández ■ Rocío de la C. Ruiz Rodríguez ■ Evelio de la Sota Ravelo ■ Ana Laura Seco Abreu ■ Arianna Ruenes Torres ■ Reynier Polanco Somohano ■ Celia Carolina Céspedes Pupo ■ Elizabeth Diana Fajardo Céspedes ■ Laura Rosa Almero Fong ■ Elizabeth Blanco Galbán ■ Laura Reynaldo Jiménez ■ Daniela Arteaga Martínez ■ Daniela Alpízar Céspedes ■ Roberto Pérez Curbelo ■ Ariel Abreu Ulloa ■ M. Sc. Maité Fundora Iglesias ■ Dr. C. Ernesto Fernández Sánchez ■ D.I. Eric Cuesta Machado ■ D.I. Julio Montesino Carmona

© Ministerio de Educación, Cuba, 2025

© Editorial Pueblo y Educación, 2025

ISBN 978-959-13-4939-2 (Versión impresa)

ISBN 978-959-13-5012-1 (Versión digital)

EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN

Av. 3.<sup>a</sup> A No. 4601 entre 46 y 60,  
Playa, La Habana, Cuba. CP 11300.  
epueblo@epe.gemined.cu



# ÍNDICE

**Prefacio ..... IX**

**A los Estudiantes ..... XII**

## **1 Óptica ondulatoria ..... 1**

<b>1.1</b> Nociones acerca de la naturaleza de la luz .....	2
<b>1.2</b> Velocidad de la luz .....	6
<b>1.3</b> Reflexión y refracción de la luz. Índice de refracción .....	10
<b>1.4</b> Dispersión de la luz .....	21
<b>1.5</b> Interferencia de la luz. Experimento de Young .....	26
<b>1.6</b> Interferencia de la luz en láminas delgadas .....	33
<b>1.7</b> Difracción de la luz .....	42
Hora del laboratorio .....	50
<b>1.8</b> Polarización de la luz. Ley de Malus .....	51
Hora del laboratorio .....	57
<b>1.9</b> Absorción y difusión de la luz .....	58
Problemas generales del capítulo .....	62

## **2 Introducción a la Teoría Especial y General de la Relatividad ..... 67**

<b>2.1</b> Velocidad de la luz y sistemas de referencia .....	69
<b>2.2</b> Postulados de la teoría especial de la relatividad de Einstein .....	72
<b>2.3</b> Relatividad de los intervalos temporales .....	73
<b>2.4</b> Relatividad de los intervalos espaciales .....	78
<b>2.5</b> Relatividad de la simultaneidad .....	80
<b>2.6</b> Ecuación de composición de velocidades en la relatividad de Einstein .....	82
<b>2.7</b> La energía y la cantidad de movimiento lineal en la Teoría Especial de la Relatividad .....	84
<b>2.8</b> Un experimento con los mesones $\mu$ .....	88
<b>2.9</b> Relatividad general .....	90
Problemas generales del capítulo .....	98

# 3

## Introducción a la Teoría Cuántica de la luz ..... 101

3.1 Radiación térmica. Modelo del cuerpo negro. Leyes de la radiación del cuerpo negro. Hipótesis de Planck .....	102
3.2 Efecto fotoeléctrico. Leyes empíricas y explicación teórica .....	110
3.3 Rayos X .....	123
3.4 Efecto Compton .....	128
3.5 Carácter dual de las radiaciones electromagnéticas .....	131
Problemas generales del capítulo .....	133

# 4

## Física del átomo ..... 137

4.1 Primeras concepciones sobre la estructura del átomo. Modelo atómico de Thomson .....	138
4.2 Modelo atómico de Rutherford .....	140
4.3 Modelo atómico de Bohr. Aplicación al átomo de hidrógeno .....	144
4.4 Experimento de Franck y Hertz .....	153
4.5 Espectros atómicos .....	156
4.6 Limitaciones del modelo de Bohr .....	161
4.7 Dualismo onda-corpúsculo .....	162
4.8 El láser .....	166
Problemas generales del capítulo .....	168

# 5

## Elementos de Física Nuclear y de las Partículas Elementales ..... 175

5.1 Métodos de observación y registro .....	176
5.2 Estructura y propiedades físicas del núcleo atómico .....	181
5.3 Energía de enlace del núcleo y defecto de masa. Energía de enlace por nucleón .....	186
5.4 Transformaciones de los núcleos .....	189
5.5 Reacciones nucleares. Radiactividad artificial .....	205
5.6 Fisión nuclear. Reacción de fisión controlada. Fusión nuclear .....	209
5.7 Partículas elementales .....	218
Problemas generales del capítulo .....	226

# 6

## Elementos de Cosmología ..... 229

6.1 Las raíces de la cosmología ..... 229

6.2 Observaciones fundamentales ..... 234

6.3 Teorías básicas ..... 259

6.4 La evolución futura del universo ..... 290

6.5 La estructura del universo observable ..... 293

6.6 Cosmografía de nuestro vecindario cósmico ..... 303

6.7 La composición del universo observable ..... 307

Problemas generales del capítulo ..... 320

**Glosario ..... 323**

**Anexos ..... 369**

**Bibliografía ..... 377**



# Prefacio

**A**l ser este texto un volumen independiente, de la serie de libros de Física para la educación preuniversitaria, resulta necesario reiterar algunos aspectos ya señalados en los prefacios de los volúmenes precedentes para los grados décimo y oncenno. La idea es que esto contribuya a facilitar el trabajo de los estudiantes y profesores con el libro.

Primero que todo, debemos recordar que estamos ante un panorama en el que el estudio de la Física, como parte esencial de una educación en ciencia y tecnología, en el nivel de educación preuniversitario, tiene una importancia creciente para la *formación de una cultura general* de los jóvenes, incluida, por supuesto, la preparación específica para la continuidad de estudios o para la vida laboral; formación, vale reiterar, que resulta cada vez más necesaria, no solo para la continuidad de estudios superiores, sino para la vida en general.

Consideramos obligado hacer un paréntesis, dada la confusión imperante, de que la cultura no solo comprende el importante campo de las artes y de las humanidades, sino que con igual “peso” abarca también todo lo relacionado con las ciencias exactas y naturales y la tecnología, en fin, con toda la actividad humana.

El libro *Física duodécimo grado*, editado en 1990, fue objeto de una segunda edición en correspondencia con los cambios de programa introducidos en este grado, en el año 2007. Esta segunda edición constó de dos partes, y la segunda parte es la que se ha utilizado, desde el curso escolar 2009-2010, como texto básico para el duodécimo grado del nivel preuniversitario.

Independientemente de los valores de esta obra, la evolución de los programas de estudio para este nivel, en función de los logros alcanzados, las dificultades y los nuevos retos, así como lo avances en la ciencia y su proceso de enseñanza-aprendizaje, apuntaban en la dirección de la necesidad de, más allá de una reedición, elaborar un nuevo libro de Física.

Así nace este nuevo libro *Física duodécimo grado*, cuya puesta en práctica está proyectada para el curso escolar 2025-2026.

Los autores de este libro se consideran deudores del equipo de profesores que tuvo a su cargo la preparación de una primera versión, sometida a prueba en un grupo de centros educativos durante el curso escolar 2019-2020, y del papel del ya citado texto precedente, en la elaboración de esta obra, en tanto fue utilizado como fuente de mucho valor y del cual, incluso, se retomaron algunas partes.

Llegue también el mayor agradecimiento a los profesores Alexis Gómez Zoque, Jorge Luis Contreras Vidal, Saúl Larramendi Valdés y Virginia Rodríguez León, por sus valiosos señalamientos y aportaciones. Igualmente, agradecemos las contribuciones de los profesores Maikel Ortiz Carmona, Juan José Lloverá, René Fundora, Antonio Berazaín Iturralde, Zulema Pérez Roque, Rosa María Gómez y María Dolores Zubero, que como parte de la Subcomisión Nacional de Física participaron en los análisis de la obra durante el proceso de su elaboración.

Antes de continuar con otros aspectos, queremos hacer patente que agradeceríamos mucho todos los comentarios y sugerencias que, en opinión de los profesores, estudiantes y otros usuarios del libro puedan contribuir a mejorar las futuras ediciones de este texto.

### **Algunas características específicas del libro**

Entre otras características del libro se destacan las siguientes:

El libro está orientado a cubrir las temáticas del nuevo programa oficial de *Física para el duodécimo grado*, elaborado en el contexto del Tercer Perfeccionamiento del Sistema Nacional de Educación, y da continuidad a los estudios precedentes de esta asignatura en los grados octavo, noveno, décimo y undécimo.

El enfoque metodológico del libro sigue la pauta de considerar que la Física ha de ser enseñada y aprendida, no centrada en la atención a saberes y habilidades específicos, sino con toda la riqueza de métodos y formas de trabajo que le son inherentes a su sistema conceptual, y que pueden contribuir decisivamente a una sólida asimilación de sus contenidos. Esto presupone que los estudiantes puedan apreciar la extraordinaria riqueza de la actividad investigativa y tengan una visión profunda de la ciencia, en correspondencia con su edad, nivel cultural de partida y así lo requiera el contexto histórico-social en que han de vivir, de manera que

se alcance el objetivo de ser personas verdaderamente cultas, capaces de orientarse independientemente en la solución de los problemas planteados por la sociedad.

El texto está organizado en capítulos y epígrafes, que pueden incluir varias subtemáticas. Los capítulos están representados por números naturales consecutivos; los epígrafes tendrán dos números (el primero corresponde al capítulo y el segundo al orden del epígrafe). Las ecuaciones fundamentales estarán numeradas con dos números, por ejemplo: 1.1, que significa: capítulo 1, ecuación 1. Las figuras están numeradas de manera similar a las ecuaciones y se incluye una breve información de lo que representan.

Cada capítulo parte del planteamiento de la problemática de interés que será tratada, y se incluyen ejemplos en los que se explica el procedimiento de solución de problemas, como modelo de referencia. Cada epígrafe incluye un sistema de actividades orientado a comprobar la asimilación correcta de las principales ideas abordadas, y cada capítulo termina con un sistema de tareas generales con el objetivo de consolidar los conocimientos y desarrollar las habilidades necesarias para operar con estos, hasta el nivel de aplicación, es decir, poder resolver tareas para las que no se dispone de un modelo previo.

Además de la presentación de demostraciones y tareas experimentales, en el texto se incluyen prácticas de laboratorio, las que se identifican siguiendo el mismo criterio utilizado para los ejercicios resueltos.

Los cálculos, tanto en las tareas teóricas como en las experimentales, son reportados según las cifras significativas utilizadas y el método de redondeo.

A lo largo del texto se usa el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Al final del texto (anexos) se proporcionan varias tablas de datos físicos, factores de conversión, tablas de constantes fundamentales, símbolos matemáticos, los símbolos griegos más utilizados y las respuestas a los problemas generales de cada capítulo.

Se incluyen también las secciones o detalles siguientes:

*¿Sabías que...?* y *Saber más*: hacen referencia a los contenidos tendientes a provocar curiosidad, investigación, motivación, así como ampliar en algunos aspectos de especial importancia.

*¡Cuidado!:* llamada sobre posibles errores derivados de ideas alternativas sobre algunos conceptos.



**De la historia:** destaca los aportes de hombres de ciencia al desarrollo del conocimiento científico y algunos hechos históricos importantes.

**Desafío:** ejercicios teóricos o experimentales que para su solución requieren de un mayor esfuerzo, por su nivel de integración interdisciplinaria, aparecen en las tareas generales de cada capítulo.

**Conéctate:** sugiere realizar la búsqueda de información en materiales complementarios o sitios de internet con el objetivo de ampliar y profundizar en el estudio de temáticas de interés.

*Los autores*

# A los estudiantes

No queremos dejar pasar la oportunidad de reiterar algunas ideas a quienes está dirigida fundamentalmente esta obra: los estudiantes.

Es muy común, y lógico, escuchar entre los estudiantes preguntas como las siguientes: ¿Para qué hace falta estudiar Física? ¿Qué importancia tiene aprender las ecuaciones?

Responder de forma convincente a estas interrogantes no es cosa sencilla, pero podemos al menos hacer algunos comentarios: en la actualidad la mayoría de los equipos utilizados –en las fábricas, las industrias, los hospitales, el transporte, la agricultura, las comunicaciones, los centros artísticos, la práctica deportiva, nuestros hogares y otros ámbitos– se han diseñado por los científicos e ingenieros sobre la base de las leyes de la física.

Sin embargo, la importancia del estudio de la Física no solo está dada por sus aportes al desarrollo tecnológico de nuestra civilización, sino por lo que este aporta intelectualmente a las personas: potenciar sus capacidades de razonamiento y la creatividad. De hecho, *el conocimiento físico del mundo constituye un componente esencial de la cultura.*

Debe señalarse también que, inmersos en una sociedad cada vez más influenciada por la ciencia y la tecnología, sin el conocimiento físico, que está en la base de una formación que permite evaluar el impacto de este desarrollo sobre nuestra civilización, es poco probable que las personas puedan avanzar más allá de sus propios e inmediatos intereses, e incluso, ser presa fácil de muchos mitos, falsedades y manipulaciones. No exageramos si decimos que el conocimiento físico del mundo nos hace más libres, en tanto nos hace menos manipulables, de ello sobran ejemplos concretos que seguro discutirán durante el curso.

Solo si nos apropiamos, también, de estos conocimientos y procedimientos es posible alcanzar una cultura integral que nos permita disfrutar la vida en toda su riqueza, y orientarnos de manera correcta en la solución de los problemas planteados por la sociedad. Por supuesto esto se

comprenderá a plenitud a medida que se avance en el estudio de esta ciencia y hasta las ecuaciones, que en un principio pueden parecer un jeroglífico inexplicable, terminen mostrándonos toda la belleza y esplendor del conocimiento sobre los fenómenos naturales, como reflejo sintético de la obra desarrollada durante milenios por la humanidad.

Esperamos que este libro pueda incentivar el interés de ustedes por la física y contribuir de manera significativa a su aprendizaje.

*Los autores*

# CAPÍTULO 1

## Óptica ondulatoria

**E**l hermoso espectáculo del reflejo de los objetos en las aguas tranquilas de una playa, el verdor de los árboles, el azul del cielo, el blanco de las superficies cubiertas por la nieve, los colores del arcoíris (figura 1.1) y muchos otros fenómenos naturales han sido disfrutados por las personas de todas las latitudes desde las épocas más remotas.



a



b



c



d

**Fig. 1.1** Algunos fenómenos naturales: a) arcoíris en el parque nacional Alejandro de Humboldt (Holguín-Guantánamo); b) azul del cielo y la arena casi blanca (Varadero); c) campo cubierto de nieve (Burgenland); d) reflejo del paisaje en aguas tranquilas (Cayo Santa María)

Al estudiar la óptica, rama de la Física que se ocupa de la investigación de los fenómenos luminosos, se obtiene un conocimiento que nos permite explicarlos de manera científica, diseñar y utilizar, desde simples espejos (que ya se construían desde hace aproximadamente 3 000 años) hasta cámaras fotográficas y de video, microscopios, telescopios, láseres, fibras ópticas, sistemas holográficos y muchos otros dispositivos ópticos, que han resultado y resultan esenciales para el desarrollo de nuestra civilización.

El hecho de que muchos fenómenos luminosos puedan ser explicados sobre la base del modelo de que la luz es una onda electromagnética, es algo que conoces de lo estudiado en grados anteriores. Ahora, con un conocimiento más acabado sobre el comportamiento de las ondas electromagnéticas, podemos ampliar y profundizar en lo relacionado con la naturaleza de la luz y los fenómenos luminosos. Sobre esta base, más adelante, examinaremos también el hecho de que este modelo no nos da una descripción completa de la naturaleza de la luz y nos introduciremos en el llamado modelo cuántico de la luz.

En particular, en este capítulo abordaremos lo relacionado con la naturaleza de la luz, su propagación y rapidez, los fenómenos de la reflexión y de la refracción; la dispersión, la difusión, la interferencia, la difracción y la polarización.

## 1.1 Nociones acerca de la naturaleza de la luz

La evolución del conocimiento sobre los fenómenos luminosos, la naturaleza de la luz y, en concreto, la respuesta a la pregunta ¿qué es la luz?, forman parte de una apasionante aventura que comenzó hace aproximadamente unos 3 000 años.

Existen muchas evidencias de que la tecnología óptica se remonta a la antigüedad; por ejemplo, algunos espejos del antiguo Egipto, contruidos de metal desde hace aproximadamente 1 200 años, han sido encontrados por los arqueólogos en perfectas condiciones.

Por otra parte, filósofos griegos como Pitágoras, Demócrito, Empédocles, Platón, Aristóteles y otros, desarrollaron algunas teorías sobre la naturaleza de la luz. En la antigua Grecia y en Roma también se conocían y estudiaron los fenómenos de la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción. Además, en Roma, por ejemplo, hay evidencias de la utilización de lupas por los artesanos. Posteriormente, la óptica también se estudió en el mundo árabe, donde destacan las investigaciones de Alhacén

(965-1040), al que por sus trabajos en este campo se le conoce como el padre de la óptica moderna.

En los inicios de la época del Renacimiento, los trabajos de Alhacén fueron traducidos al latín y ejercieron una fuerte influencia en el estudio de los fenómenos ópticos en Europa. Por citar solo un ejemplo, vale recordar que el polímata florentino del Renacimiento italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) inventó la cámara oscura.

En el mundo solo existen 54 cámaras oscuras del tipo de la de La Habana (figura 1.2), que está situada en la azotea de un edificio de la Habana Vieja (en la llamada Plaza Vieja). En su espejo de 1,80 m de diámetro se puede reflejar la maravillosa vista de lo que ocurre en su entorno exterior mediante el reflejo de la luz captada por un periscopio situado a 36,8 m de altura, que puede barrer un ángulo de 360 grados.



**Fig. 1.2** Cámara oscura en La Habana

Sin embargo, es en el siglo <sup>xvii</sup> comienza un intenso y acelerado proceso de desarrollo de la óptica, al que contribuyeron de manera significativa, entre otros, Galileo Galilei, Zacharias Jansen, Johannes Kepler, Willebrord Sanell, Rene Descartes, Pierre Fermat, Robert Hooke, Isaac Newton, Ole Christensen Römer, Tomas Young, Cristian Huygens y Agustín Fresnel.

A fines del siglo <sup>xvii</sup> se destacaban dos teorías acerca de la naturaleza de la luz: la teoría ondulatoria, elaborada por el físico y astrónomo Christian Huygens y la teoría corpuscular, propuesta por el físico inglés Isaac Newton, aunque este último se mantuvo ambivalente, por mucho tiempo,

entre ambas concepciones. Puede que la inclinación de Newton por el modelo corpuscular estuviera motivada por la dificultad que se presentaba con el modelo ondulatorio (como se conocía en esa época) para explicar la propagación rectilínea de la luz.

### & De la historia

Christian Huygens (1629-1695), es un físico y astrónomo holandés (figura 1.3), conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y de la dinámica. Para Huygens, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos. Basándose en esta teoría, dedujo las leyes de la reflexión y de la refracción, y explicó el fenómeno de la doble refracción.



Fig. 1.3

Para la teoría o modelo corpuscular, la luz es un flujo de partículas que salen con gran velocidad de las fuentes de luz. En los orígenes de la teoría o modelo ondulatorio de la luz, se consideraba a esta como una onda longitudinal que parte de la fuente de luz y se propaga con gran velocidad en un medio inmóvil, elástico, llamado "éter espacial" o "éter luminífero", que cubría continuamente todo el universo. Ambos modelos coincidían en el hecho de que, si bien no se conocía el valor de la velocidad de propagación de la luz, era muy grande, lo que pudo ser comprobado experimentalmente, como veremos en el próximo apartado.

Durante el siglo XVIII, el peso del prestigio de Newton opacó al modelo ondulatorio, aunque el modelo corpuscular no permitía explicar de manera satisfactoria algunos fenómenos ya conocidos.

Mediante la teoría corpuscular se podían explicar satisfactoriamente, por ejemplo: la propagación rectilínea, el regreso inverso y la reflexión de la luz. Sin embargo, al intentar explicar la refracción de la luz los resultados no concordaban con los datos experimentales. Tampoco resultaba posible explicar los ya conocidos fenómenos de la interferencia, difracción y polarización de la luz.

En este estado de cosas, a principios del siglo XIX, la teoría ondulatoria renace a partir de los trabajos del médico inglés **Tomas Young (1773-1829)**, que, entre otras cosas, añadió a la teoría ondulatoria un elemento esencial: el llamado principio de interferencia. Por otra parte, en Francia, ajeno a los trabajos de Young, Agustín Jean Fresnel, también sintetizó la teoría ondulatoria elaborada por Huygens con el principio de interferencia. Cuando Young, que era fuertemente criticado en Inglaterra por sus ideas, conoció del reconocimiento que se daba a la teoría de Fresnel, le escribió una carta congratulándole por el resultado y forjaron una estrecha colaboración.

Con este refinamiento de la teoría mecánico-ondulatoria, resultaba posible explicar casi todos los fenómenos luminosos conocidos, desde el problema de la propagación rectilínea de la luz en los medios isótropos y homogéneos hasta la reflexión y la refracción de la luz, la interferencia y la difracción.

La principal dificultad de esta teoría consistió en postular la existencia del hipotético medio por el que se propagaban las ondas luminosas, “el éter espacial”, el cual debía tener propiedades muy extrañas, por ejemplo, debía ser tan tenue que permitiera, casi sin amortiguamiento, el movimiento de los cuerpos celestes y al mismo tiempo soportar oscilaciones de muy alta frecuencia (del orden de  $10^{15}$  Hz) propagándose con una rapidez aproximada de  $3,0 \cdot 10^8$  m/s, lo que, como sabemos, implica fuerzas restauradoras de valor muy elevado.

En paralelo a estos avances en el campo de la óptica, otros se desarrollaban en relación con los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Recordemos que Faraday (1791-1867) estableció una correlación entre el electromagnetismo y la luz, cuando encontró que la dirección de polarización de la luz puede alterarse bajo un fuerte campo magnético y que posteriormente, Maxwell (1831-1879) desarrolló de manera brillante una teoría que resumía todo el conocimiento empírico sobre los fenómenos electromagnéticos, y predijo teóricamente la existencia de las ondas electromagnéticas, las que se podían propagar en el “éter luminífero” con una velocidad  $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ , que coincidía con el valor experimental de la velocidad de la luz. Como también conocemos que la existencia de estas ondas fue confirmada por los experimentos de Hertz, publicados en 1888, después de la muerte de Maxwell.



Como veremos más adelante, toda una serie de investigaciones, en particular las realizadas por Michelson-Morley, en 1887, condujeron a la idea del carácter superfluo del éter espacial. Puede que el primero en percatarse de la inexistencia del éter luminífero fuera el físico francés Henry Poincaré (1854-1912) el que, en 1900, expreso: “¿Nuestro éter, realmente existe? Yo no creo que observaciones más precisas nos puedan revelar algo más que desplazamientos relativos”.

Posteriormente, en su teoría especial de la relatividad, de manera independiente, Einstein rechaza la existencia del éter. En el marco de esta teoría los experimentos de Fizeau, Airy y Michelson-Morley, relacionados con la existencia del éter se explicaban de forma natural. Con esto quedó claro que, las ondas electromagnéticas libres son una entidad independiente que pueden propagarse en el espacio sin necesidad de ningún medio.

El estudio de la emisión de la luz por parte de los cuerpos, la distribución de la energía en el espectro de radiación calórica del cuerpo negro y el fenómeno del efecto fotoeléctrico, condujeron a suponer que la radiación, propagación y absorción de las ondas electromagnéticas tiene un carácter discreto, es decir, que la luz se emite propaga y absorbe, no en forma continua como se deducía de la teoría ondulatoria, sino de manera discreta (cuantos). Fue en 1900 que, el físico alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), sentó las bases de la teoría cuántica de los procesos electromagnéticos. Posteriormente, en 1905, Albert Einstein elaboró la teoría cuántica de la luz, según la cual está constituida por un flujo de partículas luminosas, nombradas más tarde como fotones. Por su importancia, para tener una idea más acabada sobre la naturaleza de la luz, este modelo lo estudiaremos en el capítulo 3.

## Comprueba tus conocimientos

1. Redacta un resumen sobre la evolución de las ideas acerca de la naturaleza de la luz.

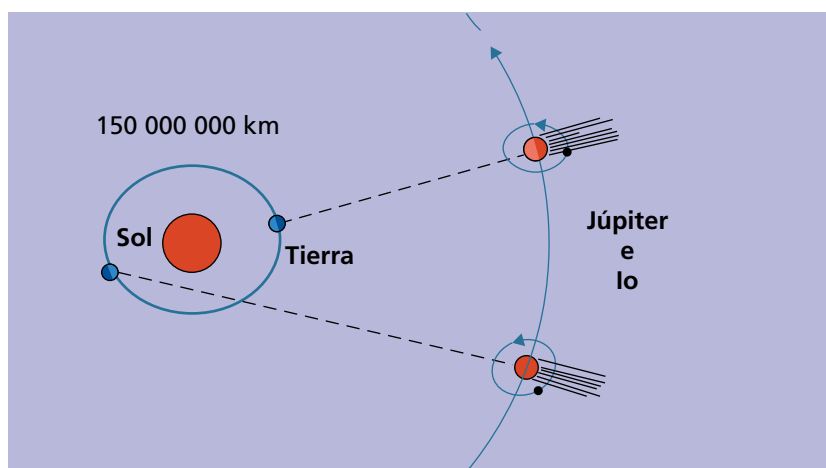
## 1.2 Velocidad de la luz

Durante mucho tiempo, los filósofos de la antigüedad discrepaban sobre el hecho de que si la luz se propagaba de manera instantánea o no. Por ejemplo, Empédocles consideraba que la luz se propagaba con cierta velocidad, Aristóteles que lo hacía de manera instantánea y, en el mundo árabe, Alhacén creía que la luz tenía una velocidad finita.

Aún a principios del siglo XVII, grandes pensadores, como René Descartes, defendían la idea de la propagación instantánea de la luz y otros, como Kepler, que su velocidad era finita.

Galileo estuvo entre los primeros en tratar de medir experimentalmente la velocidad de la luz. A estos efectos, en 1629, propuso un experimento intentando medir el posible intervalo de tiempo al tapar y destapar un farol colocado a una distancia lo más alejada posible. Aunque este experimento no tuvo éxito, la inferencia de este fue de que el valor de la velocidad era tan grande, que no podía ser detectado en el intervalo de tiempo transcurrido al tapar y destapar los faroles.

No fue hasta 1676 en que el astrónomo danés Ole Christensen Römer (1644-1710) pudo determinar de manera experimental, mediante mediciones astronómicas, el carácter finito del valor de la velocidad de propagación de la luz. En esencia, su conclusión se basó en la discrepancia entre los tiempos observados y predichos para los eclipses de Ío, una de las lunas de Júpiter (la más cercana). La idea central de Römer fue la de que esta discrepancia se debía a que cuando la Tierra se alejaba de Júpiter, la luz procedente de Ío demoraba más tiempo en llegar a la Tierra al salir del cono de sombra de Júpiter, que cuando la Tierra estaba en su punto más próximo (figura 1.4). Huygens y Newton, entre otros, que estaban muy convencidos de la validez del trabajo de Römer, estimando de manera independiente el diámetro de la órbita de la Tierra, calcularon el valor de la velocidad de la luz en  $2,3 \cdot 10^8$  m/s y  $2,4 \cdot 10^8$  m/s, respectivamente.



**Fig. 1.4** Eclipse de Sol provocado por el satélite de Júpiter Ío

En 1849, poco más de un siglo después del descubrimiento de Römer, el físico francés Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) inventó un dispositivo que le permitió hacer la primera medición, en un laboratorio terrestre, del valor de la velocidad de la luz. Su dispositivo consistió en una rueda dentada que podía girar y un espejo colocado a 8,633 m (figura 1.5). Este aparato se instaló en los suburbios de París y funcionaba de la manera siguiente: un pulso de luz salía, pasaba en dirección al espejo por una abertura de la rueda, se reflejaba y regresaba. Ajustando la velocidad de rotación de la rueda se podía lograr que el pulso volviera a pasar por las aberturas o fuera obstruido por los dientes.

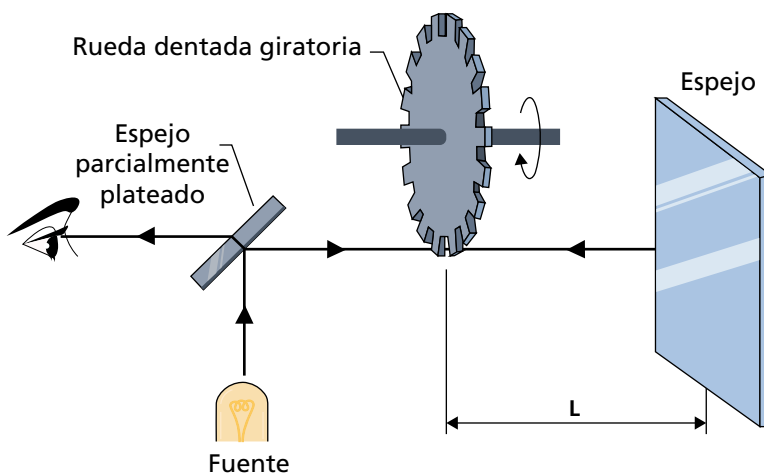
Nota que, si la rueda gira de modo que al regreso la luz sea bloqueada por el diente, que sigue a la abertura por la que pasó, el tiempo que le toma a la luz en ir y volver de la rueda al espejo  $\frac{2L}{c}$  será igual al tiempo  $\frac{\varphi}{\omega}$  que le toma a la rueda girar con velocidad  $\omega$ , el ángulo  $\varphi$  entre el centro de un diente y el centro de una abertura, por lo tanto:

$$\frac{2L}{c} = \frac{\varphi}{\omega}$$

De donde se obtiene que:

$$c = \frac{2L\omega}{\varphi}$$

Con este método Fizeau encontró un valor de la velocidad de  $3,133 \cdot 10^8$  m/s.



**Fig. 1.5** Esquema del aparato de Fizeau

Posteriormente, su colega Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), que también estaba empeñado en medir el valor de la velocidad de la luz, mediante un experimento similar, pero con espejos giratorios encontró el valor de  $3,153 \cdot 10^8$  m/s.

Usando técnicas similares y procedimientos de interferometría, hasta principios del siglo xx, se logró determinar el valor de la velocidad de la luz con mucha menos incertidumbre. En este camino se destaca el trabajo realizado por el físico estadounidense Albert A. Michelson, que le valió la obtención del premio Nobel de Física, en 1907. Posteriormente, en un experimento aún más preciso, Michelson, en unión del también físico estadounidense Edward Morley, obtuvo el valor de 299 796 km/s, con una incertidumbre de 4 km/s

Ya en la segunda mitad del siglo xx, usando radiación láser se logró medir, de manera directa y con una extraordinaria precisión, la frecuencia y la longitud de onda de la luz, y por esa vía obtener el valor de su velocidad de propagación (recuerda que para la velocidad de propagación de las ondas se cumple que  $c = \lambda \nu$ ) con una incertidumbre menor que 1 m/s.

Dada la determinación tan precisa de la velocidad de propagación de la luz y el hecho de que su valor, como estudiaremos más adelante, es independiente del sistema de referencia, a partir de 1983 se ha asumido que esta constante universal tiene el valor:

$$c = 299\,792,458 \text{ m/s}$$

A partir del 2018, este valor de la velocidad de la luz en el vacío se considera sin incertidumbre.

El metro se define, entonces, en función de esta magnitud como la distancia que recorre la luz en el vacío en  $1/299\,792,458$  s.

Debemos señalar que nos hemos estado refiriendo al valor de la velocidad de la luz en el vacío (semejante a la que tiene en el aire y que se acostumbra a tomar de manera aproximada como  $3,0 \cdot 10^8$  m/s).

## Comprueba tus conocimientos

2. Explica el método de Römer y el método de Fizeau para determinar la velocidad de la luz.
3. ¿Cuál es el valor de la velocidad de la luz en el vacío?

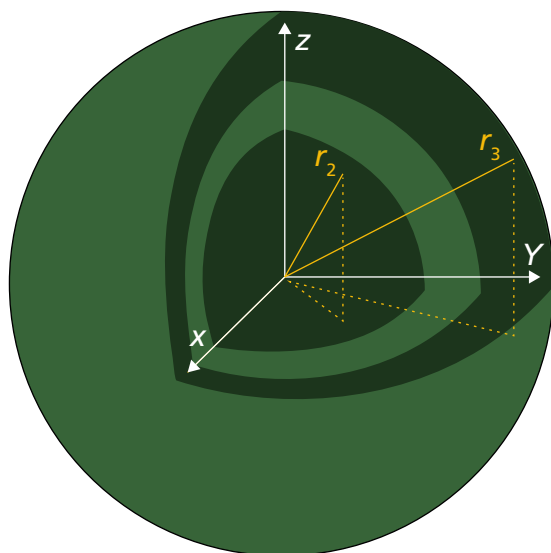
## 1.3 Reflexión y refracción de la luz.

### Índice de refracción

De los estudios realizados en grados anteriores ya conoces los fenómenos de la propagación rectilínea de la luz en los medios homogéneos e isótropos, de la reflexión y de la refracción, esencialmente de manera cualitativa. También conoces las leyes relacionadas con la reflexión y la refracción de las ondas, y su deducción teórica a partir del principio de Huygens-Fresnel (Física décimo grado, capítulo 8).

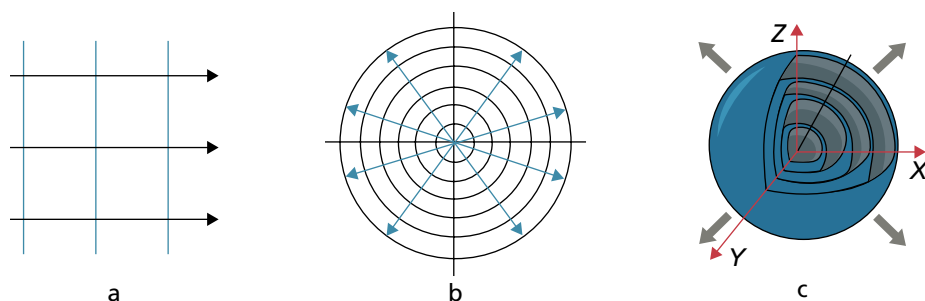
Recordemos algunos aspectos fundamentales sobre estos fenómenos para el caso específico de las ondas luminosas y profundicemos en algunas de sus características.

Primero recordemos que para representar las ondas se utiliza el concepto de **frente de onda**, que es el lugar geométrico de todos los puntos que oscilan en fase. Para hacer la representación de una onda, con el modelo de los frentes de onda, lo que se hace es trazar algunos de los frentes de ondas separados por una longitud de onda (figura 1.6).



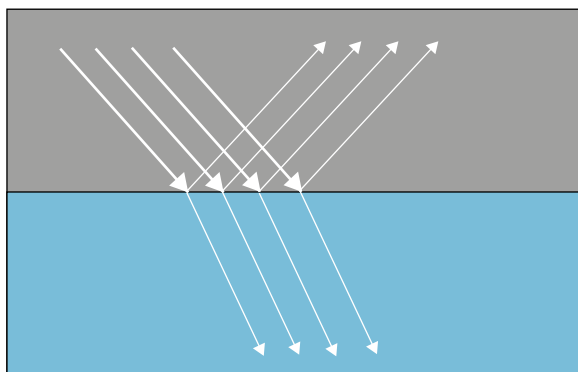
**Fig. 1.6** Representación de una onda esférica mediante frentes de onda

Por otra parte, en algunos casos puede ser más conveniente representar la propagación de las ondas con el modelo de **rayos**, que son líneas en la dirección en que se propaga la onda. Los rayos son siempre perpendiculares al frente de onda (figura 1.7).



**Fig. 1.7** Representación de las ondas mediante frentes y rayos: a) onda plana; b) onda circunferencial; c) onda esférica. Los rayos se representan mediante las flechas cuya dirección es perpendicular a los frentes de onda

En la figura 1.8 se representa, mediante el modelo de rayo, lo que sucede cuando una onda luminosa incide en la superficie lisa de separación de dos medios transparentes diferentes, por ejemplo, el aire y el agua o el aire y el vidrio, en el caso en que el fenómeno de la absorción de energía de las ondas pueda no ser tomado en consideración.

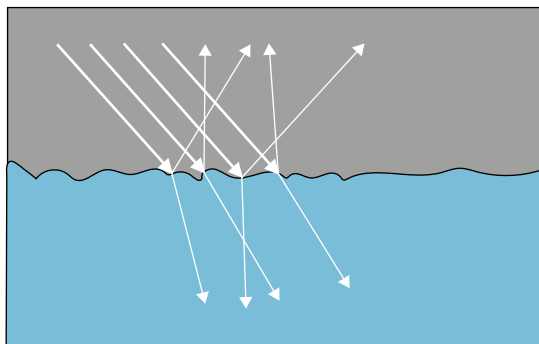


**Fig. 1.8** Representación de la reflexión y refracción de la luz al incidir sobre la superficie lisa que separa dos medios transparentes

En este caso, parte de la onda incidente se refleja y parte se refracta (trasmite), con ángulos bien definidos para la reflexión y para la refracción respecto a la dirección perpendicular a la superficie de separación, que como sabemos se acostumbra a llamar dirección normal.

Si la superficie de separación no es lisa entonces los rayos reflejados y refractados no forman un ángulo único respecto a la normal y se reflejan o refractan en diferentes direcciones (figura 1.9). En esta situación, se dice que la reflexión es difusa y cuando la superficie es lisa se dice que la

reflexión es regular. Por supuesto, esto último también es válido para el caso de la refracción.



**Fig. 1.9** Representación de la reflexión y refracción de la luz al incidir sobre la superficie irregular que separa dos medios transparentes

El cambio en el valor de la velocidad de propagación de las ondas luminosas cuando se transmiten de un medio a otro (refracción) se caracteriza por la relación entre los índices de refracción de cada medio. El índice de refracción absoluto ( $n$ ) de un medio es la relación que existe entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío ( $c$ ) y en el medio dado ( $v$ ).

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Como la velocidad de la luz en cualquier otro medio es menor que en el vacío, el índice de refracción es siempre mayor que 1.

El índice de refracción depende de las características del medio, como sabemos, en el caso de la luz, de sus propiedades eléctricas y magnéticas, pero también depende de la longitud de onda de la luz.

Conocidos los índices de refracción absolutos de dos medios cualesquiera  $n_1$  y  $n_2$  resulta sencillo determinar el índice de refracción relativo de esas sustancias:

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ y } n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Como la velocidad de la luz en el aire se suele considerar igual a la de la luz en el vacío, el índice de refracción relativo del aire se puede considerar aproximadamente igual a la unidad.

En la tabla 1.1 se muestran los valores de los índices de refracción de algunas sustancias transparentes cuando se utiliza luz monocromática amarilla de longitud de onda  $\lambda = 589,0 \text{ nm}$ .

**Tabla 1.1**

Sustancia	Índice de refracción
Agua 20°C	1,333
Alcohol etílico	1,362
Vidrio Crown	1,515
Vidrio Flint	1,572
Diamante	2,420

Nota que los valores de los índices de refracción para algunas sustancias, dados en la tabla 1.1, se han referido a determinada longitud de onda. Lo que sucede es que la rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, pero la rapidez de propagación de la luz en cualquier sustancia es diferente para diferentes longitudes de onda y, en consecuencia, el índice de refracción del material depende de la longitud de onda de la luz.

### Problema resuelto 1

Considera que la longitud de onda de la luz roja emitida por un láser es de 633 nm en el aire y que la velocidad de propagación de esta radiación en el humor acuoso del ojo es de  $2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Calcula el índice de refracción del humor acuoso y la longitud de onda de la luz en ese medio.

*Solución:*

En este caso, el índice de refracción del humor acuoso se puede calcular directamente a partir de la relación  $n = \frac{c}{v}$

Si denotamos al aire como medio 1 y al humor acuoso como medio 2, para el humor acuoso tendremos que:

$$n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$n_2 = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$n_2 = 1,34$$



Como la frecuencia es la misma para los dos medios, la longitud de onda en el humor acuoso se puede calcular a partir de la relación:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Bajo la consideración de que  $n_1 = 1$ , despejando  $\lambda_2$  se obtiene que:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n_2}$$

$$\lambda_2 = \frac{633 \text{ nm}}{1,34}$$

$$\lambda_2 = 472 \text{ nm}$$

Recordemos ahora que las leyes de la reflexión y la refracción de la luz, aunque se pueden deducir teóricamente a partir del principio de Huygens-Fresnel, fueron formuladas inicialmente de manera empírica, es decir a partir de resultados experimentales que permitieron establecer lo siguiente:

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie de separación entre dos medios, por ejemplo: A y B, están todos en un mismo plano, que es perpendicular al plano de la superficie de separación entre los dos medios.
2. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales.

$$\theta_A = \theta'_A \quad (1.2)$$

Estos dos hechos los conocemos como **leyes de la reflexión** (figura 1.10).

3. Para luz monocromática la razón de los senos de los ángulos que forman los rayos incidente y refractado con la normal es igual a la razón inversa de los índices de refracción de cada material: Si denotamos por A al medio por el que se propaga la onda incidente y por B la onda refractada, podemos escribir esta ley de manera simbólica de la forma siguiente:

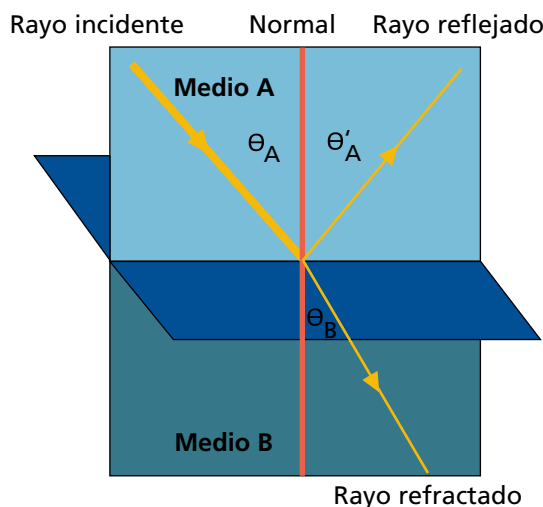
$$\frac{\text{sen}\theta_A}{\text{sen}\theta_B} = \frac{n_B}{n_A} \quad (1.3)$$

Este hecho y el de que los rayos incidente y refractado, y la normal estén en un mismo plano es lo que conocemos como **leyes de la refracción** (figura 1.10).

La ecuación 1.3 nos indica que, si el índice de refracción del medio al cual se trasmite la luz es mayor que el de donde la luz proviene, la luz se

refracta desviándose de manera tal que su dirección de propagación se acerca a la normal. En el caso contrario, se aleja de la normal.

En el caso particular de que el rayo incidente sea perpendicular a la superficie de separación, el rayo refractado no se desvía, lo que se corresponde con la ecuación 1.3, aunque, por supuesto si cambia el valor de su velocidad.



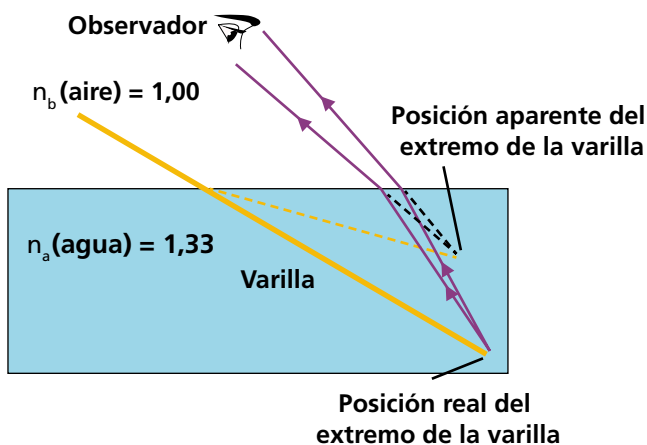
**Fig. 1.10** Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales, y el de refracción es diferente al de incidencia. También los tres rayos están en el mismo plano

Las leyes de la refracción y de la reflexión de la luz nos permiten explicar el funcionamiento de muchos dispositivos ópticos y de fenómenos que nos son familiares, por ejemplo, seguro recuerdas (de noveno grado) que una regla o varilla sumergida parcialmente en el agua parece estar doblada (figura 1.11).



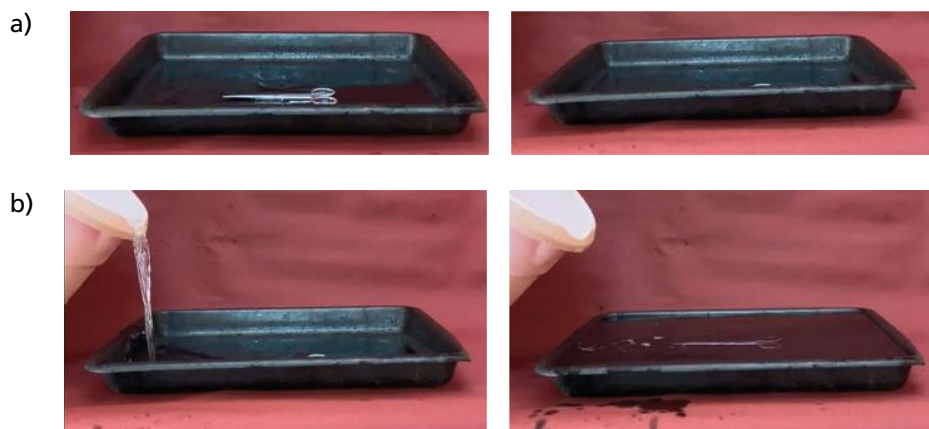
**Fig. 1.11** ¿Está realmente doblada la vara para limpiar la piscina?

En este caso lo que sucede es que la luz que proviene de la parte sumergida se desvía, alejándose de la normal, al pasar del agua al aire y entonces parece que la parte sumergida de la varilla está a menos profundidad (figura 1.12).



**Fig. 1.12** Esquema que permite apreciar cómo se produce el efecto de que la parte sumergida de la varilla está aparentemente a menos profundidad

Este mismo efecto permite explicar, por ejemplo, por qué sí podemos ver una tijera sumergida en el agua desde cierta distancia, y si se extrae el agua del recipiente ya no resulta visible, aunque estemos observando desde la misma posición (figura 1.13).

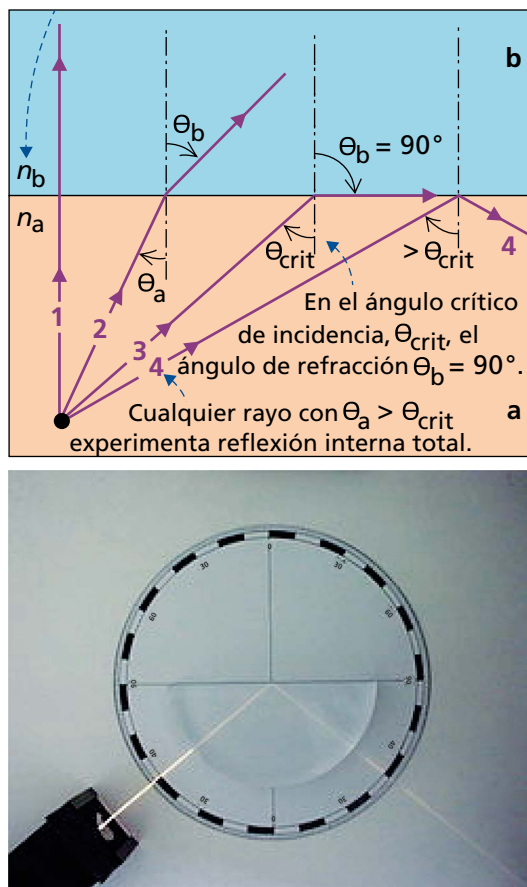


**Fig. 1.13** Fotos a y b tomadas desde la misma posición, la única diferencia es que en la foto b, al añadir agua a la cubeta, la tijera se hace visible

*Sugerencia:* puede que este sea un buen momento para que revise lo que estudiaste en noveno grado sobre los fenómenos ópticos, por ejemplo, la formación de imágenes en espejos y lentes, el funcionamiento de un microscopio y de un telescopio y el mecanismo de la visión.

Examinaremos ahora con más detalle el importante fenómeno de la **reflexión total interna**.

Sabemos que cuando la luz se propaga de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor índice de refracción, el rayo refractado se desvía alejándose de la normal (figura 1.14 a), pero a partir de cierto valor del ángulo de incidencia, llamado ángulo crítico, el rayo se desvía de manera rasante a la superficie de separación y para valores mayores ocurre la reflexión total interna, es decir, el rayo incidente solo se refleja (figura 1.14).



**Fig. 1.14** Ejemplos de propagación de la luz: a) representación de valores del ángulo de incidencia mayores que el ángulo crítico; b) foto del fenómeno de la reflexión total interna cuando la luz pasa del vidrio al aire

Esta situación se describe bien por la ecuación 1.3:

$$\frac{\text{sen}\theta_A}{\text{sen}\theta_B} = \frac{n_B}{n_A}$$

Si despejamos el seno del ángulo de refracción obtenemos que:

$$\text{sen}\theta_B = \frac{n_A}{n_B} \text{sen}\theta_A$$

Como  $n_A/n_B$  es mayor que la unidad, debe existir algún valor de  $\theta_A$  menor de  $90^\circ$  que haga  $\text{sen}\theta_B = 1$  y en consecuencia  $\theta_B = 90^\circ$ .

Como para  $\theta_B = 90^\circ$ , se tiene que  $\text{sen}\theta_B = 1$ , entonces el ángulo crítico estará dado por:

$$\text{sen}\theta_{\text{crítico}} = \frac{n_B}{n_A} \quad (1.4)$$

Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico, el seno del ángulo de refracción, de acuerdo con la ley de Snell, sería mayor que la unidad, cosa que no es posible. En esta situación no hay rayo refractado. Un análisis más profundo sobre la base de las leyes de los mecanismos relacionados con la absorción y emisión de la luz por la sustancia está en concordancia con estos hechos experimentales.

## Aplicaciones

Algunas aplicaciones de la reflexión total

- Una aplicación interesante de reflexión interna total es el uso de varillas de vidrio o plástico transparente para "transportar" luz de un lugar a otro. Como se indica en la figura 1.15, la luz es confinada a moverse dentro de una varilla, como resultado de reflexiones internas totales sucesivas, el tubo flexible de luz se denomina *fibra óptica*.

Los dispositivos de fibras ópticas son particularmente útiles para ver objetos en lugares inaccesibles. Por ejemplo, los médicos a veces usan estos dispositivos para examinar órganos internos del cuerpo o para realizar cirugía sin necesidad de grandes incisiones (figura 1.16). En la actualidad los cables de fibra óptica sustituyen a los alambres de cobre.

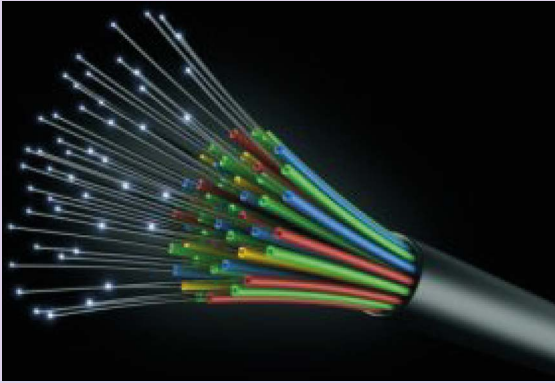


Fig. 1.15

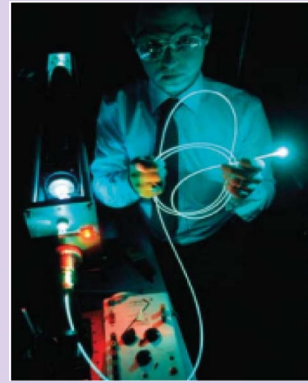


Fig. 1.16

- *Prisma de Porro*: un prisma de Porro (figura 1.17) es un prisma reflectivo usado en ciertos dispositivos ópticos para modificar la posición de la imagen. Se suelen usar en pares, formando un prisma Porro doble. Su nombre se debe a su inventor, el ingeniero y óptico italiano Ignacio Porro. El prisma Porro básico es una pieza de vidrio de base triangular isósceles con un ángulo de  $90^\circ$ .
- *Binoculares prismáticos*: los binoculares prismáticos (figura 1.18) funcionan mediante la utilización de lentes y prismas para ampliar la imagen de un objeto distante. Los prismas (de Porro) corrigen la imagen invertida y reducen la longitud del cuerpo del binocular, mientras las lentes objetivas y oculares amplían la imagen del objeto.

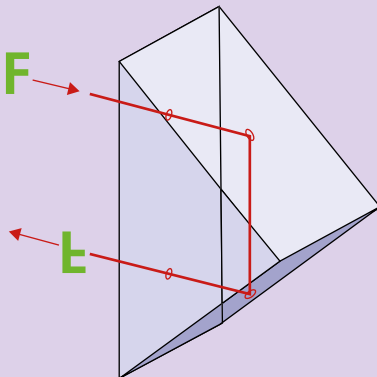


Fig. 1.17

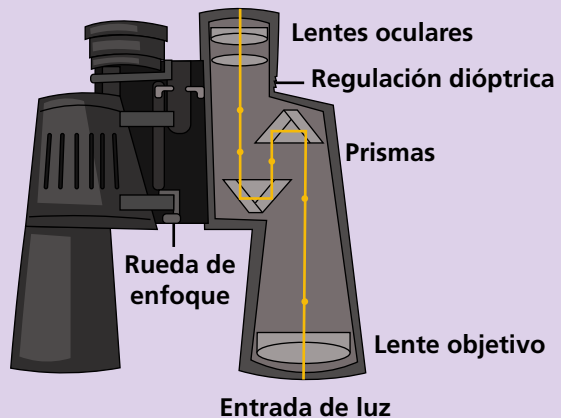


Fig. 1.18

## Problema resuelto 2

Un rayo de luz que se propaga en el aire (supón  $n = 1$ ) incide sobre una superficie plana de vidrio con índice de refracción  $n = \frac{3}{2}$  formando un ángulo de  $60^\circ$  con la normal. Determina:

- El ángulo de refracción de este rayo.
- La velocidad de la luz en el vidrio.

*Solución:*

En este caso, la luz pasa de un medio menos refringente (el aire) a uno más refringente (vidrio), en consecuencia, cambia el valor de su velocidad y el haz se desvía de su dirección inicial de propagación, acercándose a la normal.

- El valor del ángulo de refracción se puede calcular, dados los datos del problema, a partir de la ecuación de la ley de refracción:

$$\frac{\text{sen}\theta_A}{\text{sen}\theta_B} = \frac{n_B}{n_A}$$

Si el medio A es el aire, para  $\text{sen}\theta_B$  se tendrá que:

$$\text{sen}\theta_B = \frac{\text{sen}\theta_A}{n_B}$$

$$\theta_B = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen}\theta_A}{n_B}\right)$$

$$\theta_B = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen } 60^\circ}{\frac{3}{2}}\right)$$

$$\theta_B = \text{sen}^{-1}\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{3}{2}}$$

$$\theta_B = 35,2^\circ$$

- La velocidad de la luz en el vidrio se puede determinar a partir de la relación:

$$n = \frac{c}{v}$$

De donde se obtiene que:

$$v = \frac{c}{n}$$

$$v = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{\frac{3}{2}}$$

$$v = 2,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

## Comprueba tus conocimientos

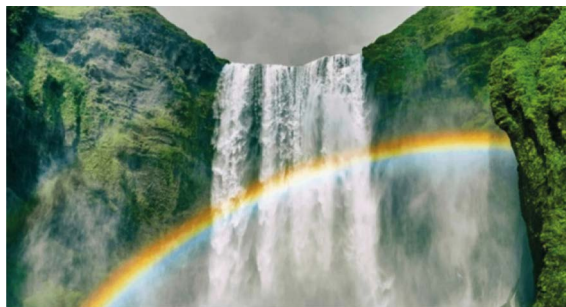
4. ¿Cuál es el significado físico del índice de refracción de la luz?
5. Enuncia las leyes de la reflexión y refracción de la luz.
6. Deduce las leyes de la reflexión y refracción de la luz a partir del principio de Huygens-Fresnel. A estos efectos, consulta el capítulo 6 del texto *Física décimo grado*.
7. Analiza en la tabla 1.1
  - a) ¿En cuál de los medios la luz se propaga más lentamente y en cual con mayor rapidez?
  - b) ¿En cuál de los medios la luz se desvía más?
8. Si un haz de luz pasa del aire al agua, ¿Qué le sucede a la dirección del rayo de luz refractado? Construye un esquema que represente aproximadamente el fenómeno. Considera que el ángulo de incidencia es de  $30^\circ$ .
9. Si un cazador submarino desde la orilla descubre un pez cuya imagen ve en el agua, ¿qué debe hacer para disparar y acertar en el blanco, apuntar encima o debajo de la imagen del pez? Para explicar auxíliate de un esquema.

## 1.4 Dispersión de la luz

Un fenómeno similar al arcoíris se observa también en las cascadas y saltos de agua (figura 1.19), también en las proximidades de los aspersores de los regadíos utilizados en zonas agrícolas o en los jardines. Esto ocurre principalmente donde el agua se encuentra casi



pulverizada en forma de gotas muy pequeñas. ¿Cuál es la causa de estos fenómenos?

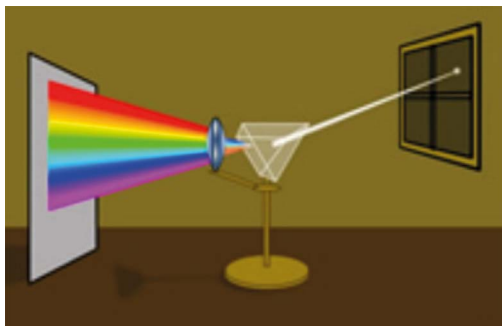


**Fig. 1.19** Arcoíris en una cascada

Los fenómenos de la reflexión y de la refracción no nos permiten por sí solos dar una explicación directa a este tipo de fenómeno, se requiere además tener en cuenta un descubrimiento, realizado por Newton, que establece la relación existente entre el índice de refracción y el color de la luz: la dispersión de la luz.

En sus trabajos para perfeccionar el telescopio, Newton observó que los contornos de las imágenes de los objetos visualizados eran muy coloreados. Investigó las diferencias entre los rayos luminosos de distintos colores y su relación con la luz blanca, fenómeno que hasta ese momento no se conocía.

El experimento realizado por Newton fue genialmente sencillo: hizo incidir sobre un prisma, un haz de luz solar de pequeña sección transversal, en una habitación en penumbra, procedente de un orificio en una ventana, la luz se refractó y se proyectó sobre la pared formando una imagen constituida por una gama de colores diferentes (figura 1.20).

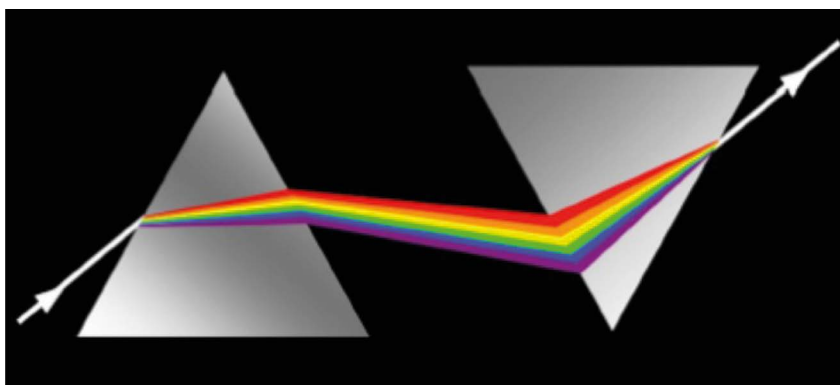


**Fig. 1.20** Recreación del experimento de Newton sobre la dispersión de la luz por un prisma

Newton detectó siete colores en el haz de luz dispersada, los cuales se distribuyen según el orden siguiente: violeta, azul, azul claro, verde, amarillo, naranja y rojo. A esta gama de colores Newton la denominó espectro. La distribución de los colores del espectro de la luz blanca se corresponde con la del arcoíris.

Al bloquear el orificio con un vidrio rojo, Newton observó en la pared solamente una mancha roja. Al colocar uno azul observó una mancha azul, los resultados con otros vidrios coloreados, también mostraron que la luz al emerger del prisma tiene el mismo color que la que incidió en él. Concluyó que el prisma no coloreaba la luz blanca como se suponía en ese momento, sino que el prisma descompone la luz blanca en los diferentes colores.

Si la luz dispersada por un prisma se hace pasar a través de un segundo prisma que esta rotado  $180^\circ$  con respecto al primero, los haces del espectro se reúnen y se obtiene de nuevo luz blanca (figura 1.21).



**Fig. 1.21**

Separando cualquier color componente del espectro, por ejemplo, el verde, y obligándolo a pasar a través de otro prisma, no se obtendrá una nueva descomposición de ese color.

Otra conclusión importante a la cual llegó Newton fue formulada por él en su tratado de óptica de la forma siguiente: las sustancias transparentes tienen diferentes índices de refracción para diferentes colores, en particular, los rayos luminosos que más se desvían al refractarse en una sustancia son los de color violeta y los que menos se desvían los de color rojo.

La luz blanca ordinaria es una superposición de ondas con frecuencias que se extienden a través de todo el espectro visible. La rapidez de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, pero la rapidez en

una sustancia es diferente para distintas longitudes de onda. En consecuencia, el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda.

La dependencia de la rapidez de onda y del índice de refracción de los medios transparentes con respecto a la longitud de onda se denomina **dispersión**.

El arcoíris (o arco iris) es un fenómeno óptico y meteorológico que causa la aparición en la atmósfera terrestre de un arco multicolor, por la descomposición de la luz solar. Se produce por refracción, cuando la luz atraviesa las gotas de agua. Está formado por arcos concéntricos de colores, sin solución de continuidad entre ellos, con el rojo hacia la parte exterior y el violeta hacia el interior. A una altitud suficiente, por ejemplo, cuando se viaja en un avión, se puede observar que la forma del arcoíris se aproxima a la de una circunferencia, y por ello se le llama arcoíris circular (figura 1.22).<sup>1</sup>



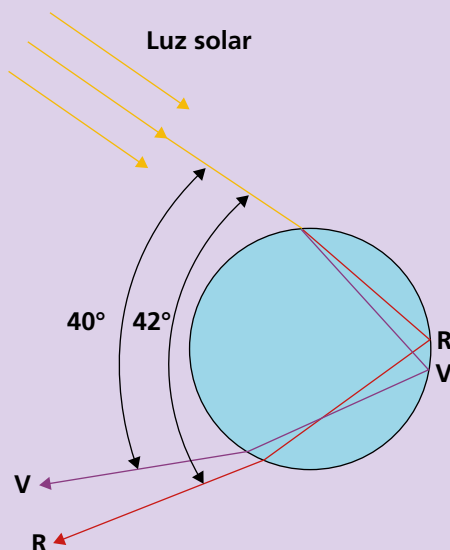
**Fig. 1.22** Arcoíris circular

### Saber más

La dispersión de luz en un espectro se comprueba en la naturaleza con la formación de un arcoíris, el cual es visto frecuentemente por un observador que está situado entre el Sol y una zona con lluvia. Para comprender cómo se forma, considera la figura 1.23. Un rayo de luz del sol (luz blanca) incide

<sup>1</sup> Para más información sobre este hermoso fenómeno puedes consultar EcuRed ([https://: www.ecured.cu/Arco%C3%aDris](https://www.ecured.cu/Arco%C3%aDris))

por arriba en una gota de agua en la atmósfera y es refractado y reflejado de la siguiente manera: primero es refractado en la superficie frontal de la gota, ahí la luz violeta tiene la mayor desviación y la luz roja la menor. En la superficie posterior de la gota la luz se refleja y regresa a la superficie frontal, en la que otra vez se somete a refracción cuando pasa del agua al aire. Los rayos dejan la gota tal que el ángulo entre la luz blanca incidente y el más intenso rayo violeta de retorno es de  $40^\circ$  y el ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo rojo más intenso de retorno es de  $42^\circ$ . Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de retorno hace posible que se vea un arco de colores.



**Fig. 1.23** Trayectoria de luz solar a través de una gota esférica de lluvia. La luz que sigue esta trayectoria contribuye al arcoíris visible

## Comprueba tus conocimientos

10. ¿Qué relación existe entre el índice de refracción y el color de la luz?
11. El índice de refracción absoluto del vidrio para cierto color rojo es  $n_r = 1,525$  y para cierto tono de verde es  $n_v = 1,534$ . ¿Cuál de los dos colores se desvía más de la línea de propagación inicial al refractarse?
12. Representa en tu libreta la trayectoria aproximada de un haz de luz rojo y otro azul, al pasar del aire al agua cuando inciden en la superficie de separación con un cierto ángulo  $\alpha$ .

13. Observa la figura 1.20, y di cuál es el color del rayo de mayor velocidad dentro del prisma y para cuál el prisma posee mayor índice de refracción.
14. Si interponemos un filtro amarillo (vidrio de color amarillo) en la zona por donde llega la luz blanca al prisma, ¿qué le sucede al espectro?
15. En una libreta se ha escrito con un lápiz rojo la palabra “excelente”. Se tienen dos vidrios, uno de color verde y otro rojo. ¿A través de qué vidrio se debe mirar para ver la palabra “excelente”?
16. Explica cómo se produce el arcoíris.

## 1.5 Interferencia de la luz. Experimento de Young

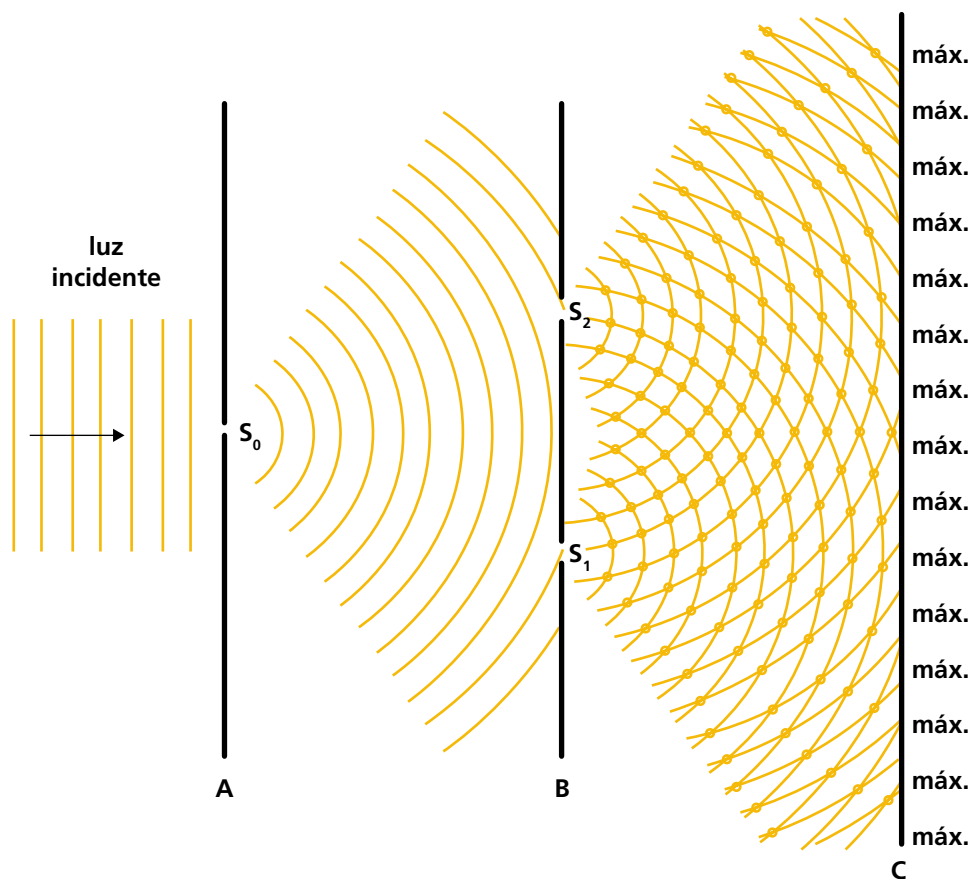
Recordemos que cuando dos o más ondas coinciden en un punto, el desplazamiento resultante es igual a la suma de los desplazamientos instantáneos de cada una de las ondas, y que estas continúan propagándose sin sufrir ninguna alteración (en esto consiste el principio de superposición de las ondas).

En décimo grado estudiamos que el fenómeno de la interferencia ocurre cuando dos o más ondas mecánicas se superponen dando lugar a un patrón estable. En oncenso grado profundizamos en el hecho de que este fenómeno también ocurre con las ondas electromagnéticas.

Recordemos también que cuando la amplitud resultante es mayor que la de las ondas individuales se dice que la interferencia es constructiva o por refuerzo, y cuando es menor que es destructiva o por atenuación. Que la interferencia sea por refuerzo o atenuación depende de la relación entre las fases de las ondas al superponerse, si las ondas llegan al punto de encuentro en fase ocurrirá el refuerzo y si llegan en oposición de fase ocurrirá su atenuación o incluso anulación cuando las amplitudes son iguales.

Otro hecho importante es que para que ocurra la interferencia las ondas deben ser coherentes, es decir que la relación entre sus fases permanezca constante en el tiempo. Es por esta razón, por ejemplo, que al superponerse la luz procedente de dos o más lámparas incandescentes lo que se observa es un aumento de la intensidad de la luz y no un efecto de interferencia.

Tomas Young realizó por primera vez, en 1801, un experimento de interferencia de la luz que proporcionó una prueba concluyente de la naturaleza ondulatoria de la luz. En esencia, Young logró una fuente de luz coherente al hacer pasar la luz del Sol por un orificio angosto, que se comportaba como un foco emisor de ondas, que después se dividía en dos focos de luz coherentes al pasar por otras dos aberturas. La luz procedente de estos dos focos incidía sobre una pantalla dando lugar a un patrón de interferencia (figura 1.24).



**Fig. 1.24** Esquema del patrón de interferencia por doble abertura

En el experimento de Young el patrón que se obtiene es multicolor, más complejo que el representado en la figura, pues los máximos de interferencia correspondientes a cada longitud de onda se localizan en diferentes posiciones, como veremos más adelante.

## & De la historia

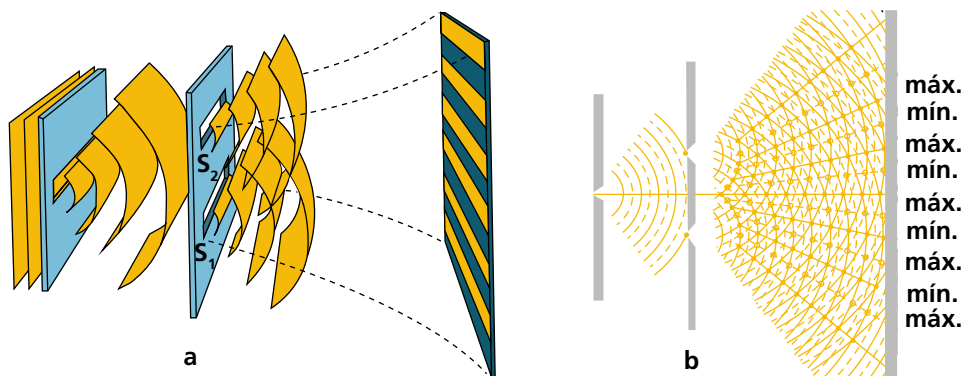
Thomas Young (figura 1.25) nace el 13 de junio de 1773, en Milverton, y muere el 10 de mayo de 1829, en Londres; científico y lingüista inglés, célebre por su experimento de la doble ranura, que mostraba la naturaleza ondulatoria de la luz, por descubrir el astigmatismo ocular y por haber ayudado a descifrar los jeroglíficos egipcios a partir de la piedra Rosetta.



**Fig. 1.25**

Hoy día hay muchas variantes del experimento de Young (incluso utilizando láseres) y es frecuente utilizar rendijas estrechas en lugar de orificios pequeños para así permitir el paso de una mayor cantidad de luz, pero en esencia la idea de este hermoso experimento, dada su importancia y trascendencia, permanece inalterable.

Analicemos ahora las características del resultado de un experimento de Young utilizando rendijas estrechas que se iluminan con un haz de luz monocromático y plano (figura 1.26).



**Fig. 1.26** Esquema del resultado del experimento de Young: a) vista tridimensional; b) vista en el plano

En este experimento la distancia  $L$  desde los focos  $S_1$  y  $S_2$  hasta la pantalla es mucho mayor que la distancia  $d$  que separa a las ranuras y en consecuencia el ángulo que forman los segmentos  $S_1P$  y  $S_2P$ , donde  $P$  es un punto cualquiera sobre la pantalla, es aproximadamente igual al ángulo  $\theta$  (figura 1.27).

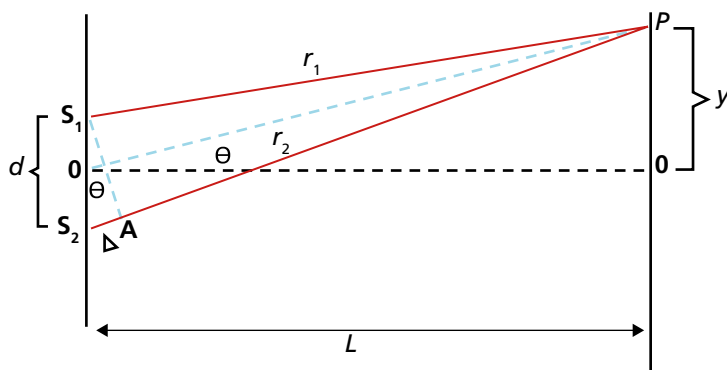


Fig. 1.27

En estas condiciones la diferencia de marcha (camino) que recorren las ondas hasta el punto  $P$  de la pantalla será:  $\Delta = |r_1 - r_2| = S_2A$ , donde el punto  $A$  es el pie de la perpendicular a  $S_2P$  que pasa por  $S_1$ .

La diferencia de marcha ( $\Delta$ ), se corresponde con el cateto opuesto del ángulo  $\theta$  en el triángulo  $S_1AS_2$ , por tanto:

$$\Delta = d \operatorname{sen} \theta, \quad (1.5)$$

donde  $d$ , que es la hipotenusa del triángulo y coincide con la distancia entre los orificios.

Para que ocurra un máximo de interferencia las ondas deberán llegar en fase, por lo que la diferencia de marcha debe ser igual a un número entero de longitudes de onda. Por lo tanto, para los máximos de interferencia deberá cumplirse que:

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (1.6)$$

donde  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Sustituyendo 1.5 en 1.6 se obtiene que:

$$d \operatorname{sen} \theta = \pm k\lambda \quad (1.7)$$

Por lo tanto:

$$\operatorname{sen} \theta = \pm \frac{k\lambda}{d} \quad (1.8)$$

$$\theta = \pm \operatorname{sen}^{-1} \frac{k\lambda}{d} \quad (1.9)$$

Esta expresión nos permite calcular la posición angular de los máximos en la pantalla. Para el centro de la pantalla  $O$ , corresponde el máximo central  $k = 0$ , los valores positivos a la parte superior y los negativos a la parte



inferior (en correspondencia con que los ángulos medidos en sentido anti-horario se consideran positivos y en sentido horario negativos).

Además, para aquellos casos en los cuales la desviación angular es pequeña (hasta tres grados aproximadamente), se puede considerar que el  $\text{sen } \theta = \tan \theta$  (también aproximadamente igual a  $\theta$  si se mide en radianes), y en consecuencia:

$$\text{sen } \theta = \tan \theta = \frac{y}{L} \quad (1.10)$$

Sustituyendo el valor de  $\text{sen } \theta$  dado por 1.8 en 1.7 y despejando se tendrá que la posición lineal de los máximos de interferencia sobre el eje de coordenadas estará dada por:

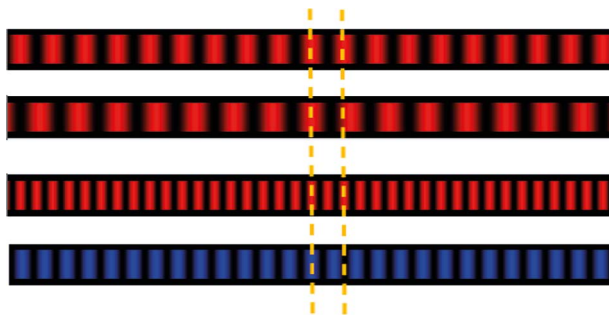
$$y = \frac{k\lambda L}{d} \quad (1.11)$$

La posición de los mínimos de interferencia (zonas oscuras) quedará determinada por los puntos donde las ondas se superpongan en oposición de fase, lo que ocurre cuando la diferencia de marcha entre ellas sea de un número impar de medias longitudes de onda. De manera que la posición angular de los mínimos de interferencia estará dada por la condición (demuéstralo):

$$d \text{ sen } \theta = \pm \frac{(2k+1)\lambda}{2} \quad (1.12)$$

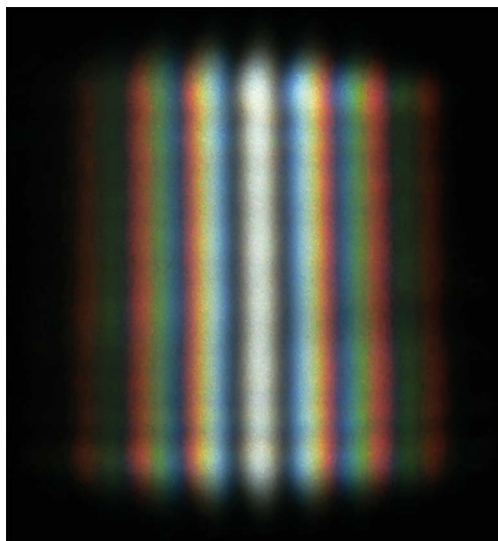
Donde  $k$  es 0, 1, 2, 3 ...

De acuerdo con la ecuación 1.11 debe esperarse que si la distancia entre las aberturas  $d$  disminuye aumentará la distancia entre las bandas brillantes, es decir, el patrón se expande; si se disminuye la distancia a la pantalla, el patrón se contrae y si la longitud de onda aumenta el patrón se expande (figura 1.28).



**Fig. 1.28** De arriba hacia abajo, la distancia  $d$  entre las aberturas para cada patrón es de 0,005 mm; 0,004 mm; 0,006 mm y 0,005 mm. En todos los casos la distancia a la pantalla es de 1,0 m

El corrimiento del patrón para diferentes longitudes de onda explica el hecho de que si se emplea luz blanca lo que se observa es un patrón con bandas de diferentes colores (figura 1.29).



**Fig. 1.29** Patrón del experimento de Young con luz blanca

### ¡Cuidado!

La ecuación 1.11 solo es válida para ángulos pequeños. Puede usarse si la distancia entre las ranuras y la pantalla es mucho mayor que la separación entre las ranuras y si es mucho más grande que la distancia desde el centro del patrón de interferencia a la *n*-ésima franja brillante.

Aunque hemos descrito el experimento realizado por Young con luz visible, sabemos que los resultados obtenidos son válidos para cualquier tipo de onda, siempre y cuando la onda resultante de las dos fuentes coherentes se detecte en un punto que esté muy alejado en comparación con la separación entre las aberturas.

### Problema resuelto 3

En un experimento de interferencia con dos ranuras, estas se encuentran separadas por una distancia de 0,200 mm, y la pantalla está a una distancia de 1,00 m. Se observa que la tercera franja brillante (sin contar la franja brillante central frente a las ranuras) está desplazada 9,49 mm de la franja central (figura 1.30). Calcula la longitud de onda de la luz utilizada.

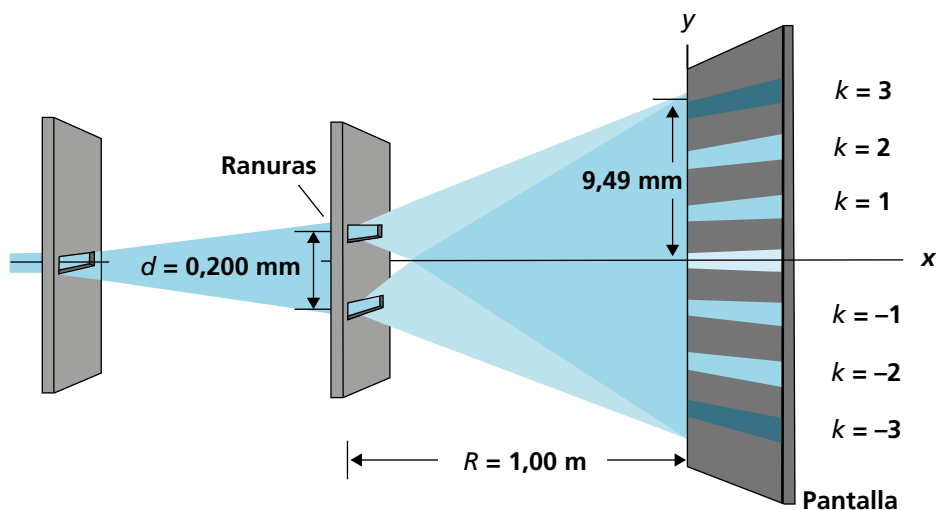


Fig. 1.30

*Solución:*

La longitud de onda se puede calcular directamente, a partir de los datos del problema, despejando la longitud de onda en la ecuación 1.11:

$$y = \frac{k\lambda L}{d}$$

Despejando  $\lambda$  se obtiene que:

$$\lambda = \frac{yd}{kL}$$

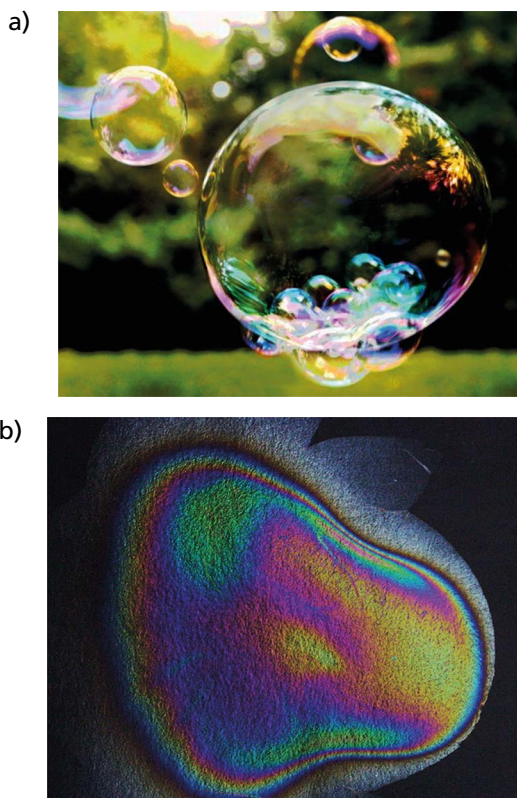
Sustituyendo por los valores numéricos se tendrá que  $\lambda = 633 \text{ nm}$

## Comprueba tus conocimientos

17. ¿En qué consiste el fenómeno de interferencia de la luz?
18. ¿Por qué la luz proveniente de dos lámparas domésticas no da lugar a un patrón de interferencia?
19. ¿Cuál es la condición para que se produzca un máximo por interferencia? ¿Y para que se produzca un mínimo?
20. Explica en qué consiste el experimento de Young.
21. ¿Cuál es la ecuación que nos permite calcular la posición de los máximos en el experimento de Young?

## 1.6 Interferencia de la luz en láminas delgadas

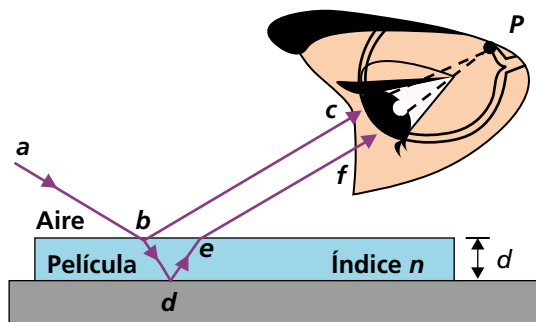
Las bandas brillantes de colores que se observan en las pompas de jabón (figura 1.31 a), o en una capa delgada de aceite sobre el agua (figura 1.31 b) o las losas del piso, no son el resultado de un fenómeno de dispersión (como el caso del arcoíris), sino de un fenómeno de interferencia de la luz.



**Fig. 1.31**

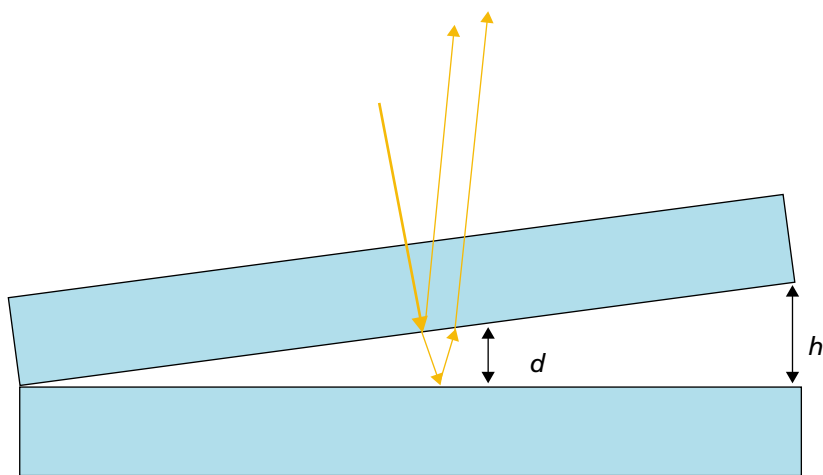
Sucede que las ondas luminosas que se reflejan en las superficies anterior y posterior de una fina película transparente son coherentes y se produce interferencia constructiva o destructiva entre estas dos ondas reflejadas (según se superpongan en fase o en oposición de fase) en diferentes lugares para distintas longitudes de onda. La figura 1.32 ilustra esta situación: la luz que ilumina la superficie superior de una película delgada con espesor  $d$  refleja parcialmente en esa superficie (trayectoria  $abc$ ) y la luz transmitida a través de la superficie superior se refleja parcialmente en la superficie inferior (trayectoria  $abdef$ ). Las dos ondas reflejadas

llegan juntas al punto  $P$  en la retina del ojo. En función de la relación de fase, interferirán en forma constructiva o destructiva. Diferentes colores tienen distintas longitudes de onda, por lo que la interferencia puede ser constructiva para unos colores y destructiva para otros. Por esa razón se observan zonas de variados colores como los mostrados en la figura 1.31. Las formas complejas de estos patrones es el resultado de las variaciones en el espesor de la película delgada.



**Fig. 1.32**

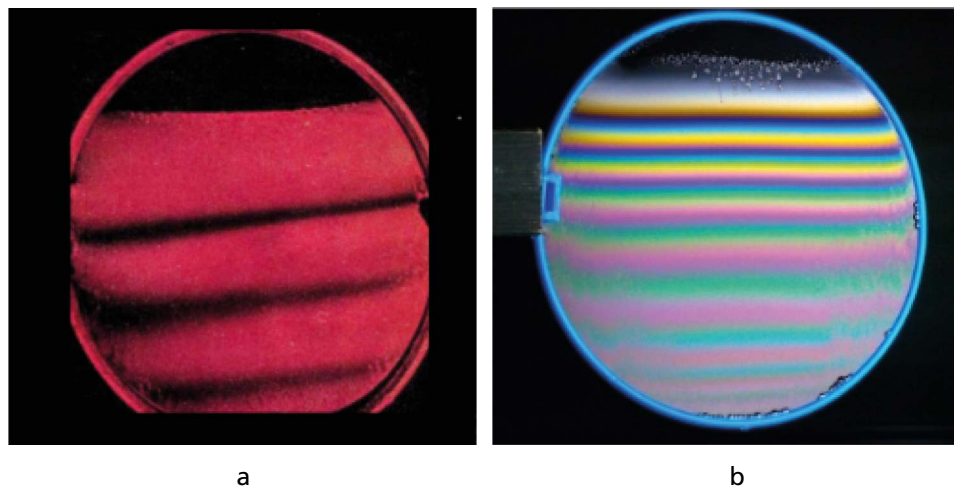
Un caso particularmente sencillo de este tipo de interferencia ocurre cuando la lámina tiene forma de cuña y la luz incide casi normalmente sobre las superficies, por ejemplo, este es el caso de la cuña de aire que se forma entre dos placas de vidrio casi paralelas (figura 1.33).



**Fig. 1.33** El valor de  $h$  es del orden de las décimas de milímetro; en general, las proporciones de la figura están muy exageradas

La situación es la misma que la de la figura 1.32, excepto que el espesor de la película (cuña) no es uniforme. La diferencia de trayectoria entre las dos ondas es prácticamente el doble del espesor  $d$  de la cuña de aire en cada punto. En los puntos en que  $2d$  es un número entero de longitudes de onda, esperamos que haya interferencia constructiva y una zona brillante; ahí donde hay un valor equivalente a la mitad de un número entero de longitudes de onda, es de esperar que la interferencia sea destructiva y que haya un área oscura. A lo largo de la línea en la que las placas están en contacto, prácticamente no hay diferencia en las trayectorias, por lo que se espera una región brillante, pero cuando se hace un experimento de este tipo lo que se observa es una franja oscura, esto se debe a que cuando se produce la reflexión en la parte inferior, donde el índice de refracción del segundo medio es mayor que en el primero, ocurre un cambio de fase en la onda reflejada de  $\pi$  (la explicación está fuera del alcance de este libro, pero es similar a lo que sucede cuando una onda en una cuerda se refleja en un extremo fijo)

En este caso, la sucesión de los máximos y los mínimos forma una figura como la que se muestra en la figura 1.34 a, en la que aparece la fotografía de una película jabonosa iluminada con luz roja. La película, al ir escurriéndose, resulta más gruesa en la parte inferior que en la superior. Si la película jabonosa se ilumina con luz blanca, se obtiene un patrón como el mostrado en la figura 1.34 b.



**Fig. 1.34**

En este caso es relativamente sencillo encontrar la relación que nos permita calcular la posición de los máximos y mínimos de interferencia. Para esto bastaría con determinar cuántas longitudes de onda caben en la distancia  $2d$  y tener en cuenta el cambio de fase de la onda reflejada en la parte inferior para así saber si están en fase o en oposición de fase al superponerse, pero hay que tener en cuenta que el valor de la longitud de onda en una sustancia no es igual a su valor en el vacío pues, como sabemos, el valor de la velocidad de la luz cambia al cambiar el índice de refracción de acuerdo con la relación:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

Por lo tanto, el número de longitudes de onda que caben en la distancia  $2d$  de la sustancia será:

$$\frac{2d}{\frac{\lambda}{n}} = \frac{2dn}{\lambda}$$

De manera que para que exista un máximo debe cumplirse que:

$$\frac{2dn - \lambda}{2} = k\lambda$$

Donde se ha restado  $\lambda / 2$  a  $2 dn$ , teniendo en cuenta que la diferencia de fase en  $\pi$  equivale a una diferencia de marcha en  $\lambda / 2$ .

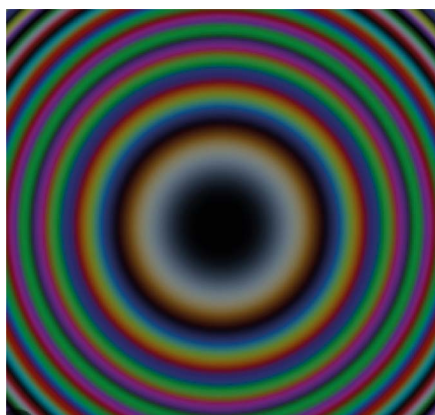
Por lo tanto, para la posición de los máximos deberá cumplirse que:

$$2dn = k \left( 1 + \frac{\lambda}{2} \right) \quad (1.13)$$

De manera análoga, se puede deducir que para los mínimos debe cumplirse la condición:

$$2 dn = k\lambda \quad (1.14)$$

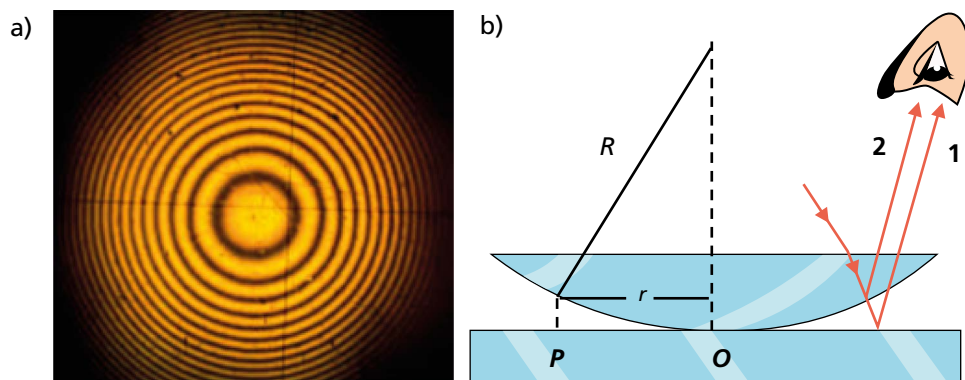
Un caso interesante de interferencia en láminas delgadas es el del patrón de interferencia que se origina debido a una capa intermedia de aire entre una lente plana convexa de gran radio de curvatura sobre una lámina de vidrio. Este patrón de interferencia adopta la forma de anillos concéntricos coloreados que se denominan *anillos de Newton* (figura 1.35).



**Fig. 1.35** Anillos de Newton

En esta situación, la película de aire entre las superficies de vidrio varía en grosor desde cero en el punto  $O$  de contacto hasta un valor  $h$  en el punto  $P$ . Si el radio de curvatura  $R$  de la lente es mucho menor que la distancia  $r$ , y el sistema se observa desde arriba se puede visualizar una configuración de anillos brillantes y oscuros al ser iluminado el sistema con luz monocromática (figura 1.36 a).

El efecto de interferencia se debe a la combinación del rayo 1, reflejado desde la placa plana, con el 2, reflejado desde la superficie curva de la lente. El rayo 1 experimentó un cambio de fase de  $180^\circ$  al reflejarse, mientras que el rayo 2 no pasa por cambio de fase (figura 1.36 b).



**Fig. 1.36** Anillos de Newton: a) con luz monocromática; b) esquema del proceso de formación de los anillos

Las condiciones para que se produzcan las interferencias por reforzamiento y atenuación se conocen por las ecuaciones 1.13 y 1.14, con  $n = 1$  porque la



película es de aire. El punto de contacto en  $O$  es oscuro porque no hay diferencia de trayectoria y el cambio total de fase es de  $180^\circ$  por reflexión

Si en estas condiciones se conoce el radio de curvatura  $R$  de la lente, entonces se puede calcular a que distancia  $r$  del punto de contacto de la lente con la lámina de vidrio se produce una diferencia de marcha tal que las ondas de determinadas longitudes se anulen entre sí. Estas distancias son los radios de los anillos oscuros de Newton. Cada zona de espesor constante de la capa intermedia de aire constituye una circunferencia. Determine-mos la relación que existe entre el radio de orden  $k$  del anillo oscuro  $r_k$  y el espesor de la capa intermedia de aire  $h_k$ . Según el teorema de Pitágoras:

$$R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2$$

$$R^2 = r_k^2 + R^2 - 2Rh_k + h_k^2$$

$$2Rh_k = r_k^2 + h_k^2$$

Como  $h_k$  es un número muy pequeño por ser muy delgada la cuña y estar elevado al cuadrado se puede no tomar en consideración en comparación con  $r_k^2$ . Con esta aproximación se tendrá que:

$$h_k = \frac{r_k^2}{2R}$$

La onda 1 recorre una distancia  $2h_k$  mayor que la onda 2 por causa de la inversión de fase al reflejarse, igual a  $\pi$  rad, la diferencia de marcha se incrementó en media longitud de onda. La condición para que se produzca un mínimo será:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = 2h_k$$

$$2h_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$2h_k = k\lambda$$

Por otra parte:

$$h_k = \frac{r_k^2}{2R}$$

Por lo tanto:

$$2 \cdot \frac{r_k^2}{2R} = k\lambda$$

$$r_k^2 = kR\lambda$$

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}$$

(1.15)

De la ecuación 1.15 se infiere que, midiendo el radio de uno de los anillos, conocido su número de orden y el radio de curvatura de la lente, se puede determinar la longitud de onda de la luz incidente.

Para la luz roja las mediciones reportan  $\lambda_R = 800 \text{ nm}$  y para la luz violeta  $\lambda_V = 400 \text{ nm}$ . Las longitudes de onda que corresponden a los restantes colores del espectro visible están comprendidas dentro de este intervalo.

En la tabla 1.2 de los Anexos se muestran los rangos aproximados de longitudes de onda para las distintas tonalidades de los colores del espectro.

## Aplicaciones

La interferencia de película delgada (lámina delgada) tiene diversas aplicaciones en ciencia y tecnología, incluyendo:

- Recubrimientos antirreflectantes: se utilizan películas delgadas para reducir reflejos en superficies como lentes de gafas, lentes de cámaras o paneles solares. Controlando cuidadosamente el grosor y el índice de refracción del recubrimiento, se puede lograr interferencia destructiva, minimizando la cantidad de luz reflejada y mejorando la transmisión de luz a través de la superficie.
- Recubrimientos reflectantes: las películas delgadas también se pueden usar para crear recubrimientos altamente reflectantes para espejos u otras superficies maximizando la interferencia constructiva. Estos recubrimientos se utilizan en dispositivos ópticos, como telescopios y láseres.
- Filtros de color: la interferencia de película delgada se puede usar para crear filtros de color que transmiten o reflejan selectivamente ciertas longitudes de onda de luz. Estos filtros se utilizan en diversas aplicaciones, como pantallas, sensores y recubrimientos decorativos.
- Fibra óptica: la interferencia de película delgada también se usa en dispositivos de fibra óptica, como multiplexores y multiplexores de división de longitud de onda, que dependen de las propiedades de interferencia de las películas delgadas para transmitir o reflejar selectivamente longitudes de onda específicas de luz.

## Problema resuelto 4

El diámetro del décimo anillo oscuro de Newton es de 0,5 cm cuando se observa con luz reflejada de una longitud de onda de 589 nm.

