

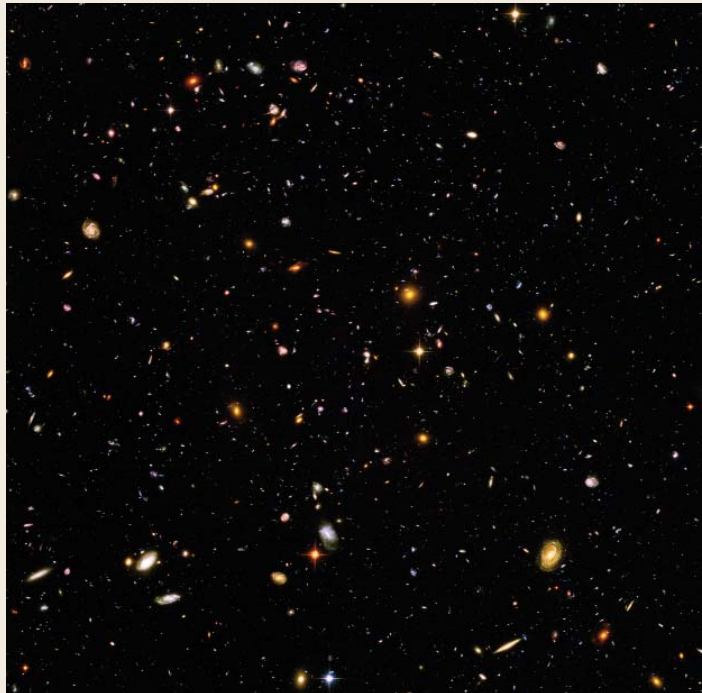
# 1

## Organización y origen del universo

**N**o es fácil concretar el significado del término *universo*. A menudo se define simplemente como todo lo que existe, lo que existió y lo que existirá. Desde este punto de vista, el universo incluiría no solamente la totalidad de la materia y la energía, sino también el espacio y el tiempo que ocupan y las leyes de la física a las que obedecen.

Una concepción alternativa deja abierta la posibilidad de que existan múltiples “universos” incapaces de interactuar entre sí, quizá con diferentes leyes físicas. Nuestro universo particular sería *el* Universo (con mayúscula), y para el conjunto de todos los universos (“todo lo que existe, lo que existió y lo que existirá”) se reservaría el nombre de Multiverso.

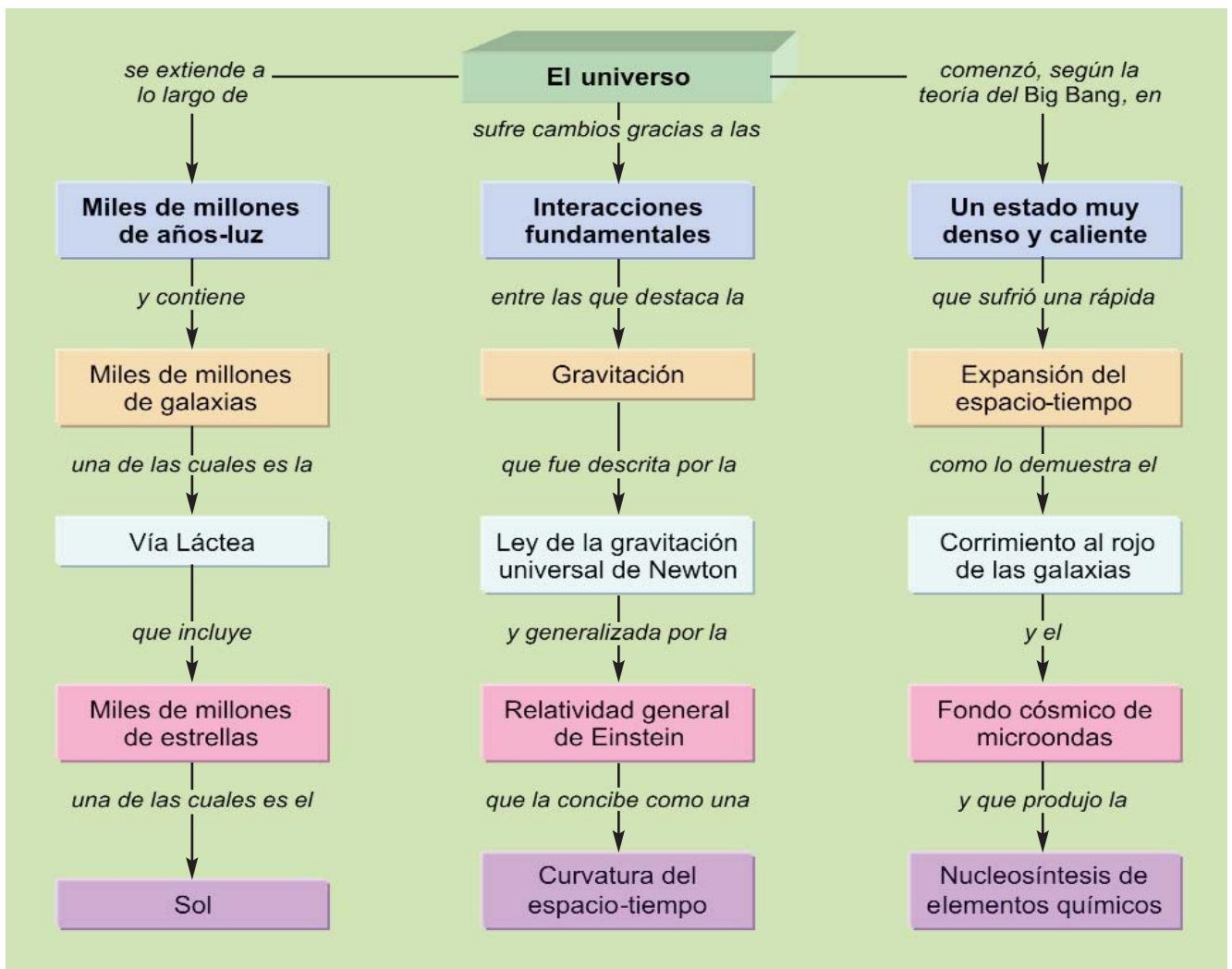
En la práctica científica se suele restringir el concepto de universo a aquella parte de la realidad (espacio, tiempo, materia y energía) directamente accesible a nuestros instrumentos de observación. Aún así, este universo observable abarca una región colosal, de casi un cuatrillón de kilómetros de diámetro. Sus propiedades, su origen y sus posibles futuros serán los temas que abordaremos en las páginas que siguen.