- a) Calcula el radio de curvatura de la lente plana convergente que está apoyada sobre la lámina de vidrio.

- b) Si el sistema se sumerge en agua, ¿cuál será el radio del décimo anillo oscuro de Newton?

*Solución:*

- a) Al incidir la luz normalmente (perpendicularmente) sobre el sistema lente-lámina de vidrio, se produce el fenómeno de la interferencia; esto se debe a que parte de la luz incidente se refleja en la superficie límite vidrio-aire y parte se refracta en esta a través de esta misma superficie. Este haz atraviesa la cuña de aire que existe entre la lente y la superficie plana y después se refleja en esta superficie, atraviesa la lente y se superpone al haz reflejado en la superficie lente-aire. La superposición de ambos haces, que son coherentes por provenir del haz incidente, provocará una interferencia que puede ser por atenuación o por reforzamiento. Puesto que en este caso el problema se refiere a los anillos oscuros, entonces la posición de ellos se obtiene mediante la expresión:

$$r_k = \sqrt{R\lambda k}$$

De donde:

$$r_k^2 = R\lambda k$$

$$R = \frac{r_k^2}{\lambda k}$$

$$R = \frac{(2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot 10}$$

$$R = 1,06 \text{ m}$$

- b) Si el dispositivo se sumerge en agua, los anillos cambian el valor de sus radios, ya que cambia la longitud de onda de la luz según la proporción  $\frac{\lambda}{n}$ , donde  $n$  es el índice de refracción del agua respecto al aire.

$$r_k = \sqrt{R\lambda k}$$

$$r_k = \sqrt{R \frac{\lambda}{n} k}$$

$$r_k = \sqrt{1,06 \text{ m} \cdot \frac{5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{1,33} \cdot 10}$$

$$r_k = 2,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

## Saber más

### Interferómetro de Michelson

Un interferómetro (figura 1.37) es un instrumento que se utiliza para medir longitudes o cambios de longitudes, con gran exactitud, por medio del análisis de las franjas de interferencia que en él se producen. El principio de funcionamiento del equipo diseñado por Michelson, en 1881, es el siguiente: una fuente de luz, emite un haz de luz monocromático, el cual al llegar al espejo semiplatedado  $M_0$ , situado formando un ángulo de  $45^\circ$  con la dirección del haz, se divide en dos haces. Uno por refracción atraviesa el espejo fijo  $M_0$  y marcha al espejo fijo  $M_1$ ; el otro obtenido por reflexión, marcha hacia el espejo móvil  $M_2$ .

Ambos haces se reflejan en los espejos  $M_1$  y  $M_2$ , y después de recorrer las distancias de ida y vuelta,  $L_1$  y  $L_2$ , llegan finalmente al telescopio. Las ondas luminosas que integran ambos haces son coherentes ya que provienen de un mismo foco, al superponerse provocan una banda de interferencia.

Si los recorridos ópticos de  $L_1$  y  $L_2$  son iguales la diferencia de marcha  $L_1 - L_2$  es nula; las ondas llegan en fase y se produce una zona iluminada por reforzamiento.

Si, por medio de un mecanismo especial, se desplaza el espejo  $M_0$  una distancia equivalente a  $1/4$  de la longitud de onda de la luz utilizada, entonces la diferencia de marcha  $|L_1 - L_2|$ , se incrementa en  $1/2 \lambda$  y la interferencia es por atenuación, produciéndose una zona oscura.

Al situar un indicador en la zona de interferencia se pueden medir con mucha exactitud los cambios en la longitud de la distancia  $L_2$ , al contar el número de franjas oscuras que pasan por el indicador al mover el espejo  $M_2$  una distancia  $D$ .

$$\Delta = |L_1 - L_2| = k\lambda$$

$$\Delta = 2D$$

$$2D = k\lambda$$

Michelson empleó su interferómetro en la medición de la longitud de onda de la luz roja procedente del vapor de cadmio. La longitud de onda calculada fue:  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

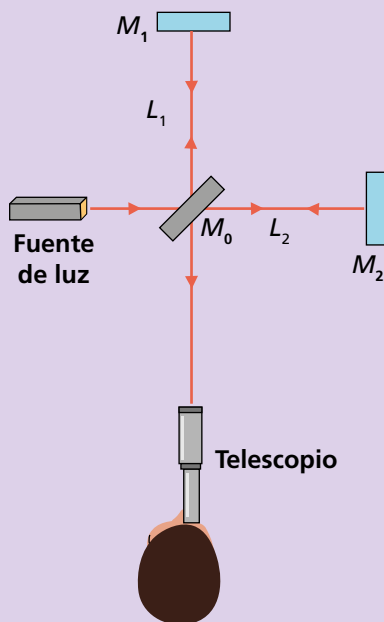


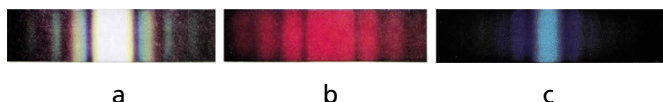
Fig. 1.37

## Comprueba tus conocimientos

22. Explica por qué pueden aparecer bandas coloreadas al reflejarse la luz sobre una pompa de jabón o sobre una película delgada de aceite en el agua.
23. ¿Cuáles son las fórmulas para calcular las posiciones de los máximos y mínimos de interferencia en una lámina delgada en forma de cuña cuando sobre ella incide normalmente un haz de luz monocromática?
24. ¿Por qué al observar por reflexión los anillos de Newton estos presentan un mínimo en su centro?
25. Cuáles son las fórmulas para calcular los radios de los anillos claros y oscuros en el experimento de los anillos de Newton.
26. ¿Se puede observar la interferencia de la luz en una lámina gruesa? Explica.

## 1.7 Difracción de la luz

Cuando se observa a través de una ranura larga y estrecha una fuente de luz blanca lejana, se percibe una zona central ancha, brillante y de color blanco, y a ambos lados zonas coloreadas (figura 1.38 a). Si después se coloca un filtro rojo delante de la ranura, a esta solo llega luz de ese color, y se ve una zona central brillante roja y regiones oscuras, alternadas por bandas de color rojo, menos intensas (figura 1.38 b). Si observamos las dimensiones del patrón, veremos que es mucho más ancho que la ranura, es decir, que la luz se comporta como si se desviara de la trayectoria rectilínea al pasar por la ranura. En la figura 1.38 c se puede observar el mismo patrón para la luz azul. Ese mismo es el comportamiento de las ondas mecánicas al pasar por un orificio pequeño, fenómeno que estudiaste en décimo grado y que recibe el nombre de difracción de las ondas. Este comportamiento de la luz refuerza aún más la idea del carácter ondulatorio de la luz, pues, como conocemos, la difracción es un fenómeno característico de los procesos ondulatorios.



**Fig. 1.38** Patrones de difracción por una abertura: a) con luz blanca; b) con luz roja; c) con luz azul

**La difracción de la luz es el fenómeno en el cual su dirección de propagación se curva al pasar por la vecindad de objetos.**

La distribución de iluminación que se obtiene como resultado de la difracción de la luz se denomina patrón de difracción.

La difracción de la luz no es tan fácil de observar como la de las ondas mecánicas, pues la longitud de las ondas luminosas es muy pequeña. Resulta apreciable, con luz visible, cuando un haz pasa a través de una abertura o incide sobre un obstáculo cuyas dimensiones son inferiores a las décimas de milímetro. También, se puede observar en los bordes de un objeto delgado, por ejemplo, de una cuchilla de afeitar.

También se pueden observar patrones de difracción cuando se observa la luz solar al pasar a través de una tela fina (por ejemplo, un pañuelo de seda) o cuando se mira a una fuente intensa de luz con los ojos entrecerrados.

El fenómeno de la difracción limita la aplicación de las leyes de la óptica geométrica. Por ejemplo, cuando estudiamos, en noveno grado, el concepto de rayo luminoso dijimos que se podía obtener experimentalmente la dirección de un rayo luminoso, limitando el paso de la luz con un obstáculo que posea una ranura pequeña. Esto es así hasta cierto límite, ya que para aberturas muy pequeñas la luz dejará de propagarse en forma rectilínea y se curvará al pasar por la ranura. Como el ancho de las ranuras que se utiliza en los experimentos de óptica geométrica, son, por lo general, mayores que las décimas de milímetros no se observa de manera apreciable el fenómeno de la difracción de la luz.

### Saber más

El fenómeno de la difracción se puede explicar sobre la base del principio de Huygens-Fresnel (Física décimo grado). Puede ser conveniente recordar que, de manera cualitativa se puede tener una idea de la explicación del fenómeno mediante el ejemplo siguiente:

Cuando un frente de onda llega a una abertura, cuyo tamaño es unas cuantas veces mayor que su longitud de onda (inferior a las décimas de milímetro), los diferentes puntos del frente de onda se comportan como focos secundarios de ondas esféricas coherentes, que se propagan más allá del orificio, contorneando sus bordes (figura 1.39) debido a que las ondas secundarias interfieren provocando un cuadro de interferencia, que en este caso recibe el nombre de patrón de difracción. Es por esta razón que las ondas, al atravesar el orificio, se ensanchan como un abanico.

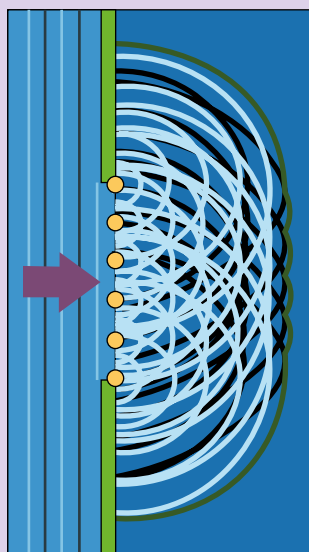
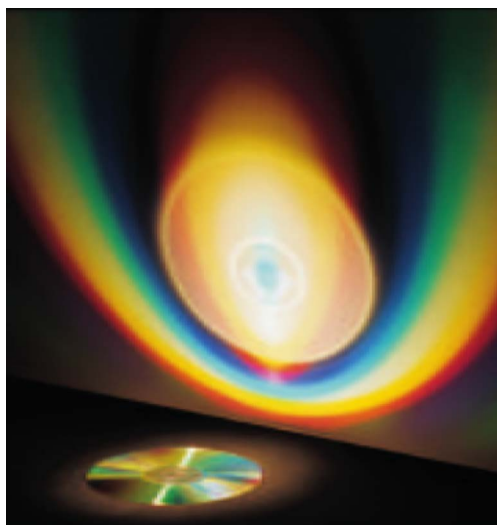


Fig. 1.39

## Redes de difracción

Vamos a estudiar ahora un instrumento que tiene gran aplicación práctica: la red de difracción.

En general, una red de difracción está constituida por un gran número de finas ranuras separadas por intervalos opacos (red de transmisión) o por una superficie especular rayada formando surcos microscópicos (de reflexión). Las mejores redes o rejillas se construyen con máquinas especiales que trazan rayas paralelas en láminas de vidrio. El número de rayas puede alcanzar hasta algunos miles por milímetro; el número total de líneas puede superar las 10 000 por milímetro. Puede resultar interesante observar como la superficie de un CD o DVD se comporta como una red de difracción por reflexión (figura 1.40).



**Fig. 1.40** Patrón obtenido al reflejarse luz blanca sobre la superficie de un CD

En los laboratorios docentes se emplean redes más sencillas, denominadas réplicas, que se confeccionan con una sustancia gelatinosa en la que se imprimen las rayas, para protegerlas se colocan entre dos láminas de vidrio.

Para interpretar el patrón de una red de difracción, podemos utilizar lo que hemos visto en este mismo capítulo relativo al experimento de Young y la difracción en una ranura.

Se llama período de la red ( $d$ ) a la distancia entre los centros de dos ranuras consecutivas (figura 1.41). Por lo tanto:  $d = b + c$ , donde  $a$  es el ancho de las ranuras y  $b$  el ancho de la zona que las separa.

Red de difracción

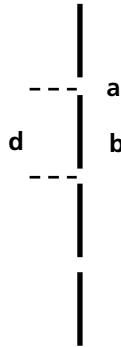


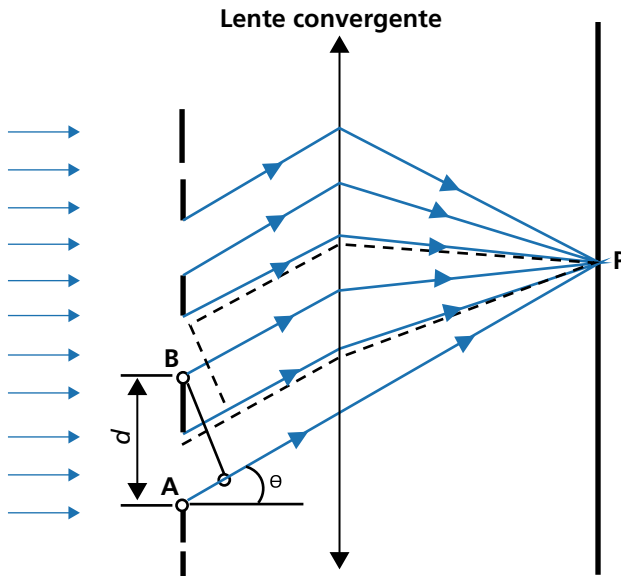
Fig. 1.41

$$d = \frac{\text{unidad de longitud}}{\text{número de trazos}}$$

Si el ancho de las ranuras es del orden de las décimas de milímetro o menor, en cada ranura se produce la difracción. Por lo tanto, al iluminar la red interferirán los haces provenientes de todas las ranuras (figura 1.42).

Como sabemos del experimento de Young, dos ranuras contiguas dan un máximo de interferencia cuando se cumple la condición:

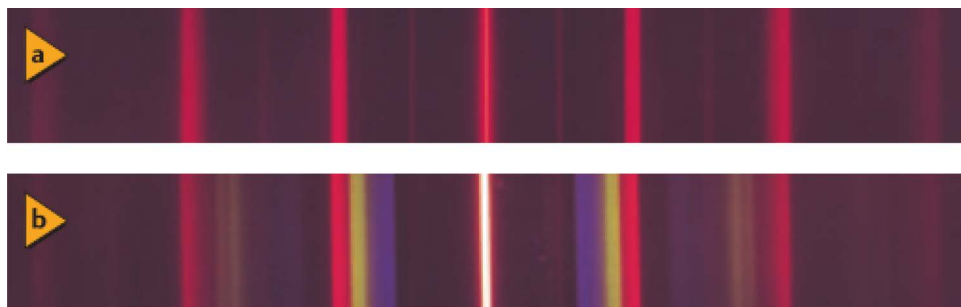
$$d \sin \theta = k\lambda, \text{ donde } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$



**Fig. 1.42** Esquema de la trayectoria para los rayos de luz que llegan a un punto arbitrario  $P$  de la pantalla



Si para un cierto ángulo  $\theta$  la primera y la segunda ranura dan un máximo, lo darán también la segunda y la tercera, la cuarta y la quinta, etc. Esto quiere decir que la condición de máximo de interferencia de una red es la misma que la del experimento de Young, solo que aquí se le denominan máximos principales. En realidad, aparecen además otros secundarios que no tendremos en cuenta por su poca intensidad. Al iluminar la red con luz de un solo color el patrón toma el aspecto de un conjunto de líneas definidas con el color de la luz utilizada sobre un fondo oscuro (figura 1.43 a). Si la luz que se usa es blanca, entonces se verá una zona central blanca y, a cada lado de ella, un espectro en el que los rayos violetas se desvían menos y los rojos más. Después aparecerán una serie de espectros superpuestos parcialmente, que forman una banda continua coloreada (figura 1.43 b).



**Fig. 1.43**

Con ayuda de las redes de difracción se pueden hacer determinaciones de  $\lambda$  mucho más exactas que con el experimento de Young, pues los máximos obtenidos son muy estrechos y se puede determinar con más precisión su posición en la pantalla.

Hay algunos modelos burdos de redes de difracción que encontramos frecuentemente en nuestra vida diaria. Nuestras pestañas constituyen uno de ellos: cuando se mira una fuente de luz blanca intensa con los ojos entrecerrados, se observa un patrón de difracción de la luz; de esta forma también se comporta un disco de música, en el que la luz reflejada aparece coloreada. Un pañuelo de seda es un modelo tosco de una red plana; por eso, cuando se mira una fuente intensa de luz blanca a través de él, se observa también un patrón de difracción de la luz.

### Problema resuelto 5

Sobre una red de difracción de 100 rayas por milímetro se hace incidir un haz estrecho de luz blanca. Considerando que las longitudes

de onda para el violeta y para el rojo son respectivamente 400 nm y 700 nm:

- Determina las desviaciones angulares (ancho angular) de los espectros de orden  $k = 1$ ,  $k = 2$  y  $k = 3$ .
- ¿A partir de qué orden los espectros se solapan?
- Representa en un esquema la distribución de los espectros.

*Solución:*

- Sabemos que la luz blanca está entre los valores de  $\lambda$  que nos dan como datos. En el resto del enunciado se nos dice que hay 100 rayas en un milímetro, esto nos conduce al valor de la constante de la red que será:

$$d = \frac{\text{unidad de longitud}}{\text{número de trazos}} \quad d = \frac{1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,0 \cdot 10^2} \quad d = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Debemos introducir ahora una notación adecuada. Supongamos que el espectro de primer orden (que corresponde a  $k = 1$ ) está comprendido entre los ángulos  $\theta_{1_v}$  y  $\theta_{1_r}$  correspondientes a los máximos de los colores rojo y violeta respectivamente. Su abertura angular la denotaremos por  $\Delta \theta_1$ , y será entonces:

$$\Delta \theta_1 = \theta_{1_r} - \theta_{1_v}$$

Del mismo modo, para los espectros de segundo y tercer orden tendremos:

$$\Delta \theta_2 = \theta_{2_r} - \theta_{2_v}$$

$$\Delta \theta_3 = \theta_{3_r} - \theta_{3_v}$$

Para calcular los valores de los extremos de los espectros podemos utilizar la ecuación:

$$d \sin \theta = k\lambda$$

Hemos utilizado solo el signo positivo ya que nos referiremos a una parte del espectro. Así, para el rojo tendríamos:

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{k\lambda_r}{d}$$

y del mismo modo para el violeta:

$$\theta_v = \sin^{-1} \frac{k\lambda_v}{d}$$

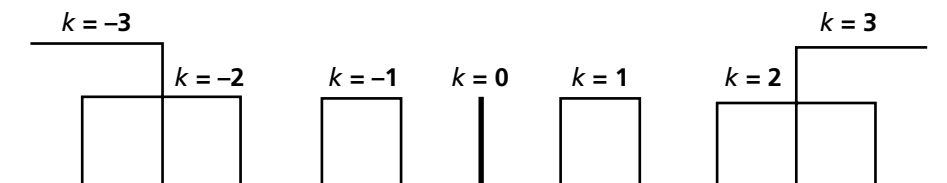
Con los tres valores de  $k$  que nos dan y los datos podemos hacer los cálculos correspondientes y construir una tabla.

**Tabla 1.3**

$k$	$\theta_v$	$\theta_r$	$\Delta\theta$
1	2,3	4,0	1,2
2	4,6	8,0	3,4
3	6,9	12,1	5,2

Donde  $\theta_r$ ,  $\theta_v$  y  $\Delta\theta$  están dados en grados.

- b) El análisis de la tabla 1.3 nos muestra que el espectro de primer orden aparece solo, mientras que el de tercer orden se superpone con el de segundo (observa que el extremo violeta del tercero, cuya abertura angular es  $6,9^\circ$ , está comprendido en el intervalo del segundo).
- c) El esquema pedido se representa en la figura 1.44:



**Fig. 1.44**

¿Se podría determinar qué parte del segundo espectro se solapa con el tercero?

### Problema resuelto 6

Si el patrón de difracción producido por la red del problema anterior se recoge en una pantalla que se encuentra a 1,0 m de distancia de la red, calcula:

- a) ¿A qué distancia (desviación lineal), con respecto al máximo de orden cero, queda ubicado el límite del color rojo ( $\lambda = 700$  nm) del espectro de orden  $k = 1$ ?
- b) Si el período de la red es de 0,01 m, ¿cuál será la separación del límite del color rojo en este caso, si mantenemos las mismas condiciones del inciso a)?



Del análisis de los resultados se confirma que los efectos de interferencia se hacen más visibles cuando la separación entre las rendijas es más pequeña.

## Hora del laboratorio

### Práctica de laboratorio 1.1

#### Determinación de la longitud de onda de la luz mediante una red de difracción

##### Objetivo

Determinar experimentalmente la longitud de onda de un haz de luz monocromático mediante una red de difracción.

##### Actividades

Diseña un procedimiento para determinar experimentalmente la longitud de onda de la luz de una fuente láser, mediante una red de difracción, y estima la incertidumbre del cálculo realizado.

##### Sugerencias

Si se conoce el número de orden de un máximo y su posición respecto al centro del patrón, la constante o período de la red y la distancia a la que está situada la pantalla, la longitud de onda se puede calcular mediante la ecuación  $d \frac{y}{L} = k\lambda$ .

Se puede usar el láser y la red del laboratorio escolar o un puntero láser y utilizar como red un pedazo de CD.

#### Comprueba tus conocimientos

27. ¿A qué se llama difracción de la luz?
28. ¿Por qué la difracción de las ondas sonoras es más fácil de observar que la de las ondas luminosas?
29. ¿Qué dificultades aparecen al intentar hacer un modelo práctico del rayo de luz?
30. Describe el patrón de difracción que se obtiene al pasar luz de un solo color a través de una ranura estrecha.
31. ¿Qué es una red de difracción?
32. ¿Por qué la luz violeta se desvía menos en una red de difracción que la luz de color rojo?

33. ¿Cómo explicas que una red de difracción descomponga la luz blanca en los diferentes colores del espectro?
34. ¿Cómo se puede determinar experimentalmente la longitud de onda de la luz mediante una red de difracción?

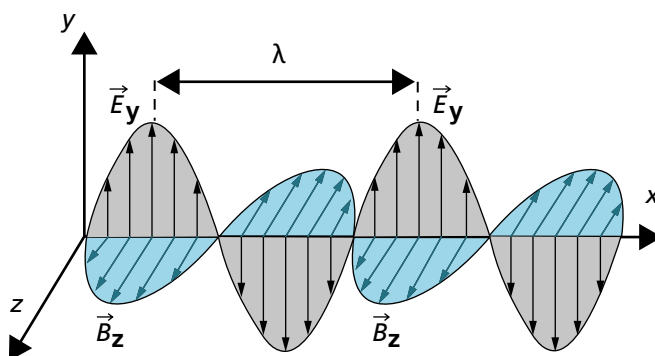
## 1.8 Polarización de la luz. Ley de Malus

En el libro de Física oncenso se analizó el fenómeno de la polarización de las ondas electromagnéticas y cómo este fenómeno pone de manifiesto el carácter transversal de este tipo de ondas.

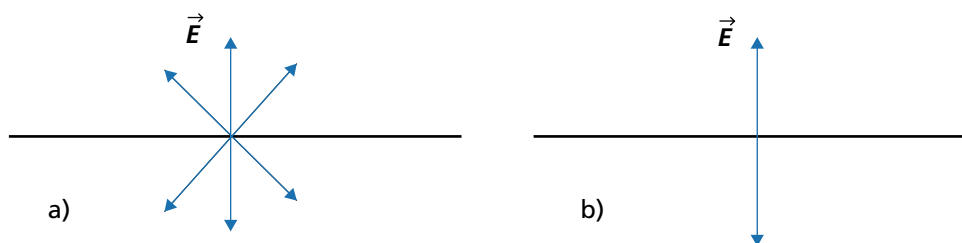
Ahora bien, en el caso particular de las ondas electromagnéticas cuya frecuencia está comprendida en el espectro visible, es decir, el de la luz, hay determinadas particularidades en las que resulta importante detenerse, tanto por su valor conceptual como por sus aplicaciones prácticas.

Recordemos que cuando los “puntos” del medio por los que se propaga una onda solo oscilan en una dirección se dice que la onda está linealmente polarizada en esa dirección, por ejemplo, si las oscilaciones tienen lugar en la dirección  $y$  se dice que está polarizada en  $y$ .

También debemos recordar que en el caso de las ondas electromagnéticas lo que se propaga son las oscilaciones de los vectores intensidad de campo eléctrico y campo magnético (figura 1.46). Como en el caso de las ondas luminosas, son las oscilaciones del vector intensidad de campo eléctrico las que se relacionan con el fenómeno de la visión, la luz natural se representa mediante el vector intensidad de campo “oscilando” en cualquier dirección, en un plano perpendicular a la dirección de propagación (figura 1.47 a) y la polarizada mediante el vector oscilando en una dirección (figura 1.47 b).



**Fig. 1.46** Representación de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética sinusoidal, que se propaga en la dirección del eje  $x$



**Fig. 1.47** Representación de: a) la luz natural;  
b) la luz linealmente polarizada

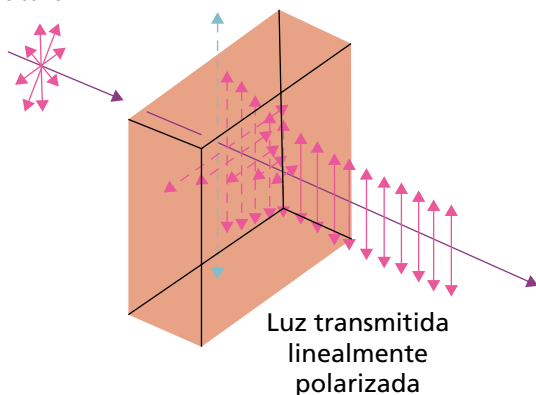
A diferencia del generador de microondas del laboratorio escolar, que como sabemos emite ondas electromagnéticas linealmente polarizadas, las fuentes ordinarias de luz (por ejemplo, las bombillas eléctricas incandescentes, las lámparas fluorescentes o la luz solar) emiten ondas luminosas que no están polarizadas. A esta luz se le denomina luz no polarizada o luz natural. Esto está dado por el hecho de que si bien la luz emitida por cualquier átomo puede estar linealmente polarizada, los cuerpos emisores de luz están constituidos por un número enorme de átomos o moléculas con orientaciones al azar, y la luz emitida es una mezcla de ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones posibles.

Se puede obtener luz polarizada a partir de luz natural o no polarizada de diversas formas. Una de estas formas es mediante el empleo de filtros llamados polaroides, que se construyen con materiales que presentan una absorción selectiva de las ondas con diferente dirección de propagación (figura 1.48). Esta propiedad se denomina dicroísmo.

Un filtro polarizador ideal deja pasar el 100 % de la intensidad de las ondas luminosas polarizadas en una dirección paralela a cierto eje del material, que se denomina eje de transmisión del polaroide, y bloquea completamente la luz polarizada de forma perpendicular al eje de transmisión. En la práctica, los filtros polarizadores dejan pasar alrededor del 80 % de la intensidad de la luz polarizada de forma paralela al eje de transmisión.

En este tipo de filtros hay moléculas de cadena larga que están orientadas con su eje perpendicular al eje de polarización; estas moléculas absorben preferentemente la luz polarizada a lo largo de ellas, en forma muy parecida a los alambres conductores de un filtro polarizador para microondas.

Luz natural

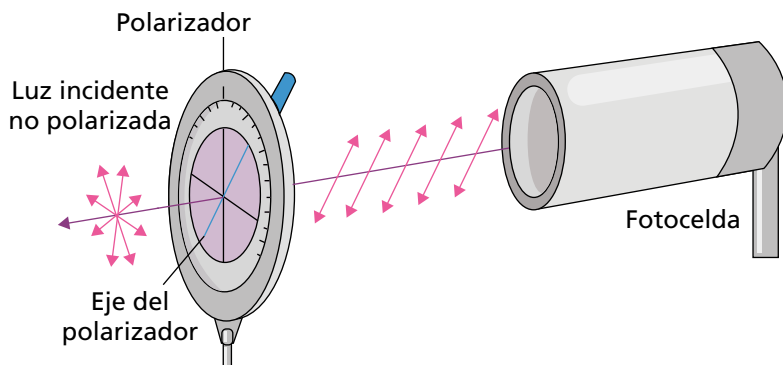


**Fig. 1.48** Filtro polarizador o polaroide. La luz con polarización horizontal se absorbe casi en su totalidad. La luz con polarización vertical se absorbe solo parcialmente

### Saber más

El material más utilizado para hacer los filtros polarizadores es el polímero de acetato de celulosa. Este material se trata con productos químicos para obtener una solución que se deposita en forma de capa fina y uniforme sobre un sustrato transparente, por ejemplo, de vidrio y se somete a un proceso de estirado. Mediante todo este proceso se logra el alineamiento de las moléculas.

Si se hace pasar luz natural por un polaroide ideal (figura 1.49) se tendría que, para cualquier dirección del eje de transmisión, a la salida del polaroide se obtendría luz linealmente polarizada y su intensidad sería la mitad de la de la luz natural incidente.

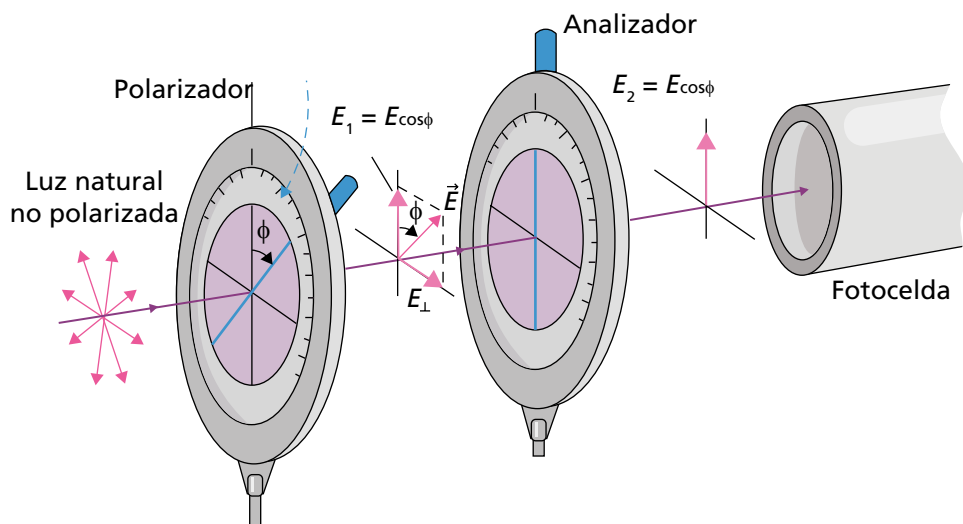


**Fig. 1.49** Mediante la fotocelda se mide la intensidad de la luz a la salida del polaroide



¿Qué pasa cuando la luz linealmente polarizada que sale de un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, como se ilustra en la figura 1.50?

En el caso general, en el cual el eje de polarización del segundo polarizador, o analizador, forma un ángulo  $\phi$  con el eje de polarización del primer polarizador, podemos considerar la luz linealmente polarizada que es transmitida por el primer polarizador tiene dos componentes, una paralela y la otra perpendicular al eje del analizador. Solo la componente paralela, con amplitud  $E \cos \phi$ , es transmitida por el analizador. La intensidad transmitida es máxima cuando  $\phi = 0$ , y es igual a cero cuando el polarizador y el analizador están cruzados de manera que  $\phi = 90^\circ$ . Para determinar la dirección de polarización de la luz transmitida por el primer polarizador, se hace girar el analizador hasta que la fotocelda (figura 1.46) mida una intensidad igual a cero; el eje de polarización del primer polarizador es, entonces, perpendicular al del analizador.



**Fig. 1.50**

En general, la amplitud del vector intensidad de campo eléctrico a la salida del segundo polarizador será:

$$E_t = E \cos \phi$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de esta ecuación y multiplicando por una constante  $k$ , se tendrá que:

$$kE_t^2 = E^2 \cos^2 \phi$$

Como conocemos que la intensidad de la luz es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones luminosas, podemos escribir que:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (1.16)$$

Esta relación (1.16), que descubrió experimentalmente Étienne Louis Malus en 1809, se llama ley de Malus.

### ¡Cuidado!

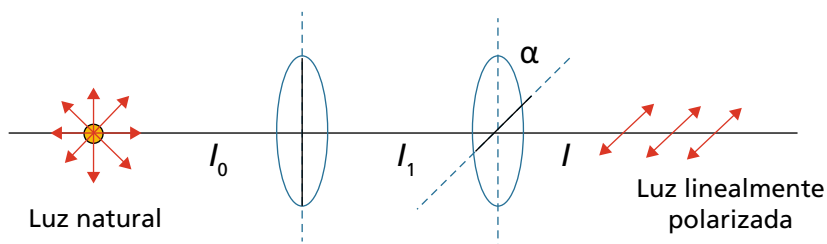
La ley de Malus solo se aplica si la luz incidente que pasa a través del polarizador está linealmente polarizada.

### Problema resuelto 7

Sobre un sistema formado por dos polaroides cuyos ejes de transmisión forman un ángulo  $\alpha$ , incide luz natural. A la salida emerge un cuarto de la intensidad de la luz incidente. Calcula el ángulo  $\alpha$  entre los dos ejes de transmisión.

*Solución:*

Para comprender mejor el problema, es conveniente hacer un esquema e introducir una notación adecuada (figura 1.51).



**Fig. 1.51**

Al primer polaroide le llega luz natural de intensidad  $I_0$ . La intensidad  $I_1$  después de atravesarlo será:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

El paso de la luz a través del segundo polaroide está descrito por la Ley de Malus, por lo tanto:

$$I = I_1 \cos^2 \alpha$$

Además, nos dicen que:

$$I = \frac{1}{4} I_0 \text{ o sea } I_0 = 4I$$

Sustituyendo esta información y despejando en la ecuación de Malus, se obtiene que:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \text{ donde } \alpha = 45^\circ$$

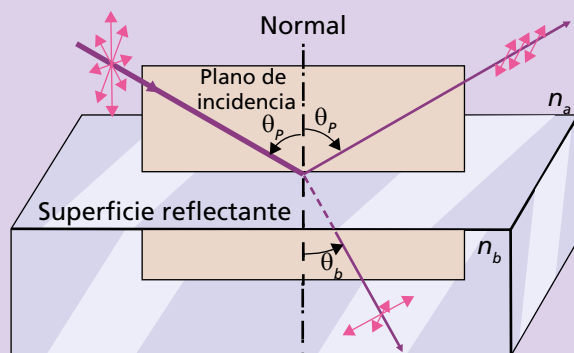
La solución matemática admite también los valores de  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ , sin embargo, solo tomamos  $45^\circ$ , ¿Podrías explicar por qué?

## Saber más

### Otras formas de polarización

Algunos materiales, como los cristales de turmalina o calcita, o plásticos sometidos a tensión, tienen la propiedad de birrefringencia o doble refracción. En estos medios los dos rayos refractados están linealmente polarizados y sus direcciones de polarización son perpendiculares entre sí. De hecho, el estudio de este tipo de materiales contribuyó al descubrimiento del fenómeno de la polarización de las ondas luminosas.

También se observa que, la luz reflejada está parcialmente polarizada y que cuando el ángulo de incidencia es tal que entre los rayos reflejado y refractado el ángulo formado es de  $90^\circ$ , el rayo reflejado está totalmente polarizado con la dirección de polarización perpendicular al plano que contiene a los rayos reflejado y refractado (figura 1.52). En este caso, el rayo refractado está parcialmente polarizado.



**Fig. 1.52**

A partir de la ley de la refracción, se puede demostrar que el ángulo de incidencia  $\theta_p$ , para el que la luz reflejada está totalmente polarizada, está dado por:  $\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}$ .

## Aplicaciones

El fenómeno de la polarización de la luz tiene múltiples aplicaciones en el estudio de fenómenos astronómicos; en el diseño de materiales antirreflecentes, como los usados en las gafas de sol, etcétera.

Como la sacarosa tiene la propiedad de hacer rotar el plano de polarización de la luz que pasa a través de ella en función de su concentración en una disolución, se puede entonces determinar con facilidad y rapidez la concentración de azúcar en el jugo de la caña y controlar así determinada fase del proceso de elaboración del azúcar de caña, mediante un instrumento llamado polarímetro (también llamado sacarámetro). Esta es una aplicación muy conocida en la industria azucarera cubana y en este capítulo hay un trabajo de laboratorio sobre esta aplicación.

Los sacarímetros también se utilizan, por ejemplo, en enología para determinar la concentración de azúcar en el vino

## Hora del laboratorio

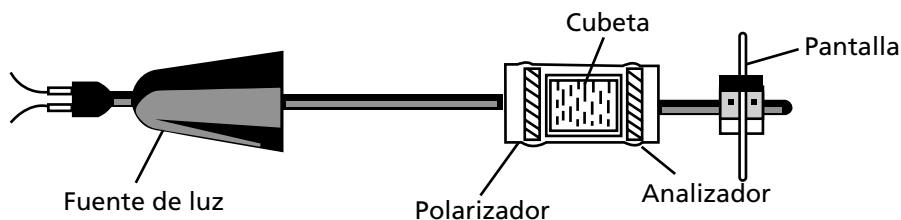
### Práctica de laboratorio 1.2

### Medición del giro del plano de polarización

#### Objetivo

Determinar experimentalmente el ángulo de giro del plano de polarización de una solución concentrada de agua y azúcar.

Mediante un montaje como el mostrado en la figura 1.53, estudia cómo varía el ángulo de polarización con la concentración de azúcar en el agua.



**Fig. 1.53** La cubeta contiene una disolución de azúcar en agua

### Comprueba tus conocimientos

35. ¿En qué se diferencia la luz natural de la luz linealmente polarizada?
36. ¿Cuáles experimentos pueden convencernos de que la luz es una onda transversal?

37. Expresa un argumento a favor de que la luz tiene una naturaleza electromagnética.
38. ¿Qué fracción de la intensidad de la luz natural incidente en un polarizador logra atravesarlo?
39. Escribe e interpreta la ecuación que expresa la Ley de Malus.

## 1.9 Absorción y difusión de la luz

### *Absorción de la luz*

*¿Por qué existen cuerpos con diferentes colores, si en condiciones ordinarias, sobre ellos incide luz blanca?*

Las vivencias experimentadas durante la propagación de la luz por medios transparentes resultan en ocasiones muy impactantes.

- Cuando miramos al fondo del mar en un lugar de poca profundidad, si el agua está tranquila vemos lo que se encuentra sobre el fondo y el propio fondo; pero si estamos sobre un bote en un lugar de mayor profundidad no podemos observarlo.
- Si colocamos un objeto de metal al Sol notaremos que se calienta más que otro igual de madera.
- Ciertas lentes, por ejemplo, las utilizadas en las gafas llamadas *photo-grey*, son fotocromáticas, es decir, se oscurecen de manera automática, cambian su transparencia con la intensidad de la luz.

*¿Cómo pueden explicarse estos fenómenos?*

Estos fenómenos se deben a la **absorción de la luz por el medio**, o sea, al debilitamiento de la intensidad de la luz durante el paso de esta a través de una sustancia, como consecuencia de la transformación de la energía luminosa en energía interna del medio por el que se propaga.

La intensidad de la luz que un medio absorbe depende fundamentalmente de los factores siguientes: las características del medio, la frecuencia de la luz que lo atraviesa, el espesor del medio que la luz atraviesa y en ocasiones de la intensidad de la luz que atraviesa el medio.

La Ley Bouguer formulada en el siglo XVIII permite conocer la intensidad de la luz absorbida por un medio, en dependencia de sus propiedades y su espesor.

La expresión matemática de esta ley para medios en los que la absorción no depende de la intensidad de la luz que atraviesa el medio es la siguiente:

$$I = I_0 e^{-KI} \quad (1.17)$$

En esta expresión  $I$  es el espesor del medio que atraviesa la luz,  $K$  es el coeficiente de absorción del medio,  $I_0$  la intensidad de la luz que penetra en el medio e  $I$  la que sale.

La luz es más absorbida a medida que atraviesa un espesor mayor, esto es debido a que se encuentra más tiempo interactuando con el medio (un medio acuático puede ser opaco si su espesor es muy grande, por ello la luz no llega a las grandes profundidades oceánicas) y también es más absorbida para los medios con mayor coeficiente de absorción.

El coeficiente de absorción del medio es una magnitud de unidades inversas de longitud. En el aire, a la presión atmosférica,  $K$  es aproximadamente del orden de  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  y para el vidrio es del orden de  $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ . Para los metales es del orden de  $10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ .

El coeficiente de absorción además de depender del tipo de sustancia puede depender de la longitud de onda de la luz incidente, de la temperatura y en las disoluciones de su concentración.

Cuando la luz blanca incide sobre un determinado objeto su coeficiente de absorción es mayor para unos colores que para otros, depende de la longitud de onda de la luz que atraviesa el medio, y cada color de luz tiene un rango de longitud de onda determinado. De esta forma hay colores que se absorben casi totalmente y, por tanto, tienen poca intensidad en la luz reflejada y otros tienen más. Esta es una de las causas de que veamos los objetos coloreados. Si el cuerpo es una hoja de papel, esta refleja por igual todas las longitudes de onda, se observa de color blanco.

¿Qué ocurre cuando pintamos la hoja, por ejemplo, de color rojo?

En este caso la mayor parte de la luz reflejada es la que corresponde al color rojo, los restantes colores son fuertemente absorbidos por la hoja pintada. Un vidrio lo visualizamos de color azul, cuando solo transmite este color los restantes del espectro son absorbidos. Esto permite explicar los hermosos efectos que se aprecian en los vitrales decorativos.

La explicación microscópica de la absorción de la luz viene dada por las excitaciones y diferentes movimientos que sufren los átomos y moléculas

de las sustancias al interaccionar la luz con ellas, que son las que absorben la energía luminosa en última instancia.

### ***Difusión de la luz***

Hasta ahora hemos estudiado el paso de la luz en un medio homogéneo y observamos que se mueve en línea recta. ¿Qué le sucederá a la luz al atravesar un medio no homogéneo?

Cuando la luz atraviesa un medio no homogéneo en general sufre una curvatura de su trayectoria al no ser que la incidencia en el medio sea perpendicular. Esto es debido a que en este medio el índice de refracción va variando y, por la Ley de la refracción, cuando la incidencia no es normal va sufriendo una desviación. Esta curvatura de la trayectoria de la luz hace, por ejemplo, que la posición en que se ven las estrellas sea aparente, también es la causa de los espejismos y de que el Sol se vea achatado.

Otro fenómeno que ocurre cuando la luz atraviesa una sustancia no homogénea o heterogénea es la llamada *difusión de la luz*. La difusión de la luz es el fenómeno de desviación de un haz luminoso en diferentes direcciones laterales al propagarse por un medio heterogéneo. Existen dos tipos de heterogeneidad óptica.

- a) Pequeñas partículas extrañas en una sustancia homogénea. En estos medios llamados turbios se produce el llamado Efecto Tyndall. Este es el caso cuando observamos mirando lateralmente un rayo de luz que entra por la ventana de una habitación debido a las heterogeneidades que producen las partículas de polvo en la habitación.
- b) Heterogeneidad óptica debido a la desviación estadística de las moléculas lo que produce fluctuaciones en los valores de la densidad. Este tipo de difusión se denomina molecular. Esta es la difusión que ocurre en la atmósfera, aunque esté limpia de polvo.

El físico británico John William Strutt Rayleigh (1842-1919), estableció que durante la dispersión en un medio turbio con heterogeneidades menores que  $0,2 \lambda$  aproximadamente, así como durante la difusión molecular la intensidad de la luz difundida es proporcional al inverso de la cuarta potencia de la longitud de onda. Esto es conocido como la Ley de Rayleigh, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.18)$$

El color azul del cielo se debe a este fenómeno al igual que el color rojo del Sol poniente. Analicemos como ocurren estos fenómenos.

Cuando la luz blanca proveniente del Sol viaja a través de la atmósfera, va experimentando una desviación lateral debido a la difusión de la luz. Esta desviación es mayor para los colores violetas y azules, pues son los que tienen menor longitud de onda y de acuerdo con la Ley de Rayleigh se desvían más. La combinación de estos colores forma el azul celeste.

Las bellas tonalidades rojizas de los atardeceres son explicadas debido a que cuando el Sol se está poniendo, el espesor de la atmósfera que tiene que atravesar los rayos de luz es mayor que el que tienen que atravesar cuando el Sol se encuentra en el cenit o en cualquier otra posición. Por lo tanto, el fenómeno de la difusión de la luz ocurre a lo largo de una mayor distancia y como consecuencia es mayor la pérdida de las componentes azules y violetas de la luz que llega directamente a los ojos del observador, que la percibe entonces de un color rojizo.

La menor difusión que sufre la luz roja en la atmósfera unido a que la mayor parte de la naturaleza es verde y azul, hace que la luz roja sea la utilizada en los semáforos y señales de peligro.

Si las partículas en suspensión son grandes comparadas con la longitud de onda de la luz o esta corresponde a la luz infrarroja con longitudes de ondas mayores, entonces casi la difusión de la luz no existe. En el primer caso porque no se cumple la Ley de Rayleigh y la intensidad difundida será proporcional a  $\lambda^{-2}$  y en el segundo caso porque al aumentar la longitud de onda, la luz casi no se difunde.

Esto explica por qué el cielo de las ciudades polvorientas o con mucho humo de los carros es blanquecino. Lo mismo sucede cuando hay niebla que debido al tamaño de las gotas de agua en suspensión se ve blanco.

## Comprueba tus conocimientos

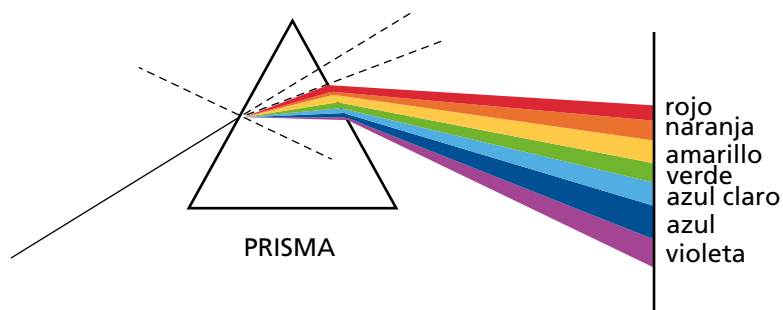
40. ¿Qué es la absorción de la luz?
41. ¿Por qué no llega luz a las grandes profundidades oceánicas?
42. Explica cuál es la causa de la coloración de los objetos por reflexión.



43. ¿Qué es la difusión de la luz?
44. ¿Por qué el cielo se ve azul?
45. ¿Por qué los atardeceres tienen tonalidades rojizas?

## Problemas generales del capítulo

1. Analiza el fenómeno representado en la figura 1.54 y responde:
- ¿Cuál de los colores posee mayor velocidad dentro del prisma y para cuál color el prisma posee menor índice de refracción?
  - Si interponemos un filtro amarillo en la zona por donde llega la luz blanca al prisma de la figura, ¿qué le sucederá al espectro? Explica tu respuesta.



**Fig. 1.54**

2. Se dispone de tres medios de diferente índice de refracción: 1,5; 2,42 y 1,33. Además se dispone de una fuente monocromática de luz verde.
- ¿En cuál medio el haz de luz se refractará más? Argumenta tu respuesta.
  - ¿Disminuirá o aumentará la velocidad de este haz al refractarse en ese medio? ¿en cuántas veces?
  - ¿Disminuirá o aumentará la longitud de onda de este haz al refractarse en ese medio? ¿en cuántas veces?
  - ¿Se produce alguna variación de la frecuencia de la radiación luminosa, al interactuar con este medio?
- Dato: la longitud de onda del color verde es 570 nm.*
3. A continuación te mostramos una tabla que ofrece el valor del índice de refracción del vidrio para diferentes colores:

Tabla 1.4

Color	$n$
violeta	1,532
Azul	1,528
Verde	1,519
Amarillo	1,517
Naranja	1,514
Rojo	1,513

- a) Si cada uno de estos haces se dirigen formando igual ángulo de incidencia (como se representa en la figura 1.55), al refractarse en el vidrio, ¿lo harán con igual ángulo? Argumenta tu respuesta.

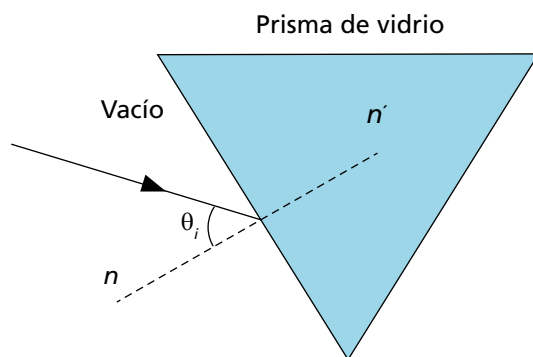


Fig. 1.55

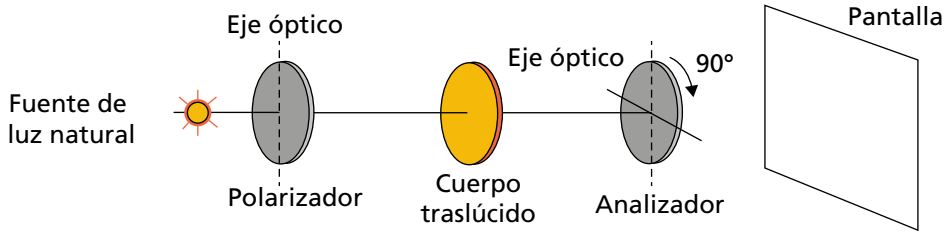
- b) Supón que el ángulo de incidencia sea  $30^\circ$ , calcula entonces el ángulo de refracción que tendrán los haces violeta, verde y rojo. Representa en tu libreta las trayectorias aproximadas en el esquema.
- c) ¿Qué velocidad tendrán en el vacío y en el vidrio estos haces monocromáticos?
- d) ¿Cambiará el color de cada uno de estos haces al refractarse en el vidrio? Argumenta tu respuesta.
4. Explica qué les ocurre a las posiciones de los máximos obtenidos con una red de difracción si:
- Aumenta la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación incidente.
  - Cambiamos la red por otra de mayor período de difracción.

- c) Incrementamos la densidad lineal de trazos por unidad de longitud, de la red.
  - d) Aumenta la distancia de la red a la pantalla.
5. Describe el comportamiento del patrón de interferencia obtenido en una pantalla a partir del experimento de Young.
- a) Si al iluminar con luz monocromática aumenta la separación entre las rendijas.
  - b) Se realiza primero con luz azul y luego con luz roja, ¿en qué caso la separación entre las franjas de interferencia es mayor?
  - c) Si el espacio entre la pantalla y la doble rendija se rellena con agua, ¿aumenta o disminuye la separación entre las franjas de interferencia?
6. Dos rayos luminosos idénticos, cuya longitud de onda es de 500 nm, se propagan en una misma dirección y se encuentran en un punto en el cual la diferencia de marcha es de  $2,0 \cdot 10^{-3}$  mm. ¿Qué se observará en dicho punto del medio, un máximo o un mínimo? Argumenta tu respuesta.
7. ¿Qué longitud de onda posee una radiación luminosa que incide sobre una red de difracción si en el patrón se observa que el ángulo de desviación para el primer máximo es de  $30^\circ$ ? El período de la red es de  $1,2 \cdot 10^{-6}$  mm.
8. Sobre una red de difracción incide luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$ . ¿Bajo qué ángulo se observará el tercer máximo en el patrón de difracción si el período de la red es de  $6\lambda$ ?
9. Una onda monocromática de longitud de onda  $4,0 \cdot 10^{-5}$  mm incide normalmente sobre una red de difracción de modo que el máximo de tercer orden está separado un ángulo de  $3^\circ$  respecto al máximo central.
- a) ¿Cuál es el período de la red de difracción?
  - b) Determina el número de ranuras por centímetro de la red.
10. Sobre una red de difracción incide normalmente un haz de luz monocromática cuyo máximo de tercer orden se observa bajo un ángulo de  $20^\circ$  respecto a la normal. Halla la constante de la red en función de la longitud de onda de la radiación incidente.
11. Sobre una red de difracción con período  $1,2 \cdot 10^{-3}$  cm incide normalmente una onda monocromática, ¿cuál será el valor de su longitud de

- onda, si el ángulo entre los espectros de segundo orden y tercer orden es  $2,5^\circ$ ?
12. Determina la distancia entre el máximo de tercer orden y el máximo central de un patrón de difracción originado en una pantalla por una radiación de longitud de onda  $0,8 \mu\text{m}$ , si la red posee un período de  $0,1 \mu\text{m}$  y la distancia entre esta y la pantalla es  $50 \text{ cm}$ .
  13. Durante una práctica de laboratorio se hizo pasar luz verde a través de una red de difracción obteniéndose el patrón en una pantalla situada a  $20 \text{ cm}$  de la red, la distancia medida entre el máximo de primer orden y el máximo central fue de  $1,0 \text{ cm}$ . Determina la longitud de onda de la radiación utilizada. El período de la red es  $9,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ .
  14. Sobre una red de constante  $10^{-4} \text{ m}$  incide luz con una longitud de onda  $6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . El patrón se observa en una pantalla que dista  $1,0 \text{ m}$  de la red. Calcula:
    - a) Separación lineal entre el segundo y quinto máximo.
    - b) Separación lineal entre el primer y segundo máximo.
    - c) Densidad lineal de trazos por milímetro de la red.
  15. Cierta red de difracción se ilumina con luz blanca. En el espectro de primer orden la raya verde ( $\lambda = 5 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ ) se observa bajo un ángulo de  $20^\circ$ . ¿Para qué ángulo se formará en esta red el máximo de segundo orden para el color naranja ( $\lambda = 6 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ )?
  16. Sobre cierta red de difracción incide un haz de luz blanca. En el primer máximo el color azul ( $\lambda = 4 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ ) está separado  $0,6 \text{ cm}$  del máximo central. ¿Qué longitud de onda tendrá un color que está situado en este mismo máximo, pero separado  $1,0 \text{ cm}$  del máximo central?
  17. En el experimento de Young los orificios se iluminan con luz monocromática de longitud de onda  $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ , la distancia entre ellos era de  $1,0 \text{ mm}$  y su distancia hasta la pantalla  $3,0 \text{ m}$ . Hallar la posición que tenían las tres primeras franjas brillantes.
  18. Incide luz violeta con longitud de onda  $6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  en una doble ranura y luego llega a una pantalla blanca a  $2,0 \text{ m}$  de distancia, formando franjas de interferencia con  $1,5 \text{ mm}$  de separación. Calcular la separación entre las dos ranuras.
  19. Determinar la longitud de onda de la luz que incide sobre una red de difracción, en cada milímetro de la cual vienen trazadas 400 líneas, si la red dista  $25 \text{ cm}$  de la pantalla, resultó que la distancia entre las

terceras líneas a la izquierda y a la derecha respecto al máximo central es de 27,4 cm.

20. Analiza el siguiente esquema (figura 1.56) al pasar la luz por un sistema de polaroides.



**Fig. 1.56**

- ¿Qué ocurrirá si la sustancia que forma el cuerpo traslúcido fuera ópticamente activa? Argumenta.
- ¿Qué ocurrirá si eliminamos dicho cuerpo? Argumenta.

# CAPÍTULO 2

## Introducción a la Teoría Especial y General de la Relatividad

**E**n el libro *La evolución de la física* (1938), Albert Einstein y Leopold Infeld señalan que:

*La teoría de la relatividad fue una necesidad, consecuencia de serias y profundas contradicciones de la teoría clásica que no parecían tener solución. El valor de la nueva teoría radica en la consistencia y sencillez con que resuelve todas estas dificultades utilizando solo algunas hipótesis muy convincentes... La mecánica clásica es válida cuando las velocidades son pequeñas y constituyen el caso límite de la nueva mecánica.*

### & De la Historia

Einstein, uno de los físicos más grandes de todos los tiempos, nació en Ulm, Alemania. En 1905, a los 26 años de edad, publicó cuatro ensayos científicos que revolucionaron la física. Dos de estos ensayos se referían a lo que ahora se considera su aportación más importante: la teoría especial de la relatividad. En 1916, Einstein publicó su obra sobre la teoría general de la relatividad. El pronóstico más impresionante de esta teoría es el grado en el cual la luz es desviada por un campo gravitacional. En 1919, diversos astrónomos realizaron mediciones sobre estrellas brillantes cerca del Sol eclipsado que confirmaron la predicción de Einstein, y como resultado el científico alemán se convirtió en celebridad mundial.



**Fig. 2.1** Escultura de A. Einstein en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana

Einstein estaba profundamente preocupado por el perfeccionamiento de la mecánica cuántica en la década de los veinte, a pesar de su propio papel como científico revolucionario, en particular, nunca aceptó la probabilista sucesión de eventos en la naturaleza, característica esencial de la teoría cuántica. Dedicó las últimas décadas de su vida a una infructuosa búsqueda de una teoría unificada que pudiera combinar la gravitación y el electromagnetismo. Einstein también se destacó por sus manifestaciones sociales de carácter progresista y su enérgico rechazo al uso de la energía atómica con fines militares.

El desarrollo de la denominada *teoría especial de la relatividad* y, posteriormente, de la *teoría general de la relatividad* es considerado como uno de los grandes avances en el conocimiento del mundo físico y despertó, como nunca antes, un gran interés popular, posiblemente debido a sus sorprendentes consecuencias, que resultaban contradictorias con nuestra intuición y sentido común.

Esta teoría fue el primer paso de la gran revolución que experimentó la Física en el siglo xx e introdujo profundas modificaciones en nuestras concepciones sobre el espacio, el tiempo, la masa, la energía, y abrió las puertas del desarrollo energético nuclear y de nuevos campos en la ciencia y la tecnología. Por otra parte, tanto la relatividad especial como la relatividad general han sido exhaustivamente verificadas y se utilizan con éxito en los nuevos desarrollos de la ciencia, la tecnología y la ingeniería.

### + ¿Sabías que...?



**Fig. 2.2** Placa colocada en la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana, en recordación de la visita de Albert Einstein a la ciudad

## 2.1 Velocidad de la luz y sistemas de referencia

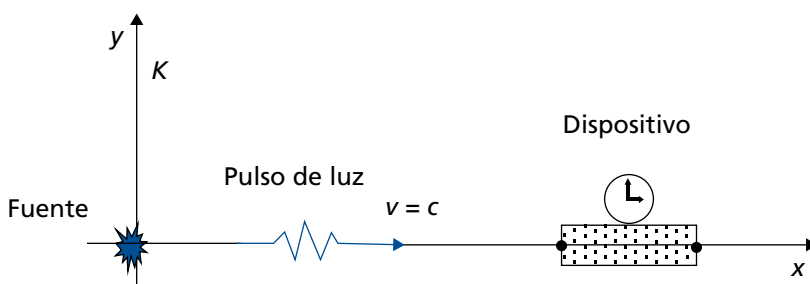
Conocemos que la velocidad de la luz en el vacío tiene, muy aproximadamente, el valor  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s.

Pero, ¿respecto a qué sistema de referencia se da este valor de la velocidad de la luz? Poder especificar esto tiene una gran importancia pues, en correspondencia con la mecánica newtoniana, hablar de velocidad sin indicar el sistema de referencia carece de sentido, vale decir, el valor antes citado debe estar referido a un determinado sistema de referencia inercial.

Recordemos que para poder explicar la propagación de las ondas luminosas fue necesario introducir la hipótesis del éter luminífero; de hecho, este medio sería el marco de referencia absoluto en el cual la luz se propaga con velocidad  $c$  y en cualquier otro sistema de referencia inercial que se mueva respecto al definido por el éter luminífero, la velocidad de la luz estaría dada por la ley galileana de composición de velocidades.

Puede resultar útil considerar, aunque sea de manera simplificada, qué implicación tiene la consideración de la hipótesis de la existencia del éter luminífero en su carácter de sistema de referencia absoluto.

Si la idea de que la luz se propaga con velocidad  $c$  respecto al éter luminífero fuera válida y suponiendo que se dispone de un dispositivo para medir, con suficiente precisión, la velocidad de la luz, entonces, en el caso de que este dispositivo y la fuente de luz estén en reposo respecto al éter (sistema de referencia inercial  $K$ ) como se ilustra en la figura 2.3, el dispositivo registrará una velocidad de la luz igual a  $c$ .



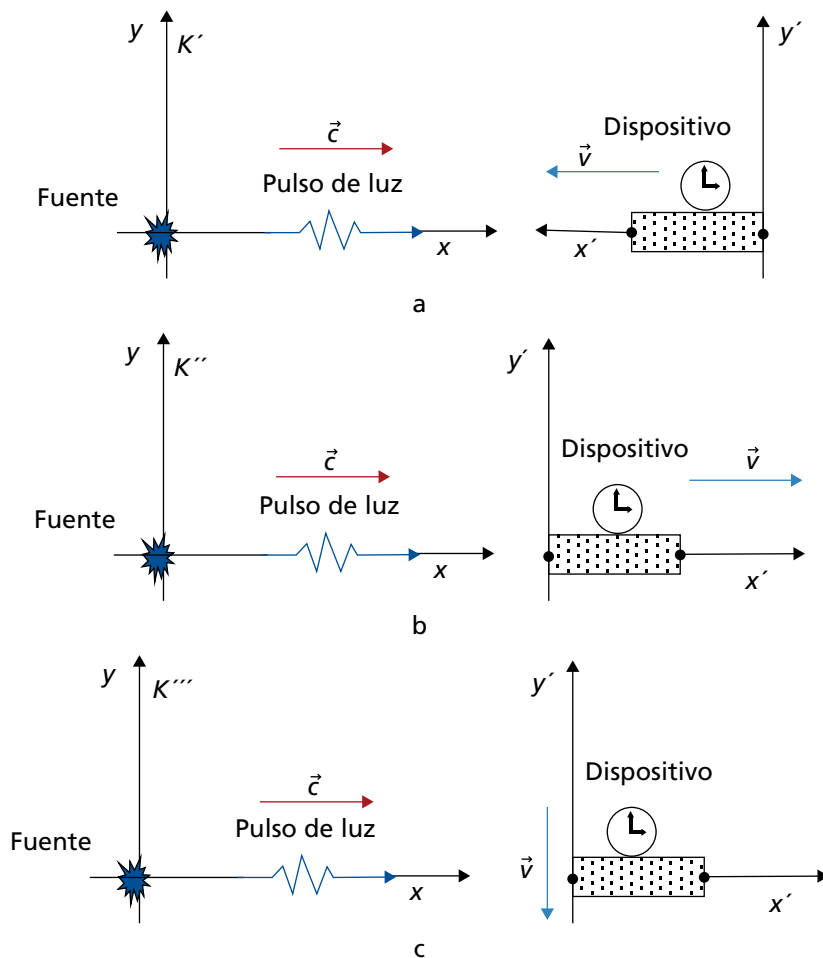
**Fig. 2.3** Fuente luminosa y dispositivo se encuentran en reposo respecto al sistema de referencia  $K$  que está ligado al éter luminífero

Si el dispositivo se ubica ahora en otro sistema de referencia inercial que se mueva en relación con el sistema  $K$ , ligado a la fuente, como se indica en las figuras 2.4 a, 2.4 b y 2.4 c, debemos esperar para el valor de



la velocidad de la luz, en correspondencia con la ecuación de composición de velocidades, los resultados siguientes:

$$\text{En } K' \quad c' = c + V \quad \text{en } K'' \quad c'' = c - V \quad \text{en } K''' \quad c''' = \sqrt{c^2 + V^2}$$



**Fig. 2.4** El dispositivo ubicado en otro sistema de referencia inercial se mueve en relación con el sistema  $K$ : a)  $K'$  se mueve en dirección contraria a la del pulso de luz; b)  $K''$  en la misma dirección; c)  $K'''$  en dirección perpendicular

Sin embargo, los resultados de las observaciones y experimentos reales, equivalentes a esta situación hipotética, indican que:

$$c = c' = c'' = c'''$$

O sea, que la velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales.

De manera general, por toda una serie de investigaciones y en particular las realizadas por Michelson-Morley, en 1887, se conoce que la hipótesis del éter luminífero no es correcta. Puede que el primero en percatarse de la inexistencia del éter luminífero fuera el físico francés Henry Poincaré (1854-1912) el que, en 1900, expuso: “¿Nuestro éter, realmente existe? Yo no creo que observaciones más precisas nos puedan revelar algo más que desplazamientos relativos”.

En la comunicación sobre su primer trabajo, para determinar la velocidad de la luz respecto al éter, vale decir, respecto al espacio absoluto como sistema de referencia privilegiado, Michelson expresó lo siguiente: “El resultado de la hipótesis de la existencia de un éter estacionario demuestra, por tanto, que es incorrecto”.

La solución de este y otros problemas, por ejemplo, la explicación del fenómeno de la aberración de la luz de las estrellas, constituyeron, desde el punto de vista histórico, una de las partes más emocionantes del desarrollo de la Física, muy estrechamente ligada con otras problemáticas del propio desarrollo de esta ciencia.

Algunos físicos asumieron sin éxito que la dificultad estaba en la ecuación de composición de velocidades, o sea, que esta solo era aplicable a los fenómenos mecánicos; lo que equivale a decir que, mediante fenómenos de otra naturaleza, electromagnéticos, por ejemplo, es posible determinar el estado de un sistema inercial de referencia. Esto conduce a la idea, como ya fue mencionado, de la existencia de un sistema de referencia absoluto, cuestión que refutan los experimentos realizados en este sentido.

Otros científicos consideraron, también sin éxito, que la dificultad estaba en la descripción de los fenómenos no mecánicos que conducían a la contradicción con la ecuación de composición de velocidades, y que, por lo tanto, las leyes relacionadas con estos debían ser revisadas.

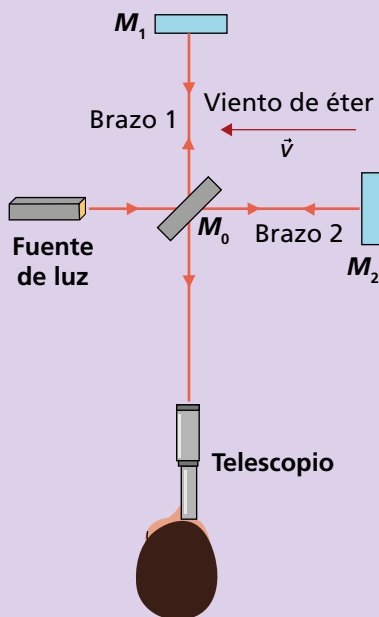
No fue hasta 1905 que el científico alemán Albert Einstein (1879-1955) resolvió satisfactoriamente esta contradicción. En el siguiente epígrafe examinaremos las sorprendentemente sencillas y profundas ideas de Einstein en este sentido.

## & De la historia

El experimento más famoso diseñado para detectar pequeños cambios en la rapidez de la luz fue realizado primero en 1881 por Albert A. Michelson y después repetido en diversas condiciones por Michelson y Edward W. Morley (1838-1923). El experimento fue diseñado para determinar la velocidad de la Tierra respecto a la del hipotético éter. La herramienta experimental empleada

fue el interferómetro de Michelson (figura 2.5). El brazo 2 está alineado a lo largo de la dirección del movimiento de la Tierra en el espacio. La Tierra, que se mueve por el éter a una rapidez  $v$ , es equivalente al éter que circula junto a ella en dirección opuesta con rapidez  $v$ . Este viento de éter que sopla en la dirección opuesta a la del movimiento de la Tierra debe hacer que la rapidez de la luz, medida en el marco de la Tierra, sea  $c - v$  cuando la luz se aproxima al espejo  $M_2$  y  $c + v$  después de reflejarse, donde  $c$  es la rapidez de la luz en el marco de éter.

Los dos haces luminosos se reflejan en  $M_1$  y  $M_2$  y se recombinan y se forma un patrón de interferencia, que se observa mientras el interferómetro se hace girar un ángulo de  $90^\circ$ . Esta rotación intercambia la rapidez del viento de éter entre los brazos del interferómetro. La rotación debe hacer que el patrón de franjas se desplace en forma ligera pero mensurable. Sin embargo, ¡las mediciones no mostraron ningún cambio en el patrón de interferencia! El experimento de Michelson-Morley se repitió en tiempos diferentes del año cuando se esperaba que el viento de éter cambiara de dirección y magnitud, pero los resultados siempre fueron los mismos: **jamás se observó desplazamiento alguno de franja de la magnitud requerida.**



**Fig. 2.5**

## Comprueba tus conocimientos

1. ¿Está la ley de composición de velocidades en correspondencia con los resultados que se obtienen al medir la velocidad de propagación de la luz en el vacío desde distintos sistemas de referencia inerciales? Explica tu respuesta.

## 2.2 Postulados de la teoría especial de la relatividad de Einstein

El análisis profundo de todo el material experimental y teórico existente a principios del siglo xx llevó a Einstein a revisar los conceptos fundamentales de la física clásica, en particular los conceptos tiempo y espacio existentes en esa época.

Del estudio teórico realizado, Einstein elevó a la categoría de postulados, para desarrollar su teoría, los hechos que todo el material experimental confirmaba. Esos postulados fueron los siguientes:

- Todos los sistemas de referencia inerciales son físicamente equivalentes con respecto a todas las leyes de la física.
- **La velocidad de la luz en el vacío posee siempre el valor constante  $c$ .**

El primero de los postulados es la generalización a todos los fenómenos físicos, sobre la base del material experimental acumulado, del hecho de que todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes desde el punto de vista mecánico. Esto quiere decir que no es posible determinar si un sistema de referencia está en reposo o en movimientos rectilíneos uniformes mediante la realización de experimentos mecánicos electromagnéticos, térmicos u otros.

El otro postulado es la adopción de un hecho comprobado experimentalmente: la velocidad de la luz en el vacío es independiente del estado de movimiento de la fuente. Este postulado solo en apariencia contradice al primero, pues no contradice el principio mecánico de la relatividad, sino que, como veremos a continuación, conduce a una variación sustancial de los conceptos espacio y tiempo establecidos en la mecánica newtoniana.

### Comprueba tus conocimientos

2. Plantea los postulados de la teoría de la relatividad de Einstein.

## 2.3 Relatividad de los intervalos temporales

Analicemos la modificación del concepto tiempo mediante un experimento mental muy simple. Para ello utilizaremos un dispositivo con dos espejos separados una distancia  $d$ , entre los cuales marcha un pulso de luz o destello luminoso de muy corta duración (figura 2.6). Si  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo que la luz demora en ir de un espejo al otro tendremos que:  $d = c\Delta t$

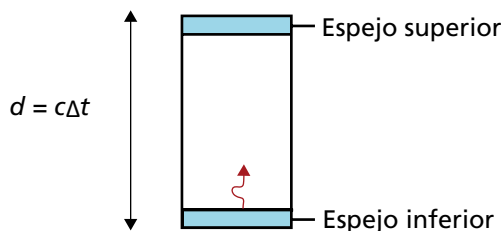
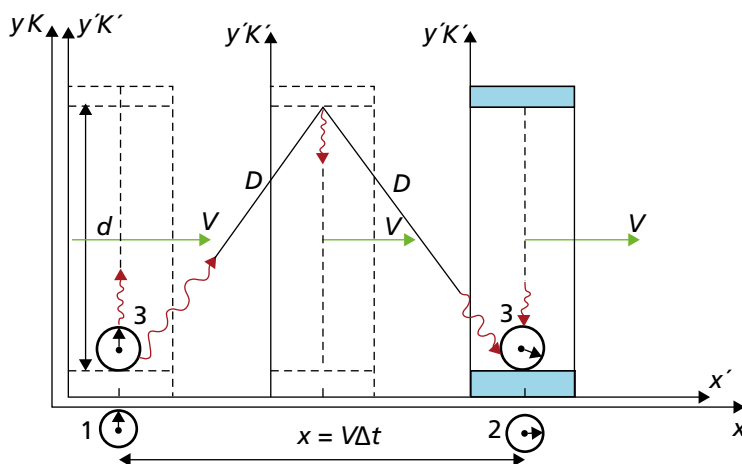


Fig. 2.6

Consideremos ahora que el sistema de espejos se encuentra en reposo en un sistema de referencia inercial  $K'$  que se mueve con velocidad de valor  $V$  respecto a otro  $K$  como se representa en la figura 2.7.



**Fig. 2.7**

Respecto al sistema de referencia inercial  $K$  la distancia  $2D$  que debe recorrer el pulso de luz para ir del espejo inferior al superior y regresar al inferior será mayor que la distancia  $2d$  que debe recorrer el pulso de luz respecto al sistema de referencia  $K'$ , pues en el sistema  $K'$ , durante el tiempo  $\Delta t$  que emplea el pulso de luz en su recorrido, el dispositivo se desplaza una cierta distancia  $x = V\Delta t$ .

Si tomamos ahora en consideración que la velocidad de la luz debe ser siempre la misma ( $c$ ), el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , en que el pulso de luz realiza el recorrido, medido respecto al sistema de referencia  $K$  (utilizando relojes debidamente sincronizados), será mayor que el intervalo de tiempo  $\Delta t$  en que el pulso realiza el recorrido respecto al  $K'$  (medido utilizando el reloj 3).

La relación entre los tiempos  $\Delta t$  y  $\Delta t'$  se puede obtener fácilmente desde el punto de vista geométrico, pues en la figura 2.7 es posible establecer, según el teorema de Pitágoras, la relación:

$$(c\Delta t)^2 = (V\Delta t)^2 + (c\Delta t')^2$$

de la cual, agrupando los términos convenientemente, se obtiene que:

$$\Delta t^2 (c^2 - V^2) = c^2 \Delta t'^2$$



es menor que el medido desde un sistema respecto al cual el reloj se mueve.

- El carácter relativo de los intervalos temporales no viene dado por la naturaleza del reloj, sino por el hecho de que la velocidad de la luz en el vacío es independiente del movimiento de la fuente. O sea, la relatividad de los intervalos temporales es una consecuencia de un hecho experimentalmente verificado y tiene, por tanto, un carácter plenamente real.
- La relación 2.1 indica, además, que la diferencia entre  $\Delta t$  y  $\Delta t'$  no es apreciable si  $V \ll c$ . Por ello, en el dominio de los fenómenos analizados por la mecánica de Newton, no se pone de manifiesto la relatividad de los intervalos temporales.

Esto último se puede comprobar fácilmente mediante un ejemplo: para una velocidad  $v = 8 \text{ km/s}$  (primera velocidad cósmica) tendremos que:

$$\frac{V^2}{c^2} = 7,0 \cdot 10^{-10}$$

y:

$$\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) = 0,999999993 \approx 1$$

Por lo que, en este caso,  $\Delta t \approx \Delta t'$ .

- Un elemento implícito en nuestro análisis de la relatividad de los intervalos temporales y al que, antes de la teoría de la relatividad de Einstein, no se le prestaba atención, es el de la sincronización de los relojes. Analicemos brevemente este aspecto.

Si se dispone de un reloj en un lugar donde ocurran, por ejemplo, dos sucesos es fácil determinar con buena aproximación si son simultáneos o no. Pero si los sucesos ocurren en diferentes lugares, es preciso disponer de dos relojes exactos debidamente sincronizados.

Einstein formuló las reglas para sincronizar los relojes mediante señales luminosas. Uno de los procedimientos más simples para sincronizar relojes es el siguiente: si los relojes están colocados en las coordenadas  $x_1$ ;  $x_2$ ; ...  $x_n$  (figura 2.8), basta, que el primer reloj (el de coordenada  $x_1$ ) se ponga en marcha, un dispositivo emita un pulso de luz que al alcanzar a los demás relojes (los cuales deben estar indicando los tiempos:

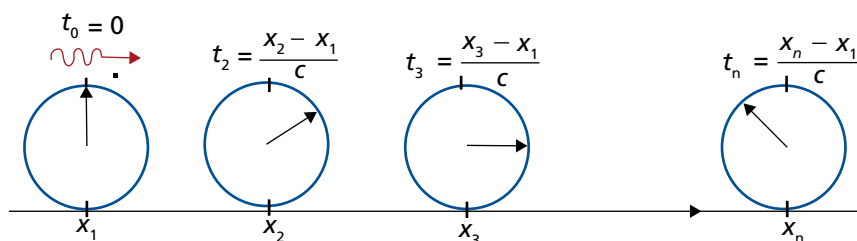


Fig. 2.8

$(t_2 = \frac{x_2 - x_1}{c}; t_3 = \frac{x_3 - x_1}{c}; \dots; t_n = \frac{x_n - x_1}{c})$ , los ponga en funcionamiento.

Como del carácter absoluto de los intervalos temporales se deriva el carácter absoluto de los intervalos espaciales, es lógico pensar que, si los intervalos temporales no son absolutos tampoco lo serán los espaciales. En el próximo epígrafe examinaremos este aspecto.

## Saber más

### La paradoja de los gemelos

La relatividad de los intervalos temporales, expresada mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2, conduce a una aparente paradoja, que ha sido muy divulgada: la paradoja de los gemelos.

Examinemos brevemente en qué consiste esta paradoja. Considera dos gemelos idénticos e imagina que uno permanece en la Tierra y el otro emprende un viaje a una galaxia lejana, con una rapidez cercana a la de la luz. El que quedó en Tierra “observa” que todos los procesos vitales de su hermano transcurren más lentamente, en general y en consecuencia, al regreso será más joven que su hermano “terrestre”.

Sin embargo, el gemelo en la nave “observa” lo mismo para su hermano en Tierra y será su hermano el que ha envejecido menos. En esto consiste la paradoja. El problema radica en que hay que tener en cuenta que el gemelo que quedó en la Tierra permanece en un sistema de referencia aproximadamente inercial todo el tiempo, mientras que el salió de viaje debe acelerar para partir, dar la vuelta y regresar, de manera que existe una diferencia física real y no es válido considerar que ambos puedan hacer la misma descripción del proceso. Un análisis detallado indica que, en efecto, el gemelo que salió de viaje regresaría más joven que su hermano que quedó en la Tierra.

Debemos añadir que en un análisis completo de este proceso es necesario tomar en consideración la aceleración, propiamente dicha, también influye en la “marcha” del tiempo, como veremos en el acápite dedicado a la relatividad general. Este efecto, ha sido comprobado experimentalmente mediante relojes atómicos colocados en aviones.



## Comprueba tus conocimientos

3. Plantea e interpreta las relaciones que expresan matemáticamente el hecho de que los intervalos temporales dependen del sistema de referencia inercial desde el cual se miden.
4. ¿Por qué en el dominio de la mecánica newtoniana no se pone de manifiesto la relatividad de los Intervalos temporales?
5. Analiza críticamente el siguiente planteamiento: “la relatividad de los intervalos temporales viene dada por la naturaleza del reloj utilizado para medirlos”.

## 2.4 Relatividad de los intervalos espaciales

Consideremos los sistemas de referencia inerciales  $K$  y  $K'$ , tales que  $K'$  se mueve respecto a  $K$  con velocidad de valor  $V$  en el sentido positivo del eje de las  $x$ . En  $K'$  medimos un intervalo de longitud  $\Delta x' = x'_2 - x'_1$  (figura 2.9).

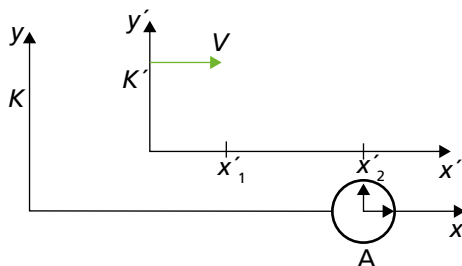


Fig. 2.9

Supongamos que en el eje de las  $x$  del sistema  $K$  hacemos una marca  $A$ , y junto a ella colocamos un reloj. Según este reloj calculamos el tiempo  $\Delta t$  en el cual el intervalo  $\Delta x'$  pasa por la marca  $A$ . Entonces desde el sistema de referencia  $K$  la longitud del intervalo se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\Delta x = V \Delta t \quad (2.3)$$

Analicemos ahora la situación desde el sistema  $K'$ . Aquí, es el reloj  $A$  el que se mueve con velocidad  $V$  en el sentido negativo del eje de las  $x'$ , y el tiempo transcurrido para que el reloj pase del extremo de coordenada  $x'_2$  al de coordenada  $x'_1$ , será  $\Delta t'$ .



- La relación entre  $\Delta x$  y  $\Delta x'$  permite apreciar con facilidad por qué en la mecánica newtoniana se considera que los intervalos espaciales no dependen del sistema de referencia, pues para  $V \ll c$  se tiene que  $\Delta x \approx \Delta x'$  (figura 2.10).

La relatividad de los intervalos temporales y espaciales se ha comprobado en múltiples experimentos en forma directa. Uno de estos experimentos se describe en el epígrafe 2.8.

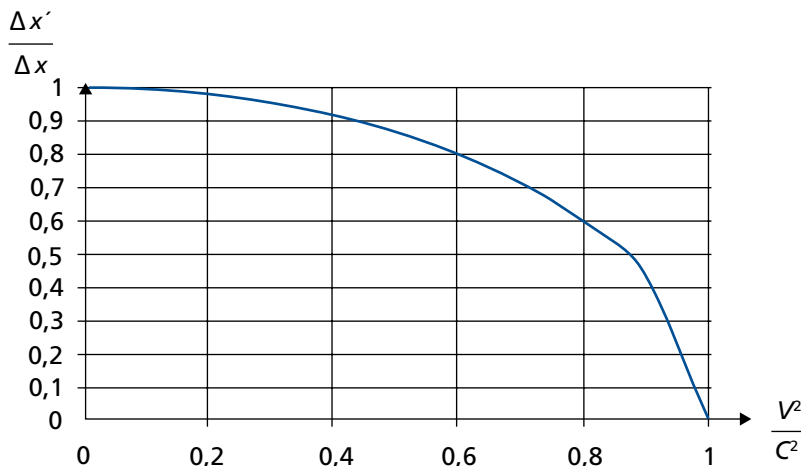


Fig. 2.10

## Comprueba tus conocimientos

6. Plantea e interpreta las relaciones que expresan matemáticamente el hecho de que los intervalos espaciales dependen del sistema de referencia inercial desde el cual se midan.
7. ¿Por qué en el dominio de la mecánica newtoniana no se pone de manifiesto la relatividad de los intervalos espaciales?

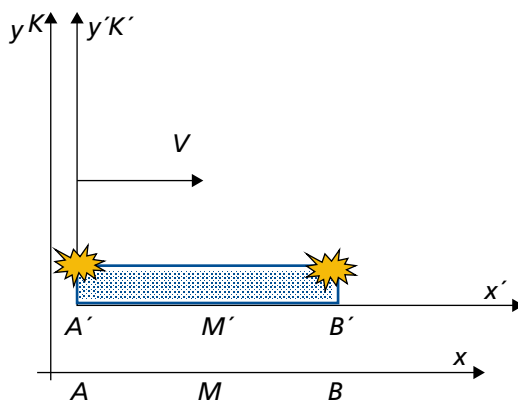
## 2.5 Relatividad de la simultaneidad

Otra consecuencia importante derivada de los postulados de la teoría de la relatividad de Einstein es la del carácter relativo de la simultaneidad de dos sucesos. Es decir, dos sucesos, que ocurren en puntos diferentes, pueden ocurrir en el mismo instante respecto a un determinado sistema de referencia, y en instantes distintos para otros sistemas de referencia.

Aunque la relatividad de la simultaneidad puede inferirse directamente del carácter relativo de los intervalos temporales, y viceversa, resulta conveniente analizar este asunto más detenidamente.

Examinemos el siguiente experimento mental: tenemos un sistema de referencia  $K$  relacionado con la Tierra y otro  $K'$ , relacionado con un tablón que se mueve con velocidad de valor  $V$  en el sentido positivo del eje  $x$  (figura 2.11). Supongamos que dos observadores situados en los puntos  $M$  y  $M'$ , ven que en cada uno de sus sistemas ocurren dos sucesos (por ejemplo, dos explosiones que provocan destellos luminosos) que dejan marcas permanentes en los puntos  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  y  $B'$ . Posteriormente, mediante mediciones, cada observador determina que se encontraba localizado exactamente en el punto medio de las marcas dejadas por los sucesos en su sistema de referencia.

Si los destellos provocados por las explosiones llegan en el mismo instante de tiempo, es decir, simultáneamente al punto  $M$ , los sucesos ocurridos en  $A$  y  $B$  son simultáneos en su sistema de referencia  $K$ .



**Fig. 2.11**

Sin embargo, al punto  $M'$  llegará primero el destello emitido desde  $B'$  pues recorre menos distancia para llegar que el emitido en el punto  $A'$ , y las velocidades de propagación son iguales ( $c$ ). Por tanto, estos sucesos no serán simultáneos para un observador en el punto  $M'$  del sistema  $K'$  para el cual primero ocurre el suceso en  $B'$  y después el suceso en  $A'$ .

Si  $K'$  se mueve con velocidad de valor  $V$  en el sentido negativo del eje de las  $x$ , desde este sistema de referencia, primero ocurrirá el suceso en  $A'$  y después en  $B'$ .

Tenemos, pues, que la simultaneidad tiene un carácter relativo: acontecimientos simultáneos en un sistema pueden no serlo en otro sistema.

El carácter relativo de la simultaneidad no se pone de manifiesto en la mecánica newtoniana, pues en este caso las velocidades son muy pequeñas en comparación con la de la luz ( $V \ll c$ ), y es posible considerar que la luz se propaga prácticamente en forma instantánea. En tal caso, por ejemplo, un observador en el punto  $M$  y otro en el punto  $M'$  no apreciarían diferencia en la llegada de los destellos luminosos.

Resulta conveniente aclarar que la relatividad de la simultaneidad, que se deriva directamente de los postulados de la relatividad de Einstein, no significa que se puedan violar las relaciones de causa y efecto entre determinados fenómenos.

Si dos sucesos  $A$  y  $B$  son simultáneos en un sistema, ellos no pueden guardar relación causal y, por tanto, es posible que en otro sistema primero ocurra el suceso  $A$  y después el  $B$ , o viceversa. Cuando dos sucesos guardan relación causal, por ejemplo, el disparo de un fusil y la posterior marca en la diana, estos sucesos no pueden ser simultáneos en ningún sistema de referencia. En este caso, el intervalo de tiempo entre los dos sucesos depende del sistema de referencia, pero en todos ellos siempre se registrará primero el “suceso-causa”, y después el “suceso-efecto”.

### Comprueba tus conocimientos

8. ¿La simultaneidad de dos sucesos depende del sistema de referencia? Explica tu respuesta.

## 2.6 Ecuación de composición de velocidades en la relatividad de Einstein

La ecuación de composición de velocidades que está en correspondencia con los postulados de la teoría de la relatividad de Einstein (cuya deducción está fuera del alcance de este libro), es la siguiente:

$$v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{v'_x \cdot V}{c^2}} \quad (2.6)$$

Debemos notar que en el caso particular en que  $V \ll c$  y  $v'_x \ll c$ , la ecuación 2.6 adopta la forma:

$$v_x = v'_x + V$$

que es la ecuación de composición de velocidades obtenidas en la mecánica newtoniana.

En el caso en que  $v'_x = c$ , tendremos que:

$$v_x = \frac{c+V}{1+\frac{c \cdot V}{c^2}} = \frac{c+V}{1+\frac{V}{c}} = \frac{c(c+V)}{c+V} = c$$

Lo que corresponde con el hecho experimental de que la velocidad de la luz en el vacío es siempre  $c$ .

En el caso en que además de  $v'_x = c$ , se tenga que  $V = c$ , el resultado será el mismo:

$$v_x = \frac{c+c}{1+\frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{1+1} = c$$

La ecuación de composición de velocidad 2.6 se comprueba directamente en forma experimental. En particular los resultados que obtuvo Fizeau en 1851 (y que después fueron confirmados por Michelson, Morley y Zeeman) sobre el cálculo de la velocidad de la luz cuando esta se propaga a través de una columna de agua en movimiento rápido respecto a un observador en la Tierra, coinciden perfectamente con los de esta ecuación.

Un esquema del dispositivo que permite determinar la velocidad de la luz en el agua en movimiento se representa en la figura 2.12. El espejo semiplataado A divide en dos el haz de luz Incidente que proviene del foco S (línea continua y línea de puntos), de manera que cada uno de ellos atraviesa el dispositivo en sentido contrario y se reúnen a la entrada del equipo E, que permite determinar cuál ha sido la velocidad de la luz a través del líquido en movimiento.

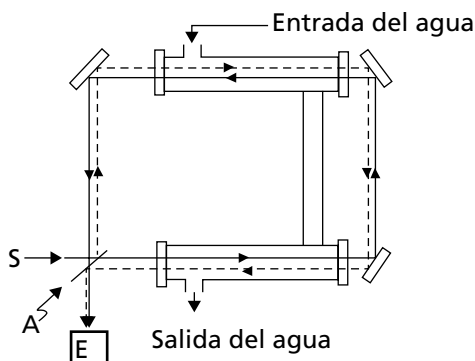


Fig. 2.12

## Comprueba tus conocimientos

9. Plantea la ecuación de composición de velocidades que se obtiene a partir de la teoría especial de la relatividad y argumenta si está de acuerdo con los resultados experimentales.

## 2.7 La energía y la cantidad de movimiento lineal en la Teoría Especial de la Relatividad

No debemos finalizar nuestro estudio elemental de la teoría especial de la relatividad de Einstein sin referirnos a los conceptos energía y cantidad de movimiento lineal, básicos en la mecánica, pues están ligados a las consecuencias de mayor interés teórico y práctico de la relatividad especial.

### Energía

Como es conocido, en la mecánica newtoniana, la energía cinética de una partícula se relaciona con su velocidad según la ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

de donde se puede concluir que:

$$v^2 = \frac{2}{m}E_c$$

Esta ecuación representa el hecho de que el cuadrado de la velocidad de una partícula debe aumentar linealmente con el incremento de la energía cinética.

¿Qué muestran los experimentos en este sentido?

En la gráfica representada en la figura 2.13 se indica, mediante una línea discontinua, el resultado que debe esperarse en correspondencia con la mecánica newtoniana, y con una curva continua el resultado de los experimentos. Esta gráfica indica que las predicciones de la mecánica newtoniana son completamente válidas en el dominio de las “pequeñas velocidades”, pero no a velocidades cercanas a la de la luz en el vacío. Los experimentos dan por resultado de que por mucho que se incremente la energía cinética de una partícula, su velocidad al cuadrado no puede ser mayor que  $9,0 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 / \text{s}^2$  o lo que es lo mismo, que su velocidad no puede alcanzar el valor de la velocidad de la luz en el vacío ( $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

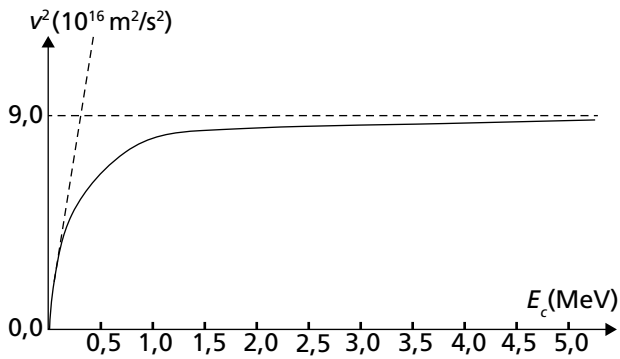


Fig. 2.13

¿Cuál es entonces la relación correcta entre  $E_c$  y  $V^2$ ?

La gráfica de la figura 2.13 se puede dibujar también de la siguiente forma: en el eje vertical se representa  $E_c$  y en el horizontal, por comodidad, la relación  $V/c$ . Entonces se obtienen las gráficas de la figura 2.14. Que también evidencian que la velocidad límite permisible es la que corresponde a la luz.

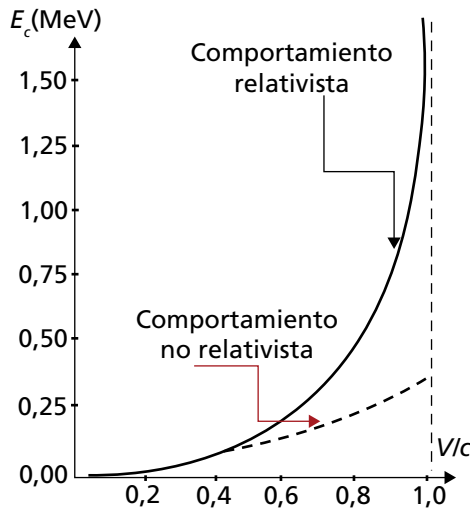


Fig. 2.14

La ecuación que representa correctamente la relación experimental entre la energía cinética y la velocidad de una partícula, que ofrecemos sin demostración, es la siguiente:

$$E_c = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} - 1 \right) \quad (2.7)$$



La ecuación 2.7 conduce, para velocidades “pequeñas”, al resultado previsto por la mecánica newtoniana:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

La ecuación 2.7 tiene además un significado físico más profundo; para analizar esto, rescribámosla de la siguiente forma:

$$E_c + mc^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \right)$$

El término  $mc^2$ , que no depende de la velocidad, recibe el nombre de **energía en reposo**,  $E_0$  y la suma  $E_c + mc^2$ , **energía total**,  $E$ . De acuerdo con esto:

$$E = E_0 + E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (2.8)$$

En el caso de un cuerpo en reposo respecto a cierto sistema de referencia, tendremos que:

$$E = E_0 = mc^2 \quad (2.9)$$

La energía de un cuerpo en reposo es igual al valor de su masa multiplicado por el cuadrado de la velocidad de la luz.

Por otra parte, si el cuerpo se mueve con velocidad de valor  $V$  respecto al sistema de referencia considerado, su energía cinética se interpreta en la teoría especial de la relatividad como la diferencia entre la energía total y la energía en reposo:

$$E_c = E - E_0 \quad (2.10)$$

Resulta importante señalar que la ecuación 2.9 no significa que la masa y la energía sean conceptos equivalentes. Ella solo revela la estrecha relación existente entre las magnitudes masa y energía.

La ecuación 2.9, establecida por la teoría especial de la relatividad, ha desempeñado un importantísimo papel en la ciencia, en particular, en el ámbito de la física del núcleo atómico, como veremos más adelante.

### Cantidad de movimiento lineal

Recordemos que, en la mecánica newtoniana, la cantidad de movimiento lineal de una partícula se define mediante la ecuación:

$$\vec{p} = m\vec{V} \quad (2.11)$$

De acuerdo con la segunda ley de Newton,  $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ , donde  $\Delta t$  es el tiempo durante el cual actúa la fuerza  $\vec{F}$  sobre la partícula. Por lo tanto, aplicando esta fuerza durante un tiempo suficientemente grande, la partícula puede adquirir una cantidad de movimiento tan grande como se desee y, consecuentemente, su velocidad puede alcanzar cualquier valor, incluso mayor que  $c$ .

Como ya conocemos que esto no es posible, la ecuación 2.11 tiene también que ser modificada. Experimentalmente se ha comprobado que la relación entre el valor de la cantidad de movimiento lineal y de la velocidad de una partícula tiene la forma que se muestra en la gráfica de la figura 2.15.

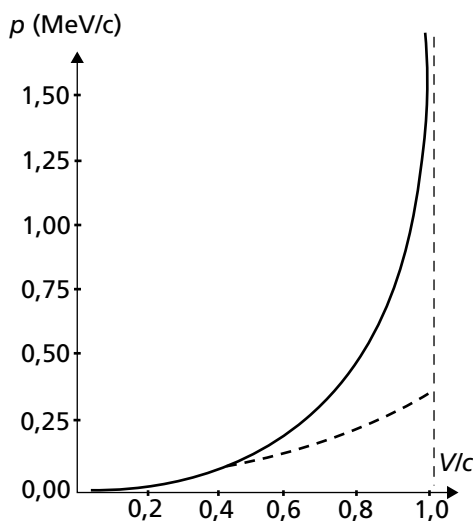


Fig. 2.15

La ecuación que corresponde a esta gráfica, la cual daremos sin demostración, es:

$$p = \frac{mV}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (2.12)$$

Como puede apreciarse fácilmente en esta ecuación, si  $V \ll c$  entonces  $p = mV$ , como se establece en la mecánica newtoniana.

Las ecuaciones 2.9 y 2.12 sugieren que la energía y la cantidad de movimiento lineal están íntimamente relacionadas. En efecto, si en ambas ecuaciones despejamos el término del denominador e igualamos ambos resultados, se obtiene que:

$$\frac{mc^2}{E} = \frac{mV}{p}$$

De donde:

$$p = \frac{E \cdot V}{c^2} \quad (2.13)$$

La utilidad de esta ecuación se pondrá de manifiesto cuando estudiemos la teoría cuántica de la luz y de la sustancia, en los próximos capítulos.

### Comprueba tus conocimientos

10. ¿Cuál es el significado físico de la ecuación  $E = mc^2$ ?
11. Plantea e interpreta la ecuación relativista que define la cantidad de movimiento lineal de una partícula.

## 2.8 Un experimento con los mesones $\mu$

Las predicciones de la teoría especial de la relatividad se han comprobado en un gran número de hechos experimentales, y en la actualidad no existen dudas en cuanto a su validez.

Uno de estos experimentos es el relacionado con la observación del carácter relativo de los intervalos temporales y espaciales, mediante la observación de los mesones  $\mu$  originados en las altas capas de la atmósfera. Analicemos, de manera muy simplificada, en que consiste dicho experimento.

Los mesones  $\mu$  son partículas fundamentales cargadas que, como estudiarás en el capítulo 5, se desintegran en otras partículas fundamentales en un tiempo muy corto, aproximadamente  $2,0 \cdot 10^{-6}$  s (tiempo propio).

Los mesones  $\mu$  originados bajo la influencia de los rayos cósmicos en las altas capas de la atmósfera (aproximadamente a 9 km de altura), atraviesan radialmente la atmósfera terrestre con una velocidad de aproximadamente  $0,998 c$  y pueden ser detectados al nivel del mar.

Calculemos la distancia que pueden recorrer esos mesones bajo el supuesto de que se desintegran en  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ :

$$d = v\Delta t = (0,998)(3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})(2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s})$$

$$d = 598 \text{ m}$$

¿Cómo explicar entonces que estos mesones se detecten al nivel del mar después de haber recorrido aproximadamente 9 000 m?