*El Campo Ultraprofundo del telescopio espacial Hubble es la imagen más sensible del universo jamás tomada. Muestra unas diez mil galaxias, cada una con miles de millones de estrellas, en sus primeros estadios de formación. (NASA, ESA y STScI. Dominio público)*

Mediante el estudio de esta Unidad podrás alcanzar los siguientes **objetivos**:

1. Valorar críticamente diversos modelos sobre la estructura del universo, teniendo en cuenta el contexto histórico y cultural en que fueron formulados.
2. Evaluar el papel que ha jugado la observación y el razonamiento creativo y crítico en las controversias en torno a las interacciones fundamentales del universo.
3. Reconocer las presunciones que deben hacerse al utilizar diferentes métodos para datar la edad de las rocas de la Tierra y de otros objetos celestes.
4. Usar la teoría más aceptada sobre el origen y evolución del universo para enunciar predicciones acerca de sus propiedades actuales.
5. Comparar las predicciones derivadas de las teorías sobre la estructura y el origen del universo con los datos obtenidos mediante observaciones astronómicas.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. MODELOS DEL UNIVERSO</b> .....	<b>12</b>
1.1. Modelos filosóficos .....	12
1.2. Modelos astronómicos .....	12
<b>2. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES DEL UNIVERSO</b> .....	<b>17</b>
2.1. Las leyes del movimiento de los planetas .....	18
2.2. El nacimiento de la física clásica .....	18
2.3. La teoría de la relatividad .....	21
2.4. La física cuántica .....	23
<b>3. LA EDAD DEL UNIVERSO</b> .....	<b>25</b>
3.1. Tiempo cíclico y tiempo lineal .....	25
3.2. Primeras estimaciones de la edad del mundo .....	26
3.3. La expansión del universo .....	27
<b>4. LA GÉNESIS DE LOS ELEMENTOS</b> .....	<b>30</b>
4.1. La infancia del universo .....	30
4.2. Nacimiento y muerte de estrellas .....	32

### 1. Modelos del universo

El interés del ser humano por los fenómenos celestes se remonta por lo menos a la protohistoria. Las observaciones rutinarias permitieron descubrir regularidades en el movimiento de los astros que servían de referencia a los pueblos nómadas y facilitaban a los pueblos sedentarios la planificación de las cosechas.

Es comprensible que esta influencia de los astros sobre aspectos cruciales como la agricultura se extrapolara a todo el ámbito de la vida humana, e indujera a atribuir a los objetos celestes el poder de condicionar el destino de las personas. De esta forma, los astros se convirtieron en objetos de veneración, y los fenómenos celestes se interpretaron en términos de la genealogía de los dioses, de sus conflictos y de sus hazañas.

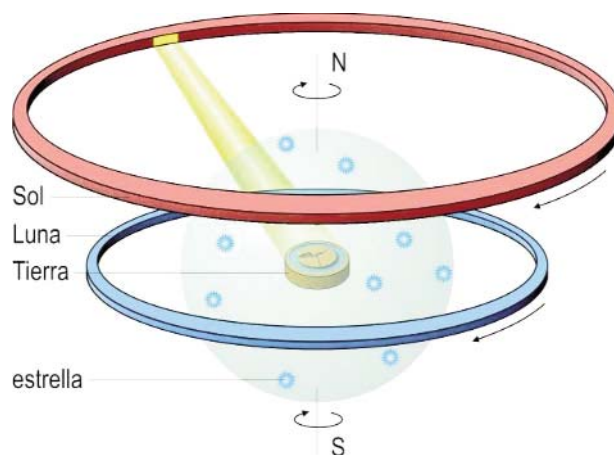


El grabado Flammarion, de origen desconocido, ilustra un antiguo modelo del universo en el que la Tierra se concebía como plana, y el cielo se describía como una cúpula de estrellas fijas tras la que se hallaba la "maquinaria" — representada por ruedas— que hacía funcionar el mundo. (Wikimedia Commons. Dominio público)

#### 1.1. Modelos filosóficos

Las civilizaciones griega e india fueron las primeras en sustituir la visión de un universo subordinado al capricho de los dioses por la de un universo impersonal gobernado por las leyes de la física.

Entre los primeros filósofos griegos, dicho reemplazo ocurrió al rechazar los mitos como verdades reveladas y aceptarlos como propuestas sobre las que se puede argumentar racionalmente. El más destacado de ellos, Anaximandro de Mileto (610-546 a. C.), sostenía que la Tierra era un cilindro que flotaba inmóvil en el espacio porque, equidistante de todo, no tenía mayor razón en ir a un sitio que a otro. El Sol y la Luna eran como ruedas o tubos circulares rellenos de fuego, provistos de orificios por los que salía la luz; si esos orificios se obstruían, se producía un eclipse. Las estrellas eran asimismo orificios en una esfera que giraba de Este a Oeste; curiosamente, Anaximandro las situó más próximas a la Tierra que la Luna y el Sol.