Para los observadores respecto a los cuales los mesones tienen una velocidad de  $0,998 c$ , el tiempo en que estos tardan en desintegrarse se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

donde  $\Delta t'$  es el tiempo en que tardan en desintegrarse en el sistema respecto al cual se consideran en reposo:

$$\Delta t' = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Por lo tanto:

$$\Delta t = \frac{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0,998 c)^2}{c^2}}} = 3,17 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

En ese intervalo de tiempo, los mesones pueden recorrer una distancia:

$$d = v \cdot \Delta t = (0,998) \left( 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot 3,17 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$d = 9\,994 \text{ m}$$

lo cual permite explicar satisfactoriamente la pregunta anterior.

Se podrá objetar que el análisis realizado es válido para los observadores respecto a los cuales se mueve el mesón, pero ¿qué sucede en un sistema de referencia ligado al mesón? En este sistema el mesón se encuentra en reposo y, por tanto, el tiempo en que se desintegra sería aproximadamente de  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . De manera que para este observador no podría recorrer la distancia que lo separa de la superficie terrestre al nivel del mar lo que también resulta contradictorio. Realmente, no hay tal contradicción a la luz de la teoría especial de la relatividad. Para un observador en el sistema de referencia ligado al mesón, la superficie de la Tierra se acerca con una velocidad de  $0,998 c$ . De modo que, para dicho observador, la

distancia y entre la superficie de la Tierra y las capas altas de la atmósfera está dada por:

$$y = y' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Considerando que  $y' = 9\,000\text{ m}$ , se tiene que:

$$y = 9000\text{m} \sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}$$

$$y = 587\text{ m}$$

Que es una distancia inferior a los 598 m que puede recorrer el mesón antes de desintegrarse.

### Saber más

El primer experimento para observar la relatividad del tiempo y de la longitud mediante mesones de rayos cósmicos fue realizado, en 1941, por B. Rossi y D.B. Hall. Ellos contaron la llegada de un promedio de 563 muones en una hora, a una altura próxima a los 2 000 m (en la cima del monte Washington), y en el recuento a nivel del mar la cifra promedio, en una hora, fue de 412 y no de 27 como era de esperar.

Una detallada descripción de este experimento se da en la película que fue posteriormente filmada. Se puede acceder a ella en la dirección: <https://www.soloentendidos.com/dilatacion-tiempo-experimento-meson-mu-1950>.

## Comprueba tus conocimientos

12. ¿Cómo se explica que un observador en la Tierra pueda detectar los mesones, que se forman a 9,0 km de altura y se desintegran al cabo de  $2,0 \cdot 10^{-6}\text{ s}$ , puedan llegar hasta el nivel del mar?

## 2.9 Relatividad general

La diferencia fundamental entre la relatividad general o teoría general de la relatividad y la teoría de la relatividad especial, radica en que la relatividad especial, formulada por Albert Einstein, en 1905, se centra en describir el comportamiento de objetos con velocidades cercanas a la de la luz desde sistemas de referencia inerciales y la relatividad general, presentada por Einstein en una serie de artículos desde 1915, abarca los sistemas acelerados y describe la gravedad no como una fuerza sino como una curvatura del espacio-tiempo, una entidad de cuatro dimensiones (tres

espaciales y una temporal) que se deforma por la presencia de los cuerpos (su masa/energía).

Si bien el estudio de la relatividad general requiere de formulaciones matemáticas que normalmente se tratan en cursos universitarios especializados, conocer sus fundamentos de manera cualitativa resulta importante para la cultura de todas las personas, en particular, para entender el universo y el desarrollo de muchas nuevas tecnologías. En la actualidad, la relatividad general ha sido una de las teorías más divulgadas en los medios de comunicación como consecuencia de los descubrimientos relacionados con agujeros negros, ondas gravitacionales y otros.

Conocer los fundamentos de la relatividad general, algunos de sus conceptos esenciales, efectos y aplicaciones prácticas, de forma cualitativa, es el objetivo esencial de este apartado.

### Fundamentos de la relatividad general

Podemos decir, de manera simplificada, que la Teoría General de la Relatividad se basa en los principios siguientes:

**El principio de equivalencia:** establece que la aceleración gravitatoria es indistinguible de la aceleración experimentada en un sistema de referencia no inercial.

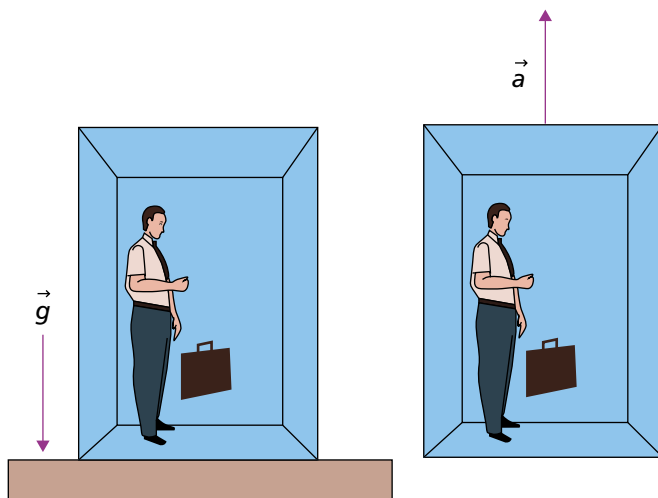
**La curvatura del espacio-tiempo:** consiste en la propuesta de que la gravedad no es una fuerza en el sentido que establece la mecánica newtoniana, sino que es una consecuencia de que la geometría de lo que se llama el continuo espacio-tiempo tiene una curvatura que depende de la presencia de los cuerpos (su masa/energía).

**El principio de covarianza:** establece que las leyes de la física deben tener la misma forma matemática en todos los sistemas de referencia, lo que constituye una generalización de lo que se considera en la relatividad especial, en la que solo se consideran los sistemas de referencia inerciales.

Podemos tener una primera idea del significado del *principio de equivalencia* mediante el análisis de la situación siguiente:

Consideremos un observador que se encuentra dentro de un elevador en reposo, respecto a la superficie de la Tierra, que deja caer su portafolio. En estas condiciones, como sabemos, la aceleración de caída del portafolio tendrá el valor  $g$  (figura 2.16 a).

En el caso de que el elevador, con el observador, este situado en una región donde la aceleración gravitatoria se pueda considera nula y se esté moviendo con aceleración  $\vec{a} = \vec{g}$  como se representa en la figura 2.16 b, al dejar caer el portafolio, el observador registrará que la aceleración de caída del portafolio también tendrá el valor  $g$ , es decir que detecta lo mismo que se describió en caso representado por la figura 2.16 a. Esto indica que el observador no puede distinguir si el sistema este reposo en presencia de del campo gravitatorio de la Tierra, o está en movimiento acelerado con aceleración  $\vec{g}$ .

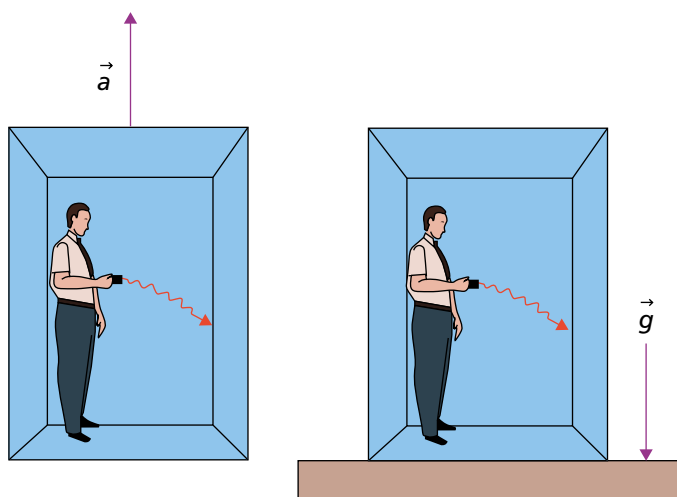


**Fig. 2.16**

Por otra parte, esta equivalencia hubiera sido importante pero no revolucionaria, si fuera solo válida para fenómenos mecánicos. Pero en el planteamiento de Einstein la equivalencia es válida para todo tipo de fenómenos. Analicemos entonces, como en el caso de un fenómeno no mecánico se llega a la misma conclusión. En otras palabras, tratemos de ilustrar el significado del *principio de covarianza* generalizado.

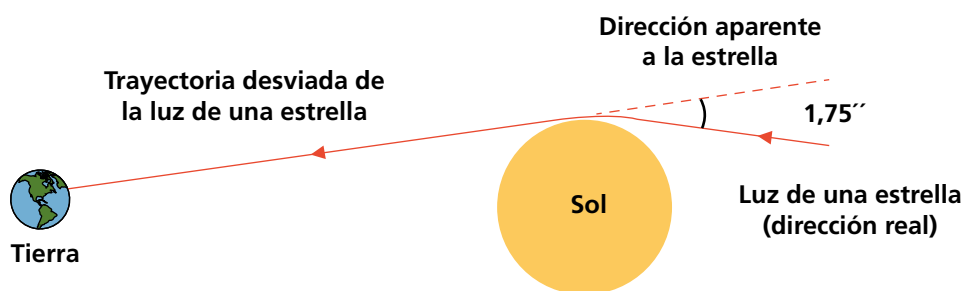
Consideremos ahora que el observador que está en el elevador, en el caso que se acelera hacia arriba en una región donde la gravedad es nula, proyecta un rayo de luz en dirección horizontal sobre la pared del elevador. En esta situación, el observador detecta que el rayo de luz se curva hacia abajo (figura 2.17 a).

La propuesta de Einstein es de que si el elevador se encuentra en reposo respecto a Tierra (figura 2.17 b), el campo gravitatorio doblará el haz de luz de manera que la trayectoria descrita tendrá la misma forma que en el caso representado en la figura 2.17 a.



**Fig. 2.17**

La masa de la Tierra no es lo suficientemente grande para doblar un haz de luz de manera apreciable, pero, por ejemplo, en el caso de que la luz procedente de las estrellas, Einstein predijo que al pasar cerca del Sol se desviarían un ángulo de 1,75 segundos (figura 2.18). Esta desviación se comprobó experimentalmente por primera vez durante el eclipse total en 1919 y desde esa fecha se ha vuelto normal repetir esta medición durante los eclipses totales de Sol.



**Fig. 2.18**



## & De la historia

### El eclipse solar de 1919 y la teoría especial de la relatividad

Durante un eclipse solar total, la Luna bloquea la luz del Sol hacia la Tierra, permitiendo que las estrellas que están en una dirección cercanas a la del Sol sean visibles en pleno día. Esta situación permite observar cómo la gravedad afecta la luz al pasar cerca de un objeto masivo, como el Sol.

En el año 1919, durante un eclipse solar, se llevó a cabo un experimento revolucionario que confirmó la Teoría General de la Relatividad propuesta por Albert Einstein en 1915. Este experimento, liderado por Sir Arthur Eddington, capturó la atención del mundo científico al poner a prueba una de las teorías más innovadoras de la física moderna.

La idea fue que como durante un eclipse solar total, la Luna bloquea la luz del Sol, las estrellas cercanas al Sol resultan visibles en pleno día y ello permitiría verificar la predicción de la Teoría de la Relatividad de Einstein sobre la curvatura del espacio-tiempo alrededor de objetos masivos, midiendo la desviación de la luz al pasar cerca del Sol.

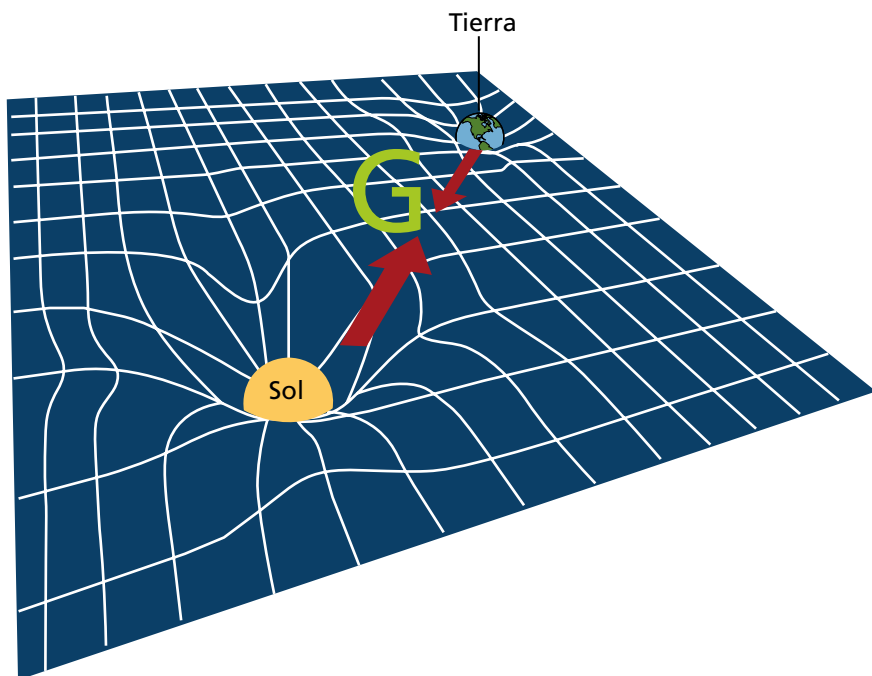
Las fotografías tomadas durante el eclipse mostraron que las estrellas cercanas al Sol estaban ligeramente desplazadas de su posición esperada, lo que indicaba que la luz se había curvado al pasar cerca del Sol, tal como lo predijo la Teoría de la Relatividad.

Este experimento marcó un hito en la historia de la ciencia al confirmar una de las predicciones de la teoría más revolucionaria de la física moderna y no solo validó el trabajo de Einstein, sino que también abrió nuevas puertas a nuestra comprensión del universo y de la naturaleza del espacio y del tiempo e inspiró a las generaciones futuras de científicos a explorar los límites de nuestro conocimiento y a desafiar las ideas establecidas en busca de una comprensión más profunda del cosmos.

Para acercarnos de manera simplificada al significado de la propuesta ulterior de Einstein de que la gravedad no es una fuerza en el sentido que establece la mecánica newtoniana, sino que es una consecuencia de la *curvatura de la geometría del continuo espacio-tiempo*, que depende de la presencia de los cuerpos (su masa/energía), podemos considerar la analogía siguiente:

Consideremos que un cuerpo descansa sobre el centro de una manta elástica (figura 2.19), por supuesto, mientras mayor sea la masa del cuerpo, más deformada estará la superficie de la manta. De manera similar, la masa de los objetos en el universo curva el espacio-tiempo a su alrededor y condiciona la trayectoria del movimiento de los cuerpos en el universo, por ejemplo, la Tierra gira alrededor del Sol no porque esté

siendo atraída por la fuerza de gravedad, sino porque la masa del Sol curva el espacio-tiempo a su alrededor, creando una especie de pozo gravitacional en el que la Tierra se desplaza siguiendo una trayectoria curva alrededor del Sol.



**Fig. 2.19** Esquema de la curvatura espacio-tiempo

Algunos estudiantes han considerado de ayuda, para tener una representación de cómo la curvatura del espacio-tiempo explica el cambio en el estado de movimiento de los cuerpos en lugar de recurrir a su interacción gravitatoria, la analogía siguiente:

Imagina dos investigadores que se encuentran sobre la superficie de la Tierra separados unos pocos metros, en el círculo ecuatorial y comienzan a moverse con rumbo norte. Mientras estén cerca del ecuador dirán que sus trayectorias son paralelas, pero cuando se aproximan al polo norte, observarán que se están moviendo cada vez más cerca uno del otro y de hecho se encontrarán en el polo norte. Por lo tanto, dirán que se movieron a lo largo de trayectorias paralelas, pero uno hacia el otro, *como si hubiera una fuerza de atracción entre ellos*. Llegarán a esta conclusión de acuerdo con su experiencia diaria de moverse en superficies planas, pero a partir de una representación mental verán

que están caminando en una superficie curva, y que es la geometría de la superficie curva la que los hace converger, en lugar de una fuerza de atracción. De manera análoga, la relatividad general sustituye la noción de fuerzas con el movimiento de cuerpos en el espacio-tiempo curvado.

### **Curvatura del espacio-tiempo y relatividad del tiempo**

La teoría general de la relatividad, debido a la deformación del espacio-tiempo, conduce al hecho de que el tiempo transcurre de manera diferente en la Tierra que en las proximidades del Sol. En el lenguaje newtoniano, esto significa que el tiempo depende de la intensidad del campo gravitatorio.

Este hecho se ha podido comprobar en el experimento de Hafele-Keating, en el año 1971. En este experimento se comparó la lectura de un reloj atómico colocado en un avión comercial con otro reloj igual situado en Tierra, para estudiar la dependencia del tiempo con la gravedad y la velocidad. Los resultados de este experimento permitieron comprobar la validez de lo pronosticado por la teoría general de la relatividad.

### **Otras evidencias experimentales de la teoría general de la relatividad**

Desde su publicación y hasta la fecha, la teoría general de la relatividad ha superado con éxito las comprobaciones experimentales a que ha sido sometida. Además de la de la mencionada observación de la desviación de la trayectoria de la luz de las estrellas por el Sol y de la dependencia del tiempo con la intensidad del campo gravitatorio, está el hecho de la precesión del perihelio del planeta Mercurio.

Según la Relatividad General (TGR), la órbita de un planeta no es realmente una elipse cerrada; el eje de la elipse gira un tanto en cada órbita, figura 2.20.

Para Mercurio, que está más cerca del Sol y por lo tanto mostraría el efecto más grande, el efecto predicho es de 42,98 segundos de arco por siglo. El valor medido es actualmente de  $43,11 \pm 0,21$  segundos de arco por siglo, está en excelente concordancia con las predicciones de la TGR. Este fenómeno fue advertido por primera vez en 1859 y constituyó un problema serio para la teoría gravitatoria newtoniana (antes de que Einstein proporcionara la explicación correcta).

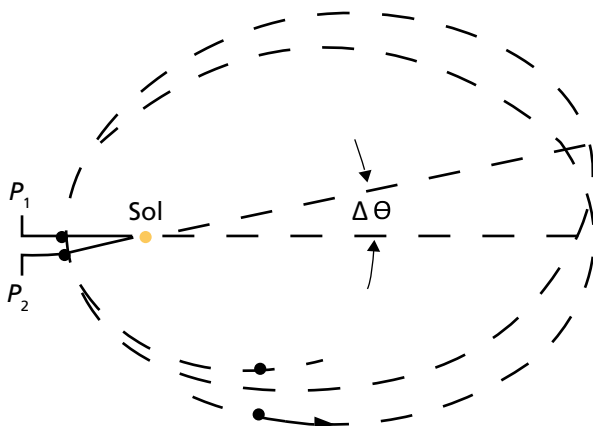


Fig. 2.20

El denominado corrimiento hacia el rojo constituye también una evidencia de la validez de la teoría general de la relatividad. Este fenómeno se explica de manera satisfactoria al considerar, de acuerdo con la predicción de la relatividad general, de que la frecuencia de la radiación emitida por los átomos es menor, o sea están corridas hacia la parte roja del espectro, en presencia de un campo gravitatorio intenso, en comparación con el caso de que el campo gravitatorio sea un campo débil.

Este corrimiento hacia el rojo gravitacional ha sido detectado en los espectros de emisión de los átomos en estrellas de gran masa y también se ha verificado en la Tierra al comparar las frecuencias de rayos gamma emitidos desde núcleos separados verticalmente unos 20 m.

Otra evidencia es la de la detección directa de las ondas gravitacionales, en el año 2015, por el Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitatorias (LIGO), lo que confirmó la predicción de Einstein sobre la existencia de estas ondas, que son perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo.

### Teoría de la relatividad general y teoría de la gravitación universal

Como sabemos, a velocidades pequeñas en comparación con la velocidad de la luz en el vacío, los resultados de la teoría especial de la relatividad concuerdan con los de la mecánica newtoniana. De la misma manera, cuando los campos gravitacionales son débiles, la teoría de la gravitación universal formulada por Newton, es completamente válida. De hecho, el cálculo de las trayectorias que deben seguir los satélites artificiales que

orbitan alrededor de la Tierra, los telescopios espaciales, las naves que han volado a la Luna, Marte y otros planetas y la predicción de los eclipses, por solo citar algunos ejemplos, se realizan sobre la base de la ley de gravitación universal y las leyes de la mecánica formuladas por Newton.

Es muy probable que en el futuro las personas tengan una representación del universo distinta a la nuestra, de la misma forma que hoy tenemos una representación muy diferente de la que tenían, por ejemplo, las civilizaciones griega, egipcia, china o hindú, pero de lo que no hay dudas es de que el modelo del universo dado por la teoría general de la relatividad nos ha permitido ampliar, como nunca antes, en el conocimiento del universo y ha abierto nuevas puertas para seguir progresando en esta fascinante aventura.

### Comprueba tus conocimientos

- 13.** ¿Cuáles son los principios básicos de la teoría general de la relatividad?
- 14.** Imagina que un astronauta despierta en su nave cerrada, que está sobre la superficie lunar, ¿puede decir si su peso se debe a la gravitación o que la nave está con movimiento acelerado? Explica tu respuesta.
- 15.** En que consiste el corrimiento hacia el rojo de la luz.
- 16.** Cita algunos de los hechos que pongan en evidencia la validez de la teoría general de la relatividad.

### Problemas generales del capítulo

- 1.** Una nave cohete parte de la Tierra y alcanza una velocidad próxima a la de la luz, si en el cosmódromo queda una nave gemela:
  - a) ¿Qué dirán los observadores terrestres de la longitud de la nave en comparación con la que queda en el cosmódromo?
  - b) ¿Qué dirán los tripulantes de la nave de la longitud de la gemela que quedó en tierra en comparación con la de ellos?
- 2.** Una nave cohete se mueve respecto a la Tierra a una velocidad próxima a la de la luz, y sus tripulantes encuentran que para hervir cierta cantidad de agua emplean 10 min. Para los observadores en Tierra, ¿el tiempo en que hierve el agua en la nave será el mismo? Explica tu respuesta.
- 3.** Dos acontecimientos son simultáneos si se observan desde el sistema de referencia "Isla de Cuba". Uno ocurre en La Habana y el otro en Matanzas. ¿Pueden ocurrir simultáneamente en otro sistema de referencia

inercial? ¿Existe algún sistema de referencia en el cual ocurra primero el suceso de La Habana y después el de Matanzas? ¿Existe algún sistema de referencia en el que ocurra primero el suceso de Matanzas y después el de La Habana? ¿Pueden estos sucesos guardar relación causal? Explica.

4. En la probeta de un laboratorio se observa el nacimiento y la muerte de un microorganismo. ¿Puede existir algún sistema de referencia en el que primero se observe la muerte y después el nacimiento del microorganismo? Explica tu respuesta.
5. Un suceso ocurre en un instante determinado de tiempo en la provincia de Pinar del Río, y un segundo después acontece otro suceso en Guantánamo. Si la distancia entre los dos lugares es de 1 200 km. ¿Puede existir otro sistema de referencia inercial en el cual los dos sucesos ocurran en el mismo lugar? Justifica tu respuesta.
6. Representa cualitativamente la gráfica de la relación  $v = f(\Delta t)$  para un cuerpo sobre el que actúa una fuerza constante durante mucho tiempo:
  - a) de acuerdo con la mecánica newtoniana;
  - b) de acuerdo con la teoría de la relatividad.
7. ¿A qué velocidad será la energía cinética de una partícula igual a su energía en reposo? ¿Depende la respuesta de la masa de la partícula?
8. Cita dos hechos experimentales conocidos por ti que confirmen la veracidad de la teoría especial de la relatividad. Explica brevemente en qué consisten estos experimentos.
9. Plantea algunas de las principales contribuciones de la teoría especial de la relatividad de Einstein a la comprensión del comportamiento de la naturaleza.
10. Analiza críticamente el siguiente planteamiento: “la teoría especial de la relatividad de Einstein nos indica que las leyes de la mecánica newtoniana son falsas”.
11. Haz una exposición de algunos elementos que justifiquen la afirmación de que la teoría especial de la relatividad ha tenido y tiene una extraordinaria importancia para el desarrollo de la técnica contemporánea.
12. ¿Qué velocidad relativa respecto a un sistema de referencia inmóvil debe tener un cuerpo para que la disminución relativista de su longitud sea de un 25 %?

13. Dos cohetes se mueven al encuentro a velocidades  $V_1 = 0,8 c$  y  $V_2 = 0,7 c$  respectivamente. Determina la velocidad relativa del primer cohete respecto al segundo.
  - a) De acuerdo con las ecuaciones de Física clásica.
  - b) De acuerdo con las ecuaciones de la Teoría Especial de la Relatividad.
14. Una varilla de longitud propia de 1 m se mueve horizontalmente respecto a la Tierra a  $v = 0,8 c$  y está dispuesta de forma tal que forma un ángulo de  $45^\circ$  con el horizonte (medido desde la varilla). Para los observadores terrestres ¿qué longitud tiene la varilla y qué ángulo de inclinación tiene con el horizonte?
15. Una nave cohete abandona la Tierra a  $v = 0,8 c$ . ¿Cuánto tiempo necesita el minuterero de un reloj en la nave para efectuar una revolución completa si la medición la realiza un observador en la Tierra?
16. Después de 1,0 s, una bala disparada horizontalmente cae 4,9 m en dirección vertical, respecto a su trayectoria rectilínea, en un campo gravitacional de 1,0 g. ¿Qué distancia bajará un rayo de luz en este mismo campo gravitacional al cabo de 1,0 s? ¿Y al cabo de 2,0 s?
17. La luz cambia su energía al “caer” en un campo gravitacional. Sin embargo, el cambio de energía no se traduce en un cambio de rapidez. ¿Cuál es la prueba de ese cambio de energía?
18. ¿Notaríamos un retraso o un adelanto en un reloj, si lo pusiéramos en el fondo de un pozo muy hondo?
19. Si presenciamos eventos que suceden en la Luna, donde la gravedad es menor que en la Tierra, ¿esperaríamos observar un corrimiento gravitacional hacia el rojo o hacia el azul? Explica tu respuesta.
20. Una astronauta despierta en su cápsula cerrada que está descansando en la Luna. ¿Puede ella decir si su peso se debe a la gravitación o a un movimiento acelerado? Explica tu respuesta.
21. Una persona dice que la luz que pasa cerca del Sol se desvía, ya sea que ocurra o no un eclipse de Sol. ¿Estás de acuerdo con ella? Explica.
22. ¿Por qué decimos que la luz se propaga en línea recta? Estrictamente, ¿es correcto decir que un rayo láser sigue una línea perfectamente recta para usarla en topografía? Explica.

# CAPÍTULO 3

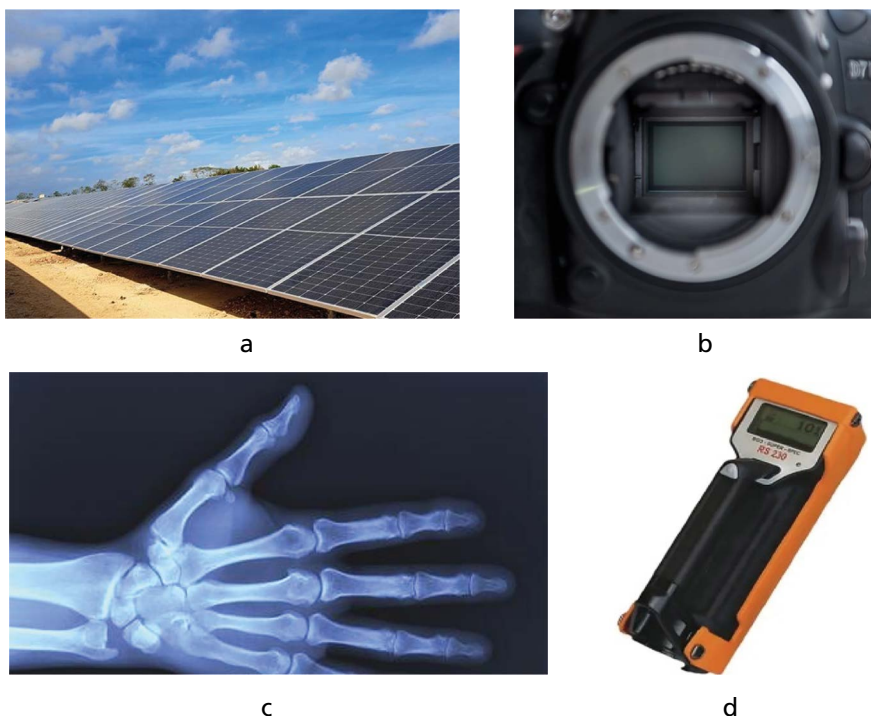
## ■ ■ ■ ■ ■ Introducción a la Teoría Cuántica de la luz ■ ■ ■ ■ ■

**E**l origen de lo que hoy conocemos como física cuántica se encuentra en los trabajos que condujeron al establecimiento de la teoría cuántica de la luz, entre los que destacan los realizados por Planck, en 1900, para explicar la radiación del cuerpo negro, y la explicación dada por Einstein al efecto fotoeléctrico externo, en 1905. También la explicación de otros fenómenos como el efecto Compton y los rayos X contribuyeron a establecer el carácter cuántico de la luz.

Tal fue la importancia de la explicación dada por Einstein al fenómeno del efecto fotoeléctrico, que por ella recibió el Premio Nobel de Física, en 1921. Anteriormente, en 1918, Planck había recibido también el Premio Nobel de Física por su contribución al surgimiento de la física cuántica.

En este capítulo abordaremos los aspectos básicos de esta importante y revolucionaria teoría que, además de ser esenciales para profundizar en el conocimiento sobre la naturaleza de la luz y su interacción con los cuerpos, también ha tenido una enorme repercusión por sus aplicaciones prácticas, entre ellas, por ejemplo: **los paneles solares, los sensores usados en las cámaras fotográficas digitales, los reguladores de tóner en la máquinas impresoras, la espectrografía de rayos gamma, los diagnósticos médicos e industriales** (figura 3.1).





**Fig. 3.1** Aplicaciones: a) parque fotovoltaico en Cuba; b) sensor de luz para cámaras digitales; c) imagen mediante Rayos X; d) espectrógrafo de rayos gamma

### 3.1 Radiación térmica. Modelo del cuerpo negro. Leyes de la radiación del cuerpo negro. Hipótesis de Planck

#### *Radiación térmica*

Sabemos que si tenemos dos cuerpos con diferentes temperaturas y los ponemos en contacto, ambos adquieren, al cabo de cierto tiempo, la misma temperatura, es decir, los cuerpos alcanzan el estado de equilibrio térmico. En este caso la energía pasa del cuerpo más caliente al más frío mediante el proceso que conocemos como conducción del calor.

Pero, ¿qué ocurre si los cuerpos están separados y en el vacío?

Como también sabemos, la experiencia demuestra que igual se establece el equilibrio térmico, solo que en este caso la transferencia de energía ocurre mediante el proceso que conocemos como radiación térmica.

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo a expensas de su energía interna de carácter térmico.

Esta radiación es generada por el movimiento de las partículas cargadas que componen el cuerpo y las ondas electromagnéticas emitidas comprenden las zonas infrarroja, visible y ultravioleta del espectro

La distribución de energía de la radiación depende de la temperatura del cuerpo radiador: a temperaturas bajas la radiación térmica emitida por el cuerpo está fundamentalmente en la región infrarroja y a temperaturas elevadas la radiación “alcanza” las zonas visible y ultravioleta.

Si la radiación térmica es inherente a todos los cuerpos a cualquier temperatura y se produce a expensas de la energía interna del cuerpo, entonces, ¿por qué los cuerpos que nos rodean no disminuyen su temperatura a pesar de que están emitiendo energía? Esto se explica porque todo cuerpo, a la vez que radia, absorbe parte de la energía radiada por los otros cuerpos circundantes y se mantiene el equilibrio térmico.

Para el estudio cuantitativo de los procesos de radiación y absorción se utiliza el *modelo del cuerpo negro*.

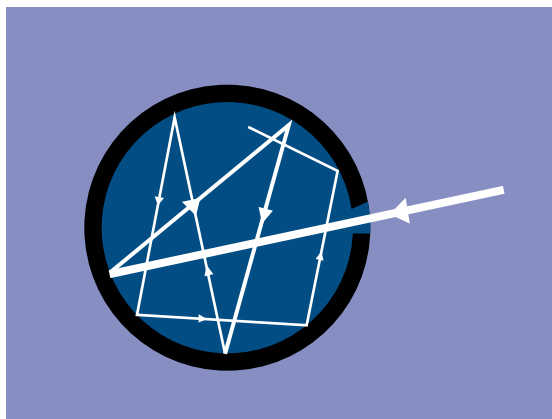
### **Modelo del cuerpo negro**

Un cuerpo que absorbe a cualquier temperatura toda la energía radiante que incide sobre él, recibe el nombre de cuerpo negro.

En realidad, el cuerpo negro es una idealización, un modelo, no existe un cuerpo que absorba el 100 % de las radiaciones que inciden sobre él. En la práctica, la superficie de un cuerpo recubierta con negro de humo, que es uno de los mejores absorbentes, solo absorbe aproximadamente el 99 % de la radiación incidente.

El físico alemán G.R. Kirchhoff (1824-1887) ideó un modelo del cuerpo negro. Este modelo consiste en un cuerpo hueco cuyas paredes interiores absorben en gran medida las radiaciones (pueden estar cubiertas con una capa de negro de humo), y que posee un orificio pequeño. Este cuerpo absorbe prácticamente todas las radiaciones que inciden en él, pues al penetrar por el orificio sufren en el interior una serie de reflexiones y ceden una parte considerable de su energía a la superficie en cada reflexión. La probabilidad de que la radiación que entró salga de nuevo por el orificio es muy pequeña. Ello hace que el orificio se comporte como un absorbente ideal, es decir, como un cuerpo negro. En la figura 3.2 se representa esta situación. Las líneas rectas con las saetas representan

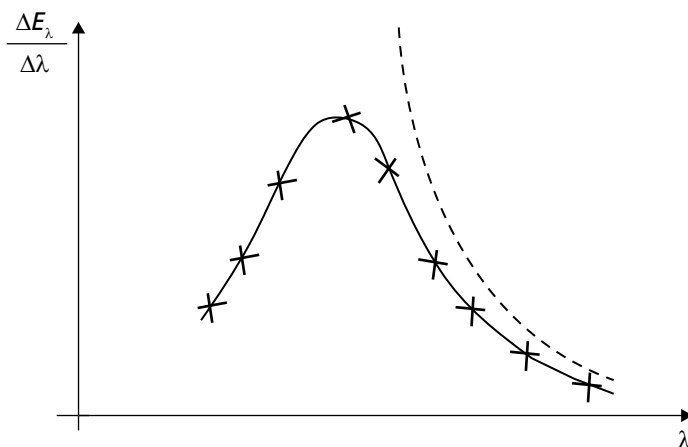
las radiaciones incidentes y reflejadas. El grosor de las líneas representa como disminuye la intensidad de la radiación incidente durante las múltiples reflexiones.



**Fig. 3.2** Modelo de cuerpo negro

### Leyes de la radiación del cuerpo negro. Hipótesis de Planck

A finales del siglo XIX se estudió experimentalmente la distribución de energía en el espectro de radiación térmica de un cuerpo negro en equilibrio térmico. Los resultados de esta distribución se representan en la figura 3.3 (curva continua).



**Fig. 3.3** La curva discontinua representa la distribución esperada en correspondencia con la teoría electromagnética. Nota la fuerte discrepancia con los valores experimentales, representados por la línea continua, para las longitudes de onda pequeñas

En el eje de las abscisas se anotan los valores de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y en el de las ordenadas la energía emitida por unidad de superficie del cuerpo negro en la unidad de tiempo, por cada unidad de intervalo de longitud de onda. Estos resultados, obtenidos experimentalmente, contradicen las predicciones de la teoría electromagnética de Maxwell sobre la naturaleza de la luz.

De acuerdo con la teoría de Maxwell, la energía radiada en la unidad de tiempo por unidad de área es proporcional a la frecuencia de la onda al cuadrado, o sea,  $\Delta E \propto \nu^2$ . Esto implica que la energía radiada en la unidad de tiempo por unidad de área, y por unidad de intervalo de frecuencia, aumenta al aumentar la frecuencia, o lo que es lo mismo, al disminuir la longitud de onda. La gráfica que muestra la distribución teórica de energía en el espectro de la radiación térmica de un cuerpo negro en equilibrio térmico, a una temperatura dada, está representada en la figura 3.3 con una línea discontinua. Podemos observar que, para longitudes de onda largas, ambas curvas (la experimental y la teórica) tienen el mismo comportamiento: disminuye cuando aumenta la longitud de onda  $\lambda$ . Pero para longitudes de onda cortas, en la curva experimental disminuye después de alcanzar un máximo, mientras que en la curva teórica aumenta continuamente.

La teoría electromagnética de Maxwell explica la radiación térmica de un cuerpo negro en equilibrio térmico para longitudes de onda largas, pero está en contradicción con el experimento para longitudes de onda cortas (zona ultravioleta).

Esta divergencia entre la teoría y los resultados experimentales en el estudio de la radiación térmica de un cuerpo negro en equilibrio térmico, para longitudes de onda cortas, se llamó catástrofe ultravioleta.

Todos los intentos para tratar de eliminar estas contradicciones de la teoría electromagnética de Maxwell con la práctica resultaron infructuosos; y no fue hasta principios del siglo xx que tuvo lugar en la física una gran revolución, cuando el 14 de diciembre de 1900 el físico alemán Max Planck (1858-1947) presentó un trabajo sobre la radiación del cuerpo negro, en una reunión de la Sociedad Alemana de Física, en Berlín. Planck propuso que los átomos no irradian la energía electromagnética en forma continua, sino que lo hacen en forma de porciones aisladas con valores perfectamente definidos, a los que denominó cuantos. La

energía  $E$  de cada cuanto es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación, o sea:

$$E = h\nu \quad (3.1)$$

### & De la historia

Max Planck (1858-1947) (figura 3.4), alemán, físico y matemático. Es considerado como el fundador de la teoría cuántica y fue galardonado con el Premio Nobel de Física, en 1918.



**Fig. 3.4**

El coeficiente de proporcionalidad  $h$  se denomina constante de Planck. A partir de los estudios experimentales sobre la radiación del cuerpo negro se determinó su valor, que resultó ser muy pequeño:

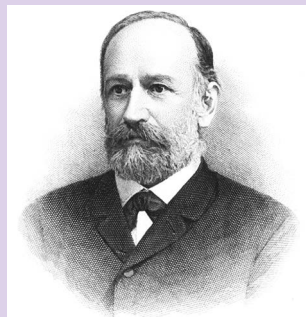
$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

La curva obtenida según la teoría de Planck para la distribución de la energía en el espectro de la radiación térmica del cuerpo negro, coincide (curva de trazo continuo en la figura 3.3) con la curva obtenida experimentalmente.

### — Saber más

#### La ley de Stefan-Boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva total (energía emitida en todas las longitudes de onda por unidad de tiempo y de área) que es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (figura 3.7).



**Fig. 3.5**

Esta ley fue obtenida en 1879 por el físico austriaco Josef Stefan (1835-1893) (figura 3.5), sobre la base de las mediciones experimentales realizadas por el físico irlandés John Tyndall. En 1884, el también físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) (figura 3.6), la derivó a partir de consideraciones teóricas.

Con esta ley, Stefan determinó la temperatura de la superficie del Sol y calculó un valor de 5 430 K.



Fig. 3.6

### Ley de Wien

La ley del desplazamiento de Wien establece que hay una relación inversa entre la longitud de onda en que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura absoluta (figura 3.8).

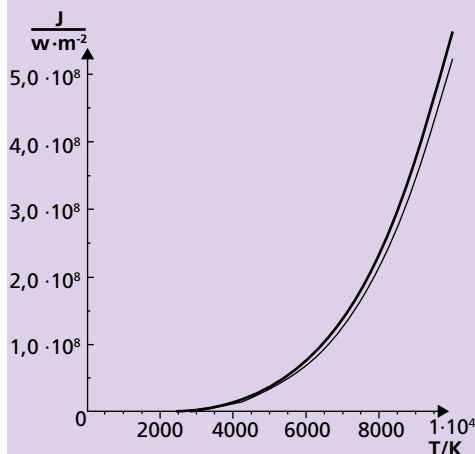


Fig. 3.7

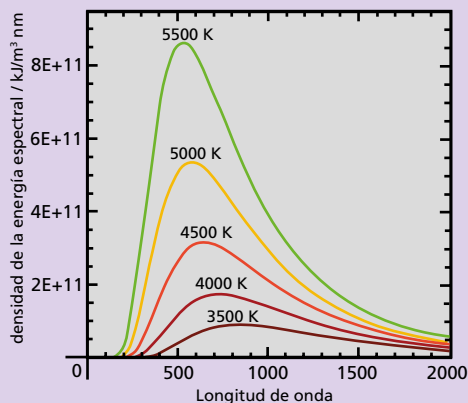


Fig. 3.8

### + ¿Sabías que...?

#### Efecto invernadero y calentamiento global

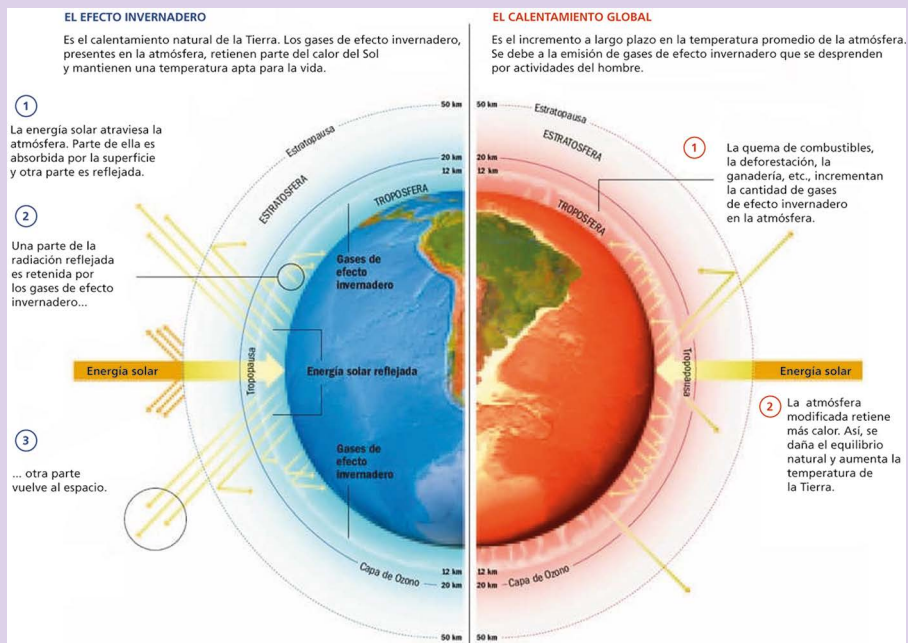
Una parte de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra regresa al espacio reflejada por la atmósfera, otra parte llega a la superficie de la Tierra y calienta el suelo, que entonces emite radiación en la región infrarroja (calor), que en parte es retenido por los gases de la atmósfera, llamados de efecto invernadero, y en parte escapa al espacio. Esta parte de la radiación retenida es la que causa el llamado efecto invernadero, por analogías con los invernaderos artificiales empleados en la jardinería o la agricultura.

El efecto invernadero es un proceso natural que contribuye a mantener el equilibrio térmico en la superficie de la Tierra; de no existir la temperatura de equilibrio de la Tierra esta sería de alrededor de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la vida no podría existir, al menos en la forma que la conocemos. Gracias al efecto invernadero, la temperatura promedio en la superficie de la Tierra es de alrededor de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

¿Qué pasaría si la atmósfera de la Tierra irradia hacia abajo mayor energía que la que absorbe? ¿Cómo influye este desequilibrio en la temperatura de la Tierra?

Si la concentración de estos gases de efecto invernadero en la atmósfera aumenta, la radiación de energía hacia la Tierra aumenta y esto hace que la temperatura del planeta aumente.

El aumento de los gases de efecto invernadero, como consecuencia de la actividad humana, es una de las causas del proceso de calentamiento global (figura 3.9) que, como se ha estudiado, puede traer consecuencias desastrosas para la naturaleza y en consecuencia para toda la humanidad.



**Fig. 3.9**

Para conocer más sobre estos importantes fenómenos se sugiere visitar:

[https://www.ecured.cu/Efecto\\_invernadero](https://www.ecured.cu/Efecto_invernadero)

<https://www.ecured.cu/Calentamiento.Global>

## Aplicaciones

1. Existe un tipo de termómetro que se utiliza en las industrias de fundición de metales llamado Pirómetro óptico, que funciona con la radiación del cuerpo incandescente. Cuando el color de la luz emitida por el cuerpo coincide con el color de la luz del filamento del termómetro, se conoce la temperatura del cuerpo radiante (figura 3.10).



**Fig. 3.10**

2. En la terapia médica suele emplearse la radiación infrarroja, utilizando su acción térmica. El efecto curativo se obtiene de la radiación infrarroja de longitudes de onda próximas a la región visible del espectro electromagnético, para lo cual se emplean lámparas especiales.
3. La fotografía infrarroja permite conocer el perfil de temperatura durante diferentes procesos. La figura 3.11 muestra fotografía infrarroja de un neumático durante ensayos de calidad.



**Fig. 3.11**



## Comprueba tus conocimientos

1. ¿En qué consiste el fenómeno de la radiación térmica?
2. ¿Por qué los cuerpos a pesar de radiar energía pueden encontrarse en equilibrio térmico?
3. ¿Qué es un cuerpo negro?
4. ¿En qué consiste la catástrofe ultravioleta?
5. ¿Qué suposición tuvo que hacer Planck para resolver el problema de la catástrofe ultravioleta de la radiación del cuerpo negro?
6. Calcula la energía de un cuanto de frecuencia  $4,0 \cdot 10^{14}$  Hz. Expresa el resultado en Joule y en electronvoltio. Ten en cuenta que  $1,0 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ J}$ .
7. Compara la energía de un cuanto infrarrojo con la energía de un cuanto ultravioleta. Justifica tu respuesta.
8. Describe brevemente los procesos de absorción y emisión de la energía en la Tierra.
9. ¿Por qué en la actualidad el calentamiento de la Tierra es un factor que interviene en su cambio climático?
10. ¿Por qué el efecto invernadero es esencial para la vida en nuestro planeta?
11. Relaciona varias causas del incremento de los gases de efecto invernadero.

## 3.2 Efecto fotoeléctrico. Leyes empíricas y explicación teórica

La teoría de Planck de la radiación, cuyos fundamentos ya se analizaron someramente en el epígrafe anterior, se apartaba tanto de las ideas clásicas a las que los físicos estaban acostumbrados, que encontró una gran oposición. Sin embargo, esta teoría no solo sirvió como punto de partida para explicar el fenómeno de la radiación térmica,

sino que también contribuyó a darle solución a varios problemas en los cuales la física clásica falla. Uno de esos problemas fue el efecto fotoeléctrico.

Curiosamente, el primer paso que condujo al descubrimiento del efecto fotoeléctrico y, por lo tanto, a la revisión de la teoría electromagnética de la luz, fue una observación incidental del científico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) durante sus trabajos de investigación, en el año 1887, que proporcionaron la confirmación experimental de la teoría electromagnética de Maxwell.

Hertz observó que entre dos esferas sometidas a una diferencia de potencial saltaba con más facilidad una chispa eléctrica si eran iluminadas con rayos ultravioletas.

Las experiencias realizadas por el físico alemán W. Hallwach (1859-1922) y, en particular, las llevadas a cabo por el científico ruso y profesor de la Universidad de Moscú A. G. Stolietov (1839-1896), en los años 1888-1889, esclarecieron la esencia de este fenómeno. Bajo la acción de los rayos ultravioletas se desprenden partículas con carga negativa de la superficie del metal, lo cual facilita la producción de una chispa eléctrica.

Con posterioridad se realizaron experimentos en los que se comprobó que las partículas con carga negativa, emitidas por la superficie del metal, eran electrones, y se les llamó fotoelectrones.

Al fenómeno de extracción de los electrones al incidir luz sobre una superficie metálica se le denomina *efecto fotoeléctrico externo*.

Analicemos ahora cuáles son las principales regularidades experimentales de este fenómeno, conocidas como leyes empíricas del efecto fotoeléctrico.

Si hacemos incidir luz monocromática sobre el cátodo de un dispositivo como el que se muestra en la figura 3.12 y medimos con un voltímetro la tensión entre los electrodos y con un galvanómetro la corriente (que recibe el nombre de corriente fotoeléctrica o fotocorriente), y construimos la característica voltampérica para diferentes iluminancias (la unidad de iluminancia en el SI es el lux), se obtienen las gráficas representadas en la figura 3.13.

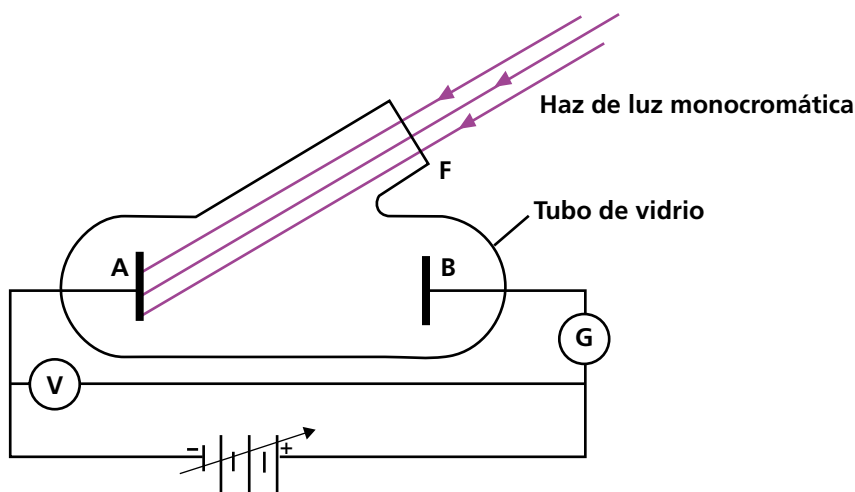


Fig. 3.12

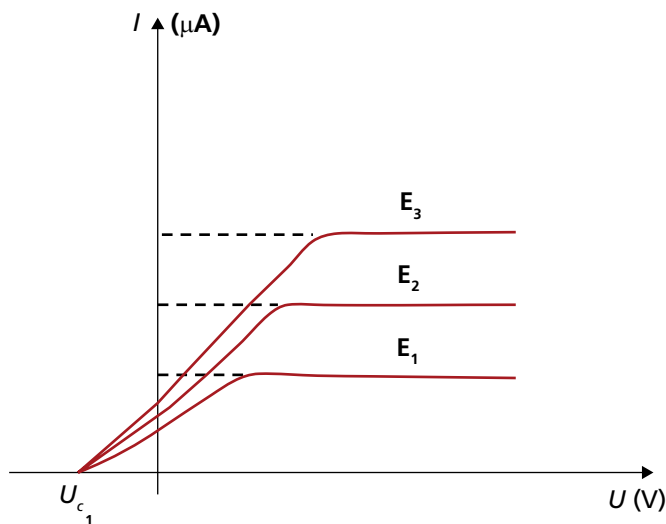


Fig. 3.13

De la característica voltampérica se observa que, al aumentar la tensión para una misma iluminancia, aumenta la intensidad de la fotocorriente hasta alcanzar la saturación, es decir, por mucho que aumente la tensión la intensidad de la corriente se mantiene constante. También vemos que, para una misma tensión, la intensidad de la fotocorriente y, por lo tanto, el número de electrones desprendidos en la unidad de tiempo, aumenta cuando la iluminancia sobre la superficie es mayor. En esto consiste la primera ley empírica del efecto fotoeléctrico:

Al aumentar la iluminancia, aumenta el número de fotoelectrones emitidos por el metal en la unidad de tiempo.

De la figura 3.13 también se puede concluir que cualquiera que sea la iluminancia de la luz monocromática utilizada, la fotocorriente se anula para la misma tensión, llamada tensión de corte. Esto nos hace concluir que, para la misma luz monocromática es necesario realizar el mismo trabajo para detener los fotoelectrones, independientemente del valor de la iluminancia. Este hecho constituye la segunda ley empírica del efecto fotoeléctrico:

La energía cinética máxima de los fotoelectrones no depende de la iluminancia.

De acuerdo con lo antes expuesto, la relación entre la tensión de corte y la energía cinética máxima de los fotoelectrones estará dada por la ecuación:

$$eU_c = \frac{1}{2}mv_{máx}^2 = E_{c\ máx} \quad (3.2)$$

Donde  $U_c$  es la tensión de corte,  $e$  la carga del electrón,  $m$  la masa del electrón y  $v$  la velocidad máxima de los electrones.

Si mantenemos constante la iluminancia que incide sobre el cátodo del circuito representado en la figura 3.12, pero variamos la frecuencia de la radiación incidente, obtendremos una gráfica como la representada en la figura 3.14.

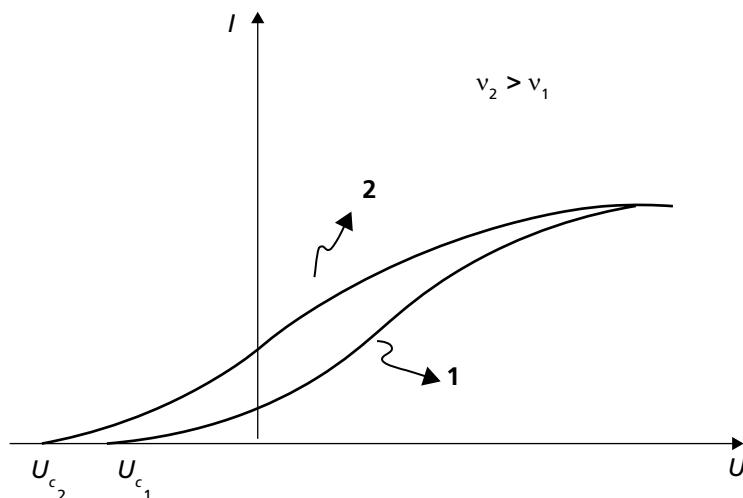
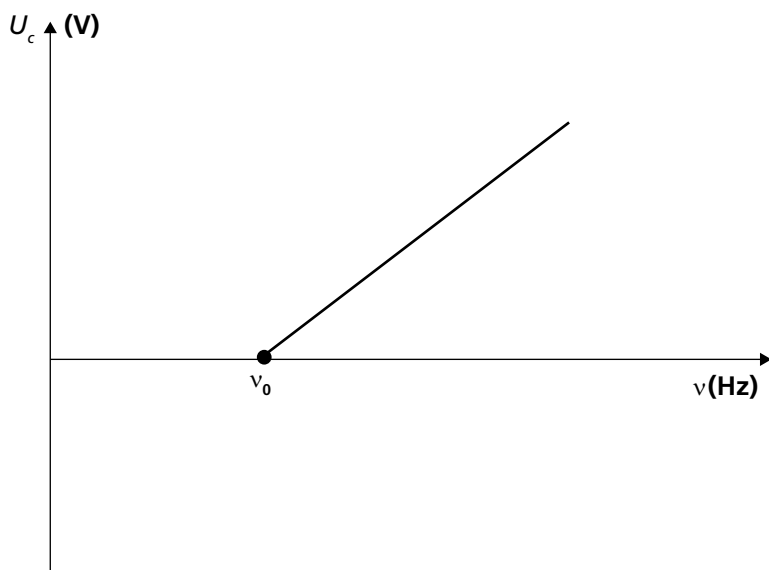


Fig. 3.14

El análisis de esta gráfica nos revela que, al aumentar la frecuencia de la radiación, aumenta la energía cinética máxima de los fotoelectrones. Para establecer la forma de esta dependencia, se puede construir una gráfica de la variación de la tensión de corte con la frecuencia (figura 3.15).



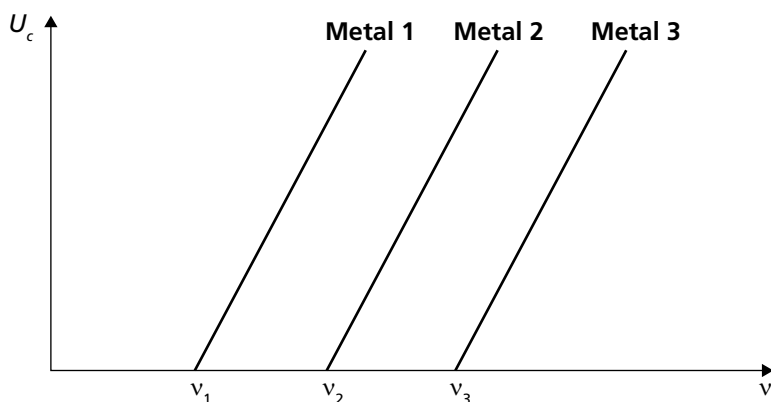
**Fig. 3.15**

A partir de la gráfica representada en la figura 3.15 se puede establecer que la dependencia es lineal, lo cual constituye la tercera ley empírica del efecto fotoeléctrico:

La energía cinética máxima de los fotoelectrones depende de forma lineal de la frecuencia de la radiación incidente.

Del análisis de la gráfica de la figura 3.15 también podemos concluir que existe una frecuencia  $\nu_0$  para la cual la energía cinética máxima de los fotoelectrones se hace cero. Esta frecuencia recibe el nombre de frecuencia umbral, frecuencia de corte o límite rojo del efecto fotoeléctrico. Para una frecuencia menor que  $\nu_0$  no se produce el efecto fotoeléctrico; cualquiera que sea la iluminancia de la radiación incidente.

Otro resultado experimental se obtuvo al cambiar el metal del cátodo del dispositivo de la figura 3.12 y determinar cómo varía, para cada metal, la tensión de corte al variar la frecuencia. Se obtuvo una familia de curvas como la que se muestra en la figura 3.16 para tres metales diferentes.



**Fig. 3.16** La frecuencia de corte o frecuencia umbral depende del metal

De estos resultados se puede establecer la cuarta ley empírica del efecto fotoeléctrico:

La frecuencia umbral es característica de cada metal.

En la mayoría de los metales la frecuencia umbral se encuentra en la zona ultravioleta, aunque hay algunos para los cuales está en la región visible del espectro.

Experimentalmente se ha comprobado que cuando la luz incidente tiene una frecuencia igual o mayor que la umbral, por muy pequeña que sea la iluminancia energética, los electrones son arrancados sin retraso sensible (al menos es menor que  $3,0 \cdot 10^{-9}$  s). Esto nos permite establecer la quinta ley empírica:

El efecto fotoeléctrico se produce casi instantáneamente después de ser iluminada la superficie del cuerpo.

Los físicos de la época trataron de explicar el efecto fotoeléctrico con la herramienta que poseían: la física clásica.

De acuerdo con la teoría electromagnética de la luz debía ocurrir lo siguiente:

1. Al aumentar la iluminancia sobre la superficie, aumenta la energía que llega a esta en la unidad del tiempo y, por lo tanto, se incrementa el número de electrones que son arrancados del metal; es decir, debe aumentar la fotocorriente.
2. Al incidir la luz sobre el metal, los electrones absorben energía luminosa y aumenta su energía cinética. Así, los electrones que estén situados de forma tal que empleen la menor cantidad de energía para vencer

las fuerzas que los mantienen ligados al metal serán los que saldrán con una energía cinética máxima. Al aumentar la iluminancia energética de la superficie los electrones absorben más energía y, por lo tanto, la energía cinética máxima de salida de los electrones aumenta.

3. La energía de la onda electromagnética no depende de la frecuencia de esta. Por lo tanto, cualquiera que sea la frecuencia ( $\nu$ ) de la luz, esta debe arrancar electrones de cualquier superficie metálica.
4. En una onda electromagnética la energía está distribuida uniforme y continuamente en el frente de onda. Los cálculos indican que con una baja iluminancia se requeriría algún tiempo antes de que se hubiese acumulado energía suficiente para arrancar un electrón de la superficie.

Se puede concluir, comparando las “predicciones” de la teoría electromagnética con los resultados experimentales sobre el efecto fotoeléctrico, que solamente el aumento de la fotocorriente con el incremento de la iluminancia concuerda con la teoría. El resto está en franca contradicción.

¿Cómo explicar que la velocidad con que son separados del metal los fotoelectrones dependen de la frecuencia de la radiación incidente y no de la iluminancia?

¿Qué explicación tiene la existencia de la frecuencia umbral, y la extracción sin retraso de los fotoelectrones, aunque la iluminancia sea muy baja?

La solución de estos problemas se obtuvo, en 1905, cuando el físico alemán Albert Einstein retomó las ideas de Planck, y consideró que la energía luminosa no solo se emitía en forma discreta, sino que también se transmitía en forma de cuantos de energía

$$E = h\nu \quad (3.3)$$

(donde  $h$  es la constante de Planck). Es decir, planteó que la energía luminosa se transmitía concentrada o localizada en pequeñas regiones (como en bolsas o paquetes de energía), distribuidas en todo el frente de onda. A estos “paquetes” de energía o cuantos luminosos se les llamó fotones.

Analicemos cómo la teoría de Einstein explica el efecto fotoeléctrico.

De acuerdo con la teoría cuántica de la luz, al incidir un fotón en una sustancia solo interactúa con un electrón entregándole toda su energía. Una parte de ella es utilizada por el electrón en la realización del trabajo necesario para salir del metal, y la otra parte le comunica cierta energía cinética.

La menor energía necesaria para sacar a los electrones del metal recibe el nombre de trabajo de extracción  $W_0$ . Aplicando la ley de conservación





Metal	Trabajo de extracción (eV)
Calcio (Ca)	1,9
Potasio (K)	2,0
Sodio (Na)	2,3
Litio (Li)	2,4
Plata (Ag)	4,74

El que los electrones sean arrancados sin retraso sensible está dado porque la energía del fotón es transmitida al electrón en forma directa, como en un choque. “inmediatamente” después de la interacción, el electrón adquiere la energía necesaria para “escapar” del cuerpo.

Por último, queda por explicar con la teoría cuántica el primer resultado experimental analizado: la dependencia de la fotocorriente de la iluminancia energética. Este es el único hecho experimental que pudo explicar la teoría clásica.

De acuerdo con la teoría cuántica, la iluminancia está dada por:

$$E = nh\nu \quad (3.5)$$

donde  $n$  es el número de fotones que inciden normalmente por unidad de área y por unidad de tiempo.

Por lo tanto, si la frecuencia permanece constante, un aumento de la iluminancia implica que aumentó el número de fotones por unidad de área y por unidad de tiempo, como consecuencia aumenta el número de electrones emitidos por cada unidad de área y de tiempo, es decir, aumenta la fotocorriente.

### **Efecto fotoeléctrico interno**

Además del efecto fotoeléctrico que hemos estudiado, existe el llamado efecto fotoeléctrico interno, que se produce en los semiconductores y dieléctricos sólidos y líquidos.

Analicemos brevemente este fenómeno en el caso de los semiconductores. Como sabemos, de onceno grado, la conductividad en los semiconductores está determinada por la concentración de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia, así como de la movilidad de ambos. La absorción de un fotón, siempre que su energía sea mayor que el ancho de la banda de energía de la zona prohibida, trae como consecuencia la aparición

de un par electrón-hueco y, por lo tanto, un aumento de la conductividad. En algunos semiconductores el efecto se produce a muy baja frecuencia, llegando a manifestarse incluso con radiaciones infrarrojas. Esto y otras propiedades como, por ejemplo, las pequeñas dimensiones de los fotoelementos que utilizan este efecto, su largo plazo de servicio y la simplicidad relativa de su fabricación, hacen muy ventajosa la utilización de este tipo de dispositivos, entre los que se encuentran los fotorresistores y las celdas fotovoltaicas.

Los fotorresistores aprovechan de manera directa la propiedad de los semiconductores de variar su resistencia mediante la acción de la luz al incrementarse la concentración de los portadores de carga, como consecuencia del efecto fotoeléctrico interno.

Las celdas fotovoltaicas o fotoceldas, que son base de la producción de energía solar fotovoltaica y de muchas otras aplicaciones, por ejemplo, los sensores utilizados en las cámaras digitales, son dispositivos (uniones PN), que permiten obtener energía eléctrica a partir de la energía de la luz incidente. Este efecto se denomina efecto fotovoltaico.

Si la energía de la radiación es suficiente para la formación de los pares electrón-hueco en la unión PN, estos son separados por la acción del campo eléctrico interno que se establece en las uniones. La separación de estos portadores ocurre de manera que los electrones se mueven hacia la región N y los huecos hacia la región P, apareciendo de esta forma una diferencia de potencial entre los extremos de las dos regiones, o una corriente a través del circuito externo (figura 3.18).

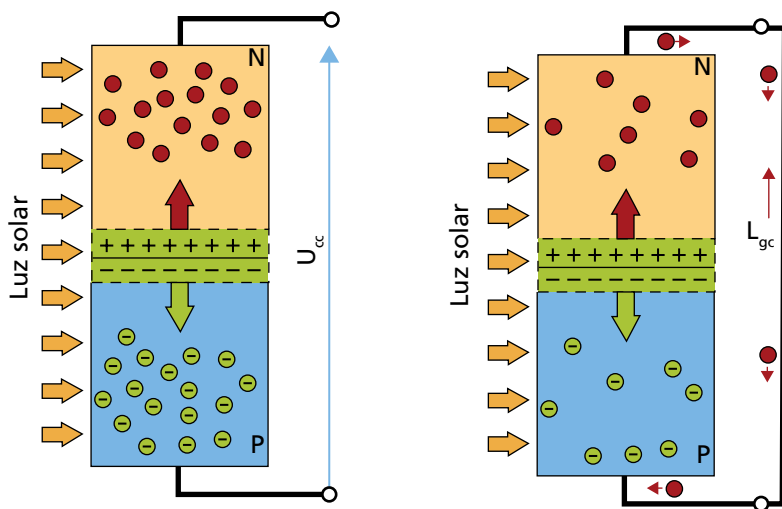


Fig. 3.18

### + ¿Sabías que...?

Robert A. Millikan (1868-1953) físico norteamericano, descubridor de la carga del electrón, llevó a cabo experimentos relacionados con el efecto fotoeléctrico durante diez años y comprobó la ecuación de Einstein para el fotoefecto, determinando experimentalmente el valor de la constante de Planck.

### Problema resuelto 1

La gráfica (figura 3.19) representa la dependencia de la energía cinética máxima de los electrones arrancados de un fotocátodo con la frecuencia de la radiación. Con los datos que aparecen, determina:

- La energía cinética máxima de los electrones cuando incide una radiación de longitud de onda igual a  $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ .
- La tensión de corte que se requiere para anular la fotocorriente.
- Si se utilizara otra radiación luminosa de menor longitud de onda para iluminar el fotocátodo ¿cómo se debe variar la tensión de frenado? Explica.
- ¿Dependerá el nuevo valor de la tensión de frenado, del valor de la iluminancia de la nueva radiación utilizada? Explica.

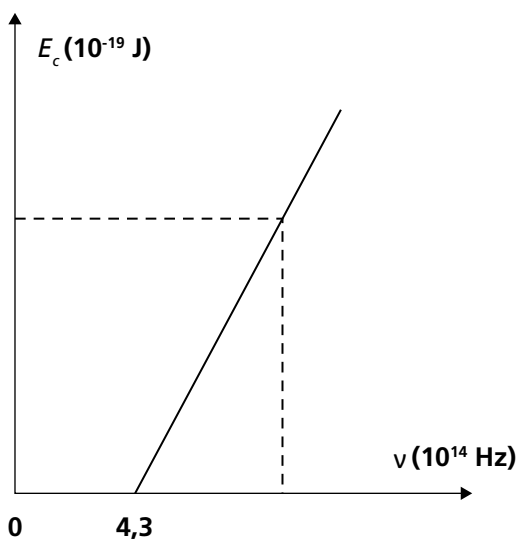


Fig. 3.19

*Solución:*

- a) Analizando la gráfica, podemos conocer el valor de la frecuencia umbral o mínima de la luz para extraer los electrones del fotocátodo y calcular el valor de la energía cinética máxima de los electrones emitidos mediante la ecuación:

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = E - W_o$$

Que se puede escribir como:

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = h \frac{c}{\lambda} - h\nu_o$$

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = h \left( \frac{c}{\lambda} - \nu_o \right)$$

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \left( \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}} - 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \right)$$

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} (5,7 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1})$$

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- b) La tensión de corte o frenado se puede determinar directamente a partir de la ecuación:

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = eU_c$$

$$U_c = \frac{E_{c_{m\acute{a}x}}}{e} \quad U_c = \frac{3,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \quad U_c = 2,4 \text{ V}$$

- c) La tensión de corte que se debe utilizar para frenar a los electrones debe ser mayor porque la energía cinética aumentó debido a que la radiación luminosa utilizada tiene mayor frecuencia que la anterior. La energía cinética máxima de los electrones varía de forma lineal con la frecuencia de la radiación.
- d) No depende la tensión de frenado del flujo de la radiación luminosa, sino de la frecuencia de la luz. Por lo tanto, el nuevo valor de la tensión de corte, no varía con el aumento de la iluminancia.

## Aplicaciones

- *Fotorresistencia*: es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de la intensidad de la luz incidente (figura 3.20).
- *Celda fotoeléctrica*: es un dispositivo a través del cual la energía luminosa es transformada en energía eléctrica (figura 3.21).

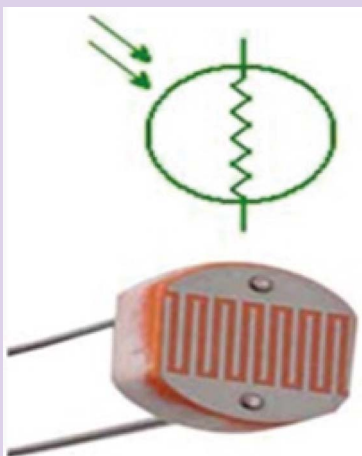


Fig. 3.20

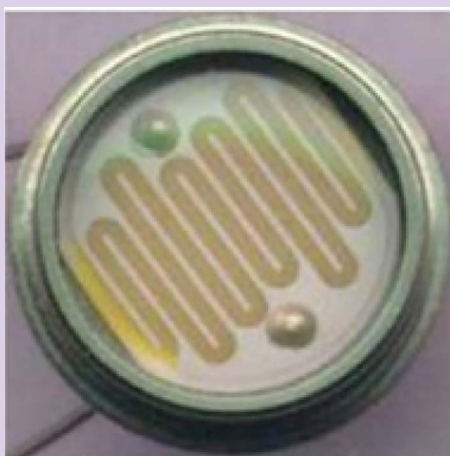


Fig. 3.21

## Comprueba tus conocimientos

12. ¿En qué consiste el fenómeno del efecto fotoeléctrico?
13. ¿Por qué aumenta la conductividad eléctrica en un semiconductor cuando sobre él incide una radiación luminosa?
14. Una fotocelda es iluminada primero con luz azul y después con luz ultravioleta. ¿En qué caso la tensión de frenado será mayor? Explica.
15. ¿Cuáles son las contradicciones entre la teoría electromagnética de la luz y las leyes empíricas del efecto fotoeléctrico?
16. ¿En qué consiste la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico y, sobre esta base, di como se explican los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico?
17. En la gráfica de  $I = f(U)$  de la figura 3.22, se representan tres curvas experimentales obtenidas al iluminar una celda fotoeléctrica con radiaciones de diferente frecuencia así como iluminancia.

- a) ¿Cuál de las curvas fue obtenida con una mayor: iluminancia, frecuencia, longitud de onda?  
b) Explica cada caso.

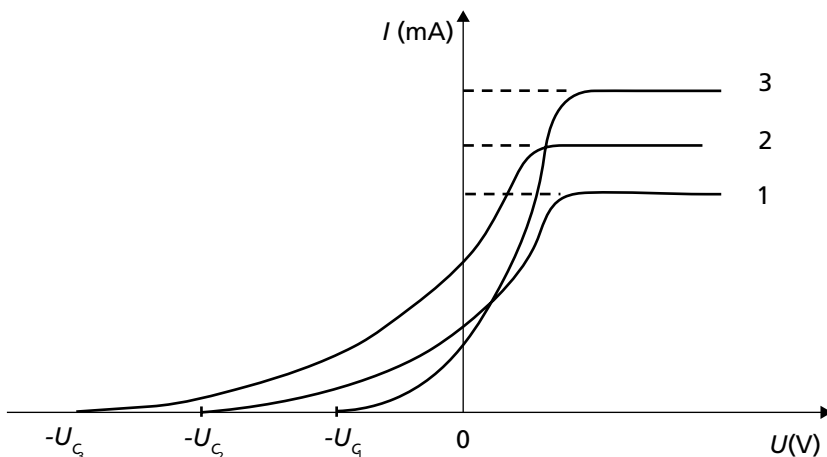


Fig. 3.22

18. En la gráfica de  $E_{c_{m\acute{a}x}} = f(\nu)$  de la figura 3.23, di la magnitud que cambia para cada metal y cuál es la magnitud que permanece constante para cada uno. ¿En cuál de los metales se requiere de menor energía luminosa para que ocurra el fotoefecto?

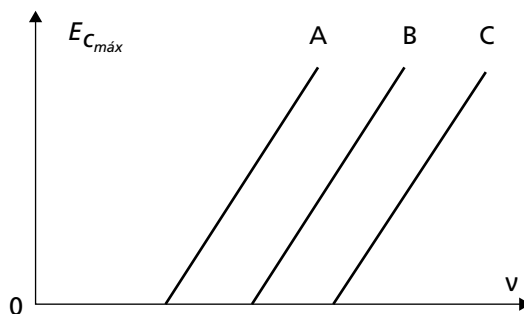


Fig. 3.23

### 3.3 Rayos X

En los epígrafes anteriores, relacionados con la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, se ha puesto de manifiesto el carácter cuántico de la luz en una gama de frecuencias que van desde la zona infrarroja hasta la ultravioleta.

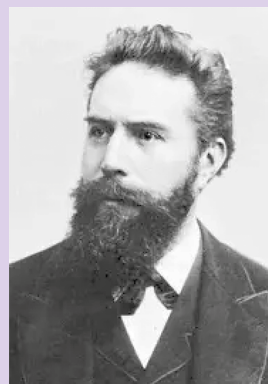
En el oncenso grado nos familiarizamos con el comportamiento de las radiaciones electromagnéticas de menor frecuencia, recordemos los experimentos realizados con los generadores de microondas para el estudio de su propagación, reflexión, refracción, absorción, interferencia, difracción y polarización.

Analicemos ahora las características de las radiaciones de mayor frecuencia, en particular, ¿se pondrá de manifiesto el carácter cuántico de estas radiaciones al igual que en el caso de la luz?

Iniciemos con un poco de historia. En 1895, el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen, al realizar experimentos con el tubo de rayos catódicos, observó que cuando los electrones chocaban contra las paredes del tubo de vidrio, y con el ánodo se obtenía una radiación, que no se debía a los rayos catódicos. Esta radiación la pudo detectar por la fosforescencia de una pantalla tratada a estos efectos. Como estas radiaciones eran de naturaleza desconocida, recibieron el nombre de **rayos X**.

### & De la historia

Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) (figura 3.24) físico alemán que el 8 de noviembre de 1895 produjo radiación electromagnética en las longitudes de onda correspondiente a los actualmente llamados **rayos X**. Por su descubrimiento, en 1901, fue galardonado con el Premio Nobel de Física. La unidad de medida a la exposición de la radiación lleva su apellido.



**Fig. 3.24**

Después de investigar las propiedades de los rayos X, su descubridor llegó a las siguientes conclusiones:

1. Los rayos X se producen cuando los electrones chocan contra un metal pesado.
2. No se desvían al atravesar un campo eléctrico o campo magnético, demostrando que no poseen carga eléctrica.
3. Poseen la capacidad de penetrar cuerpos sólidos.
4. Los fenómenos de la reflexión y refracción de los rayos X no ocurren apreciablemente al incidir en la sustancia.

En los comienzos del siglo xx había evidencias de que los rayos X tenían una naturaleza ondulatoria como la de la luz y que su longitud de onda era muy pequeña, del orden de 0,1 nm. Pero no fue hasta 1912 que el físico alemán Max Von Laue (1879-1960) logró difractar los rayos X y demostrar con ello su naturaleza ondulatoria.

Suponiendo que los rayos X no se podían difractar mediante las redes empleadas ordinariamente para la luz visible, debido a su pequeña longitud de onda, Laue propuso utilizar en calidad de red de difracción para los rayos X la estructura de un cristal, pues en ellos los átomos se encuentran dispuestos regularmente y separados a distancias del orden de los 0,1 nm

En la práctica, Laue logró la difracción de los rayos X haciendo pasar un haz estrecho a través de un cristal de ZnS (sulfuro de zinc). Colocando detrás de este cristal una placa fotográfica (figura 3.25), obtuvo una distribución de puntos oscuros como la que se muestra en la figura 3.26. Los puntos corresponden a los lugares donde incidieron los rayos X, después de atravesar el cristal. Esta figura es un patrón de difracción.

El fenómeno de la difracción de los rayos X, junto con el de su polarización, descubierta por el físico inglés Charles G. Barkla (1877-1944), permitió establecer que los rayos X eran ondas electromagnéticas de longitudes de onda muy pequeñas. Este carácter ondulatorio y electromagnético estaba de acuerdo con la teoría clásica, pues según la electrodinámica clásica una partícula cargada acelerada produce radiación electromagnética. En este caso, los cuerpos cargados eléctricamente acelerados son los electrones, que disminuyen su velocidad al chocar con el ánodo del tubo de rayos catódicos. Por eso a estos rayos X se les llama de radiación de frenado.

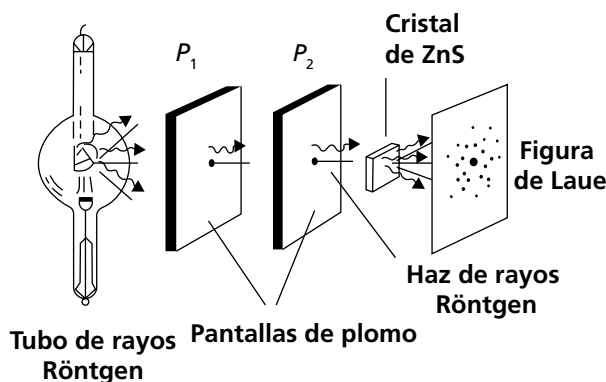


Fig. 3.25

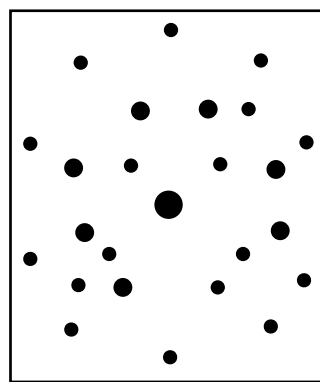


Fig. 3.26



El descubrimiento de la difracción de los rayos X, realizado por Laue, permitió el inicio de la cristalografía de rayos X, que es una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales, basada en el fenómeno de *difracción* de los rayos X por sólidos en estado *crystalino*.

Al estudiar la intensidad de los rayos X, en función de la longitud de onda, se descubrió que existía un valor mínimo de longitud de onda a partir del cual la intensidad se anula, es decir, que no hay rayos X con longitudes de onda menores que ese mínimo. A ese  $\lambda_{\min}$  se le llama límite de onda corta de los rayos X.

También se comprobó experimentalmente que  $\lambda_{\min}$  depende de la energía cinética de los electrones incidentes. En la figura 3.27 se representa el comportamiento descrito, donde  $E_{c_1}$ ,  $E_{c_2}$ ,  $E_{c_3}$  es la energía de los electrones incidentes en cada caso y  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$ , el límite de onda corta de los rayos X producidos.

Este hecho experimental entra en contradicción con la electrodinámica clásica pues, según ella, al frenarse los electrones deben emitirse ondas electromagnéticas de todas las longitudes de onda. Sin embargo, el límite de onda corta se explica perfectamente teniendo en cuenta el carácter cuántico de la radiación electromagnética.

Si los rayos X se producen a expensas de la energía del electrón que choca con el ánodo, el fotón de rayos X no se puede llevar más energía que la del electrón, por lo tanto:

$$h\nu \leq \frac{mv^2}{2}$$

Entonces la frecuencia máxima debe ser tal que:

$$h\nu_{\max} \leq \frac{mv^2}{2}$$

De manera que:

$$\nu_{\max} = \frac{\frac{mv^2}{2}}{h}$$

De donde, tomando en cuenta que  $\nu = \lambda c$ , se obtiene que:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{\frac{mv^2}{2}} \quad (3.6)$$



- *Medicina:* para detectar fracturas, cáncer de mama (mamografía), neumonía, objetos extraños, problemas dentales y otros usos. En la figura 3.29 se muestra una radiografía de mano.
- *Ciencia:* cristalografía de rayos X. En la figura 3.30 se muestra el patrón de difracción de una estructura icosaédrica.
- *Control:* para controlar de manera rápida y efectiva bultos y equipajes en puertos y aeropuertos, y en general del tráfico de mercancías.

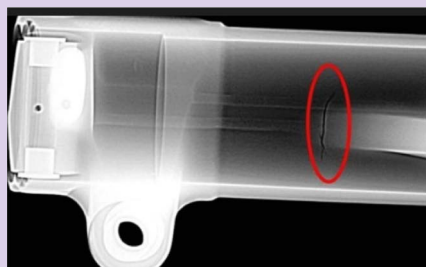


Fig. 3.28



Fig. 3.29

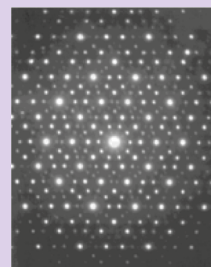


Fig. 3.30

## Comprueba tus conocimientos

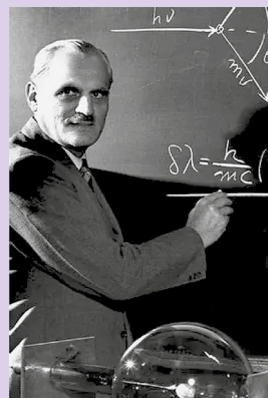
19. Explica de qué forma pueden obtenerse los rayos X.
20. ¿Por qué se puede afirmar que los rayos X no poseen carga eléctrica?
21. ¿Por qué los rayos X se difractan fácilmente en los cristales y no en las redes de difracción para la luz visible?
22. ¿A qué se denomina límite de onda corta de los rayos X?
23. ¿Cuál es la explicación cuántica de la existencia del límite de onda corta de los rayos X?

## 3.4 Efecto Compton

El descubrimiento del fenómeno denominado efecto Compton contribuyó de forma decisiva a la consolidación de la idea sobre la naturaleza cuántica de la luz y al establecimiento de la física cuántica en sentido general.

## & De la historia

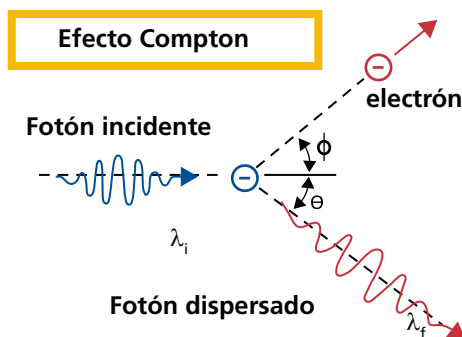
Arthur H. Compton (1892-1962) (figura 3.31), físico estadounidense. Fue galardonado con el Premio Nobel de Física, en 1927, por el descubrimiento del fenómeno de la dispersión de los rayos X y sus investigaciones sobre la reflexión, polarización y espectro de los rayos X y de los rayos cósmicos.



**Fig. 3.31**

El efecto Compton consiste en que al interactuar con los electrones la luz dispersada tiene una longitud de onda mayor que la esperada según la teoría electromagnética.

Para explicar este fenómeno, Compton supuso que los rayos X incidentes eran fotones de frecuencia  $\nu$  con una energía  $E = h\nu$  y cantidad de movimiento  $p = \frac{h\nu}{c}$  antes de chocar con el electrón de la sustancia dispersora. Consideró que antes del choque, el electrón se encontraba en reposo y después del choque el electrón se movía con una parte de la energía del fotón incidente, teniendo el fotón dispersado menor energía, menor frecuencia y mayor longitud de onda (figura 3.32).



**Fig. 3.32**

Esta explicación coincidía con la medición de la longitud de onda del fotón dispersado ( $\lambda'$ ) y no podía considerarse a los rayos X como una onda.

Si los rayos X tuviesen comportamiento ondulatorio cuando se origina el choque con el electrón, este último debiera oscilar con la misma frecuencia de la onda incidente y comenzar a emitir radiación de igual frecuencia, y entonces no varía la longitud de onda de la radiación X dispersada.

Utilizando las ecuaciones relativistas de la energía y de la cantidad de movimiento, así como las leyes de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía en la interacción fotón-electrón, se puede obtener la ecuación que permite calcular el valor de la longitud de onda de los fotones dispersados:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \cos\varphi) \quad (3.7)$$

Donde  $\lambda_c = 0,0024 \text{ nm}$  es la llamada longitud de onda de Compton y  $\varphi$ : ángulo de dispersión.

### Aplicaciones

El efecto Compton es lo que permite conocer información detallada sobre la composición y densidad de los tejidos, creando imágenes tridimensionales de alta resolución (figura 3.33) que son claves para la medicina.



Fig. 3.33

### Problema resuelto 3

Un fotón de rayos X de frecuencia  $8,6 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$  choca elásticamente con un electrón que se encuentra en reposo y es dispersado con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la dirección del fotón incidente. Calcula el valor de la longitud de onda del fotón dispersado.

*Solución:*

El valor de la longitud de onda del fotón X dispersado se puede calcular a partir de la ecuación 3.7:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \cos\varphi)$$

Como  $\lambda' = \frac{c}{\nu'}$ , esta ecuación se puede escribir en la forma:

$$\lambda' = \frac{c}{\nu'} + \lambda_c (1 - \cos\varphi)$$

Sustituyendo por los datos se obtiene que:

$$\lambda' = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8,6 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} + 0,0024 \cdot 10^{-9} \text{ m} (1 - \cos 45^\circ)$$

$$\lambda' = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8,6 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} + 0,0024 \cdot 10^{-9} \text{ m} (1 - \cos 45^\circ)$$

$$\lambda' = 0,0357 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0,0357 \text{ nm}$$

### Comprueba tus conocimientos

24. Di en qué consiste el efecto Compton.
25. ¿Cuáles son las leyes de conservación que se manifiestan en la dispersión de los rayos X?
26. Explica el aumento de la longitud de onda del fotón dispersado al chocar con el electrón.
27. En el efecto Compton con una radiación X de un valor de longitud de onda definida, ¿para qué ángulo de dispersión los fotones dispersados poseen la mayor longitud de onda?

## 3.5 Carácter dual de las radiaciones electromagnéticas

La explicación, entre otros, del fenómeno de la radiación térmica, del efecto fotoeléctrico y del efecto Compton condujo a considerar a las radiaciones electromagnéticas, como un flujo de partículas, finalmente se denominarían fotones. Esto significó una reconsideración de la teoría corpuscular, pero no un retorno a la concepción newtoniana, pues los fotones tienen características muy peculiares. Por ejemplo, además de poseer cantidad de movimiento  $p$ , tienen frecuencia  $\nu$  y energía  $E = h\nu$ .

Surge de inmediato una pregunta; ¿cuál es la cantidad de movimiento de los fotones?

Al inicio del capítulo planteamos que las radiaciones electromagnéticas tenían un doble comportamiento. En experimentos como la interferencia, difracción, polarización y otros de la luz visible y los rayos X, las radiaciones electromagnéticas se comportan como ondas que se propagan con una velocidad de  $3,0 \cdot 10^8$  m/s en el vacío.

Pero se ha demostrado, en este capítulo, que las radiaciones electromagnéticas también tienen un comportamiento corpuscular para poder explicar fenómenos como la radiación térmica de los cuerpos, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton. La teoría corpuscular de Newton sobre la luz planteaba que esta era un flujo de partículas que poseen una masa determinada y no explicaba la propagación rectilínea de los rayos luminosos cuando se interceptan en un punto. La teoría corpuscular de Einstein consideró a las radiaciones electromagnéticas como partículas llamadas fotones que no tenían masa en reposo, sino energía, frecuencia y cantidad de movimiento.

¿Cuál es la relación entre la frecuencia y la cantidad de movimiento de un fotón?

De acuerdo con la teoría de la relatividad:

$$p = \frac{Ec}{c^2} \qquad p = \frac{EV}{c^2}$$

Por lo tanto, para los fotones se tendrá que;

$$p = \frac{h\nu c}{c^2}$$

De donde se obtiene que:

$$p = \frac{h}{\lambda} \qquad (3.8)$$

Las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz no deben interpretarse como contradictorias. La luz es un ente físico que no es ni onda ni partícula, sino que posee propiedades ondulatorio-corpusculares. Es decir, la luz posee tanto propiedades ondulatorias como corpusculares. En esto consiste el carácter dual de las radiaciones electromagnéticas.

## Comprueba tus conocimientos

- 28.** Di en qué consiste el carácter ondulatorio-corpuscular de la radiación electromagnética.

29. Determina el valor de la energía y de la cantidad de movimiento de un fotón de color rojo de longitud de onda igual a 750 nm.

## Problemas generales del capítulo

1. Determina el valor del cuanto energético de una radiación luminosa de longitud de onda igual a  $5,0 \cdot 10^{-7}$  m.
2. Calcula el número de fotones absorbidos de una radiación luminosa de frecuencia  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz, por la superficie de un metal si la radiación utilizada tiene una energía igual a 4 965 J.
3. Calcula el valor de la energía cinética de un electrón, si se requiere una tensión de corte igual a 3,0 V. Expresa el resultado en joule y electronvolt.
4. Calcula el trabajo de extracción de una sustancia si se conoce que la frecuencia umbral es de  $6,0 \cdot 10^{14}$  Hz.
5. Determina la frecuencia umbral para el primer metal que aparece en la tabla de la figura 3.17.
6. Calcula la frecuencia de la radiación luminosa con la cual se ilumina una superficie, si la energía cinética máxima de los fotoelectrones es  $9,9 \cdot 10^{-20}$  J, siendo el trabajo de extracción de 4,75 eV.
7. La gráfica de la figura 3.34 representa la dependencia de la energía cinética máxima de los fotoelectrones con la frecuencia de la radiación luminosa para dos metales diferentes A y B.
  - a) ¿En cuál de los metales los electrones requieren de mayor energía para salir del metal? Justifica.
  - b) Calcula la energía cinética máxima de los fotoelectrones del metal B al ser iluminada con una radiación de frecuencia  $3,0 \cdot 10^{15}$  Hz.

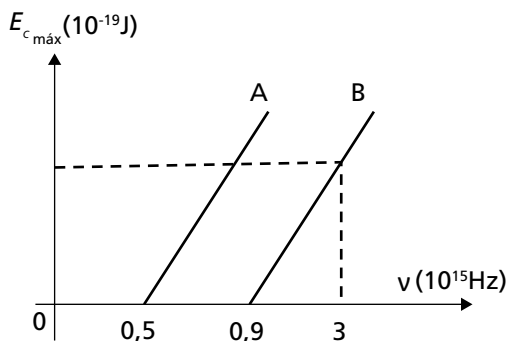


Fig. 3.34



8. La siguiente gráfica (figura 3.35) muestra la dependencia de la energía cinética de los fotoelectrones con la frecuencia de la luz que incide sobre el metal.

- a) ¿Cuál es el valor del trabajo de salida?  
b) ¿Cuál es la frecuencia límite del fotoefecto para ese metal?

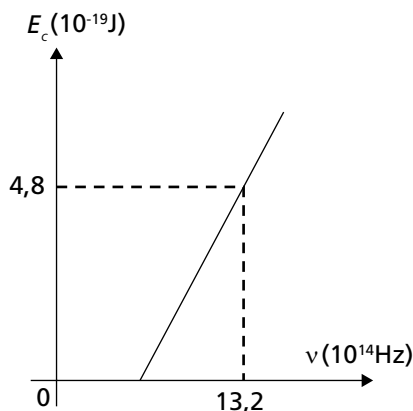


Fig. 3.35

9. Una luz de longitud de onda 430 nm extrae de cierto metal electrones cuyas energías cinéticas tienen valores comprendidos entre cero y  $1,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Determina el trabajo de extracción de este metal.
10. La mínima energía requerida para extraer un electrón del sodio es de 2,3 eV. ¿Muestra el sodio efecto fotoeléctrico para la luz anaranjada de longitud de onda 680 nm? Fundamenta tu respuesta realizando el cálculo correspondiente.
11. La frecuencia umbral de cierto metal es la que corresponde con una radiación de longitud de onda  $8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . Si esa sustancia se ilumina con una radiación de longitud de onda de  $2,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ , calcula:  
a) La energía cinética de los fotoelectrones emitidos.  
b) La tensión de corte.
12. Al producirse el efecto fotoeléctrico en una superficie de platino ( $W_0 = 5,3 \text{ eV}$ ), la tensión de corte resultó ser 0,8 V. Halla:  
a) La longitud de onda de la radiación que se utilizó.  
b) La longitud de onda máxima con la cual aún se consigue el fotoefecto.
13. El trabajo de salida de un electrón de la superficie de un metal es  $2,64 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ :

- a) Determina los valores límites del fotoefecto para la longitud de onda y la frecuencia.
- b) Si sobre el metal incide una radiación de frecuencia igual a  $8,0 \cdot 10^{14}$  Hz, ¿se producirá el fotoefecto? Argumenta tu respuesta.
- c) Si se hace más intenso el haz luminoso anterior manteniendo constante la frecuencia, ¿Qué le sucederá a la fotocorriente de saturación? Argumenta tu respuesta.
- d) Bajo las mismas condiciones haz un análisis para la tensión de corte.
- 14.** Sobre una superficie de aluminio incide luz de longitud de onda 200 nm. En el aluminio se requieren 3,7 eV para extraer electrones.
- a) ¿Cuál es la energía cinética del fotoelectrón más rápido?
- b) ¿Cuál es el valor del potencial de corte?
- c) ¿Cuál es la longitud de onda umbral del aluminio?
- 15.** El efecto fotoeléctrico para cierto metal comienza cuando la frecuencia de la luz incidente es igual a  $10^{15}$  Hz. Calcula el valor de la tensión de corte cuando el metal se ilumina con una radiación de  $10^{-7}$  m de longitud de onda.
- 16.** La mínima energía requerida para extraer un electrón del sodio es de 2,3 eV. ¿Ocurrirá el efecto fotoeléctrico en el sodio cuando se ilumina con luz de 680 nm? Argumentar realizando el cálculo correspondiente.
- 17.** En la gráfica de la figura 3.36 se representa la intensidad de los rayos X en función de la longitud de onda, producidos al bombardear un ánodo de wolframio con tres haces electrónicos de diferente energía cinética. Determina el valor que le corresponde al límite de onda corta  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  de cada uno de los rayos X.

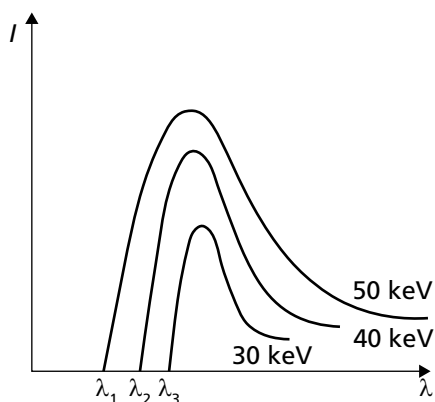


Fig. 3.36

18. La velocidad máxima de los electrones ( $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg) que inciden en el ánodo de un tubo de rayos X es de  $1,0 \cdot 10^7$  m/s. Calcula la frecuencia máxima de los rayos X producidos.
19. Las radiaciones que emite un tubo de rayos X tienen un límite de onda corta de 10 nm. Calcula el valor del potencial acelerador utilizado.
20. Calcula la velocidad máxima de los electrones acelerados para obtener rayos X que posee un límite de onda corta igual a 12,4 nm.
21. Un haz de rayos X de longitud de onda 0,0558 nm es dispersado con un ángulo de  $45^\circ$  al chocar elásticamente con un electrón. Determina el valor de la longitud de onda del haz dispersado.
22. Fotones de rayos X de longitud de onda igual a  $10^{-11}$  m colisionan con electrones libres de un metal y son dispersados con un ángulo de  $90^\circ$ . Determina la frecuencia de los fotones dispersados.
23. Un haz de rayos X es dispersado por electrones libres. Los rayos dispersados de longitud de onda 220 nm, se encuentran en una dirección que forma un ángulo de  $30^\circ$  con respecto a la dirección del haz incidente. Determina la frecuencia de los rayos X del haz incidente.



# CAPÍTULO 4

## Física del átomo

La Física Atómica es un fascinante campo de estudio que nos sumerge en el mundo microscópico de los átomos, las unidades fundamentales de las que están formados todos los cuerpos. En esta rama de la física exploramos la estructura, las propiedades y el comportamiento de los átomos, revelando un universo de partículas subatómicas, fuerzas fundamentales y fenómenos cuánticos que desafían nuestra intuición cotidiana. Desde los experimentos pioneros de Thomson y Rutherford hasta los avances contemporáneos en la manipulación de átomos individuales, la Física Atómica nos invita a un viaje de descubrimiento en el que la imaginación se combina con la precisión científica, para revelar los misterios de la materia a escalas infinitesimales.

En particular, en este capítulo tendremos la oportunidad de explorar cuestiones como la estructura del átomo, el desarrollo de las ideas sobre la naturaleza del átomo, los trabajos pioneros relacionados con la investigación mediante colisiones nucleares para conocer la estructura del átomo y que en la actualidad son una herramienta básica en la investigación científica, la naturaleza ondulatoria de las partículas subatómicas, la dualidad onda-partícula, la mecánica cuántica y las aplicaciones de esta disciplina en el campo de la medicina, la ingeniería, las artes y la ciencia y la tecnología en sentido general (figura 4.1).



**Fig. 4.1** Imagen de los huesos de una mano obtenida mediante tomografía axial computarizada

¡Puede que lo más importante sea que nos acercaremos a un mundo de partículas, energías y leyes fundamentales que desafiarán y enriquecerán nuestra comprensión del universo que nos rodea! ¡Bienvenidos al apasionante mundo de la Física Atómica!

## 4.1 Primeras concepciones sobre la estructura del átomo. Modelo atómico de Thomson

Desde la antigüedad, los hombres de ciencia (llamados en aquella época filósofos) se interesaron por la estructura interna de los cuerpos. Ya en la antigua Grecia surge el llamado atomismo, una teoría que planteaba que el átomo era la menor porción posible de sustancia y lo consideraban indivisible (de ahí el nombre de átomo, que en griego significa indivisible). El representante principal del atomismo griego fue Demócrito (460 a.n.e.-360 a.n.e.).

Aún en la época de Newton se consideraba a los átomos como esferas diminutas, duras e indestructibles. Si bien este modelo proporcionó una buena base para la teoría cinética de los gases, fue necesario diseñar nuevos modelos cuando los experimentos revelaron la naturaleza eléctrica de los átomos.

Con los avances de la química en el siglo <sup>xviii</sup>, el científico inglés John Dalton (1776-1884) recuperó la idea de los átomos como constituyentes básicos de los cuerpos y enunció un conjunto de propiedades que estos debían tener. Aunque no aportó más información sobre la estructura de los átomos, contribuyó a allanar el camino para los futuros estudios sobre la estructura del átomo.

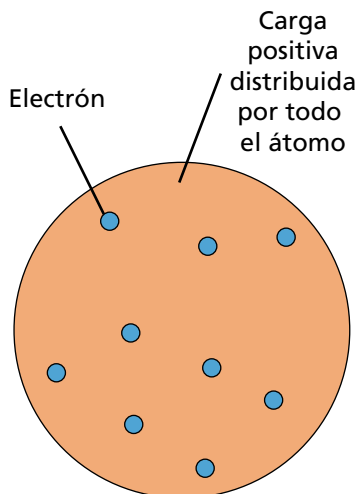
Un paso significativo en el esclarecimiento de la estructura interna de los cuerpos tuvo lugar a finales del siglo XIX, cuando el físico inglés J.J. Thomson (1856-1940) estableció el primer modelo de la estructura compleja del átomo. Thomson se basó en los siguientes hechos:

- Podían obtenerse partículas cargadas negativamente (que él llamó electrones) de las distintas sustancias; esto sugería la idea de que los electrones formaban parte de los átomos.
- Los cuerpos son, normalmente, eléctricamente neutros: es posible suponer entonces que cada átomo debe poseer la misma cantidad de cargas eléctricas positivas y negativas.
- Los electrones son miles de veces más ligeros que los átomos, lo que indica que los constituyentes cargados positivamente deben ser los que poseen casi toda la masa de los átomos.

Sobre la base de estos hechos, Thomson propuso el siguiente modelo:

Los átomos son esferas uniformemente cargadas con carga positiva, en las que se encuentran "empotrados" los electrones. La carga total de los electrones es de igual valor a la de la distribución de carga positiva en la que están "empotrados".

En la figura 4.2 se representa esquemáticamente este modelo atómico.



**Fig. 4.2**

## ¡Cuidado!

En muchas ocasiones se hace referencia a este modelo como el “modelo del pudín con pasas”, es decir, se supone que los electrones están como las pasas en un pudín. Puede que esta no sea una mala imagen, pero tiene el inconveniente de hacer pensar que los electrones están distribuidos al azar (como las pasas en el pudín y esto no es así, de acuerdo con la cantidad de electrones, en este modelo, la distribución de los electrones está condicionada por el propio modelo.

Con este modelo se pueden explicar los hechos relacionados anteriormente y, además, según Thomson, la emisión de luz por los átomos y las propiedades químicas de los elementos de la tabla periódica.

## & De la historia

Joseph John Thomson (figura 4.3). Premio Nobel de Física, en 1906, Thomson es considerado el descubridor del electrón. Su estudio de la reflexión de los rayos catódicos (electrones) en un campo eléctrico inició el campo de la física de las partículas subatómicas.



Fig. 4.3

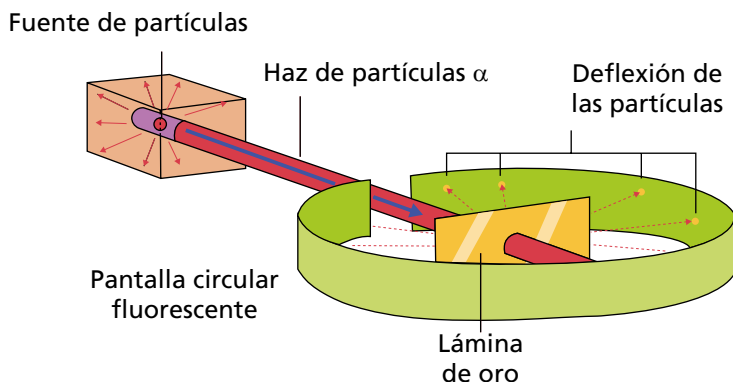
## Comprueba tus conocimientos

1. ¿Qué hechos indujeron a Thomson a formular su modelo del átomo?
2. ¿Cómo era el átomo según J. J. Thomson?
3. Explica, a partir del modelo atómico de Thomson, los hechos que le sirvieron de base para su establecimiento.

## 4.2 Modelo atómico de Rutherford

Pasaron 13 años antes que se realizara una prueba experimental definitiva para comprobar si el modelo de Thomson era válido o no. Para ello, los físicos alemanes H. Geiger (1882-1945) y Marsden bajo la dirección del físico inglés-neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) estudiaron,

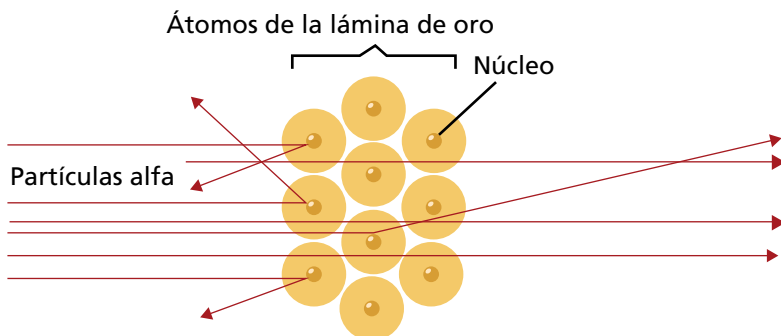
en 1911, el comportamiento de un haz de partículas  $\alpha$  (átomos de helio doblemente ionizados) al incidir en una lámina muy fina de oro colocada en un recipiente en el que se ha hecho el vacío. En la figura 4.4 se representa un esquema de esta instalación.



**Fig. 4.4**

Como consecuencia del modelo de Thomson se esperaba que la mayoría de las partículas  $\alpha$  atravesaran la lámina, mientras las otras sufrirían una ligera desviación; pues como la carga positiva se encuentra, según este modelo, distribuida uniformemente en el átomo, este ejercería fuerzas eléctricas débiles sobre las partículas  $\alpha$  que penetraran en la lámina, y como estas poseen una cantidad de movimiento grande, solo debían sufrir una ligera desviación.

Geiger y Marsden encontraron en su experimento que la mayoría de las partículas  $\alpha$  incidentes atravesaban la lámina sin desviarse, un grupo se desviaba (dispersaba ligeramente) y un pequeño grupo era dispersado con un ángulo mayor de  $90^\circ$ , o sea, "rebotaban" en la lámina. En la figura 4.5 se muestra esquemáticamente esta situación.



**Fig. 4.5**



Este último resultado sorprendió a Rutherford y a sus ayudantes. Según el propio Rutherford, era equivalente a que una bala de cañón de 38 cm de diámetro, disparada contra una hoja de papel, rebotara en ella y regresara hacia el tirador.

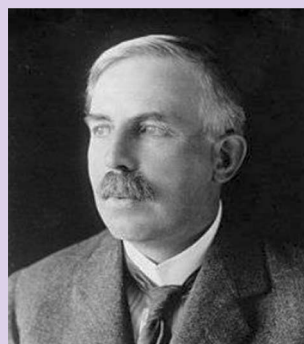
Rutherford llegó a la conclusión de que el retroceso de las partículas  $\alpha$  era debido a un solo choque y no a varios choques sucesivos, y que esto solo era posible si la mayor parte de la masa del átomo y su carga positiva estaban concentradas en una zona muy pequeña del volumen que ocupa el átomo. A esta zona Rutherford le llamó núcleo atómico.

Partiendo de estas consideraciones, Rutherford elaboró un nuevo modelo atómico que establece que:

*El átomo está constituido por el núcleo atómico cargado positivamente, alrededor del cual se mueven los electrones de forma semejante a como lo hacen los planetas alrededor del Sol. La fuerza de Coulomb entre el núcleo y los electrones es la responsable de que las cargas negativas giren alrededor del núcleo. La carga positiva del núcleo es numéricamente igual a la de todos los electrones que giran a su alrededor, pues el átomo es eléctricamente neutro.*

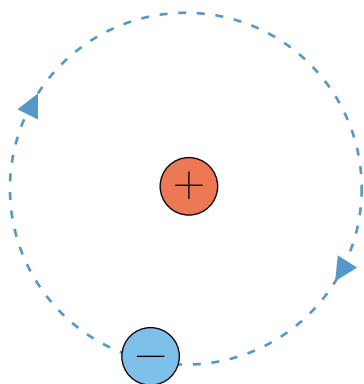
## & De la historia

Ernest Rutherford (figura 4.6), célebre físico inglés, nace el 30 de agosto de 1871. Recibió el Premio Nobel de Química en el año 1908, por su explicación del fenómeno de la radiactividad. Elaboró, por medio de la experimentación, un modelo del átomo que permitió explicar un amplio conjunto de fenómenos atómicos.



**Fig. 4.6**

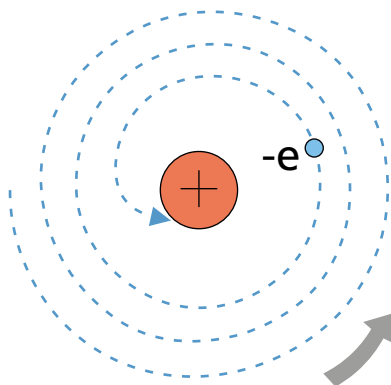
En la figura 4.7 se representa el átomo de hidrógeno según el modelo de Rutherford.



**Fig. 4.7** Modelo planetario del átomo de hidrógeno según Rutherford

Este modelo atómico explica todos los hechos experimentales que explicaba el modelo sugerido por Thomson y, además, la dispersión de las partículas  $\alpha$ ; pero no es capaz de explicar la estabilidad del átomo. Analicemos brevemente esta dificultad del modelo.

Según el modelo de Rutherford, los electrones están girando alrededor del núcleo. Como este movimiento es acelerado y los electrones son partículas cargadas, de acuerdo con la teoría electromagnética deben irradiar energía constantemente en forma de ondas electromagnéticas. Por lo tanto, debe disminuir su energía mecánica de forma continua y precipitarse contra el núcleo (figura 4.8). El átomo se destruiría entonces en un tiempo del orden de  $10^{-8}$  s.



**Fig. 4.8**

Sin embargo, los átomos son estables y pueden existir mucho tiempo sin emitir radiaciones. Esta y otras contradicciones, entre la práctica y el

modelo de Rutherford, determinaron que los científicos lo consideraran insuficiente y se dedicaran a modificarlo o buscar otro modelo que explicara los hechos experimentales.

### & De la historia

Antes de los trabajos de Rutherford y sus colaboradores se propusieron otros modelos atómicos.

En 1901, el químico y físico francés Jean Baptiste Perrin, partiendo del modelo de Thomson, propuso que los electrones debían estar fuera del núcleo, como los planetas alrededor del Sol.

En 1902, el químico estadounidense Gilbert Newton Lewis propuso un modelo en el que la estructura del átomo tiene forma de cubo con el núcleo en su centro y los electrones en cada uno de los vértices. Este modelo no tuvo mucha aceptación y su aporte radicó en la introducción del concepto de valencia.

En 1903, el físico japonés Huntaro Nagoka, rechazó el modelo de Thomson argumentando que los electrones no podían estar empotrados en la carga positiva del átomo y propuso un modelo similar a Saturno y sus anillos. En este modelo, Saturno representaba al núcleo y los anillos los electrones. Este modelo se desestimó pues no consideraba la repulsión entre los electrones.

### Comprueba tus conocimientos

4. Menciona un hecho experimental que contradijo al modelo atómico de Thomson. Explica esa contradicción.
5. ¿Cuál es el modelo del átomo según Rutherford?
6. ¿Cómo se explica, de acuerdo con el modelo atómico de Rutherford, la dispersión de las partículas  $\alpha$ ?
7. Explica la contradicción del modelo atómico de Rutherford con la práctica.

## 4.3 Modelo atómico de Bohr. Aplicación al átomo de hidrógeno

En 1913, el físico danés Niels Bohr (1885-1962), basándose en hechos experimentales aislados y con el objetivo de resolver las insuficiencias del modelo de Rutherford, estableció su modelo atómico.

## & De la historia

Niels Bohr (figura 4.9) fue un activo participante en el temprano desarrollo de la mecánica cuántica y aportó gran parte de su estructura filosófica. Durante los años 20 y 30 del siglo xx dirigió el instituto para Estudios avanzados en Copenhague. El Instituto fue un imán para los mejores físicos del mundo y proporcionó un foro para el intercambio de ideas. Cuando Bohr visitó Estados Unidos, en 1939, para asistir a una conferencia científica, trajo noticias sobre la fisión del uranio, que habían sido observadas por Hahn y Strassman en Berlín. Los resultados fueron los cimientos del arma nuclear desarrollada en Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. A Bohr se le otorgó el Premio Nobel de Física, en 1922, por su investigación sobre la estructura de los átomos y la radiación emanada por estos.



**Fig. 4.9**

Bohr acepta el movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo, pero estableciendo los postulados siguientes:

*Un sistema atómico solo puede encontrarse en determinados estados en los que no emite energía. A estos estados se les llama estados estacionarios y a cada uno de ellos le corresponde una energía  $E$  bien determinada.*

Se puede observar que este postulado entra en contradicción con la mecánica clásica según la cual la energía de los sistemas en movimiento puede tener cualquier valor. También contradice la electrodinámica clásica, pues admite la posibilidad del movimiento acelerado de los electrones sin emisión de ondas electromagnéticas.

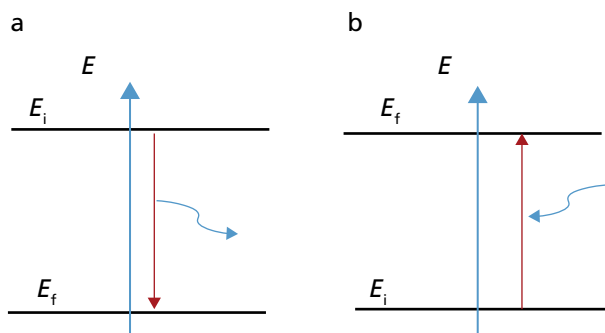
Cuando el electrón en el átomo de hidrógeno pasa de un estado estacionario a otro, emite o absorbe un "cuanto" de energía de valor:

$$h\nu = E_i - E_f \quad (4.1)$$

*Donde  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  es la frecuencia del fotón emitido o absorbido y  $E_i$  y  $E_f$  las energías de los estados inicial y final del átomo, respectivamente.*

Cuando  $E_i > E_f$  o sea, cuando el electrón pasa de un estado de mayor contenido de energía a otro de menor energía el sistema atómico emite un fotón cuya energía se calcula por la ecuación 4.1 (figura 4.10 a).

Si  $E_i < E_f$ , el electrón pasa a un estado más energético. En este caso el sistema atómico absorbe un fotón cuya energía se calcula también por la ecuación 4.1 (figura 4.10 b).

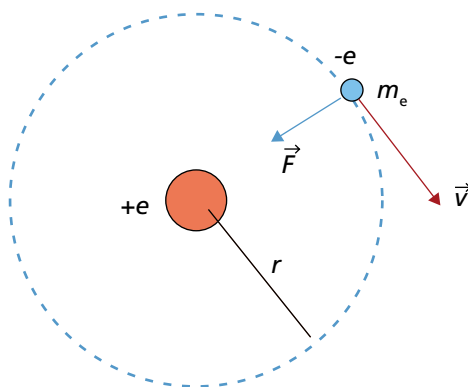


**Fig. 4.10**

*Solo son permitidas aquellas órbitas en que el producto del módulo de la cantidad de movimiento del electrón por el radio de la órbita sea un múltiplo entero de veces la constante de Planck  $h$ :*

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (4.2)$$

*Donde  $m$  y  $v$  son la masa y la velocidad del electrón,  $r$  es el radio de la órbita (figura 4.11) permitida, y  $n$  es un número entero positivo que puede tomar cualquier valor:  $n = 1; 2; 3; 4; \dots$*



**Fig. 4.11**

Se acostumbra representar a  $\frac{h}{2\pi}$  por  $\hbar$  (hache cruzada), por lo que la expresión 4.2, que recibe el nombre de condición de cuantización de Bohr, se escribe como:

$$mvr = n\hbar \quad (4.3)$$

El primer postulado permite justificar la estabilidad del átomo. Con el segundo se establece el mecanismo de emisión y absorción de energía por el sistema atómico. El último postulado da la posibilidad de determinar las dimensiones del átomo para un estado energético dado.

Del modelo nuclear del átomo y de los postulados de Bohr surge un nuevo modelo atómico conocido como modelo de Bohr.

Como se puede apreciar ese modelo no es más que la imposición de ciertas limitaciones cuánticas al modelo de Rutherford, que se basa en las leyes de la física clásica. Es decir, el modelo atómico de Bohr no rechaza completamente esas leyes.

Apliquemos el modelo atómico de Bohr al átomo más sencillo de la naturaleza, el de hidrógeno, con el objetivo de calcular su tamaño (el radio de la órbita del electrón) y la energía del sistema en los distintos estados estacionarios.

El núcleo del átomo de hidrógeno está constituido por un protón que tiene carga eléctrica  $e^+$ , donde  $e$  es el módulo de la carga del electrón.

De acuerdo con el modelo nuclear del átomo, el electrón se encuentra girando en una órbita circular de radio  $r$  alrededor del núcleo. La energía potencial ( $E_p$ ) de interacción del sistema electrón-núcleo se determina por la ecuación:

$$E_p = \frac{k \cdot q_e \cdot q_p}{r}$$

Donde  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $q_e = q_p = e$  y  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$ , es la permitividad del vacío.

Por lo tanto:

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (4.4)$$

Según la mecánica clásica, la energía total  $E$  del sistema atómico es la suma de la energía potencial del sistema ( $E_p$ ), más la cinética ( $E_c$ ). Por lo tanto:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (4.5)$$

Por otra parte, como la fuerza que le proporciona al electrón la aceleración centrípeta  $\left(\frac{v^2}{r}\right)$  es la fuerza de Coulomb entre el electrón y el núcleo (protón):

$$F_c = F_E$$

Por lo tanto:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Simplificando esta expresión queda entonces que:

$$mv^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Que dividida entre 2 queda como:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (4.6)$$

Sustituyendo 4.6 en 4.5 y restando:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (4.7)$$

Analizando la ecuación 4.7 se puede concluir que la energía del átomo está relacionada con el radio de la órbita del electrón: a mayor energía, mayor será el radio de la órbita.

De acuerdo con la mecánica clásica, la energía del átomo puede tener cualquier valor, pues el radio también puede tener un valor cualquiera. Pero, según el tercer postulado de Bohr la órbita del electrón debe ser tal que cumpla con la ecuación 4.2, es decir, el radio de la órbita no puede tomar cualquier valor (está cuantizada) y, por lo tanto, la energía del átomo también está cuantizada.

Calculemos los valores permitidos del radio de la órbita del electrón y de la energía del átomo.

Según la ecuación 4.2, para la velocidad del electrón en la órbita se tendrá que:

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \quad (4.8)$$

Sustituyendo este valor de  $v$  en la ecuación  $mv^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$  y despejando  $r$ , nos queda:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{me^2} \quad (4.9)$$

De esta ecuación se concluye que el radio de la órbita del electrón depende del valor de  $n$ . En la figura 4.12 se representa una relación aproximada entre  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ .

El menor radio posible ( $n = 1$ ) es;

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}$$

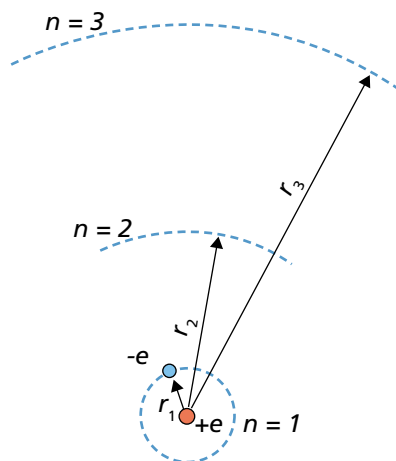
Como la masa del electrón es:

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

el radio de la menor órbita posible es:

$$r_1 = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Este resultado concuerda con las determinaciones experimentales del radio del átomo de hidrógeno.



**Fig. 4.12**

Para determinar la energía de los distintos estados estacionarios, es decir, de los niveles energéticos del átomo de hidrógeno, sustituimos el valor de  $r_n$  (del orbital seleccionado) en la ecuación 4.9. Entonces nos queda:

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (4.10)$$

Notemos que en la obtención de las ecuaciones 4.9 y 4.10, que determinan el radio y los valores de los niveles energéticos del átomo, se utilizó el tercer postulado de Bohr.



El menor nivel energético ( $n = 1$ ) tiene el siguiente valor:

$$E_1 = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar^2} \quad (4.11)$$

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$$

La menor energía que puede poseer el átomo de hidrógeno corresponde al estado más estable. Este nivel energético recibe el nombre de estado básico del átomo de hidrógeno. El resto de los estados energéticos ( $n = 2; 3; 4; \dots$ ) corresponden al átomo excitado. El tiempo promedio que el átomo está en uno de esos estados es del orden de  $10^{-8}$  s. Durante ese tiempo el electrón debe dar aproximadamente un millón de vueltas alrededor del núcleo.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 4.7 y 4.11 podemos determinar la energía de los distintos estados estacionarios por la siguiente ecuación:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

En la expresión  $E_1$ , es la energía del estado básico o fundamental, aquel en que el electrón se encuentra más próximo al núcleo del átomo de hidrógeno,  $n$  es el número cuántico del orbital que se analiza. Sustituyendo el valor de  $E_1$ , tendremos:

$$E_n = \frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (4.12)$$

## Problema resuelto 1

1. A partir del modelo atómico de Bohr:

- Calcula la energía requerida para ionizar un átomo de hidrógeno cuando se encuentra excitado en el estado estacionario caracterizado por  $n = 3$ , y cuando se encuentra en el estado básico.
- Calcula la energía del fotón emitido cuando el átomo pasa del estado de  $n = 3$  al básico.
- Representa en tu libreta un esquema de niveles energéticos con las energías de ionización para el estado de  $n = 3$  y para el básico. Además, señala en el esquema la transición correspondiente a la emisión de un fotón al pasar el electrón, en el átomo, del nivel  $n = 3$  al básico.

*Solución:*

- a) La energía requerida para ionizar un átomo es la cantidad mínima de energía que hay que suministrarle para que pase del nivel en que se encuentra al nivel energético correspondiente a la energía cero (electrón no ligado,  $n = \infty$ ). Por lo tanto, si el átomo se encuentra en el nivel  $n$  la energía requerida para ionizarlo ( $E_{ion_n}$ ) será:

$$E_{ion_n} = -E$$

Por lo que, de acuerdo con la ecuación 4.10, nos queda:

$$E_{ion_n} = - \left( - \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar n^2} \right)$$

$$E_{ion_n} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar n^2}$$

El dato que nos brinda directamente el problema es:  $n = 3$  en el primer caso; en el segundo caso, como nos dice que el átomo está en el estado básico,  $n = 1$ . Los demás elementos de la ecuación son magnitudes que se pueden buscar en una tabla de constantes físicas. Estos datos son:

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

$$\pi = 3,14$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación solución, tenemos que para  $n = 3$

$$E_{ion_n}^3 = 2,42 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,51 \text{ eV}$$

Para  $n = 1$  tendremos:

$$E_{ion_n} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 13,6 \text{ eV}$$

Este es el valor de lo que se conoce como energía de ionización del átomo de hidrógeno.

- b) Para determinar la energía del fotón emitido cuando el átomo experimenta una transición energética entre el estado de  $n = 3$  y el básico, aplicamos la ecuación 4.1:

$$h\nu = E_i - E_f$$

Donde, de acuerdo con la ecuación 4.10, tenemos:

$$E_f = E_1 - \left( -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar} \right) = -E_{ion_1} \text{ y}$$

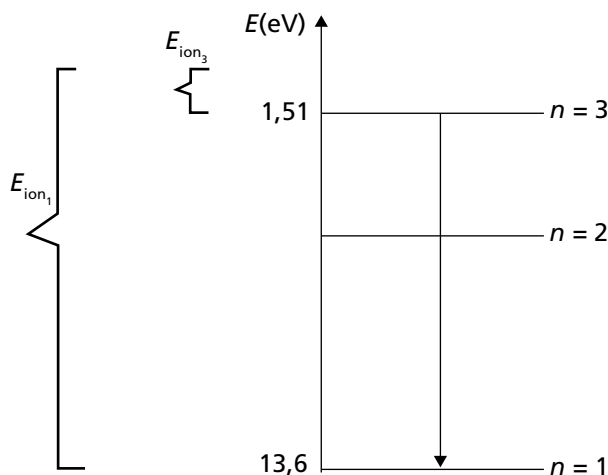
$$E_i = E_3 - \left( -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{m \cdot e^4}{2\hbar 3^2} \right) = -E_{ion_3}$$

Por lo tanto, la energía del fotón será;

$$h\nu = 13,58 \text{ eV} - 1,51 \text{ eV} = 12,1 \text{ eV}$$

A los resultados de los incisos a y b se puede llegar directamente, utilizando la ecuación 4.12 en lugar de la 4.10.

- c) El esquema que nos piden en este inciso está representado en la figura 4.13.



**Fig. 4.13**

## Problema resuelto 2

Determina la mayor longitud de onda de la serie de Lyman.

*Solución:*

Para calcular la mayor longitud de onda de una serie espectral hay que determinar la longitud de onda del fotón emitido de menor frecuencia. Esto (de acuerdo con la ecuación 4.1) corresponde a la transición menos energética.

En la serie de Lyman la transición menos energética corresponde al paso del átomo del estado estacionario caracterizado por  $n = 2$ , al estado de  $n = 1$ .

La ecuación que describe la serie de Lyman es:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \text{ donde } n_f = 1$$

$$\lambda = \frac{1}{R \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)}$$

Sabemos que para que  $\lambda$  sea máxima  $n$  tiene que ser igual a 2. Además, conocemos que  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ . Así:

$$\lambda_{\text{máx}} = 1,215 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 121,5 \text{ nm}$$

Este fotón corresponde a la zona ultravioleta.

### Comprueba tus conocimientos

8. Enuncia los postulados de Bohr.
9. ¿Por qué se dice que los postulados de Bohr están en contradicción con la física clásica?
10. ¿Qué explica cada postulado?
11. ¿En qué consiste el modelo atómico de Bohr?
12. ¿Qué postulados se utilizan para determinar  $r_n$  y  $E_n$ ?
13. ¿Cuándo en una transición atómica se emite energía y cuándo se absorbe?

## 4.4 Experimento de Franck y Hertz

Al aplicar el modelo atómico de Bohr al hidrógeno no hicimos más que utilizar las leyes de la física clásica, condicionándolas con los postulados de Bohr, los cuales, a su vez se contraponían a las teorías clásicas; sobre todo el hecho de que una partícula cargada se mueva aceleradamente y no emita energía. La existencia de los estados estacionarios fue un aspecto muy controvertido de los postulados, hasta que en el mismo año 1913 los físicos alemanes James Franck (1882-1964) y Gustav Ludwig Hertz (1887-1975) realizaron un experimento con el cual confirmaron la existencia de los estados estacionarios.

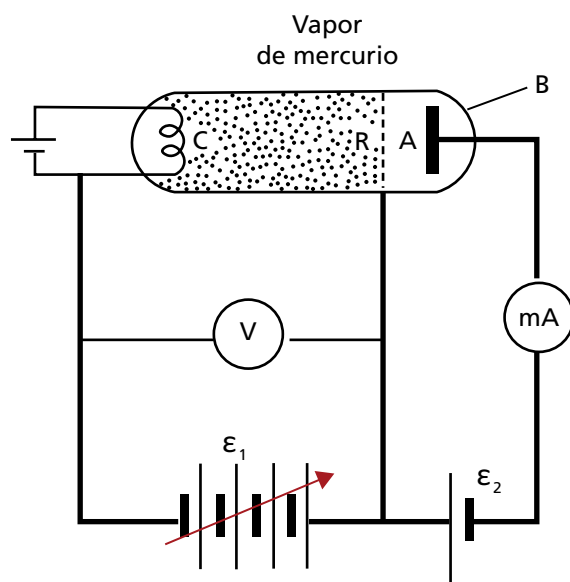
Franck y Hertz pensaron que, de ser cierto que el átomo solo podía tener ciertos valores de energía, entonces, si por cualquier mecanismo se le entrega una energía menor que la diferencia entre la energía del estado

más estable y el inmediato siguiente, esta no sería absorbida. El átomo solo absorbe energía cuando se le entrega una cantidad igual o mayor que la diferencia entre el estado en que se encuentra y cualquier otro más energético.

Para llevar a cabo esta idea, utilizaron como fuente de energía electrones acelerados por una diferencia de potencial.

En la figura 4.14 se esquematiza un dispositivo similar al utilizado por Franck y Hertz para realizar su experimento: B es un bulbo de vidrio dentro del cual se encuentran tres electrodos (cátodo C, rejilla R y ánodo A) y un gas atómico de mercurio enrarecido (a una presión aproximadamente de 13 Pa).

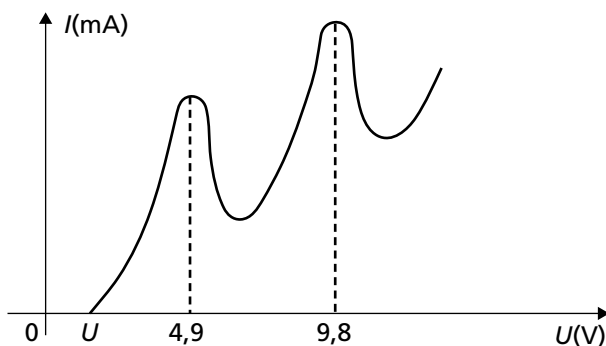
La batería variable  $\varepsilon_1$  suministra una diferencia de potencial entre el cátodo y la rejilla la cual acelera a los electrones que son emitidos mediante el calentamiento del cátodo. La batería  $\varepsilon_2$  establece una pequeña tensión retardadora (aproximadamente de 0,5 V) entre el ánodo y la rejilla, con el objetivo de que los electrones poco energéticos no lleguen al ánodo. El voltímetro y el miliamperímetro miden la tensión aceleradora y la corriente anódica, respectivamente.



**Fig. 4.14**

Al aumentar la tensión cátodo-rejilla se comprobó que crecía la corriente anódica. Pero al pasar la tensión el valor de 4,9 V, la corriente decrecía

bruscamente. Luego volvía a crecer hasta el valor de 9,8 V, partir del cual decrecía nuevamente. La gráfica de los resultados experimentales se muestra en la figura 4.15.



**Fig. 4.15**

Este comportamiento solo se explica a partir de la existencia de los estados estacionarios.

Cuando la tensión entre el cátodo y la rejilla es menor de 4,9 V los electrones chocan elásticamente con los átomos de mercurio (no hay pérdida de energía mecánica) y, por lo tanto, la energía cinética de los electrones prácticamente no varía; es como si chocaran contra una pared fija, pues la masa de los electrones es mucho menor que la de los átomos de mercurio.

A partir de cierto valor de la tensión aceleradora, la energía cinética que poseen los electrones les permite “vencer” el campo eléctrico producido por la tensión retardadora (ánodo-rejilla) y llegar al ánodo. Al aumentar la tensión entre el cátodo y la rejilla, aumenta el número de electrones que llega al ánodo y, como es lógico, aumenta la corriente anódica.

Cuando la tensión aceleradora llega a 4,9 V, entonces los átomos de mercurio absorben la energía que traen los electrones y pasan al estado energético siguiente, por lo que disminuye la energía de los electrones y no pueden “vencer” el potencial retardador. Entonces disminuye la corriente anódica.

La corriente anódica no llega a hacerse cero porque al ánodo llegan los electrones que no chocan con los átomos.

Este resultado experimental nos permite concluir que la diferencia energética entre el estado estable y el primer nivel energético excitado de mercurio es de 4,9 eV. Cuando el átomo adquiere esa energía, y solo esa

pasa al primer estado excitado. Esto confirma la existencia de los estados estacionarios en los átomos.

Experimentalmente se ha comprobado que entre las radiaciones que emiten los átomos de mercurio excitados se encuentran radiaciones de frecuencia  $\nu$  tal que  $h\nu = 4,9$  eV. Esto confirma aún más las conclusiones a las que arribaron Franck y Hertz.

El segundo máximo, que se produce para una diferencia de potencial de 9,8 V se debe a que los electrones chocan dos veces inelásticamente con los átomos de mercurio, cediendo 4,9 eV de energía en cada caso.

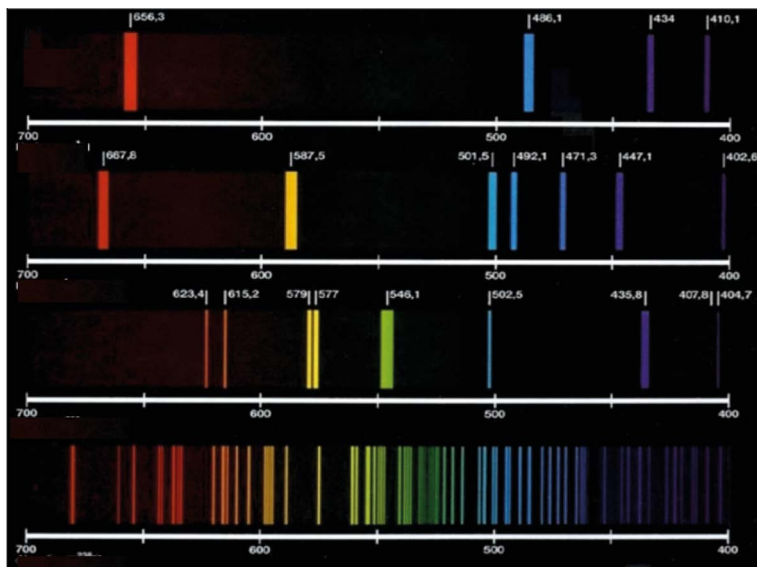
### Comprueba tus conocimientos

14. Describe el experimento de Franck y Hertz.
15. ¿Qué confirma el experimento de Franck y Hertz? ¿Por qué?

## 4.5 Espectros atómicos

Sabemos que al hacer pasar por un prisma luz blanca esta se descompone en una gama de diferentes colores que llamamos espectro.

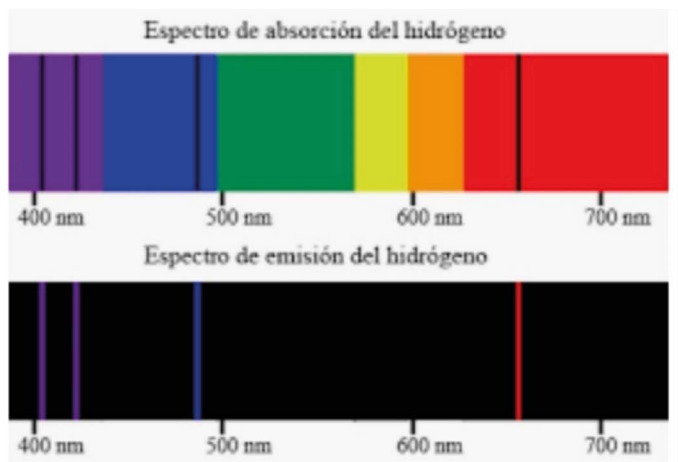
Cada sustancia, en dependencia de su estado y su temperatura, emite radiaciones electromagnéticas con un espectro característico (figura 4.16), es decir tienen espectros de emisión que las caracterizan, como si fuera su huella digital.



**Fig. 4.16** Representación de los espectros de emisión de algunos elementos, de arriba hacia abajo, hidrógeno, helio, mercurio y uranio

Por otra parte, si se hace pasar luz blanca, por ejemplo, a través de los vapores de cierta sustancia, esta absorbe las radiaciones de la misma frecuencia que puede emitir y se obtiene el llamado espectro de absorción de la sustancia. La absorción de las radiaciones se puede considerar como el proceso inverso al de la emisión, en este caso, los átomos al absorber la radiación pasan de un estado energético inferior a uno superior.

En la figura 4.17 se representan de manera comparativa los espectros de emisión y absorción del hidrógeno.



**Fig. 4.17** Nota que las rayas oscuras en el espectro de absorción se corresponden con las del espectro de emisión

Por su estructura, los espectros se pueden agrupar en tres tipos: continuos, de rayas y de bandas.

### Espectros continuos

Un espectro continuo es aquel en que están presentes todas las longitudes de onda dentro de una región del espectro electromagnético. La luz solar, la emitida por una lámpara de arco o por un cuerpo sólido calentado, son ejemplos de espectros continuos. En la figura 4.18 se muestra el espectro continuo de la luz solar en la zona visible.



**Fig. 4.18**

Este tipo de espectro es característico de los cuerpos sólidos y líquidos en estado incandescente. También el plasma puede emitir un espectro



continuo. El carácter continuo del espectro se debe no solo a las propiedades de los átomos, sino, además, a la interacción entre estos; por eso los gases monoatómicos enrarecidos no lo producen, pues en ellos los átomos prácticamente no interactúan.

### Espectros de rayas o líneas

Si se observa a través de un aparato espectral la luz proveniente de los vapores producidos al calentar una sustancia en la “llama” de un mechero, se observa un conjunto de rayas sobre un fondo negro. Esto constituye un espectro de rayas. Estos espectros también se producen cuando la luz se emite por un gas por el que circula una corriente eléctrica.

Experimentos realizados con vapores de distintas sustancias permiten concluir que cada sustancia presenta un espectro de rayas característico. Así, cada vez que, por ejemplo, obtengamos el espectro de los vapores de hidrógeno, el espectro estará formado por cuatro rayas sobre fondo oscuro, como se representa en la figura 4.17.

Los espectros de rayas solo se producen cuando la luz es producida por sustancias en estado gaseoso atómico, no molecular. Son los átomos aislados, que no interactúan entre sí, los responsables del “carácter discreto” del espectro. De esto y del carácter individual de los espectros de rayas (cada sustancia produce su espectro característico) se infiere que los átomos aislados de una sustancia emiten radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda bien determinadas que, además, son características de cada sustancia. Esta conclusión se infiere también del modelo atómico de Bohr, como veremos más adelante.

Entre los espectros atómicos más estudiados está el producido por la luz emitida por vapores de hidrógeno. En 1885, el profesor sueco J. J. Balmer (1825-1898) realizó un importante aporte en su estudio del espectro del hidrógeno pues, en su artículo *Notas relativas a las líneas espectrales del hidrógeno*, presentó una fórmula empírica que describía perfectamente el espectro de rayas del hidrógeno en la zona visible (las rayas roja, verde, azul y violeta). Esta fórmula es:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (4.13)$$

Donde  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ , se denomina constante de Rydberg.

El modelo atómico de Bohr aplicado al átomo de hidrógeno proporciona una fundamentación teórica a la fórmula empírica de Balmer. Teniendo

en cuenta el segundo postulado de Bohr la frecuencia del fotón emitido por el átomo es:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$

Sustituyendo en esta ecuación las expresiones de  $E_i$  y  $E_f$ , dadas por la ecuación 4.10, y que  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , tendremos que:

$$\nu = \frac{me^4}{8h^3\epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Pero  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , por lo tanto:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{me^4}{8h^3\epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

De donde, dividiendo toda la expresión por  $c$ :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8h^3\epsilon_0^2 c} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Donde:

$$\frac{me^4}{8h^3\epsilon_0^2 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

O sea, el mismo valor de la constante de Rydberg.

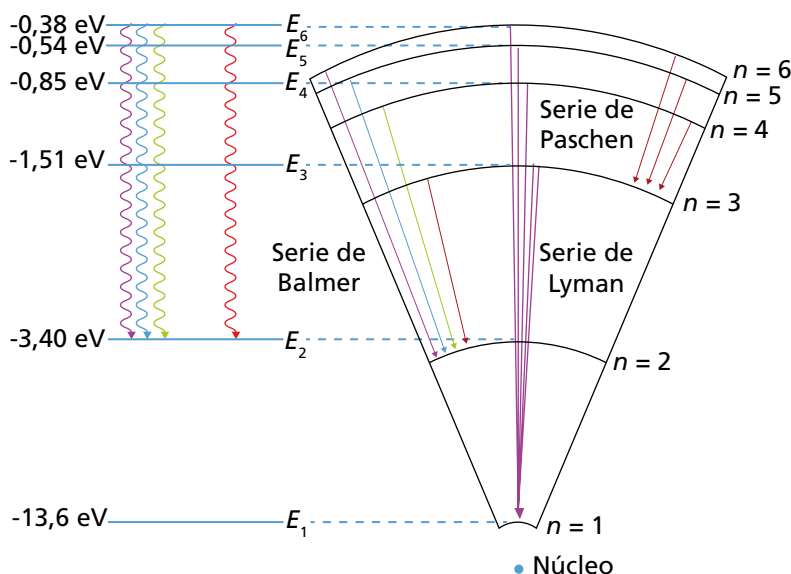
Si hacemos  $n_f = 2$  tenemos la expresión de Balmer obtenida a partir del modelo atómico de Bohr.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Las cuatro rayas espectrales de la serie de Balmer corresponden a las transiciones desde los niveles energéticos de  $n = 3; 4; 5$  y  $6$  hasta el nivel  $n = 2$ ; es decir, desde los estados con energía  $E_3, E_4, E_5$  y  $E_6$  hasta el estado de energía  $E_2$ .

La teoría de Bohr conduce a la cuantización de la frecuencia, en concordancia con los resultados experimentales, correspondientes al estudio del espectro de emisión del átomo de hidrógeno. Las radiaciones de distintas frecuencias emitidas por el átomo de hidrógeno forman una serie, cada una de las cuales se corresponde con un determinado valor del número cuántico asociado al estado estacionario  $n_f$  y diferentes valores del número  $n_i > n_f$ .

Si la transición se establece entre los niveles energéticos ( $n_f = 1$ ) y ( $n_f = 3$ ), se obtienen las fórmulas espectrales para las llamadas series de Lyman (en la zona ultravioleta) y de Paschen (en la zona infrarroja), descubiertas a principios del siglo xx. En la figura 4.19 se representan las transiciones correspondientes a las series de Balmer, Lyman y Paschen.



**Fig. 4.19** Series espectrales del hidrógeno

Esta explicación cuantitativa de los espectros del átomo de hidrógeno constituyó un gran éxito del modelo atómico de Bohr. Las hipótesis de Bohr fueron una verdadera revolución del pensamiento científico, pues contribuyeron notablemente en la búsqueda de una teoría cuántica que describiera la estructura y el comportamiento de los átomos.

### Espectros de bandas

Estos espectros, también llamados espectros moleculares están formados por un conjunto de bandas, más o menos anchas, formadas por rayas espectrales muy próximas entre sí. El nombre de espectros moleculares está asociado al hecho de que estos espectros se producen al variar la energía de las moléculas y su análisis detallado, que no abordaremos en este curso, resulta algo más complejo.

### + ¿Sabías que...?

Por la individualidad de los espectros, los científicos determinan la composición química de un cuerpo sin necesidad de tocarlo. Con ayuda del análisis espectral se puede detectar la presencia de un elemento cualquiera (de los conocidos) en la composición compleja de una sustancia, aunque su masa no supere los  $10^{-10}$  g

El análisis cuantitativo de la composición de una sustancia según su espectro presenta dificultades, pues la brillantez de las líneas espectrales depende no solo de la masa de la sustancia, sino también del método de excitar la luminiscencia. Así a temperaturas no muy altas muchas de las rayas espectrales no se manifiestan.

En la actualidad se conocen los espectros de todos los átomos y se han confeccionado tablas de ellos. Con ayuda del análisis espectral fueron descubiertos muchos nuevos elementos, como por ejemplo el rubidio y el cesio.

En el estudio de la composición química del Sol y de las estrellas el análisis espectral es determinante, pues no es posible utilizar otros métodos. A partir de estas investigaciones se ha llegado a la conclusión de que las estrellas están compuestas por los mismos elementos químicos que existen en la Tierra. En el análisis espectral de la radiación solar se descubrió un elemento desconocido en la Tierra, a este elemento se le denominó helio (solar). Con posterioridad fue descubierto en la atmósfera terrestre.

Las sustancias orgánicas, que son complejas, se analizan por medio de sus espectros moleculares.

### Comprueba tus conocimientos

16. ¿Cuáles son las características de los espectros:
  - a) continuos,
  - b) de rayas,
  - c) de bandas?
17. ¿Cómo se originan los espectros de rayas?
18. ¿Qué postulados se emplearon para obtener la fórmula espectral de Balmer, a partir del modelo atómico de Bohr?

## 4.6 Limitaciones del modelo de Bohr

Los espectros atómicos, que tanto éxito le dieron a la teoría de Bohr, constituyeron también su limitación al serle imposible describir el

comportamiento espectral del átomo de helio (el que sigue en complejidad al de hidrógeno) y de otros más complejos; así como el hecho experimental de que cada línea espectral está constituida por un conjunto de líneas más finas (esto se conoce como estructura fina del espectro).

Estas, junto con la propia contradicción que internamente presenta el modelo al tratar de conjugar las leyes de la mecánica y la electrodinámica clásica con los principios de cuantificación, son las limitaciones fundamentales del modelo atómico de Bohr.

Con el objetivo de resolver las limitaciones del modelo de Bohr y poder explicar la estructura fina de las rayas espectrales, en 1916, el físico alemán A. Sommerfeld (1868-1951) generalizó el tercer postulado, permitiendo la existencia de órbitas elípticas y la existencia de subniveles en un mismo nivel energético. Pero no fue hasta después de 1925 que se comenzaron a desentrañar los misterios de la estructura atómica, con el surgimiento de la mecánica cuántica. El primer paso en esta dirección lo dio el físico Austriaco Erwin Schrödinger que elaboró un modelo atómico basado en el comportamiento onda-partícula, propuesto por Louis de Broglie. En este modelo los electrones no se encuentran describiendo una órbita específica, sino que tienen determinada probabilidad de moverse en una región a la que se nombró orbitales.

Otro paso importante fue dado, en 1932, cuando el físico inglés James Chadwick descubrió la existencia del neutrón y propuso que el núcleo central del átomo está formado por protones y neutrones, moviéndose los electrones, que tienen una masa mucho menor, en orbitales alrededor del núcleo.

En la actualidad la mecánica cuántica constituye la teoría que proporciona el modelo más acabado para explicar la estructura del átomo y sus propiedades.

### Comprueba tus conocimientos

- 19.** Di cuáles son las limitaciones del modelo atómico de Bohr.

## 4.7 Dualismo onda-corpúsculo

El modelo cuántico es el que permite explicar los problemas conocidos actualmente sobre la estructura atómica, pero la complejidad matemática de esta teoría sale del alcance de nuestro estudio. Nos limitaremos aquí a exponer someramente algunas ideas de esta concepción.

Según Bohr el electrón se mueve en órbitas bien determinadas alrededor del núcleo. En el modelo cuántico el movimiento del electrón no es así. La mecánica cuántica solo nos da la probabilidad de encontrar al electrón en un punto del espacio. En esta descripción el radio de la órbita de Bohr coincide con la distancia más probable al núcleo.

Otra diferencia entre los dos modelos consiste en que en el de Bohr se considera al electrón como una partícula clásica, mientras que para la mecánica cuántica presenta propiedades muy diferentes.

Es un hecho experimental que los electrones (al igual que el protón, el neutrón y otras partículas) poseen propiedades ondulatorias. Este comportamiento se consideró al principio como algo sorprendente, como ocurrió a principios de siglo xx con el carácter corpuscular de la luz. Fue el físico francés Luis Víctor de Broglie, quien, en 1924, con gran coraje intelectual, presentó la teoría de que el dualismo no es un comportamiento solo de la luz, sino que tiene un significado universal, y planteó que las partículas también poseen propiedades ondulatorias.

De Broglie asoció al electrón una longitud de onda. Para llegar a la ecuación que permite calcularla, siguió un razonamiento análogo al siguiente:

La longitud de onda de los fotones está relacionada con su cantidad de movimiento por  $\lambda = \frac{h}{p}$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $p$  es el valor de la cantidad de movimiento lineal de los fotones. Por analogía, la longitud de onda de los electrones estará dada también por la ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4.14)$$

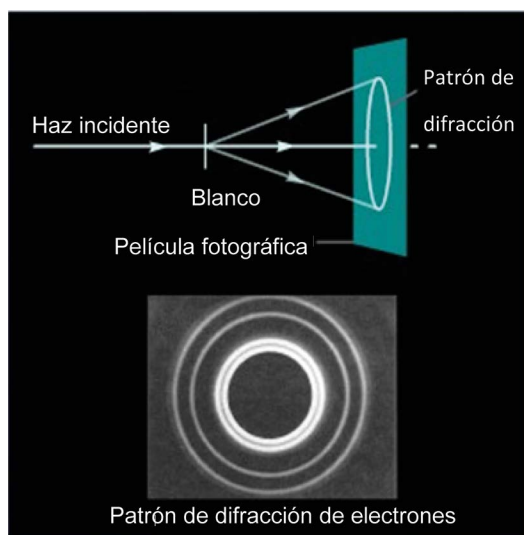
Donde  $p$  es el valor de la cantidad de movimiento del electrón.

La hipótesis de De Broglie motivó dudas en los físicos de la época, pues si los electrones poseen propiedades ondulatorias, debían experimentar fenómenos propios de las ondas: debían interferir y difractarse. Los fenómenos de interferencia y difracción de los electrones no se habían observado.

Los científicos se dieron cuenta de que de acuerdo con el valor tan pequeño que se predecía para la longitud de onda de los electrones (del orden de 0,1 nm), no se podía producir su difracción en una red de difracción normal (pues el periodo de las redes es muy grande con respecto a la longitud de onda predicha). En 1927. C. J. Davisson (1881-1958) y L.M. Germer utilizaron como red de difracción una red cristalina (como se hizo en la difracción

de los rayos X), y obtuvieron la difracción de los electrones. En experimentos posteriores, se hizo pasar un haz de electrones a través de una lámina delgada de estructura policristalina y se registró la radiación dispersada en una película fotográfica; se obtuvo un patrón de difracción. En la figura 4.20 se representa esquemáticamente este experimento.

En 1949 se demostró experimentalmente que este comportamiento no era debido a que en el experimento intervenían un gran número de electrones, sino que era característico del propio electrón. Es decir, el electrón se difracta.



**Fig. 4.20**

Podemos concluir que los electrones poseen propiedades ondulatorias. En realidad, los electrones tienen propiedades corpusculares y ondulatorias; pero, como en el caso de los fotones, estas no son excluyentes ni contradictorias. Los electrones constituyen un ente que no es ni una partícula ni una onda, pero posee propiedades de ambas. Esto se ha demostrado experimentalmente para otras micropartículas como los neutrones, los átomos de helio y las moléculas de hidrógeno.

### Problema resuelto 3

Calcula la longitud de onda de un protón cuya velocidad es:

- a) 300 km/s;
- b)  $2,85 \cdot 10^8$  m/s.

*Solución:*

- a) Para calcular la longitud de onda del protón, aplicamos la relación de De Broglie (ecuación 4.14):

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Donde  $p = mv$  es la cantidad de movimiento del protón,  $m$  es la masa del protón y  $v$  su velocidad. Los datos del problema son:

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$v = 300 \text{ km/s} = 3,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

Sustituyendo los datos en la relación de De Broglie, tenemos:

$$\lambda = 1,32 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0,00132 \text{ nm}$$

- b) El razonamiento en este inciso es análogo al anterior, con la diferencia de que como la velocidad del protón es del orden de la velocidad la luz, la cantidad de movimiento en la ecuación 4.13 no es  $mv$ , sino la cantidad de movimiento relativista del protón.

Como sabemos del capítulo 2, la cantidad de movimiento relativista se calcula por la ecuación:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$v = 2,85 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Entonces:

$$\lambda = 4,34 \cdot 10^{-16} \text{ m} = 4,34 \cdot 10^{-7} \text{ nm}$$

Si comparamos el resultado de ambos incisos, podemos concluir que mientras mayor es la velocidad del protón, menor es su longitud de onda y, por lo tanto, son más difíciles de detectar sus propiedades ondulatorias. Es decir, a grandes velocidades el protón se “comporta” como una partícula.



## Comprueba tus conocimientos

**20.** ¿En qué consiste el dualismo onda-corpúsculo de las partículas?

### 4.8 El láser

Por su repercusión práctica en el campo de la medicina, la industria, la investigación y muchos otros más, abordaremos ahora de manera breve y simplificada lo relacionado con el principio de funcionamiento de los láseres y sus propiedades más generales.

En 1917, Einstein predijo la posibilidad de provocar la denominada radiación inducida (estimulada) de luz por los átomos.

Se entiende por radiación inducida la emisión de luz por los átomos excitados por la acción de la luz. Una particularidad notable de esta radiación consiste en que, durante la emisión inducida, las ondas luminosas radiadas no se diferencian de las ondas incidentes sobre el átomo ni por la frecuencia, ni por la fase, ni en el plano de polarización.

En el lenguaje de la teoría cuántica, las radiaciones estimuladas son el paso no espontáneo de un átomo de un estado energético superior a uno inferior bajo la influencia de acciones externas.

En el año 1940, el físico ruso V. A. Fabricant señaló la posibilidad de utilizar el fenómeno de la emisión estimulada para reforzar las ondas electromagnéticas. En el año 1954, los científicos rusos N. G. Basov y A. M. Projorov, e independientemente de ellos el físico norteamericano C. H. Towns, utilizaron el fenómeno de la emisión inducida para crear un generador de microondas de radio con longitudes de onda de 1,27 cm, denominado másér.

En 1959, por la elaboración del nuevo principio de generación y reforzamiento de las ondas de radio, Basov y Projorov obtuvieron el premio Lenin. En el año 1960, estos científicos soviéticos y el norteamericano recibieron el premio Nobel.

En 1960, en EE.UU., fue creado el primer láser: un generador cuántico de ondas electromagnéticas en el diapasón visible del espectro.

El término láser surgió de la sigla de *Ligh Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (reforzamiento de la luz con ayuda de la radiación inducida).

#### Propiedades de la emisión del láser

Las fuentes de luz láser poseen una serie de características que las diferencian de las otras.

1. Los láseres son capaces de producir un flujo luminoso muy fino, con un ángulo de dispersión de aproximadamente  $10^{-5}$  rad. Un flujo luminoso con estas características emitido desde la Tierra, cubre en la Luna un área con un radio de 3 km.
2. La luz del Láser posee una monocromaticidad formidable. A diferencia de las fuentes comunes de luz, en las cuales los átomos emiten independientemente unos de otros, en los láseres los átomos emiten luz coherente. Por eso, la fase de las ondas del láser se mantiene constante durante un tiempo mucho mayor que en las fuentes comunes de luz.
3. Los láseres son fuentes potentes de luz. En un intervalo pequeño de tiempo ( $10^{-11}$  s) se alcanza una potencia de emisión entre  $10^{12}$  W y  $10^{11}$  W por cada centímetro cuadrado. En el mismo tiempo, la potencia de emisión del Sol por centímetro cuadrado, correspondiente a la suma de la energía de todo el espectro, es solo de  $7,0 \cdot 10^3$  W. En un estrecho intervalo de longitud de onda  $\Delta\lambda = 10^{-6}$  cm (ancho de una línea espectral del láser), del Sol llega solamente  $0,2 \text{ W/cm}^2$ . La intensidad del campo eléctrico en una onda electromagnética emitida por un láser llega a valores entre  $10^{10}$  V/cm y  $10^{12}$  V/cm, que supera la intensidad del campo en las proximidades de los núcleos de los átomos.

Los láseres tienen muchas perspectivas para la comunicación, particularmente en el espacio cósmico, donde no existen nubes que absorben la luz.

La enorme potencia del rayo láser se utiliza para llevar hasta la ebullición a los materiales en el vacío. Con ayuda del rayo láser se pueden realizar operaciones quirúrgicas (por ejemplo, “soldar” los desprendimientos de la retina del ojo).

En la holografía, ya mencionada en el primer capítulo, se utiliza la coherencia de los rayos láser.

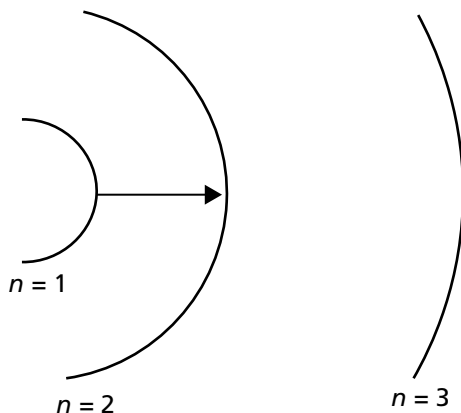
Los láseres permitieron fabricar los “localizadores luminosos” con ayuda de los cuales se puede medir con gran exactitud la distancia hasta los objetos en movimiento.

### Comprueba tus conocimientos

21. ¿En qué consiste la radiación inducida?
22. Menciona tres propiedades del láser.
23. Menciona tres aplicaciones prácticas del láser.

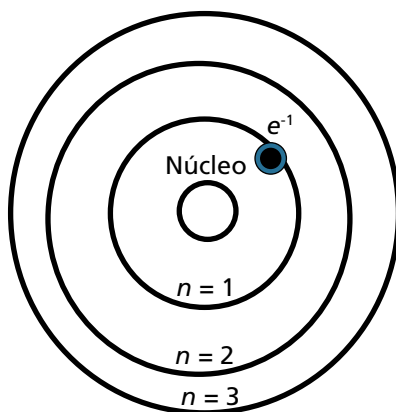
## Problemas generales del capítulo

1. Enumera las características más importantes de los modelos atómicos y señala las semejanzas y diferencias entre ellos.
2. La figura 4.21 representa tres niveles energéticos del átomo de hidrógeno. En la transición representada, ¿el átomo absorbe o emite energía?  
a) Si el electrón permanece durante un pequeño intervalo de tiempo en el nivel  $n = 2$ , y luego pasa espontáneamente a otro, ¿cuál es este nivel? ¿Por qué?



**Fig. 4.21**

3. Sobre la base de la figura 4.22 en la que se representan tres posibles niveles energéticos del átomo de hidrógeno, según Bohr.  
a) ¿Se encuentra excitado el átomo? Explica tu respuesta.  
b) ¿Hacia qué nivel pasará el electrón si se le suministra la energía necesaria para realizar un salto?



**Fig. 4.22**

4. Un átomo de hidrógeno se encuentra excitado en el estado energético caracterizado por  $n = 7$ . Calcula:
- La energía del sistema atómico en ese estado estacionario.
  - La energía del fotón emitido por el átomo al pasar al estado básico.
5. En la figura 4.23 se representan algunos de los niveles energéticos del átomo de hidrógeno.
- Señala una transición en la que el átomo absorba energía. Explica tu respuesta.
  - Determina la cantidad de energía absorbida.
  - ¿A qué serie espectral corresponde la transición? Explica tu respuesta.

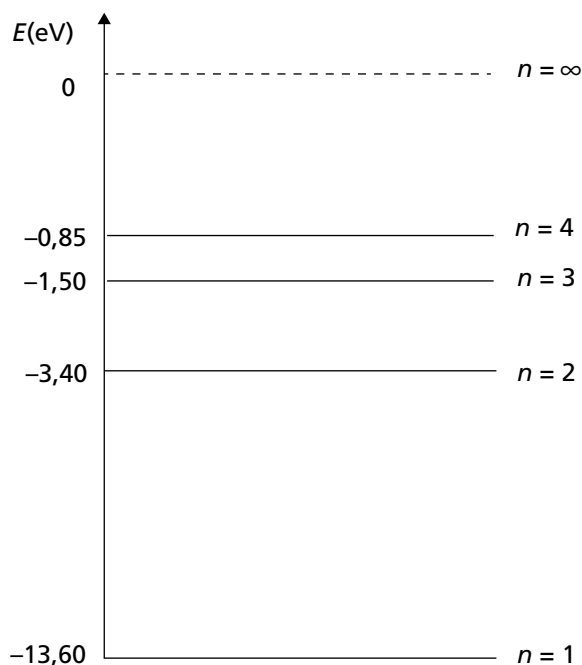


Fig. 4.23

- Calcula la longitud de la onda de la radiación emitida por el átomo de hidrógeno al pasar de un estado energético caracterizado por el número  $n = 4$  al de  $n = 2$ .
- Determina la frecuencia mínima de las series de Balmer y Paschen.
- Calcula la longitud de onda límite de las cinco series del hidrógeno (la cuarta serie del hidrógeno es la de Brackett, para la cual  $n_f = 4$ , y la quinta es la de Pfund, para la cual  $n_f = 5$ ).

9. Tomando como unidad la energía del nivel  $n = 1$ , dibuja en tu libreta un gráfico en el que se representen a escala los niveles de energía del átomo de hidrógeno, desde  $n = 1$  hasta  $n = 7$ .
10. Determina.
- El radio de la órbita del electrón en el átomo de hidrógeno para el estado estacionario  $n = 5$ , así como la energía de este estado.
  - ¿Hacia qué nivel de energía transitará el átomo espontáneamente? Justifica tu respuesta.
11. El electrón en el átomo de hidrógeno transita del estado estacionario  $n = 4$  al de  $n = 2$ :
- ¿Emite o absorbe un fotón, el átomo en la transición? Justifica tu respuesta.
  - ¿A qué zona del espectro pertenece el fotón emitido o absorbido por el átomo?
  - ¿A qué serie espectral corresponde la radiación asociada con la transición? ¿Qué valor tiene la longitud de onda del fotón asociado a la transición?
12. En la figura 4.24 se muestran algunos de los estados estacionarios para el átomo de hidrógeno, según el modelo de Bohr.
- Identifica las transiciones A, B y C, según la serie espectral a la que pertenecen.
  - Determina la frecuencia de la línea espectral emitida en la región visible, según Balmer.
  - De las transiciones energéticas representadas, ¿cuál tiene asociada una radiación de mayor frecuencia y cuál de mayor longitud de onda?
13. El diagrama (figura 4.25) corresponde al modelo de los niveles energéticos para el átomo de hidrógeno:
- ¿Se absorbe o se emite energía en la transición representada? Justifica tu respuesta.
  - Calcula la energía y la frecuencia de la radiación asociada a este salto.
  - ¿En cuál de los estados estacionarios, que intervienen en esta transición, el átomo es más estable? Justifica tu respuesta.

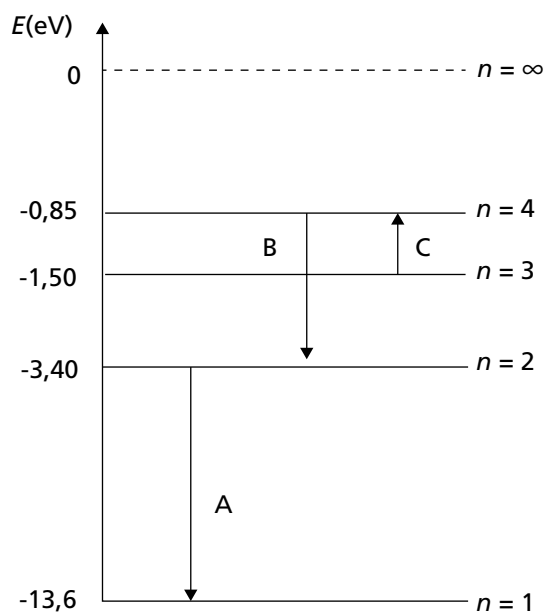


Fig. 4.24

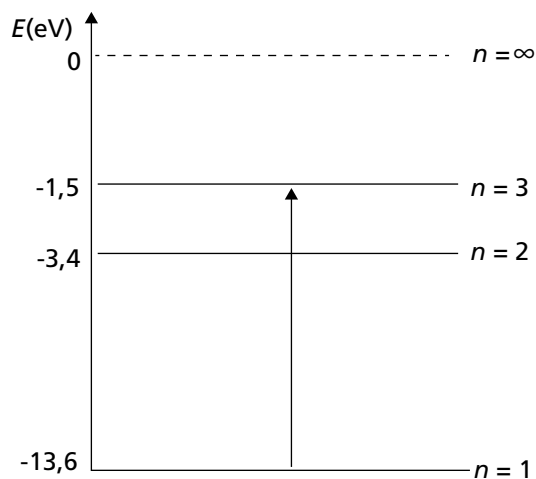


Fig. 4.25

14. El físico J. J. Balmer se destacó en el estudio del análisis espectral (específicamente en los espectros de rayas).
- Describe el espectro de emisión del átomo de hidrógeno para la serie espectral que lleva su nombre.
  - ¿Hasta qué nivel final llegan las transiciones del electrón en esta serie?

15. En la figura 4.26 se representan los niveles energéticos del átomo de hidrógeno y dos posibles transiciones del electrón.

- En estas transiciones, ¿el átomo emite o absorbe energía? Justifica tu respuesta.
- Explica cómo determinar la frecuencia de la radiación asociada a cada salto.

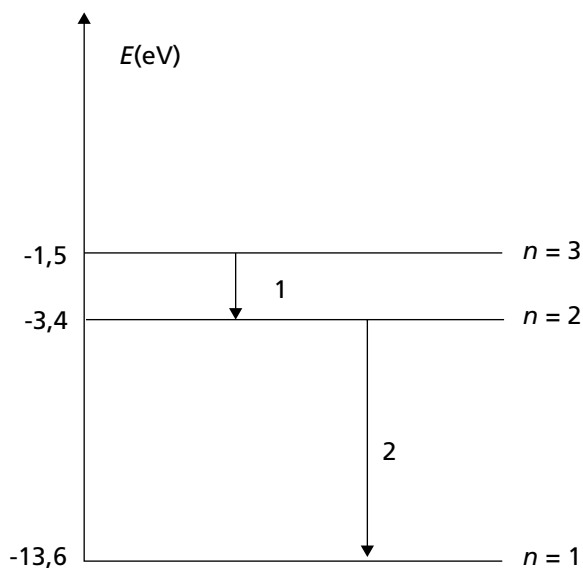


Fig. 4.26

16. En la figura 4.27 se muestran cuatro de los posibles niveles energéticos del átomo de hidrógeno. Si el electrón se encuentra en el estado  $n = 4$ .

- Determina la energía que tiene el sistema en ese estado.
  - Representa dos de las posibles transiciones, una en la que absorbe energía y otra en la que emita. Justifica tu respuesta en cada caso.
17. A partir del siguiente esquema (figura 4.28) y de tus conocimientos acerca de los postulados de Bohr para el átomo de hidrógeno:
- ¿A qué denominó Bohr estados estacionarios? ¿Cuál es el valor de la energía del estado básico o fundamental?
  - Explica los pasos necesarios para que el electrón pase del estado de menor energía al cuarto estado estacionario.
  - Calcula el valor de la frecuencia del fotón que experimenta la transición.

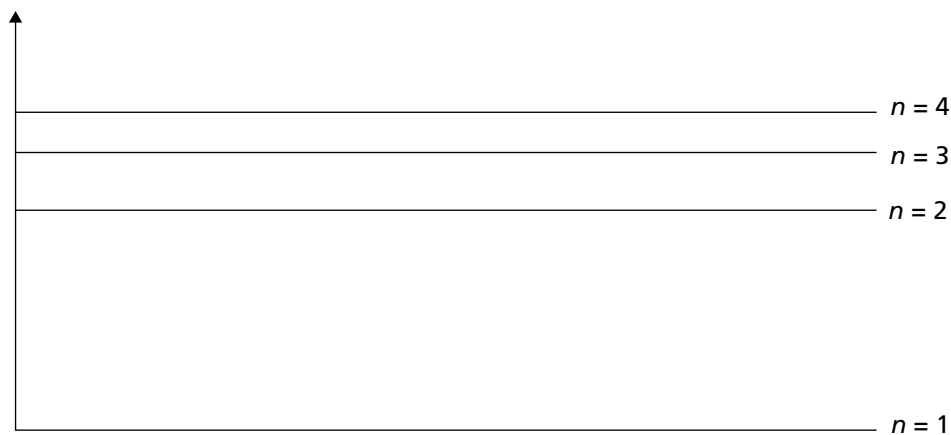


Fig. 4.27

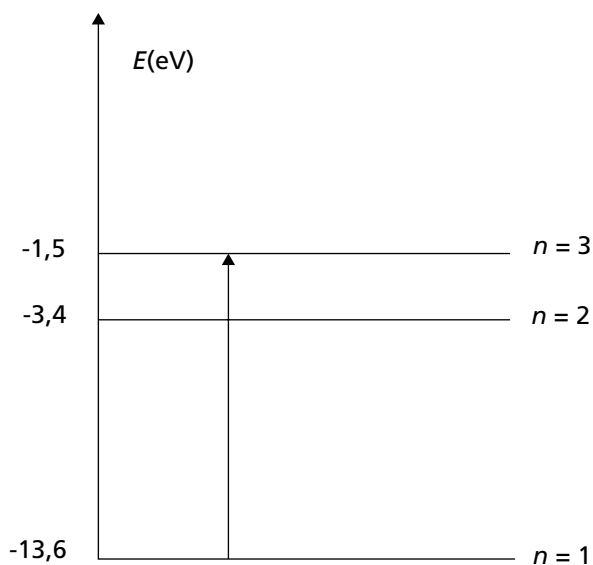


Fig. 4.28

**18.** La figura 4.29 representa tres de los estados estacionarios en el átomo de hidrógeno.

- En la transición representada, ¿el átomo emite o absorbe energía? Justifica tu respuesta.
- ¿A cuál de los estados corresponde el menor contenido de energía? Explica cómo determinar la energía asociada a la transición representada.



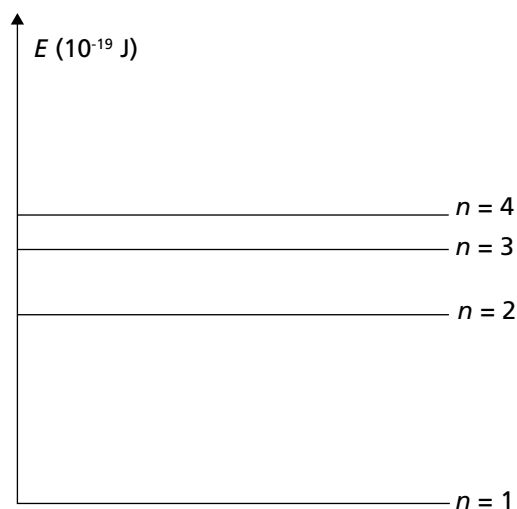


Fig. 4.29

19. La gráfica 4.30 muestra algunas de las transiciones energéticas correspondientes al átomo de hidrógeno.

- Explica para cada transición si el átomo absorbe o emite energía.
- Plantea la ecuación que permite determinar la frecuencia del fotón asociado a la transición B. ¿A qué serie espectral pertenece?

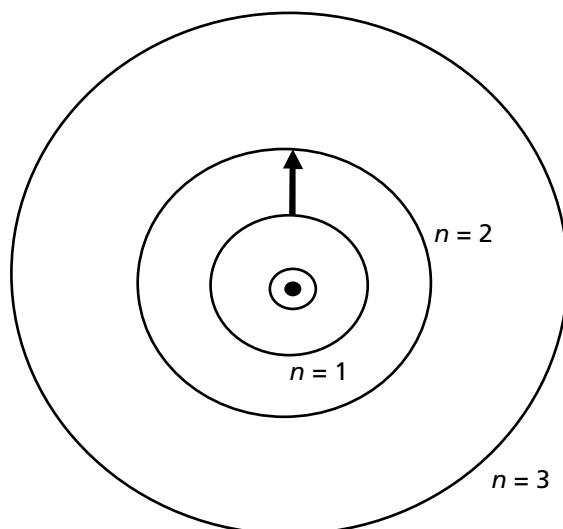


Fig. 4.30

# CAPÍTULO 5

## Elementos de Física Nuclear y de las Partículas Elementales

La Física Nuclear y la Física de Partículas Elementales son dos campos fascinantes de la Física que nos sumergen en el mundo microscópico de las partículas subatómicas y las interacciones fundamentales que existen en el universo. En este viaje, te iniciarás en el mundo de los núcleos atómicos, de las partículas elementales y de los constituyentes básicos de la materia.

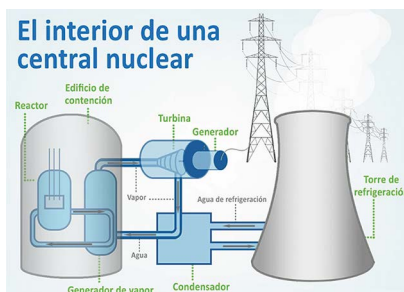
La Física Nuclear se ocupa del estudio de los núcleos atómicos y sus propiedades, así como de las reacciones nucleares que pueden ocurrir en ellos. En este campo conocerás conceptos y leyes relacionados con la radiactividad, la fisión y la fusión nuclear, así como las múltiples aplicaciones prácticas de esta rama de la física, entre las que se destacan: las ingenieras, los isótopos industriales, la agricultura, la producción de electricidad, los estudios arqueológicos, el análisis de obras de arte y la medicina (figura 5.1).

La Física de Partículas Elementales se centra en el estudio de las partículas subatómicas, su estructura e interacciones. Al abordar este tema tendrás un primer acercamiento al llamado modelo estándar de la física de partículas y por supuesto, a la importancia de las investigaciones que actualmente se desarrollan en este campo.

Por otra parte, también es importante considerar los problemas que para la humanidad ha significado el mal uso de los conocimientos sobre la física del núcleo atómico, sobre todo en lo relacionado con la creación y producción de las armas de destrucción masiva.



a



b



c



d

**Fig. 5.1** Aplicaciones prácticas de la Física Nuclear: a) equipo para resonancia magnética; b) esquema de una central nuclear; c) planta para radiación de alimentos; d) acelerador lineal en un hospital

Se puede decir que esta rama de la física se separó de la física del átomo y comenzó a desarrollarse de manera independiente en el año 1896, cuando el físico francés Antoine Henri Becquerel (1852-1908) descubrió la radiactividad en los compuestos del uranio.

Comenzaremos el estudio de este tema con una descripción de los métodos que se utilizan para el registro y estudio de las partículas elementales y las radiaciones nucleares.

## 5.1 Métodos de observación y registro

Algunos de los instrumentos utilizados para la detección y el estudio de las radiaciones y partículas emitidas por los núcleos atómicos son el contador Geiger-Muller, la cámara de niebla o de Wilson, la cámara de burbujas, las emulsiones fotográficas de capas gruesas y los detectores de estado sólido a base de semiconductores. A continuación, analizaremos de manera simplificada el funcionamiento de estos instrumentos.

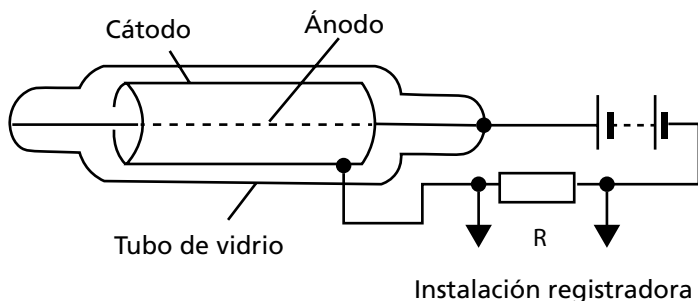
### Contador Geiger-Müller

El dispositivo llamado contador Geiger-Müller fue desarrollado, en el año 1928, por los físicos alemanes Hans Geiger y Walter Müller.

El contador está formado por un tubo de vidrio, recubierto por dentro de una capa metálica que sería el cátodo, y de un delgado filamento que pasa a lo largo del eje del tubo que sería el ánodo. Dentro del tubo hay gas, generalmente argón (figura 5.2).



a



b

**Fig. 5.2** Contador Geiger-Müller: a) apariencia externa; b) esquema del contador

El funcionamiento del contador se basa en la ionización por choque: una partícula cargada al pasar por el gas arranca electrones de los átomos del gas y se crean iones positivos y electrones libres. El campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo acelera los electrones hasta energías elevadas con las cuales comienza la ionización por choque, que da lugar a una avalancha de iones y un aumento de la corriente. Como consecuencia de esto, en la resistencia de carga se genera una diferencia de potencial que se detecta y se amplifica en el contador.

Para detectar partículas que no tienen carga (como los neutrones) o fotones la pared interior del tubo se recubre con una sustancia en la que al incidir estas partículas se emiten electrones.

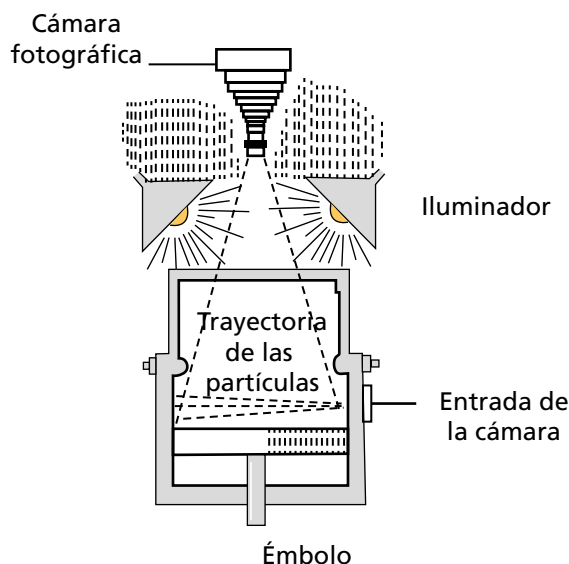
También hay tubos que se construyen de metal con una ventana de material transparente a las radiaciones.

### Cámara de niebla

Fue inventada por el físico escocés Charles Thomson Rees Wilson, en 1912, (figura 5.3). En la cámara la partícula cargada deja una trayectoria visible que se puede fotografiar o ver directamente.

La cámara consiste en un recipiente cerrado, lleno de vapor de agua o de alcohol próximo a la saturación. El vapor saturado se condensa por los iones que se crean en el recorrido de la partícula, observándose goticas que constituyen la trayectoria visible o traza de la partícula.

La información que proporcionan las trazas (huellas) en la niebla es mucho más completa que la que pueden dar los contadores. Por la longitud de la huella se puede determinar la energía de la partícula; mediante el número de gotas por unidad de longitud de la trayectoria se puede apreciar su velocidad; y de acuerdo con el grosor de las trazas se puede juzgar comparativamente el valor de su carga.



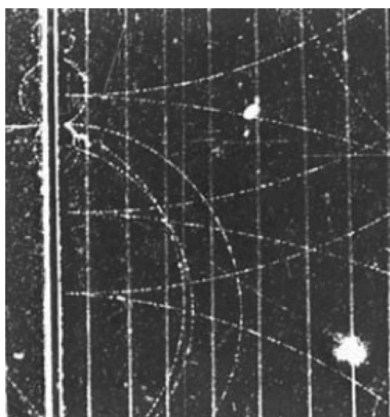
**Fig. 5.3** Esquema de la cámara de niebla

### Cámara de burbujas

Otro dispositivo que emplea un método similar a la cámara de niebla es la cámara de burbujas. Su inventor fue Donald Arthur Glaser, en 1952.

La cámara de burbujas es un detector de partículas cargadas eléctricamente y la compone una cuba que contiene un fluido transparente, generalmente hidrógeno líquido, que está a una temperatura algo más baja que su temperatura de ebullición. Una partícula cargada suministra la energía necesaria para que el líquido comience a hervir a lo largo de su trayectoria, formando una línea de burbujas que constituye la traza o huella.

Esta traza puede fotografiarse (figura 5.4), pues la cámara tiene en su parte superior una cámara fotográfica. La cámara se somete a un campo magnético constante, lo cual hace que las partículas cargadas viajen en trayectorias helicoidales cuyo radio queda determinado por el cociente entre la carga y la masa de la partícula. De esta manera se pueden obtener la masa y la carga de las partículas que entran en la cámara.



**Fig. 5.4** Huellas de un electrón y un positrón en la cámara de burbujas. Bajo el campo magnético aplicado, los electrones se desvían hacia abajo y los positrones hacia arriba

### Método de las emulsiones fotográficas

Con este método fue que, en 1896, el físico francés Antoine Henri Becquerel descubrió el fenómeno de la radiactividad con sales de uranio. Este fenómeno se produjo durante su investigación sobre la fluorescencia. Al colocar sales de uranio sobre una placa fotográfica en una zona oscura, comprobó que la placa se ennegrecía.

En este caso, lo que sucede es que las partículas emitidas, debido a su acción ionizante, dejan una huella a su paso a través de la capa que se puede observar cuando se realiza el revelado de la película (figura 5.5). Con este método, también se puede determinar la masa, la energía y la carga de la partícula.



**Fig. 5.5** Grosor de huella que permite estimar la energía y la masa de la partícula

### Detectores de estado sólido

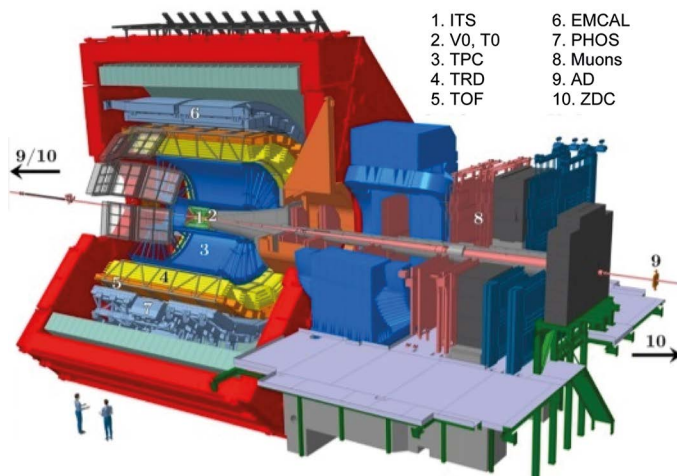
Se acostumbra a llamar detectores de estado sólido a los dispositivos que utilizan materiales semiconductores para detectar y medir las radiaciones nucleares.

La detección de radiación con detectores de estado sólido se basa en la interacción de la radiación con los átomos del material semiconductor. Cuando una partícula incidente interactúa con el material semiconductor, se crean pares electrones-huecos, que se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, generando una corriente proporcional a la energía de la partícula incidente.

Como los detectores de estado sólido tienen una respuesta rápida y lineal, una gran versatilidad geométrica, una elevada sensibilidad y fiabilidad, además de ser compactos y robustos, tienen amplia gama de aplicaciones prácticas en la investigación, la práctica médica, la industria y la seguridad radiológica, por solo citar algunas.

### Otras formas de detección de las radiaciones nucleares

En la actualidad, el alto nivel en las investigaciones relacionadas con el núcleo atómico y las partículas elementales, ha propiciado el desarrollo de complejos y sofisticados sistemas para la detección y estudio de las radiaciones y partículas elementales como, por ejemplo, en el moderno acelerador de partículas de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN): el LHC (Gran Colisionador de Hadrones) que tiene siete detectores de partículas de gran complejidad para poder desarrollar los diferentes experimentos programados. Solo el experimento ALICE (Gran Experimento Colisionador de Iones, uno de los siete) utiliza 18 detectores, cada uno con una finalidad muy específica (figura 5.6).



**Fig. 5.6** El detector Alice, uno de los siete grandes detectores del gran colisionador de hadrones del CERN

## Comprueba tus conocimientos

1. Describe brevemente cómo funciona uno de los dispositivos utilizados en Física nuclear para el estudio de las propiedades de las partículas.
2. ¿Cómo se puede registrar con el contador de Geiger partículas sin carga eléctrica?
3. ¿Qué ventajas ofrece la cámara de Wilson sobre el contador de Geiger?

## 5.2 Estructura y propiedades físicas del núcleo atómico

Sabemos que el núcleo del átomo tiene carga positiva y que está formado por protones (partículas de carga positiva) y neutrones (partículas sin carga), pero para poder explicar los fenómenos relacionados con el núcleo atómico es necesario ampliar nuestros conocimientos sobre la estructura del núcleo y sus propiedades.

A partir del descubrimiento por el físico inglés J. Chadwick del neutrón, en el año 1932, fue que surgió el modelo de que el núcleo atómico estaba formado por protones (partículas con carga eléctrica positiva) y por neutrones (partículas sin carga eléctrica). A los protones y neutrones se le denomina nucleones.

Como el átomo es un sistema eléctricamente neutro y la carga del protón es igual en valor modular de la carga del electrón  $e$ , entonces el número de protones, en un elemento químico dado, será igual al número de electrones ( $Z$ ) y la carga total del núcleo  $q_n$  estará dada por:

$$q_n = +Ze \quad (5.1)$$

Como la masa del núcleo ( $m_{\text{núcleo}}$ ) será igual a la suma de las masas de los protones ( $m_p$ ) y de los neutrones ( $m_n$ ), si  $Z$  es el número de protones y  $N$  el número de neutrones, entonces:

$$m_{\text{núcleo}} = Zm_p + Nm_n \quad (5.2)$$

La masa del protón es  $1,6726 \cdot 10^{-26}$  kg y la del neutrón es  $1,6749 \cdot 10^{-26}$  kg.

En química, bioquímica y física para medir la masa de los átomos y sus componentes también se utiliza la unidad Dalton. El Dalton se define como la doceava parte de la masa de un átomo de carbono-12 en estado fundamental y su símbolo es Da.



Esta unidad permite expresar con precisión las masas relativas de las partículas subatómicas, por ejemplo, expresadas en Dalton, las masas del protón y del neutrón son aproximadamente de 1,007 Da y 1,009 Da, respectivamente. Es decir, la masa del neutrón es ligeramente mayor que la masa del protón, siendo ambas masas muy cercanas en valor. Esta diferencia se debe a que los protones y neutrones, si bien son partículas subatómicas que componen el núcleo de los átomos, tienen una composición interna y propiedades ligeramente distintas.

A la suma de los protones y neutrones de un núcleo atómico se le llama número másico y se simboliza por la letra  $A$ :

$$A = Z + N \quad (5.3)$$

El número másico es el número entero aproximado a la masa, expresada en dalton, del núcleo del elemento químico en cuestión. Por ejemplo:

Elemento	Masa atómica (Da)	A
Helio	4,0026	4
Carbono	12,0111	12

Por supuesto, como la masa del electrón es muy pequeña en comparación con la de los nucleones (la masa del protón es aproximadamente 1 836 veces mayor que la masa del electrón), el número másico es aproximadamente igual a la masa del átomo, medida en dalton. Aproximadamente el 99 % de la masa del átomo está concentrada en el núcleo.

En general la masa del núcleo estará dada por:

$$M_n = Zm_p + Nm_n \quad (5.4)$$

Donde  $Z$  es el número de protones y  $N$  el número de neutrones en el núcleo.

Para representar a los núcleos atómicos se utiliza la simbología siguiente:



Donde  $A$  es el número másico,  $Z$  es el número atómico y  $X$  es el símbolo del elemento.

El experimento de dispersión de Rutherford y otros experimentos han demostrado que la mayor parte de los núcleos son aproximadamente

esféricos y tienen un radio promedio que se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$r = r_o \cdot \sqrt[3]{A} \quad (5.5)$$

Siendo  $r_o = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ , donde  $A$  es el número másico.

De la ecuación 5.4 se infiere que el volumen del núcleo es proporcional a la raíz cúbica del número másico. Como los núcleos “pesados” tienen un número mayor de nucleones, estos tendrían un radio mayor, pero la densidad de todos los núcleos sean ligeros o pesados es la misma y aproximadamente igual a  $2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

Cómo el radio de un átomo es del orden de  $10^{-10} \text{ m}$ , el núcleo solo ocupa una parte muy pequeña del volumen del átomo.

### Isótopos e isobaros

A los núcleos que poseen igual número atómico ( $Z$ ) y diferente número másico ( $A$ ) se les llama isótopos, ejemplo: el deuterio  ${}^2_1\text{H}$  y el tritio  ${}^3_1\text{H}$  son isótopos del hidrógeno.

A los núcleos que poseen igual número másico ( $A$ ) se les denomina isobaros, por ejemplo: el tritio  ${}^3_1\text{H}$  y el helio  ${}^3_2\text{He}$ , o el carbono  ${}^{14}_6\text{C}$  y el nitrógeno  ${}^{14}_7\text{N}$ , son isobaros.

En la tabla 5.1 aparecen las características de algunas partículas.

**Tabla 5.1**

Nombre	Símbolo	A	Z	N	Masa atómica (Da)	Representación
Electrón	$e^-$	0	-1	0	0,0005	${}^0_{-1}e$
Protón	p	1	1	0	1,0073	${}^1_1p$
Neutrón	n	1	0	1	1,0087	${}^1_1n$
Hidrógeno	H	1	1	0	1,0081	${}^1_1\text{H}$
Helio	He	4	2	2	4,0026	${}^4_2\text{He}$
Litio	Li	7	3	4	7,0160	${}^7_3\text{Li}$
Carbono	C	12	6	6	12,0111	${}^{12}_6\text{C}$
Nitrógeno	N	14	7	7	14,0067	${}^{14}_7\text{N}$

Nombre	Símbolo	A	Z	N	Masa atómica (Da)	Representación
Oxígeno	O	16	8	8	15,9994	$^{16}_8\text{O}$
Sodio	Na	23	11	12	22,9998	$^{23}_{11}\text{Na}$
Aluminio	Al	27	13	14	26,9815	$^{27}_{14}\text{Al}$
Silicio	Si	28	14	14	28,0860	$^{28}_{14}\text{Si}$
Fósforo	P	31	15	16	30,9738	$^{31}_{15}\text{P}$
Polonio	Po	210	84	126	209,9824	$^{210}_{84}\text{Po}$
Radón	Rn	222	86	136	222,000	$^{222}_{86}\text{Rn}$
Torio	Th	232	90	142	232,0381	$^{232}_{90}\text{Th}$
Uranio	U	238	92	146	238,0289	$^{238}_{92}\text{U}$

### + ¿Sabías que...?

La densidad de los núcleos atómicos es mayor que la densidad de la Tierra en  $4,6 \cdot 10^{13}$  veces. La densidad de la Tierra considerándola esférica es  $5,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Si la densidad de la Tierra fuera la nuclear, su radio tuviese un valor de solo 180 m.

## Fuerzas nucleares

Como en el núcleo atómico los protones están muy próximos, las fuerzas de repulsión de origen electrostático deben ser muy grandes. Para tener una idea al respecto, la fuerza de repulsión entre dos protones en el núcleo debe ser de unos 230 N, entonces:

¿Cómo es que los nucleones se mantienen unidos?

Por supuesto, esto solo se puede explicar si entre los nucleones actúa una fuerza de atracción lo suficientemente grande como para compensar las fuerzas de repulsión electrostáticas.

La fuerza de atracción entre los nucleones es la más grande que existe en la naturaleza y se le conoce como *fuerza fuerte*. La comprensión de la naturaleza de este tipo de interacción (interacción fuerte) se ha logrado poco a poco y sigue siendo un complejo tema de investigación.

Aunque la explicación de la naturaleza de la interacción fuerte rebasa el nivel de este libro, sí precisaremos algunas de sus características:

- Son fuerzas de atracción. de muy corto alcance, o sea, solo se ejercen en el interior del núcleo.
- Cada nucleón interactúa con los nucleones más cercanos y con un número determinado.
- Son independientes de la carga, ya que la fuerza, específicamente nuclear, protón-protón, neutrón-neutrón y protón-neutrón tiene el mismo valor.
- Son las más intensas de la naturaleza, 137 veces más que las fuerzas electromagnéticas y aproximadamente 1 038 más que las gravitacionales.
- No están dirigidas en la dirección de la recta que une las partículas.
- Se produce por el intercambio de una partícula elemental llamada pion.

### Modelos del núcleo atómico

Además del modelo de núcleo atómico esférico, que describe el núcleo como un objeto extremadamente denso de forma esférica constituido por protones y neutrones acomodados muy juntamente, se han desarrollado el modelo de la gota líquida (o modelo colectivo) y el modelo de capas de nucleones.

**El modelo de la gota líquida** trata al núcleo atómico como si fuera una gota de líquido incompresible. Algunas de las principales características de este modelo son:

- El núcleo tiene forma esférica y su radio es proporcional al número de nucleones (protones y neutrones) que lo componen.
- La fuerza nuclear que mantiene unidos a los nucleones es la misma para todos, sin importar si son protones o neutrones.
- Los nucleones solo interactúan con sus vecinos más próximos.

Este modelo ayuda a explicar algunas propiedades generales del núcleo, la variación de la energía de enlace con el número de nucleones y no toma en consideración los efectos cuánticos.

**El modelo de capas** describe al núcleo atómico como un sistema de nucleones que se mueven de manera independiente en niveles de energía discretos, similar a como los electrones se organizan en

capas en el átomo. Algunas de las características principales de este modelo son:

- Los nucleones se mueven en un potencial nuclear con simetría esférica, ocupando niveles de energía discretos.
- Los nucleones van llenando los niveles de energía de manera ordenada, formando “capas” llenas y semillenas (se sigue el principio de exclusión de Pauli)
- Ciertos números de protones o neutrones (2; 8; 20; 28; 50; 82; 126) forman configuraciones particularmente estables, llamados “números mágicos”.

Este modelo ayuda a explicar propiedades como la discontinuidad en la energía de enlace de los núcleos y la estabilidad de ciertos isótopos.

### Comprueba tus conocimientos

4. ¿Por qué podemos afirmar que la carga del núcleo es positiva y que su masa coincide con la masa atómica del elemento?
5. ¿Qué es un nucleón? ¿Cuáles son las partículas consideradas como nucleones?
6. Describe el modelo de la gota líquida para el núcleo.
7. ¿Por qué la densidad nuclear es igual para todos los elementos químicos?
8. ¿Cómo se clasifica la interacción entre las partículas del núcleo? Menciona algunas de sus características.

## 5.3 Energía de enlace del núcleo y defecto de masa. Energía de enlace por nucleón

¿Qué es la energía de enlace?

*Se llama energía de enlace del núcleo a la energía necesaria para la desintegración total del núcleo en nucleones separados o, lo que es equivalente a la energía que se libera al formarse un núcleo a partir de los nucleones por separado.*

La energía de enlace de los núcleos atómicos es muy grande, ¿cómo se puede hallar su valor?



En la figura 5.7 se muestra la gráfica de la variación de la energía de enlace por nucleón en función del número de nucleones. El mayor valor de la energía de enlace de un nucleón es el del níquel ( $A = 62$ , con 8,8 MeV). Los núcleos de los elementos que se encuentran en la parte media del sistema periódico ( $28 < A < 138$ ) es decir, desde el silicio hasta el bario, son los más estables. En estos núcleos el valor de  $E_{enl}$  se aproxima a 8,7 MeV/nucleón. A medida que aumenta el número de nucleones del núcleo, la energía de enlace por nucleón disminuye. Los núcleos de los átomos de los elementos químicos que se encuentran al final del sistema periódico tienen una energía de enlace de aproximadamente 7,6 MeV/nucleón.

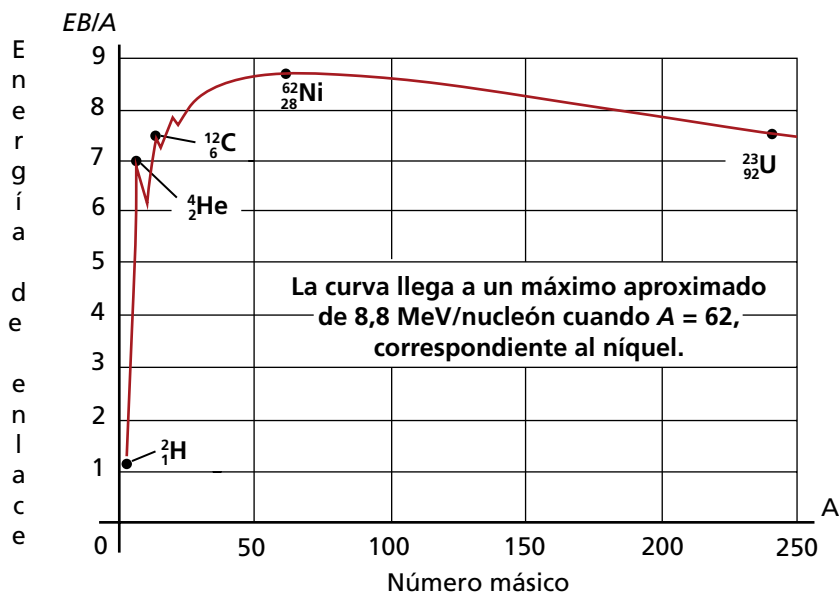


Fig. 5.7

### Problema resuelto 1

Determina la energía de enlace del núcleo de deuterio  $^2_1\text{H}$  y la energía de enlace por nucleón. Considera que la masa del protón es de 1,0073 Da, la del neutrón de 1,0087 Da y la del  $^2_1\text{H}$ , de 2,0141 Da.

**Solución:**

La energía de enlace se puede calcular mediante la ecuación 5.7:

$$E_{enl} = \delta M c^2$$

Y la diferencia de masa mediante la ecuación 5.6;

$$\delta M = Z_{mp} + N_{mn} - M_n$$

Como en este caso  $Z = 1$  y  $N = 1$

$$\delta M = 1,0073 \text{ Da} + 1,0087 \text{ Da} - 2,0141 \text{ Da}$$

$$\delta M = 0,0019 \text{ Da}$$

Para calcular la energía de enlace se debe expresar este resultado en kilogramos (kg) y después usar la ecuación 5.7. Al tomar  $c$  en metros por segundo (m/s), quedará  $E_{\text{enl}}$  expresada en joule (J). Después debemos expresar la energía de enlace en megaelectronvolt (MeV), que es la forma en que más frecuentemente se usa en física nuclear. Realizar estas conversiones es equivalente a utilizar la ecuación:

$$E_{\text{enl}} (\text{MeV}) = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} \delta M (\text{Da})$$

*Nota:* demuéstalo

$$E_{\text{enl}} = 9,31 \cdot 0,0019 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{enl}} \approx 1,77 \text{ MeV}$$

La energía de enlace por nucleón se puede calcular mediante la ecuación 5.8:

$$E'_{\text{enl}} = \frac{E_{\text{enl}}}{A}$$

$$E'_{\text{enl}} = \frac{1,77 \text{ MeV}}{2}$$

$$E'_{\text{enl}} \approx 0,88 \text{ MeV}$$

## Comprueba tus conocimientos

9. ¿Qué se entiende por defecto de masa?
10. ¿Cómo se define la energía de enlace de un núcleo? Plantea la ecuación para determinarla.
11. ¿Cuáles son los elementos de la tabla periódica, que poseen núcleos estables? Justifica tu selección.