Esquema del universo según Anaximandro. (A. S. H.)

#### 1.2. Modelos astronómicos

A diferencia de sus predecesores, los pensadores griegos posteriores al siglo VI a. C. se esforzaron por construir **modelos** del universo basados más en las **observaciones astronómicas** que en la especulación filosófica. En realidad, los primeros pueblos que llevaron a cabo observaciones sistemáticas de los cielos, a veces de admirable precisión, fueron los egipcios y los babilonios. Pero como su interés se centraba en el calendario y en los vaticinios astrológicos, no elaboraron modelos que representaran dichas observaciones; cosa que, en cambio, sí hicieron los griegos, si bien a menudo se apoyaron en las observaciones egipcias y babilónicas.

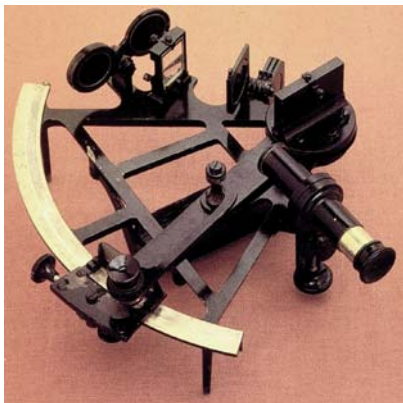


## COMPRENDER LA CIENCIA

### La observación científica

La **ciencia** es una forma de entender cómo es el mundo, cómo funciona y cómo ha llegado a alcanzar su estado actual. No es simplemente una colección de hechos y de conceptos que hay que memorizar; es, ante todo, un *procedimiento* para aprender. A diferencia de otras formas de adquirir conocimiento, toda idea científica debe ponerse a prueba, y para ello es necesario: 1) hacer **predicciones** acerca de cómo sería el mundo si dicha idea fuese correcta, y 2) llevar a cabo **observaciones** para verificar si se cumplen o no tales predicciones.

Las observaciones científicas dependen no solo de nuestros cinco sentidos, sino también de instrumentos hechos para extender su limitado alcance: telescopios, espectrógrafos, microscopios... Mediante estas herramientas los científicos obtienen **datos**, para cuyo examen es a menudo necesario representarlos en forma de tablas y gráficas o llevar a cabo complejos análisis estadísticos.



El **sextante** permite medir el ángulo entre un astro y el horizonte. (NOAA. Dominio público)

Un malentendido habitual acerca de las observaciones es que estas nos informan directamente de cómo funciona el mundo o, dicho de otra forma, que el científico adquiere conocimiento limitándose a “leer el libro” de la naturaleza. Las observaciones pueden inspirar ideas, brindarles apoyo o ayudar a refutarlas, pero la construcción del conocimiento científico es un proceso complejo en el que la creatividad (la capacidad de *inventar* explicaciones sobre la realidad) y el pensamiento crítico (saber contrastar empíricamente dichas explicaciones) juegan un papel tan relevante, o más, que la habilidad de observar.



**Telescopio** con el que el astrónomo Frederick William Herschel (1738-1822) observó el planeta Urano. (Wikimedia Commons. Dominio público)

### Modelos de un cosmos cerrado y finito

Los astrónomos no observan objetiva y desapasionadamente el universo sin tener una idea previa de cómo es la realidad que investigan, sin un marco conceptual que les sugiera qué observar, qué datos interesa reunir y cuáles conviene ignorar.

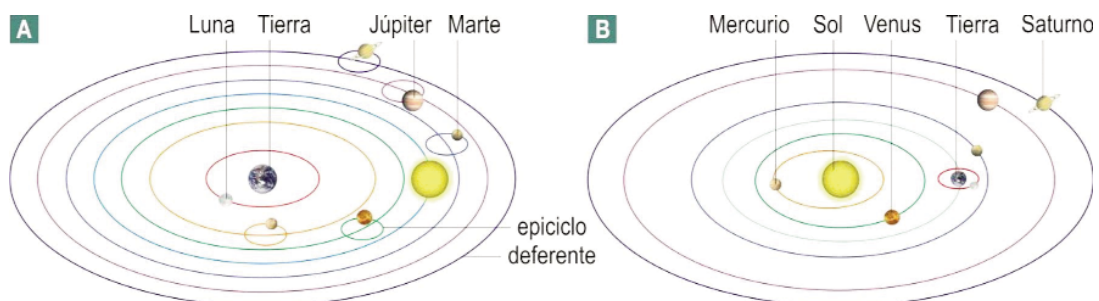
Desde **Aristóteles** (384-322 a. C.), el referente que servía de guía a los astrónomos era un **cosmos** (del griego *kosmo*, “orden”): un universo armonioso, en el que cada cosa tiene su sitio —los cuerpos llamados **graves**, como las piedras, caen, mientras que los cuerpos **leves** como el fuego y el aire suben, porque sus “lugares naturales” son la tierra y el cielo, respectivamente— y donde los astros solo efectúan movimientos circulares, por ser los más “perfectos”. El límite del cosmos es la **esfera de estrellas fijas** en la que están incrustadas las estrellas, manteniendo su posición relativa.