## 5.4 Transformaciones de los núcleos

### Radiactividad natural

El fenómeno de la radiactividad natural, descubierto por Becquerel, en 1896, durante sus experimentos con sales de uranio, consiste en la emanación espontánea de radiaciones por la sustancia.



Investigaciones posteriores desarrolladas, entre otros, por la científica polaca María Slodowska-Curie (1867-1934), el francés Pierre Curie (1859-1906) y Rutherford, permitieron establecer que todos los elementos cuyo número atómico es mayor que 83 son radiactivos. Estos científicos también fueron los iniciadores de las investigaciones sobre la naturaleza física de estas radiaciones y sus propiedades.

### & De la historia

Antoine Henri Becquerel (1852-1908) físico francés (figura 5.8): descubridor de la radiactividad y galardonado con el Premio Nobel de Física del año 1903. Con sus valiosas investigaciones y descubrimientos hizo aportes al modelo atómico. En 1900 halló que la radiación Beta está integrada por electrones y, en 1901, que el radio se podía utilizar para destruir tumores, origen de la radioterapia.



**Fig. 5.8**

Marie Curie (1867-1934) científica polaca, nacionalizada francesa (figura 5.9): pionera en el campo de la radiactividad, fue la primera persona en recibir dos premios Nobel en Física y Química y la primera mujer en ocupar el puesto de profesora en París. Descubrió el radio y el polonio. Bajo su dirección se llevaron a cabo los primeros estudios en el tratamiento de neoplasias con isótopos radiactivos. Murió por una anemia aplásica, causada por la exposición a la radiación, por guardar tubos de ensayo con radio en los bolsillos durante la investigación.



**Fig. 5.9**

Pierre Curie (1859-1906) físico francés (figura 5.10): pionero en el estudio de la radiactividad y fue galardonado con el Premio Nobel de Física en el año 1903. Descubridor de la piezoelectricidad, en 1880. Enunció en 1894 el principio universal de simetría. Durante su doctorado y los años siguientes se dedicó a investigar alrededor del magnetismo. Desarrolló una balanza de torsión muy sensible para estudiar fenómenos magnéticos y estudió el ferromagnetismo, el paramagnetismo y el diamagnetismo.



**Fig. 5.10**

Analizando la desviación de las radiaciones emitidas por un preparado radiactivo cuando atraviesan un campo eléctrico o magnético (figura 5.11) es posible comprobar experimentalmente la existencia de cuatro tipos de radiaciones diferentes. Estas radiaciones se han denominado alfa ( $\alpha$ ) beta negativa ( $\beta^-$ ), beta positiva ( $\beta^+$ ) y gamma ( $\gamma$ ).

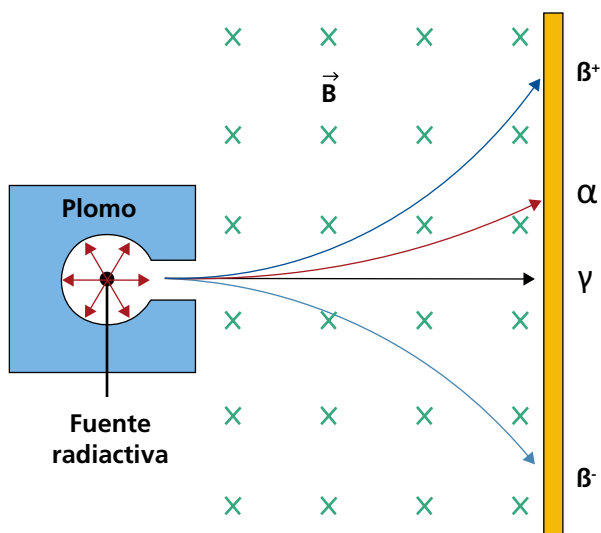


Fig. 5.11

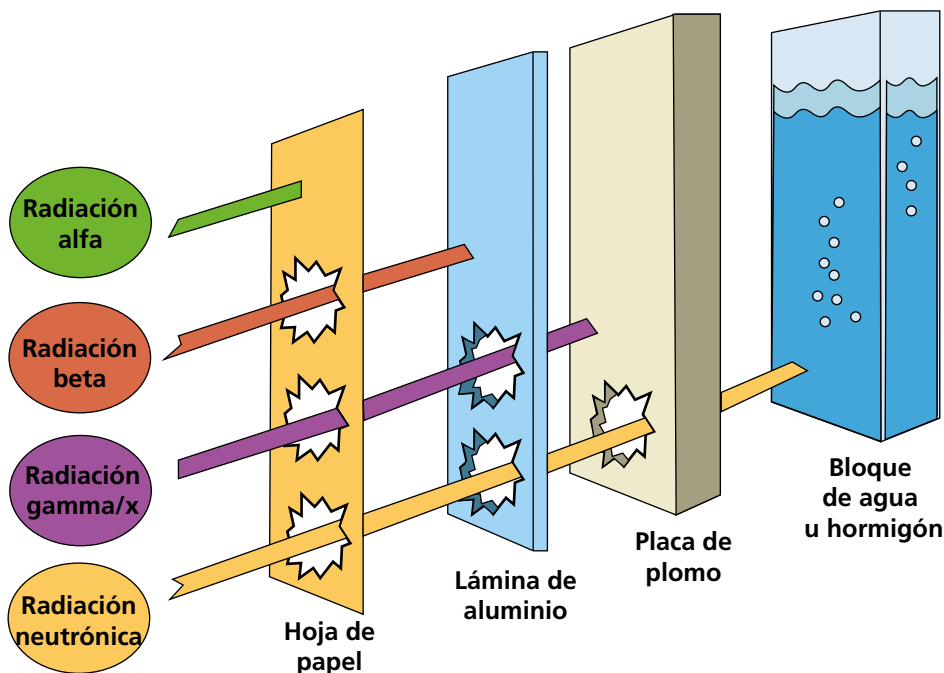
Estas radiaciones se diferencian por su naturaleza, origen y propiedades, algunas de sus principales características se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2

Radiación	Naturaleza	Carga	Masa	Poder de ionización	Símbolo
Alfa	Núcleos de helio	$+2e$	$4m_p$	30 000	${}^4_2\alpha$ o ${}^4_2\text{He}$
Beta –	electrones	$-e$	$m_e$	10-100	$\beta^-$ o ${}^0_{-1}e$
Beta +	positrones	$+e$	$m_e$	10-100	$\beta^+$ o ${}^0_{+1}e$
Gamma	electromagnética	0	$\frac{h\nu}{c^2}$	Menor que las $\beta$	${}^0_0\gamma$

Estos cuatro tipos de radiaciones, además de diferenciarse por su composición, se diferencian también por su capacidad de ser absorbidas por

las sustancias (figura 5.12). Las de menor capacidad de penetración son las radiaciones alfa  $\alpha$  (no son capaces de atravesar una hoja de papel de un espesor aproximado de 0,1 mm) y las de mayor capacidad de penetración son las  $\gamma$ , que pueden atravesar una lámina de plomo de 1,0 cm de espesor.



**Fig. 5.12**

A principios del siglo xx se obtuvo una serie de resultados experimentales, relacionados con la radiactividad natural, además de sus efectos físicos, biológicos y químicos. A grandes rasgos, los podemos resumir de la forma siguiente:

1. La radiación emitida por los elementos radiactivos uranio, torio y radio no depende de la temperatura y la presión a que está sometida la sustancia, ni de las reacciones químicas en que participan.
2. La intensidad de la radiación emitida por estos elementos radiactivos prácticamente no varía con el tiempo, durante un intervalo de años.
3. Durante la emisión radiactiva se produce una liberación de energía.
4. Como resultado de la transformación radiactiva se origina una nueva sustancia, que se diferencia totalmente de la sustancia inicial por sus propiedades físicas y químicas.

Todas estas regularidades pueden ser explicadas suponiendo que la emisión radiactiva se produce por transformaciones que ocurren espontáneamente en los núcleos atómicos, acompañadas de emisión de energía en cantidades enormes en comparación con la energía que se libera de las transformaciones moleculares habituales.

### Isótopos

Conocemos que a los núcleos que poseen igual  $Z$  y diferente  $A$  se les llama isótopos. La existencia de los isótopos demuestra que la carga del núcleo atómico no determina todas las propiedades de los átomos, sino únicamente sus propiedades químicas y aquellas físicas que dependen de la capa electrónica, por ejemplo, las dimensiones. La masa del átomo y sus propiedades radiactivas no vienen determinadas por el número de orden en la tabla de Mendeléiev, es decir, por el número de protones, sino también por la cantidad de neutrones. En la tabla 5.3 se muestran los números de neutrones y protones de algunos isótopos que no son radiactivos y otros que lo son.

Cuando las masas atómicas relativas de los isótopos se midieron con precisión, se puso de manifiesto que se aproximan a números enteros. A veces se encuentra una gran desviación de las masas atómicas relativas de los elementos químicos respecto de los números enteros. Así, la masa atómica relativa del cloro es igual a 35,5. Esto significa que, en su estado natural, la sustancia químicamente pura es una mezcla de isótopos en distintas proporciones.

**Tabla 5.3**

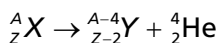
Isótopos	Notación	A	Z	N	Masa (Da)	Radiactividad
Hidrógeno	${}^2_1\text{H}$	2	1	1	2,0141	no
	${}^3_1\text{H}$	3	2	2	3,0160	$\beta^-$
Helio	${}^3_2\text{He}$	3	2	1	3,0160	no
Litio	${}^6_3\text{Li}$	6	3	3	6,0151	no
Carbono	${}^{13}_6\text{C}$	13	6	7	13,0033	no
	${}^{14}_6\text{C}$	14	6	8	14,0030	$\beta^-$

Isótopos	Notación	A	Z	N	Masa (Da)	Radiactividad
Silicio	$^{30}_{14}\text{Si}$	30	14	16	29,9737	no
Fósforo	$^{30}_{15}\text{P}$	30	15	15	29,9783	$\beta^+$
Rubidio	$^{94}_{37}\text{Rb}$	94	37	57	94,0051	$\beta^-$
Cesio	$^{140}_{55}\text{Ce}$	140	55	85	139,9101	$\beta^-$
Polonio	$^{210}_{84}\text{Po}$	210	84	126	209,9828	$\alpha$
Radio	$^{223}_{88}\text{Ra}$	223	88	135	223,0185	$\alpha$
Torio	$^{232}_{90}\text{Th}$	232	90	142	232,0380	$\alpha$
	$^{234}_{90}\text{Th}$	234	90	144	234,0435	$\alpha$
Uranio	$^{235}_{92}\text{U}$	235	92	143	235,0439	$\alpha$
	$^{238}_{92}\text{U}$	238	92	146	238,0507	$\alpha$

### Ley de los desplazamientos

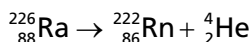
Solo después que fueron descubiertos los isótopos se logró entender la composición de la cadena sucesiva de las transformaciones radiactivas de los elementos. Estas transformaciones se subordinan a la denominada regla de los desplazamientos.

Durante la desintegración  $\alpha$ , o sea, durante el proceso en el cual el núcleo emite una partícula  $\alpha$ , dicho núcleo pierde una carga positiva  $+2e$ , y su masa disminuye aproximadamente en 4,0 Da. Como resultado de ello, el elemento se desplaza dos casillas hacia el inicio del sistema periódico. Este proceso puede ser escrito simbólicamente como sigue:

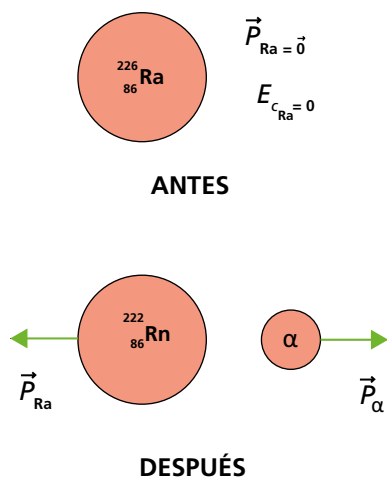


donde X es el núcleo inicial (núcleo madre) y Y es el núcleo producto de la desintegración (núcleo hijo).

Por ejemplo, en el caso de la desintegración alfa ( $\alpha$ ) del Radio 88 (figura 5.13), el proceso se representaría de manera simbólica de la forma siguiente:

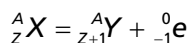


Además de la conservación de la carga y la masa, en estas transformaciones se cumplen, entre otras, las leyes de conservación de la cantidad de movimiento lineal y de la energía. Después de la transformación el núcleo hijo y la partícula  $\alpha$  se mueven en sentidos contrarios, pero cada uno con igual cantidad de movimiento, siendo la velocidad de la partícula mayor que la velocidad del núcleo hijo. Por otra parte, la suma de la masa del núcleo hijo y la de la partícula es menor que la masa en reposo del núcleo madre, diferencia de masa que se corresponde con la energía liberada en la transformación.



**Fig. 5.13** Representación de la desintegración  $\alpha^-$  del radio

Durante la desintegración  $\beta^-$  del núcleo, se libera un electrón. Como resultado, la carga del núcleo aumenta en una unidad, mientras que su masa se mantiene casi invariable, y el elemento se desplaza una casilla hacia el final de la tabla periódica. Este proceso puede ser escrito simbólicamente de la forma:

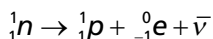


Pero hay que prestar atención a un detalle, ¿cómo se explica que el núcleo al transformarse emita un electrón que no entra en su composición?

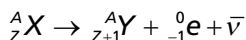
Esto se explica si se considera que al aumentar la carga eléctrica del núcleo en un protón es porque un neutrón se transformó en un protón y en el proceso se emite un electrón. Por otra parte, para que en un proceso de este tipo se cumplan las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento fue necesario postular la emisión de una tercera

partícula sin carga (antineutrino). Esta idea la propuso, en 1930, Pauli, y Fermi llamó neutrino a esta partícula. En 1953, en un experimento realizado por Frederick Reines y Clyde Cowan se comprobó la existencia de esta partícula.

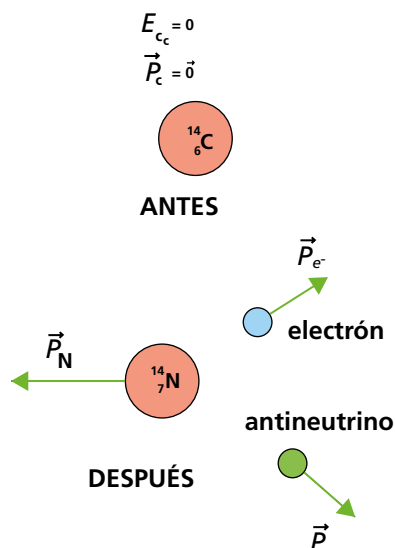
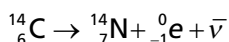
La representación simbólica de la transformación del protón es:



Y de la desintegración beta menos ( $\beta^-$ ) ya completada:



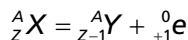
Por ejemplo, en el caso de la desintegración beta menos ( $\beta^-$ ) del carbono 14 (figura 5.14), el proceso se representaría de manera simbólica de la forma siguiente:



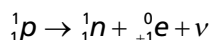
**Fig. 5.14** Representación de la desintegración  $\beta^-$  del carbono

En el caso de la desintegración beta más ( $\beta^+$ ) el núcleo madre se transforma emitiendo una partícula llamada positrón que es la antipartícula del electrón. El positrón tiene la misma masa y el valor de la carga del electrón, pero positiva  $+e$ . Esta partícula fue predicha por Paul Dirac, en el año de 1928, para luego ser descubierta en el año 1932 por el físico norteamericano Anderson, al fotografiar las huellas de los rayos cósmicos en una cámara de niebla.

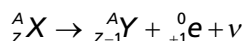
Como resultado de la transformación, la carga del núcleo hijo disminuye en una unidad, mientras que su masa se mantiene invariable y el elemento nuevo se desplaza una casilla hacia el inicio de la tabla periódica. La representación simbólica de este proceso es:



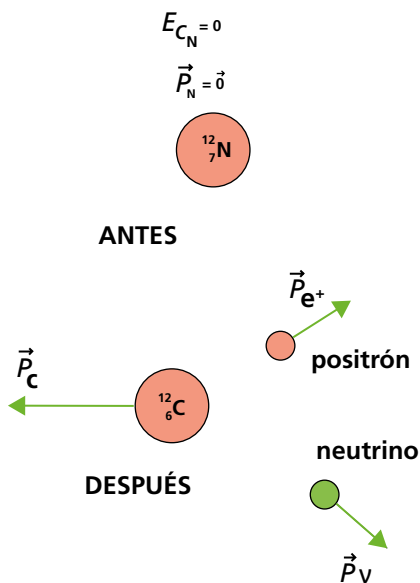
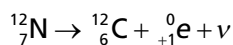
De manera análoga al caso de la desintegración beta menos, para explicar la emisión del positrón, ahora se considera que en el proceso un protón se transforma en un neutrón y un neutrino, lo que se representa de forma simbólica de la forma siguiente:



Entonces la representación simbólica de la desintegración beta más ( $\beta^+$ ) será:



Por ejemplo, en el caso de la desintegración natural del nitrógeno-12 (figura 5.15), que es  $\beta^+$  radiactivo, la representación del proceso sería:



**Fig. 5.15** Representación de la desintegración  $\beta^+$  del nitrógeno



La desintegración  $\beta^+$  se manifiesta en aquellos elementos químicos que tengan muy pequeña la relación  $\frac{N}{Z}$ , para buscar la estabilidad los núcleos emiten un positrón y la desintegración  $\beta^-$  en aquellos núcleos que la relación  $\frac{N}{Z}$  sea muy grande.

Las radiaciones  $\gamma$  no determinan variación en la carga del núcleo, y la masa varía de manera insignificante. La emisión de los cuantos  ${}^0_0\gamma$  por la sustancia radiactiva, se origina porque el núcleo se encuentra en un estado excitado. Similar al proceso que ocurre en el átomo, el núcleo pasa a un nivel de menor energía y emite el fotón gamma, sin variar el número de protones y el número másico. Las gammas son radiaciones electromagnéticas de elevada frecuencia, sin carga eléctrica y con un gran poder de penetración.

La regla de los desplazamientos es una consecuencia de las leyes de conservación de la carga y de la masa, y plantea que cuando ocurre la desintegración  $\alpha$  el elemento se desplaza dos casillas hacia el inicio de la tabla periódica, cuando ocurre la  $\beta^-$  una casilla hacia el final y, cuando ocurre la  $\beta^+$ , una casilla hacia el inicio.

Los nuevos núcleos que surgen durante la desintegración radiactiva generalmente son, a su vez, radiactivos.

### + ¿Sabías que...?

Los sismos se deben en parte a la desintegración radiactiva del  ${}^{238}_{92}\text{U}$  en el interior de la Tierra. Las desintegraciones liberan energía que contribuye a producir corrientes convectivas que provocan movimientos en la corteza terrestre (figura 5.16). También en las naves espaciales que salen del sistema solar llevan un suministro de energía radiactiva en las puntas de dos antenas porque los paneles solares no funcionan en regiones alejadas del Sol (figura 5.17).



Fig. 5.16



Fig. 5.17

**Ley de la desintegración radiactiva. Período de semidesintegración**

En los procesos de desintegración de los núcleos descritos anteriormente, no todos los átomos de una muestra de una sustancia radioactiva se transforman simultáneamente. En cada instante una pequeña parte de los átomos de la muestra se hacen inestables y se transforman en otro elemento químico. Por esta razón el número de átomos de la muestra aún sin transformarse decrece con el tiempo.

Se ha comprobado experimentalmente que el número de átomos que se desintegran en un tiempo determinado no es igual para todas las sustancias radiactivas, es decir, que podemos diferenciar una sustancia radiactiva de otra teniendo en cuenta esta propiedad. Una forma de cuantificar dicha propiedad es midiendo el tiempo que se demora en desintegrarse la mitad de la cantidad inicial de átomos radiactivos. Este tiempo recibe el nombre de período de semidesintegración.

Período de semidesintegración (T): es el tiempo en el transcurso del cual se desintegra la mitad del número de átomos radiactivos que existía inicialmente.

Supongamos que el número de átomos radiactivos en el instante inicial de tiempo  $t = 0$  es igual a  $N_0$ . Entonces, transcurrido un período de semidesintegración, este número será igual a:

$$\frac{N_0}{2}$$

Después de otro intervalo de tiempo igual, este número es:

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$$

Al transcurrir el tiempo  $t = nT$ , es decir, después de  $n$  períodos de semidesintegración, los átomos radiactivos que quedan sin desintegrar serán:

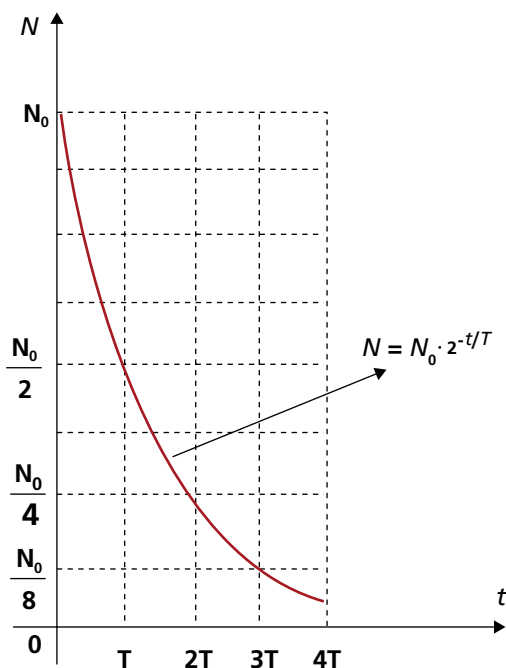
$$N = N_0 \frac{1}{2^n}$$

$$N = N_0 \frac{1}{2^{t/T}}$$

$$N = N_0 2^{-t/T} \quad (5.9)$$

La ecuación 5.9 representa la expresión cuantitativa de la ley de desintegración radiactiva y de ella podemos inferir que el número de

átomos sin desintegrarse decrece exponencialmente como se muestra en la figura 5.18.



**Fig. 5.18**

Todas las desintegraciones no ocurren con la misma velocidad. Existe una magnitud llamada actividad radiactiva ( $A$ ) que se define como el número de átomos desintegrados en la unidad de tiempo  $N'$ , de manera que:

$$A = \frac{N'}{\Delta t} = \frac{N_0 - N}{\Delta t} \quad (5.10)$$

La unidad de medida para la actividad en el sistema internacional de unidades es el becquerel (Bq) y  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/s}$ . También la actividad se puede expresar con otra unidad de medida conocida como el curie (Ci) siendo:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ desintegraciones/s}$$

En la tabla 5.4 se muestran los periodos de semidesintegración para algunos elementos.

Tabla 5.4

Elementos	Isótopos	Período de semidesintegración (T)	Emisión
Hidrógeno	${}^3_1\text{H}$	12,32 años	$\beta^-$
Carbono	${}^{14}_6\text{C}$	5 370 años	$\beta^-$
Cobalto	${}^{60}_{27}\text{Co}$	5,271 años	$\beta^-$ y ${}^0_0\gamma$
Radio	${}^{223}_{88}\text{Ra}$	11,43 días	$\alpha$
Uranio	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,038 \cdot 10^8$ años	$\alpha$
	${}^{232}_{92}\text{U}$	68,9 años	$\alpha$
Polonio	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138,376 días	$\alpha$

## Aplicaciones

La utilidad que brindan los isótopos radiactivos depende de sus propiedades, en particular del tipo de radiación que emiten, la energía de esta y su vida media, algunos ejemplos son los siguientes:

1. Análisis de elementos que se encuentran en concentraciones muy bajas.
2. Trazadores en estudios de procesos físicos, químicos, biológicos y médicos. En la medicina se utiliza una solución de cloruro con sodio o yoduro de sodio radiactivo que se inyecta en una vena de la pierna, con el objetivo de detectar obstrucciones en el sistema circulatorio (figura 5.19).

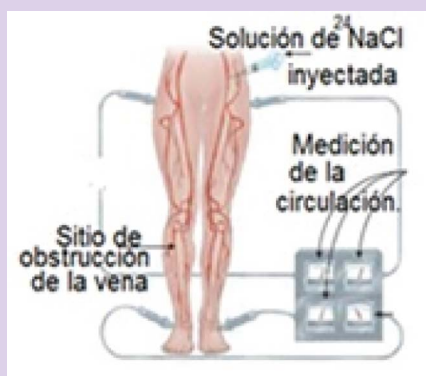
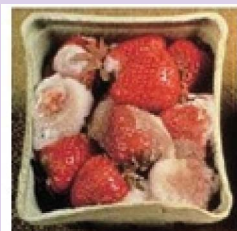


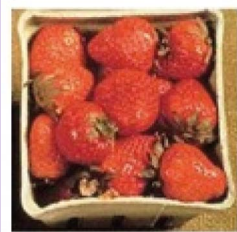
Fig. 5.19

3. Esterilización de productos químicos y biológicos.

Los alimentos pueden ser expuestos a radiaciones, para destruir las bacterias y las esporas de moho. De esta forma se pueden poner en recipientes sellados y almacenarse por un largo tiempo (figura 5.20).



Sin irradiar



**Fig. 5.20**

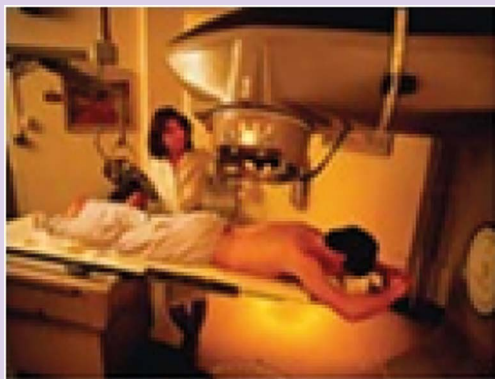
4. Hay dos tipos de detectores de humo: los fotoeléctricos y los iónicos. estos últimos funcionan mediante una pequeña fuente de material radioactivo que emite partículas  $\alpha$ , que ioniza el oxígeno del aire y origina una corriente eléctrica. Con la presencia del humo, la corriente varía, haciendo sonar la alarma (figura 5.21).



**Fig. 5.21**

5. Fuentes intensas de radiación en radiografías industriales y de la medicina nuclear.

En la medicina se utiliza la radiación como terapia útil para el tratamiento del cáncer, porque las células malignas se destruyen cuando se utiliza la radiación de rayos X o de una fuente de cobalto 60 (figura 5.22).



**Fig. 5.22**

6. Fechado radiactivo de muestras arqueológicas y geológicas midiendo la concentración de isótopos radiactivos del carbono 14.
7. Control del espesor de hojas y láminas en las industrias del papel, del hule, etcétera.
8. En pinturas luminiscentes.

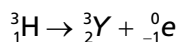
### Problema resuelto 3

El tritio es un isótopo radioactivo del hidrógeno que experimenta una desintegración radioactiva  $\beta^-$  hasta convertirse en un isótopo de un elemento conocido:

- a) Escribe la ecuación simbólica de la desintegración del tritio.
- b) ¿Cuál es el elemento químico que resulta de la desintegración?

*Solución:*

- a) De acuerdo con la ley de desplazamiento:



- b) Para conocer el elemento nuevo, vamos a la tabla periódica y buscamos el elemento que tiene como número atómico 2 y este coincide con el helio. En este caso es un isótopo de helio  ${}^3_2\text{He}$ .

## Problema resuelto 4

El período de semidesintegración del radón es igual 3,82 días. ¿Qué fracción de la cantidad inicial de radón se desintegrará en 5,0 días?

*Solución:*

Como:

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T},$$

la fracción que permanece sin desintegrar será:

$$\frac{N}{N_0} = 2^{-t/T}$$

Aplicando el logaritmo a los miembros de la igualdad queda:

$$\log \frac{N}{N_0} = \log \left( 2^{-t/T} \right)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = \frac{t}{T} \log 2$$

Como  $\log 2 = 0,301$

$$\log \frac{N}{N_0} = \frac{5,0 \text{ días}}{3,82 \text{ días}} \cdot 0,301 = 0,394$$

Aplicando antilogaritmo

$$\frac{N_0}{N} = \frac{1}{0,394} = 2,5$$

Por lo tanto:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

El 40 % de los átomos de la muestra inicial de radón quedan sin desintegrarse y el 60 % se transformó en otro elemento químico.

## Comprueba tus conocimientos

- 12.** Describe el fenómeno de la radiactividad natural.
- 13.** Explica cómo es posible determinar mediante un experimento la naturaleza física de las radiaciones nucleares.

14. ¿Por qué en la desintegración  $\beta^-$  el núcleo emite un electrón y en la desintegración  $\beta^+$  emite un positrón?
15. Di las características de las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  y  $\gamma$
16. ¿Qué ocurre con la sustancia durante la desintegración radiactiva?
17. ¿Por qué en las desintegraciones naturales hay una liberación de energía, que se utiliza en las aplicaciones? ¿Cómo se determina su valor?
18. ¿Qué leyes de conservación conocidas por ti se ponen de manifiesto durante las transformaciones radiactivas de los núcleos?
19. ¿Qué significa que el período de semidesintegración del radio sea de 1 580 años?
20. ¿Qué son los isótopos? ¿Serán todos radiactivos? Pon un ejemplo.

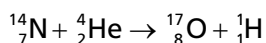
## 5.5 Reacciones nucleares. Radiactividad artificial

Las transformaciones de los núcleos no ocurren solo de manera espontánea; pueden producirse también artificialmente.

Rutherford supuso que para destruir o transformar el núcleo era necesario utilizar una cantidad de energía grande. La mayor fuente de energía disponible en ese tiempo eran las partículas  $\alpha$  emitidas por los núcleos radiactivos.

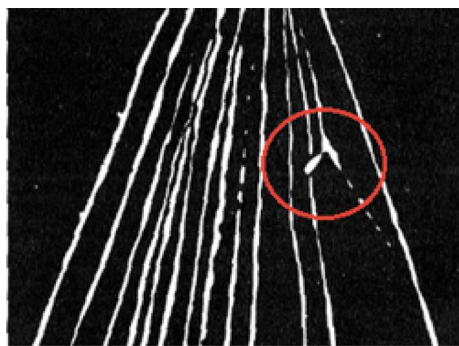
En 1920, Rutherford realizó un experimento en el que bombardeó con partículas  $\alpha$  emitidas por el radio (Ra) una muestra de nitrógeno y detectó la presencia de protones (el núcleo del átomo de hidrógeno). ¿Cómo explicar este resultado?

Aproximadamente una partícula  $\alpha$  de cada 50 000 de las lanzadas por el preparado radiactivo hacia la muestra es capturada por el núcleo de nitrógeno, el cual emite después un protón. Cuando esto ocurre, el núcleo de nitrógeno se transforma en un isótopo del oxígeno. Este proceso se puede representar simbólicamente de la siguiente forma:



En la figura 5.23 se representa una de las fotografías de este proceso. En la parte superior y hacia el centro se observa como una letra Y invertida, que corresponde a esta reacción nuclear.





**Fig. 5.23** En la parte señalada, la huella gruesa corresponde al protón y la fina al electrón

La huella gruesa es la que deja el núcleo de oxígeno, y la fina, el protón. Las partículas restantes no experimentan choques con los núcleos y las huellas de sus trayectorias son rectilíneas.

Mediante otras investigaciones fueron descubiertas las transformaciones de otros núcleos bajo la acción de partículas. Esto ocurrió con los núcleos del flúor, el calcio, el aluminio, etc. Los núcleos de los elementos pesados que se encuentran al final del sistema periódico no experimentan estas transformaciones, pues su gran carga eléctrica no permite el acercamiento de partículas.

Desde 1930 hasta la actualidad se utilizan aceleradores de partículas para iniciar las reacciones nucleares, en las que se alcanzan energías de por lo menos 1 000 GeV. Desde ese momento se han observado miles de reacciones nucleares en las que se crean nuevas partículas, cuyas propiedades ayudan a resolver los misterios del núcleo (figura 5.24)



**Fig. 5.24** El gran colisionador de hadrones del CERN es hasta ahora el acelerador de partículas más grande y de mayor energía que existe

## Radiactividad artificial

Durante las reacciones nucleares se pueden obtener artificialmente isótopos inestables de aquellos elementos químicos que en condiciones naturales son estables. Este fenómeno fue descubierto por los esposos Irène y Federico Joliot-Curie, en el año 1934, denominado por ellos radiactividad artificial.

Uno de los experimentos de los esposos Joliot-Curie, consistió en bombardear aluminio con partículas  $\alpha$  y con el contador Geiger comenzaron a detectar radiaciones de la placa de aluminio una vez que cesaba el bombardeo. Estas partículas eran positrones y eran emitidas por isótopos de fósforo 30. Los núcleos de aluminio se transformaron en isótopos radiactivos de fósforo 30, emitiendo un neutrón como se representa en la figura 5.25. La representación simbólica de esta reacción nuclear es:

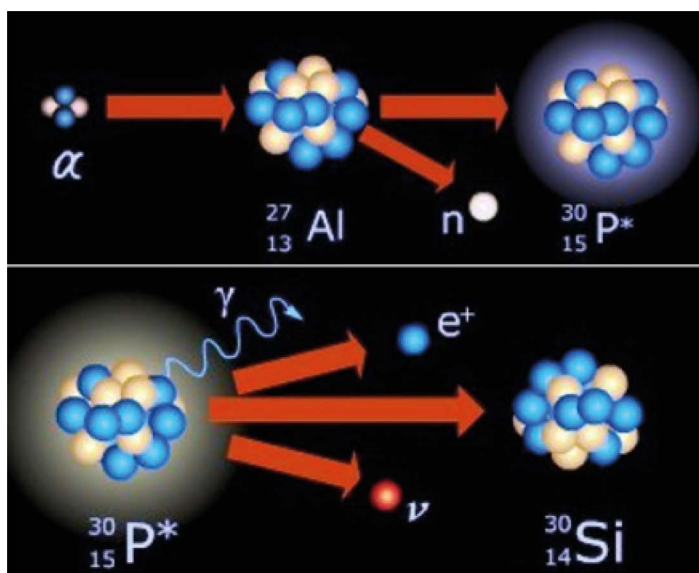
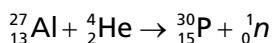
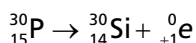


Fig. 5.25

Y la de la transformación del isótopo radiactivo artificial del fósforo:



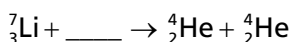
Este es uno de los ejemplos de formación de un núcleo por radiactividad artificial. Como consecuencia de este fenómeno se han obtenido cerca de mil isótopos radiactivos artificiales, mientras que los isótopos radiactivos naturales no pasan de 40.

Para el proceso de transformación artificial del núcleo, además de utilizar la partícula alfa, se utilizan protones por tener menor carga eléctrica y la repulsión eléctrica entonces sería menor.

En 1932, Ernest Walton (físico irlandés, 1903-1995) y John Douglas Cockcroft (físico británico, 1897-1967), discípulos doctorales de Rutherford, lograron construir uno de los primeros aceleradores de partículas y dividir, por primera vez, un núcleo atómico: el de litio en dos núcleos de helio. Estos físicos recibieron el Premio Nobel de Física, en 1951.

### Problema resuelto 5

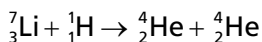
Completa la representación simbólica de la desintegración del litio realizada por primera vez en 1932:



Determina la energía asociada a la reacción, ¿es liberada o absorbida? Justifica.

*Solución:*

Para completar la ecuación utilizaremos la ley de conservación del número de nucleones y de la carga eléctrica.



La partícula utilizada para transformar al litio fue un protón.

Para calcular la energía asociada a la reacción de manera directa, podemos utilizar la ecuación:

$$E_{\text{enl}} (\text{MeV}) = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} \delta M (\text{Da})$$

$$E = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} (m_r - m_p)$$

Utilizando la tabla 5.1 y sustituyendo en la ecuación

$$E = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} (7,0160 \text{ Da} + 1,0072 \text{ Da} - 2 \cdot 4,0026 \text{ Da})$$

$$E = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \cdot 0,018 \text{ Da}$$

$$E = 16,758 \text{ MeV}$$

La energía fue liberada porque la energía en reposo de los reaccionantes es mayor que la energía en reposo de los productos.

### Comprueba tus conocimientos

21. ¿Cómo se define una reacción nuclear? ¿Cuál es su resultado?
22. ¿En qué consiste el fenómeno de la radiactividad artificial?
23. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre la radiactividad natural y la artificial?
24. ¿Cuáles son las partículas que en la actualidad se utilizan para provocar y estudiar las reacciones nucleares? Explica por qué son más efectivas que las partículas  $\alpha$  emitidas por los elementos radiactivos naturales.
25. ¿Cuál es la condición para que una reacción nuclear sea exotérmica y para que sea endotérmica?

## 5.6 Fisión nuclear. Reacción de fisión controlada. Fusión nuclear

### Fisión nuclear

El descubrimiento del neutrón, en 1932, fue un punto de giro en las investigaciones de las reacciones nucleares, pues carece de carga eléctrica y entonces penetra fácilmente en los núcleos atómicos, provocando las transformaciones.

El famoso físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) fue el primero en comenzar los estudios de las reacciones nucleares provocadas por neutrones rápidos y lentos que se mueven con velocidades térmicas. Con sus colaboradores, bombardeó con neutrones 60 elementos pesados, logrando obtener isótopos de 40 y la transformación del átomo del elemento 92, uranio, en el átomo del elemento 93, neptunio, no existente en la naturaleza.

### & De la historia

Enrico Fermi (1901-1954), físico italiano (figura 5.26): desarrolló el primer reactor nuclear. Realizó contribuciones al desarrollo de la teoría cuántica, la física nuclear y de partículas, y la mecánica estadística. En 1938, Fermi recibió el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre

radiactividad inducida, y es considerado uno de los científicos más destacados del siglo xx. Es reconocido por sus capacidades tanto en el plano teórico como experimental. El elemento fermio, que fue producido en forma sintética en 1952, fue nombrado en su honor. Los fermiones, el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), el elemento químico fermio y la Estadística de Fermi-Dirac reciben nombre en su honor.



Fig. 5.26

En 1938, los científicos alemanes O. Hahn (1879-1968) y F. Strassmann (1902-1980), descubrieron la fisión nuclear del uranio utilizando el neutrón y obteniendo dos elementos que ocupan la parte media de la tabla periódica: el bario y el kriptón.

La fisión nuclear es una reacción en la que un núcleo pesado se divide en dos núcleos de menor masa acompañada de la emisión de neutrones, fotones (rayos  $\gamma$ ), partículas  $\alpha$  y  $\beta$ . La energía “liberada” en este proceso se conoce como *energía nuclear de fisión*.

La representación de la ecuación simbólica de la fisión del isótopo radiactivo uranio 235 (figura 5.27) es la siguiente:

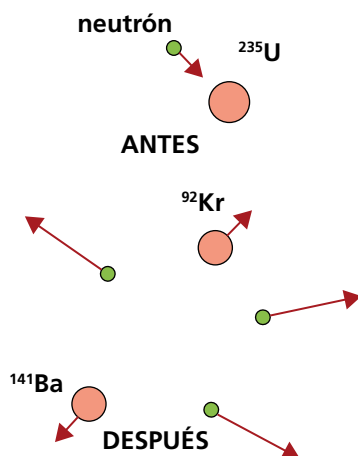
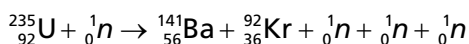


Fig. 5.27 Representación del proceso de fisión del  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , mediante un neutrón

En la fisión nuclear parte de la energía en reposo del núcleo se convierte en energía cinética de los fragmentos de la fisión. En la fisión de un núcleo de uranio 235 se libera una energía igual a 200 MeV.

¿Cómo se produce la fisión del núcleo?

El modelo de la gota líquida permite explicar este proceso. Cuando el núcleo absorbe el neutrón, se excita y comienza a deformarse, adquiriendo una forma alargada. El núcleo se estira sin romperse hasta que la fuerza de repulsión sea mayor que la fuerza de atracción y el núcleo se divide en dos fragmentos. Los fragmentos se repelen, alejándose con una velocidad del orden igual a la tercera parte de la velocidad de la luz (figura 5.28).

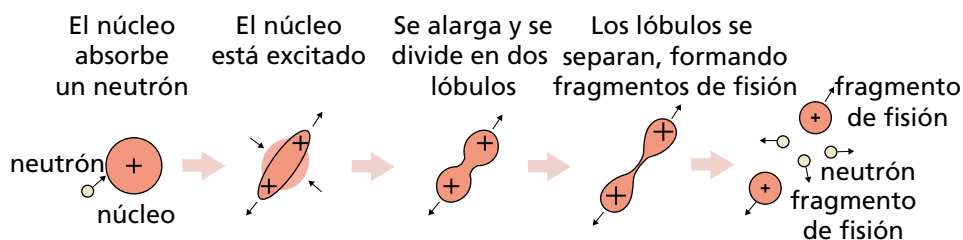


Fig. 5.28

### Reacción en cadena

La liberación de neutrones durante la fisión permite que se produzca, bajo determinadas condiciones, la denominada reacción en cadena de la fisión del uranio. Cualquiera de los neutrones que se liberan de la fisión del primer núcleo puede provocar la fisión de otro núcleo vecino, que emite también nuevos neutrones que poseen la capacidad de provocar nuevas fisiones. Como resultado, el número de núcleos de uranio fisionados aumenta rápidamente, así como la energía liberada, ocurriendo la reacción en cadena (figura 5.29).

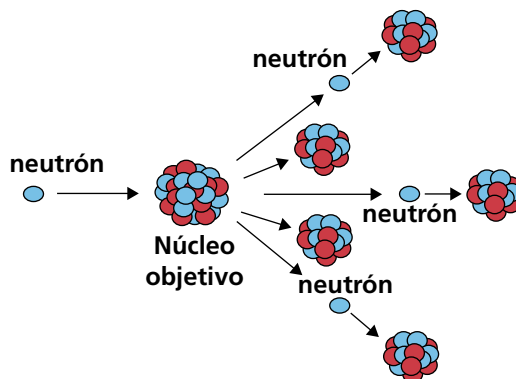


Fig. 5.29

La reacción en cadena va acompañada de una liberación de energía muy grande. Un núcleo radiactivo fisionado libera 200 MeV. Un gramo de uranio, tiene  $2,56 \cdot 10^{21}$  átomos y libera una energía de  $5,12 \cdot 10^{23} \text{ MeV} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$ , equivalente a la energía que se obtiene al quemar 3 t de carbón o 2,5 t de petróleo.

Pero para obtener la reacción en cadena no se pueden utilizar núcleos cualesquiera. El isótopo de uranio de número másico 235 constituye uno de los núcleos más ventajosos de los que se encuentran en la naturaleza para este propósito, pero el uranio natural está constituido fundamentalmente por dos isótopos: el  $^{235}_{92}\text{U}$  y el  $^{238}_{92}\text{U}$ . El primero constituye 1/140 parte del segundo, que es el más abundante en la naturaleza.

El núcleo se divide bajo la acción de neutrones rápidos o lentos (con velocidades térmicas). Los núcleos del  $^{238}_{92}\text{U}$  pueden fisionarse solo bajo la acción de neutrones rápidos de una energía superior a 1,0 MeV. Esta energía la posee aproximadamente el 60 % de los neutrones que se liberan durante la fisión. Sin embargo, solamente un neutrón de cada 5 es capaz de fisionar al  $^{238}_{92}\text{U}$ . Los restantes neutrones son absorbidos por este isótopo y no producen su fisión. Por esta razón, no se puede lograr la reacción en cadena si se utiliza solo el isótopo  $^{238}_{92}\text{U}$ .

Por lo tanto, para lograr la reacción en cadena es necesario disponer de mineral de uranio con una alta concentración del isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  (uranio enriquecido) y moderar la velocidad de los neutrones mediante algún material apropiado.

La reacción en cadena de forma controlada, es decir, para que no se produzca una liberación de energía de forma explosiva, se logra en los reactores nucleares de fisión.

## Reactor de fisión nuclear

Una de las aplicaciones más importantes de la física nuclear la constituye el reactor nuclear, pues es una instalación con la cual se puede controlar la reacción de la fisión del núcleo de uranio.

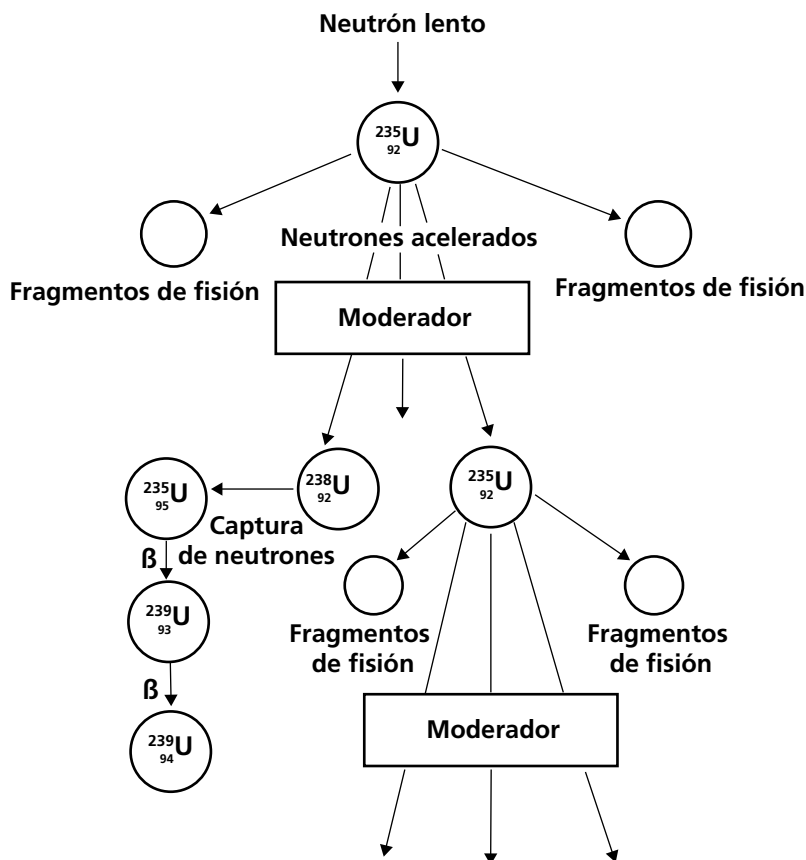
El núcleo de uranio que más se utiliza en los reactores es del isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  pues en él se absorbe con más efectividad a los neutrones lentos.

## & De la historia

El primer reactor nuclear se construyó en una cancha abandonada de tenis, de la Universidad de Chicago. Allí se inició, se mantuvo y se detuvo, en diciembre de 1942, bajo la dirección del físico italiano Enrico Fermi, la primera reacción nuclear en cadena.

La posibilidad de asimilar los neutrones lentos es cientos de veces mayor que la de asimilar neutrones rápidos. Por ello en los reactores nucleares que trabajan con uranio natural se utilizan neutrones retardados.

En la figura 5.30 se representan de forma esquemática los procesos que tienen lugar en un reactor nuclear.



**Fig. 5.30**

Los elementos fundamentales de un reactor nuclear son el combustible nuclear ( $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{239}_{94}\text{Pu}$  y otros), el retardador de neutrones (agua pesada o común, grafito y otros), el conductor del calor para dar salida al calor que se produce durante el trabajo del reactor (agua, calcio líquido y otros) y la instalación para regular la velocidad de reacción (que introduce en el espacio del trabajo del reactor unas varillas que contienen cadmio o bario, sustancias que absorben muy bien los neutrones). Alrededor del reactor



hay una capa protectora contra las radiaciones  $\gamma$  y los neutrones, constituida por concreto y planchas de acero.

Un retardador muy bueno lo constituye el agua pesada. El agua común retiene los neutrones y se convierte en agua pesada. Otro buen retardador es el grafito, cuyo núcleo no absorbe neutrones.

En la figura 5.31 se muestra el esquema de un reactor para alimentar un generador de electricidad.

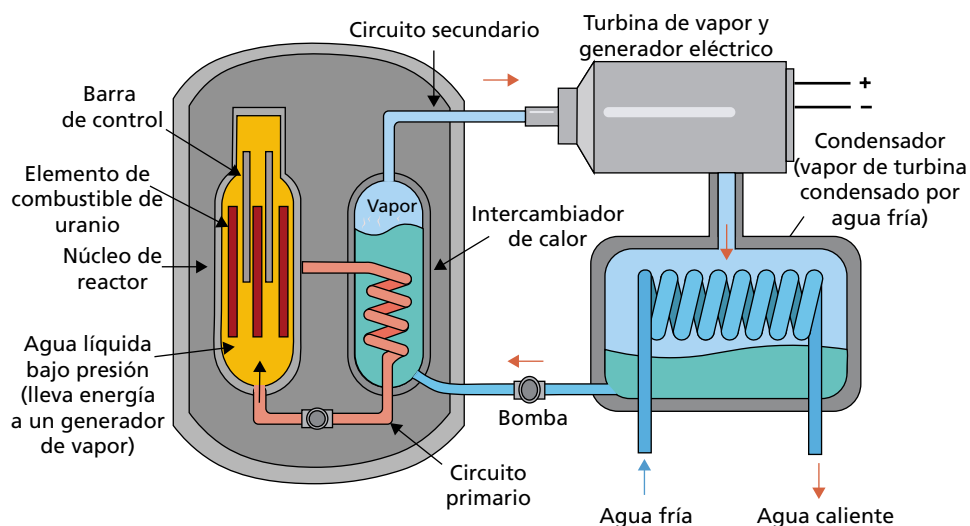


Fig. 5.31

## Saber más

### Reactores de neutrones rápidos

Se han construido reactores que trabajan sin retardador de neutrones rápidos. Puesto que la posibilidad de fisión que provocan los neutrones rápidos es muy pequeña, estos reactores no pueden trabajar con uranio natural. La reacción se puede lograr solo con una mezcla enriquecida que contenga no menos del 15 % del isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$ . La ventaja de los reactores de neutrones rápidos consiste en que, durante su trabajo, se forma una cantidad considerable de plutonio, el cual puede ser utilizado como combustible nuclear. Estos reactores se denominan reactores multiplicadores, pues reproducen el material fisionable. Se construyen reactores con coeficiente de multiplicación de hasta 1,5. Esto significa que de 1,0 kg del isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  se obtienen hasta 1,5 kg de plutonio. En los reactores comunes también se forma plutonio, pero en menor cantidad (el coeficiente de multiplicación es de hasta 0,6-0,7).

## & De la historia

Cuando la reacción en cadena de la fisión del uranio no se controla, puede ocurrir una explosión nuclear (figura 5.32). Este es el principio de la bomba atómica. El Proyecto Manhattan, fue el nombre clave de un proyecto de investigación científico llevado a cabo durante la Segunda Guerra Mundial por los Estados Unidos con ayuda parcial del Reino Unido y Canadá. El objetivo final del



**Fig. 5.32**

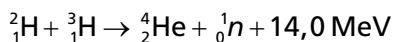
proyecto era el desarrollo de la primera bomba atómica antes que la Alemania fascista. En el grupo de científicos se encontraba, entre otros, Enrico Fermi, creador de la primera pila atómica en la Universidad de Chicago y Albert Einstein, que escribió una carta al presidente Roosevelt conminado por Oppenheimer, antes del inicio del proyecto, para convencer al presidente de la necesidad de establecer un programa semejante al que tenía la Alemania fascista, por el peligro que representaba la energía liberada por la fisión nuclear. En respuesta a la advertencia, Roosevelt incrementó las investigaciones acerca de las implicaciones en la seguridad nacional de la fisión nuclear. Después de la detonación sobre Hiroshima, Einstein comentaría: "debería quemarme los dedos con los que escribí aquella primera carta a Roosevelt". Albert Einstein después de enviar la carta al presidente no participó en la construcción de la bomba atómica. Aparte de esta carta, él nunca trabajó en el desarrollo de bombas nucleares.

## Fusión nuclear

Otra forma de reacción nuclear es la fusión, que consiste en la unión de dos núcleos ligeros con  $A < 20$ , con energía de enlace por nucleón menor, para formar un núcleo más pesado. En este proceso se desprenderá energía.

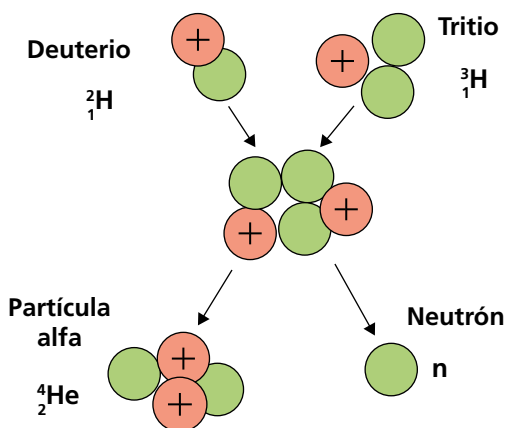
Este proceso proporciona cantidades de energía muy superiores al de la fisión nuclear. Por ejemplo, durante la fusión del deuterio con el tritio, ambos isótopos del hidrógeno (figura 5.33), se liberan 3,5 MeV/nucleón, mientras que en la fisión del uranio se libera 1,0 MeV/nucleón.

La representación simbólica de la fusión del deuterio con el tritio es la siguiente:



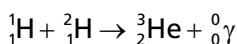
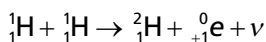
El principal obstáculo para obtener energía útil de la fusión es la gran fuerza repulsiva de Coulomb entre los núcleos. Los núcleos antes de la

fusión tienen que tener una gran energía cinética para vencer la fuerza electrostática de Coulomb. La temperatura requerida para producir fusión está en el orden de  $10^8$  K, y a esta temperatura toda la materia se presenta como plasma. Por este motivo las reacciones de fusión se les conocen como reacciones termonucleares. Ellas ocurren en las estrellas y una de ellas es el Sol, planteando entonces que la energía que irradian tiene un origen termonuclear.

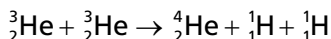
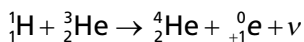


**Fig. 5.33**

Un ejemplo de reacciones de fusión en las estrellas con liberación de energía es:



Algunas de las reacciones de fusión en el Sol, que tienen: 70 % de hidrógeno, 28 % de helio y 2 % de carbono, nitrógeno, oxígeno y otros, son:



La enorme cantidad de energía liberada en las reacciones de fusión sugiere la posibilidad de emplear esta energía para diferentes fines que sean útiles. En la actualidad, ya se han construido reactores termonucleares de carácter experimental y se trabaja de manera intensa para construir un reactor termonuclear de fusión, que pueda ser utilizado de forma generalizada para la producción de energía de manera confiable y sostenible.

### + ¿Sabías que...?

Se cree que la fusión controlada es la máxima fuente de energía por la disponibilidad de su fuente de combustible: el agua. Por ejemplo, si se usara deuterio como combustible, podría extraerse 0,12 g de un galón de agua a un costo muy bajo; y podría liberar unos  $10^{10}$  J si todos los núcleos experimentaran fusión. En comparación, un galón de gasolina libera unos  $10^8$  J al consumirse y cuesta mucho más caro.

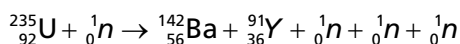
## Problema resuelto 6

En un reactor nuclear ocurre la fisión de un núcleo de uranio 235 por un neutrón lento. Se obtiene un isótopo de bario ( $m = 141,895$  Da), un elemento desconocido de masa 90,9133 Da y tres neutrones.

- Escribe la representación simbólica de la reacción de fisión del uranio.
- ¿Cuántos protones tiene el núcleo desconocido y cuál es el nombre del elemento? ¿En qué ley de conservación te basaste para conocer los protones en el núcleo desconocido?
- Calcula la energía liberada por la fisión del núcleo.
- ¿Cuánta energía libera 1,0 g de uranio?

*Solución:*

- Para escribir la representación simbólica de la reacción de fisión, tenemos que saber los elementos que reaccionan y los productos de la reacción, así como balancear la masa y la carga del sistema:



- Tiene  $Z = 36$  y el nombre es el kriptón. Para conocer el número de protones, se utilizó la ley de conservación de la carga nuclear.
- Para calcular la energía liberada, se puede usar la ecuación:

$$E = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} (m_r - m_p)$$

$$m_r - m_p = 235,0439 \text{ Da} + 1,0086 \text{ Da} - 141,895 \text{ Da} + 90,9133 \text{ Da} + 3,0258 \text{ Da} = 0,2184 \text{ Da}$$

$$E = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{Da}} \cdot 0,2184 \text{ Da} = 203,33 \text{ MeV}$$

- Para determinar la energía liberada por un gramo de uranio, primero debemos conocer el número de átomos que existen en un gramo y

después multiplicar este valor por la energía que libera el núcleo de un átomo. La masa molar del uranio es  $235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{1,0 \text{ g}}{235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,6 \cdot 10^{21} \text{ átomos}$$

$$E = 203,33 \text{ MeV} \cdot N = 203,33 \text{ MeV} \cdot 2,6 \cdot 10^{21} = 5,27 \cdot 10^{29} \text{ eV} = 8,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

## Comprueba tus conocimientos

26. ¿En qué consiste la reacción de fisión nuclear?
27. Describe el mecanismo de fisión nuclear, utilizando el modelo de la gota líquida.
28. ¿Por qué ocurre la emisión de neutrones y radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  y  $\gamma$  en la fisión del núcleo de uranio?
29. Describe el mecanismo de la reacción nuclear en cadena y di cuál es la condición que debe cumplirse para que ocurra.
30. ¿Cuándo una reacción nuclear en cadena es controlada?
31. ¿En qué consisten las reacciones termonucleares y cuáles son las condiciones necesarias para que estas se produzcan?
32. ¿Por qué podemos afirmar que el combustible nuclear del Sol disminuye? Describe las reacciones de fusión que ocurren en el Sol.

## 5.7 Partículas elementales

Actualmente el nombre de partícula elemental se usa para las partículas que, hasta donde se conoce, no están constituidas por partículas más pequeñas.

La idea de que los protones, neutrones y electrones, las partículas constituyentes de los átomos, eran partículas elementales, comenzó a cambiar radicalmente a partir del año 1940, en que los experimentos mediante colisiones nucleares a altas energías pusieron de manifiesto la existencia de otros tipos de partículas, con la característica de ser muy inestables y tener un pequeño periodo de semidesintegración.

El relativamente rápido descubrimiento de decenas de nuevas partículas (en la actualidad son centenares las partículas descubiertas y se hipotetiza sobre muchas más) puso de relieve la pregunta de que si esta gran cantidad y variedad de partículas no se podría explicar a partir de un número reducido de partículas, de manera semejante a como la tabla

periódica permite explicar la existencia de más de 100 elementos a partir de tres partículas diferentes (protones, neutrones y electrones).

### + ¿Sabías que...?

Durante las investigaciones realizadas con los aceleradores de partículas fueron apareciendo otras partículas que se clasificaron como:

**Partículas extrañas:** sus tiempos de vida ( $10^{-10}$  s) eran mucho mayor que los tiempos característicos de los procesos en los que surgían ( $10^{-23}$  s) y aparecían en pares.

**Partículas resonancias:** el tiempo de vida de estas partículas es de  $10^{-23}$  s y para su detección se empleaba métodos no ordinarios.

**Partículas encantadas:** partículas con una masa tres veces mayor que la masa del protón y con un tiempo de vida de  $10^{-20}$  s.

**Partículas bonitas:** se descubrieron en 1977 y su masa es 11 veces la masa del protón, siendo las más pesadas con un tiempo de vida igual a  $10^{-20}$  s.

En el presente, se conoce que los protones, los neutrones y muchas otras partículas, como los mesones que ya se han mencionado en capítulos anteriores, están formadas por seis tipos diferentes de partículas llamadas quarks y que toda la materia en el universo está formada por dos familias de partículas: los quarks y los leptones.

Si bien el fascinante estudio de las partículas elementales trasciende el nivel de este libro, el conocimiento de sus fundamentos de manera cualitativa resulta de mucha importancia para la cultura contemporánea. De hecho, nos encontramos inmersos en un mundo en el que se destinan grandes recursos a las investigaciones en este campo, con un impacto creciente en nuestra vida, no solo por sus aplicaciones prácticas más inmediatas, sino por lo que representan para la comprensión del universo.

La propuesta inicial de que todas las partículas, excepto las que se denominan leptones, están constituidas por otras, a las que se les llamó quarks, fue formulada, en 1963, por los científicos estadounidenses Gell-Mann y G. Zweig.

Originalmente se introdujo la hipótesis de que existen tres quarks (y tres antiquarks) y que, entre otras propiedades, tienen carga eléctrica fraccionaria. En la actualidad se postula la existencia de seis quarks (y seis antiquarks), denominados con las letras (u, d, s, c, b y t).

Los quarks se han encontrado formando parte de otras partículas, pero no se han descubierto quarks libres.

En la actualidad, la física de partículas elementales se basa en el llamado **modelo estándar**.

Las tres generaciones de la materia (fermiones)				Interacciones / transmisiones de fuerzas (bosones)	
	I	II	III		
masa	= 2,2 MeV/c <sup>2</sup>	= 1,28 GeV/c <sup>2</sup>	= 173,1 GeV/c <sup>2</sup>	0	= 125,11 GeV/c <sup>2</sup>
carga	2/3	2/3	2/3	0	0
espín	1/2	1/2	1/2	1	0
	u quark arriba	c quark encantado	t quark cima	g gluon	H bosón de Higgs
	= 4,7 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 d quark abajo	= 96 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 s quark extraño	= 4,18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 b quark fondo	0 1 γ fotón	
	= 0,511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 e electrón	= 1,5,66 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 μ muon	= 1,7768 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 τ tautón	0 1 Z bosón Z	
	< 1,0 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>e</sub> neutrino electrónico	< 0,17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>μ</sub> neutrino muónico	< 18,2 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>τ</sub> neutrino tauónico	±1 1 W bosón W	

QUARKS

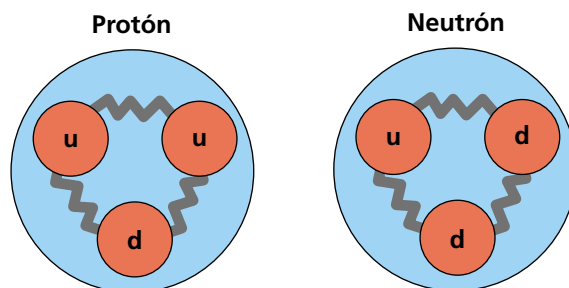
LEPTONES

BOSONES DE GAUGE

BOSONES VECTORIALES

BOSONES ESCALARES

Los **fermiones** son constituyentes básicos de las partículas subatómicas que interactúan mediante los bosones de Gauge. Algunos fermiones, como el electrón, son partículas elementales y otros, como el protón y el neutrón, son partículas compuestas (figura 5.34).

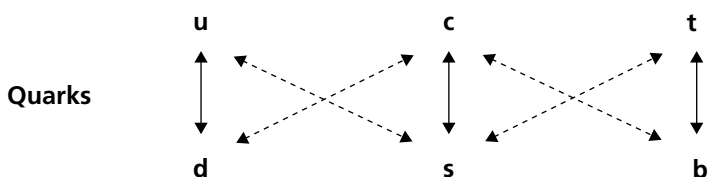


**Fig. 5.34** El protón está compuesto por dos quarks u y un quark d y el neutrón por dos quarks d y uno u

Las generaciones de fermiones dependen de su masa, los de segunda generación tienen una mayor masa que los de la primera y los de la tercera una mayor masa que los de la segunda.

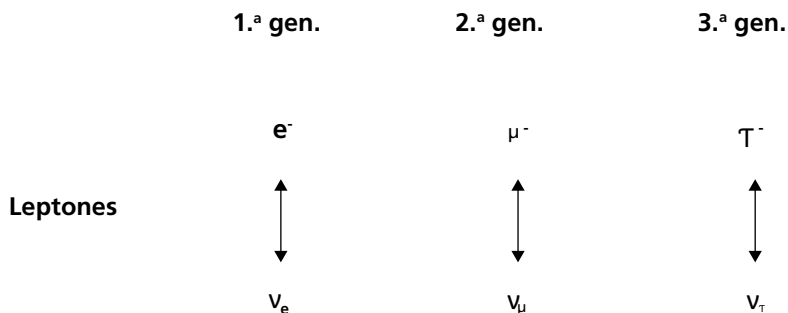
Los **quarks** se caracterizan por la interacción fuerte entre ellos. Aunque a la interacción entre los nucleones se le sigue llamando interacción fuerte, la interacción fuerte es la que se manifiesta entre los quarks y la que existe entre los nucleones es una interacción fuerte residual.

Entre los quarks también se manifiesta la fuerza débil, pero solo en determinadas condiciones puede provocar transformaciones entre distintas generaciones de quarks (figura 5.35)



**Fig. 5.35** Las líneas de puntos representan transformaciones muy poco probables

Los **leptones** se caracterizan porque entre ellos solo se manifiesta la interacción débil, pero esta interacción solo puede transformar un leptón en otro de la misma generación (figura 5.36)



**Fig. 5.36**

Los **bosones de gauge** son los bosones portadores de las interacciones fundamentales en la naturaleza y son diferentes de otros tipos de bosones, por ejemplo, de los mesones, que son bosones compuestos por quarks.



Los fotones (los portadores de la fuerza electromagnética), los bosones W y Z (los portadores de la fuerza débil) y los gluones (los portadores de la fuerza nuclear fuerte) son bosones de gauge. Todos los bosones de gauge conocidos tienen espín igual a 1 y por ello se les llama bosones vectoriales. El bosón de Higgs (relacionado con el origen de la masa de las partículas elementales) tiene espín cero y al hipotético gravitón le corresponde espín 2, estos son llamados bosones escalares.

Recordemos que las interacciones fundamentales en la naturaleza son la fuerte, la débil, la electromagnética y la gravitatoria. En la tabla 5.7 se resumen algunas características de estas interacciones y de sus partículas mediadoras.

Para ayudar a esclarecer la idea de la interacción, entre las partículas elementales, mediada por bosones, se puede recurrir a la analogía mecánica siguiente:

Imaginemos una pelota de ping-pong que representa una partícula elemental, como un electrón. Esta pelota se mueve por un campo de fuerza, como el campo electromagnético. Para que esta pelota interactúe con otra partícula, digamos un protón, necesita intercambiar algo con ella. En el caso de la interacción electromagnética, la pelota de ping-pong intercambia fotones con el protón. Los fotones actúan como los “mensajeros” que transmiten la fuerza entre las dos partículas. Cuantos más fotones se intercambien, más fuerte será la interacción electromagnética. De manera similar, en la interacción débil, la pelota de ping-pong intercambia bosones W y Z con otra partícula. Estos bosones masivos son los “mensajeros” que transmiten la fuerza débil entre las partículas. La gran masa de estos bosones hace que la interacción débil sea mucho más débil que la electromagnética. En la interacción fuerte, la pelota de ping-pong intercambia gluones con otras partículas, como los quarks dentro de un protón. Los gluones son los “mensajeros” de la fuerza fuerte.

Así, la idea clave es que las interacciones fundamentales entre partículas elementales se producen mediante el intercambio de partículas mediadoras específicas de cada tipo de interacción. Estas partículas mediadoras actúan como “mensajeros” que transmiten la fuerza entre las partículas.

Tabla 5.7

Interacción	Intensidad relativa	Alcance	Partícula mediadora		
			nombre	masa	carga
Fuerte	1	Corto $\sim 10^{-15}$ m	Gluón	0	0
Débil	$10^{-9}$	Corto $\sim 10^{-18}$ m	Bosón $\left( \begin{smallmatrix} + \\ W^-, Z^0 \end{smallmatrix} \right)$	$(80, -91, 2)$ $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	$\pm e, 0$
Electromagnética	$\frac{1}{137}$	Largo $\left( \frac{1}{r^2} \right)$	Fotón	0	0
Gravitacional	$10^{-38}$	Largo $\left( \frac{1}{r^2} \right)$	Gravitón	0	0

La familia de los mesones, formados por un número par de quarks (normalmente un quark y un antiquark), y de los bariones, formados por un número impar de quarks (normalmente tres quarks), son llamados **hadrones** (figura 5.37). Los protones y neutrones son ejemplos de bariones y los piones son ejemplos de mesones.

Se considera que casi todos los hadrones y antihadrones libres (es decir, aislados no ligados a un núcleo atómico) son inestables. La única excepción conocida hasta ahora son los protones, que son estables o tardan mucho tiempo en desintegrarse (del orden de  $10^{34}$  años). A manera de comparación, los neutrones libres, que son las partículas inestables más longevas, tienen una vida media de 879 s.

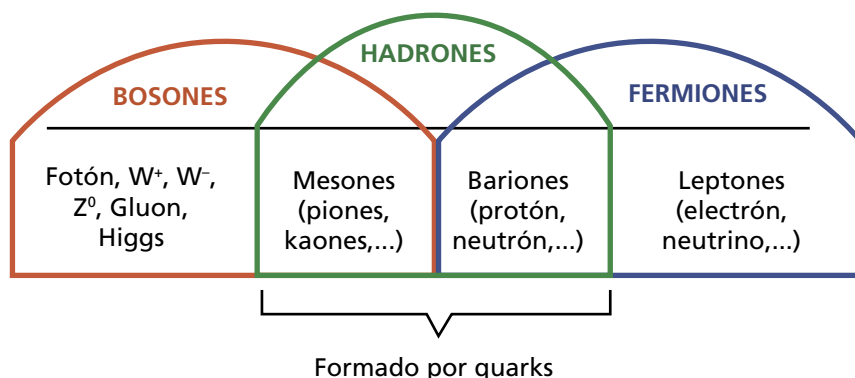
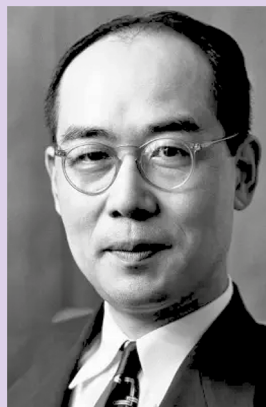


Fig. 5.37

Hideki Yukawa (1907-1981), físico japonés (figura 5.38): galardonado con el Premio Nobel de Física, en 1949, por formular la hipótesis de los mesones, basada en trabajos teóricos sobre fuerzas nucleares.

Aunque hoy se conoce que los mesones no son los portadores de las fuerzas nucleares, los trabajos de Yukawa contribuyeron de manera significativa a las investigaciones sobre las partículas elementales.

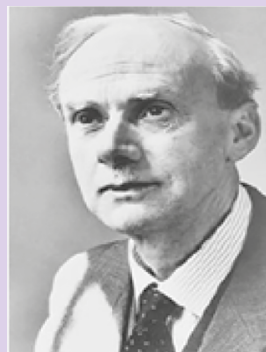
En 1955, junto con otros diez científicos e intelectuales, firmó el Manifiesto Russell-Einstein para un desarme nuclear.



**Fig. 5.38**

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), físico británico (figura 5.39): su trabajo fue vital para el discernimiento de la antimateria y la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad.

Realizó varias contribuciones para el desarrollo de la física cuántica y de la cosmología. Fue ganador del Premio Nobel de Física en 1933.



**Fig. 5.39**

## Limitaciones del modelo estándar

A pesar de ser, hasta la fecha, la teoría de partículas con más éxito, el modelo estándar presenta un gran número de limitaciones intrínsecas, cuya superación es un activo campo de trabajo de la física contemporánea.

A manera de ejemplo, algunas de sus limitaciones son las siguientes:

El Modelo Estándar no proporciona una explicación para la gravedad. El planteamiento de añadir simplemente un gravitón al Modelo Estándar no resuelve el problema y, además, es incompatible con la teoría de la gravedad que ha sido la más exitosa hasta la fecha, la relatividad general.

De acuerdo con el Modelo Estándar los neutrinos son partículas sin masa. Sin embargo, los experimentos de las oscilaciones de neutrinos han demostrado que los neutrinos sí tienen masa.

El Modelo Estándar predice que las cantidades de materia y la anti-materia deben ser casi iguales, lo que no coincide con las observaciones actuales. El modelo tampoco explica otros problemas cosmológicos, por ejemplo, los relacionados con la llamada materia y energía oscura.

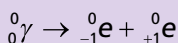
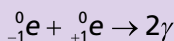
No hay correspondencia entre los resultados experimentales del valor de algunas magnitudes y los predichos por la teoría, por ejemplo, la masa del bosón W que excede a la predicha por el modelo.

### Saber más

#### Antipartículas

En 1928, Dirac resolvió la ecuación cuántico relativista del electrón y encontró dos resultados importantes. Primero aparecía el espín (número cuántico relacionado con la cantidad de movimiento angular) del electrón y el segundo se relacionaba con la posible existencia de una partícula similar al electrón, pero el signo de la carga sería positivo o sea la antipartícula del electrón llamada **positrón** ( ${}^0_{+1}e$ ). En 1932 el físico estadounidense Carl D. Anderson descubrió el electrón positivo, o **positrón**, cuando investigaba las partículas que bombardean la Tierra desde el espacio.

En 1933 y 1934, se hallaron experimentalmente las reacciones de formación y aniquilación de pares de partículas, en las que interviene el positrón:



La existencia de antipartículas se estableció con un carácter universal. El protón tiene su antipartícula llamada antiprotón ( $\bar{p}$ ) y el neutrón tiene a su antipartícula llamada antineutrón ( $\bar{n}$ ). Fueron encontrados, en 1955 y 1956, con los aceleradores de partículas.

### Comprueba tus conocimientos

33. ¿Cuáles son las partículas del modelo estándar?
34. ¿Cuáles son las características de los fermiones?
35. ¿Cuáles son las características de los bosones gauge?
36. ¿Qué son los quarks?
37. ¿Cuáles son los quarks que forman un protón, un antiprotón, un neutrón y un antineutrón?
38. ¿Cuáles son las cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza?

- 39.** ¿Cuáles son las partículas que participan en cada una de las interacciones?
- 40.** ¿Qué es la antipartícula? ¿Cuál fue la primera antipartícula descubierta experimentalmente?
- 41.** Di si la afirmación siguiente es verdadera o falsa: "El fotón gamma, utilizado para obtener el par electrón-protón, está formado por tres quarks: dos **u** y un **d**". Argumenta.

## Problemas generales del capítulo

- La energía de enlace del núcleo de  ${}^4_2\text{He}$  es 28,296 MeV. Calcula la energía, expresada en megaelectronvolt (MeV) y en joule (J), cuando se forman 0,5 g de helio a partir de sus nucleones libres.  
 Datos:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  moléculas  $\cdot$  mol $^{-1}$  y  $M = 4$  g  $\cdot$  mol $^{-1}$
- Las energía de enlace de los núcleos de  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{11}_5\text{B}$  y  ${}^{12}_5\text{B}$  son respectivamente 64,751 MeV; 76,205 MeV y 79,575 MeV.
  - Calcula la energía de enlace por nucleón para cada uno de los núcleos.
  - ¿Qué núcleo es más estable?
- Para el elemento oxígeno y con los datos que aparecen en la tabla 5.1, calcula:
  - El defecto de masa.
  - La energía de enlace expresada en megaelectronvolt (MeV) y en Joule (J).
  - La energía de enlace por nucleón.
- Con los datos que aparecen en la tabla 5.3, para el isótopo uranio 238:
  - Plantea la ecuación simbólica de la desintegración radiactiva alfa y diga el nombre del elemento obtenido.
  - Calcula la energía que se libera en la desintegración del núcleo de uranio.
- Con los datos que aparecen en la tabla 5.3, para el isótopo carbono-14:
  - Plantea la ecuación simbólica de la desintegración radiactiva beta menos y diga el nombre del elemento obtenido.
  - Calcula la energía que se libera en la desintegración del núcleo de carbono.

6. Con los datos que aparecen en la tabla 5.3, para el isótopo fósforo 30:
- Plantea la ecuación simbólica de la desintegración radiactiva beta más y diga el nombre del elemento obtenido.
  - Calcula la energía que se libera en la desintegración del núcleo de fósforo.
7. Determina el número de átomos que quedan sin desintegrarse, de una muestra radiactiva del cobalto (tabla 5.4) para un tiempo igual a 10,542 años.
8. El período de semidesintegración del polonio es de 140 días. Durante la emisión de partículas  $\alpha$ , el polonio se transforma en plomo estable. Calcula el número de átomos de plomo que se obtuvieron en 240 días como resultado de la desintegración.
9. Una muestra radiactiva que inicialmente poseía  $8,0 \cdot 10^{20}$  átomos, comienza a desintegrarse de modo que al transcurrir 10 días solo formaban parte de la misma la cantidad de  $2,0 \cdot 10^{20}$  átomos. ¿Cuál es el periodo de semidesintegración del elemento que conforma la muestra?
10. Se tiene un mole de un isótopo radiactivo, cuyo periodo de semidesintegración es de 100 días. ¿Al cabo de cuánto tiempo quedará solo el 10 % de la muestra inicial?
11. Completa las siguientes reacciones nucleares:
- ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \text{_____}$
  - ${}^{19}_9\text{F} + {}^1_1\text{H} \rightarrow \text{_____} + {}^4_2\text{He}$
  - ${}^6_3\text{Li} + \text{_____} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$
12. En la reacción del  ${}^6_3\text{Li}$  que aparece en la tabla 5.3, con un neutrón se obtiene un núcleo Y y una partícula alfa (masa de isótopo:  ${}^4_2\text{He} = 4,00260 \text{ Da}$ ).
- Escribe la ecuación simbólica de la reacción y determina el número de protones y neutrones del núcleo hijo.
  - Calcula la energía de la reacción. Clasifícala en exotérmica o endotérmica.
13. La siguiente ecuación corresponde a una reacción nuclear:
- $${}^{235}_{92}\text{U} + \text{_____} \rightarrow {}^{140}_{55}\text{Cs} + {}^{94}_{37}\text{Rb} + {}^1_0\text{n} + {}^1_0\text{n}$$
- ¿Es una reacción de fisión nuclear o de fusión nuclear? Justifica.
  - Completa la reacción y di el nombre de la partícula.

- c) Calcula la energía asociada a la reacción.
- d) Cada uno de los fragmentos de la fisión experimenta tres desintegraciones beta menos. ¿Qué elemento estable genera cada uno?
- 14.** En el Sol ocurren reacciones de fusión, donde el hidrógeno se convierte en helio. Una de ellas es la siguiente:
- $${}_1^1\text{H} + \text{_____} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{+1}^0\text{e} + \nu$$
- a) Completa la reacción y di el nombre del isótopo que se fusiona con el hidrógeno.
- b) Calcula la energía que se libera en la reacción.
- c) Compara la energía de enlace por nucleón del producto ( ${}_2^4\text{He}$ ) con la energía de enlace por nucleón de los elementos que se unen.
- 15.** Completa las siguientes ecuaciones simbólicas que corresponden a reacciones de fusión que ocurren en una estrella.
- a)  ${}_1^2\text{H} + \text{_____} \rightarrow {}_2^3\text{He} + {}_0^1n$
- b)  ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow \text{_____} + {}_1^1\text{H}$
- c)  ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + \text{_____}$

# CAPÍTULO 6

## Elementos de Cosmología

- ¿Por qué es oscuro el cielo nocturno?
- ¿Cómo sabemos que el universo está en expansión?
- ¿Dónde está el centro del universo?

### 6.1 Las raíces de la cosmología

La Cosmología es la ciencia de nuestro universo, es la parte de la Astrofísica que estudia su origen, naturaleza física, estructura, evolución y composición como un sistema físico. Los cosmólogos pretenden explicar cómo el universo llegó a ser lo que es en la actualidad y lo que será en un futuro.

Esa rama de la ciencia ha experimentado una transformación en los últimos 50 años que la ha convertido en una disciplina de precisión, y cuenta con un conjunto impresionante de conocimientos, una extraordinaria riqueza de datos observacionales y una enorme vinculación con los últimos adelantos de otras ramas del saber, fundamentalmente con la física nuclear y de las partículas.

Todo lo referente al origen y evolución del universo ha ocupado un lugar de primera atención en la mente del hombre desde los albores de la humanidad, formando parte de la historia y cultura de los pueblos.

La génesis de todo lo existente ha inquietado siempre a científicos, filósofos y teólogos desde tiempos inmemoriales, incluso cuando ciencia, filosofía y teología se confundían en una sola profesión.

Una ciencia que considera galaxias enteras como pequeños objetos podría parecer, a primera vista, muy remota de las preocupaciones de la humanidad. No obstante, la cosmología se ocupa de preguntas que son fundamentales para la condición humana:



¿Cómo empezó todo? ¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿A dónde vamos? La cosmología se enfrenta con estas preguntas describiendo el pasado, explicando el presente, y haciendo predicciones sobre el futuro del universo.

Los cosmólogos hacen preguntas tan complejas como: ¿De qué está hecho el universo? ¿Es este finito o infinito en extensión espacial? ¿Tuvo un comienzo algún tiempo finito en el pasado? ¿Llegará a un fin algún tiempo finito en el futuro?

En estos epígrafes daremos una ojeada a los hechos e ideas más relevantes que, en diferentes épocas, han tenido los seres humanos acerca del origen y evolución del cosmos.

Para lograr sus objetivos la cosmología usa toda la física conocida aplicada al universo, a su vez, contribuye en el descubrimiento de la nueva física, es una región del conocimiento en la frontera de la ciencia. La ciencia del universo se ocupa de distancias que son muy grandes, de objetos que son enormes, y trabaja con escalas de tiempo que son amplísimas. Los cosmólogos frecuentemente se dan cuenta que las unidades de las magnitudes físicas estándar del Sistema Internacional de unidades definidas por los físicos no son convenientes para sus propósitos: el metro (m) es torpemente pequeño, el kilogramo (kg) es muy diminuto, y el segundo (s) no es nada apropiado en escalas de tiempo cosmológicas. Afortunadamente, podemos adoptar otras unidades de medida que han sido desarrolladas por los astrónomos para ocuparse de distancias muy grandes, masas superlativas, y tiempos muy largos.

Una unidad de distancia usada por astrónomos es la unidad astronómica (ua) una unidad convencional de longitud cuyo valor es cercano a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol; en unidades métricas,  $1 \text{ ua} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} = 1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$ . Aunque la unidad astronómica sea una escala útil de longitud dentro del sistema solar, es pequeña comparada con las distancias entre estrellas.

Para medir distancias interestelares, es útil utilizar al parsec (pc), una longitud igual a la distancia para la cual 1 ua subtiende un ángulo de 1 segundo de arco ( $1 \text{ pc} = \sim 206\,265 \text{ ua}$ ); en unidades métricas,  $1 \text{ pc} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}$  (figura 6.1). Por ejemplo, estamos en una distancia de 1,30 pc de Próxima Centauri (una estrella pequeña, relativamente más fría que el Sol en nuestra vecindad estelar); estamos a una distancia de 8 500 pc del centro de nuestra Galaxia, la Vía Láctea.

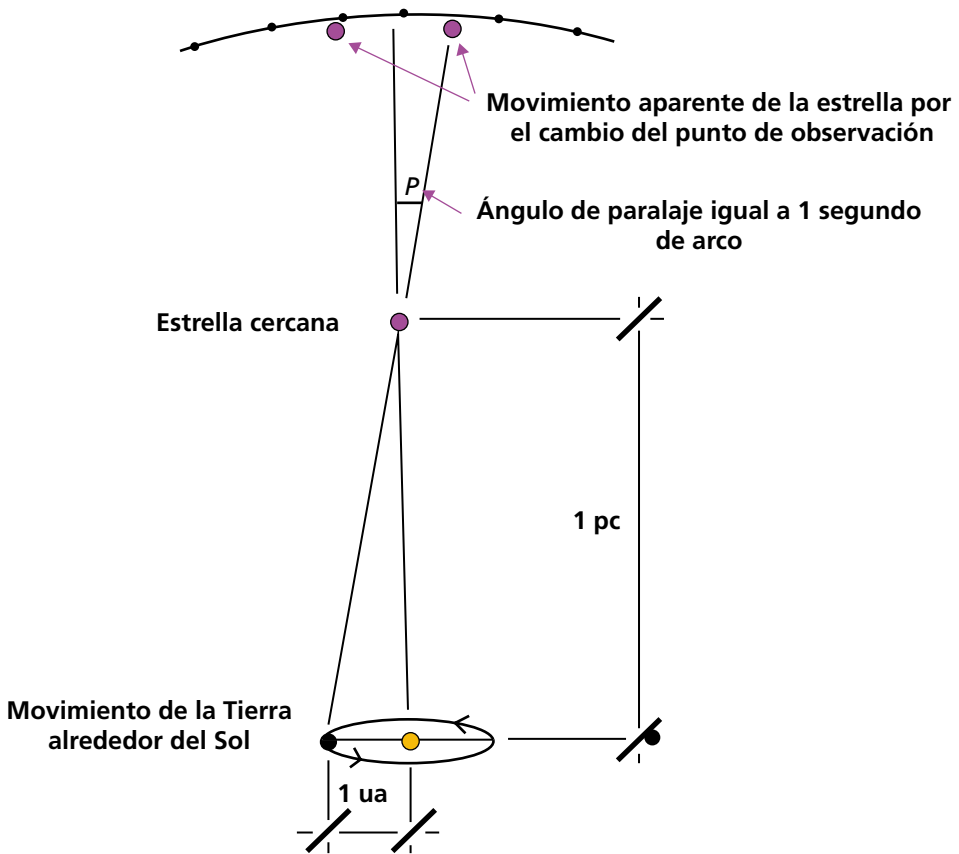


Fig. 6.1

Aunque el parsec es una unidad de longitud útil dentro de nuestra galaxia, es pequeño comparado con las distancias entre galaxias. Para medir distancias intergalácticas, utilizamos el Megaparsec (Mpc), equivalente

a  $10^6$  pc, o  $3,09 \cdot 10^{22}$  m. Por ejemplo, estamos en una distancia de  $\approx 0,76$  Mpc de Messier<sup>1</sup> 31 (M31) (conocida como la galaxia de la Andrómeda) y  $\approx 15$  Mpc del centro del cúmulo de Virgo (un próximo grupo grande de galaxias).

Los astrofísicos también utilizan el año luz como una unidad de medición de distancias igual a la longitud recorrida por la luz en un año:  $1 \text{ al} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} = 0,307 \text{ pc}$ .

La unidad de masa estándar usada por astrónomos es la masa solar ( $M_{\odot}$ ); en unidades métricas, la masa del Sol tiene el valor:  $1 M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ . La masa total de nuestra la galaxia no es conocida tan exactamente como la del Sol; en números redondos, sin embargo, es  $M_{\text{gal}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ , incidentalmente, también el Sol proporciona la unidad estándar de potencia usada en la astronomía. La luminosidad del Sol (es decir, la tasa con la que el astro rey radia energía en forma de luz)  $1 L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Tampoco la luminosidad total de nuestra galaxia es conocida tan exactamente como la luminosidad del Sol; pero una buena estimación, sin embargo, es:  $L_{\text{gal}} \approx 3 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ .

Para medir tiempos mucho mayores que un segundo, conviene utilizar el año sidéreo como unidad de tiempo, es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de la Tierra por un mismo punto de su órbita. Un año sidéreo es igual a 365,242 190 402 días solares medios, 365 días 6 h 9 min 9,76 s,<sup>2</sup>  $\approx 3,16 \cdot 10^7 \text{ s}$ . En un contexto cosmológico, un año sidéreo es frecuentemente un breve período de tiempo, por lo que resulta inconveniente, así es que los cosmólogos acostumbran usar a menudo el Mega año (Maño), con  $1 \text{ Maño} = 10^6 \text{ años} \approx 3,16 \cdot 10^{13} \text{ s}$ . Incluso las escalas de tiempo cosmológicas exigen el uso de gigaaño (Gaño),  $1 \text{ Gaño} = 10^9 \text{ años} \approx 3,16 \cdot 10^{16} \text{ s}$ .

Por ejemplo, la edad de la Tierra es más convenientemente escrita como  $4,57 \text{ Gaños} \approx 1,44 \cdot 10^{17} \text{ s}$ .

Además de ocuparse de cosas muy grandes, la cosmología moderna también trata con cosas muy pequeñas. Temprano en su historia, como veremos, el universo fue muy pequeño caliente y denso, y algunos fenómenos

<sup>1</sup> Número del objeto celeste en el catálogo de Nebulosas y Cúmulos Estelares, que se publicó originalmente en 1771, por el astrónomo francés Charles Messier.

<sup>2</sup> Un segundo es definido en el Sistema Internacional de Unidades como la duración de 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de cesio (Cs 133), a una temperatura de 0 K.



Considerando la **constante de Boltzmann**,  $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$ , en el acto, también se puede definir la **temperatura de Planck**:

$$T_p = E_p/k = 1,42 \cdot 10^{32} \text{ K} \quad (6.5)$$

Estas unidades adquieren suma importancia al analizar los procesos en el universo temprano.

En este capítulo nos ocuparemos de distancias que se extienden desde la longitud Planck hasta los miles de megaparsec (Mpc), poco más o menos. Ocuparse de escalas de longitud tan amplias requiere, seguramente, una gran imaginación. Sin embargo, los cosmólogos no permiten a su mente correr completamente sin restricción. La Cosmología se basa, a la postre, en la observación del universo alrededor de nosotros. Incluso en la antigüedad, la cosmología fue basada en observaciones. Desafortunadamente, esas observaciones fueron frecuentemente imperfectas e incompletas.

En el principio existió una etapa puramente contemplativa, previa a la especulación filosófica y al cientificismo, dominada por los llamados mitos cosmogónicos.

A la pregunta ¿De dónde salió todo lo que existe? se respondía contando un mito. El término proviene de la palabra griega *Mythos* que significa historia contada, una narración. La palabra cosmogónico procede de la conjugación de otras dos palabras griegas, *Kosmos* que los pitagóricos usaban para designar al mundo en su perfecta armonía y orden y *Gen* que indica nacimiento. Un mito cosmogónico es pues la narración del modo en que el mundo ha llegado a ser.

### Comprueba tus conocimientos

1. ¿Qué estudia la Cosmología?
2. ¿Cuáles son las unidades de longitud, tiempo, masa y energía que utilizan los astrofísicos en la cosmología?
3. ¿Qué importancia tienen para la astrofísica las unidades de Planck?

## 6.2 Observaciones fundamentales

Una parte de las observaciones sobre las cuales se basa la cosmología moderna requiere equipos altamente complejos, y la elaboración de un sofisticado análisis de datos. Sin embargo, existen otros hechos observacionales que permiten sacar conclusiones cosmológicas importantes y son sorprendentemente simples. Empecemos con una indagación que es poco apreciada en su sencillez extrema.

## *El cielo de la noche es oscuro*

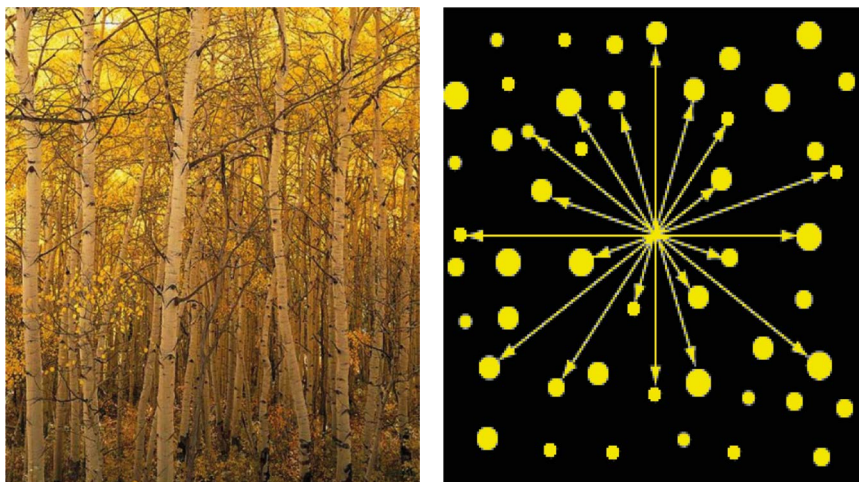
Salgamos al exterior en una noche despejada, sin Luna, lejos de la iluminación de la ciudad, y miremos hacia arriba, entonces veremos un cielo oscuro, con aproximadamente unas 2 500 estrellas esparcidas en él.

Pero si consideramos un universo infinito, con infinito número de estrellas, entonces el hecho de que *el cielo de la noche esté oscuro* es una paradoja.

El habitual panorama de que el cielo de noche es oscuro en las longitudes de onda visibles, en lugar de estar uniformemente brillante por la luz de las estrellas, es conocido como la **paradoja de Olbers**, después que el médico y astrónomo aficionado alemán Heinrich W. Olbers (1758-1840) popularizó el tema, en 1823, con su artículo *Sobre la transparencia del universo*.

¿Por qué debería ser paradójico que el cielo de la noche esté oscuro?

En un bosque bastante grande, cada línea de visión termina en un árbol. En un universo bastante grande, cada línea de visión debería terminar en una estrella (figura 6.2). ¡El cielo de la noche no debería ser oscuro!



**Fig. 6.2** Representación de la paradoja de Olbert. En un universo estático infinitamente grande, cada línea de visión debería terminar en una estrella

Como ocurre casi siempre, Olbers no fue la primera persona en pensar sobre este delicado asunto. En tiempos tan antiguos como en 1576, Thomas Digges mencionó también el extraño hecho de que el cielo de noche esté oscuro, con solo algunos puntos de luz para marcar el lugar de las estrellas. En 1720, el conocido astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742) razonó de la siguiente manera: el brillo de una estrella disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia (porque la energía se distribuye sobre el área de

una esfera). Si imaginamos las estrellas distribuidas en capas esféricas, como una cebolla, el número de estrellas en cada capa aumentaría con el cuadrado de la distancia. El aumento en el número de estrellas compensaría la disminución del brillo, y si el universo es infinito, entonces el resultado final debería ser que el brillo del cielo fuera infinito, con o sin el Sol.

En 1744, el astrónomo suizo Jean-Phillipe de Cheseaux (1718-1751) sugirió la existencia de algo que atenuaba el brillo de las estrellas, para que la noche no sea infinitamente brillante, ni siquiera tan clara como el día.

La mayor parte de nosotros simplemente da por sentado el hecho de que el día es claro y la noche oscura. La oscuridad del cielo de noche ciertamente no planteó problemas para los antiguos egipcios o griegos, para los que las estrellas eran luminarias empotradas a un domo o esfera cristalina.

Sin embargo, el modelo cosmológico propuesto por Nicolás Copérnico requería que la distancia a las estrellas fuera mucho mayor que una unidad astronómica; de otra manera, como la Tierra se mueve en su órbita, el paralaje de las estrellas, sería bastante grande y podría ser detectado a simple vista. Además, el sistema copernicano ya no pide que las estrellas estén pegadas a una esfera celeste rotativa, las estrellas podían estar a distancias diferentes del Sol. Estas realizaciones libertadoras proporcionaron la delantera a Thomas Digges, y otros astrónomos copernicanos, al aceptar un modelo en el cual las estrellas serían esferas grandes y encendidas como el Sol, desparramadas a todo lo largo del espacio infinito.

La paradoja de Olbers fue el resultado de la visión del siglo XIX sobre un universo, eterno e infinito antes del descubrimiento de las galaxias.

Por tanto, algunas de las suposiciones, o todas, que fueron hechas en la estimación del brillo del firmamento deben ser incorrectas.

Analicemos estas premisas.

Primero, se consideró que el espacio es completamente transparente. Esto podría no ser cierto. Heinrich Olbers intentó resolver la paradoja proponiendo que las estrellas distantes se hacen invisibles escondidas por la materia interestelar que absorbe la luz de las estrellas. Pero esta justificación no surte efecto a largo plazo, porque la materia interestelar se puede calentar con la luz de las estrellas hasta tener la misma temperatura que estas, en ese momento, la materia interestelar emitiría tanta luz como absorbe, y resplandecería brillantemente.

Una segunda premisa, se consideró que el universo es infinitamente grande.



Un tercer postulado, ligeramente más sutil que los previos, es que el universo es infinitamente viejo. Pero un universo infinitamente grande, eternamente viejo, y estático no se mantiene firme al escrutinio de la paradoja.

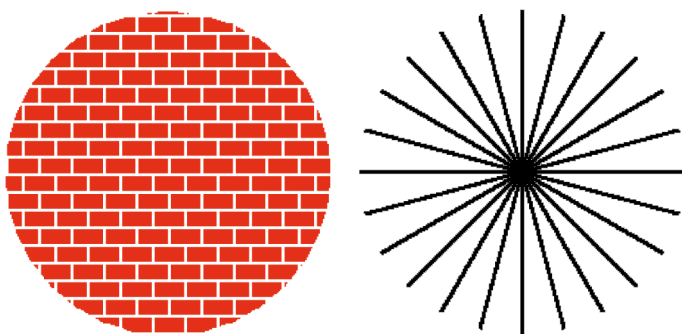
La solución definitiva para la paradoja de Olbers proviene del hecho que el universo tiene una edad finita, si el universo lleva existiendo una cantidad finita de tiempo, entonces solo la luz de una cantidad finita de estrellas ha tenido tiempo de llegar a nosotros, por lo que la paradoja desaparece.

De modo alternativo, si el universo se está expandiendo, y las estrellas más distantes se alejan de nosotros, entonces su luz sufre un corrimiento hacia el rojo cosmológico, que de nuevo resuelve la paradoja, ya que dicho corrimiento implica un aumento de la longitud de onda de los fotones, lo que determina una reducción de la energía con la que viaja la luz y, por tanto, una atenuación de la intensidad por debajo de la esperada según la ley del inverso del cuadrado de la distancia en un universo estático. Esta reducción de la contribución de las galaxias distantes también ayuda a explicar la oscuridad del cielo nocturno.

### El universo es homogéneo e isótropo

¿Qué quiere decir que el universo sea homogéneo e isótropo?

Decir que el universo es isótropo significa que no hay direcciones preferidas en el universo; este se ve igual, sin importar en qué dirección apuntemos nuestros telescopios. Un universo homogéneo significa que no hay ningún lugar preferido en este; se ve lo mismo desde cualquier punto donde se establezca nuestro telescopio (figura 6.3).



**Fig. 6.3** Homogéneo significa lo mismo, en promedio, en cualquier punto del espacio.

La pared extendida es homogénea, pero no es la misma en cualquier dirección.

Isótropo significa lo mismo en promedio, en cualquier dirección. Este patrón de rectas radiales es isótropo visto desde el centro, pero no es homogéneo



El universo es homogéneo e isótropo en escalas muy grandes. En este contexto, la homogeneidad e isotropía del universo ha sido modelada a escalas mayores de 307 Mpc, unos 1 000 millones años luz, esto implica que en esta inmensa escala el universo aparezca igual para cualquier observador, y desde cualquier lugar de observación, el universo se vería igual sin importar en qué dirección miremos.

El hecho de que, el universo sea homogéneo (idéntico en su conjunto) e isótropo (mismas propiedades en todas las direcciones) en la gran escala es llamado **Principio Cosmológico**. Que se puede enunciar: *No existe un centro o lugar privilegiado en el universo.*

Asumir que nuestro universo observable es isótropo, implica que la distancia hasta su borde es la misma en todas direcciones (es finito), por esta razón, es un volumen esférico (una esfera) con centro en el observador, y cada posición de observación en el universo tiene su propio universo observable.

La isotropía del universo observable no es inmediatamente obvia. De hecho, en escalas pequeñas, el universo es manifiestamente no homogéneo y anisótropo. En la Tierra, nuestro entorno no es ni homogéneo ni isótropo. Si nos movemos a la escala del Sistema Solar, los planetas, por ejemplo, están confinados a un plano delgado que contiene al Sol. Incluso en la escala de la Galaxia o del Grupo Local de galaxias, el universo no es homogéneo ni isótropo.

También los cosmólogos actuales aceptan el llamado principio copernicano o principio de mediocridad esto implica comprender que no vivimos en un lugar especial de nuestro universo; vivimos en un planeta promedio, alrededor de: una estrella promedio en una galaxia promedio de un universo muy grande que posiblemente este contenido en un multiverso aún mucho mayor, por tanto, el universo no tiene centro ni somos el centro y no hay ningún punto en algún lugar especial desde el cual el universo se originó.

### **Corrimientos al rojo proporcionales a la distancia**

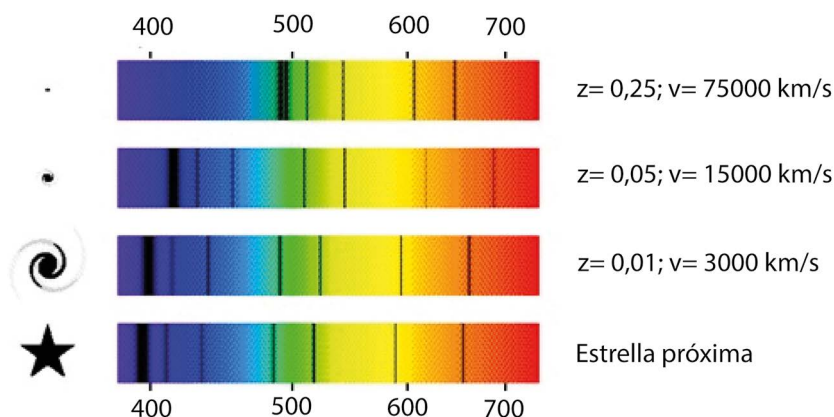
Cuando observamos una galaxia en las longitudes de onda visibles, detectamos primordialmente la luz de las estrellas que la galaxia contiene.

Así, cuando tomamos el espectro de una galaxia en las longitudes de onda visibles, típicamente este contiene líneas de absorción que son producidas en capas relativamente más frías de las atmósferas estelares en las estrellas que contiene la galaxia; las galaxias con núcleos activos también muestran líneas de emisión del gas caliente.

Consideremos una línea particular producida por un átomo cuya longitud de onda,  $\lambda_{em}$  fue medida en un laboratorio aquí en la Tierra. Sin embargo, la longitud de onda que medimos para la misma línea en el espectro observado de una galaxia distante,  $\lambda_{ob}$ , no será la misma. Entonces se dice que las líneas del espectro en la galaxia tienen un corrimiento  $z$  dado por la fórmula:

$$z = \frac{\lambda_{ob} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad (6.6)$$

Que puede ser un corrimiento al rojo (*redshift*), o al azul (*blueshift*). Cuando  $z < 0$ , la cantidad  $z$  se llama corrimiento al azul (*blueshift*), en vez de un corrimiento al rojo (*redshift*). Sin embargo, la inmensa mayoría de las galaxias tienen  $z > 0$  (figura 6.4).



**Fig. 6.4** Desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales, en galaxias lejanas, con respecto a las observadas en los laboratorios terrestres

El hecho de que la longitud de onda de las líneas espectrales en la luz de las galaxias esté generalmente corrida hacia el rojo, en vez de hacia el azul, no fue conocido hasta el siglo veinte. En 1912, Vesto Merlin Slipher, en el Lowell Observatory, midió el desplazamiento en la longitud de onda de la luz de la galaxia M31, la galaxia de Andrómeda. Él se dio cuenta del valor de  $z = -0,001$ , queriendo decir que M31 es una de las pocas galaxias que exhibe un *blueshift* en vez de un *redshift*.

Slipher interpretó que el desplazamiento en la longitud de onda era debido al efecto Doppler.<sup>3</sup> Desde esa vez  $|z| \ll 1$  para M31, él usó el clásico y conocido, desplazamiento Doppler no relativista,  $z = v/c$ , para calcular que M31 se movía hacia la Tierra con una velocidad  $v = -0,001 c = -300 \text{ kms}^{-1}$ .

En el año 1927, el cosmólogo y sacerdote católico belga Georges Lemaître (1894-1966) (figura 6.5) compiló una lista de 42 galaxias cuyo desplazamiento de la longitud de onda en sus líneas espectrales había sido medido, en su mayor parte por Vesto Slipher. De estas galaxias, 37 presentaban en sus espectros corrimientos al rojo, y solo 5 corrimientos al azul. Este es un exceso notable de *redshifts*; el promedio de velocidad radial de las 42 galaxias en la muestra fue  $v = +600 \text{ km s}^{-1}$ . Para Lemaître esta alta velocidad radial de las galaxias (mucho más alta que la velocidad media de las estrellas dentro de nuestra galaxia) podía estar relacionada con una expansión del universo.



Fig. 6.5

Usando una distancia estimada de  $r = 0,95 \text{ Mpc}$  para las galaxias en su muestra, él llegó a la conclusión de que la expansión estaba descrita por el parámetro  $K = v/r = 625 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ . Aunque Lemaître hizo una estimación de la distancia a las galaxias en su muestra, encontrar una distancia precisa, en la época, para una galaxia individual le fue realmente muy difícil.

El corrimiento al rojo de la luz de galaxias lejanas,  $z = (\lambda_{\text{ob}} - \lambda_{\text{em}})/\lambda_{\text{em}}$ , se relaciona con el factor de escala del universo  $a$  de la siguiente forma:

$$a(t) = 1/(1 + z(t)) \quad (6.7)$$

Donde:  $t$  es el tiempo en el instante en que fue emitida la radiación y se define que, al tiempo de observación actual,  $t_0$ ,  $a(t_0) = 1$ . Entonces, cuando se dice que la luz de una galaxia está corrida a  $z = 1$ , significa que

<sup>3</sup> Es el cambio de la longitud de onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. En el caso del espectro visible de la radiación electromagnética, si el objeto se aleja, su luz se desplaza a longitudes de onda más largas, desplazándose hacia el rojo. Si el objeto se acerca, su luz presenta una longitud de onda más corta, desplazándose hacia el azul. Esta desviación hacia el rojo o el azul es muy leve incluso para velocidades elevadas, como las velocidades relativas entre estrellas o entre galaxias, y el ojo humano no puede captarlo, solamente medirlo indirectamente utilizando instrumentos de precisión como espectrómetros. Si el objeto emisor se moviera a fracciones significativas de la velocidad de la luz, sí sería apreciable de forma directa la variación de longitud de onda.

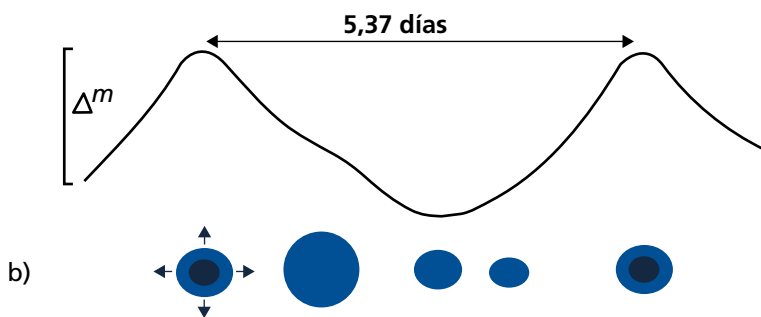
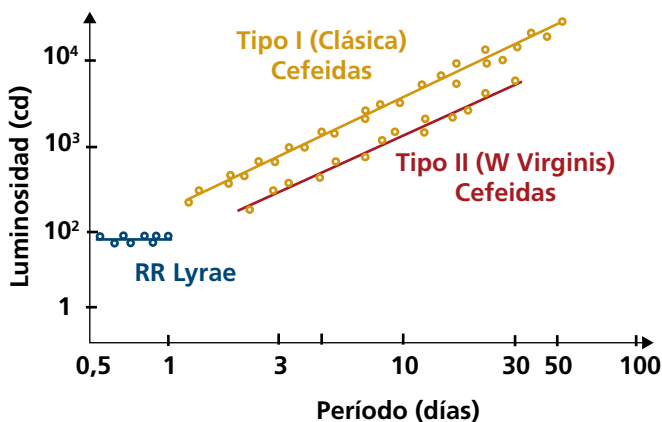
las escalas eran un factor 2 menores en la época en que se emitió esa radiación. Para saber a qué tiempo cósmico corresponde eso, hay que definir el modelo cosmológico:  $z \rightarrow a \rightarrow t$ .

En 1912, la astrónoma estadounidense Henrietta Swan Leavitt (Lancaster, Massachusetts, 1868-1921) (figura 6.6 a) que trabajó en el Observatorio del Harvard College estudió las variables Cefeidas, estrellas cuyo brillo varía con un período muy regular, descubrió y catalogó varias de ellas en las Nubes de Magallanes, galaxias satélites de la Vía Láctea, asimismo que las cefeidas de mayor luminosidad intrínseca tenían largos períodos, y que existía una relación de proporcionalidad directa entre ambas magnitudes (figura 6.6 b), lo que permitió utilizar las cefeidas como candelas estándar para medir distancias en el universo.



a)

Relación Período-Luminosidad



b)

Fig. 6.6

En el año 1923, el astrónomo norteamericano Edwin Powell Hubble pudo observar estrellas variables cefeidas en algunas nebulosas percibidas en el firmamento, por aquella fecha, y usó la relación descubierta por Leavitt para determinar, por primera vez, la distancia a estos objetos, en particular a la hoy conocida galaxia de Andrómeda, M31.

En los años siguientes se publicaron las distancias, demostrando que estas “nebulosas” eran, en realidad, otras galaxias exteriores a la Vía Láctea.

Hubble al medir las distancias hasta estos conglomerados de estrellas, polvo y gas encontró una correlación directa entre el grado de desplazamiento al rojo ( $z$ ) y su distancia a nosotros  $D$ , resultado que se conoce hoy día como ley de Hubble.

$$c \cdot z = H_0 D \quad (6.8)$$

Donde:  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $H_0$  es un parámetro llamado en su época “constante de Hubble”, expresado habitualmente en  $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$

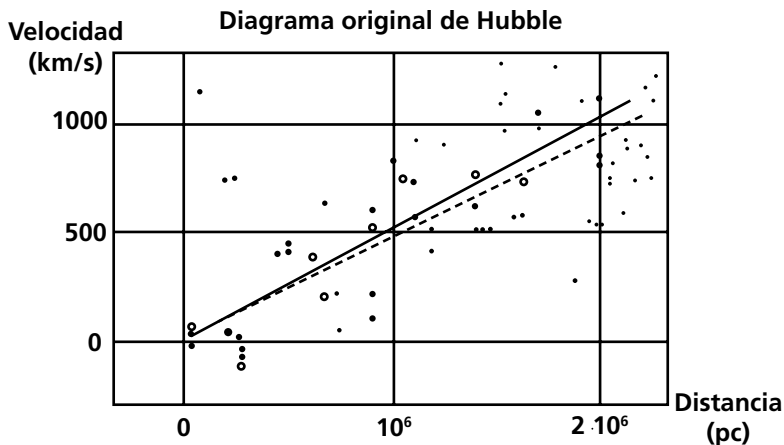
Interpretando en aquel momento el corrimiento al rojo observado como efecto Doppler, Hubble encontró una relación lineal entre las velocidades radiales de las galaxias y las distancias hasta ellas, es decir a medida que estas se encontraban más lejos de nosotros se alejaban también a mayor velocidad.

$$V = H_0 D \quad (6.9)$$

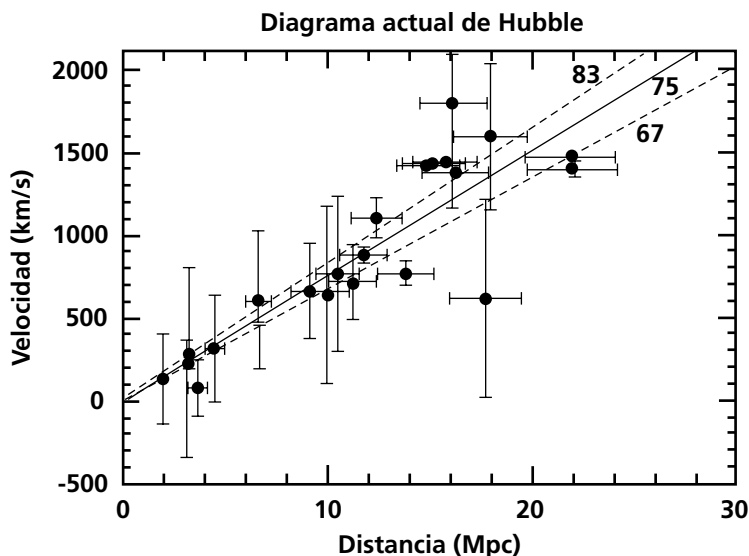
$V$  es la velocidad de recesión de la galaxia,  $D$  es la distancia y  $H_0$  la constante de Hubble (figura 6.7).

Se han obtenido mediciones más recientes de este parámetro utilizando la tecnología actual, gracias al telescopio espacial Hubble (HST) y las sondas WMAP y Planck.

Una versión más actual de gráfico de Hubble, mostrando el valor de  $cz$  contra la distancia se pudo lograr, observando con HST (figura 6.8) las distancias a las galaxias fueron determinadas usando estrellas variables cefeidas como candelas estándar.



**Fig. 6.7** Relación entre la distancia de las galaxias y la velocidad de recesión descubierta por Hubble, en 1929. “la velocidad” fue sobrentendida como “la velocidad aparente”. Los puntos negros representan 24 galaxias individuales (los *redshifts* para todas menos cuatro galaxias que estaban resueltas por Slipher). La constante de Hubble obtenida de esta gráfica fue demasiado grande, ya que Hubble subestimó las distancias a las galaxias obteniendo para  $H_0 \approx 500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$



**Fig. 6.8** Versión más actual de gráfico de Hubble, mostrando  $cz$  contra la distancia que se pudo lograr, observando con el Telescopio Espacial Hubble

Noten que las galaxias con velocidad radiales  $v = cz \approx 1\,000 \text{ km s}^{-1}$ , que Hubble utilizó considerando que se encontraban a la distancia  $r$  de  $\approx 2 \text{ Mpc}$ , ahora están más exactamente acomodadas a la distancia  $r \approx 15 \text{ Mpc}$ .

Combinando los resultados de varias técnicas de investigación se ha obtenido:

$$H_0 = 68 \pm 2 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

El valor actual de  $H_0$  más aceptado por los astrofísicos es:  $67,36 \pm 0,54 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Sonda Planck 2018).

El tiempo calculado como  $t_H = 1/H_0$  se llama *tiempo de Hubble*. Para  $H_0 = 67,36 \pm 0,54 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , el tiempo de Hubble es  $13,797 \pm 0,023 \text{ Gaños}$ . Si las velocidades relativas de las galaxias fueron constantes en el pasado, entonces un tiempo de Hubble atrás, todas las galaxias del universo debieron encontrarse juntas en un volumen limitado. Así pues, la observación de los *redshifts* galácticos llevó de forma natural a la idea de un comienzo para el universo.

El tiempo de Hubble  $< 13,797 \text{ Gaños}$  es comparable con las edades calculadas para las estrellas más viejas conocidas en el universo. Este hecho es reconfortante.

### La radiación del Fondo Cósmico de Microondas (CMB)

Ya, a finales de los años 30 del siglo pasado, los astrónomos se encontraban en disposición de entender que el universo se encontraba en expansión. En la segunda mitad de los 40, el físico ruso-norteamericano George Gamow y sus colaboradores Ralph Alpher y Robert Herman, habían elaborado un modelo cosmológico en el que se resumían los trabajos de Friedman y Hubble; en este modelo llamado **modelo de universo evolutivo**, ellos proponen la **teoría del universo caliente**, según la cual el universo habría comenzado en lo que el sacerdote católico y astrónomo belga George Lemaître llamó "átomo primitivo", un verdadero fermento de energía a enorme densidad y temperatura que estalló, y en el instante comenzó consecuentemente a expandirse.

En esta teoría se examinaban las reacciones nucleares que transcurrían en la sustancia muy densa en el mismo inicio de la expansión del universo, suponiéndose que la temperatura de la sustancia era muy elevada (de aquí el nombre de la teoría) y esta se reducía durante la expansión.

Con este modelo de origen caliente Gamow buscaba dar explicación a las cantidades observables de los diferentes elementos químicos, en el universo los trabajos permitieron además predecir que todo el cosmos estaría

inundado de una radiación remanente, que se correspondería con la curva de emisión de un cuerpo negro a la temperatura de 5 K, algo así como el eco del momento en que surgió el universo, el último vestigio del fermento del cual nació. La predicción no causó gran impacto en su época, pues para la comunidad científica esta parecía imposible de verificar.

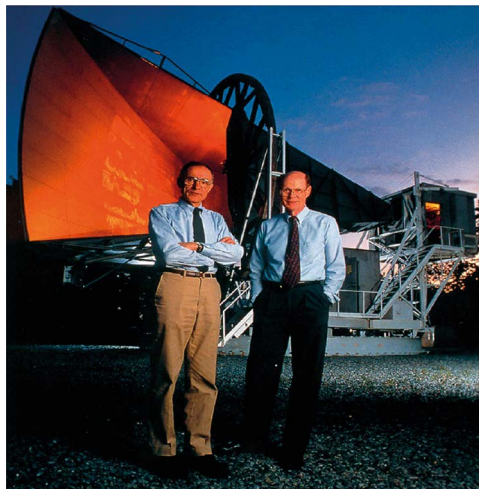
No obstante, este hecho terminó por conocerse como el **Big Bang**, la “gran explosión” que dio origen al Universo y su expansión.

El nombre Big Bang fue utilizado por primera vez por el astrofísico inglés Fred Hoyle (1915-2001), de forma peyorativa, en una entrevista de radio para la BBC, ya que Hoyle y sus colaboradores Hernan Bondi y Thomas Gold defendían un modelo alternativo de universo llamado **modelo del Estado Estacionario**. En este escenario, el universo no tuvo un comienzo, para estos astrofísicos el universo era eterno, siempre había existido y siempre existiría, es decir, no tendría principio ni fin, aunque se explicaba la expansión con la producción continua de materia.

Esta teoría no fue confirmada por las observaciones, en particular, por la observación del fondo cósmico de microondas.

Curiosamente todavía existen varios defensores del estado estacionario guiados por uno de sus partidarios; Jayant Vishnu Narlikar, quien trata de explicar los datos cosmológicos modernos usando su teoría en el siglo XXI.

La pregunta ¿El Big Bang ocurrió? fue finalmente contestada después del descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB) por Arno Alan Penzias y Robert Woodrow Wilson, en 1965 (figura 6.9).



**Fig. 6.9** Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, junto a la antena de cono invertido de 20 pies de los Laboratorios Bell, en Holmdel, New Jersey



El CMB es la radiación emitida unos 380 000 años después del Big Bang y es la más vieja entidad observable en el universo actual. Además, este descubrimiento también contestó otra pregunta:

¿Qué apariencia tenía el universo inmediatamente después del Big Bang?

La hipótesis más popular afirmaba que el universo fue extremadamente caliente en su nacimiento y se enfrió con la expansión.

El mero hecho de la existencia del CMB probó que el Universo nació caliente o aumentó su temperatura durante una fracción de segundo.

Si al principio de su existencia el universo estaba muy caliente la temperatura descendió durante la expansión. Los protones y las partículas alfa, que son núcleos de hidrógeno y helio, se produjeron más bien rápidamente (ver epígrafe 6.3).

El origen de la radiación del fondo cósmico de microondas es relativamente sencillo. Como el universo tiene una edad finita (recuérdese:  $\approx 13,8$  millones de años) y, a medida que observamos objetos cada vez más distantes, más atrás en el tiempo se remonta nuestra mirada (ya que, desde esos objetos, la luz tarda más en llegar hasta nosotros), podríamos imaginar que, si observáramos lo bastante lejos, contemplaríamos el mismísimo origen del cosmos.

Pero en principio, entre nosotros y aquel tiempo primero se levanta un muro. No es un muro material, como las paredes de la habitación en la que dormimos, pero en gran medida provoca la misma consecuencia.

No podemos ver lo que hay al otro lado de las paredes de nuestro cuarto porque son opacas. No dejan pasar la luz. Pues bien, cuando al contemplar el cielo retrocedemos cada vez más en el tiempo, estamos mirando un universo cada vez más joven y también más caliente, puesto que empezó a enfriarse a partir del Big Bang.

Si echamos la vista lo suficientemente atrás, hasta un momento en que el universo tenía cerca de 380 000 años, su temperatura rondaba los 3 000 K sobre el cero absoluto. A esta temperatura, la radiación ambiental estaba cargada de tanta energía que podía separar los átomos dominantes del universo –los de hidrógeno– en sus distintos constituyentes: protones y electrones. Antes de ese momento, la materia neutra no existía. La materia normal en el universo, formada por núcleos atómicos y electrones,

estaba compuesta de un “plasma” denso de partículas cargadas que interactuaban con la radiación.

Sin embargo, un plasma puede ser opaco a la radiación. Las partículas cargadas en el interior del plasma absorben fotones y los liberan de modo que la radiación no puede atravesar fácilmente un material de este tipo sin interrupción. En consecuencia, si intentamos mirar atrás en el tiempo, no podremos ver más allá de la época en que la materia del universo estuvo, por última vez, compuesta, sobre todo, de aquella clase de plasma.

Vuelve a ser como con las paredes de nuestra habitación. Podemos verla solo porque reflejan luz y el aire que hay entre las paredes es transparente, de modo que se puede ver todo lo comprendido hasta la superficie de la pared que emitió la luz.

Lo mismo sucede con el universo. Cuando se mira hacia fuera, se puede reseguir todo el camino de vuelta hasta esa «superficie de la última dispersión», que es el punto en el que el universo se volvió neutro, en el que se combinaron protones con electrones para formar átomos de hidrógeno neutro. Tras este punto, el universo se hizo en buena medida transparente a la radiación, y ahora podemos ver la radiación que los electrones absorbieron y emitieron de nuevo cuando la materia del universo se volvió neutra.

Por lo tanto, la concepción del universo que parte del Big Bang *predice* que deberíamos recibir radiación que puede provenir de todas direcciones, desde aquella «superficie de la última dispersión».

Como desde entonces el universo se ha expandido, la radiación se ha enfriado en el camino y ahora está aproximadamente a 2,7 K sobre el cero absoluto. Y esta es, precisamente, la señal que los dos científicos descubrieron en Nueva Jersey, en 1965, y cuyo hallazgo les valió, años después, el premio Nobel.

El descubrimiento del fondo cósmico de microondas fue inmediatamente saludado como la más contundente demostración de que el Universo surgió de un gran estallido inicial. El modelo de Hoyle y sus colaboradores sufría un golpe mortal en su credibilidad; Gamow, definitivamente, parecía ganar la partida.

Como curiosidad añadiremos que quizá todos hemos visto la radiación de fondo de microondas sin darnos cuenta, con algo tan común como un

televisor analógico, es decir, los antiguos receptores de televisión. Cuando se sintonizaba un canal en el que no había emisión de ninguna señal; parte (un 1,0 %) de la “nieve” que podía verse en la pantalla era dicha radiación del fondo cósmico de microondas captada por la antena del aparato.

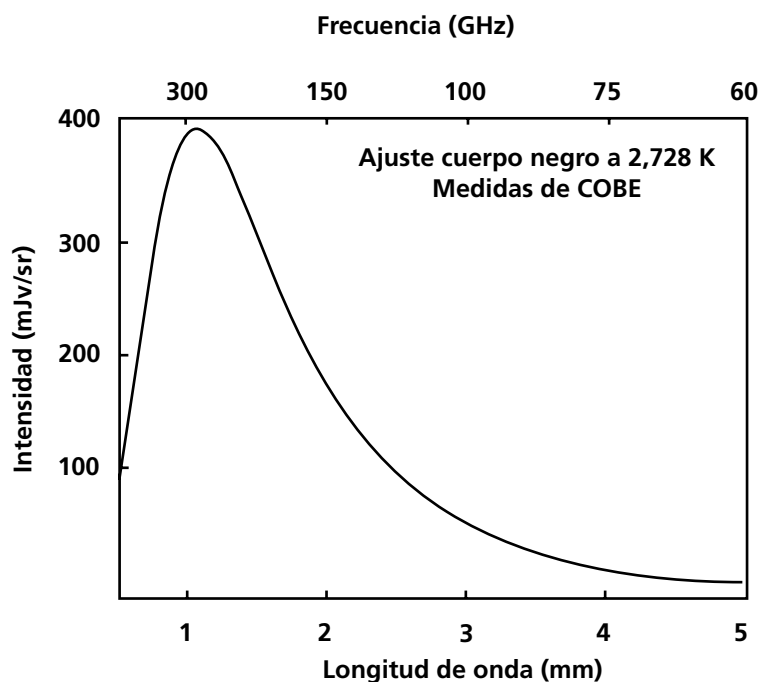
El estudio del CMB en cosmología es importante porque, siendo esta una señal proveniente del universo en sus épocas más antiguas, trae información sobre los procesos y la física del universo temprano. Cualquier tipo de interacción que sufren los fotones del CMB desde su emisión hasta el momento de ser detectados, debe dejar una huella en la distribución espectral y (o) espacial de la temperatura.

Así, por ejemplo, si en su camino al observador el CMB pasa por una inmensa nube de electrones calientes, debido al efecto Compton inverso,<sup>4</sup> el espectro de CMB debe sufrir desviaciones de su forma Planckiana. La información en el CMB tiene una incidencia directa en los problemas más importantes de la cosmología: el problema de la materia oscura del universo, la naturaleza y el espectro de las fluctuaciones primordiales, así como, la posible existencia de la constante cosmológica, la existencia de ondas gravitacionales, y la identificación de anisotropías intrínsecas en la métrica del universo.

El 18 de noviembre de 1989 la NASA lanzó el Explorador del Fondo Cósmico de Microondas COBE (por su sigla en inglés: Cosmic Background Explorer), fue el primer satélite construido especialmente para estudios de cosmología. Su objetivo fue investigar, en detalle, la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB) y obtener medidas de esta, que ayudaran a ampliar nuestra comprensión del cosmos. Los resultados fueron sorprendentes puesto que demostraron un ajuste perfecto entre el CMB y la curva teórica de un cuerpo negro a una temperatura de 2,72 K (figura 6.10).

<sup>4</sup> El efecto Compton consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su energía. La frecuencia o la longitud de onda de la radiación dispersada depende únicamente del ángulo de dispersión. También puede ocurrir un Efecto Compton inverso; es decir, que los fotones disminuyan su longitud de onda al chocar con electrones. Pero para que esto suceda es necesario que los electrones viajen a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, y que los fotones tengan altas energías.

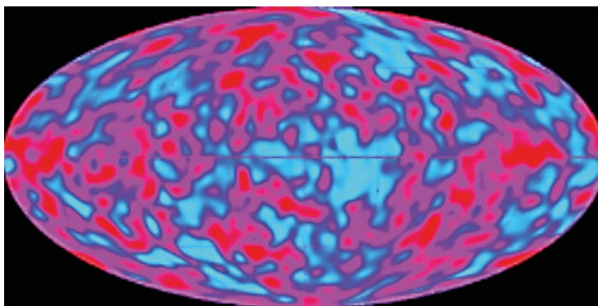
La principal diferencia entre los dos fenómenos es que durante el Efecto Compton “convencional” los fotones entregan energía a los electrones, y durante el inverso sucede lo contrario.



**Fig. 6.10** Datos del COBE mostraron una coincidencia perfecta entre la curva de cuerpo negro predicha por la Teoría del Big Bang y la observada en el fondo cósmico de microondas

### Anisotropías intrínsecas del CMB

El Radiómetro Diferencial de Microondas (DMR) de COBE fue un instrumento que mapeó variaciones (o anisotropías) en la radiación del fondo de microondas. Esta operación pudo crear mapas completos del CMB sustrayendo emisiones galácticas (figura 6.11).

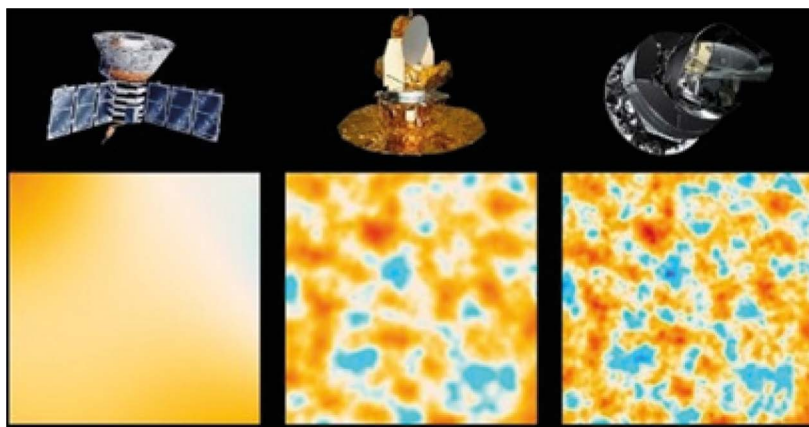


**Fig. 6.11** El famoso mapa de las anisotropías del CMB formado con los datos tomados por el satélite COBE

Las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas son extremadamente débiles, representan solo una parte entre 100 000 comparada con la temperatura media de 2,7 K del campo de radiación. Las fluctuaciones en la radiación de fondo de microondas como residuo del Big Bang resultaron ser la impronta del contraste de la densidad en el universo primigenio. Desde entonces las ondas de densidad han producido la formación de estructuras tal como se observan en el universo hoy día: cúmulos de galaxias y vastas regiones desprovistas de galaxias.

En junio de 2001, la NASA lanzó una segunda misión espacial para el estudio del CMB, el Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), para realizar medidas mucho más precisas de las anisotropías a gran escala en todo el cielo. Los primeros resultados de esta misión, revelados en 2003, fueron medidas detalladas del CMB acotando varios parámetros cosmológicos.

Los resultados fueron ampliamente consistentes con los esperados. Aunque el WMAP proporcionó medidas muy exactas de las fluctuaciones a grandes escalas angulares en el CMB (estructuras que son tan grandes en el cielo como la Luna) una tercera misión espacial, la sonda **Planck**, fue lanzada en 2009. Sus detectores han producido las medidas más precisas a pequeñas escalas angulares hasta la fecha del CMB confirmando y precisando los datos de WMAP (figura 6.12).

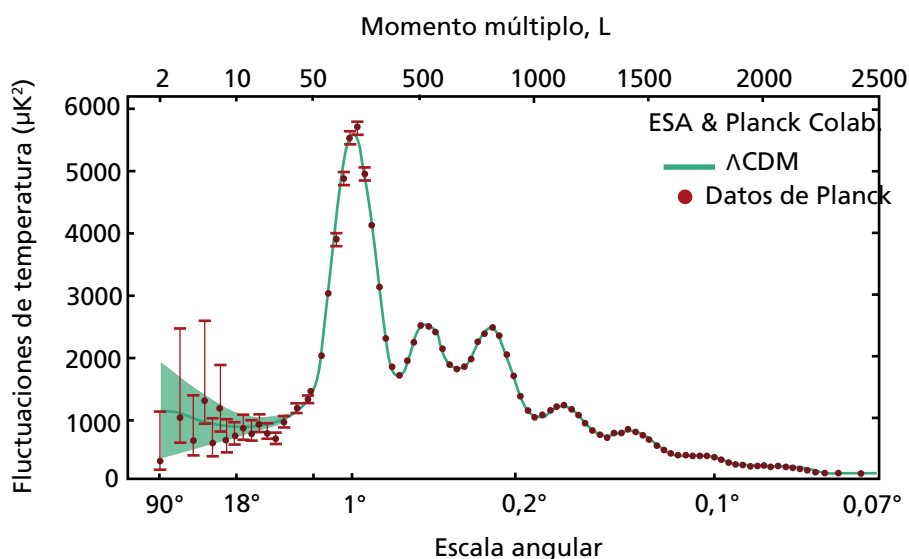


**Fig. 6.12** Anisotropías del CMB formado con los datos tomados por los satélites:  
a) COBE; b) WMAP; c) Planck

Si representamos las fluctuaciones de temperatura del CMB en función de su tamaño angular —el área que ocupan en el cielo— obtenemos una curva sinuosa llamada **espectro de potencias del CMB**.

Las anisotropías que se observan en la distribución celeste de la radiación de microondas contienen una enorme cantidad de información sobre la física del universo de los primeros tiempos. Muestran cómo, en el período comprendido entre las fases más calientes del principio y el momento en que, tras un suficiente enfriamiento de la materia, se liberó la radiación electromagnética, y la atracción gravitatoria produjo una formación de grumos con pequeñas fluctuaciones de densidad.

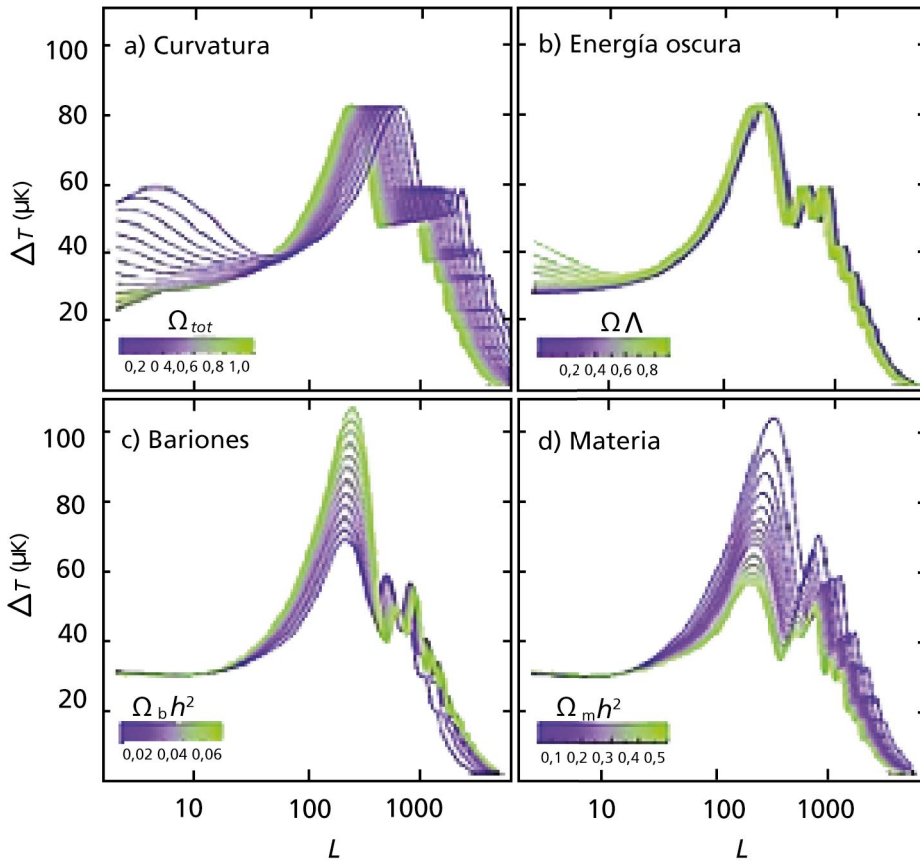
Analizando las diferentes altura y disposición de los picos y valles de este espectro podemos averiguar la edad del universo, su ritmo de expansión y la cantidad de materia oscura, materia normal o bariónica y energía oscura que lo forman (figura 6.13). Estos picos fueron producidos por las oscilaciones gravito-acústicas del plasma primordial de bariones-radiación causalmente conectado (las que midió inicialmente el COBE).



**Fig. 6.13** El espectro de potencias del CMB según Planck 2018

La escala del primer pico está asociada al tamaño físico del horizonte del universo observable, mientras el tamaño angular que subtende este al día de hoy depende principalmente de la geometría del espacio. El valor medido implica que la geometría del universo es plana con alta probabilidad. La diferencia en amplitud entre el primer y segundo picos depende principalmente de la densidad de los bariones. En general, toda la forma del espectro de potencias angular depende, además, de

la amplitud, de la geometría y de la mayoría de los parámetros cosmológicos (figura 6.14).



**Fig. 6.14** El valor de los parámetros cosmológicos cambia la forma del espectro de potencias del CMB

En conclusión, la CMB contiene gran parte del “código genético” del Universo y sus estructuras.

#### Algunos parámetros cosmológicos según la sonda Planck 2018

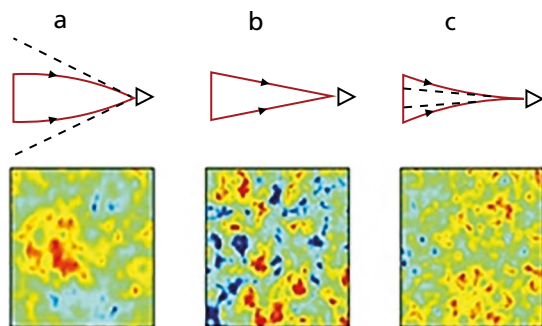
Parámetro de Hubble ( $H_0$ )	$67,36 \pm 0,54 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Parámetro de densidad de la materia ( $\Omega_m$ )	$0,3153 \pm 0,0073$
Parámetro de densidad de la energía oscura ( $\Omega_{\Lambda}$ )	$0,6847 \pm 0,0073$
Edad del universo (Gaño)	$13,797 \pm 0,023$
Parámetro de curvatura ( $\Omega_k$ )	$-0,0096 \pm 0,0061$

El auténtico tamaño físico de los puntos calientes y fríos, registrados en la imagen del CMB, está determinado por una física simple relacionada con la superficie de la última dispersión, mientras que el tamaño medido de los puntos calientes y puntos fríos en la imagen se conoce que deriva de la geometría real del universo.

Una sencilla analogía quizá ayude a explicar mejor este resultado. Una geometría cerrada se parece a la superficie de una esfera, mientras que una geometría abierta se parece a la superficie de una silla de montar (ver epígrafe 6.3). Si dibujamos un triángulo sobre estas superficies, observaremos el efecto que se describe: las líneas rectas convergen en la esfera, divergen en la silla y, por supuesto, se mantienen rectas y paralelas en un universo plano.

Por lo tanto, ahora la pregunta clave sería: ¿De qué tamaño son los puntos calientes y los puntos fríos que se observan en la imagen del CMB real? Para dar respuesta, se prepararon en ordenadores varias simulaciones de imágenes de los puntos calientes y de los puntos fríos según se verían en universos cerrados, planos y abiertos, y se las comparó con otra imagen del verdadero cielo de microondas.

Si examinamos la imagen inferior izquierda (figura 6.15 a), la que simula un universo cerrado, veremos que, en promedio, los puntos calientes son mayores en dimensión angular que en el universo real. A la derecha (figura 6.15 c), el tamaño medio de los puntos es menor en dimensión angular que en el universo real. Pero, la imagen central (figura 6.15 b), que corresponde al universo plano, es lo que observamos en nuestro universo real y es «perfecta».



**Fig. 6.15** Correspondencia entre el tamaño angular de las anisotropías del CMB y la geometría del universo

Es el universo matemáticamente bello que los teóricos esperaban hallar, y que pudo confirmarse con esta observación. El tamaño de las manchas resultó ser cercano a un grado.

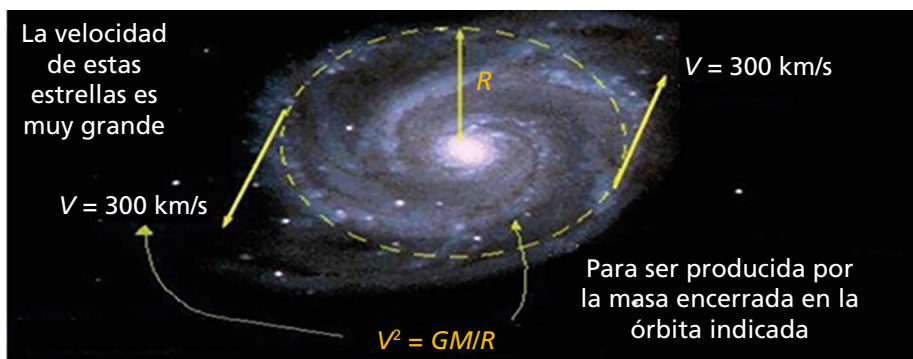


De hecho, la concordancia entre las predicciones de un universo plano y la imagen obtenida del CMB casi resulta violenta. Tras examinar los puntos y buscar los de mayor tamaño que tuvieron tiempo suficiente para haberse colapsado significativamente hacia el interior en la época reflejada en la superficie de la última dispersión, la línea continua del espectro de potencias ofrece la predicción de un universo plano, en el que la mayor protuberancia ocurre cerca de 1,0 grado! lo que significa que vivimos en un universo con geometría euclidiana.

## La materia oscura y la energía oscura

### La materia oscura

En las diversas observaciones realizadas durante las décadas de los 70 y 80, del pasado siglo sobre todo las de las curvas de rotación de las galaxias (figura 6.16 y 6.17) se mostró que no había suficiente materia visible en el universo para explicar la intensidad aparente de las fuerzas gravitacionales que se dan en y entre las galaxias. Esto condujo a la idea de que poco más del 25 % de la materia en el universo no era materia común o bariónica<sup>5</sup> sino **materia oscura** que solo se percibe por sus efectos gravitacionales. La materia común solo abarcaría cerca del 5 % del universo. Además, la asunción de que el universo estuviera compuesto en su mayor parte por materia común llevó a predicciones que eran fuertemente inconsistentes con las observaciones.

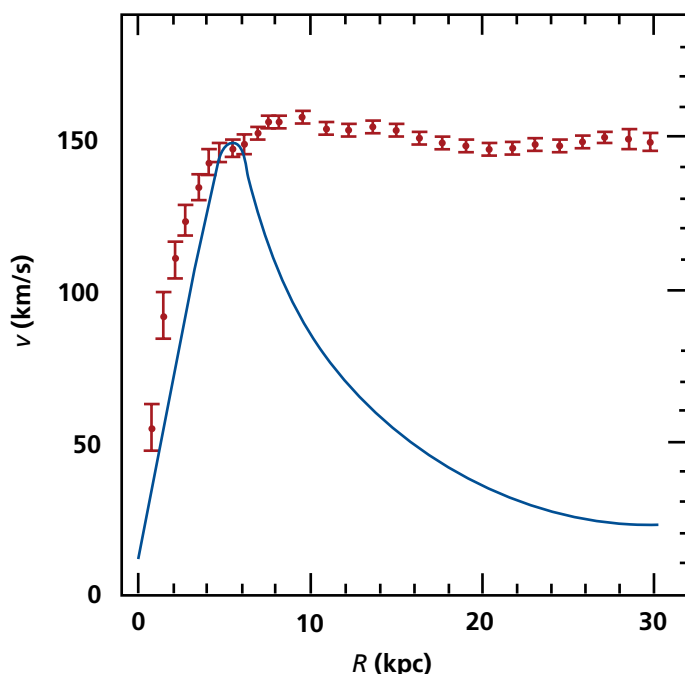


**Fig. 6.16** Órbita de las estrellas en la periferia de las galaxias

En particular, el universo es mucho menos "inhomogéneo" y contiene mucho menos deuterio de lo que se puede considerar sin la presencia de materia oscura.

<sup>5</sup> La materia bariónica o materia normal sería aquella formada por las partículas del modelo estándar de la física de partículas (ver capítulo 5).

Mientras que la existencia de la materia oscura fue inicialmente polémica, ahora es una parte aceptada de la cosmología estándar, debido a las observaciones de las anisotropías en el CMB (radiación cósmica de fondo), la dispersión de velocidades de los cúmulos de galaxias y; en las estructuras a gran escala, estudios de las lentes gravitacionales y medidas, por medio de rayos X, de los cúmulos de galaxias.



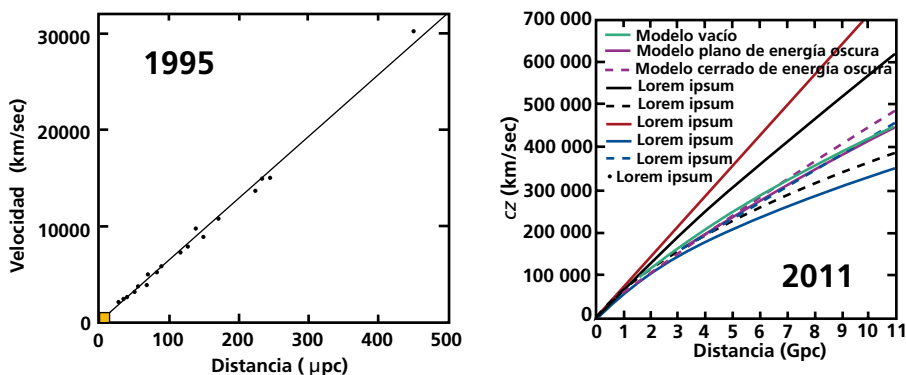
**Fig. 6.17** Las estrellas en la periferia de las galaxias no cumplen las leyes de Kepler, que se explica por la interacción con la materia oscura

La materia oscura se ha detectado únicamente por medio de su huella gravitacional; no se ha observado en el laboratorio ninguna partícula que se le pueda corresponder, sin embargo, hay muchos candidatos a materia oscura en la física de partículas -como, por ejemplo, las partículas pesadas y neutras de interacción débil (WIMP)- y se están llevando a cabo diversos proyectos para detectarlas.

### **La energía oscura**

En la década de 1990, medidas detalladas de toda la densidad de materia-energía del universo revelaron que esta sumaba en torno al 30 % de la densidad crítica. Puesto que el universo es plano, como indican las medidas del fondo cósmico de microondas, quedaba un 70 % de densidad de

materia-energía sin contar. Este misterio aparece ahora conectado con otro: las mediciones independientes de distancia utilizando las supernovas de tipo *la* revelaron que la expansión del universo experimenta una sutil aceleración de tipo no lineal, en vez de seguir estrictamente la Ley de Hubble (figura 6.18).



**Fig. 6.18** La relación entre la velocidad de recesión de las galaxias y la distancia *no es lineal*

Para explicar esta aceleración la relatividad general necesita que gran parte del universo consista en un componente energético con gran presión negativa. Se cree que esta energía oscura constituye ese casi 70 % restante. Su naturaleza sigue siendo uno de los grandes misterios del Big Bang.

Los candidatos posibles incluyen una **constante cosmológica** escalar como la propuesta por Albert Einstein una energía de densidad constante que llena el espacio en forma homogénea, se piensa que la constante cosmológica se origina en la energía del vacío.

Se ha propuesto también la **quintaesencia** y la **energía fantasma**, campos dinámicos cuya densidad de energía puede variar en el tiempo y el espacio.

Actualmente se están realizando observaciones que podrían ayudar a aclarar este punto y cuál de ellos se corresponde con la realidad que observamos.<sup>6</sup>

Hoy es un hecho observacional que la materia que conocemos y que resulta visible en el universo es solo un pequeño por ciento del total. El contenido de materia-energía en el universo se distribuye según las últimas investigaciones de los astrofísicos (sonda Planck 2018) en:

<sup>6</sup> En el año 2024 los primeros resultados del proyecto DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), considerado el proyecto cosmológico más importante en el ámbito internacional, abre una hipótesis la cual considera que la energía oscura evoluciona con el tiempo, pero se necesita más tiempo de observación para confirmarlo.

Un 4,9 % de materia bariónica o materia normal (compuesta por las partículas del modelo estándar de la física de partículas) y un 26,8 % de materia oscura de naturaleza desconocida, solo detectada hasta ahora por sus efectos gravitacionales. Las mejores medidas disponibles (provenientes de los satélites WMAP y Planck) muestran que la forma más común de materia en el universo es la materia oscura fría.

Basándose en medidas de distancia a galaxias lejanas utilizando las **supernovas tipo Ia** como candelas estándar, es decir como bujías patrón para estudiar la expansión del universo se ha podido determinar que **la expansión actual del universo es acelerada**.

El universo observable parece estar dominado por una forma desconocida de energía, denominada por los astrofísicos **energía oscura**.

Aproximadamente el **68,3 % de la densidad de materia-energía del universo** actual se encuentra en esa forma de esa energía desconocida (figura 6.19). Una de las propiedades características de este componente del universo es el hecho de que provoca que este se expanda cada vez más rápido.

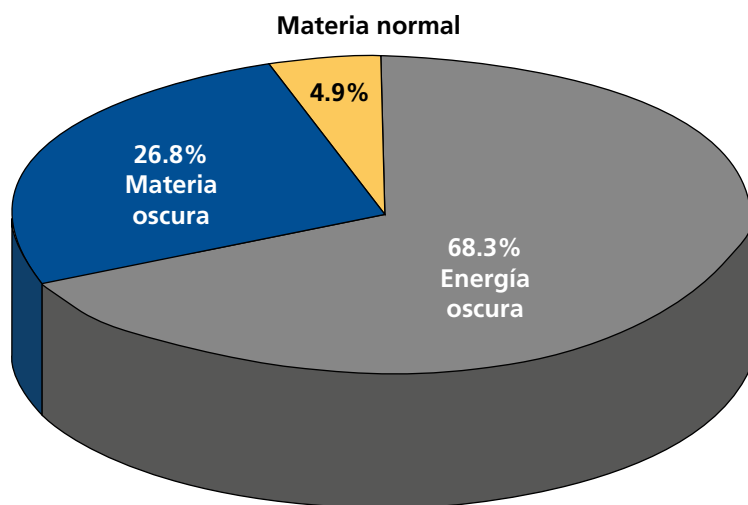


Fig. 6.19 El pastel del universo según Planck

La energía oscura podría tomar la forma de una constante cosmológica como la colocada en las ecuaciones del campo de la relatividad general de Einstein (ver epígrafe 6.3), pero los detalles de la ecuación estado y su relación con el modelo estándar de la física de partículas continúa siendo investigada tanto en el ámbito de la física teórica como por medio de las observaciones.

## Comprueba tus conocimientos

4. ¿Por qué es oscuro el cielo nocturno?
5. ¿Qué significa que nuestro universo sea homogéneo e isótropo?
6. ¿Existe un centro del Universo? ¿Por qué?
7. ¿Qué pruebas apoyan la homogeneidad e isotropía del Universo?
8. ¿Qué es el desplazamiento al rojo?
9. ¿Qué plantea la ley de Hubble?
10. ¿Cuáles son las evidencias de que vivimos en un universo en expansión?
11. ¿Se alejan las galaxias o es el espacio el que se expande?
12. Si el Universo está en expansión, ¿Cambian los átomos de tamaño? ¿Por qué no se expande el Sistema Solar?
13. ¿Cuál es la edad actual del Universo?
14. ¿En qué consiste el modelo cosmológico del estado estacionario?
15. ¿En qué consistió el descubrimiento de los físicos Arno Pensias y Robert Wilson?
16. ¿En qué época tuvo lugar la emisión de la radiación de fondo en microondas, cuál fue su temperatura en ese instante y porqué actualmente es más fría?
17. ¿Qué parámetro observable es directamente proporcional a la edad del Universo?
18. ¿Qué gobierna la geometría del Universo?
19. ¿Qué entendemos por un Universo plano?
20. ¿Qué evidencias tenemos de que el Universo es plano?
21. ¿Se puede establecer el pasado, el futuro y la geometría del universo midiendo la densidad de la materia luminosa?
22. ¿Qué es la materia oscura?
23. ¿Qué es la energía oscura?
24. ¿Qué es la constante cosmológica?

## 6.3 Teorías básicas

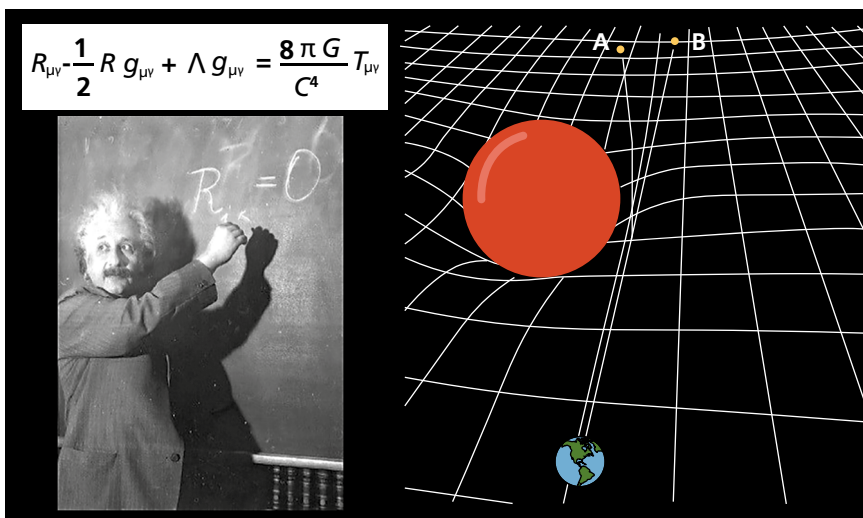
### Relatividad general

En 1915 llega el suceso más trascendental del siglo xx en el campo de la física y las matemáticas: Albert Einstein publica su *Teoría General de la Relatividad* (TGR) en realidad una nueva teoría de la gravitación, el gran físico utilizó una geometría no clásica para describir el universo asociando la fuerza de gravedad con la curvatura del espacio-tiempo, es decir tomando a la geometría como causa de la gravitación.

En relatividad general la fuerza de gravedad es debida a la curvatura del espacio-tiempo, de acuerdo con el físico J. A. Wheeler "el espacio-tiempo le dice a la materia como moverse, pero la materia le dice al espacio-tiempo como curvarse".

En las ecuaciones de Einstein la curvatura del espacio tiempo está descrita por el *Tensor de curvatura*, además, la energía y el *momentum* del universo quedan descritas por el *Tensor de energía-impulso*.

Sin embargo, Einstein (figura 6.20) era seguidor de algunas ideas cosmológicas que prevalecían todavía en aquella época como la de un universo estático, y se tropezó con el hecho de que sus cálculos no arrojaban una solución que lo permitiese. Por esa causa, en 1917, Einstein forzó sus ecuaciones introduciendo como hipótesis adicional una misteriosa fuerza de repulsión cósmica que sería necesaria en un universo estático como el que él mismo concebía, a fin de contrarrestar la atracción debida a la gravitación.



**Fig. 6.20** Ecuaciones de Einstein para el campo gravitatorio

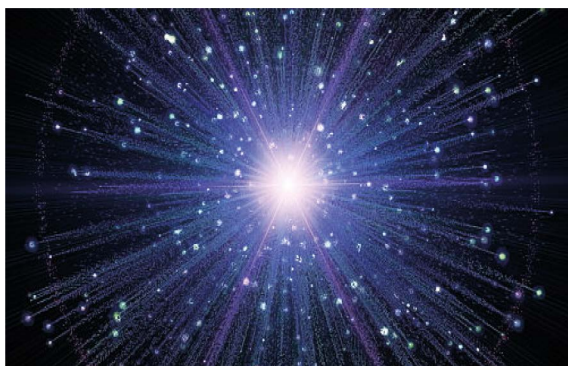
La acción de esta fuerza sería tan universal, como la de la fuerza de gravitación universal, no dependía de la masa de los cuerpos, sino de la distancia que los separa, y quedaría representada en las ecuaciones de la relatividad general por la constante cosmológica  $\Lambda$ . Es lógico denominar a esta fuerza acción gravitacional del vacío, aunque, generalmente, por gravitación se entiende la atracción y no la repulsión, de acuerdo con la idea de Einstein su valor sería extraordinariamente pequeño:  $\Lambda = 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$ , por lo que estas fuerzas de repulsión cósmicas solo podrían ser descubiertas en experimentos de mucha sensibilidad. El insignificante valor de  $\Lambda$  hacía que la tarea de su descubrimiento experimental en la época fuera absolutamente irreal, de modo que este efecto solo podría ser detectado en el futuro investigando el movimiento de las galaxias más alejadas que fuera posible observar.

Al demostrarse que el universo estaba en expansión Einstein afirmó que esa constante había sido su mayor error, y renegó de ella pero los últimos descubrimientos cosmológicos demuestran que este "error" en realidad fue su mayor certeza.

Dos años más tarde, Willem de Sitter (1872-1934) publica una serie de artículos en los que se discuten las posibles consecuencias observacionales de la teoría de Einstein como, por ejemplo, el cálculo preciso de la desviación gravitacional de la luz debido a un cuerpo celeste. No pasó mucho tiempo para que la TGR se aplicara en el estudio de la evolución del Universo como un todo, nace así la cosmología moderna.

### Modelos de Friedman

En 1922, el matemático ruso Alexander Friedman (1888-1925) da solución a las ecuaciones de Einstein y demuestra que el tamaño del universo puede cambiar con el tiempo. Con la muerte de Friedman, sus resultados fueron poco publicitados hasta que, de forma independiente, el sacerdote católico y astrónomo belga George Lemaître descubre, en 1927, la misma solución que Friedman, es decir, la de un universo dinámico que comenzó su expansión en un tiempo finito. En esos años Lemaître desarrolló lo que él denominó Teoría del átomo primigenio, en la que afirmaba que el universo había tenido un comienzo en un estado en el que toda la materia estaba altamente concentrada, en lo que él mismo llamó el átomo primitivo, expandiéndose luego (figura 6.21).

**Fig. 6.21**

Es Lemaître el primero en concebir la tremendamente atrevida idea de un comienzo para el Universo. Pero Friedman a partir de sus cálculos propone tres alternativas de su evolución en dependencia del valor de la densidad total de materia-energía del cosmos:

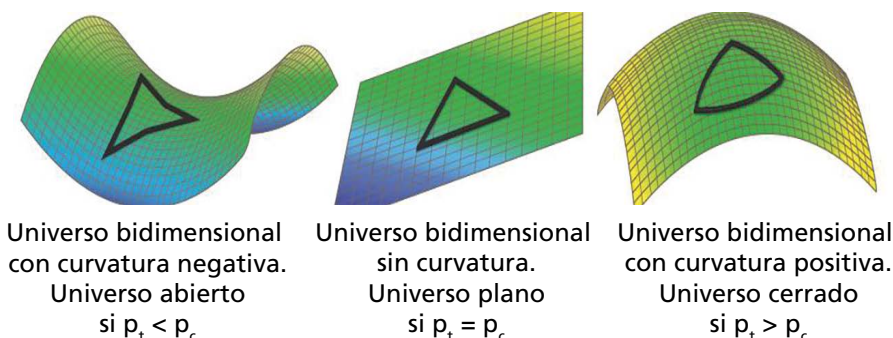
1. Si la densidad total de materia-energía existente en el universo es menor que un cierto valor denominado densidad crítica, la expansión continuará eternamente.
2. Si la densidad total de materia-energía existente en el universo es igual a la densidad crítica, también la expansión continuará por siempre, aunque a un ritmo diferente (este parece ser el caso de nuestro universo real).
3. Si la densidad total de materia-energía existente en el universo supera el valor crítico de densidad, la gravedad será lo suficientemente fuerte como para curvar el espacio-tiempo hasta el punto en que la expansión se detenga y el universo comience a contraerse, regresando hasta su estado inicial.

Es decir, la densidad total de materia con su energía asociada en el universo determina su geometría que puede ser abierta, plana, o cerrada.

Si la densidad total de materia-energía en el universo es exactamente igual a la densidad crítica, entonces este tendría una geometría completamente plana con curvatura nula (euclidiana). Si esta densidad de materia-energía fuera más pequeña que la densidad crítica, entonces el universo tendría una geometría abierta con una curvatura negativa, semejante a la de una silla de montar. Sin embargo, si la densidad de materia y energía



fuese mayor que la densidad crítica, el universo tendría una geometría con curvatura positiva, cerrada, similar a la de una esfera (figura 6.22).



**Fig. 6.22** Ejemplo de tres geometrías posibles para un universo, según Friedman; en el caso plano la suma de los ángulos interiores de un triángulo será siempre  $180^\circ$ , en el caso abierto esa suma sería siempre menor de  $180^\circ$ , y en el caso cerrado sería siempre mayor de  $180^\circ$

Una expresión para la densidad crítica de materia-energía del universo se puede encontrar asumiendo que  $\Lambda$  es cero (como es para todos los Universos de Friedmann básicos) y estableciendo la curvatura  $K$  igual a cero:

$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G \quad (6.10)$$

Repare en que el valor de  $\rho_c$  depende del valor del parámetro de Hubble.

### El parámetro omega

La densidad que hoy estimamos tiene nuestro universo es de aproximadamente un átomo de hidrógeno por cada metro cúbico.<sup>7</sup> Este valor nos puede parecer ínfimo, sobre todo, por ejemplo, comparado con aquellas regiones de densidades inmensas en el núcleo de los astros. Este valor es un promedio sobre todo el universo observable.

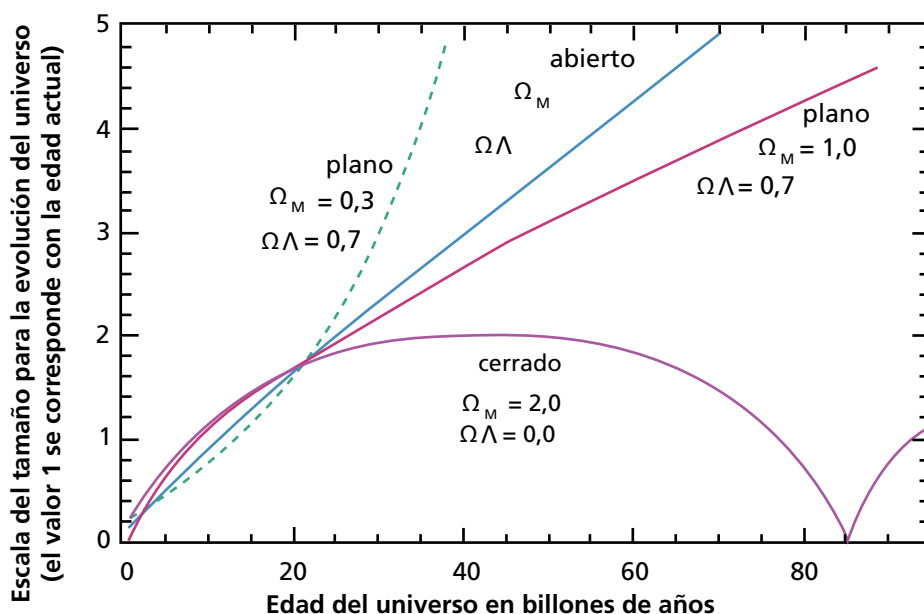
Y de la misma manera que sabemos que abundan las regiones de densidades extremas, también existen inmensas zonas vacías de toda forma de materia, como en efecto nos lo indican los actuales censos de galaxias. Esta densidad de energía, que llamamos “crítica”, hace las veces de línea divisoria entre universos de muy diferentes características y evoluciones. Es por ello que, los cosmólogos han decidido definir un nuevo e importante parámetro

<sup>7</sup> El valor determinado para  $\rho_c$  en el momento actual es igual a:  $1,88 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ .

cosmológico, al que han bautizado con la última letra del alfabeto griego: omega, escrita en mayúsculas ( $\Omega$ )<sup>8</sup>, y que no es otra cosa que el cociente entre la densidad de materia-energía real del universo y la densidad crítica.

$$\Omega_T = \rho t / \rho_c \quad (6.11)$$

Es por ello que un valor de omega mayor (menor) que 1 indica que la densidad de materia-energía real del universo es mayor (menor) que la crítica y, en consecuencia, que la geometría del espacio físico tridimensional será esférica (hiperbólica) y de curvatura positiva (negativa); el valor crítico omega = 1 indicará en cambio un universo Euclídeo ("plano" o de curvatura nula) de densidad idénticamente igual a la crítica (figura 6.23).



**Fig. 6.23** Evolución del universo para diferentes modelos cosmológicos actuales.

Para cada modelo, se indica la geometría del universo y los componentes dominantes:  $\Omega_M$  es el parámetro de densidad de la materia bariónica y oscura, y  $\Omega_\Lambda$  es el parámetro de densidad de la energía oscura

<sup>8</sup> Se puede escribir:  $\Omega_T = \Omega_M + \Omega_R + \Omega_\Lambda$

Donde,  $\Omega_M$  tiene en cuenta todos los componentes sustanciales del Universo: la materia bariónica y la materia oscura.  $\Omega_R$  es el parámetro de densidad de la radiación, que contribuye solo en un 0,005 % a la densidad de la materia-energía cósmica.  $\Omega_\Lambda$  es el parámetro de densidad de la energía oscura; por ejemplo, el parámetro de densidad de la materia  $\Omega_M$ , actualmente se estima en aproximadamente 0,3 y el parámetro de densidad de la energía oscura  $\Omega_\Lambda$  en aproximadamente 0,7. Estos son valores favorecidos por observaciones recientes.

## La teoría del Big Bang

La teoría del Big Bang (en español, gran explosión) es la teoría cosmológica mayoritariamente aceptada por la comunidad científica actual, para explicar los períodos conocidos más antiguos del universo y su posterior evolución a gran escala. Afirma que en sus inicios el universo se encontraba en un estado de muy altas densidad y temperatura, desde donde comenzó a expandirse, y que, con el transcurso del tiempo continuó expandiéndose y enfriándose hasta el día de hoy.

Después de la rápida expansión inicial, poco a poco la temperatura del universo descendió lo suficiente para permitir debido a diversos procesos físicos la formación de partículas fundamentales, partículas subatómicas y, más tarde, simples átomos, los núcleos atómicos ligeros. Posteriormente, al formarse nubes de los elementos primordiales, estas se concentraron por medio de la gravedad para formar estrellas en las que se sintetizaron posteriormente los elementos más pesados. En las galaxias se reunieron miles de millones de estrellas que favorecieron la formación de sistemas planetarios, con planetas de muy diversos tipos incluida nuestra Tierra, único lugar que conocemos, hasta el momento, en el universo en el que se desplegó la vida.

Bajo la influencia de la gravedad producida por la materia oscura -un componente del universo que solo se percibe por sus efectos de atracción gravitacional- los cúmulos de galaxias se agruparon en supercúmulos tejiendo una inmensa red cósmica que abarca todo el universo observable.

Mediciones modernas (Sonda Planck 2018) datan que el nacimiento de nuestro universo ocurrió hace  $13,797 \pm 0,023$  Gaños atrás, intervalo que sería por tanto igual a su edad.

En realidad en el principio del universo no hubo una “explosión” pues no tuvo lugar su localización en ninguna extensión espacial preexistente, por lo que no se propagó fuera de sí mismo ni tampoco el evento fue “grande”, pues en rigor al surgir de una “singularidad en el inicio del tiempo”, hablamos del reino de lo extraordinariamente pequeño, en cuyo principio se producían fluctuaciones cuánticas del vacío que los físicos admiten hoy como el origen de todo lo que vino después, incluida la expansión del propio espacio-tiempo. El nombre de la Teoría (Big Bang) es una denominación errónea.

La Teoría de la Relatividad General puede combinarse con las observaciones de isotropía y homogeneidad, a gran escala, de la distribución de

las galaxias y de los cambios de posición entre ellas, permitiendo extrapolar las condiciones del universo antes o después en el tiempo.

Una consecuencia de todos los modelos en la teoría del Big Bang es que, en el pasado, el universo tenía una temperatura mucho más alta y mucha mayor densidad que hoy y, por tanto, las condiciones físicas actuales son muy diferentes de las condiciones físicas en el lejano pasado.

Con el transcurso de los años, todas las evidencias observacionales han apoyado la idea de que el universo evolucionó a partir de un estado superdenso y caliente.

Desde el descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas, en 1965, esta ha sido considerada la mejor teoría para explicar la evolución del cosmos, no es especulativa, se basa en una enorme cantidad de observaciones precisas y de hechos probados:

La “gran explosión” es un concepto muy diferente a la explosión de una granada, de la que sale metralla en todas direcciones desde un centro (la propia granada). Sería más apropiado llamar al Big Bang la Gran Expansión, puesto que la expansión del universo se refiere a todo lo que existe, incluido el espacio y el tiempo. Antes del Big Bang no había espacio, por lo tanto, no pudo haber un centro del universo.

En general, se consideran tres las evidencias observacionales más importantes que apoyan la teoría cosmológica del Big Bang. Estas son:

- La expansión del universo que se puede apreciar en el corrimiento hacia el rojo de las líneas de los espectros generados por las galaxias.
- Las medidas detalladas de la radiación del fondo cósmico de microondas.
- La abundancia de los elementos ligeros en el universo.

De la observación de galaxias y cuásares lejanos se desprende la idea de que las líneas espectrales de estos objetos experimentan un corrimiento hacia el rojo, lo que quiere decir que la luz que emiten se ha desplazado proporcionalmente hacia longitudes de onda más largas. Esto se explica actualmente por un cambio en el factor de escala del universo en expansión que produce a su vez un aumento de la longitud de onda de la radiación (corrimiento al rojo cosmológico).

Una de las mejores predicciones de la teoría del Big Bang es la existencia de la radiación cósmica de fondo, la radiación del fondo cósmico de microondas.

El universo temprano, debido a su alta temperatura, se habría llenado de radiación electromagnética emitida por sus otros componentes.

Mientras el universo se enfriaba debido a la expansión, su temperatura habría caído por debajo de  $\approx 3\,000\text{ K}$ . Por encima de esta temperatura, los electrones y protones están separados, haciendo el universo opaco a la radiación electromagnética.

Por debajo de los  $3\,000\text{ K}$  se forman los átomos, permitiendo el paso de esta radiación a través del plasma del universo. Esto es lo que se conoce como disociación de fotones.

La radiación en este momento habría tenido el espectro de un cuerpo negro y habría viajado libremente durante el resto de la vida del universo, sufriendo un corrimiento hacia el rojo como consecuencia de la expansión de Hubble, esta hizo variar el espectro de cuerpo negro de unos  $3\,345\text{ K}$  a un espectro con una temperatura mucho menor ( $2,725\text{ K}$ ) como lo observamos hoy. La radiación, vista desde cualquier punto del universo, parecerá provenir de todas las direcciones en el espacio.

Las observaciones detalladas de la morfología y estructura de las galaxias y cúasares proporcionan una fuerte evidencia a favor del Big Bang.

La combinación de las observaciones con la teoría sugiere que los primeros cúasares y galaxias se formaron hace alrededor de 500 millones de años después del Big Bang, y desde ese momento se han estado formando estructuras más grandes, como los cúmulos de galaxias y los supercúmulos. Las poblaciones de estrellas han ido envejeciendo y evolucionando, de modo que las galaxias lejanas (que se observan tal y como eran en el principio del universo) son muy diferentes a las galaxias cercanas (que se observan en un estado más reciente). Estas observaciones son argumentos sólidos en contra de la teoría del estado estacionario (teoría antagónica al Big Bang). Las observaciones de la formación estelar, la distribución de cúasares y galaxias, y las estructuras más grandes concuerdan con las simulaciones obtenidas en supercomputadoras sobre la formación de las estructuras en el universo a partir de la teoría del Big Bang, y están ayudando a completar detalles de cómo ocurrió este proceso.

Después de cierta controversia, la edad del universo estimada por la expansión de Hubble y la radiación cósmica de fondo concuerdan en gran medida (es decir, es ligeramente más grande) con las edades de las estrellas más viejas, ambos intervalos medidos aplicando la teoría de la evolución

estelar de los cúmulos globulares y mediante la fecha radiométrica individual en las estrellas de la población II.

A finales de los años 1990 y principios del siglo  $\text{xxi}$ , se lograron grandes avances en la cosmología del Big Bang, como resultado de importantes adelantos en el instrumental astronómico de observación, y en el uso de nuevos telescopios que exploraron todo el cielo en múltiples longitudes de onda, y del cual forman parte el telescopio espacial Hubble y los satélites WMAP y Planck, los astrofísicos calcularon muchos de los parámetros cosmológicos hasta un nuevo nivel de precisión.

A pesar de sus muchos aciertos, históricamente, desde la década de 1970 habían surgido varios problemas dentro de la teoría del Big Bang, fundamentalmente, por el razonamiento de que, para parecerse el universo a como es en la actualidad, este tendría que haber empezado con unas condiciones iniciales “especiales” o muy puestas a punto cerca del Big Bang. Específicamente, había tres aspectos que no se aclaraban y que fueron nombrados como:

- El problema del horizonte.
- El problema de la planidad.
- El problema de los monopolos magnéticos.

*El problema del horizonte*, también llamado problema de la causalidad, es resultado de que la información no puede viajar más rápido que la luz, de manera que dos regiones en el espacio separadas por una distancia mayor que la velocidad de la luz multiplicada por la edad del universo no pueden estar causalmente conectadas.

En este sentido, la isotropía observada de la radiación de fondo cósmico de microondas (CMB) resulta problemática, debido a que el tamaño del horizonte de partículas en ese tiempo corresponde a un tamaño de cerca de dos grados en el cielo.

Si el universo hubiera tenido la misma historia de expansión desde la época de Planck, no habría mecanismo que pudiera hacer que estas regiones tan alejadas entre sí tuvieran la misma temperatura.

Medir una uniformidad en la radiación cósmica de fondo implica que hay zonas del universo muy distantes entre sí que tienen igual temperatura (equilibrio térmico). ¿Cómo han podido interactuar para lograr este equilibrio?

*El problema de la planidad* es un problema observacional, la densidad de materia-energía del universo en el presente es muy cercana a la densidad crítica, (medida muy precisa de la geometría del universo por las sondas WMAP y Planck) o lo que es lo mismo, el universo hoy es espacialmente plano, dentro de una muy buena aproximación. Sin embargo, las diferencias con respecto a la densidad crítica crecen con el tiempo, luego, en el pasado la densidad tuvo que ser aún más cercana a esta. Se ha calculado que en los primeros momentos del universo la densidad era diferente a la crítica tan solo en una parte en  $10^{15}$  (una milbillonésima parte). Cualquier desviación mayor hubiese conducido a una muerte térmica o un Big Crunch y el universo no sería como es ahora.

¿Por qué el universo surgió precisamente con ese valor de densidad?

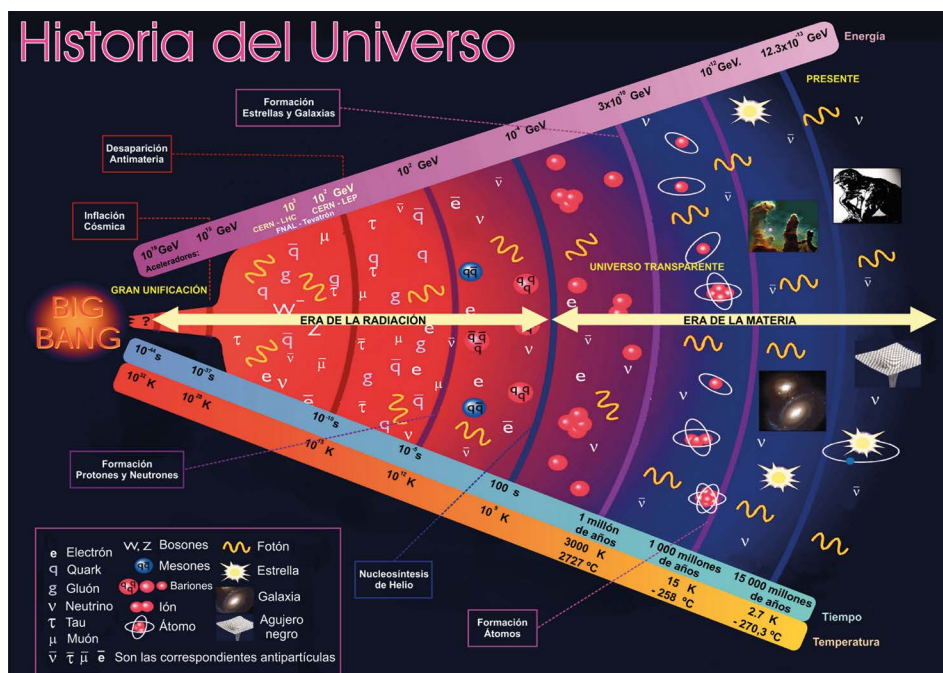
Por último, *la objeción de los monopolos magnéticos* fue propuesta a finales de la década de 1970. Las Teorías de la Gran Unificación (TGU) predicen defectos topológicos en el espacio, que se manifestarían como monopolos magnéticos que supuestamente deberían existir, encontrándose el espacio con una densidad mucho mayor a la observada. De hecho, hasta ahora, no se ha dado con ningún monopolo, sin embargo, según las (TGU) desde la época de la gran unificación deben existir tantos monopolos magnéticos como bariones, además su masa es tal ( $10^{16}$  GeV) que influirían seriamente en la geometría del universo. Pero nada de esto se observa, a pesar de los esfuerzos experimentales realizados para detectarlos.

La mayoría de los astrónomos y los físicos aceptan que la concordancia entre la teoría del Big Bang y la evidencia observacional es tan cercana que permite establecer con cierta seguridad casi todos los aspectos básicos de la teoría, pero estos señalamientos necesitaban explicación.

## Historia Térmica del Universo

### La Época de Planck. Tiempo: desde 0 a $10^{-43}$ s desde el Big Bang

El momento del Big Bang aún no puede ser descrito por las leyes de la física que conocemos, en ese instante, el universo era, según la Teoría de la Relatividad General, una "singularidad" y numerosos misterios aparecen cuando se investiga cerca del principio del tiempo (figura 6.24), allí las energías eran muchísimo más altas de las que ahora se pueden estudiar mediante experimentos en los aceleradores actuales.



**Fig. 6.24** La historia del universo según la teoría del Big Bang

En esta época las densidades son tales que los efectos gravitacionales y de mecánica cuántica se hacen igual de importantes. Todo indica que nuestro conocimiento está todavía incompleto y que, para describir la física cuando la temperatura supera los  $10^{32}$  K y la energía los  $10^{18}$  GeV,<sup>9</sup> hace falta una teoría cuántica de la gravedad inexistente en la actualidad. Partamos entonces de un hecho: estamos todavía lejos de poder explicar el tiempo cero, el supuesto origen del universo (si tuvo origen). Asimismo, querer decir algo sobre la verdadera estructura del espacio-tiempo, es decir, si el espacio-tiempo es en realidad continuo *ad infinitum*, o si en alguna escala microscópica llegaremos a detectar sus "pixels" característicos, requiere contar con una buena teoría cuántica de la gravedad.

¿Cómo poner a prueba estas ideas?

<sup>9</sup> GeV es una unidad de energía llamada Giga electronvolt, y corresponde a  $10^9$  eV. La equivalencia entre materia y energía de la relatividad especial,  $E = m \cdot c^2$ , nos permite expresar los GeV en unidades de masa, en este caso tenemos,  $1 \text{ GeV} = 1,8 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ . De manera análoga, podemos también establecer la equivalencia:  $1 \text{ GeV} = 1,2 \cdot 10^{13} \text{ K}$ , donde K es Kelvin, la unidad de la escala absoluta de temperaturas, en la cual el cero absoluto, o cero kelvin, corresponde a 273,15 grados por debajo del punto de congelación del agua.



En estas escalas de energía cualquier acelerador de partículas que pueda diseñar el hombre en el futuro imaginable parece ser insuficiente. Por ello, quizás es mejor mirar hacia el cielo: el universo nos ofrece procesos astrofísicos increíblemente energéticos, que un buen observador debería ser capaz de aprovechar. Como le gustaba afirmar a un conocido cosmólogo ruso, "el universo es el acelerador de los pobres" y cuando se quiere llegar a la escala de Planck, todos lo somos.

La comprensión de la física en la época de Planck figura entre los mayores problemas no resueltos de la física actual.

Dentro de una nueva teoría física aún más completa y general, podría ser posible que el Big Bang no sea una singularidad, sino una transición entre dos estados diferentes del universo que todavía no comprendemos.

Debemos tener claridad entonces que, la teoría del Big Bang no explica propiamente el origen del universo, pues no nos dice nada sobre su inicio, ni tampoco sobre la posible causa de su aparición, no expone nada en absoluto sobre el propio instante cero. Realmente la teoría solo trata de explicar la evolución del cosmos a partir del momento en que son aplicables las leyes conocidas de la física.

De acuerdo con estos postulados, el tiempo y el espacio no existían antes del universo ambos tuvieron su origen en el Big Bang, al igual que toda la materia, incluida la energía de cualquier tipo. Preguntar qué había antes es como preguntar que hay más al Norte del polo Norte.

Por lo tanto, solo podemos comenzar a describir la historia cósmica después del intervalo temporal llamado tiempo de Planck ( $t_p$ ), igual a  $5,39 \cdot 10^{-44}$  s después del Big Bang. Esta es una unidad de tiempo, considerada hoy por la física como el intervalo temporal más pequeño que en principio podría ser medido y representa el instante más pequeño en el que las leyes de la física que conocemos pueden ser utilizadas para estudiar la naturaleza y la evolución del universo, es un lapso muy corto, muchos órdenes de magnitud más pequeños que el instante más pequeño que se puede medir hoy en un laboratorio.

En cosmología, se llama época de Planck al más temprano período de tiempo en la historia del universo, y se toma entre  $t = 0$  y  $10^{-43}$  s ( $t \sim t_p \sim 10^{-43}$  s), durante el cual las cuatro fuerzas fundamentales (interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil, interacción electromagnética e interacción gravitatoria) estaban unificadas y no existían todavía

partículas fundamentales. De modo que, aún no hay ningún modelo físico convincente para estudiar el primer  $10^{-43}$  s en la existencia del universo.

Todavía sabemos muy poco de la época de Planck, es posible que el universo en esta etapa tuviera más dimensiones espaciales que las tres que conocemos, al concluir esa fase (en la que el tiempo de vida del universo coincide con el llamado “tiempo de Planck”) la primera interacción que se separa del resto del campo unificado es la interacción gravitatoria, el “gravitón” (la partícula cuántica asociada) se aparta de las demás formas de materia, también en este instante, el espacio-tiempo adquiere las cuatro dimensiones que conocemos hoy y en las que se basa la relatividad (clásica) de Einstein (tres dimensiones espaciales y una temporal).

Con la separación de la gravitación de las demás interacciones fundamentales conocidas, la materia se ve sujeta a una nueva interacción de gran unificación, que podríamos llamar interacción unificada: *fuerte y electro débil*.

### **La época de la Gran Unificación (TGU). Tiempo: $10^{-43}$ s - $10^{-35}$ s desde el Big Bang**

Luego de la era de Planck, comienza un período de la historia del universo dominado por la “radiación”. Vale aclarar aquí que esta “radiación” no está relacionada con la radiación electromagnética (por ejemplo, con la luz) como la conocemos hoy. En cosmología, denominamos “radiación” a todos aquellos componentes del universo –sean partículas que posean o no masa– con masas asociadas menores a la energía térmica reinante del universo en ese momento.

En los primerísimos instantes de la vida del cosmos, las temperaturas predichas son inmensas y por ello, aun partículas estables de masa no nula, pueden caer bajo la denominación de “radiación”. En el universo actual, cuando la temperatura del espacio profundo se halla a unos pocos grados (2,7 K) por encima del cero absoluto (o cero kelvin), solo los fotones (corpúsculos de luz, de masa nula) y los neutrinos no masivos (y quizás también alguna partícula nueva aún no detectada por los físicos) reciben dicha denominación.

Esta época “dominada por la radiación”, como se la conoce técnicamente, se extenderá por varias decenas de miles de años, hasta que el universo, en continua expansión y permanente enfriamiento, vea disminuir su temperatura a tal punto que puedan darse las condiciones

propicias para la formación de los primeros átomos de la materia neutra conocida.

El universo se expandió y se enfrió desde la época de Planck, la física de esta etapa inicial apenas se puede esbozar con la llamada Teoría de la Gran Unificación (TGU) en el que los grupos del modelo estándar se integran en uno mayor, que se rompe para producir las fuerzas de la naturaleza observadas. Eventualmente, la gran unificación se rompe cuando la interacción nuclear fuerte se separa de la fuerza electrodébil, en esta era la teoría arroja que el universo debió producir muchos monopolos magnéticos.<sup>10</sup>

### **Inflación. Tiempo: $10^{-35}$ s desde el Big Bang**

Prácticamente todos los trabajos teóricos actuales en cosmología tratan de ampliar o concretar aspectos de la teoría del Big Bang. Gran parte del trabajo actual trata de entender cómo se formaron las galaxias y los cúmulos y supercúmulos de galaxias en este contexto, comprender lo que allí ocurrió y cotejar las nuevas observaciones con la teoría fundamental.

La clave para explicar los problemas teóricos del Big Bang estándar se encontraron en la "Teoría inflacionaria". La inflación cósmica es un conjunto de propuestas en el marco de la física teórica para explicar la expansión ultrarrápida del universo en los instantes iniciales. Se postula que cuando el universo tenía unos  $10^{-35}$  s de edad, ocurrió un período de expansión exponencial en el universo muy preprimigenio. La expansión es exponencial porque la distancia entre dos observadores fijos se incrementa exponencialmente, debido a la métrica de expansión del universo (un espacio-tiempo con esta propiedad es llamado un espacio-tiempo de Sitter). La idea de la existencia de este período fue propuesta por el físico estadounidense Alan Guth, en la década de 1980 e independientemente por Andrei Linde; y tiempo después por Andreas Albrecht junto con Paul Steinhardt, para resolver los problemas teóricos mencionados de la teoría del Big Bang. El mecanismo que hace surgir la inflación todavía no está claro, pero probablemente esté asociado con las propiedades físicas del universo temprano en el que

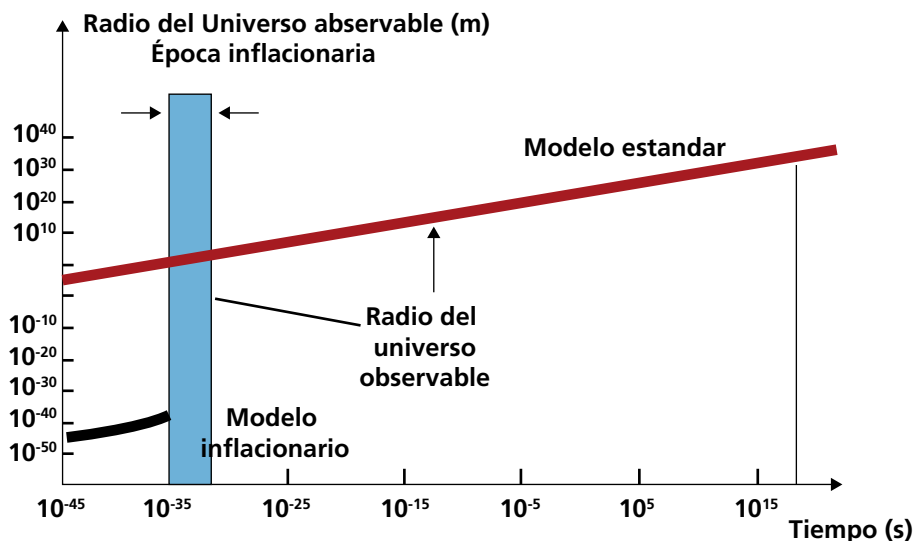
<sup>10</sup> Un monopolio magnético es una partícula elemental hipotética constituida por un solo polo magnético. De existir en la naturaleza, sería el equivalente a una "carga magnética" en el campo magnético, tal y como ocurre con la carga eléctrica en el caso del campo eléctrico.

todas las fuerzas de la naturaleza estaban unificadas excepto la gravedad (figura 6.25).



**Fig. 6.25** Representación de momentos espacio-temporales en la era de Planck. Los conceptos de dirección e incluso causa y efecto pierden significado en este caos espacio-temporal

El universo niño sufrió una transición de fase y liberó grandes cantidades de energía. Posiblemente, la inflación ocurrió durante esta transición (figura 6.26).



**Fig. 6.26** Representación del período inflacionario del universo

*¿Cómo resuelve la inflación el problema del horizonte?*

La expansión temprana del universo llevó a dos puntos distantes uno del otro a moverse más rápido que la velocidad de la luz, la relatividad general no establece un límite de velocidad para la expansión, como consecuencia de esto el universo físico es mucho más grande que el universo observable, estamos sujetos a un horizonte cosmológico. Al sufrir el universo una expansión exponencial, regiones que se afectan mutuamente se expanden más allá de sus respectivos horizontes.

Este comportamiento tuvo una consecuencia importante para el tejido del espacio-tiempo: dejó al espacio-tiempo homogéneo como es hoy.

Es como si tomamos una tela muy arrugada, y la estiramos muy rápidamente en todas direcciones, dejándola completamente lisa.

Antes de la inflación, el universo tendría un tamaño del orden de  $10^{-27}\text{m}$ , de modo tal que sería menor que el posible horizonte cosmológico de ese instante. Así fue posible el contacto térmico y se justifica la uniformidad de la radiación cósmica de fondo, la uniformidad observada en todas las direcciones. No importa dónde miremos, implica que el universo debe haberse expandido mucho, mucho más de lo predicho en la teoría original del Big Bang estándar.

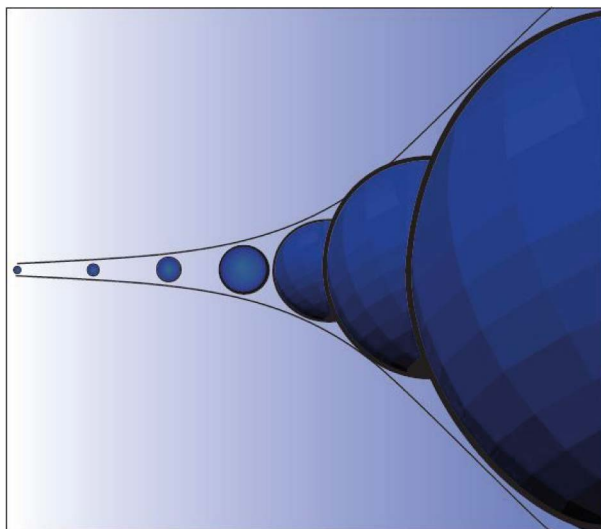
El principio de incertidumbre de Heisenberg predice además que, durante la fase inflacionaria habrían existido fluctuaciones primordiales, que se amplificarían hasta la escala cósmica. Estas fluctuaciones, de acuerdo con los teóricos, servirían de semillas para toda la estructura actual del universo.

Al pasar la inflación, el universo se siguió expandiendo siguiendo la ley de Hubble, y las regiones que estaban demasiado lejos para afectarse mutuamente vuelven al horizonte. Esto explica la isotropía observada de la radiación cósmica de fondo. La inflación predice que las fluctuaciones primordiales son casi invariantes según la escala y que tienen una distribución normal o gaussiana, lo cual ha sido confirmado con precisión por medidas muy precisas del fondo cósmico de microondas desde el espacio.

*¿Cómo resuelve la inflación el problema de la planidad?*

Durante el período inflacionario el espacio-tiempo se expandió tan rápido que provocó una especie de estiramiento del universo acabando con

cualquier curvatura residual que pudiese haber (figura 6.27). Así la inflación pudo hacer al universo plano.



**Fig. 6.27** Representación del aumento exponencial del tamaño del universo durante la fase de inflación. Durante esta fase de expansión el universo tiene una geometría cada vez más plana

Se puede probar teóricamente que con la inflación el parámetro de densidad total del universo  $\Omega$  tiende rápidamente a 1, independientemente de su valor anterior. La expansión acelerada hace que el espacio se alise como la superficie de un globo se aplanan en la medida que este se infla.

La curvatura del universo se puede medir, por ejemplo, analizando las fluctuaciones de temperatura de la radiación cósmica de fondo; hoy sabemos que la geometría del universo es prácticamente plana. Sin inflación, la teoría del Big Bang no puede explicar satisfactoriamente este aplanamiento del cosmos.

*¿Cómo resuelve la inflación el problema de los monopolos magnéticos?*

La inflación elimina todos los puntos defectuosos del universo observable de la misma forma que conduce la geometría hacia su forma plana. Al final de la expansión inflacionaria, el universo tiene un tamaño que ya superaba el horizonte observable, es posible que los monopolos accesibles en la parte del universo observable sean tan escasos como muestran las observaciones. La inflación diluye los monopolos magnéticos predichos

por muchas extensiones del modelo estándar de física de partículas. Si el universo estuviese lo suficientemente caliente como para formar tales partículas anteriores al período de inflación, estas no serían observadas en la naturaleza, ya que habrían de ser tan raras que es bastante probable que no haya casi ninguna en el universo observable. Es posible que aun así pueda haber algún monopolio pero se ha calculado que apenas existiría una cantidad ínfima.

Después de la fase de inflación, el universo continuó expandiéndose y enfriándose, pero ahora a un ritmo más lento.

### **La era electrodébil. Tiempo: $10^{-12}$ s desde el Big Bang**

Todas las partículas estándar al principio eran relativistas y estaban en equilibrio térmico con la radiación. Una partícula se vuelve no relativista (n.r.) cuando su energía cinética decrece por debajo de la energía de reposo por lo que ese tiempo depende de su masa. El que las partículas abandonen el equilibrio térmico depende de dos escalas de tiempo: su tasa de reacción y la tasa de expansión del universo. Si la tasa de reacción es menor que la tasa de expansión, entonces la distancia entre las partículas aumenta más rápido de lo que ellas pueden interactuar, y esas partículas se desacoplan. La fascinante historia térmica del universo depende entonces de la dinámica global y de las propiedades de las partículas y campos (masas y secciones de choque). Con la expansión partículas cada vez menos masivas dejan de ser relativistas y un poco antes o después, dependiendo del tipo de interacción, se desacoplan del resto de las partículas y la radiación, permitiendo la formación de sistemas más complejos.

La historia térmica tiene una descripción formal a partir de ( $t \approx 10^{-10}$  s), cuando  $T \approx 10^{15}$  K o  $E \approx 10^2$  GeV. En esta época se rompe la *simetría electrodébil* y las partículas estándar adquieren su masa por medio del mecanismo de Higgs (ver (capítulo anterior), a partir de entonces existen las familias de partículas/antipartículas de quarks y leptones más las partículas portadoras de las interacciones (partículas fundamentales).

Al final de la era electrodébil, prima en el universo un denso plasma de quark-gluones, así como de partículas masivas que se crean a esas energías, por ejemplo, los bosones  $W^+ W^-$  y  $Z^0$ , además de los bosones de Higgs (todos ya descubiertos experimentalmente en los aceleradores).

En esta época, partículas relativamente livianas (comparadas con los futuros bariones) como los electrones y los neutrinos, globalmente llamadas “leptones”, adquieren sus masas características. Por su parte, con el electromagnetismo surge también el fotón, la partícula (a veces llamado el “*quantum*”) del campo electromagnético que nos es tan familiar. Como lo señalamos más arriba, el fotón es el corpúsculo mediador de la interacción y “aquella” partícula que “informa” a un electrón, por ejemplo, que hay un protón presente en la cercanía y que ambos, por poseer cargas eléctricas diferentes, se deben atraer.

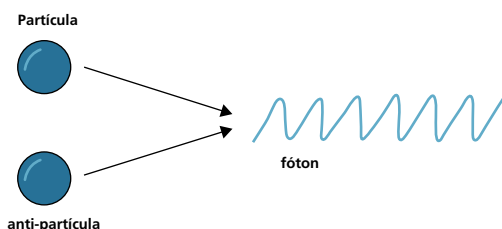
Pero antes de la ruptura de la simetría electrodébil ( $t \leq 10^{-10}$  s), se conjeturan también una serie de procesos que esperan su comprobación experimental cuando se alcancen las energías involucradas en los aceleradores. Entre ellos está la ruptura de la **supersimetría**<sup>11</sup> propuesta en los modelos más allá del modelo estándar de física de partículas; estos procesos hipotéticamente ocurrirían a temperaturas superiores a  $10^2$  GeV, a partir de entonces las masas de las partículas estándar y las de sus pares supersimétricos se harían muy diferentes; además estas últimas no interactúan electromagnéticamente, pero sí débilmente, es decir, antes de la ruptura de la simetría electrodébil podían estar en equilibrio térmico con el resto de las partículas, quedando fijada su densidad de reliquia  $\Omega_x$  antes de esta ruptura. Esa densidad es cercana a la que se infiere para la materia oscura, razón por la que las partículas supersimétricas, en especial las más ligeras, como son los **neutralinos**, se encuentran junto a otros candidatos muy probables para ser componentes de la materia oscura.

- **Aniquilación de antimateria.** Entre los procesos relevantes después de la ruptura de la simetría electrodébil están los que sirvieron para la aniquilación de la antimateria.