Sobre esta base se formularon dos modelos para describir el movimiento de los astros:

# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO

Modelo geocéntrico (del griego <i>gê</i> , "tierra")	Modelo heliocéntrico (de <i>hēlio</i> , "sol")
<p>Perfeccionado por Claudio Ptolomeo (90-168), se puede resumir en los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● La Tierra ocupa el centro del universo.</li><li>● La Tierra está inmóvil; la esfera de estrellas fijas gira a diario de Este a Oeste y arrastra consigo al Sol, la Luna y los planetas, produciendo así sus <b>ortos</b> y <b>ocazos</b>.</li><li>● Al movimiento <i>diario</i> del Sol hacia el Oeste se superpone un movimiento <i>anual</i> hacia el Este responsable de las estaciones.</li><li>● La Luna y los planetas giran en círculos pequeños o <b>epiciclos</b>, que a su vez se mueven alrededor de la Tierra (hacia el Este) en un círculo mayor o <b>deferente</b>, ocasionando las <b>retrogradaciones</b> de los planetas.</li></ul>	<p>Debido sobre todo a Nicolás Copérnico (1473-1543), afirma, en síntesis, que:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● El Sol ocupa el centro del universo.</li><li>● La Tierra gira sobre su eje de Oeste a Este, y esta rotación explica el movimiento diario <i>aparente</i> de los astros en sentido contrario; la esfera de estrellas fijas no gira.</li><li>● Al movimiento de <b>rotación</b> de la Tierra se suma un movimiento de <b>traslación</b> en torno al Sol relacionado con las estaciones.</li><li>● La Luna gira alrededor de la Tierra, pero los planetas giran alrededor del Sol. Las retrogradaciones de los planetas son un simple efecto óptico provocado al observarlos desde la Tierra en movimiento.</li></ul>



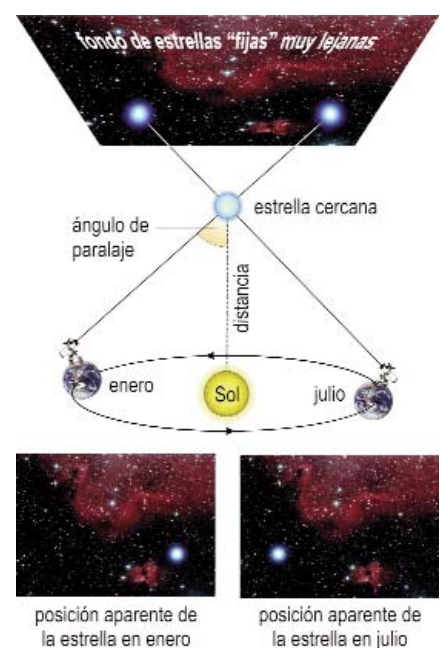
Comparación de los modelos **geocéntrico** (A) y **heliocéntrico** (B). No se ha dibujado la esfera de estrellas fijas. (A. S. H., a partir de una imagen de Wikimedia Commons)

### Modelos de un universo sin estrellas fijas

La visión geocéntrica de Ptolomeo, prevalente en Europa durante catorce siglos, viró hacia una visión heliocéntrica gracias a Copérnico e inició la **Revolución Científica** de los siglos XVI y XVII.

Un problema que planteaba el modelo copernicano fue enunciado por el astrónomo danés **Tycho Brahe** (1546-1601): si la Tierra se movía alrededor del Sol, se debería apreciar una desviación angular o **paralaje** en la posición de las estrellas, por efecto de la perspectiva, al observarlas desde posiciones opuestas de la órbita (véase la ilustración de al lado). Pero Brahe no apreció paralaje alguna, pese a que la alta precisión de sus observaciones —la mayor jamás lograda antes de la invención del telescopio— le habría permitido detectar diferencias de pocos segundos de arco.

Brahe concluyó que, de ser cierto el heliocentrismo, la esfera de estrellas fijas debía estar unas 700 veces más lejos del Sol que Saturno, el planeta más distante conocido por entonces. Pero pronto quedaría claro que se quedó corto en sus cálculos:



La paralaje mide el desplazamiento aparente de un objeto celeste respecto a las estrellas más lejanas. (A. S. H. y NASA)

- La llegada del telescopio hacia 1600 descubrió muchas más estrellas que las 5 600 visibles a ojo desnudo. Parecían extenderse sin fin en el espacio, a distancias variables del Sol, lo que descartaba la existencia de una esfera de estrellas fijas.
- A partir de 1838 se pudo medir finalmente la paralaje de las estrellas. Resultó que incluso la estrella más cercana, conocida como Próxima Centauri, tiene una paralaje de solo 0,769 segundos de arco —razón por la cual no pudo ser detectada por Brahe—, lo que implica que está 28 000 veces más lejos del Sol que Saturno.
- Que a tales distancias pudieran verse las estrellas significaba que se trata de enormes esferas incandescentes, comparables en tamaño al Sol.

La **Vía Láctea**, esa banda lechosa del cielo nocturno conocida también como la **Galaxia** (del griego *galakto*, “leche”), resultó estar integrada por miles de millones de estrellas. En 1918, el astrónomo estadounidense **Harlow Shapley** (1885-1972) averiguó que la Galaxia medía unos 950 000 billones de kilómetros; y el Sol, junto con todos sus planetas, no era más que una insignificante mota ubicada en su periferia.

### Modelos de un universo abierto e inconmensurable

En 1920 el universo conocido se reducía básicamente a la Galaxia, con sus **brazos en espiral** atestados de estrellas (véase la ilustración adjunta), y a dos conjuntos estelares —las Nubes de Magallanes— que orbitaban alrededor de la Vía Láctea. En total, ocupaban un espacio de menos de 200 000 años-luz de diámetro.

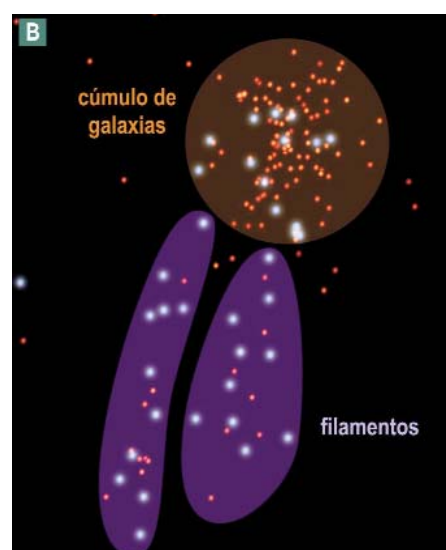
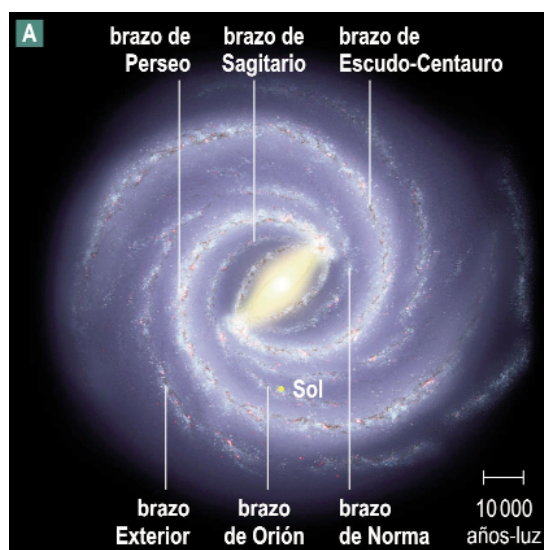
¿Había algo más allá? Seis años después del hallazgo de Shapley, el astrónomo estadounidense **Edwin Powell Hubble** (1889-1953) descubrió, con el telescopio más potente de la época, que una agrupación de gas, polvo y estrellas conocida como Nebulosa de Andrómeda no formaba parte, como se creía hasta entonces, de la Vía Láctea; se trataba de otra **galaxia** completamente independiente de la nuestra, con diez veces más estrellas y localizada a la formidable distancia de 2,54 millones de años-luz.

Con el transcurso de los años se fueron identificando más y más galaxias, cada vez más distantes. Hoy en día se estima que hay unos 80 000 millones de galaxias esparcidas a lo largo de los 93 000 millones de años-luz que mide el diámetro del universo *observable*. Y seguramente el universo *total* se extiende aún más allá.

### Las distancias estelares

Las distancias en el universo son tan enormes a escala humana que los astrónomos han necesitado idear unidades de medida más adecuadas:

- **Unidad astronómica (ua)**: es la distancia media de la Tierra al Sol (149 597 871 km).
- **Año-luz**: es la distancia que recorre la luz en el vacío en un año, y equivale a 63 241 ua.



**A.** La **Vía Láctea** contiene entre 200 y 400 mil millones de estrellas (puntos brillantes de la imagen). Muchas estrellas se forman en concentraciones de gas y polvo conocidas como brazos; el Sol se halla en el brazo de Orión.

**B.** La mayoría de las galaxias residen en agregados llamados **cúmulos**, conectados entre sí por una red de **filamentos**. El cúmulo de la ilustración se conoce como Abell 1763; los puntos azules representan galaxias activas, en las que se forman estrellas, mientras que los puntos rojos representan galaxias en las que ya no se forman estrellas. (NASA/JPL-Caltech. Dominio público)

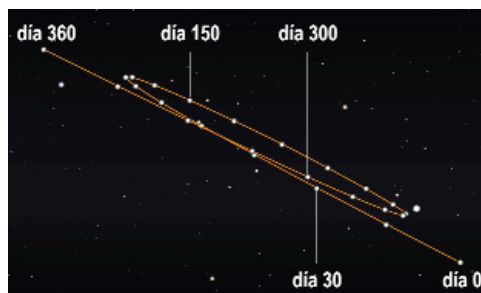
# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO



### Actividades

1. ¿Cómo explican los modelos heliocéntrico y geocéntrico la retrogradación de los planetas planetas (véase la ilustración adjunta)?
2. Galileo Galilei descubrió cuatro objetos girando en torno a Júpiter (sus satélites Ganímedes, Io, Calixto y Europa). Esta observación ayudó a afianzar el modelo heliocéntrico. ¿Por qué?
3. Si la Vía Láctea tiene la forma de espiral que se aprecia en la ilustración página anterior, ¿por qué la vemos como una banda de luz que recorre el cielo nocturno?
4. Sabiendo que la velocidad de la luz en el vacío es de  $299\,792\,458\text{ km s}^{-1}$ , ¿a cuántos kilómetros equivale un año-luz?
5. Usando los datos de la tabla adjunta, calcula en años-luz la distancia del Sol a la Tierra, a Próxima Centauri y al centro de la Galaxia.
6. Diseña un “modelo casero” a escala del Sistema Solar: si el Sol fuese una esfera con un radio de 0,5 metros, ¿qué tamaño tendrían y a qué distancia estarían los planetas? ¿Y la estrella Próxima Centauri?