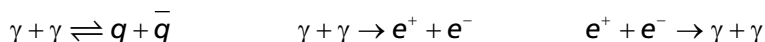
<sup>11</sup> En física de partículas, la supersimetría es una simetría hipotética que podría relacionar las propiedades de los bosones y los fermiones. La supersimetría también es conocida por el acrónimo inglés SUSY. Aunque todavía no se ha verificado experimentalmente que la supersimetría sea una simetría de la naturaleza, reviste interés teórico porque puede resolver diversos problemas como el de la jerarquía, además de ofrecer candidatos adicionales para explicar la materia oscura. La supersimetría es parte fundamental de muchos modelos teóricos, entre ellos la teoría de supercuerdas, que generaliza a la teoría de cuerdas.



Cuando la era cósmica alcanzó la milmillonésima de segundo, tuvo lugar un acontecimiento importante. Hasta entonces, el universo era lo suficientemente caliente y denso como para mantener en equilibrio la materia y la antimateria. Pero cuando se enfrió, este equilibrio se perdió y la materia y la antimateria comenzaron a aniquilarse entre sí, convirtiendo toda la masa de las partículas y antipartículas aniquiladas en radiación (figura 6.28).



**Fig. 6.28** Representación de la reacción de materia y antimateria produciendo radiación (fotones). Cuando la energía era muy alta, en un universo muy caliente y denso, los fotones podían producir un par de partículas de materia y antimateria



Por cada mil millones de partículas de antimateria habría en promedio mil millones y una partícula de materia. El resultado de esta asimetría es que la antimateria es virtualmente erradicada del universo, dejando solo la materia de la que estamos hechos nosotros y las estrellas. El cuándo y cómo se produjo la asimetría entre materia antimateria es aún un problema abierto, pero más allá de eso, gracias a esta minúscula asimetría estamos aquí.

Se sigue produciendo antimateria en el universo en diversos eventos (fusión nuclear en el interior de las estrellas, explosiones de supernovas, interacción de los rayos cósmicos en la atmósfera terrestre, etc.), pero la cantidad de antimateria hoy es insignificante.

### La época hadrónica. Tiempo: $10^{-6}$ - $10^{-2}$ s desde el Big Bang

- **Bariogénesis.** Cuando el universo alcanzó los 0,00001 s de existencia su temperatura descendió a  $10^{12}$  K. El universo estaba compuesto entonces por una sopa de quarks. Los quarks son partículas fundamentales de la naturaleza y forman todos los hadrones (partículas que participan en la interacción fuerte). A temperaturas por debajo de  $10^{12}$  K, los quarks definitivamente se mantienen unidos. En grupos de dos los quarks forman mesones, partículas inestables.

Grupos de tres quarks forman bariones; los dos bariones más conocidos son los protones y los neutrones. Por eso, esta época cósmica se llama *bariogénesis* (formación de bariones).

No todas las partículas son “compuestas”. Entre las más conocidas, los electrones y los neutrinos son consideradas hoy día como partículas realmente “fundamentales” e indivisibles, esto es, no formadas por otras partículas más pequeñas o menos masivas. Estos últimos, los neutrinos, permanecen en continua interacción con el resto del plasma primordial (esa “sopa” que mencionamos antes) por medio de la interacción nuclear débil, por ejemplo, colisionando (fusionándose) con neutrones para “desaparecer” dando origen a protones y electrones (entre otras posibles interacciones que afectan a los neutrinos). Pero, llega un momento en el que también los neutrinos se “desacoplarán” de esta sopa de partículas (dejarán de interactuar con los constituyentes de la “sopa”), y eso ocurre cuando el universo cuenta con 1 segundo de vida aproximadamente. A partir de ese momento (conocido como el “desacoplamiento débil” los neutrinos evolucionan en forma independiente del resto de las partículas.

### **Nucleosíntesis primordial. Tiempo: 1 s - 3 min desde el Big Bang**

- **Nucleosíntesis** significa producción de núcleos atómicos a partir de la fusión termonuclear de núcleos más ligeros.

Cuando el universo alcanzó la edad de un segundo, ya estaba formado por plasma con una densidad aproximadamente igual a la del agua, y una temperatura de  $10^9$  K. Los protones y neutrones que se habían formado durante la bariogénesis estaban involucrados en reacciones de fusión nuclear, formando, principalmente, deuterio (un isótopo de hidrógeno con un protón y un neutrón en el núcleo). El deuterio es un elemento relativamente frágil, y hasta que el universo tuvo un segundo de edad, los fotones tenían la energía suficiente para destruir estos núcleos. Después del primer segundo, la temperatura y la densidad disminuyeron hasta el punto en que el deuterio sobrevivió lo suficiente como para continuar la cadena de reacciones nucleares. Así, fue posible formar el elemento helio, principalmente He-4 (con dos protones y dos neutrones en el núcleo). En fin, la predicción hecha por la Teoría del Big Bang afirma que se formaron primordialmente con resultados en masas aproximadamente un 75 % de H-1, un 25 % de He-4, un 0,01 % de deuterio, muy

poco (en el orden de  $10^{-10}$ ) de litio y berilio, y nada de otros elementos (figura 6.29).

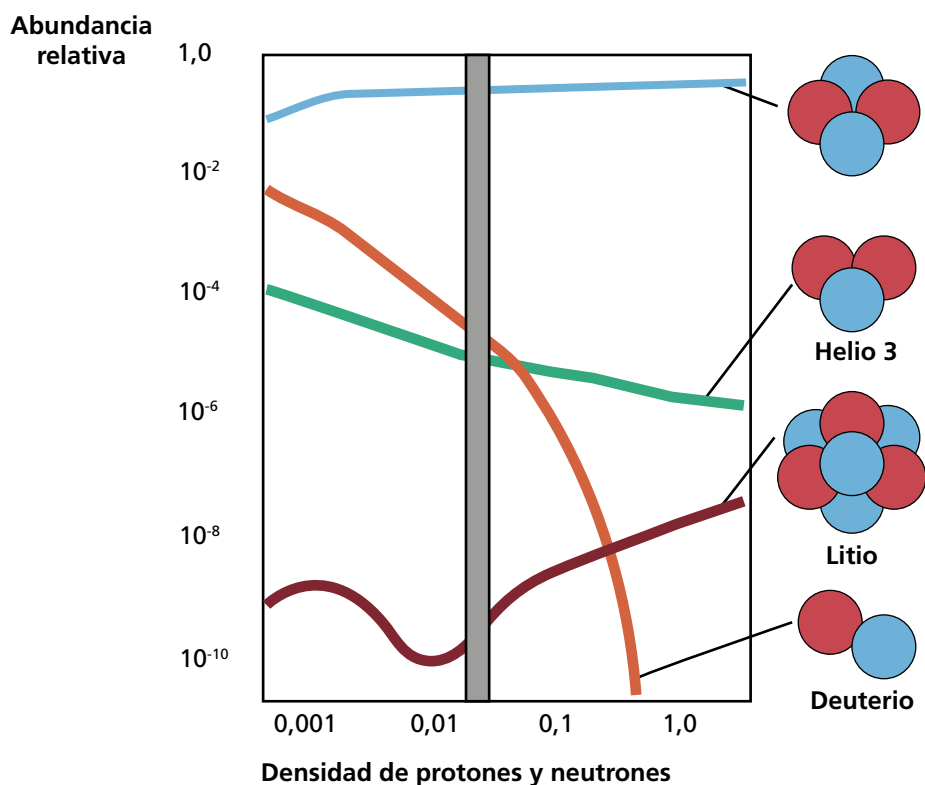
$^1\text{H}$	$n + e^+ \rightarrow \nu + ^1\text{H}$
	$n + \bar{\nu}_e \rightarrow ^1\text{H} + e^-$
$^2\text{H}$	$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$
$^3\text{H}$	$^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{H} + p^+ + 4,03 \text{ MeV}$
	$^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p^+$
$^3\text{He}$	$^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
	$^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e + 18,6 \text{ keV}$
$^4\text{He}$	$^2\text{H} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p^+ + 18,30 \text{ MeV}$
	$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$
$^6\text{Li}$	$^3\text{He} + ^3\text{H} \rightarrow ^6\text{Li}$
	$^4\text{He} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li}$
$^6\text{Be}$	$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^6\text{Be} \rightarrow ^4\text{He} + p^+ + p^+$
$^7\text{Li}$	$^4\text{He} + ^3\text{H} \rightarrow ^7\text{Li}$
	$^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li}$
$^7\text{Be}$	$^4\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^7\text{Be}$
$^8\text{Li}$	$^7\text{Li} + n \rightarrow ^8\text{Li}$
	$^7\text{Li} + ^2\text{H} \rightarrow ^8\text{Li} + p^+$
$^8\text{Be}$	$^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be} - 91,8 \text{ keV}$

**Fig. 6.29** Isótopos creados en la nucleosíntesis primordial durante los primeros minutos de existencia del universo y las reacciones nucleares que ocurrieron; los elementos más pesados solo se formarán posteriormente en el interior de las estrellas

Para un tiempo mayor a tres minutos, la temperatura y la densidad cósmica ya eran demasiado bajas para desencadenar reacciones nucleares y la nucleosíntesis primordial terminó.

Los elementos más pesados de la tabla periódica no se formaron debido a la gran inestabilidad de los núcleos que tenían cinco u ocho partículas (por ejemplo, dos protones y tres neutrones, cuatro protones y cuatro neutrones, etc.). La física nuclear es relativamente conocida y podemos predecir la abundancia relativa de elementos formados en función de la cantidad de protones y neutrones en el universo.

La cantidad de deuterio, helio y litio se puede determinar a partir de observaciones, y coinciden muy bien con la predicha por la Teoría del Big Bang (figura 6.30).



**Fig. 6.30** Abundancia de elementos formados en los primeros minutos por la densidad de protones y neutrones. La banda gris vertical indica el rango de abundancia observado para estos elementos

Todas las mediciones apuntan a la misma cantidad de bariones en el universo. El valor más aceptado es casi un 4,0 % del universo compuesto de bariones. Casi 25 % de la masa de los bariones está en forma de helio. Recordando que el helio es un producto de la nucleosíntesis estelar, el proceso que genera energía en las estrellas, uno podría imaginar que todo el helio se produjo en las estrellas. Este fue uno de los argumentos utilizados por los astrónomos contrarios a la teoría del Big Bang. Pero, sumando todo el helio producido en las estrellas, llegamos a una conclusión interesante: se necesitarían decenas de miles de millones de años para obtener todo el helio observado. La única forma de producir tanto helio es mediante la nucleosíntesis primordial, durante los primeros minutos de un universo denso y caliente.

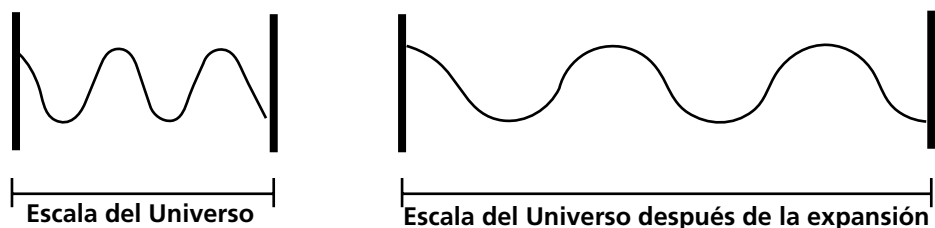
## Fin de la era de la radiación, dominio de la materia: 60 000 años desde el Big Bang

A medida que el universo se expande, la densidad de la materia disminuye proporcionalmente al aumento de volumen. Al duplicar el volumen del universo, la densidad se reduce a la mitad, y así sucesivamente. Si asociamos una escala al universo (imagina una regla que se expande junto con el universo) podemos escribir que la densidad de la materia es inversamente proporcional a esta escala al cubo: densidad de la materia =  $1/(\text{escala del universo})^3$ .

La radiación tiene un comportamiento diferente. Además de que la disminución de la densidad de energía de la radiación es inversamente proporcional al volumen (como en el caso de la materia), también está el efecto de la propia expansión sobre la radiación, como había predicho, en 1917, William de Sitter.

Considera la radiación como una onda conectada en dos puntos. Si separamos estos puntos (debido a la expansión), la longitud de onda aumenta, la frecuencia de la onda disminuye y también su energía (figura 6.31). De esta forma, la densidad de energía de la radiación disminuye proporcionalmente a la inversa de la cuarta potencia de la escala cósmica: densidad de materia =  $1/(\text{escala del universo})^4$ . Esto significa que la densidad de energía de la radiación disminuye más rápidamente que la densidad de la materia.

**Aumenta la longitud de onda de los fotones, disminuye su energía**



**Fig. 6.31** La longitud de onda de la radiación electromagnética aumenta proporcionalmente a la expansión del universo. Este fenómeno da lugar al corrimiento al rojo cosmológico

Al principio, la temperatura era tan alta y el volumen tan pequeño que la densidad de energía de la radiación era mayor que la densidad de la materia.

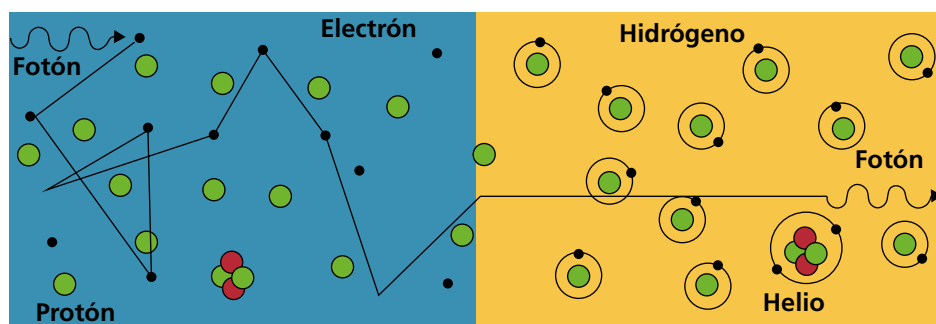
Pero con el paso del tiempo, llegó un momento en que estas dos densidades, la de la materia y la de la radiación, se igualaron. Llamamos a este momento “equipartición entre materia y energía”, que marca el final de la

era de la radiación y el comienzo de la era de la materia. Esto ocurrió cuando el universo tenía 60 000 años de edad y una temperatura de 9 200 K.

Este es un momento importante, porque mientras la radiación dominó no hubo formación de estructuras; las galaxias y las estrellas no podían condensarse. Cuando la materia comenzó a dominar la densidad, comenzaron a aparecer estructuras.

### **Recombinación y radiación cósmica de fondo. Tiempo: 380 000 años desde el Big Bang**

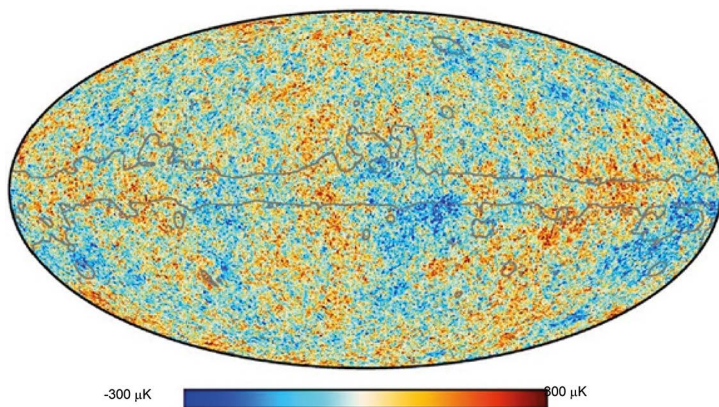
Después de que terminó la nucleosíntesis, el universo continuó expandiéndose y enfriándose. Excluyendo los componentes más exóticos como la materia y la energía oscura, el cosmos todavía tenía la composición química primordial. Todos estos átomos estaban completamente ionizados y los electrones sueltos. Esto ocurrió debido a la gran afinidad entre la radiación y los electrones. Los fotones que deambulaban todavía eran muy energéticos y cuando chocaron con un electrón transfirieron parte de su energía. Los electrones se volvieron tan energéticos que los núcleos atómicos no pudieron retenerlos. Otra consecuencia de esto es que, el universo era opaco a la radiación; en promedio, los fotones recorren un camino corto antes de interactuar con un electrón y cambiar de energía y dirección. Cuando la edad cósmica alcanzó los 380 000 años y su temperatura alcanzó aproximadamente 3 000 K, ya no había fotones con la energía suficiente para mantener la materia ionizada. Los núcleos comenzaron a capturar y retener electrones (figura 6.32). Los átomos se volvieron neutrales y el universo se volvió transparente a la radiación. Llamamos a este momento: **recombinación**.



**Fig. 6.32** Antes de la recombinación, los fotones no podían moverse libremente por el universo, por lo que cambiaban de dirección con cada encuentro con un electrón. Después de la recombinación, los electrones fueron capturados y los fotones se movieron libremente por el espacio

En esa situación, la mayoría de los fotones podrían moverse durante miles de millones de años sin interactuar con la materia. Los fotones que interactuaron por última vez con los electrones durante la recombinación se observan en la Tierra en todas las direcciones. Como estos fotones hoy día tienen una longitud de onda correspondiente a la radiación de microondas, los llamamos radiación del fondo cósmico de microondas (CMB).

La Radiación del Fondo Cósmico de microondas es extremadamente rica en información sobre el universo joven. Es una huella dactilar del universo que muestra que, hace 380 000 años, su densidad era uniforme, pero no perfecta. Las observaciones muestran pequeñas fluctuaciones en el CMB, interpretadas como una indicación de que hubo fluctuaciones de densidad, es decir, regiones más o menos densas que el promedio (figura 6.33). Estas fluctuaciones de densidad, sin embargo, eran muy pequeñas, algo así como una parte en cien mil. Imagina una bola perfectamente lisa, de un metro de diámetro. Si tiene imperfecciones de la misma escala que el CMB, su superficie tendrá pequeñas protuberancias o depresiones de alrededor de 0,01 mm. La Radiación Cósmica de Fondo es una de las mejores evidencias a favor de la teoría del Big Bang, difícilmente explicada por ningún otro modelo cosmológico.

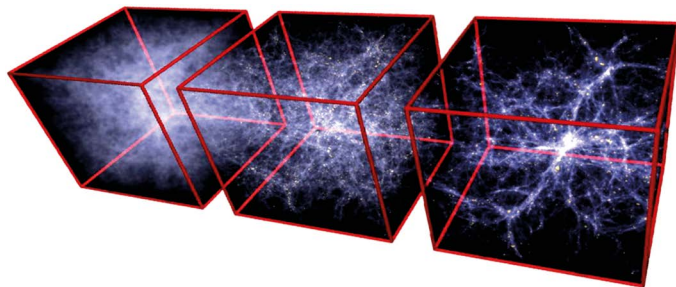


**Fig. 6.33** Mapa de todo el cielo representando la variación de temperatura en la Radiación Cósmica de Fondo (Colaboración Planck 2018)

### Era oscura

Después de la era de la recombinación, el universo entró en una fase en la que no había fuentes de luz, la llamada **Edad Oscura**. Durante este período, que duró unos 450 millones de años, la materia comenzó a

organizarse y las regiones con mayor densidad de materia comenzaron a colapsar (figura 6.34).



**Fig. 6.34** Evolución de la distribución de la materia, durante la Edad Oscura. Los filamentos de la red cósmica comenzaron a definirse. Los cúmulos de galaxias surgieron en la intersección de los filamentos de la red cósmica. Las regiones de mayor densidad que se han desarrollado en los filamentos se denominan halos

Fue en este momento cuando se formó la red cósmica trazada por la materia oscura. Las regiones de mayor densidad atrajeron materia, aumentando así la densidad local, lo que implicaba la atracción de más materia. Por otro lado, las regiones de baja densidad se fueron vaciando gradualmente. Este proceso no tiene simetría esférica, la materia que cae no viene de todas las direcciones. La distribución de la materia en el joven universo siempre fue algo plana, más o menos parecida a la forma de un cigarro aplastado. La materia cae en estas “semillas” de estructura siguiendo una dirección privilegiada, y así forma una estructura de filamentos. Los halos de materia, regiones aproximadamente esféricas en equilibrio, que se formaron durante este período, son las semillas de futuras galaxias y grupos de galaxias que se formarán después de la Edad Oscura.

La Edad Oscura termina cuando se forman las primeras estrellas y (o) los primeros núcleos galácticos. Todavía no conocemos los detalles del final de este período, pero los telescopios, terrestres y espaciales, deberán revelar los detalles de esta historia.

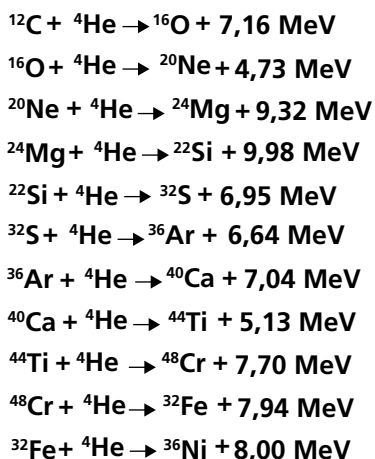
### **Formación de las primeras estrellas y cúasares Tiempo: 100-200 millones de años desde el Big Bang**

La formación de estructuras en el universo depende principalmente de la *materia oscura*. La materia “convencional” bariónica (que compone los elementos que se encuentran en la Tierra, en las estrellas y en el medio interestelar) acompaña a la materia oscura en este proceso de formación.



Inicialmente, la materia bariónica solo colapsaba gravitacionalmente en halos de materia oscura, pero a medida que aumentaba la densidad la materia bariónica experimentó fenómenos no gravitatorios. Estos fenómenos implican ganancia y pérdida de energía por absorción o emisión de radiación. La materia bariónica emite espontáneamente, por ejemplo, radiación (por lo tanto, pierde energía) cuando se calienta por encima de los 10 000 grados. No sabemos exactamente qué se formó primero, pero los primeros objetos que colapsaron fueron muy energéticos. Cuando el universo llegó a tener entre 100 y 200 millones de años, aparecieron las primeras fuentes de radiación, que parecían potentes faros.

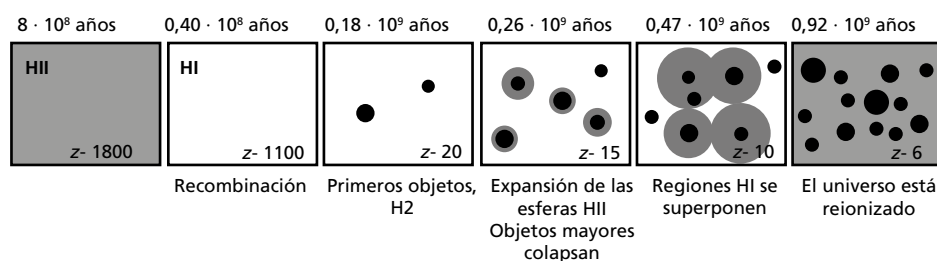
Uno de los primeros objetos en formarse fueron las estrellas. Pero a diferencia de las estrellas actuales (figura 6.35), estas pioneras no tenían metales, su composición química era primordial. La formación de estas estrellas es un poco diferente a la formación de las estrellas actuales. Sin metales, el enfriamiento del gas es más lento y las estrellas que se forman en ese momento son generalmente mucho más masivas que las estrellas que observamos hoy. Debido a que eran masivas, las primeras estrellas, llamadas estrellas de Población III, eran muy luminosas, particularmente en el rango ultravioleta. Pero, las estrellas masivas viven comparativamente muy poco, apenas unos pocos millones de años, y mueren en una poderosa explosión en forma de supernova. Las estrellas de Población III de baja masa probablemente no se formaron, por lo que no hemos encontrado ninguna hasta ahora; es posible que ya ni siquiera existan en nuestra galaxia.



**Fig. 6.35** Reacciones nucleares para la formación de elementos pesados en la síntesis estelar

Casi al mismo tiempo, comenzaron a aparecer agujeros negros supermasivos, con millones de veces la masa del Sol, alimentados por gas concentrado en las regiones que luego serán el núcleo de las galaxias. Este es el proceso que genera energía en los cuásares; además de ser muy eficiente, también es muy energético. Se piensa que los primeros cuásares y galaxias se formaron a unos 500 millones de años después del Big Bang,

La emisión de radiación ultravioleta de estos nuevos cuásares, junto con la radiación de las primeras estrellas, comenzaba a ionizar de nuevo el universo. Los átomos de Hidrógeno y Helio en la vecindad de estas fuentes fueron los primeros en perder sus electrones. El universo, que había sido neutral desde el momento de la recombinación, volvió gradualmente a convertirse en un plasma ionizado (figura 6.36). Este proceso se completó cuando el universo tenía poco más de mil millones de años desde el Big Bang.



**Fig. 6.36** Historia del universo entre la época de recombinación y el final de la reionización

El fin de la reionización del universo se detectó a principios del siglo **xxi** mediante la observación de los espectros de cuásares muy distantes. El inicio de la reionización se dedujo de las observaciones de la radiación de fondo cósmica por el satélite WMAP. Entre septiembre de 2003 y enero de 2004, en el Telescopio Espacial Hubble se observó una pequeña fracción del cielo, totalizando un tiempo de exposición equivalente a 271,2 h (11,3 días). Esta observación, la más profunda hasta el momento, permitió la identificación de objetos tan débiles como los de magnitud 30, a distancias entre 20 y 25 mil millones años luz. Teniendo en cuenta el tiempo que tarda la luz en llegar a la Tierra, esto significa que el telescopio espacial registró el universo con una antigüedad de entre 1 000 y 2 000 millones de años. El sucesor del telescopio

Hubble, el telescopio espacial James Webb, retrocederá aún más en el pasado, quizás haciendo posible la observación de las primeras galaxias.

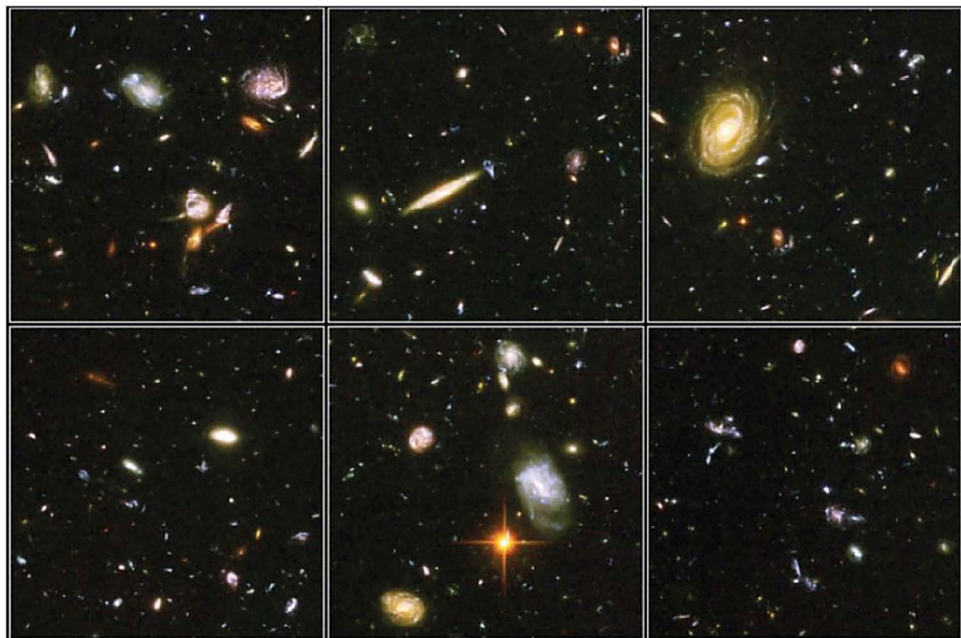
### **La era de la energía oscura (era actual). Tiempo: 10 000 millones de años después del Big Bang hasta hoy**

Como hemos visto, la densidad de la materia decae con el factor de escala inverso del universo al cubo (es decir, decrece proporcionalmente al aumento de volumen), mientras que la densidad de energía de la radiación decrece proporcionalmente con el factor de escala inverso del universo a la cuarta potencia. Al entrar en la era de la materia, la densidad de la radiación cósmica se volvió insignificante en comparación con la densidad de materia existente en ese momento. Cuando el universo alcanzó la edad de diez mil millones de años, otro componente pasó a dominar el equilibrio energético del universo: **la energía oscura**.

Todavía no sabemos qué es la energía oscura, pero tenemos evidencia de su presencia debido a un conjunto de observaciones. Asumiendo el modelo de energía oscura más simple, preferido para interpretar las observaciones realizadas, la densidad de energía oscura es constante, e independiente de la expansión cósmica.

La energía oscura tiene una propiedad muy peculiar, su presión es negativa, proporcional a su densidad en el caso más simple. Esta presión negativa actúa para acelerar la expansión del universo cada vez más rápido.

Antes de que el universo tuviera diez mil millones de años, la densidad de la energía oscura era menor que la densidad de la materia y de la radiación, lo que hacía que la presión negativa no fuera significativa. Esto es muy importante para la formación de galaxias y grupos de galaxias, ya que la presión negativa de la energía oscura dificulta la formación de estructuras. Si la densidad de energía oscura fuera mayor en nuestro universo, nuestra galaxia podría no haberse formado, lo que impediría la formación del Sol y el Sistema Solar. En los últimos cuatro mil millones de años, el universo ha estado en una fase de expansión acelerada debido a la energía oscura. Actualmente, el universo se está expandiendo cada vez más rápido (figura 6.37).



**Fig. 6.37** Detalles del campo ultraprofundo, tomado por el Telescopio Espacial Hubble. Las galaxias más grandes y brillantes están relativamente cerca, a 6 mil millones años luz. Las más débiles y pequeñas están a más de 20 mil millones años luz de distancia (imagen producida por S. Beckwith de STScI)

En unos pocos miles de millones de años más, la expansión será exponencialmente rápida y la formación de estructuras cósmicas cesará por completo. Los objetos más grandes que podrían colapsar en el universo serán los supercúmulos con hasta aproximadamente  $10^{17}$  masas solares.

### Comprueba tus conocimientos

25. ¿En qué consistió el descubrimiento de los físicos Arno Penzias y Robert Wilson?
26. ¿Cuáles son las ideas básicas de la Relatividad General?
27. ¿Qué entendemos por un universo plano?
28. ¿Qué evidencias tenemos de que el universo es plano?
29. ¿Qué plantea la teoría del Big Bang? ¿Explica el origen del Universo?

30. ¿Cuál es la principal dificultad para estudiar físicamente el origen del Universo?
31. ¿Cuáles son las confirmaciones actuales de la teoría del Bing Bang?
32. ¿Existían estrellas y galaxias en el Universo dominado por la radiación?
33. ¿En qué época del Universo aparecen los primeros átomos neutros?
34. ¿Cuál es el elemento químico más abundante en el Universo después del hidrógeno?
35. ¿Qué es la inflación del Universo?
36. ¿Cuáles son los tres problemas de la teoría del Big Bang que explica la teoría inflacionaria?
37. ¿Cuáles fueron los componentes materiales del universo al terminar la inflación cósmica?

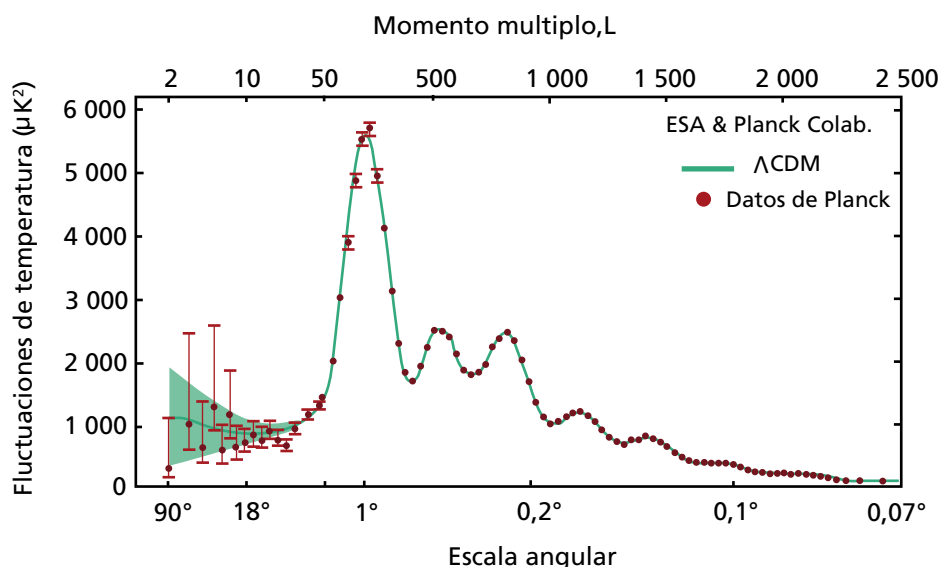
## 6.4 La evolución futura del universo

### Modelo $\Lambda$ CDM (materia oscura fría y constante cosmológica)

El modelo Lambda-CDM o  $\Lambda$ CDM materia oscura fría y constante cosmológica (en inglés: *Lambda-Cold Dark Matter*) representa el modelo cosmológico de consenso que utiliza la Teoría del Big Bang y la teoría inflacionaria, para explicar las observaciones de la radiación del fondo cósmico de microondas, así como la estructura a gran escala del universo, las observaciones realizadas de supernovas, y la influencia de la materia y la energía oscura en la evolución del cosmos, arrojando luz sobre la explicación de la expansión acelerada del universo.

Es el modelo conocido más simple que está de acuerdo con todas las observaciones.

Sin embargo,  $\Lambda$ CDM es tan solo un modelo (figura 6.38). Los cosmólogos anticipan que todas estas presunciones no serán conocidas exactamente, hasta que no se conozca más sobre la física fundamental, particularmente, sobre la inflación cósmica no obstante la coincidencia de los resultados obtenidos del modelo con las observaciones es extraordinaria.



**Fig. 6.38** Espectro de potencias del fondo cósmico de microondas. Valores medidos por Planck y correspondencia con el modelo  $\Lambda$ CDM

### El futuro del universo de acuerdo con la teoría del Big Bang

Antes de las observaciones de la energía oscura, los cosmólogos consideraron dos posibles escenarios para el futuro del universo. Si la densidad de materia-energía del universo es mayor que la densidad crítica, entonces este alcanzaría un tamaño máximo y luego comenzaría a colapsarse, se haría más denso y más caliente nuevamente, terminando en un estado similar al estado en el cual empezó en un instante llamado *Big Crunch*.

Por otro lado, si la densidad de materia-energía en el universo es menor o igual a la densidad crítica, la expansión nunca se detendría. La formación de estrellas cesaría mientras el universo en crecimiento se haría menos denso cada vez. El promedio de la temperatura del universo podría acercarse asintóticamente al cero absoluto (0 K o  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Los agujeros negros se evaporarían por efecto de la radiación de Hawking. La entropía del universo se incrementaría hasta el punto en que ninguna forma de energía podría ser extraída de él, un escenario conocido como muerte térmica. Más aún, si existe la descomposición del protón (TGU), proceso por el cual un protón decaería a partículas menos masivas emitiendo radiación en el proceso, entonces todo el hidrógeno, la forma predominante de la

materia bariónica en el universo actual, desaparecería a muy largo plazo, dejando solo radiación.

Las observaciones modernas de la expansión acelerada implican que cada vez una mayor parte del universo visible en la actualidad quedará más allá de nuestro horizonte cosmológico y fuera de contacto. Se desconoce cuál sería el resultado de este evento. El modelo  $\Lambda$ CMD del universo contiene energía oscura en la forma de una constante cosmológica (de alguna manera similar a la que había incluido Einstein en su primera versión de las ecuaciones de campo). Esta teoría sugiere que solo los sistemas mantenidos gravitacionalmente, como las galaxias, se mantendrían juntos, y ellos también estarían sujetos a la muerte térmica a medida que el universo se enfriase y expandiese (figura 6.39).

#### DESTINO DEL UNIVERSO



**Fig. 6.39** Presente y futuro del universo según el modelo  $\Lambda$ CMD

Otras explicaciones de la energía oscura sugieren que los cúmulos de galaxias y, finalmente, las galaxias mismas se desgarrarán por la eterna expansión del universo, en el llamado Big Rip (Gran desgarramiento).

A pesar de que el modelo del Big Bang se encuentra bien establecido en la cosmología, es probable que se redefina en el futuro. Se tiene muy poco conocimiento sobre el universo más temprano, durante el cual se postula que ocurrió la inflación. También es posible que en esta teoría existan porciones del universo mucho más allá de lo que es observable en principio. En la teoría de la inflación, esto es un requisito. La expansión exponencial ha empujado grandes regiones del espacio más allá

de nuestro horizonte observable. Puede ser posible deducir qué ocurrió cuando tengamos un mejor entendimiento de la física a altas energías. Las especulaciones hechas al respecto, por lo general involucran **teorías de gravedad cuántica**.

### Comprueba tus conocimientos

38. ¿Estará el Universo en expansión para siempre?
39. ¿Qué es el modelo  $\Lambda$ CDM?
40. ¿Cuál es la confirmación de la expansión acelerada del universo?
41. ¿Cuál es el futuro del universo de acuerdo con el modelo  $\Lambda$ CDM?

## 6.5 La estructura del universo observable

La palabra Universo proviene del vocablo latino *Universus* compuesta de *Unus* que significa “uno” y “*versus*” que quiere decir “girado o convertido”; es decir: “Uno y todo lo que lo rodea”.

**Universo** en nuestros días significa la totalidad del espacio y del tiempo, y de todas las formas de existencia de la materia, junto a todas las leyes y constantes físicas que las gobiernan. Sin embargo, el término también se utiliza en sentidos contextuales ligeramente diferentes, y habitualmente es usado como sinónimo de cosmos, mundo o naturaleza.

Se ha considerado que el proceso de Singularidad-Explosión-Inflación y formación de un universo puede haber ocurrido muchas veces, pues la teoría arroja la posibilidad de que existan numerosas Burbujas-Universos y que el nuestro sea solo una de ellas. Al conjunto de burbujas universos se le denomina **Multiverso**.

Es útil en lo sucesivo delimitar el sentido de varios términos que se usan frecuentemente en la ciencia del universo como son: mundo, universo, universo visible y universo observable.

Los astrofísicos distinguen entre el **universo visible**, el cual incluye solo la recepción de señales emitidas desde la época de recombinación<sup>12</sup> y el **universo observable**, que incluye la recepción de señales desde el comienzo de la expansión cosmológica (el Big Bang en la cosmología tradicional, y el fin de la época inflacionaria en la cosmología más moderna). La dife-

<sup>12</sup> La época de recombinación ocurre 380 000 años después del Big Bang. Es el momento en que el universo se hace transparente a la radiación electromagnética.



rencia entre estos dos límites cosmológicos es una distancia que se acerca a 900 millones años luz, y que es igual a la diferencia entre el radio del “universo observable” y el radio del “universo visible”.

Se suele hablar de “observable” como sinónimo de “detectable”, y de “visible” como sinónimo de “luz detectable (ondas electromagnéticas detectables)”.

El universo observable constituye la parte detectable (teóricamente) del “universo total”. Este límite está definido por el carácter finito que tiene la velocidad de propagación de las interacciones, igual a la velocidad de la luz en el vacío un hecho establecido por la relatividad especial.

El universo observable está conformado por todos los objetos materiales y las señales que emanan de ellos, de modo que, en principio, puedan ser observadas en la actualidad desde la Tierra, porque esas señales han tenido tiempo de alcanzarnos desde el comienzo de la expansión cosmológica.

La palabra *observable* usada en este sentido no depende en sí, de que tecnología moderna usemos para la detección de la señal de un objeto (o de si existe una señal para detectar). Simplemente señala si sería posible *en principio* que las señales procedentes de un objeto cósmico alcancen a un observador en la Tierra hoy.

Asumir que es isótropo, implica que la distancia hasta su borde es la misma en todas direcciones, por esta razón, es un volumen esférico (una esfera) con centro en el observador, y **cada posición de observación en el Universo tiene su propio universo observable**. No existe un centro o lugar privilegiado en el Universo.

En la práctica, podemos observar luz solo desde el momento del tiempo en el que los fotones se desacoplaron de la sustancia, en la época de la recombinación. Es el momento en que las primeras partículas pudieron emitir fotones que no fueron rápidamente reabsorbidos por otras partículas. Antes de ese momento, el universo estaba lleno de un plasma que resultaba opaco para los fotones. **La detección de ondas gravitacionales es ahora una posibilidad, para recibir señales desde una época anterior a la época de la recombinación.**

Se llama superficie de la última dispersión a aquella que está formada por la colección de puntos, en el espacio, situados a la distancia exacta para que los fotones que se desacoplaron justamente en la época de la recombinación nos alcancen hoy.

Esta superficie es el límite del universo visible y la distancia hasta ella constituye el radio del universo visible de allí provienen los fotones que detectamos en la actualidad como radiación de fondo cósmico de microondas (CMB). Sin embargo, con tecnología futura podría lograrse observar los neutrinos relictos que son más antiguos que la radiación del fondo cósmico de microondas, o acontecimientos todavía más distantes en el tiempo a través de las ondas gravitacionales.

Debido a la expansión del espacio los humanos observamos objetos que estaban originalmente mucho más cercanos, y que ahora se encuentran considerablemente mucho más lejos que a una distancia estática de 13 800 millones años luz (si definimos la estimación en términos de la correcta distancia cosmológica, la cual debe ser igual la distancia comovil<sup>13</sup> en este momento). Es por ello que el diámetro estimado del universo observable se acerca a los 93 000 millones años luz<sup>14</sup> ( $8,8 \cdot 10^{26}$  m), es decir, existe un radio 46 500 millones años luz desde nuestro lugar de observación hasta el borde del universo observable.<sup>15</sup>

Algunas partes del universo se encuentran tan lejos que las señales emitidas desde el Big Bang no han tenido tiempo suficiente de llegar a nosotros, por lo que estas regiones del universo se encuentran fuera del universo observable. En el futuro, la luz de estas galaxias distantes que han tenido más tiempo para viajar, desde estas regiones podrían hacerse observables. Sin embargo, debido a que la velocidad de alejamiento es directamente proporcional a la distancia hasta las galaxias, para regiones suficientemente distantes de nosotros la expansión del espacio podría ser más rápida que la velocidad de la luz (hecho no prohibido por la relatividad especial) además, la tasa de expansión parece estar acelerándose debido a la energía oscura.

Suponiendo que la energía oscura (una constante cosmológica que no cambia) se mantenga constante, de manera que la velocidad de expansión del Universo continúe acelerándose, implicaría que hay un “futuro límite de la visibilidad” más allá del cual los objetos no entrarán en nuestro universo observable en cualquier momento del futuro infinito, porque las

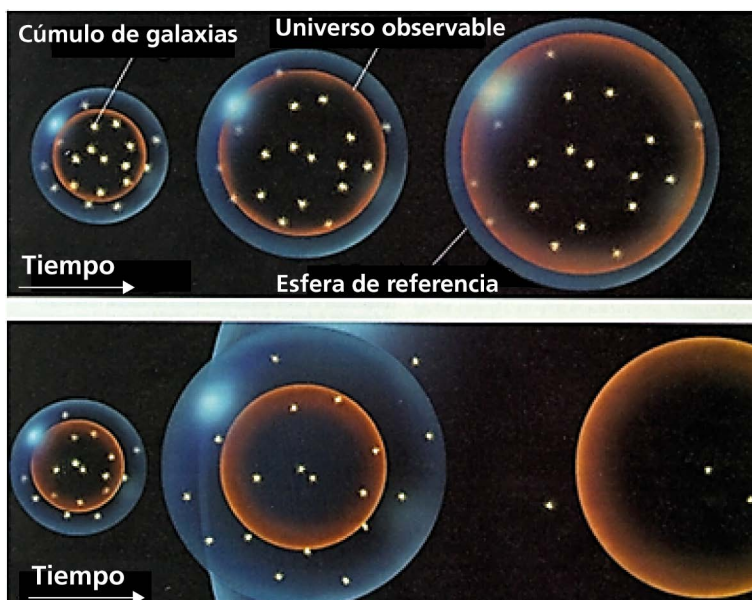
<sup>13</sup> Las coordenadas comóviles son aquellas que se expanden con el universo.

<sup>14</sup> Un año luz es una medida de distancia, igual a la distancia recorrida por la luz en un año, que es igual a  $9,64 \cdot 10^{12}$  km.

<sup>15</sup> El universo observable es por tanto finito.

señales emitidas por los objetos externos a ese límite nunca llegarían a nosotros.

Comparemos un modelo de expansión desacelerada del universo (figura 6.40, arriba) y uno en expansión acelerada (figura 6.40, abajo). Considerando que la esfera de referencia es proporcional al factor de escala. En el caso de un universo cuya expansión se desacelera, el universo observable aumenta proporcionalmente con el tiempo.



**Fig. 6.40** Horizonte del universo observable

Es decir, en un Universo desacelerado el universo observable aumenta más rápidamente que el factor de escala, con lo que cada vez podemos detectar una mayor parte del Universo.

En cambio, en un universo en expansión acelerada, la escala aumenta de manera exponencial mientras el universo observable aumenta de la misma manera que en el caso anterior. La cantidad de objetos que podemos detectar disminuye con el tiempo y el observador termina por quedar aislado del resto del Universo (al parecer este será el caso de nuestro universo real).

Consideraremos el universo observable y el universo visible como parte del universo total, y al universo total como parte del mundo. Un convenio útil cuando nos referimos al universo total sería usar la palabra Universo con mayúscula en cambio al referirnos a la parte observable y a la parte

visible podemos usar el término universo con minúscula. Por Universo total comprendemos la región del mundo que incluye el universo observable, el visible y que posee la misma estructura que estos.

Por ejemplo, el universo observable es homogéneo e isótropo a gran escala en todo su espacio. Consideramos así también el Universo total como homogéneo e isótropo, pues admitimos que el Universo ocupa una región en la que se conservan estas y otras propiedades vigentes en el universo observable.

Es evidente que no disponemos de los datos de las observaciones directas de todo el Universo o Universo total. En particular las observaciones no pueden indicarnos cuán lejos este se extiende.

En lo que se refiere al **Mundo**, se debe convenir en que este, hablando en general, es un término superior al Universo, pues no existe fundamento para afirmar que todo el mundo está construido de forma semejante al universo observable, al universo visible o al Universo total, siendo esto así, el Universo y el mundo simplemente coincidirían, lo cual ocurriría solo en un caso particular.

La posibilidad general imaginable consiste en que, en el mundo puedan existir también otras regiones, cuya estructura podría diferenciarse de la estructura del Universo. De modo que sin limitarnos a un caso particular, debemos suponer que en el mundo pueda encontrarse tal diversidad que el término mundo se corresponda no solo con un Universo, sino con varios, muchos o incluso un número infinito de Universos diferentes (Multiverso). El hecho de que no podamos observar por ahora estos otros Universos no debe restringir el pensamiento científico pues, aunque no sea de manera directa sino mediante métodos teóricos, es posible convertir otros Universos en objeto de estudio.

### **Las estructuras en la gran escala del universo observable. La red cósmica**

El término estructura en la gran escala se refiere a la caracterización de las distribuciones observables de materia y luz en las mayores escalas (típicamente del orden de miles de millones años luz).

Estudios del cielo en distintas longitudes de onda de la radiación electromagnética (en particular, en la longitud de onda de 21 cm) han permitido obtener mucha información sobre el contenido y el carácter de la estructura del universo observable.

La organización de las estructuras parece seguir un modelo jerárquico con organización demostrada hasta la escala de los supercúmulos de galaxias.

Aunque muchos astrofísicos intuyen que existe un nivel superior de jerarquía formado por los complejos de supercúmulos (hipercúmulos) que tejen las paredes, los nudos y los filamentos de la red cósmica. En escalas mayores de unos 307 Mpc, no parece haber estructuras continuas y diferenciadas, un fenómeno que se ha denominado el **Fin de la Grandeza**.<sup>16</sup>

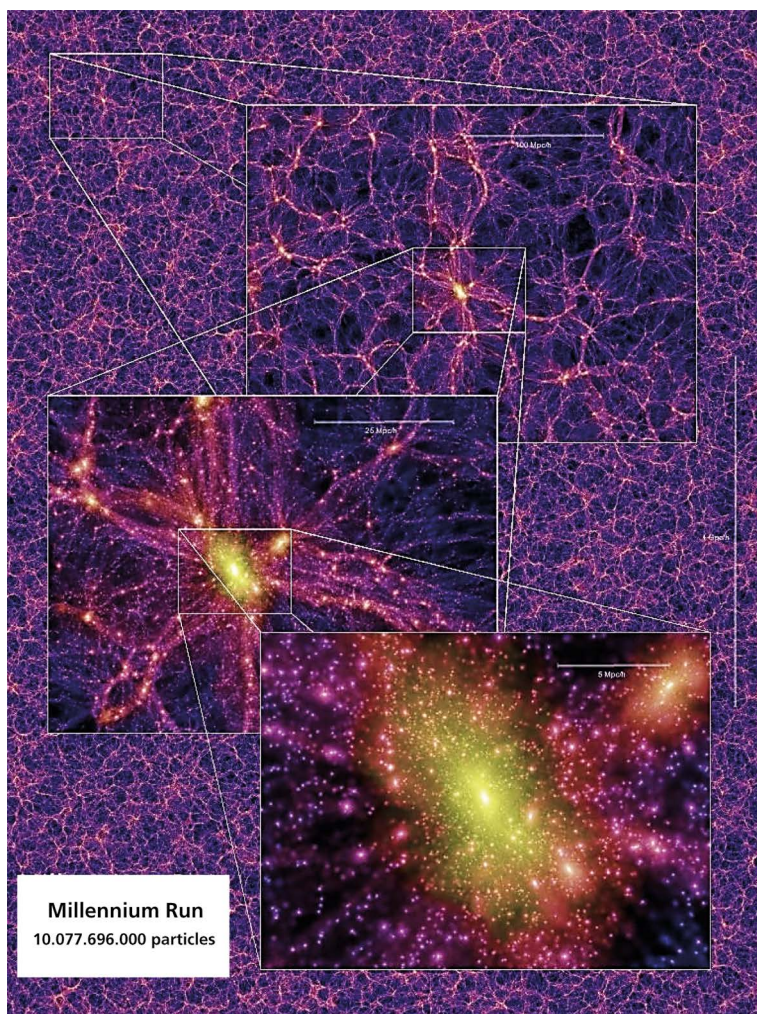
- **El medio intergaláctico:** el medio intergaláctico es el que existe entre las galaxias y entre los cúasares, está conformado por el gas difuso que conecta las galaxias a través del universo, una red de filamentos pequeños y grandes entrecruzándose a través de la inmensidad del espacio y, cuya estructura, hasta ahora, había sido únicamente fruto de la especulación. Con el *Cosmic Web Imager* desplegado en el telescopio Hale de 200 pulgadas, del Observatorio del Monte Palomar (EE. UU.) se han empezado a obtener las primeras imágenes tridimensionales del medio intergaláctico. La “materia tenue”, como han calificado al gas difuso que conforma el medio intergaláctico, es bastante difícil de ver. Los primeros filamentos cósmicos observados están en la vecindad de dos objetos muy brillantes y estos filamentos afectan a su dinámica.

Desde finales de los años 80 y principios de los 90, los teóricos habían venido pronosticando que el gas primigenio del Big Bang no está distribuido uniformemente a través del espacio, sino que se encuentra en canales o filamentos que abarcan galaxias y que fluyen entre ellas. Esta “telaraña cósmica” (figura 6.41) es una red de filamentos de diversos tamaños

<sup>16</sup> Sin embargo, a pesar de esto, algunas estructuras que superan esta escala se han encontrado en años recientes, como el LQG de Clowes-Campusano, descubierto en 1991, tiene 630 Mpc de largo, y es marginalmente mayor que la escala. La Gran Muralla Sloan, descubierta en 2003, ocupa una longitud de 423 Mpc, e igualmente es marginalmente mayor que la escala. U1.11, otro gran grupo de cúasares, descubierto en 2011, tiene 780 Mpc de largo y es dos veces mayor que la escala. El Huge-LQG (Huge Large Quasar Group, o Enorme Gran Grupo de Cúasares), descubierto en 2012, tiene una longitud de 1,24 Gpc, y es tres veces mayor que el límite superior de la escala de homogeneidad. La Gran Muralla de Hércules-Corona Boreal, es más de ocho veces mayor que la escala, y supera por mucho la escala de homogeneidad. De acuerdo con esto, la estructura de estas regiones sería aún heterogénea comparada con otras partes del universo, aun a la escala del «Fin de la Grandeza», poniendo, entonces, al principio cosmológico en duda.



entrecruzándose unos con otros a través de la vastedad del espacio. La arquitectura de esta red se remonta muy hacia atrás en el tiempo, en la llamada “Edad Oscura” cuando las primeras galaxias se estaban formando. Al parecer su tejido está determinado por la distribución de la materia oscura en el universo, el cual actuó como un esqueleto alrededor del cual se agrupó luego la materia visible.



**Fig. 6.41** La red cósmica

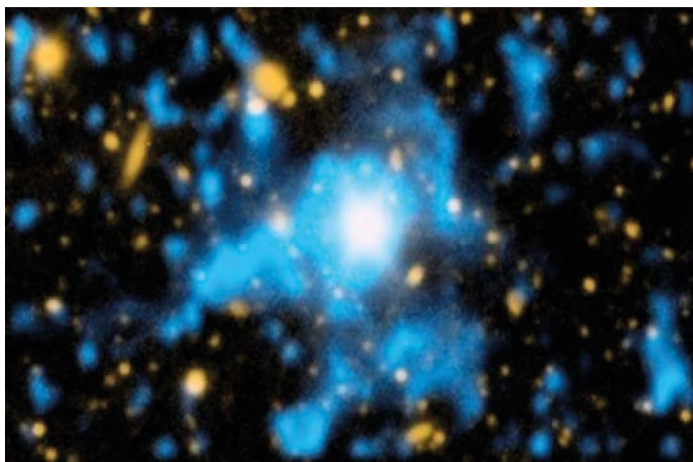
Los dos objetos observados fueron: un quásar etiquetado QSO 1549 19 y la llamada burbuja Lyman alfa en un cúmulo de galaxias conocido como emergente SSA22.

Sendos objetos fueron elegidos por Christopher Martin, creador del *Cosmic Web Imager*, para las observaciones iniciales y corresponden con una edad de 2 000 millones de años después del Big Bang.

Otra forma de estudiar el medio intergaláctico es a través del llamado **bosque Lyman-alfa** un conjunto de líneas de absorción que aparecen entre la transición Lyman-alfa del hidrógeno neutro y la localización desplazada al rojo de esta transición, en el espectro de un cuásar o una galaxia lejana.

Estas líneas de absorción se producen por las nubes de hidrógeno neutro que se encuentran entre nosotros y el objeto distante.

Se conoce que producto de la expansión del universo la mayoría de las galaxias y cuásares presentan un desplazamiento al rojo de sus líneas espectrales proporcional a la distancia a la que se encuentran de nosotros. Al encontrarse la luz emitida por el cuásar con una nube de hidrógeno se produce una absorción Lyman-alfa al desplazamiento al rojo que le corresponde a la nube (figura 6.42). De esta manera vemos distintas líneas de absorción, correspondientes a nubes a distintas distancias. El conjunto de estas líneas (bosque) se encuentra entre la línea Lyman-alfa del cuásar y la zona en la que se encontraría la línea a una distancia nula (sin desplazamiento al rojo; 121,6 nm) Este bosque de líneas nos permite comprobar las propiedades del medio intergaláctico al poder observar regiones que de otro modo serían imposibles de detectar. Estas regiones se encuentran a distintas distancias y muestrean distintas edades del universo, de esta manera se pueden usar para realizar estudios cosmológicos.



**Fig. 6.42** Nubes de hidrógeno en el medio intergaláctico

La densidad de líneas en el bosque de Lyman-alfa aumenta con el desplazamiento al rojo ( $z$ ), hasta que a  $z \sim 6$  hay tanto hidrógeno neutro en el medio intergaláctico que las líneas de absorción se funden en un solo canal. La aparición de este efecto señala el fin de la época de reionización del universo.

La organización de las estructuras en el universo podría decirse que comienza en el nivel estelar, aunque la mayoría de los cosmólogos rara vez abordan la astrofísica en esa escala.

Las estrellas se organizan en galaxias, los grupos de galaxias forman los cúmulos de galaxias, estos en una jerarquía superior conforman los supercúmulos, y se sospecha la existencia de un estadio estructural todavía mayor: los complejos de supercúmulos llamados hipercúmulos, que definitivamente se encargarían de articular los nudos, paredes y filamentos, de una colosal red cósmica que se encuentran separados por inmensos espacios vacíos, de esta forma en la gran escala se crea un vasto panorama similar a su estructura de un medio espumoso (red cósmica).

Anterior a 1989, se asumía comúnmente que los supercúmulos de galaxias eran las estructuras más grandes que existían en el universo observable, y que estos estaban distribuidos más o menos uniformemente en todas las direcciones. Sin embargo, desde principios de la década de 1980, se han descubierto más y más estructuras superlativas.

En 1983, Adrian Webster identificó la llamada Webster LQG, un gran grupo que consta de cinco cuásares<sup>17</sup>, su descubrimiento, fue la primera identificación de una estructura manifiesta en la gran escala, este hallazgo amplió la información sobre la agrupación de la materia conocida en el universo observable.

En 1987, el astrofísico Robert Brent Tully identificó el complejo de supercúmulos de Piscis-Cetus, que conforma el filamento de la red cósmica en el que reside el supercúmulo Hidra-Centauro, el supercúmulo de Virgo, nuestro grupo local y la Vía Láctea (la galaxia donde se encuentra el Sol y el sistema Solar), con extensión aproximada de 1 millón años luz de un lado a otro. Ese mismo año, se descubre una región inusualmente grande sin galaxias, un vacío gigante, que mide 1,3 mil millones años luz de lado a lado.

<sup>17</sup> Cuásar es el acrónimo de la frase inglesa fuente de radio cuasi estelar.



Con base en datos de encuestas de corrimiento al rojo, en 1989, Margaret Geller y John Huchra descubrieron la Gran Pared, una enorme muralla de galaxias con más de 500 millones años luz de largo, ancho que llega a 200 millones años luz, pero de solo 15 millones años luz de grueso. La existencia de esta estructura pasó inadvertida durante mucho tiempo, ya que requiere la localización de la posición en tres dimensiones, lo que implica la combinación de información sobre la ubicación de las galaxias con la información las distancias obtenidas mediante los desplazamientos al rojo.

Dos años después, los astrónomos Roger G. Clowes y Luis E. Campusano descubrieron el Clowes-Campusano LQG, un gran grupo de cuásares de dos mil millones años luz en su punto más ancho, y que fue la estructura más grande conocida en el universo en el momento de su anuncio.

En abril de 2003, otra inmensa estructura en la gran escala fue descubierta, la Gran Muralla Sloan con 1 370 millones años luz de longitud. Uno de los mayores vacíos del espacio parecía ser el vacío de Capricornio, con un diámetro estimado de 230 millones años luz. Sin embargo, en agosto 2007, se detectó un posible supervacío en la constelación Eridanus, que coincide con la gran mancha fría del fondo cósmico de microondas, una región más fría en el cielo de microondas cuya aparición es altamente improbable en el marco del modelo cosmológico actualmente favorecido.

Otra estructura en la gran escala es el Newfound Blob, una colección de galaxias y enormes burbujas de gas de 200 millones años luz de diámetro. En 2011, se descubrió un gran grupo de cuásares, que mide alrededor de 2,5 millones años luz de diámetro.

El 11 enero de 2013, otro gran grupo cuásares, el Huge-LQG, fue descubierto, sus dimensiones resultaron ser de cuatro mil millones años luz de diámetro, la mayor estructura conocida hasta ese momento.

En noviembre de 2013, los astrónomos descubrieron la Gran Muralla Corona Borealis-Hércules, una estructura aún más grande (el doble de grande que la primera) que se logró definir mediante mapeo de explosiones de rayos gamma.

El 15 de marzo de 2016, un equipo científico, liderado por el Instituto de Astrofísica de Canarias, ha descubierto uno de los hipercúmulos de galaxias más lejano y masivo que se conoce: el BOSS Great Wall (BGW). Según ha señalado la autora principal de la investigación, Heidi Lietzen, probablemente no haya otro sistema parecido tan claramente aislado y con un tamaño similar.

Los resultados del estudio revelan la presencia del sistema BGW, con un diámetro aproximado de 900 millones años luz, formado por dos supercúmulos y dos muros galácticos posiblemente más grandes en volumen y en diámetro que cualquier otro hipercúmulo conocido.

### Comprueba tus conocimientos

42. Define mundo, Universo, universo visible y universo observable.
43. Describe la estructura del universo observable.
44. ¿Qué significa en cosmología el término estructuras en la gran escala?
45. ¿Qué es la red cósmica y cuál es su importancia para el estudio de la evolución del universo?
46. ¿Qué es el bosque Lyman-alfa?
47. ¿Qué es la Gran Pared?

## 6.6 Cosmografía de nuestro vecindario cósmico

Con el nombre de **Laniakea** ha sido bautizada la región del universo observable en la que se agrupan los supercúmulos vecinos al de Virgo (figura 6.40). Ha sido definido en septiembre de 2014, cuando astrónomos de la Universidad de Hawái liderados por Brent Tully, publicaron una nueva forma de definir el término de supercúmulo conforme a las velocidades relativas de las galaxias.

El nombre Laniakea significa en hawaiano “Cielos inconmensurables” fue propuesto por David Nawa’a Napoleón, profesor de lengua hawaiana en la Universidad de Hawái, en honor de los navegantes polinesios y su conexión con el firmamento. Es una región que agrupa cuatro grandes supercúmulos de galaxias relativamente próximos entre sí:

- **Supercúmulo de Virgo:** el Grupo Local y la propia galaxia de la Vía Láctea que forma parte de este.
- **Supercúmulo Hidra-Centauro,** que distingue entre El Gran Atractor (lugar cercano a la constelación de Norma que es el centro gravitacional del sistema) y La Gran Muralla de Antlia o Cúmulo de Hidra.
- **Supercúmulo del Centauro.**
- **Supercúmulo meridional,** que incluye el cúmulo del Horno o Fornax S373, Cúmulo del Dorado y Cúmulo de Eridano.

Al igual que otras regiones similares formadas por agregados de varios supercúmulos, ni es compacta gravitacionalmente ni está perfectamente definida, es probable que la materia oscura la haga evolucionar hacia una disgregación y fractura de las partes que la componen.

### Dimensiones

Laniakea posee un tamaño aproximado de 160 Mpc o 520 millones de años luz, lo que hace que sea casi un 4 % del total del universo observable.

### Vecindad

Laniakea se dirige en dirección al Gran Supercúmulo de Shapley y se especula que ambos supercúmulos puedan formar parte de un complejo mayor. Otras grandes regiones próximas, además de la Región de Shapley son los grandes supercúmulos: Hércules, Coma y el supercúmulo de Perseo-Piscis. El Grupo Local, así como la galaxia de la Vía Láctea y el Sistema Solar, están en una zona muy periférica de Laniakea (figura 6.43) y por lo tanto, alejados del Gran Atractor.

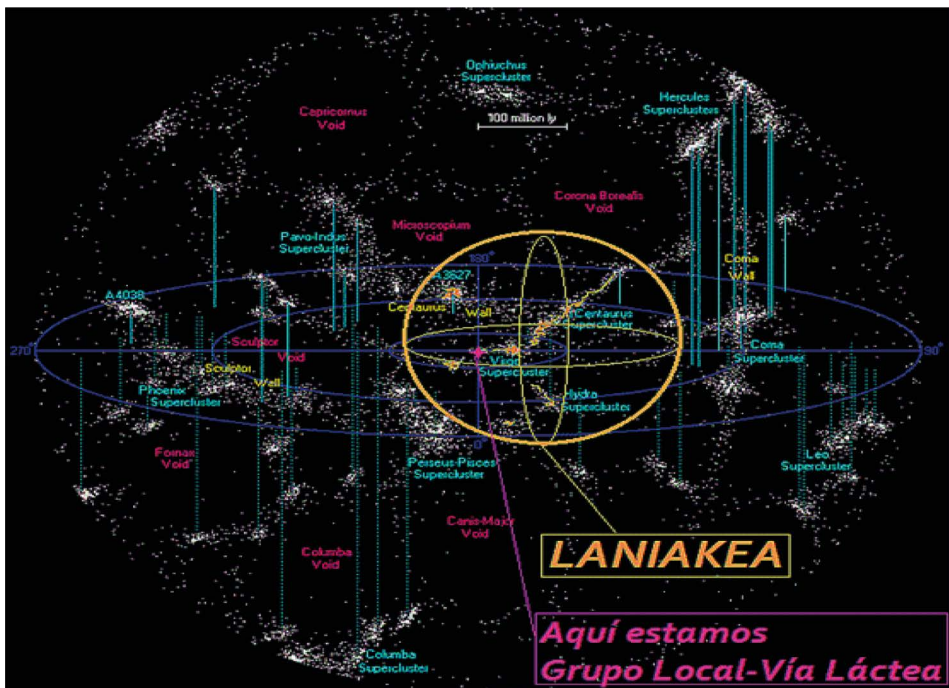


Fig. 6.43 La región de Laniakea

El Supercúmulo de Virgo, o Supercúmulo Local, es el supercúmulo de galaxias que contiene al Grupo Local y con él, a nuestra galaxia, la Vía Láctea. Tiene la forma de un disco plano, con un diámetro de unos 200 millones años luz. El supercúmulo contiene alrededor de 100 grupos y cúmulos de galaxias, y está dominado por el cúmulo de Virgo, localizado cerca de su centro. El Grupo Local está localizado cerca del borde del cúmulo de Virgo, al cual es atraído.

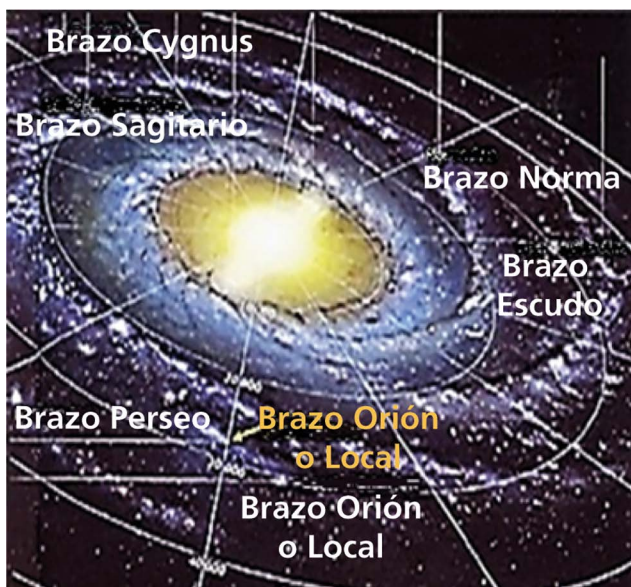
La longitud del supercúmulo de Virgo es de aproximadamente 33 Mpc (107 millones años luz), en comparación el Grupo Local tiene 1 Mpc de longitud máxima. Este supercúmulo es uno de muchos que existen a lo largo del universo observable.

Por el efecto gravitatorio que ejerce en el movimiento de las galaxias, se estima que la masa total del Supercúmulo de Virgo es de  $10^{15}$  masas solares,  $2,0 \cdot 10^{46}$  kg. Debido a que su luminosidad es demasiado pequeña para esa cantidad de estrellas, se piensa que una cantidad considerable de su masa está compuesta de materia oscura.

Una anomalía gravitacional conocida como el **Gran Atractor** existe en alguna parte dentro del supercúmulo local. Desde la década de 1980 ha sido evidente que no solo el Grupo Local, sino toda la materia a una distancia de al menos 50 Mpc está experimentando un flujo en masa del orden de 600 km/s en dirección al Cúmulo de Norma (Abell 3627). Lynden-Bell, en 1988, definió la región por esta causa como el Gran Atractor. Aunque los astrónomos están seguros de la velocidad del supercúmulo local, que se ha medido contra el Fondo Cósmico de Microondas (CMB), la naturaleza de los cuerpos que están provocando una atracción de tal magnitud sigue siendo poco conocida.

La galaxia Vía Láctea, o simplemente Vía Láctea es una galaxia espiral barrada <sup>18</sup> en la que se encuentra el Sistema Solar y, por lo tanto, la Tierra (figura 6.44). Según las observaciones, posee una masa de  $10^{12}$  masas solares. Su diámetro medio se estima en unos 100 000 años luz, equivalentes a casi un trillón y medio de kilómetros ( $1,42 \cdot 10^{18}$  km) o  $9,48 \cdot 10^9$  ua.

<sup>18</sup> Galaxia espiral que posee una sección central donde las estrellas se agrupan en forma de barra.



**Fig. 6.44** Localización del Sistema Solar en la Galaxia Vía Láctea

Se calcula que contiene entre 200 000 millones y 400 000 millones de estrellas. La distancia desde el Sol hasta el centro de la galaxia es de alrededor de 8 500 pc, unos 27 710 años luz, es decir, el 55 % del radio total galáctico.

La Vía Láctea forma parte de un conjunto de unas cuarenta galaxias llamado Grupo Local, en el cual es la segunda más grande y brillante después de la Galaxia de Andrómeda (aunque esta puede ser la más masiva, como lo muestra un estudio reciente).

El nombre Vía Láctea proviene de la mitología griega y en latín significa "camino de leche". Esa es, en efecto, la apariencia de la banda de luz que rodea el firmamento, y así lo afirma la mitología griega, explicando que se trata de leche derramada del pecho de la diosa Hera (Juno para los romanos). Sin embargo, ya en la Antigua Grecia, el astrónomo Demócrito (460-370 a.n.e.) sugirió que aquella región blanquecina en el cielo era en realidad un conglomerado de muchísimas estrellas demasiado tenues individualmente como para ser reconocidas a simple vista.

Su idea, no obstante, no halla respaldo hasta 1609 cuando el astrónomo Italiano Galileo Galilei hace uso del telescopio y constata que Demócrito estaba en lo cierto, ya que a donde quiera que mirase, en esa región, se encontraba llena de estrellas.

## Comprueba tus conocimientos

48. ¿Cómo está conformada Laniakea?
49. ¿Qué es el grupo local y cómo se compone este?
50. ¿Qué posición ocupa el Sistema Solar en la galaxia Vía Láctea?

## 6.7 La composición del universo observable

- **Los Cuásares.** Los objetos más lejanos detectados del universo observable se llaman **cuásares** (un acrónimo derivado de la frase Fuente de Radio **Cuasi**-Estelar (en inglés de *quasistellar radio source*) son potentes fuentes de energía electromagnética, que incluye radiofrecuencias y luz visible. La energía de emisión de los cuásares hace empequeñecer a casi todos los fenómenos astrofísicos conocidos en el universo, los astrónomos piensan que son versiones muy luminosas de una clase general de objetos conocida como galaxias activas. No se conoce con exactitud el mecanismo que parece explicar la emisión de tan gran cantidad de energía y su variabilidad rápida en el núcleo de los cuásares, pero según las hipótesis más aceptadas podría tratarse de agujeros negros supermasivos (una región en la que la gravedad es tan fuerte que ni la luz puede salir de ella), con cientos de millones de masas solares.
- **Las galaxias.** Las galaxias son grandes sistemas gravitacionales conformados en primer lugar por estrellas: que conforman el 90 % del total de la masa de la galaxia (sin considerar la materia oscura), los agujeros negros supermasivos constituyen la maquinaria central de la formación y de la dinámica de las galaxias, pues se cumple regularmente que cada uno de ellos constituye el 0,5 % de la masa de su galaxia, a mayor masa del hueco negro supermasivo mayor masa tiene la galaxia, y mayores son las velocidades de las estrellas más distantes al centro. Las galaxias normales como la nuestra y la vecina Andrómeda también tienen huecos negros supermasivos centrales, pero no son activos, pues hay poco material cayendo en ellos, aunque tienen una masa de millones de masas solares. En las galaxias activas que presentan intensa emisión en rayos X, se considera que gran cantidad de estrellas y otros componentes de la galaxia están en un proceso acreción y caída hacia el hueco negro central. En los cuásares se conoce que los agujeros negros son aún de mayores dimensiones. El medio interestelar se encuentra entre las estrellas de la galaxia, está conformado por *gas neutro* que casi todo es hidrógeno -elemento

predominante en todo el cosmos-; también existe en el medio interestelar *gas molecular* constituido por moléculas de dos o más átomos, que, en general, posee una masa aproximada igual o menor que el 1,0 % de la masa de las estrellas de la galaxia; adicionalmente, existe *gas ionizado* o *plasma* formado por partículas cargadas eléctricamente, su masa es menor que el 0,01 % de la masa estelar de la galaxia y del polvo interestelar -granos de polvo sólido de  $10^{-5}$  cm de radio, en los que predominan los carbonos y silicatos, absorben y emiten energía como un receptor-emisor ideal-, su masa es menos del 0,00001 % de la masa estelar de la galaxia.

- **Las estrellas y los sistemas planetarios.** Las estrellas son objetos gaseosos autoconfinados gravitacionalmente, en cuyo interior tienen lugar reacciones nucleares de fusión de forma espontánea.

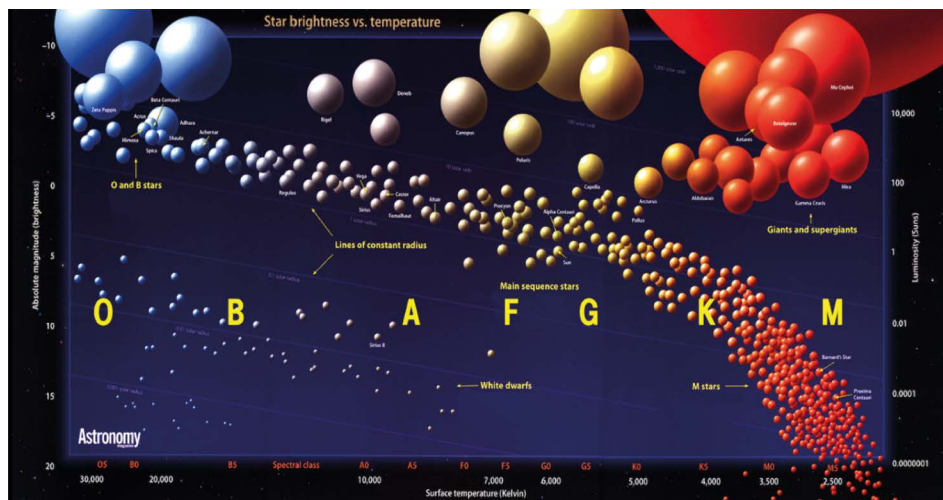
Como las especies y las civilizaciones humanas, las estrellas no son eternas, tienen un origen, una estructura y una producción de energía en su interior, nacen y evolucionan hasta que al emitir toda la energía que son capaces de producir, dejan de existir. Su origen se produce en el interior de las nebulosas gaseosas; desarrollan su vida como verdaderas estrellas en la forma luminosa que nos es común; y terminan, ya sea apagándose lentamente o en una apoteósica explosión. Las estrellas son máquinas admirables, productoras de campos electromagnéticos y de elementos pesados, que conforman los planetas, y nuestros cuerpos. Son el más maravilloso ejemplo de organización espontánea y de sistema autorregulado. Ellas son el resultado de la acreción del gas que se encuentra esparcido por todo el universo -actualmente compuesto de hidrógeno (76 %) y helio (24 %)-, y enriquecido por los elementos producidos por las generaciones de estrellas que a lo largo del tiempo han cumplido su ciclo evolutivo. El Sol es una estrella como tantas otras que existen en la galaxia y se encuentra aproximadamente en la mitad de su vida.

Las escalas para medir las estrellas toman como referencia a nuestra estrella, así pues, las masas de las estrellas se expresan, generalmente, en masas solares y su luminosidad (que es la cantidad de energía que radia la estrella) es expresada en un número de veces la luminosidad del Sol ( $L_{\odot}$ ). De esta forma, la masa de una estrella se encuentra ordinariamente entre los valores de 0,06 a 150 masas solares en un límite teórico. Por debajo de 0,08 masas solares no se alcanza la temperatura en el núcleo ( $\sim 3 \cdot 10^6$  K), que permite el inicio de las reacciones termonucleares en el interior de la estrella.



Las O son estrellas blancas azuladas con temperaturas superficiales de 38 000 K, y las M son rojas con temperaturas superficiales de unos 2 660 K. Cada clase se subdivide en 10 subclases de acuerdo con las características de sus espectros, por ejemplo, desde G0 hasta G9, el espectro del Sol es de la clase G2.

La luminosidad de las estrellas varía de 0,0004 a  $10^7$  veces la del Sol y no solo depende de su temperatura, sino también de su tamaño; para compararlas se utiliza la magnitud relativa, o aparente, que tendría una estrella si se encontrara a la distancia patrón de 10 pc (32,6 años luz) de la Tierra, que definimos como magnitud absoluta. Resulta de gran utilidad la comparación de su luminosidad con relación a su temperatura o color, mediante la construcción de un diagrama con la luminosidad de las estrellas en el eje vertical y la temperatura superficial en el eje horizontal, que es el Diagrama Hertzsprung-Russell (figura 6.45), el cual permitió descubrir la distribución de las estrellas según sus características, en 1911.



**Fig. 6.45** Diagrama de Hertzsprung-Russell



- **El medio interestelar.** El medio interestelar, es el contenido de materia-energía que existe entre las estrellas, dentro de una galaxia. El medio interestelar desempeña un papel crucial en astrofísica a causa de su situación entre las escalas estelar y galáctica. Las estrellas se forman dentro de regiones frías del medio interestelar, al tiempo que estas reponen materia interestelar, lo que equivale a un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico aproximadamente. Dicho medio lo conforman tres constituyentes básicos: materia ordinaria, rayos cósmicos y campos magnéticos.

El medio en sí es una mezcla heterogénea de polvo. La materia está compuesta a su vez de alrededor de un 99 % en masa por partículas de gas, y un 1,0 % por polvo. La composición química del gas, de acuerdo con la nucleosíntesis primordial, es *en masa*, 75 % de H-1, 25 % de He-4 y un 0,01 % de deuterio, y muy poco (en el orden de  $10^{-10}$ ) de litio y berilio, comúnmente llamados metales en la jerga astrofísica. Una fracción significativa de estos metales condensan en forma de granos de polvo en las regiones más densas y frías del medio interestelar.

La presencia del oscurecimiento interestelar dio a William Herschel y a Jacobus Kapteyn la falsa impresión de que nuestro Sistema Solar se encontraba cerca del centro de la galaxia. Sin embargo, ese oscurecimiento lo producen las nubes de gas y polvo que se interponen en el recorrido de la luz de las estrellas y nuestro sistema planetario. Es lo que se denomina extinción estelar. Este decaimiento de la intensidad lumínica de las estrellas es causado por la absorción de fotones a ciertas longitudes de onda.

Por ejemplo, la longitud de onda típica de absorción del hidrógeno atómico se encuentra a unos 121,5 nm de la transición Lyman-alfa. Por tanto, es casi imposible ver la luz emitida en esta longitud de onda por una estrella, porque gran parte es absorbida durante el viaje a la Tierra. Asimismo, la absorción causada por las nubes de polvo se da, sobre todo, a longitudes de onda cortas, es decir que el azul se absorbe mejor que el rojo. Esto produce un efecto de enrojecimiento (*reddening* en inglés) de la luz, más intenso cuanto más lejana sea la posición de la fuente. Este es uno de los motivos por los cuales los telescopios de infrarrojos permiten ver mejor a través de dichas nubes.

Otro efecto interesante es la polarización lineal de la luz, que es debida a que los granos de polvo no son esféricos sino ligeramente alargados

por lo que los campos magnéticos tienden a alinearlos a lo largo de sus líneas de campo. La manifestación de ese efecto puso en evidencia la existencia de campos magnéticos coherentes en el medio interestelar. El medio interestelar suele dividirse en tres *fases*, dependiendo de la temperatura cinética del gas: muy caliente (millones de kelvin), caliente (miles de kelvin), y frío (decenas de kelvin). Características importantes del estudio del medio interestelar incluyen nubes moleculares, nubes interestelares, restos de supernovas, nebulosas planetarias, y estructuras difusas parecidas.

- **Remanentes estelares.** Las estrellas normales evolucionan. Una vez que comienzan las reacciones de fusión de hidrógeno en su núcleo se alcanza un estado de equilibrio, la estrella es estable por muchos años y mantiene su emisión (luminosidad) y su temperatura superficial, con valores que la sitúan en la región de la llamada «Secuencia Principal» en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Las estrellas pasan la mayor parte de su tiempo en este estado. Mientras más pequeña es la estrella, más largo será su tiempo de vida en la secuencia principal.
- **Estrellas evolucionadas (Gigantes Rojas).** Cuando la estrella ha quemado todo el hidrógeno de su núcleo, que se estima en un 10 % de la masa total de la estrella, la reacción nuclear que convierte el hidrógeno en helio se detiene, el núcleo se enfría, se rompe el equilibrio entre la presión hacia el exterior producto del calentamiento del gas, y de la presión hacia el interior producto de la fuerza de gravedad. Las capas superiores de la estrella caen hacia su interior abruptamente, provocando un aumento de temperatura en el núcleo de la estrella que, al llegar a los 100 millones de grados, produce la ignición de otra reacción termonuclear: la del helio en carbono. Y en ese momento ocurre que la ignición del helio no es capaz de detener la caída de las capas superiores de la estrella inmediatamente, el núcleo sigue contrayéndose y elevando su temperatura, cuando alcanza los 250 millones de grados, entonces el helio comienza a quemarse a unas siete veces la velocidad con que venía haciéndolo, provocando que la estrella se hinche. El Sol cuando llegue a esa etapa de su vida llegará a tener más de  $3,0 \cdot 10^8$  km de diámetro, por lo que la órbita de la Tierra quedará por debajo de su superficie.

Este fenómeno de ignición del helio es lo que se conoce como el “flash del helio”. Esa dilatación abrupta del núcleo ha comprimido las capas

cercanas a este, provocando que se inicie la reacción de conversión de hidrógeno en helio en la periferia del núcleo, que lo provee de más combustible, y a su vez refuerza la expansión. Una vez revertida la contracción gravitacional por la expansión de las capas externas, el núcleo se enfría, y el sistema busca un nuevo estado de equilibrio, en forma de una estrella con una atmósfera muy extensa, con una temperatura superficial baja y se denomina gigante roja.

Las estrellas con masas entre 0,5 y 9 masas solares no podrán iniciar las reacciones que convierten el carbono en oxígeno y neón, y así la estrella terminará en forma de un cadáver estelar llamado **enana blanca**, al expulsar sus capas exteriores, dando lugar a una a la formación de una nebulosa planetaria.

Las estrellas de masa superior a las 9 masas solares continúan un ciclo evolutivo de sucesivos destellos (flash) y estados estacionarios, hasta que las reacciones termonucleares empiecen a producir hierro. De esta forma, la estrella se ha ido estructurando en capas, en las que tienen lugar reacciones nucleares cada vez más rápidas, energéticas y complejas a medida que nos acercamos al núcleo. El carbono demora en consumirse unos 600 años, el neón un año, el oxígeno seis meses, el silicio un día, y se detiene en el hierro uno de los elementos más estables que se conocen en la naturaleza.

¿Qué ocurre entonces en el interior de la estrella masiva?

Si el núcleo está constituido por hierro puro, la nucleosíntesis se detiene, y por tanto la fuerza que se opone a la presión que ejercen las capas superiores (fuerza de radiación) disminuye casi totalmente. La presión que ejercen las capas superiores aumenta induciendo un aumento de temperatura por aumento de la presión. Ese aumento abrupto de temperatura produce un fenómeno llamado **fotodisociación**, en el cual cada átomo de hierro se divide en 13 átomos de helio y se emiten cuatro neutrones.

Los electrones de los núcleos de hierro, que formaban el gas cuya presión frenaba la fuerza de gravitación como un fluido incompresible, ceden y penetran en los núcleos de hierro para formar neutrones. El núcleo de la estrella se convierte en un hiperdenso caldo de neutrones en colapso.

Cuando se alcanzan densidades que pueden superar la increíble densidad de un núcleo atómico  $10^{10} \text{ t/cm}^3$ , y la temperatura se eleva a  $10^{11} \text{ K}$

el colapso del núcleo interior se frena. La superficie de este rebota hacia afuera con la violencia con la que viajaba hacia adentro, generando potentes ondas de choque que, en un intrincado proceso, son capaces de expulsar súbitamente las envolturas exteriores de la estrella. Las capas exteriores intermedias de la estrella masiva, en las que se llevaron a efecto reacciones nucleares de síntesis de los elementos helio, carbono, oxígeno, neón, silicio y hierro son expulsadas violentamente al espacio dando lugar a una gigantesca explosión llamada explosión supernova. Vista desde afuera la estrella multiplica muchas veces su luminosidad original, posibilitándonos, si era un objeto relativamente débil observarla, aún si nunca lo habíamos hecho antes.

Como residuo de este violentísimo proceso quedan los restos irregularmente esparcidos de la estrella formando objetos nebulosos conocidos precisamente como remanentes de supernova. Lo que anteriormente era el núcleo de la estrella se convierte ahora en un diminuto y denso objeto que conocemos como estrella de neutrones.

Si la estrella es suficientemente masiva como para alcanzar unas 30 masas solares, se produce una contracción del astro y a una perturbación del espacio-tiempo tal, que se forma después del estallido lo que llamamos un «huevo negro», una región donde la gravedad es tan fuerte que ni la luz puede salir de ella. Enanas blancas, pulsares o estrellas de neutrones, y agujeros negros de origen estelar son conocidos como remanentes estelares.

- **La evolución de los sistemas planetarios.** La vastedad del universo y la existencia de millones de objetos en diferentes estadios evolutivos, nos permiten construir modelos que muestran cómo surgen las estrellas y sus sistemas planetarios. Las nubes de gas y el polvo interestelar, o nebulosas, constituyen la materia prima que, bajo determinadas circunstancias, da origen a nuevas estrellas. El gas se compone básicamente de hidrógeno y helio, pero puede contener relativamente pequeñas cantidades de elementos pesados formados por las reacciones nucleares en el interior de estrellas viejas o que terminaron su ciclo de vida. Estos elementos son lanzados al espacio por medio del viento estelar o al estallar las estrellas en procesos explosivos violentos. En su estado inicial una nebulosa protoestelar es una oscura, turbulenta y fría nube (10 K a 50 K), con una densidad pequeña si la comparamos con la atmósfera terrestre.

Los campos magnéticos inmersos en la nube tienden a evitar su contracción gravitacional, pero, en algún momento y lugar, una acción externa puede propiciar la formación de un núcleo de condensación. Los agentes aglutinadores serían una onda de choque generada por la explosión de una supernova o un intenso viento estelar de estrellas vecinas muy energéticas.

Un escenario de este último tipo nos fue revelado en 1997, cuando el telescopio espacial Hubble obtuvo imágenes de alta resolución de la nebulosa M16, situada a 5 500 años luz del Sol, en nuestra Galaxia.

En ellas se observan columnas de gas y polvo cuya densidad es suficiente para que el gas colapse por sí mismo, pero la cercanía de estrellas jóvenes que emiten una intensa radiación ultravioleta provoca la evaporación de sustancia en parte de la nube.

Subsisten pequeños glóbulos o «bolas» de materia respecto al tamaño de la nube original, pero mayores que el Sistema Solar que son las estrellas en formación.

La protoestrella, propiamente dicha, se forma unos 10 000-200 000 años después de formado el núcleo de condensación. A medida que el núcleo se comprime más, la sustancia se torna opaca, aumenta la temperatura y comienza a radiar energía.

La nebulosa remanente, que envuelve la protoestrella, posee desde el inicio del proceso una cierta rotación derivada de su propia turbulencia, pero a medida que es gravitacionalmente atraída por la estrella en gestación, se contrae y aumenta su giro a fin de conservar el impulso de giro, el llamado momento angular, de forma análoga a la de una bailarina de ballet que contrae sus brazos cuando quiere girar con más rapidez.

Algunos modelos teóricos actuales salvan la objeción que demeritó la hipótesis de Laplace. Se supone que una buena parte del material que es atraído hacia la protoestrella no cae directamente en ella, sino que entra en una órbita a su alrededor de forma similar a la órbita de un cometa. Formándose un disco o anillo que transporta y redistribuye el momento angular hacia el exterior, permitiendo a la vez que el material más interno del disco continúe ingresando en la naciente luminaria. El proceso descrito puede requerir unos 10 millones de años hasta que el núcleo adquiere la temperatura necesaria para iniciar las reacciones nucleares y convertirse en una estrella típica.

La formación de los planetas, se inicia en la nube protoplanetaria o disco protoplanetario (NPP), desde una etapa temprana estos discos han sido observados alrededor de muchas estrellas.

- **Los sistemas planetarios extrasolares.** Desde 1988 se conoció la existencia de planetas que orbitan alrededor de determinadas estrellas. Nuestro conocimiento sobre estos sistemas planetarios, encontrados fuera del sistema solar, al principio muy incompleto y fragmentado ha ido crecido considerablemente en los últimos años, lo que permitirá intentar comprender los procesos físicos que intervienen en su formación y evolución.

Con el desarrollo de las tecnologías de búsqueda también se han refinado los diferentes métodos para detectarlos y estudiarlos, a la vez que se proponen nuevas ideas para ordenarlos y clasificarlos de acuerdo con sus características físicas y astronómicas, lo cual repercutirá en una mejor comprensión de nuestro sistema planetario, y del lugar que este ocupa en una galaxia que parece estar repleta de planetas.

Un sistema planetario está conformado por un conjunto de cuerpos celestes en interacción gravitatoria que se mantienen estables dinámicamente durante períodos de tiempo muy largos y cuyos componentes pueden ser: un sistema estelar, una estrella, o remanente de ella y todos los planetas, planetas enanos y cuerpos menores que orbitan alrededor de su baricentro.

La Unión Astronómica Internacional ha definido, desde el 24 de agosto de 2006, que se debe considerar un *planeta* a todo cuerpo celeste que no emite luz propia y que orbita alrededor de una estrella o remanente de ella, con una órbita bien determinada, lo suficientemente masivo como para haber alcanzado una forma casi esférica y despejar la vecindad de su órbita del polvo y los desechos del disco protoplanetario del cual surgió.

Esta definición diferencia a los planetas de los planetas enanos (como Plutón, Ceres, Eris, Haumea, y Makemake en nuestro sistema solar), los cuales no adquirieron masa suficiente para limpiar de planetesimales la vecindad de su órbita.

En el caso de los planetas extrasolares se añade una condición adicional relacionada con el límite superior de su masa, que no debe exceder en 13 veces el valor de la masa de Júpiter, nuestro mayor planeta, para

que no exista la posibilidad de que en sus núcleos se inicien reacciones termonucleares que conviertan hidrógeno en helio.

Los objetos subestelares, con masas menores a 0,08 masas solares, con una temperatura de superficie entre 1 000 K y 2 000 K, que no pueden fusionar hidrógeno de forma continua, se deben denominar enanas marrones. Por otra parte, los objetos aislados de masa planetaria, con masa 0,015 masas solares, como límite inferior, se deben denominar subenanas marrones.

En los últimos años, la búsqueda de planetas extrasolares se ha convertido en un área de investigación muy dinámica y competitiva, hasta el 2 de septiembre de 2023, según la enciclopedia de planetas extrasolares, los astrónomos habían detectado 9 820 exoplanetas, 5 502 confirmados en 4 401 sistemas planetarios.

La mayoría de estos exoplanetas son gigantes similares a Júpiter y a Neptuno, que orbitan cerca de sus estrellas, aunque ya comienzan a detectarse un buen número de ellos con masas cercanas a la terrestre y aún menores. Hasta el 21 de marzo de 2024, se han hallado y confirmado 70 exoplanetas con condiciones potencialmente habitables, de estos, 29 son planetas rocosos capaces de mantener agua líquida en su superficie. Los otros 41 pueden ser mundos de agua o minineptunos, pero el número de casos detectados crece rápidamente con los días.

Los planetas extrasolares al igual que los de nuestro sistema planetario no emiten luz, reflejan la luz visible que les llega de sus "Soles", por ello, brillan mucho más débilmente. Ver la luz proveniente de un planeta distante cerca de su estrella madre es como intentar distinguir la luz de una linterna que alumbre cercana a un gran reflector. Sin embargo, los astrónomos se las han arreglado para detectarlos.

Actualmente se utilizan, en general, seis métodos distintos para buscar planetas extrasolares, los cuales se perfeccionan continuamente, con el fin de poder detectar planetas de masa y tamaño parecidos a los de nuestra Tierra.

Después de varios años de búsqueda, los astrónomos han encontrado que los planetas y los sistemas planetarios en el universo observable son muy diversos.

Durante años se suponía que, un sistema planetario formado alrededor de otra estrella, sería muy similar al Sistema Solar, de modo que la distribución de las masas planetarias, la distancia de sus órbitas y

las propiedades de sus planetas serían algo semejantes a las que encontramos en el nuestro, con planetas de tipo terrestre (esencialmente rocosos) próximos a las estrellas y otros similares a Júpiter (mucho más masivos y gaseosos) en la zona más lejana.

Sin embargo, aunque muchos planetas encontrados se pueden considerar semejantes a los de nuestro sistema planetario la diversidad encontrada en las masas, en la distancia a la que orbitan sus estrellas y en sus propiedades físicas parece ser la regla, encontrándose planetas que se salen fuera de toda norma, y que van mucho más allá de lo que la imaginación hubiera podido sugerir, puesto que no tienen análogos en nuestro sistema solar.

El Sistema Solar se amplía. Nuestro sistema planetario se llama Sistema Solar y hasta el momento actual consta de una estrella: el Sol; ocho planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno; cinco planetas enanos: Ceres, Plutón, Eris, Makemake y Haumea; y un número indeterminado de cuerpos menores: entre los que se encuentran los meteoroides, asteroides, cometas, centauros, junto a los objetos del cinturón de Kuiper, situados tras la órbita de Neptuno (figura 6.46). También se encuentran formando parte del sistema solar los satélites de los planetas y de los planetas enanos. El polvo y el gas del medio interplanetario y las partículas y radiaciones del viento solar.

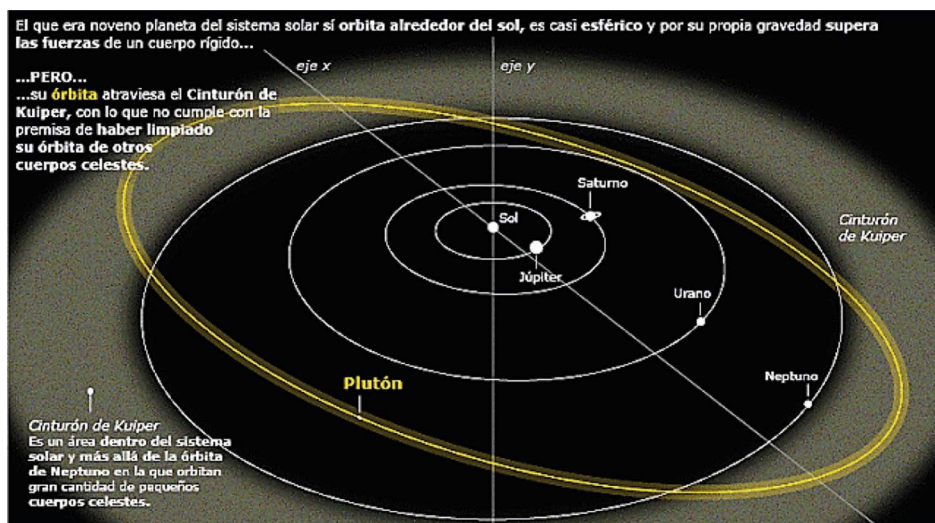


Fig. 6.46 El Sistema Solar con el cinturón de Kuiper



El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y la que da nombre a nuestro sistema planetario. Es la estrella que mejor hemos podido estudiar, los fenómenos que observamos en ella nos ilustran sobre lo que ocurre en muchas otras. Es una inmensa esfera de plasma incandescente con un radio de 695 700 km desde su centro hasta la fotosfera (zona que vemos como su superficie), y que rota sobre un eje que pasa por su centro. La velocidad de rotación varía con la latitud solar, y cerca de los polos es cerca de 31 días, mientras en el Ecuador es de unos 26 días, a este fenómeno se le llama rotación diferencial.

Nuestra estrella está constituida por una superposición de capas cuyas temperaturas varían según la distancia al centro. El núcleo incandescente supera los  $15 \cdot 10^6$  K mientras que en la fotosfera es de aproximadamente unos  $5,8 \cdot 10^3$  K.

El límite exterior del sistema solar se define a través de la región de interacción entre el viento solar y el medio interestelar. La región de interacción entre el viento solar y el estelar se denomina heliopausa esta frontera determina los límites de influencia del Sol. La heliopausa puede encontrarse a unas 100 ua ( $15 \cdot 10^9$  km) del Sol.

Plutón desde 1930, en que fue descubierto, hasta el año 2006 se consideraba el noveno planeta, pero ha pasado a clasificarse como planeta enano, junto a Ceres, también considerado planeta durante algún tiempo, más recientemente considerado como asteroide, y Eris, un objeto transneptuniano similar a Plutón.

Ciertamente, desde los años setenta existía un amplio debate sobre el concepto de planeta, a la luz de los nuevos datos referentes al tamaño de Plutón, un debate que aumentó en los años siguientes al descubrirse nuevos objetos que podían tener tamaños similares. De esta manera, la nueva definición de planeta introduce el concepto de planeta enano, que incluye a Ceres, Plutón, Haumea, Sedna, Makemake y Eris (figura 6.47); y tiene la diferencia de definición en que un planeta enano no ha despejado de planetesimales la zona local de su órbita y no es un satélite de otro cuerpo.

Los primeros asteroides descubiertos fueron también denominados temporalmente como planetas, como Ceres, que al igual que otros asteroides llegaron incluso a tener su símbolo planetario, hasta que fue evidente que formaban parte de toda una familia de objetos: el cinturón de asteroides que se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter.