Posición del planeta Saturno en intervalos de 15 días desde el 10/10/2010 (día 0) hasta el 4/10/2011 (día 360). (A. S. H.; composición hecha con el programa Stellarium)

Cuerpo celeste	Radio (km)	Distancia al Sol (millones de km)
Sol	696 000	—
Mercurio	2 440	79,8
Venus	6 052	108,2
Tierra	6 378	149,6
Marte	3 397	227,9
Júpiter	71 493	778,4
Saturno	60 267	1 426,7
Urano	25 557	2 871,0
Neptuno	24 766	4 498,3
Próxima Centauri	104 400	39 924 282,6
Centro de la Galaxia	—	245 037 000 000



### Recuerda

- ✓ Los primeros modelos racionales del universo concebían a éste como un **cosmos** finito y limitado por una esfera de estrellas fijas situada poco más allá de Saturno. En este contexto se elaboraron dos modelos principales del universo:
  - El **modelo geocéntrico** situaba a la Tierra, inmóvil, en el centro del universo, y todos los demás cuerpos celestes —incluidas las estrellas fijas— giraban a su alrededor.
  - El **modelo heliocéntrico** situaba al Sol en el centro del universo. La Tierra y los demás planetas giraban a su alrededor y sobre sí mismos, pero las estrellas fijas no giraban.
- ✓ Tras la invención del telescopio se empezó a medir la distancia a las estrellas mediante el método de la **paralaje**, comprobándose que estaban muchísimo más lejos que Saturno.
- ✓ El Sol forma parte de la Vía Láctea, una **galaxia** que cuenta con miles de millones de estrellas más. A su vez, hay miles de millones de galaxias en el universo observable.

## 2. Las fuerzas fundamentales del universo

Aunque suele situarse en Copérnico el comienzo de la Revolución Científica, lo cierto es que las motivaciones del astrónomo prusiano distaban de ser radicales. Copérnico simplemente aspiró a elaborar un modelo que respetara las posiciones de los astros descritas por el modelo de Ptolomeo, pero que eludiera las complicaciones de éste y solo recurriera a movimientos “perfectos” (esto es, circulares y uniformes).

Fue el alemán **Johannes Kepler** (1571-1630) quien, consciente de la equivalencia *geométrica* entre los modelos de Ptolomeo y Copérnico, trató de distinguirlos examinando sus causas *físicas*. Es decir, Kepler quiso elaborar una **teoría** que *explicara por qué* se mueven los astros, no un simple **modelo** que *describiera cómo* lo hacen.



### COMPRENDER LA CIENCIA

#### Teorías científicas

En el lenguaje coloquial, una **teoría** es simplemente una conjetura o una suposición basada en poco más que la intuición personal. Se usa este sentido vernáculo del término cuando, por ejemplo, un cineasta propone una nueva teoría sobre quién era Jack *el destripador*, o cuando un tertuliano teoriza sobre la intención de voto del electorado.

En la ciencia, en cambio, las teorías no se reducen a mero conocimiento especulativo. Por el contrario, para que una teoría sea aceptada por la comunidad científica debe estar respaldada por múltiples *líneas de evidencia* —datos, observaciones, resultados experimentales— independientes. Una **teoría científica** es un entramado de conceptos, principios, leyes y métodos que se construye precisamente para *explicar* un amplio rango de datos y observaciones, relacionándolos de forma coherente. Además, las teorías científicas se diferencian de otros tipos de teorías (matemáticas, filosóficas...) por criterios como los siguientes:

- **Precisión predictiva.** Toda teoría debe hacer predicciones rigurosas (sobre los resultados de futuras observaciones) que la investigación posterior pueda corroborar o rechazar.
- **Coherencia interna y consistencia externa.** No puede aceptarse una teoría nueva que contenga principios o leyes mutuamente contradictorios o que sea incompatible con los conocimientos plenamente contrastados y comprobados con anterioridad.
- **Fertilidad.** Una buena teoría ha de ser capaz de estimular la imaginación, de invitar a plantear más preguntas de las que responde, de abrir nuevas líneas de investigación.

Puesto que las teorías científicas distan de ser simples enunciados, no tiene mucho sentido calificarlas de ciertas o falsas. Una teoría es aceptada por la comunidad científica no por ser “verdadera”, sino por ser **útil**: por generar buenas predicciones, por ofrecer explicaciones satisfactorias, por extenderse a dominios inexplorados. Si la teoría comienza a mostrar fisuras —por ejemplo, si algunas predicciones no se cumplen— no por ello es inmediatamente abandonada. Los científicos pueden convivir con tales **anomalías**, intentando encajarlas en la teoría vigente a base de modificar algunos de sus postulados, hasta que el barco “hace agua” por todas partes y una teoría mejor, más útil, viene a suplir a la anterior.



# UNIDAD 1

ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO

## 2.1. Las leyes del movimiento de los planetas

Kepler utilizó el arsenal de datos obtenidos por Brahe para rehacer los cálculos de las órbitas planetarias. Como consecuencia se vio forzado a reelaborar el modelo copernicano y a romper con la tradición aristotélica que solo admitía movimientos circulares y uniformes, esto es, a velocidad constante. Todo ello quedó reflejado en las tres **leyes** que publicó entre 1609 y 1619 (véase el recuadro “Las leyes de Kepler”).

Pero si la distancia al Sol y la velocidad de un planeta podían variar, debería haber algún tipo de fuerza causante de estos cambios. Kepler postuló *dos* de tales fuerzas:

Una fuerza emanada por el Sol e inmaterial como la luz que, debido a la rotación del propio Sol, arrastraba a los planetas en círculos a su alrededor.

Las atracciones y repulsiones magnéticas entre el Sol y los planetas (concebidos por Kepler como enormes imanes), que convertían los círculos en elipses.

El astrónomo italiano **Galileo Galilei** (1564-1642) aceptó inicialmente las ideas de Kepler como una posible explicación de la diferencia entre el movimiento de los cuerpos celestes y de los objetos terrestres.

Galileo, en efecto, había acometido su propia ruptura con el aristotelismo, en concreto con la distinción entre cuerpos **graves** y **leves**. Para Galileo todos los cuerpos son graves; es decir, la fuerza de la **gravedad** los atrae hacia abajo, y solo suben si se sitúan en un medio más denso en el que flotan. Pero los cuerpos celestes, como la Luna, no suben ni bajan: giran en torno a otros cuerpos. Ello parecía indicar que están sujetos a fuerzas distintas de la gravedad.

## 2.2. El nacimiento de la física clásica

Galileo pudo extender la física terrestre al dominio celeste, excepción hecha de la gravedad, a la que consideraba un fenómeno local de cada planeta. La Tierra, pues, no tenía un estatus especial, y las viejas leyes del movimiento aristotélicas deberían sustituirse por otras nuevas que fuesen válidas tanto para la Tierra como para el cielo.

Aunque Galileo dio ya los primeros pasos en esta línea, fue el genial físico inglés **Isaac Newton** (1643-1727) quien sistematizó los descubrimientos de Galileo, Kepler y los suyos propios, unificándolos en una teoría que no solo permitía derivar todas las leyes formuladas hasta entonces, sino muchas otras nuevas: la **mecánica clásica**.

**Las leyes de Kepler**

**Primera ley.** Las órbitas planetarias son elípticas y el Sol está en uno de los **focos**. Así pues, un planeta se acerca al Sol y se aleja de él a lo largo de su recorrido.

**Segunda ley.** La velocidad orbital de cada planeta varía de forma tal que la línea imaginaria que une al planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

**Tercera ley.** El cuadrado del período ( $P$ ) o “año” de un planeta es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita ( $a$ )

Newton descubrió que la descripción del movimiento de los cuerpos era particularmente sencilla si se hacía desde unos **sistemas de referencia** llamados **inerciales**, y si se aceptaban ciertos supuestos acerca de la naturaleza del espacio y el tiempo (véase la ilustración adjunta). Con estas premisas, formuló unas *leyes generales* válidas para explicar el movimiento de cualquier cuerpo (véase el recuadro “Las leyes de Newton”), además de una *ley particular* para el movimiento de los astros.

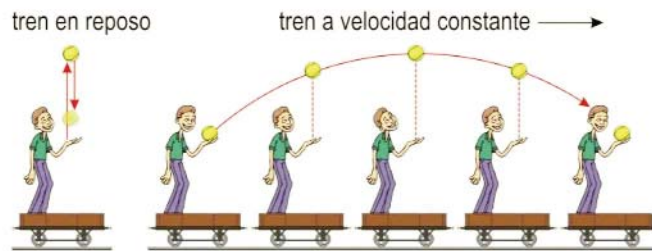
### Estructura del espacio-tiempo

- **El espacio es euclídeo.** Es decir, es el equivalente tridimensional de una superficie plana: los ángulos de un triángulo suman  $180^\circ$  y por un punto exterior a una recta pasa una y solo una paralela.
- **La distancia es relativa.** La distancia entre dos sucesos **A** y **B** no simultáneos depende en general del observador.
- **El tiempo es absoluto.** Todos los observadores medirán el mismo intervalo de tiempo entre dos sucesos **A** y **B** dados.



### Principio de relatividad de Galileo

- **Invariancia galileana.** Existe una clase de sistemas de referencia, llamados **sistemas inerciales**, desde los que ningún experimento mecánico permite averiguar si están en reposo o se mueven a velocidad constante respecto a otro sistema inercial. Así, una bola lanzada hacia arriba en un tren cae en vertical, tanto si el tren está en reposo como si va a velocidad constante.
- **Ley de composición de movimientos.** Un observador situado en el andén verá una trayectoria parabólica, porque el movimiento vertical de la bola se suma al movimiento horizontal del tren. Por lo tanto, para poder describir las mismas leyes de la mecánica que el observador móvil, el observador situado en el andén no tendrá más que “eliminar” el movimiento del tren de sus cálculos de la trayectoria de la bola.



### Principio de determinación de Newton-Laplace

Si se conocen las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, su movimiento futuro estará completamente determinado por su posición y su velocidad actuales. En particular, su aceleración es una función de su posición y su velocidad.

*Postulados de la mecánica clásica que Newton asumió implícitamente para formular sus leyes. (A. S. H.)*

### La ley de la gravitación universal

Newton prescindió de fuerzas especiales como las sugeridas por Kepler para explicar el movimiento planetario. Según Newton, la **gravedad** que atrae a una manzana hacia el suelo es la misma fuerza con que la Tierra atrae a la Luna.

¿Por qué, entonces, la Luna no cae cual manzana madura? Newton concluyó que en realidad sí cae, pero su caída se compensa con su velocidad orbital, que tiende a desplazarla tangencialmente por la **ley de la inercia** (véase la ilustración de la página siguiente).

### Las leyes de Newton

- **Primera ley o ley de la inercia.** Un cuerpo situado en un sistema de referencia inercial se desplazará con movimiento rectilíneo y uniforme si no se ejerce fuerza alguna sobre él.
- **Segunda ley.** La masa  $m$  de un cuerpo mide su inercia o resistencia a variar su velocidad, de manera que si actúa sobre él una fuerza  $F$ , la aceleración  $a$  que adquiere es inversamente proporcional a su masa:  $a = F / m$ .
- **Tercera ley.** Si un cuerpo **A** ejerce una fuerza sobre otro cuerpo **B**, este ejerce una fuerza de igual magnitud y de sentido contrario sobre **A**.