**Fig. 6.47** Planetas enanos del Sistema Solar y objetos transneptunianos

## Comprueba tus conocimientos

- 51.** ¿Qué son los cuásares?
- 52.** ¿Qué relación existe entre las galaxias y los agujeros negros supermasivos?
- 53.** ¿Cómo se define una estrella?
- 54.** ¿Qué importancia tiene el diagrama Hertzsprung-Russell?
- 55.** ¿Cómo surgen las estrellas y sus sistemas planetarios?
- 56.** ¿Qué son los sistemas planetarios extrasolares?
- 57.** ¿Cuál es la composición del sistema solar?
- 58.** ¿Qué es un planeta y un planeta enano?

## Problemas generales del capítulo

### 1. Corrimiento al rojo y distancia a una galaxia

En 1920, Edwin Hubble halló que algunas de las manchas difusas, que se observaban con los telescopios y que algunos astrónomos aceptaban como nubes dentro de la Vía Láctea, eran, en realidad, otras galaxias. En esa época la aplicación del Efecto Doppler le permitió observar que las galaxias se estaban alejando de nosotros, de modo que cuanto más lejos se encontraba una galaxia más rápida era su velocidad de recesión. Hubble concluyó que este hecho permitía encontrar la distancia a la que se encontraba la galaxia a partir de su famosa ecuación:

$$\frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o} = \left( \frac{H}{c} \right) \cdot r$$

Donde el valor considerado de  $H$  es  $77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ;  $r$  es la distancia medida en parsec y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. El término de la izquierda es conocido como *redshift* (corrimiento al rojo,  $z$ ) y es determinado por el corrimiento de la línea analizada hacia una mayor longitud de onda.

- ¿Para qué color se desplazan las líneas del espectro de una galaxia que se acerca al observador?
- Se observa que una galaxia experimenta un corrimiento al rojo de  $z = 0,77$ . Determina la distancia a la que se encuentra esa galaxia.

### 2. La edad del Universo

Estima la edad del Universo para un valor del parámetro de Hubble de:

- $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

Explica **cómo utilizando las edades de los cúmulos globulares** se puede poner un límite al valor de la constante.

### 3. Distancia a un Cuásar

Un cuásar observado tiene un corrimiento al rojo de  $z = 0,15$ .

- ¿Cuál es la velocidad de recesión del cuásar en kilómetro por segundo ( $\text{km/s}$ )?
- Encuentra la distancia al cuásar en megaparsec ( $\text{Mpc}$ ), con un parámetro de Hubble de  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

**4. Distancia a una galaxia**

El espectro de una galaxia muestra la línea K del Calcio, cuya longitud de onda de reposo es  $3\,934\text{ \AA}$ , corrida hasta  $3\,990\text{ \AA}$ . Calcula la distancia a la galaxia usando  $H_0 = 71\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$ .

**5. Distancia a la nube grande de Magallanes**

La Gran Nube de Magallanes tiene una velocidad de  $v = 2,8\text{ km/s}$ . Usando la relación entre la velocidad y la distancia de Hubble, encuentra la distancia a la galaxia con un parámetro de Hubble de  $H_0 = 70\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$ .







# GLOSARIO DE TÉRMINOS DE COSMOLOGÍA

**ABIERTO (ESPACIO).** En cosmología, se refiere a un espacio de volumen infinito y sin bordes. Por ejemplo, el espacio euclídeo o el espacio hiperbólico de topología simple.

**ABUNDANCIAS.** Las cantidades relativas de elementos químicos. Por ejemplo, el hidrógeno forma aproximadamente el 75 % de la masa del universo; su abundancia cósmica es 75 %.

**ABSORCIÓN.** Disminución de la intensidad de la radiación, en determinadas frecuencias, debido a que esta es utilizada para excitar a un átomo o a una molécula. El átomo (o la molécula) pasa entonces a un estado cuántico de mayor energía, pudiendo, incluso, perder electrones en un proceso llamado de ionización. En el caso del átomo excitado, la reemisión del exceso de energía, en forma de un fotón, se hará en una dirección arbitraria, y no necesariamente en la misma en la que venía la radiación que excitó el átomo. Por lo tanto, esa frecuencia particular estará ausente del campo de radiación, lo que dará origen a líneas de absorción en el espectro de la luz recibida.

**ACELERADOR (DE PARTÍCULAS).** Máquinas en las que se aceleran núcleos y partículas elementales a velocidades próximas a la de la luz, para luego hacerlas chocar. Esta energía disponible permite crear nuevas y más masivas partículas, y así poder estudiar la estructura íntima de la materia.

**AGUJERO NEGRO.** Objeto astrofísico con un campo gravitatorio tan grande, que ni siquiera la luz puede escapar (y por supuesto, tampoco pueden hacerlo partículas materiales u otra forma de información). Se forma, por ejemplo, como producto del colapso gravitatorio de una estrella suficientemente masiva. En otros términos, el campo gravitatorio de un agujero negro es tan grande que la velocidad de escape en su superficie (que en el caso de la Tierra es de “apenas” unos 11 km/s) excede la velocidad de la luz. Los objetos pueden caer dentro del agujero, pero, de acuerdo con la física clásica (no cuántica), ninguna forma de energía puede salir de él. En teoría cuántica, el inmenso campo gravitatorio permite la creación de pares de partículas justo en el “borde” del agujero. Si una de estas es “tragada” mientras que la otra escapa, esta última constituirá la llamada radiación de Hawking; los agujeros negros no serían tan negros, después de todo.

**ANGSTROM.** Medida de longitud equivalente a  $10^{-10}$  m. Es empleada comúnmente para describir longitudes de onda, por ejemplo, en el rango visible, que va de unos 4 000 Å a unos 7 000 Å. Un angstrom es la medida característica de un átomo de hidrógeno; el diámetro de un cabello humano ronda el medio millón de angstrom.

**ANISOTROPÍA.** Diferencias en una propiedad física entre dos o más direcciones, como en el caso de las anisotropías en la temperatura de la radiación cósmica de fondo.

**ANISOTROPÍAS EN LA RADIACIÓN DE FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS.** Diferencias de intensidad (o de temperatura efectiva) presentes en el campo de la radiación cósmica

del fondo de microondas. Estas diferencias de intensidad revelan inhomogeneidades en la distribución de materia-energía, así como también la posible existencia de ondas gravitatorias, que habrían perturbado a los fotones del fondo cósmico en su viaje hacia nuestros detectores. Las anisotropías detectadas, en muy distintas escalas angulares sobre el cielo de microondas, revelan también los detalles de procesos astrofísicos más recientes y que son sumamente importantes a la hora de estimar los parámetros cosmológicos de nuestro universo.

**AÑO LUZ.** Es una medida astronómica de distancia, equivalente al recorrido de la luz en el vacío en un año (estrictamente, un año juliano de 365,25 días). Equivale a unas 63,241 ua y unos  $9,46 \cdot 10^{12}$  km.

**ANTIMATERIA.** Materia que cuenta con las mismas propiedades gravitatorias que la materia ordinaria, pero que tiene la carga eléctrica opuesta; tiene también "cargas" opuestas para las otras fuerzas nucleares: las fuerzas nucleares débil y fuerte. Cada partícula de materia tiene una correspondiente antipartícula. Si se encuentran se aniquilan entre sí, dejando energía pura. Hoy, la producción experimental de antimateria es un proceso rutinario en los aceleradores de partículas, pero existen pocas trazas de antimateria en la naturaleza.

**ANTIPARTÍCULA.** Una partícula de antimateria. La antipartícula del neutrino es el antineutrino; la del protón es el antiprotón; la del electrón es el positrón (o antielectrón), etcétera.

**ANTRÓPICO (PRINCIPIO).** Ver Principio ANTRÓPICO.

**ASTEROIDES.** Son cuerpos rocosos demasiado pequeños para llamarlos planetas que orbitan el Sol. Oscilan en tamaño entre unos centímetros y 1 000 km de diámetro (el último es el tamaño de Ceres). Aunque se los encuentra a mucha distancia del Sol, hay una importante concentración de ellos entre Marte y Júpiter, el llamado cinturón de asteroides.



**ASTROFÍSICA.** Rama de la Astronomía que estudia la física de los astros. No la ubicación de los astros, sino “qué” son los astros. También, es la aplicación de las leyes de la física, de la química y de otras ciencias, para lograr comprender los fenómenos que tienen lugar en los planetas, estrellas, etc. La astrofísica tuvo sus inicios con el advenimiento de la espectroscopía, lo que le permitió descifrar la información que, a través de la luz, nos llega de los astros.

**AMPLITUD DE PROBABILIDAD.** En una teoría cuántica, número complejo cuyo módulo al cuadrado da una probabilidad.

**ÁTOMO.** Unidad básica de la materia ordinaria, consistente en un núcleo con protones y neutrones rodeado por electrones que se mueven a su alrededor.

**BARIÓN.** Partícula subatómica que interactúa a través de la interacción nuclear fuerte, compuesta por tres quarks. Su nombre proviene del griego *barys* que significa pesado. El neutrón y el protón son ejemplos de bariones.

**BIG BANG.** Conjunto de modelos cosmológicos para la evolución del universo, con un estado primordial altamente energético, denso y caliente, en el que el espacio-tiempo comienza con una singularidad que inicia un período de expansión global. De acuerdo con estos modelos, el universo se ha estado expandiendo, enrareciendo y enfriando desde sus inicios, y durante unos 13 800 millones de años. En la actualidad, el universo es mucho más grande y frío, pero podemos observar los remanentes de aquel período temprano en la radiación cósmica del fondo de microondas que invade todo el espacio.

**BIG CRUNCH.** *Alter ego* del Big Bang. Evento catastrófico final en un universo que primero se expande y que, luego de alcanzar un tamaño máximo, colapsa sobre sí mismo, como consecuencia de la excesiva densidad de materia-energía que contiene (traducción: gran crujido o colapso). Las leyes físicas conocidas hoy no permiten aún modelar este hipotético “evento final” para el universo.

**BINARIAS (ESTRELLAS).** Sistema astronómico formado por dos estrellas unidas por su mutua atracción gravitatoria. Las estrellas se mueven en órbitas elípticas alrededor de un centro común, llamado centro de masa del par. Se cree que, al menos la mitad de las estrellas en las cercanías del sistema solar pertenecen a este grupo. Los períodos de las órbitas van de apenas horas a millones de años; sus separaciones, de apenas unos pocos radios estelares a algunas décimas de parsecs. La forma de sus órbitas puede variar fuertemente, y ser desde excesivamente excéntricas, hasta casi circulares.

**BOSÓN.** Partícula con cantidad entera de la unidad básica de espín " $\hbar/(2\pi)$ " -esto es -2; -1; 0; 1; 2; etc., multiplicados por  $\hbar/(2\pi)$ -, donde  $\hbar$  es la constante de Planck. Son, típicamente, partículas vehículos (mensajeras) de las interacciones fundamentales. Por ejemplo, el fotón de espín 1 multiplicado por  $\hbar/(2\pi)$  es el mediador de la interacción electromagnética; el gluón lo es de la interacción nuclear fuerte, el gravitón, de la gravitación, etc. Existen también partículas compuestas de pares de fermiones cuyo espín suma cantidades enteras y, por lo tanto, son bosones. Deben su nombre al físico indio Satyendra Bose (1894-1974).

**BRANA (MEMBRANA).** En general, objetos "extensos" que surgen en las teorías que pretenden unificar la relatividad general de Einstein con la teoría cuántica. Una 1-brana es una cuerda, una 2-brana es una membrana, etcétera.

**CAMPO ESCALAR.** Campo cuántico que queda especificado con un solo número en cada punto del espacio.

**CAUSALIDAD.** Propiedad que debe satisfacer un sistema físico de acuerdo con la teoría de la relatividad especial, según la cual ninguna forma de energía (o información) puede propagarse a velocidad mayor que la de la luz.

**CERO ABSOLUTO.** Corresponde al valor más bajo de la escala absoluta de temperaturas: 0 K corresponde a  $-273,15^\circ\text{C}$ .

**CERRADO (ESPACIO).** Espacio de volumen finito y sin bordes, como la superficie de una esfera.

**CERRADO (UNIVERSO).** Modelo cosmológico de Friedmann-Lemaître, con volumen finito y curvatura espacial positiva. Corresponde a modelos con alta densidad de materia-energía, que podrían eventualmente colapsar por su propio peso en una suerte de Big Crunch.

**CINTURÓN DE KUIPER.** Es una región del sistema solar ubicada más allá de la órbita de Neptuno, a una distancia de entre 30 ua y 55 ua del Sol. Lleva el nombre de uno de sus descubridores, el astrónomo holandés, residente en EE. UU., Gerard Kuiper. Su existencia fue confirmada en 1992. Es semejante a la franja de asteroides, pero mucho mayor; 20 veces más ancha y con objetos cuya masa es entre 20 y 200 veces más alta. Se compone de cuerpos diversos, cuya existencia se remonta a la formación del sistema solar, incluso planetas enanos (categoría en la que fue incluido, el antes considerado planeta, Plutón). A diferencia de los cuerpos del cinturón de asteroides, que son rocosos y metálicos, los de Kuiper son formados sobre todo de gases (como metano y amoníaco) y de agua congelados.

**CONDICIÓN DE AUSENCIA DE BORDES.** Requisito por el que las historias del universo son superficies cerradas sin borde alguno.

**CONSTANTE COSMOLÓGICA (O LAMBDA).** Responde a un término agregado por Einstein, en 1917, a sus ecuaciones originales de la relatividad general. La idea era, mediante este término, frenar la tendencia de la materia ordinaria a colapsar por su propia atracción gravitacional. Einstein obtenía así un modelo estático (aunque altamente inestable, como más tarde se descubriría), de acuerdo con las incipientes observaciones de la época. Años más tarde, el descubrimiento de la expansión del universo hizo que los cosmólogos desearan la necesidad de una constante cosmológica. Hoy, y desde hace ya unos años, nuevas observaciones han hecho que la

constante cosmológica vuelva a formar parte de los modelos cosmológicos, que mejor reproducen las observaciones astrofísicas.

**CONSTANTE COSMOLÓGICA (PROBLEMA DE LA).** Dificultad con la que conviven (esencialmente, desde 1917) los físicos que estudian las teorías de altas energías y los cosmólogos, al no tener indicios claros sobre el origen físico ni sobre la magnitud del término de constante cosmológica, que Einstein agregara en sus ecuaciones originales de la relatividad general de 1916.

**CORRIMIENTO AL ROJO (Z).** Corrimiento de las líneas espectrales hacia mayores longitudes de onda debido a un movimiento de alejamiento o recesión de la fuente emisora. En cosmología relativista, este efecto es debido a la expansión del universo que "arrastra" a las galaxias lejanas y produce un estiramiento de las longitudes de onda características de su luz. Notar que este efecto NO es lo mismo que el efecto Doppler-Fizeau, aunque para "z" pequeños ambos dan aproximadamente el mismo resultado. En el caso cosmológico, la onda de luz viaja a través del espacio al mismo tiempo que este espacio se estira. Por ello, también la longitud de onda de la luz se estirará, ocasionando un corrimiento al rojo. Cuanto más alejada está la fuente emisora, más espacio deberá recorrer la luz y por ello, más se estirará su longitud de onda.

**CORRIMIENTO AL AZUL.** Corrimiento de las líneas espectrales hacia menores longitudes de onda debido a un movimiento de acercamiento de la fuente emisora.

**COSMOGONÍA.** Disciplina relacionada con el origen del cosmos. En cosmología, también se refiere al estudio del origen de los sistemas astronómicos, desde sistemas solares hasta estrellas, galaxias y cúmulos galácticos.

**COSMOLOGÍA.** El estudio del origen, estructura y evolución del universo, y de sus constituyentes, a las mayores escalas

astronómicas imaginables. Es también nuestro interés en estudiar el cosmos y conocer el lugar que en él ocupamos.

**COSMOLOGÍA CUÁNTICA.** Área de la cosmología que estudia el universo primitivo en épocas previas al tiempo de Planck,  $10^{-43}$  s, cuando tanto los efectos relativistas (dados por la relatividad general) como los cuánticos (dados por la teoría cuántica) son muy importantes.

**COSMOLOGÍA RELATIVISTA.** La aplicación de las ecuaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein al universo nos permite describir su evolución relativista en una manera completamente distinta a la de la teoría newtoniana. Los modelos del Big Bang surgen de esta nueva descripción del universo.

**CUÁNTICA (MECÁNICA).** Es la teoría que describe el reino de las partículas subatómicas. Explica la interacción entre la radiación y la materia con un formalismo que surgió a partir de los estudios realizados por el físico alemán Max Planck, y que llevaron a la comprensión de que la energía se transmite, no en forma continua, sino en pequeñas unidades discretas, o cuantos. Explica, además, el origen de las líneas espectrales que se detectan en astronomía, como transiciones cuánticas entre niveles de diferente energía de los átomos y moléculas, y es la teoría que deberá un día amalgamarse adecuadamente con la relatividad general para poder describir el cosmos en épocas ultra primordiales, por debajo de la escala de Planck.

**CUERPO NEGRO.** Objeto ideal que absorbe y emite radiación de todas las longitudes de onda.

**CUERPO NEGRO (RADIACIÓN DE).** Campo de radiación cuya distribución de intensidad *versus* la frecuencia (su espectro) corresponde a la de un cuerpo negro, y sigue una ley muy conocida en física llamada la Ley de Planck. Sus características dependen solo de la temperatura del cuerpo negro. En el caso cosmológico, este tipo de radiación se genera cuando partículas materiales y fotones llegan a un estado de equilibrio térmico, en el que cada reacción es balanceada por la reacción opuesta

y todos los constituyentes del universo comparten la misma temperatura. La radiación cósmica del fondo de microondas es de este tipo.

**CUERDAS (TEORÍA DE).** Teoría de gran unificación de las fuerzas fundamentales de la física, que postula que los ingredientes más básicos de la Naturaleza no son partículas sin dimensión matemática, sino diminutos filamentos unidimensionales llamados cuerdas. Aunque no está libre de problemas técnicos, la teoría de cuerdas amalgama las teorías de la relatividad general de Einstein (cuyas leyes describen el universo a gran escala, macroscópico) con la mecánica cuántica (la teoría que describe el reino subatómico).

**CÚMULOS DE GALAXIAS.** Grupos de galaxias, que pueden incluir desde varias decenas de unidades (como en el caso de nuestro Grupo Local) hasta un número mucho mayor que mil galaxias (como en el caso del cúmulo de Virgo).

**COORDENADAS COMÓVILES.** Coordenadas en un sistema de referencia que se expande con el universo.

**CUÁSAR.** Palabra derivada de *quasi-stellar radio source* (radiofuente cuasi-estelar), debido a que los cuásares fueron descubiertos como objetos con la apariencia óptica de estrellas, pero extremadamente brillantes en radioondas. Sin embargo, a diferencia de las estrellas, los espectros de los cuásares presentan fuertes líneas de emisión con un desplazamiento al rojo elevado, lo que es indicativo de su lejanía y de la extrema luminosidad intrínseca.

**DEFECTO TOPOLÓGICO CÓSMICO.** Mucho de lo que hoy se sabe en física de las altas energías se basa en procesos genéricos conocidos como "procesos de rotura de las simetrías fundamentales". Estas roturas de simetría se producen durante transiciones de fase cosmológicas, y muchas de estas últimas pudieron haber sucedido en el universo primitivo, en las inmensas energías y temperaturas cercanas a la singularidad de los modelos del Big Bang. Una predicción genérica de muchos

modelos cosmológicos de altas energías es la producción de defectos cósmicos, durante estas transiciones de fase. De la misma manera que la estructura cristalina del hielo, formado sobre la superficie de un lago al descender la temperatura, no está libre de defectos, el volumen de nuestro universo, al disminuir su temperatura, también habría formado defectos en aquellos campos de energía primordiales que dominaban el universo en épocas tempranas. En el caso del hielo, son llamados "defectos" pues constituyen regiones en las que la estructura cristalina del hielo se altera, y "topológicos" pues su completa descripción precisa de elementos de simetría, cuya descripción formal se halla en la rama de las matemáticas conocida bajo el nombre de topología. En el caso de los defectos cósmicos, lo que se altera es la estructura misma (la topología) del espacio-tiempo. Existen defectos cósmicos de varios tipos y dimensiones. Muchos son incompatibles con la cosmología estándar, pero también existen otros que conviven armoniosamente con ella, y que hasta podrían responder a ciertos enigmas aún oscuros de la cosmología actual.

**DENSIDAD CRÍTICA.** Densidad de materia-energía cósmica que separa universos de curvaturas y dinámicas muy diferentes. Dado que en la teoría de la relatividad general la materia-energía curva el espacio-tiempo, el valor de la densidad de energía-materia, de ser conocido, podría indicarnos, por ejemplo, la curvatura global del universo. El valor de la densidad crítica depende de la época cosmológica y también del valor exacto de la tasa de expansión del universo (el parámetro de Hubble). Su valor actual es de aproximadamente unos  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>, lo que equivale a unos pocos átomos de hidrógeno por metro cúbico. Por referencia, el número de partículas (átomos o moléculas) en un metro cúbico de gas a temperatura y presión normales es de unos  $3 \cdot 10^{25}$ .

**DESACOPLAMIENTO (ÉPOCA DEL).** Transición entre un estado altamente ionizado de la materia y un estado en el cual la materia es predominantemente neutra. En los modelos del Big Bang esta transición ocurre cuando la radiación, que era

difundida constantemente por los electrones y demás materia ionizada, deja de serlo, al formarse los primeros átomos neutros. En ese entonces, el universo tenía entre unos 380 mil años de vida, y su temperatura característica rondaba los 3 000 K. El fondo de radiación residual de este proceso de desacoplamiento (la llamada radiación cósmica del fondo de microondas) nos llega con un corrimiento al rojo de aproximadamente  $z = 1\,100$ .

**DEUTERIO (H-2 O 2H).** Isótopo pesado del hidrógeno, cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón (en lugar de solo un protón como en el caso del hidrógeno normal). Como en el hidrógeno, el átomo de deuterio posee solo un electrón. Cuando un átomo de deuterio reemplaza a un átomo de hidrógeno en la molécula del agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), se obtiene el agua pesada de uso corriente como moderador de las reacciones en las centrales nucleares. La abundancia de deuterio en el espacio interestelar es de solo  $1,4 \cdot 10^{-5}$ , aquella del hidrógeno -en el Sol hay menos de  $10^{-6}$  y en los océanos de la Tierra aproximadamente  $10^{-4}$ -. Dado que el deuterio es rápidamente consumido en las reacciones nucleares estelares, se cree que la mayoría de su abundancia actual es primordial, esto es, que fue fabricado durante la nucleosíntesis primordial.

**DIFUSIÓN.** Es la desviación de toda forma de radiación (incluyendo la luz visible) por su interacción con la materia. Por ejemplo, la luz de una linterna puede interactuar con las partículas de humo de una habitación. Como resultado esta luz es desviada en todas direcciones, haciéndose difusa. También se produce la difusión de la radiación en medios transparentes; es el caso de la interacción de los rayos solares con las moléculas del aire, cuyo resultado es el azul del cielo (en el rango visible, la luz más difundida es la azul). También se llama así al proceso de absorción y posterior reemisión de los corpúsculos de luz (en todas direcciones) por la materia, sin cambios en su frecuencia o energía. La difusión de los fotones por la materia ionizada y los electrones libres es el proceso principal por el cual el universo temprano se muestra altamente opaco a la radiación.



**DOPPLER-FIZEAU (EFECTO).** Modificación de la longitud de onda de la radiación electromagnética debido al movimiento relativo entre fuente emisora y receptor. Si el objeto en movimiento se acerca al observador, las ondas que emite llegan a este con mayor frecuencia, si se aleja sucede lo contrario. El fenómeno se produce también con el sonido: es conocido el caso de la locomotora lanzada a toda velocidad, cuyo sonido resulta más agudo que el original para una persona inmóvil al lado de la vía a medida que se le acerca, y se vuelve cada vez más grave a medida que se le aleja. Sin embargo, hay una diferencia esencial: el sonido precisa de un medio (el aire) para propagarse; las ondas electromagnéticas, no. En el caso cosmológico, este efecto resulta en el corrimiento de todas las líneas espectrales debido al movimiento de acercamiento (corrimiento de las líneas hacia el azul) o alejamiento (corrimiento al rojo) de las fuentes emisoras relativamente cercanas (galaxias, estrellas...) a lo largo de la línea de visión.

**EDAD DEL UNIVERSO.** Tiempo transcurrido desde la singularidad predicha por los modelos del Big Bang y el estimado por las últimas observaciones astrofísicas en 13 800 millones de años.

**ELECTRONVOLTIO (eV).** Es una unidad de energía usada en física. Equivale a la energía que adquiere un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un voltio. Un electronvolt (eV) es una cantidad muy pequeña de energía en una escala macroscópica, pero es conveniente en la descripción de procesos atómicos. Por ejemplo, 13,6 eV es la energía necesaria para desprender un electrón de un átomo de hidrógeno.

**ELECTRÓN.** Partícula fundamental de la materia que tiene carga eléctrica negativa y es responsable de las propiedades químicas de los elementos.

**EMISIÓN.** La transición cuántica entre un estado de alta energía y uno de energía menor, por ejemplo, en los átomos o moléculas, resulta en la emisión de un corpúsculo de radiación (un fotón) con la diferencia de energía. Esta radiación emitida por

**ENANA BLANCA.** Una estrella pequeña, de débil luminosidad, densa y “moribunda” (en las etapas finales de su evolución) que ha consumido la totalidad de su combustible nuclear y lentamente se va perdiendo de vista. Las estrellas cuya masa está por debajo de 1,4 veces la masa del Sol, se convierten normalmente en enanas blancas hacia el final de sus vidas. Una enana blanca típica es fría y densa, y cuenta con el 60 % de la masa solar, pero es de tamaño apenas mayor que la Tierra. Son estrellas muy comunes: un 10 % de las estrellas de nuestra galaxia serían de este tipo. La más cercana es Sirio B, a unos 8,7 años luz de distancia. Ninguna es visible sin telescopio.

**ENANA MARRÓN.** Una protoestrella con masa insuficiente como para iniciar la combustión termonuclear que transformará el hidrógeno en helio. Sus masas van desde 13 veces la masa de Júpiter hasta un 10 % de la masa solar (la masa mínima necesaria para iniciar el proceso de fusión termonuclear). Son objetos relativamente fríos, con temperaturas por debajo de los 1 000 K, y por ello emiten radiación en el infrarrojo. Podrían formar parte de la materia oscura que se piensa hoy que debe existir en las galaxias y cúmulos galácticos.

**ENERGÍA FANTASMA.** Es una forma hipotética de energía oscura si se comprueba su existencia, esta clase de energía causaría que la expansión universal acelerara tan rápidamente que el Big Rip ocurriría, destruyendo el universo en su totalidad.

**ENERGÍA OSCURA.** Forma de energía cosmológica que estaría presente en todo el espacio, produciendo una presión que tiende a acelerar la expansión del universo, resultando en una fuerza gravitacional repulsiva, no emite radiación u otra señal que podamos detectar. Su presencia debe inferirse por mediciones dinámicas a través de sus efectos gravitatorios sobre los otros componentes ordinarios

de materia-energía del universo y por sus efectos sobre la expansión del universo. Existen en la actualidad varios candidatos para la energía oscura, siendo la constante cosmológica de Einstein y los campos llamados “de quintaesencia” los más estudiados.

**ÉPOCA DOMINADA POR LA MATERIA.** En los modelos del Big Bang, es la época posterior a los 60 mil años de vida del universo, cuando la densidad de la materia relativista (radiación) se hace menor que la de la materia no relativista. Es, en principio, a partir de este momento que se puede iniciar la formación de estructuras astrofísicas. Sin embargo, la materia bariónica tardará un poco más en estructurarse, debido a su fuerte acoplamiento con la radiación, que frenará todo intento de amplificación de los grumos de materia ordinaria. De ahí la importancia que tiene la materia oscura (fría), ya que esta última, que no interactúa con la radiación, podrá comenzar a aglutinarse apenas comenzada la época dominada por la materia, y serán luego los bariones los que se verán atraídos a los grumos de materia oscura, una vez logrado su desacople. La materia oscura permite entonces comenzar antes –varios cientos de miles de años antes– el proceso de formación de estructuras que, de otra manera, no podríamos llegar a explicar.

**ÉPOCA DOMINADA POR LA RADIACIÓN.** En los modelos del Big Bang, la evolución cosmológica está dominada por la radiación, desde épocas muy tempranas y hasta que el universo llega a unos 30 mil años de vida. Será luego la densidad en materia no relativista la que dominará el universo hasta la actualidad (o hasta valores de corrimientos al rojo  $z$  pequeños, si el universo es realmente dominado por un término de constante cosmológica como lo indican las observaciones actuales). Durante la época dominada por la radiación toma lugar, por ejemplo, la llamada nucleosíntesis primordial, período durante el cual se construyen los núcleos de los átomos más livianos del universo.

**ESFÉRICO (ESPACIO).** Espacio tridimensional empleado en cosmología como una de las alternativas de los modelos del Big Bang. Su geometría puede visualizarse como la superficie de una esfera en tres dimensiones. Su curvatura es positiva; la suma de los ángulos interiores de un triángulo siempre suman más de  $180^\circ$ ; y dos geodesias que parten en direcciones paralelas terminarán por converger, de la misma manera que los meridianos terrestres, paralelos a la altura del Ecuador, se cortan en los polos de la Tierra.

**ESPACIO-TIEMPO.** La unión del espacio (tridimensional) y del tiempo (la cuarta dimensión), que constituye uno de los postulados de la teoría especial de la relatividad. Con la presencia de materia-energía, en el marco de la relatividad general, este espacio-tiempo de cuatro dimensiones se deforma y se curva. Con ciertas limitaciones, puede verse como la superficie de una "tela", dinámica y deformable, en donde ocurren los eventos de la historia del universo.

**ESPACIO-TIEMPO ABSOLUTO.** En la teoría newtoniana se supone implícitamente que las medidas de tiempo y las medidas de longitud de los cuerpos físicos son independientes del sistema de referencia y del estado de movimiento del observador. Esto cambia con la relatividad especial de Einstein.

**ESPECTRO.** Separación de la luz de acuerdo con su longitud de onda. El espectro de un elemento dado o compuesto contiene líneas espectrales características.

**ESPECTROSCOPÍA.** Método de separación de la luz en los distintos «colores» que la forman para obtener su espectro. Permite conocer la composición de objetos astronómicos a partir de sus líneas espectrales.

**ESPÍN.** Momento angular intrínseco, se refiere a una propiedad física de las partículas subatómicas, por la cual toda partícula tiene algo semejante a un momento angular intrínseco de valor fijo. Se trata de una propiedad intrínseca de la partícula como lo es la masa o la carga eléctrica. Pero

realmente es una propiedad cuántica que no tiene análogo clásico. Puede tomar valor entero o “semientero” de la unidad básica  $h/(2\pi)$ , donde  $h$  es la constante de Planck. En la física clásica (no cuántica) el valor de  $h$  es extremadamente pequeño, y propiedades como la del espín no son observables ni relevantes.

**ESTADO ESTACIONARIO (MODELO DEL).** Modelo cosmológico alternativo a los modelos del Big Bang, propuesto por Bondi, Gold y Hoyle que, hasta la década del 1960, contaba con muchos cosmólogos adeptos. Se basa en el llamado “principio cosmológico perfecto”, extensión del principio cosmológico también a la coordenada temporal, según el cual el universo debe ser isótropo y homogéneo para todo posible observador y, además, debe mostrarse idéntico a sí mismo en todo instante de tiempo. Este modelo es compatible con un universo en expansión, aunque se opone a la idea de evolución, y por ende a la de un universo que alguna vez fue diferente del presente, como lo afirman los modelos del Big Bang. Para evitar que la distribución de materia se diluyese por la expansión cosmológica, se debió inventar un mecanismo *ad hoc* de creación continua de materia, de aproximadamente un átomo de hidrógeno por metro cúbico, cada 10 mil millones de años. Luego de varias observaciones contrarias a sus predicciones teóricas, el modelo del estado estacionario sobrevive tan solo entre unos pocos “irrompibles”.

**ESTRELLAS DE NEUTRONES.** Estrellas extremadamente densas producto del colapso gravitacional de estrellas de muy alta masa. Están compuestas casi enteramente de neutrones, que son partículas subatómicas sin carga eléctrica y masa similar a la de los protones, y su densidad es semejante a la que resultaría de compactar el Sol a una esfera de 10 km de radio.

**ÉTER.** Medio material hipotético a través del cual se pensó una vez que se propagaban las ondas electromagnéticas de

**EXOPLANETAS.** Todos aquellos planetas que orbitan alrededor de una estrella que no es el Sol.

**ESPACIO-TIEMPO.** Espacio matemático cuyos puntos deben ser especificados por las coordenadas espacial y temporal.

**FERMIÓN.** Tipo de partícula fundamental de la materia con espín semientero.

**FÍSICA CLÁSICA.** Cualquier teoría de la física en la cual se suponga que el universo tiene una sola historia, bien definida.

**FORMULACIÓN ASCENDENTE, O DE ABAJO ARRIBA.** En cosmología, idea basada en la suposición de que hay una sola historia del universo, con un punto de partida bien definido, y que el estado actual del universo procede de la evolución de aquel inicio.

**FORMULACIÓN DESCENDENTE, O DE ARRIBA ABAJO.** Formulación de la cosmología en que se traza la historia del universo de «arriba abajo», es decir desde el momento presente hacia atrás.

**FOTÓN.** Bosón que transporta la fuerza electromagnética; partícula cuántica de la luz.

**FUERZA ELECTROMAGNÉTICA.** La segunda fuerza más intensa de las cuatro fuerzas de la Naturaleza. Actúa entre partículas cargadas eléctricamente.

**FUERZA NUCLEAR DÉBIL.** Una de las cuatro fuerzas de la naturaleza. La fuerza débil es la responsable de la radiactividad y desempeña un papel decisivo en la formación de los elementos en las estrellas y en el universo primitivo.

**FUERZA NUCLEAR DÉBIL.** Una de las cuatro fuerzas de la naturaleza. La fuerza débil es la responsable de la radiactividad y desempeña un papel decisivo en la formación de los elementos en las estrellas y en el universo primitivo.

**FUERZA NUCLEAR FUERTE.** La más intensa de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Mantiene unidos los protones y neutrones en el interior de los núcleos atómicos. También mantiene la cohesión interna de protones y neutrones, lo cual es necesario, ya que están formados por partículas aún más pequeñas, los quarks.

**FERMIÓN.** Partícula con cantidad "semientera" de la unidad básica de espín  $h/(2\pi)$  -esto es  $-3/2$ ,  $-1/2$ ,  $1/2$ ,  $3/2$ , etc., multiplicados por  $h/(2\pi)$ -, donde  $h$  es la constante de Planck. Son típicamente partículas de materia. Por ejemplo, los nucleones (también llamados bariones, como los protones y los neutrones) son fermiones; los electrones y los neutrinos (llamados leptones) también son fermiones. Deben su nombre al físico italiano Enrico Fermi (1901-1954).

**FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS.** Es la rama de la física que estudia los constituyentes más básicos de la materia, y para acceder a los cuales muchas veces es preciso el empleo de potentes aceleradores de partículas. Esta área busca también comprender las distintas interacciones o fuerzas fundamentales de la física, como las fuerzas nucleares débil y fuerte.

**FOTÓN.** Cuanto o corpúsculo de luz, es una unidad discreta de energía del campo electromagnético. El fotón es la "partícula" sin masa que transmite la interacción electromagnética. Su energía es proporcional a la frecuencia de la radiación. El valor de espín del fotón es 1 (es un bosón) y él es su misma antipartícula.

**FRECUENCIA.** Es el número de ciclos por unidad de tiempo de un fenómeno cíclico, por ejemplo, una onda electromagnética (véase **Longitud de onda**).

**FRIEDMANN (ECUACIÓN DE).** La ecuación que determina la evolución del universo, bajo las hipótesis de un universo isótropo y homogéneo. Se obtiene de las ecuaciones de la relatividad general y expresa la conservación de la energía total del universo. Su solución indica la manera en la que la distancia de

dos puntos (galaxias) suficientemente alejados del universo se modifica con el tiempo.

**FRIEDMANN-LEMAÎTRE (UNIVERSOS DE).** Una clase general de modelos cosmológicos que suponen que el universo a las mayores escalas astrofísicas es homogéneo e isótropo, y que evoluciona en el tiempo. Estos son los modelos del Big Bang a los que nos referimos en el capítulo 6.

**GALAXIA.** Es un sistema astronómico sujeto a la fuerza de gravedad, compuesto por estrellas, remanentes estelares, gas, polvo interestelar, más un componente aún misterioso llamado materia oscura. Las galaxias suelen contener múltiples sistemas estelares y planetarios (como el sistema solar, que forma parte de la Vía Láctea, la galaxia que habitamos), cúmulos de estrellas y nubes interestelares. El sistema rota alrededor de su centro de masa. Se estima que el universo observable contiene más de 100 000 millones de galaxias, con diámetros que oscilan entre unos 3 000 y 30 000 años luz, separadas entre ellas por distancias de millones años luz. El espacio intergaláctico contiene un tenue gas, con densidades del orden de un átomo por metro cúbico.

**GALAXIAS DE NÚCLEO ACTIVO.** Son galaxias en cuyo centro hay una región de muy alta luminosidad en algunas o todas las regiones del espectro electromagnético. Son las fuentes persistentes de radiación electromagnética más luminosas del Universo.

**GALAXIA ENANA.** Es una galaxia pequeña, compuesta por algunos miles de millones de estrellas, en comparación con la Vía Láctea, que podría alcanzar los 400 000 millones de estrellas.

**GALAXIA ESPIRAL.** Es una estructura astronómica con la forma de un disco chato con brazos en espiral. El disco rota y está compuesto por estrellas, gas y polvo interestelar, con un núcleo central de estrellas conocido por el nombre de bulbo (en inglés *bulge*). Las estrellas del núcleo están rodeadas por una



aureola o halo más débil de estrellas, muchas de las cuales forman cúmulos globulares (*globular clusters*). La Vía Láctea pertenece a esta categoría de galaxias.

**GAMMA (RAYOS).** Radiación electromagnética de muy alta energía y poder de penetración. Se considera rayos gamma a aquellos fotones con longitudes de onda inferiores al angstrom, y frecuencias mayores que aproximadamente  $10^{19}$  Hz.

**GEOCÉNTRICAS (COSMOLOGÍAS).** Grupo de antiguos modelos cosmológicos en los que la Tierra permanecía quieta en el centro del universo y el Sol, la Luna, los planetas, e incluso las estrellas ("fijas" sobre una gran esfera), revolucionaban a su alrededor.

**GIGANTES ROJAS.** Etapa tardía en la vida de una estrella, cuando ha gastado como combustible todas sus reservas de hidrógeno y la estrella se expande y su superficie se enfría, convirtiéndose en gigante y roja.

**GRAN UNIFICACIÓN (TEORÍAS DE).** Clase especulativa de teorías de las interacciones fundamentales, en las que se trata de describir al electromagnetismo y a las fuerzas nucleares fuerte y débil bajo un mismo marco teórico, consistente y unificado. Solo la gravitación es dejada de lado. La unificación última se daría a la escala de Planck y debería incluir también el campo gravitatorio. Las teorías "gran unificadas" (llamadas GUTs, acrónimo de *Gran Unified Theories*) intentan explicar las distintas fuerzas de la naturaleza como manifestaciones "de baja energía" de una única "súper fuerza" que habría dominado en épocas ultra primordiales.

**GRAVITATORIA (FUERZA).** Es la más débil de las cuatro interacciones fundamentales de la física. Fue primero descripta por la teoría de la gravitación universal de Newton y luego por la teoría general de la relatividad de Einstein.

**GRAVITINO.** Hipotética partícula fermiónica *partner* del gravitón, y cuya existencia es predicha por las teorías de supergravedad, que generalizan la relatividad general de Einstein.

**GRAVITÓN.** Partícula sin masa que cristaliza la supuesta cuantificación del campo gravitatorio, de la misma manera que el fotón es la partícula asociada al campo electromagnético. El gravitón es el mediador de la interacción gravitatoria, como el fotón lo es de la interacción electromagnética y, en el marco de una teoría cuántica de la gravedad apropiada, puede verse como un cuanto de la curvatura del espacio-tiempo.

**GRUPO LOCAL DE GALAXIAS.** Asociación de aproximadamente treinta galaxias cercanas a la nuestra y que se hallan ligadas gravitacionalmente. Es el cúmulo de galaxias al que pertenece la Vía Láctea y que tiene una dimensión de aproximadamente 1,0 Mpc. Las dos mayores del grupo son la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda.

**HADRÓN.** Del griego *hadros*: robusto o pesado. Una de las dos familias de partículas elementales que forman toda la materia. Todos los hadrones se componen de quarks e interactúan a través de la fuerza nuclear fuerte. Los nucleones (neutrones y protones) son ejemplos de bariones, esto es, hadrones compuestos por tres quarks; los mesones son hadrones que se componen de dos quarks; existen muchos otros hadrones de mayores masas.

**HALO.** La “nube” aproximadamente esférica que rodea a las galaxias espirales. Contiene estrellas viejas y su masa excede con creces la masa del disco de la galaxia.

**HELIOCÉNTRICA (COSMOLOGÍA).** Modelo cosmológico en el cual es el Sol (y no la Tierra) el centro del universo. Alrededor de este se desplazan planetas y estrellas a distintas distancias. Es una buena aproximación si nos restringimos a distancias inferiores al tamaño del sistema solar, pero dista mucho de la

realidad cuando tenemos en cuenta el desplazamiento del Sol dentro de la Vía Láctea, el movimiento de “caída” de nuestra galaxia hacia el cúmulo de Virgo, la caída de Virgo hacia la concentración de masa llamada el Gran Atractor, etcétera.

**HIPERBÓLICO (ESPACIO).** Espacio tridimensional empleado en cosmología como una de las alternativas de los modelos del Big Bang. Su geometría puede visualizarse como la superficie de una silla de montar, pero en tres dimensiones. Su curvatura es negativa; la suma de los ángulos interiores de un triángulo siempre suman menos de 180 grados; dos geodésicas que parten en direcciones paralelas terminarán por diverger.

**HISTORIAS ALTERNATIVAS.** Formulación de la teoría cuántica en la cual la probabilidad de cada observación es construida a partir de todas las historias posibles que podrían haber conducido a esa observación.

**HORIZONTE DE PARTÍCULAS.** También llamados horizontes cosmológicos, estos cristalizan la idea de que en cosmología no es posible observar más allá de una cierta distancia finita a través del espacio. Nuestro horizonte está dado por la distancia que la luz ha podido recorrer desde las épocas más tempranas del universo. Objetos ubicados fuera de nuestro horizonte no han tenido aún el tiempo de hacernos llegar su señal.

**HORIZONTE (PROBLEMA DEL).** Problema cosmológico asociado con la extrema uniformidad a gran escala del universo, esto es, con el hecho de que regiones separadas por grandes distancias, mucho mayores que la distancia que un rayo de luz puede cubrir en toda la historia del universo, nos muestran, sin embargo, idénticas propiedades, como por ejemplo la temperatura y las anisotropías de la radiación cósmica del fondo de microondas. Es un problema que los modelos del Big Bang permiten plantear, sin ofrecer, sin embargo, una solución adecuada, más que la hipótesis de que el universo habría comenzado en un estado de uniformidad casi perfecta, asunción esta que no agrada a los cosmólogos. La solución de este problema

debe buscarse en algún modelo del universo primordial que complemente el Big Bang, como, por ejemplo, los modelos inflacionarios.

**HUBBLE (H, PARÁMETRO DE).** Parámetro que indica la tasa de expansión del universo, generalmente expresado en las unidades “kilómetros por segundo por megaparsec”. Es un parámetro que, en los modelos del Big Bang, varía con la **época cosmológica**; **para un tiempo** dado fijo,  $H$  es la constante de proporcionalidad entre la distancia a las galaxias y su velocidad de alejamiento, y fue introducida por Hubble, como resultado de sus observaciones, a fines de los años 1920. Aún hoy no se conoce su valor exacto con precisión. Los valores actuales comúnmente aceptados, estimados a partir de toda una variedad de observaciones astrofísicas independientes, son próximos a  $H = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (con pequeñas barras de error). Esta cifra nos indica que dos galaxias separadas por 1,0 Mpc, se estarán alejando a una velocidad de 70 km/s, debido a la expansión del universo. En modelos simples, la inversa de  $H$  (con unidades de tiempo) nos da una idea de la “edad del universo”, mientras que el producto de su inversa por la velocidad de la luz nos indica aproximadamente el tamaño del universo observable.

**HUBBLE (LEY DE).** Relación lineal aproximada que conecta la distancia a la que se hallan las galaxias lejanas con su velocidad de recesión o, equivalentemente, con el corrimiento al rojo ( $z$ ) que la luz procedente de estas galaxias sufre en su viaje hasta nosotros. Es válida para velocidades de alejamiento menores que la de la luz, lo que equivale a valores de  $z$  inferiores a la unidad. Galaxias que siguen precisamente esta ley (o en general, la relación de expansión dada por los modelos cosmológicos), se dice que están en el “flujo de Hubble”. En la práctica, como el universo cercano no es homogéneo, sino que existen grandes concentraciones de masa que ejercen su atracción gravitatoria sobre las galaxias (así como también inmensos vacíos), el movimiento real de estas se aparta un poco de este flujo. Para distancias suficientemente grandes, estas

velocidades “peculiares” son relativamente pequeñas y las velocidades de recesión medidas coinciden, en muy buena aproximación, con las dadas por el flujo de Hubble.

**INESTABILIDAD GRAVITACIONAL.** Es el proceso mediante el cual pequeñas fluctuaciones de densidad de materia crecen por autogravitación (recordemos que la gravitación es siempre atractiva). En el caso de tratarse de materia-energía con un cierto grado de presión interna, este crecimiento solo se da si la talla de las fluctuaciones excede un valor crítico dado, de tal manera que el “peso” de la materia gravitante sobrepase a la fuerza de la presión interna del gas que se le opone. La expansión del universo frena en cierto sentido esta inestabilidad, aunque no totalmente, y las fluctuaciones terminarán por crecer cada vez más, hasta convertirse eventualmente en las grandes estructuras astrofísicas que nos rodean hoy.

**INFLACIÓN CÓSMICA.** Hipotético período primordial durante el cual el universo se habría expandido en forma dramática (explosiva) impulsado por una suerte de energía de vacío cósmica. Los modelos inflacionarios surgen de la unión de las teorías de gran unificación y de la cosmología.

Estos modelos proponen que una cierta etapa inflacionaria se habría iniciado en los primeros  $10^{-35}$  s de vida del universo y, según muchos cosmólogos, sería el responsable del “Bang” de los modelos del Big Bang. La inflación resuelve algunos de los problemas de los modelos de la cosmología estándar, como el problema de la planitud espacial, y el problema del horizonte; brinda además el mecanismo adecuado para la generación de pequeñas fluctuaciones en la densidad de la materia, que estarían a la raíz de la generación de las grandes estructuras astrofísicas que existen en el universo actual.

**INFLATÓN.** Nombre dado a cualquier tipo de campo de gran unificación responsable de desencadenar un período inflacionario.

**ION.** Es un átomo o molécula con carga eléctrica positiva o negativa por haber perdido o ganado, respectivamente, uno o más electrones.

**IONIZACIÓN.** Es el proceso que convierte a un átomo o molécula en un ion, por adición o sustracción de electrones.

**IONIZADA (MATERIA).** Forma de materia en la que los átomos se encuentran separados en núcleos atómicos cargados eléctricamente (llamados iones) y electrones libres. Los gases ionizados interactúan fuertemente con la radiación y por ello, por ejemplo, durante las épocas tempranas de nuestro universo, la radiación se encontraba estrechamente ligada a la materia.

**ISÓTOPO.** Núcleo atómico que posee idéntico número de protones que la especie más común, pero con un número diferente de neutrones. Por ejemplo, el núcleo del hidrógeno está formado por solo un protón; el deuterio es un isótopo del hidrógeno con un protón y un neutrón, mientras que el tritio es un isótopo aún más pesado pues contiene un protón y dos neutrones.

**ISOTROPÍA.** Que no depende de la dirección. En cosmología, el universo se dice isótropo si, para un dado observador, presenta iguales características en todas las direcciones.

**JOVIANOS.** Planetas gigantes que poseen una superficie gaseosa. Los planetas jovianos del sistema solar son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

**KELVIN.** Unidad de la escala absoluta de temperaturas, en la que el cero absoluto, o cero kelvin, corresponde a 273,15 grados por debajo del punto de congelamiento del agua. Se usa a veces acompañado de la palabra "grado" (como en "la temperatura ambiente es de 295 grados kelvin"); esto último, sin embargo, es incorrecto. A partir del año 1968 se decidió que la unidad sería 295 kelvin (o 295 K) y no "295 grados kelvin". El nombre de esta unidad fue elegido en honor al físico irlandés William

Thomson (1824-1907), Lord Kelvin of Largs (Netherhall in Largs, Escocia.)

**KILOPARSEC.** Distancia equivalente a 1 000 pc o bien  $3,086 \cdot 10^{21}$  cm.

**LENTE GRAVITATORIAS.** Concentraciones de materia, como, por ejemplo, galaxias o cúmulos galácticos (o incluso el Sol), que “tuercen” la trayectoria de la luz de las estrellas o cuásares lejanos. Es una predicción de la relatividad general, teoría según la cual el espacio en las vecindades de grandes concentraciones de materia se curva (se “hunde”) modificando así las geodésicas de partículas o fotones que pasan cerca. De hallarse una dada concentración de materia a lo largo de la línea de visión, se formarán varias imágenes del mismo objeto ubicado por detrás de la “lente” (el deflector). Estas imágenes, a modo de espejismos, estarán más o menos deformadas, de acuerdo con la geometría fuente-deflector-observador.

**LEPTON.** Del griego *leptos*: fino o liviano. Una de las dos familias de partículas elementales que forman toda la materia. Se compone de seis miembros: las partículas llamadas electrón, muon y tau, con sus correspondientes neutrinos (a estos deben sumárseles también sus antipartículas).

**LIBERTAD ASINTÓTICA.** Propiedad de la fuerza fuerte que hace que esta se haga más débil a distancias más cortas. Por lo tanto, aunque los quarks estén confinados en las partículas de los núcleos por la fuerza fuerte, pueden moverse en el interior de ellas como si no notaran fuerza alguna.

**LÍNEA DE UNIVERSO.** La trayectoria o “camino” seguido por las partículas en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Es el análogo a la distancia entre dos puntos distintos del espacio tridimensional usual. En el espacio-tiempo, los “puntos” se llaman eventos (ya que incluyen un punto espacial y un tiempo). Aunque un objeto se quede quieto en el mismo lugar del espacio (y por lo tanto, la distancia tridimensional recorrida es nula), su línea de mundo SI tendrá una cierta longitud, ya que

el “intervalo temporal” entre dos eventos dados no es nula (el tiempo pasa).

**LÍNEAS ESPECTRALES.** Líneas distintivas en los espectros de emisión o absorción que se detectan de objetos astronómicos a determinadas longitudes de onda. Son causadas por transiciones atómicas o moleculares. En los átomos, es el resultado del «salto» de un electrón de uno de los estados cuánticos permitidos a otro. El electrón pasa a un estado más energético si el átomo absorbe un cuanto de luz con la energía apropiada (justo la energía diferencia entre los dos estados de la transición). Por el contrario, al desexcitarse el átomo, el electrón pasará a un estado de menor energía y resultará en la emisión de un cuanto de luz.

**LONGITUD DE ONDA.** Es la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda. Se simboliza con la letra griega minúscula lambda. Es inversamente proporcional a la frecuencia, que indica número de ciclos por unidad de tiempo y se mide en hercios (Hz) (un hercio es un ciclo por segundo). Para las ondas electromagnéticas el producto de la frecuencia y la longitud de onda es igual a la velocidad de la luz. Múltiplos comunes del hercio, para referirse a ondas de radio, son el megahercio ( $1,0 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$ ) y el gigahercio ( $1,0 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$ ), respectivamente un millón y mil millones de veces mayores.

**LUMINOSIDAD.** El brillo intrínseco de una estrella. Generalmente, se la define en función de su magnitud absoluta.

**M (TEORÍA).** Teoría “Madre” que une varias teorías de supercuerdas dentro de un marco matemático más general. Está formulada en varias dimensiones (por encima de las 3 espaciales + 1 temporal); estas dimensiones suplementarias se habrían luego compactificado, resultando en nuestro espacio-tiempo estándar, de cuatro dimensiones. Es una teoría que permitiría describir el universo hasta épocas tan primordiales como la época de Planck, en la que las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo no pueden ya dejarse de lado.



**MAGNITUD.** Es la medida (en escala logarítmica) usada para medir el brillo de un objeto astronómico. Se define de tal forma que números menores corresponden a brillos mayores; disminuir el brillo en una magnitud equivale a un factor de aumento de aproximadamente 2,5 en luminosidad. Una diferencia de cinco magnitudes corresponde a un factor  $100 = (2,512)^5$  en luminosidad, y una diferencia de 10 magnitudes corresponde a un factor 10 000 en luminosidad. Esta medida de luminosidad se emplea desde los tiempos de Hiparco, en el siglo II a.n.e., y obedece al hecho de que la sensibilidad del ojo humano a la intensidad de la luz es logarítmica.

**MAGNITUD ABSOLUTA (M).** Unidad que expresa la luminosidad intrínseca de un astro, esto es, la energía por unidad de tiempo emitida por el objeto astronómico. Por ejemplo, el Sol tiene una magnitud absoluta de +4,83; mientras que Sirio, cuyo brillo intrínseco es mayor, tiene una magnitud absoluta de +1,43.

**MAGNITUD APARENTE (m).** Expresa la luminosidad de los astros vista desde la Tierra, independientemente de su verdadera distancia. En general, las estrellas más brillantes del cielo tienen magnitud aparente  $m = 1$ ; las más débiles tienen  $m = 6$ . El Sol, la de mayor magnitud aparente tiene un valor negativo:  $m = -26,74$ ; mientras que la Luna llena tiene  $m = -12,5$  y Venus  $m = -4$ . La estrella más brillante de nuestro cielo nocturno es Sirio, con una magnitud aparente de  $m = -1,46$ . Durante una noche clara, el ojo humano distingue estrellas débiles de hasta magnitud aparente +6, y los grandes telescopios logran detectar objetos hasta magnitudes aparentes de aproximadamente unos +30.

**MATERIA OSCURA.** Toda forma de materia que no emite ningún tipo de radiación electromagnética (luz visible, rayos infrarrojos, ondas de radio, etcétera) que podamos detectar, y cuya presencia debe inferirse por mediciones dinámicas. Esto es, solo la gravitación de esta materia no visible nos da indicio de su existencia. Hay pruebas observacionales de la existencia

de materia oscura en las galaxias y cúmulos galácticos, posiblemente en forma de restos de estrellas masivas, de estrellas frustradas que nunca iniciaron la combustión nuclear o en forma de objetos de tipo planetas con masas como la de Júpiter. Se estima que la materia oscura es responsable de una parte sustancial de la masa del universo, mayor incluso que la materia visible. Los físicos que estudian las partículas elementales a muy altas energías han propuesto numerosos candidatos para la materia oscura, a veces llamados WIMPs.

**MATERIA OSCURA FRÍA.** Materia solo detectable por sus efectos gravitacionales, presumiblemente un tipo de partícula desconocida relativamente masiva que se mueve a velocidades mucho menores que la velocidad de la luz (velocidades no relativistas) y que interactúa muy débilmente con la materia ordinaria con gran importancia alrededor de la época en que la sustancia comienza a dominar la expansión del universo. Esta materia oscura permite que la formación de estructuras astrofísicas comience antes de la época del desacople de los bariones y la radiación.

**MATERIA BARIÓNICA.** Materia normal formada por los constituyentes del modelo estándar de partículas entre las que se encuentran protones, neutrones y electrones constituyentes del átomo con sus correspondientes antipartículas.

**MEGAPARSEC.** Unidad de distancia equivalente a un millón de parsecs, o bien  $3,086 \cdot 10^{24}$  cm.

**MESÓN.** Tipo de partícula elemental que está formado por un quark y un antiquark.

**MODELO COSMOLÓGICO.** Se llama así a una descripción matemática del estado actual y evolución en el tiempo del universo. Para que tenga validez, los resultados de sus ecuaciones deben coincidir con las observaciones, e incluso, predecir fenómenos que confirmen observaciones futuras. Los modelos actuales se basan en las ecuaciones de la teoría general de la relatividad de Einstein y fueron desarrollados, entre

otros, por el holandés Willem De Sitter (1872-1934), el belga Georges Lemaître (1894-1966) y el ruso Alexander Friedmann (1888-1922).

**MODELO DE MATERIA OSCURA FRÍA CON CONSTANTE COSMOLÓGICA (O LAMBDA-CDM).** Es un modelo cosmológico que concuerda con la teoría del Big Bang y que explica resultados que coinciden con las observaciones de grandes estructuras cósmicas, la luminosidad de las supernovas lejanas y la expansión del universo.

**MONOPOLO MAGNÉTICO.** Partícula predicha por las teorías de gran unificación y cuya excesiva abundancia presenta un serio problema para los modelos del Big Bang. Puede verse como un imán con un solo polo, jamás descubierto en los experimentos, y que resulta ser excesivamente masivo, teniendo en cuenta las energías a las que se habría originado (tan solo tres órdenes de magnitud por debajo de la escala de Planck). La inflación cosmológica surgió como una posible solución de este problema del exceso de monopolos magnéticos.

**MOND (*Modified Newtonian Dynamics*).** Teoría alternativa a la dinámica Newtoniana, propuesta por Mordehai Milgrom, y que consiste básicamente en modificar la segunda Ley de Newton. La motivación de esta modificación es la de explicar la elevada velocidad de rotación que se mantiene casi constante en la parte externa del disco de las galaxias espirales.

**MONOPOLOS MAGNÉTICOS (PROBLEMA DE LOS).** Un problema que surge de la unión de las teorías de gran unificación y la cosmología estándar. La producción temprana de un número excesivo de monopolos cambiaría drásticamente la evolución e historia pasada de nuestro universo. La inflación diluye el número de monopolos observables, de manera de hacerlos compatibles (o, al menos, no nocivos) con la cosmología.

**MUÓN.** partícula subatómica de la familia de los leptones (leptón de segunda generación), unas 200 veces más masiva que el electrón e inestable. Se crea por colisiones de rayos cósmicos.

**MULTIVERSO.** Conjunto de universos que hipotéticamente pueden formar el mundo.

**NEUTRÓN.** Tipo de barión eléctricamente neutro que, con el protón, forma los núcleos de los átomos.

**NEBULAR (HIPÓTESIS).** Teoría de formación de nuestro sistema solar por la condensación y posterior colapso de una nube de gas lentamente rotante. En el proceso de colapso se forma un disco, del cual se irán separando los distintos planetas, por acumulación de materia debida a la atracción gravitatoria y al enfriamiento del gas. La región central, sometida a altas presiones, elevará su temperatura hasta “encenderse” en una estrella.

**NEBULOSA.** Con este nombre se llamaba a todo tipo de objetos “nebulosos” del cielo en una época en que los telescopios no lograban resolver los detalles de estas formaciones. Hoy, muchas de estas nebulosas son llamadas galaxias, aunque otras terminaron siendo cúmulos galácticos, restos de supernovas, o incluso nubes de gas ionizado en nuestra propia galaxia.

**NEUTRINO.** Partícula fundamental de la familia de los leptones (fino, liviano, del griego *leptos*). Partícula eléctricamente neutra, muy liviana (hasta hace poco tiempo se pensaba que no tenía masa) y muy débilmente interactuante (sujeta solo a la interacción nuclear débil y la gravedad).

**NEUTRÓN.** Partícula sin carga eléctrica que, junto con el protón, integra el núcleo de todos los átomos excepto el hidrógeno. Este nucleón está formado por tres quarks (es un barión). En el interior del núcleo, el neutrón es estable, pero fuera de él, sufre un decaimiento radiactivo en unos pocos minutos, convirtiéndose en un protón, un electrón y un antineutrino.

**NEWTON (G, CONSTANTE DE).** Constante de proporcionalidad que aparece en la expresión de la Ley de la gravitación de Newton. La relatividad general de Einstein, que relaciona la geometría del espacio-tiempo con la distribución local de

materia-energía, conserva a esta constante en su ecuación principal. Sin embargo, de acuerdo con algunas teorías alternativas a la relatividad general, o bien algunas teorías que buscan lograr la (gran) unificación de las interacciones fundamentales,  $G$  sería variable, variando, por ejemplo, con la época cosmológica.

**NEWTON (LEY DE LA GRAVITACIÓN DE).** Es la fuerza atractiva que existe entre dos partículas masivas. Esta fuerza es proporcional a la magnitud de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, cuya constante de proporcionalidad es la constante de Newton,  $G$ .

**NUCLEAR DÉBIL (FUERZA).** Una de las cuatro interacciones fundamentales de la física, responsable, en particular, de mediar el decaimiento radiactivo de los neutrones. Al igual que la fuerza nuclear fuerte, la débil es de corto alcance.

**NUCLEAR FUERTE (FUERZA).** La más fuerte de las cuatro interacciones fundamentales, responsable de mantener a los quarks confinados dentro de los neutrones y protones, y de mantener la integridad de núcleos con muchos neutrones y protones (cuando la repulsión eléctrica entre protones lo haría desmembrarse). Esta fuerza es de corto alcance y su distancia característica de acción es menor que  $10^{-15}$  m.

**NÚCLEO.** Como en la biología, en la cual el **núcleo denota la parte central de una célula**, aquí también el núcleo indica la parte central de un objeto, aunque esta vez se trata de los átomos, y se compone de protones y neutrones. En el núcleo se concentra virtualmente la casi totalidad de la masa del átomo.

**NUCLEOSÍNTESIS.** Formación (síntesis) de núcleos atómicos por medio de reacciones nucleares. De acuerdo con los modelos del Big Bang, la nucleosíntesis primordial habría ocurrido en los primeros tres minutos de la vida del universo, y se habrían generado en cantidades apreciables solo los núcleos más livianos (especialmente los núcleos del helio y del deuterio). Núcleos de elementos más pesados se crearán luego, en el interior de

las estrellas, proceso que se denomina nucleosíntesis estelar. Finalmente, las explosiones de supernovas generarán las condiciones extremas necesarias para la formación de los núcleos más pesados de la tabla periódica.

**OMEGA.** Importante parámetro cosmológico definido como el cociente entre la densidad de materia-energía real del universo y la densidad crítica. Un valor de Omega mayor (menor) que uno indica que la densidad de materia-energía real del universo es mayor (menor) que la crítica y, en consecuencia, que la geometría del espacio físico será esférica (hiperbólica) y de curvatura positiva (negativa). El valor crítico  $\Omega = 1$  indica, en cambio, un universo euclídeo (de curvatura nula) de densidad idénticamente igual a la crítica. Las observaciones actuales indican que Omega es muy próximo a la unidad y que el universo es espacialmente plano.

**PARSEC (PC).** Es una medida astronómica de distancia. Contracción de PARallax SECond. Se define como la distancia a la cual una unidad astronómica (1 ua) subtiende un ángulo de un segundo de arco ( $1''$ ), esto es,  $1 \text{ pc} = 1 \text{ ua} / 1''$ . En otras palabras, corresponde a la distancia a la que debemos alejarnos del sistema solar para que la distancia promedio Tierra-Sol (1 ua) se vea bajo un ángulo de un segundo de arco. Tenemos  $1 \text{ pc} = 206,265 \text{ ua} = 3,2616 \text{ al} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,086 \cdot 10^{18} \text{ cm}$ . La estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, está a 1,3 pc.

**PARTÍCULAS RELATIVISTAS.** Aquellas partículas cuyas velocidades características son próximas a la velocidad de la luz. En el caso de partículas sin masa en reposo, como los fotones de la radiación electromagnética, la velocidad es exactamente la de la luz.

**PERIHELIO.** Es el punto más próximo al Sol en la órbita de un planeta o cometa. Para la Tierra el paso por el perihelio cae aproximadamente el 3 de enero.

**PERIHELIO (AVANCE DEL).** De acuerdo con las leyes de Kepler y la mecánica newtoniana, las órbitas de los planetas alrededor

del Sol son elipses fijas en el espacio. Sin embargo, las perturbaciones debidas a los demás planetas del sistema solar hacen que estas elipses “no se cierren” o, lo que es lo mismo, que estas elipses cambien lentamente sus posiciones en el mismo plano que las contiene. Esto resulta en una modificación de la posición del perihelio (más precisamente, en un avance del perihelio). La relatividad general de Einstein agrega una pequeña corrección al cálculo newtoniano, que coincide exactamente con las discrepancias ya descubiertas, a fines del siglo XIX, entre las observaciones y la teoría newtoniana.

**PERTURBACIONES COSMOLÓGICAS.** Pequeñas inhomogeneidades en la distribución de materia del universo que dieron origen –por medio de la acción de la gravedad– a las grandes estructuras astrofísicas que nos rodean hoy. Uno de los más interesantes problemas de la cosmología actual es saber con precisión cómo fue que se originaron esas perturbaciones. En la actualidad existe un gran consenso entre los cosmólogos en afirmar que estas “semillas primordiales” se habrían originado durante una etapa inflacionaria de nuestro universo que habría tenido lugar cuando este tenía no más de  $10^{-35}$  s de vida.

**PLANCK (CONSTANTE DE).** Parámetro fundamental de la mecánica cuántica, indicado con la letra  $h$ . Es el parámetro que determina el tamaño característico de las unidades discretas de energía, espín, etc., en las cuales se fracciona el mundo subatómico.

**PLANCK (TIEMPO DE).** Instante de tiempo en los modelos del Big Bang, anterior al cual la teoría general de la relatividad de Einstein se quiebra, y debe ser reemplazada por una teoría cuántica de la gravedad. En función de constantes fundamentales de la física, el tiempo de Planck puede expresarse como  $[G h / (2\pi) / c^5]^{1/2}$ , donde  $G$  es la constante de Newton,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $h$  es la constante de Planck, y vale aproximadamente  $10^{-43}$  s.

**PLANCK (LONGITUD O ESCALA DE).** La escala de longitud característica por debajo de la cual las fluctuaciones cuánticas en la

“tela” espacio-temporal dejarían de ser despreciables. Es también la distancia que recorre un rayo de luz en un tiempo igual al tiempo de Planck.

**PLANCK (SATÉLITE).** Sonda diseñada para detectar las anisotropías en el fondo cósmico de microondas en casi todo el cielo menos un octavo, con una resolución y sensibilidad sin precedentes.

**PLANITUD (PROBLEMA DE LA).** Un problema de los modelos del Big Bang relacionado con la precisión con que se debe ajustar el valor inicial del parámetro Omega, el cociente entre la densidad real del universo y la densidad crítica. Omega varía su valor con el tiempo y, de no ser exactamente uno, se aparta rápidamente de este valor. Las observaciones actuales indican que Omega debe estar cerca de la unidad, y eso implica que su valor en épocas de la nucleosíntesis primordial (unos pocos minutos después de la singularidad) no podía diferir de uno en más que una parte en  $10^{15}$ . De no ser así, el universo que resultaría diferiría mucho del nuestro. Los modelos del Big Bang proveen el marco adecuado para que surjan este tipo de interrogantes, aunque no proveen la solución; esta solución quedará para modelos primordiales que complementen el Big Bang, como, por ejemplo, los modelos inflacionarios.

**PLANO (ESPACIO).** Sinónimo de espacio Euclídeo, en el que las propiedades geométricas usuales deducidas de los postulados de Euclides tienen validez. En cosmología se refiere al espacio físico de tres dimensiones espaciales y sin curvatura.

**PLANO (UNIVERSO).** Universo de extensión infinita en el que el espacio está exento de curvatura. A un universo isótropo y homogéneo se le llama plano si se encuentra justo en la línea divisoria que separa los universos llamados de baja densidad y los de alta densidad (estos últimos, a veces, también llamados universos “cerrados”). Si la constante cosmológica es cero, un universo plano continuará su expansión indefinidamente, pero cada vez con menor velocidad (hasta detenerse “en el



infinito", un balance exacto entre su energía cinética de movimiento y su energía potencial gravitatoria). En un universo plano, la densidad real de materia-energía es siempre igual a la llamada densidad crítica, y por ende el parámetro Omega es igual a la unidad.

**PLASMA.** Un gas completamente ionizado, a veces llamado el cuarto estado de la materia (además de los estados sólido, líquido y gaseoso). En un plasma la temperatura es demasiado alta como para que existan átomos neutros, y la materia se separa en núcleos atómicos y electrones libres.

**POLARIZACIÓN.** Restricción en el modo de vibración de una onda transversal, como las ondas electromagnéticas. En estas ondas, los campos eléctrico y magnético son ortogonales entre sí y vibran en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La restricción que hace que, por ejemplo, el campo eléctrico solo vibre en una dada dirección fija sobre este plano, y no en todas las posibles, resulta en un estado de polarización lineal. La polarización o cambio del estado de polarización de la luz se logra con polarizadores. La interacción de la radiación con partículas cargadas también polariza a la luz.

**POSITRÓN.** La antipartícula del electrón.

**PRINCIPIO ANTRÓPICO.** Enunciado que afirma que el estado actual de nuestro universo puede explicarse por el hecho de que, de ser distinto, no existirían las condiciones adecuadas para la vida y entonces no habría lugar para observadores (como nosotros) capaces de preocuparse sobre por qué el universo es como es. Por ejemplo, si la fuerza nuclear fuerte fuera apenas diferente de lo que es en la actualidad, la combustión termonuclear estelar sería distinta, las estrellas no brillarían como lo hacen en la realidad y la vida como la conocemos no tendría lugar. Se separan comúnmente dos definiciones en este principio. El principio antrópico "débil"

y el “fuerte”. El primero afirma que los valores observados de todas las cantidades físicas y cosmológicas, no son igualmente probables, sino que toman valores restringidos por el requerimiento que deben existir lugares en el cosmos en los que la vida basada en la química del carbono pueda evolucionar, y por el requerimiento adicional que el universo sea lo suficientemente viejo como para haber permitido dicha evolución. Por otro lado, el principio antrópico “fuerte” afirma que el universo debe poseer aquellas propiedades que permitan la evolución de la vida en algún momento de su historia. Esta separación fue introducida por Brandon Carter, en 1974.

**PRINCIPIO COSMOLÓGICO (O COPERNICANO).** La hipótesis que afirma que nuestra ubicación espacial en el universo no debe ser privilegiada, que el universo debe resultar aproximadamente isótropo y homogéneo para todo posible observador.

**PRINCIPIO COSMOLÓGICO PERFECTO.** La extensión del principio cosmológico también al tiempo: el universo no solo debe ser isótropo y homogéneo para todo posible observador, sino que, además, debe mostrarse idéntico a sí mismo en todo instante de tiempo. Nótese que esto no prohíbe la expansión, aunque SI prohíbe un origen de los tiempos y un universo evolutivo. Este principio está en la raíz del modelo del estado estacionario.

**PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG.** Ley de la teoría cuántica que establece que ciertos pares de magnitudes físicas no pueden ser conocidos simultáneamente con precisión arbitraria.

**PROTOESTRELLAS.** Densas concentraciones de gas y polvo en el seno de nubes moleculares frías que constituyen el estadio inicial de la constitución de las estrellas.

**PROTÓN.** Partícula subatómica con carga eléctrica. Unidad que, junto con el neutrón, integra el núcleo de todos los átomos (es un nucleón). El número de protones de un núcleo atómico

define al elemento: el hidrógeno tiene siempre solo un protón como núcleo, el helio tiene siempre solo dos protones en su núcleo, etc., independientemente del número de neutrones que compartan ese núcleo (que no hacen más que cambiar el isótopo de dicho elemento).

**QUARK.** Partícula fundamental con carga eléctrica fraccionaria y sensible a la fuerza nuclear fuerte. Los quarks existen en seis variedades (o "sabores"): *up* (u), *down* (d), *charm* (c), *strange* (s), *top* (t), *bottom* (b), y en tres "colores": rojo, verde y azul. Por ejemplo, tres quarks forman el protón (uud), pero deben ser los tres de colores distintos, de tal manera que estos, al neutralizarse, den un protón "sin color", como en efecto se verifica experimentalmente. El nombre quark está asociado con el número "tres"; de acuerdo con el físico Murray Gell-Mann, fue sacado de la novela *Finnegans Wake*, de James Joyce: "*Three quarks for Muster Mark!*".

**QUASAR (O CUÁSAR).** Los objetos extra galácticos más luminosos (y lejanos) del universo. Su nombre proviene de la contracción de *Quasi Stellar Radio Sources* (Q.S.R.S), acrónimo que en inglés suena como "*quasars*" y que significa fuentes (de radio) altamente energéticas de apariencia estelar. Se piensa que son poderosos núcleos de galaxias activas.

**QUINTAESENCIA.** El quinto y más puro elemento en la filosofía antigua y medieval, que constituye la sustancia de la cual están hechos los astros.

En cosmología moderna, se da el nombre campos de quintaesencia a ciertas formas hipotéticas de energía oscura que podrían dar cuenta de las observaciones actuales que indican un movimiento de expansión acelerada para nuestro universo. Es un tipo de "energía del vacío", que actúa como un campo repulsivo, y puede variar en escalas de tiempo cosmológicas. A diferencia de la constante cosmológica de Einstein (otra forma de energía oscura), los campos de quintaesencia no permanecerían constantes en el tiempo, pudiendo incluso tener

fluctuaciones cuánticas, que harían su dinámica menos trivial y más fácilmente amoldable a las estrictas y variadas observaciones astrofísicas actuales.

**RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO.** *In extenso*, radiación cósmica del fondo de microondas. Es un fondo difuso de radiación de muy alto nivel de isotropía, cuya distribución de intensidad, en función de la frecuencia, corresponde al llamado espectro de cuerpo negro, y sigue con extrema precisión una curva teórica conocida como la curva de Plank. Vestigio del Big Bang, es un frío baño de radiación en la región de las ondas de radio y que hoy cuenta con unos pocos grados Celsius por encima del cero absoluto (2,725 K, para ser más precisos). Llega de todas las direcciones del universo y llena completamente el espacio intersidereal. La ley de Planck de su espectro es un fuerte indicio de la existencia, miles de millones de años atrás, de un estado de equilibrio térmico total entre todos los constituyentes del universo (partículas fundamentales, corpúsculos de radiación, etc.); equilibrio que se habría roto en un determinado momento (llamado “desacoplamiento”) y que habría dejado “escapar” este fondo de radiación. La presencia de este fondo es una característica distintiva de los modelos con un comienzo “caliente” y energético, como los del Big Bang. Fue descubierta, en 1965, por Arno Penzias y Robert Wilson, que recibieron el Premio Nobel de Física de 1978 por ello.

**RADIACIÓN DE HAWKING.** Tipo de radiación producida en el horizonte de sucesos de un agujero negro y debida, plenamente, a efectos de tipo cuántico.

**RAYOS CÓSMICOS.** Son partículas subatómicas (protones, neutrones y núcleos atómicos despojados de sus electrones) que ingresan en la atmósfera terrestre desde el espacio. Se las detecta en un rango muy amplio de energías, que llegan hasta  $10^{20}$  eV. Un protón con esa energía se mueve a velocidad muy cercana a la de la luz, y a pesar de su minúscula masa su

energía es equivalente a la de una pelota de tenis impulsada a 150 km/h.

**RAYOS GAMMA.** Son una forma de radiación electromagnética de onda muy corta y muy alta frecuencia (por encima de  $10^{19}$  Hz). Fueron descubiertos, en 1900, por el fisicoquímico francés Paul Villard (1860-1934) estudiando la radioactividad natural del uranio.

**RECOMBINACIÓN.** Proceso de captura de un electrón por un ion positivo que, en los modelos del Big Bang, sucede principalmente cuando un protón captura un electrón para formar un átomo de hidrógeno. Esta “recombinación” del hidrógeno neutro ocurre cuando el universo tenía una temperatura aproximada de unos 3 000 K. Sucede poco antes de la época del desacoplamiento pues, dado que la proporción de materia ionizada disminuye bruscamente durante la recombinación, la radiación, que interactúa muy poco con la materia neutra, se desacopla luego de esta.

**REIONIZACIÓN.** Luego de la formación de la materia neutra (durante la etapa de la recombinación del hidrógeno) el universo es en gran medida transparente a la radiación cósmica de fondo. Pero a los pocos cientos de millones de años, las primeras estrellas y cuásares comienzan a formarse. Estas potentes fuentes de radiación, que emiten en longitudes de onda cercanas al ultravioleta, terminarán por volver a ionizar a la materia neutra, dando lugar a un nuevo período en el que el universo se hallará ionizado; por eso se habla de “reionización”. Se considera comúnmente que la observación de ese período de reionización es un fuerte indicio del momento aproximado en el que se generaron las primeras estrellas, época en la que las “tinieblas cósmicas” llegan a su fin.

**RELATIVIDAD ESPECIAL.** Descripción de los fenómenos mecánicos y electromagnéticos que involucran fuentes y observadores desplazándose a velocidades próximas a la de la luz, pero en

ausencia absoluta de efectos gravitatorios. Fue propuesta por Einstein, en 1905, aunque varios otros científicos contemporáneos, tanto experimentales como teóricos, también contribuyeron a delinear sus bases.

**RELATIVIDAD GENERAL.** Descripción de la gravedad propuesta por Einstein, en 1916, en la cual la curvatura del espacio-tiempo tetradimensional surge de la distribución local de materia-energía, y, a su vez, el movimiento de la materia es afectado por la curvatura del espacio-tiempo, todo esto en una forma bien precisa, dictada por las ecuaciones del campo gravitatorio. La relatividad general (generalización de la relatividad especial) es la teoría que describe aquellos fenómenos mecánicos, gravitatorios y electromagnéticos que ocurren en presencia de campos gravitatorios fuertes y que involucran velocidades próximas a (o al menos, no mucho menores que) la de la luz. Estos últimos son los casos en los que la teoría de Einstein se aparta notoriamente de la gravitación de Newton, y son ejemplos típicos el estudio de objetos compactos, como los agujeros negros, y el estudio del universo.

**REMANENTES DE SUPERNOVAS.** Estructuras que se forman en el espacio como consecuencia de las explosiones de supernovas, y está compuesto por el material expelido por la estrella explotada, más el material que la onda expansiva encuentra en su camino y, eventualmente, una estrella de neutrones en su interior.

**RENORMALIZACIÓN.** Técnica matemática diseñada para eliminar los infinitos que aparecen en las teorías cuánticas.

**RETRÓGRADO (MOVIMIENTO).** Movimiento aparente de un planeta en dirección opuesta a la normal, producido por el movimiento orbital de la Tierra; en astronomía, este movimiento retrógrado corresponde a moverse –noche tras noche– de Este a Oeste.

**SEGUNDO DE ARCO.** Unidad angular usada en astronomía. Un segundo de arco (notado  $1''$ ) equivale a  $1/3\,600$  de un grado.

**SEGUNDO-LUZ.** La distancia recorrida en el vacío por un haz de luz en un segundo, esto es, aproximadamente unos 300 000 km.

**SINGULARIDAD.** Región del espacio-tiempo en la que las leyes conocidas de la física se quiebran, la “tela” espacio-temporal sufre una ruptura y la curvatura se hace infinita. Hoy se piensa que los modelos del Big Bang comienzan con una tal singularidad.

**SIRIO (ALPHA CANIS MAJORIS).** Ubicada en la constelación del Can Mayor, es llamada la Estrella Canicular, o a veces el Perro de Orión. Es la estrella de mayor brillo (aparente) del cielo, con una luminosidad aparente unas 26 veces menor que la del Sol. Se ubica a 8,7 años luz de la Tierra y tiene una estrella compañera (una débil enana blanca, y que orbita alrededor de la estrella principal) llamada Sirio B.

**SOL.** Estrella del sistema solar, alrededor de la cual orbita la Tierra y los demás planetas y cometas. Su edad se estima en unos 4 600 millones de años, y se halla a unos 27 000 años luz del centro de la galaxia, o sea a un 40 % de la distancia entre el centro y el borde del disco galáctico.

**SUPERCUERDAS (TEORÍA DE).** Teoría de cuerdas que incorpora una simetría adicional, llamada la supersimetría. Esta última postula un principio de simetría que relaciona partículas con distintas cantidades de espín, llamadas bosones (espín entero: -1, 0, 1, etc.) y fermiones (espín semientero: -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, etc.).

**SUPERCÚMULO GALÁCTICO.** Un cúmulo de cúmulos de galaxias, típicamente de un tamaño que ronda los 100 millones años luz.

**SUPERGRAVEDAD.** Teoría de la gravitación que tiene un tipo de simetría denominado supersimetría.

**SUPERNOVA (SN).** Una explosión estelar que puede manifestarse de forma muy notable, incluso a simple vista, en lugares de la esfera celeste en las que antes no se había detectado nada en particular. La violenta explosión marca el fin de la

vida de algunas estrellas. Ese final también puede deberse a la acumulación de un exceso de materia de una estrella vecina, y puede dejar como remanente un objeto compacto del tipo de una estrella de neutrones (incluso un agujero negro, si la masa es suficientemente grande). Existen varios tipos de eventos de supernova, clasificados principalmente por los elementos presentes en sus espectros de luz (las SN de tipo I no muestran hidrógeno en sus espectros; las de tipo II en cambio (SI lo muestran). Las SN de tipo I se clasifican además en SN-Ia, SN-Ib y SN-Ic. Las dos últimas resultan del colapso de estrellas masivas que han perdido sus atmósferas de hidrógeno; las primeras son estrellas del tipo de las enanas blancas, que al incorporar demasiada masa de otra estrella compañera cercana, colapsan gravitacionalmente, terminando su vida en una gigantesca explosión termonuclear. Recientemente, las SN-Ia han sido muy usadas en cosmología como patrones de luminosidad para calcular distancias astronómicas.

**SUPERNOVA TIPO IA.** Explosión termonuclear resultado de la acreción de masa por parte de una enana blanca de carbono-oxígeno desde una estrella compañera, generalmente una gigante roja. La enorme energía libera una poderosa onda de choque que destruye la estrella, normalmente no quedan rastros del astro que originó el cataclismo, sino solo restos de gas y polvo sobrecalentados en rápida expansión.

**SUPERSIMETRÍA.** Tipo sutil de simetría que no puede ser asociada con la transformación de un espacio ordinario. Una de las implicaciones importantes de la supersimetría es que las partículas de fuerza y las partículas de materia, y por lo tanto fuerza y materia, son en realidad dos facetas de la misma cosa.

**TEORÍA CUÁNTICA.** Teoría en que los objetos no tienen una sola historia bien definida.

**TEORÍAS DE GRAN UNIFICACIÓN (sigla en inglés TGU).** Teorías que tratan de unificar todas las interacciones conocidas a excepción de la gravitación: electromagnética, nuclear débil y



nuclear fuerte. Suponiendo que sea posible una gran unificación de todas las interacciones, entonces todas las interacciones que observamos no son más que diferentes aspectos de la misma teoría unificada.

**TEORÍA M.** Teoría fundamental de la física que es candidata a ser teoría de todo.

**TEORÍA DE CUERDAS.** Teoría de la física en que las partículas son descritas como modos de vibración que tienen longitud, pero no anchura ni altura, como fragmentos de cuerda infinitamente finos.

**TEORÍA DEL BIG BANG.** Es un conjunto de modelos cosmológicos que dan cuenta del estado ultra temprano y posterior desarrollo del universo que concuerdan en un alto grado de precisión con las evidencias observadas. El término Big Bang o gran explosión (una mala designación para la teoría, pues no existe una tal “gran explosión”) alude a que el universo se habría expandido en un tiempo limitado a partir de un estado inicial de altísima temperatura energía y densidad, y continúa expandiéndose hoy.

**TRITIO.** Isótopo del hidrógeno de corta vida media (unos 12 años) en el cual el núcleo está formado por un protón y dos neutrones. Es el isótopo más pesado del hidrógeno y no se encuentra en forma natural en la Tierra.

**UNIDAD ASTRONÓMICA (UA).** Es una medida astronómica convencional de distancia, aproximadamente igual a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, es decir, unos 150 millones de kilómetros (más exactamente  $1,496 \cdot 10^{13}$  cm, o 8,31 minutos luz). Para distancias cósmicas de órdenes de magnitud mucho mayores se usan: años luz o parsec.

**UNIVERSO ESTÁTICO (DE EINSTEIN).** Modelo cosmológico en el cual el universo se mantiene estático (sin expansión ni contracción) gracias a la introducción de una fuerza cosmológica “repulsiva” (relacionada con la llamada constante cosmológica





# ANEXOS

## SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

El SI revisado quedó definido como aquel en el que:

- la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ )  $\Delta\nu$  C s es 9 192 631 770 Hz
- la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ) es 299 792 458 m/s
- la constante de Planck ( $h$ ) es  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  J·s
- la carga elemental ( $e$ ) es  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  C
- la constante de Boltzmann ( $k$ ) es  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  J/K
- la constante de Avogadro ( $N_A$ ) es  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>
- la eficacia luminosa de la radiación monocromática de  $540 \cdot 10^{12}$  Hz ( $K_{\text{cd}}$  K cd) es 683 lm/W

A partir de los valores anteriores se definen las siete unidades básicas.

**TABLA 1.1** (unidades básicas)

Unidad básica (símbolo)	Magnitud física básica (Símbolo de la magnitud)	Definición técnica	Definición derivada
segundo (s)	tiempo [t]	Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s <sup>-1</sup> . [ $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ /s]	Es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133.

Unidad básica (símbolo)	Magnitud física básica (Símbolo de la magnitud)	Definición técnica	Definición derivada
metro (m)	longitud [l]	Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, $c$ , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , según la definición del segundo dada anteriormente. [ $c = 299\,792\,458\,\text{m/s}$ ]	Es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo.
kilogramo (kg)	masa [m]	Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, $h$ , en $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ , cuando se expresa en la unidad $\text{J} \cdot \text{s}$ , igual a $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , según las definiciones del metro y el segundo dadas anteriormente. [ $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ ]	
amperio (A)	corriente eléctrica [I]	Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, $e$ , en $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ , cuando se expresa en la unidad $\text{C}$ , igual a $\text{A} \cdot \text{s}$ , donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ . [ $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\text{A} \cdot \text{s}$ ]	El efecto de esta definición es que el amperio es la corriente eléctrica correspondiente al flujo de $1/(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}) = 6,241\,509\,074 \cdot 10^{18}$ cargas elementales por segundo.
kelvin (K)	temperatura termodinámica [T]	Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann, $k$ , en $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ , cuando se expresa en la unidad $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ , igual a $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , según las definiciones del kilogramo, el metro y el segundo dadas anteriormente. [ $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$ ]	Es igual a la variación de temperatura termodinámica que da lugar a una variación de energía térmica $kT$ de $1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,\text{J}$ .

mol (mol)	cantidad de sustancia [N]	Cantidad de sustancia de exactamente $6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$ entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, $N_A$ , cuando se expresa en la unidad $\text{mol}^{-1}$ . [ $N_A = 6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23} / \text{mol}$ ]	Es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene $6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$ entidades elementales especificadas.
candela (cd)	intensidad luminosa [Iv]	Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz, $K_{cd}$ , en 683, cuando se expresa en la unidad $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , igual a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ , o a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ , según las definiciones del kilogramo, el metro y el segundo dadas anteriormente. [ $K_{cd} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} / \text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}^3$ ]	Es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz y tiene una intensidad radiante en esa dirección de $1/683 \text{ W/sr}$ .

Además de las unidades básicas, en el SI hay dos unidades suplementarias.

**TABLA 1.2** (unidades suplementarias)

Unidad (símbolo)	Magnitud física	Expresión en unidades SI básicas	Definición
radián (rad)	ángulo plano	$\text{m/m} = 1$	Es el ángulo plano comprendido entre dos radios de un círculo que, sobre la circunferencia de dicho círculo, intersecan un arco de longitud igual a la del radio.
estereorradián (sr)	ángulo sólido	$\text{m}^2/\text{m}^2 = 1$	Es el ángulo sólido que, teniendo su vértice en el centro de una esfera, interseca sobre la superficie de dicha esfera un área igual a la de un cuadrado que tenga por lado el radio de la esfera.

## Unidades que no pertenecen al SI, pero se aceptan para su uso dentro de este

El BIPM declara que las siguientes unidades, que no pertenecen al SI, se permiten para su uso con el SI.

**TABLA 1.3**

Magnitud	Unidad		
	Nombre	Símbolo	Valor expresado en unidades del SI
Masa	tonelada	t	$1\text{ t} = 1\text{ Mg} = 1\,000\text{ kg}$
volumen	litro	L, l	$1\text{ L} = 1\text{ dm}^3 = 0,001\text{ m}^3$
superficie	área	a	$1\text{ a} = 1\text{ dam}^2 = 100\text{ m}^2$
	hectárea	ha	$1\text{ ha} = 100\text{ a} = 10\,000\text{ m}^2$
ángulo plano	grado sexagesimal	°	$1^\circ = (\pi/180)\text{ rad}$
	minuto de arco	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10\,800)\text{ rad}$
	segundo de arco	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648\,000)\text{ rad}$
tiempo	minuto	min	$1\text{ min} = 60\text{ s}$
	hora	h	$1\text{ h} = 60\text{ min} = 3600\text{ s}$
	día	d	$1\text{ d} = 24\text{ h} = 86\,400\text{ s}$

## DATOS ÚTILES

Ángulos notables		
$\alpha$	$\text{sen } \alpha$	$\text{cos } \alpha$
$0^\circ$	0	1
$30^\circ$	0,5	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$
$45^\circ$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$
$60^\circ$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$	0,5
$90^\circ$	1	0
$180^\circ$	0	-1

**Identidades trigonométricas frecuentes**

$$1 = \operatorname{sen}^2 \alpha + \operatorname{cos}^2 \alpha$$

$$\operatorname{sen}^2 \alpha = 2 \operatorname{sen} \alpha \operatorname{cos} \alpha$$

$$\operatorname{cos}^2 \alpha = \operatorname{cos}^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha$$

**Algunas constantes físicas y datos astronómicos**

Rapidez de la luz	$2,997\,924\,68 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Constante gravitacional	$6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$
Aceleración de la gravedad (valor estándar)	$9,806\,65 \text{ m/s}^2$
Masa del electrón	$9,1093826(16) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masa del protón	$1,67262171(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masa del neutrón	$1,67492728(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Carga del electrón	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Número de Avogadro	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de los gases	$8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
Constante de Boltzmann	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Masa de la Tierra	$5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Masa de la Luna	$7,349 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Masa del Sol	$1,7349 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Radio medio de la Tierra	$6371,0 \text{ km}$
Radio medio de la luna	$1738 \text{ km}$
Radio medio del Sol	$0,7 \cdot 10^9 \text{ m}$

Los números entre paréntesis indican la incertidumbre en los dígitos finales.



## Respuestas a las tareas generales

### Capítulo 1

7.  $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
8.  $\theta = 30^\circ$
9. a)  $d = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$     b)  $\Delta \text{de trazos/m} = 417$
10.  $d = 6,8\lambda$
11.  $\lambda = 5,23 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
12.  $y = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
13.  $\lambda = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
14. a)  $\Delta y = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$     b)  $\Delta y = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$     c)  $\Delta \text{de trazos/m} = 10$
15.  $\theta = 54^\circ$
16.  $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
17.  $y_1 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$      $y_2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$      $y_3 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
18.  $d = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
19.  $\lambda = 4,56 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

### Capítulo 2

12.  $v = 0,967c$
13.  $v = 0,1c$  ,     $v = 0,64c$
14.  $\Delta x = 0,42 \text{ m}$  ,     $\theta = 65^\circ$
15.  $\Delta t' = 36 \text{ s}$

### Capítulo 3

1.  $E = 3,972 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
2.  $n = 1,0 \cdot 10^{20}$  fotones
1.  $E_{c_{\text{máx}}} = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$      $E_{c_{\text{máx}}} = 3,0 \text{ eV}$
3.  $W_0 = 3,972 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
4.  $\nu_0 = 4,59 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
5.  $\nu = 1,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
2. b)  $E_{c_{\text{máx}}} = 13,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
3. a)  $W_0 = 3,94 \cdot 10^{-19} \text{ J}$     b)  $\nu_0 = 5,95 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
4.  $W_0 = 3,41 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

5.  $\lambda_0 = 5,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}$      $\lambda = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  No se muestra el fotoefecto  $\lambda > \lambda_0$   
o  $E < W_0$
6.  $E_{c_{\text{máx}}} = 7,45 \cdot 10^{-19} \text{ J}$      $U_c = 4,65 \text{ V}$
7.  $\lambda = 2,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}$      $\lambda_0 = 3,74 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
8. a)  $\nu_0 = 3,98 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$      $\lambda_0 = 7,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}$   
b) Se produce  $\nu > \nu_0$
9. a)  $E_{c_{\text{máx}}} = 6,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$     b)  $U_c = 3,98 \text{ V}$     c)  $\lambda_0 = 3,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
10.  $U_c = 8,27 \text{ V}$
11.  $W_0 = 3,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ,  $E = 2,92 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , No se produce  $E < W_0$
12.  $\lambda_1 = 2,48 \text{ nm}$      $\lambda_2 = 3,10 \text{ nm}$      $\lambda_3 = 4,13 \text{ nm}$
13.  $\nu_{\text{máx}} = 6,87 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
14.  $U_a = 12,41 \text{ V}$
6.  $\nu = 5,92 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
7.  $\lambda' = 0,05652 \text{ nm}$
15.  $\nu' = 3,0 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$
8.  $\nu = 1,36 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

#### Capítulo 4

4.  $E_7 = -0,27 \text{ eV}$      $E_1 = -13,60 \text{ eV}$
5.  $E = E_i - E_f$  donde  $E_f > E_i$  según los estados estacionarios seleccionados.
6.  $\lambda = 4,87 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
7.  $\nu_{\text{min}_{32}} = 4,59 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$      $\nu_{\text{min}_{43}} = 6,16 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
8.  $\lambda_{\text{Lyman}} = 0,931 \cdot 10^{-7} \text{ m}$      $\lambda_{\text{Balmer}} = 3,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}$      $\lambda_{\text{Paschen}} = 10,09 \cdot 10^{-7} \text{ m}$   
 $\lambda_{\text{Brackett}} = 21,40 \cdot 10^{-7} \text{ m}$      $\lambda_{\text{Pfund}} = 45,97 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
10.  $r_n = r_1 n^2$      $r_5 = r_1 5^2$      $r_5 = 1,25 \cdot 10^{-9} \text{ m}$      $E_n = \frac{E_1}{n^2}$      $E_5 = -0,54 \text{ eV}$
12.  $\nu_{\text{rojo}} = 4,59 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$      $\nu_{\text{verde}} = 6,16 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$   
 $\nu_{\text{azul}} = 6,90 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$      $\nu_{\text{violeta}} = 7,32 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
13.  $E = -12,10 \text{ eV}$      $\nu = 2,92 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
16.  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$      $E_4 = -0,85 \text{ eV}$

## Capítulo 5

9.  $E = 212,9274 \cdot 10^{22} \text{ MeV}$       $E = 3,41 \cdot 10^{10} \text{ J}$
10.  $E'_{10} = 6,475 \text{ MeV}$       $E'_{11} = 6,92 \text{ MeV}$       $E'_{12} = 6,63 \text{ MeV}$   
 Es más estable el de  $E'_{11} = 6,92 \text{ MeV}$
11. a)  $\delta m = 0,1286 \text{ Da}$      b)  $E_{enl} = 119,7266 \text{ MeV}$       $E_{enl} = 1,915 \cdot 10^{-11} \text{ J}$   
 c)  $E' = 7,48 \text{ MeV/nucleón}$
12.  $E = 203,33 \text{ MeV}$
13. b)  $E_{enl} = 1033,5 \text{ MeV}$
14.  $E_{enl} = 243,5 \text{ MeV}$
15. Quedan sin desintegrar  $\frac{1}{4}$  de los átomos de la muestra inicial.
16. Se obtuvo en forma de átomos de plomo  $\frac{3}{4}$  de los átomos iniciales de polonio.
17.  $T = 5 \text{ días}$
18. Al cabo de 332,23 días.
- 19.
20. b)  $E = 4,84 \text{ MeV}$
21. c)  $E = 111,35 \text{ MeV}$
22. b)  $E = 19,27 \text{ MeV}$

# BIBLIOGRAFÍA

Avila-Reese, V.: *Un Universo en evolución*, en Fronteras de la Física (e-book).

Battaner, S.: *Introducción a la Astrofísica*, Ed. Alianza, Madrid, 1999.

French, A. P.: *Teoría de la Relatividad Especial*, Ed. Reverte, España, 1988.

Gil, P.D., B. Macedo, M. J. Torregrosa, B. C. Sifredo, C. P. Valdés, A. Vilches:  
¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta  
didáctica fundamentada para la educación de jóvenes de 15 a 18 años.  
OREALC/UNESCO, Santiago de Chile, 2005.

Hecht, Eugene: *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000.

Kikoin, I. K., Kikoin, A. K.: *Física 2*, Ed. MIR, Moscú, 1987.

Parnonosky, S.: *How the Universe Work. Introduction to Modern Cosmology*, World Scientific, Publishing Co. Pte. Ltd., 2017.

Resnick, R., D. Halliday, S. K. Krane: *Física*, Vol. 2, Ed. Continental, México, 1999.

Ryden, B.: *Introduction to Cosmology*, Pearson, 2017.

Serway, A. R., Jewett, W. J.: *Física para ciencias e ingeniería*, Vol. 2, Cengage Learning, 2014.

Sifredo, B. C., E. L. Ayala: *El trabajo experimental asistido por recursos informáticos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física*, Sello editor Educación Cubana, La Habana, 2012.

Sifredo, B. C. y otros: *Física Duodécimo grado*, Parte 1, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 2007.

---

\_\_\_\_\_: *Física Grado Doce. Orientaciones Metodológicas para la solución de problemas*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1990.

*The Oxford Handbook of the History of Modern Cosmology*, Edited by Heige Kragh and Malcom S. Lonbgair, 2019.

*Vocabulario Internacional de Metrología*, Centro Español de Metrología, Tercera Edición, 2012.

Yavorki, B. M., Pinski, A. A.: *Fundamentos de Física II*, Ed. MIR, Moscú, 1983.

Young, H. D., Roger, A. F.: *Física Universitaria*, Vol. 2, Ed. Pearson, México, 2009.