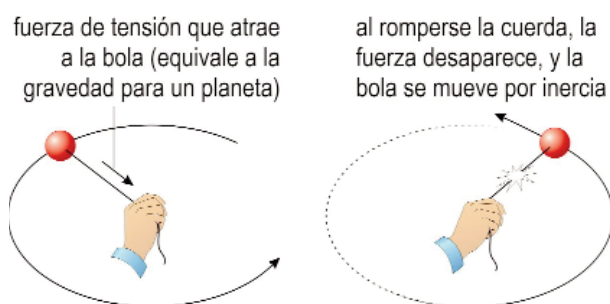
# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO

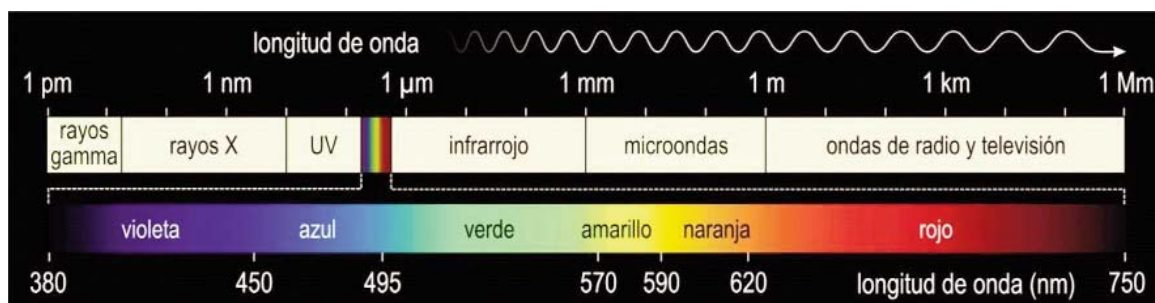
Seguidamente Newton dedujo que, para que la fuerza de la gravedad terrestre pudiese contrarrestar el movimiento de la Luna y verificase, además, las leyes de Kepler, debería ser proporcional a la masa de la Tierra ( $M$ ) y a la de la Luna ( $m$ ) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambas ( $r$ ):

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Esta ley resultó aplicable a la atracción gravitatoria entre cualquier par de cuerpos: no solo entre la Tierra y la Luna, sino también entre el Sol y la Tierra, o entre la Tierra y una manzana ( $F$  sería entonces el **peso** del fruto). En todos estos casos la constante de proporcionalidad  $G$  toma el mismo valor ( $6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ); es, pues, una **constante universal**.



La **inercia**, o tendencia a moverse uniformemente, mantiene girando a un objeto pese a ser atraído hacia el centro. (A. S. H.)



**Espectro electromagnético** obtenido al descomponer la radiación electromagnética en ondas con distinta longitud de onda (distancia entre dos crestas sucesivas). Todas ellas se desplazan en el vacío a una velocidad, denotada habitualmente por  $c$ , aproximadamente igual a  $300\,000\,000 \text{ m s}^{-1}$ . UV significa radiación ultravioleta. (A. S. H.)

### Las leyes del electromagnetismo

Si Newton unificó la gravedad terrestre y la celeste, el escocés **James Clerk Maxwell** (1831-1879) impulsó la *segunda gran unificación* de la física al mostrar que la **electricidad** y el **magnetismo** eran distintas facetas de un mismo fenómeno. Un conjunto de leyes expresadas en forma de ecuaciones matemáticas (las **ecuaciones de Maxwell**) predecía que los fenómenos eléctricos producen fenómenos magnéticos y viceversa, y que la **luz** era una combinación de **campos** eléctricos y magnéticos (un **campo electromagnético**) que se propagaba en forma de ondas incluso en el vacío. En otras palabras, la luz es un tipo de **onda electromagnética** (véase la ilustración del espectro electromagnético).



Según la **Mecánica clásica**, la ley de composición de movimientos se debería cumplir tanto si la fuente (el observador en reposo) lanza bolas como si emite haces de luz.. (A. S. H.)

## 2.3. La teoría de la relatividad

Pero las ecuaciones de Maxwell también generaban predicciones controvertidas. Una de ellas incluso llegó a adquirir más tarde la categoría de principio fundamental:

**Principio de invariancia de la velocidad de la luz.** La luz se mueve en el vacío a una velocidad constante  $c$ , independientemente de cómo se mueva la fuente que la emite.

Esta regla suponía que el principio de relatividad de Galileo no valdría para el electromagnetismo: por la ley de composición de movimientos (véase la ilustración página anterior), la velocidad de la luz para un observador que se acercara a la fuente lumínica a velocidad  $v$  ya no sería  $c$ , sino  $c + v$ , con lo que las ecuaciones de Maxwell tendrían que cambiar de un sistema inercial a otro.

No obstante, los experimentos nunca confirmaron tales diferencias entre los observadores en reposo y los que se mueven: todos miden siempre la misma velocidad  $c$ .

### La relatividad especial

En 1905, el por entonces desconocido físico alemán **Albert Einstein** (1879-1955) intentó conciliar el electromagnetismo, en particular el principio de invariancia de la velocidad de la luz, con el principio de relatividad. Para Einstein, *ambos* principios eran válidos, si bien el segundo de ellos debería ampliarse para incluir el electromagnetismo:

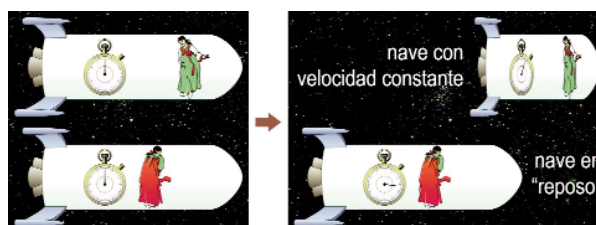
**Principio de relatividad de Einstein.** Además de las leyes de la mecánica, las leyes del electromagnetismo son también las mismas para todos los sistemas inerciales, tanto si se hallan en reposo relativo como si se mueven uniformemente entre sí.

Einstein utilizó estos dos principios como postulados básicos de una nueva mecánica, la llamada **mecánica relativista** o **teoría especial de la relatividad**. Su desarrollo supuso el derrumbe de nuestra forma de ver el mundo, ya que algunas de sus predicciones —todas ellas brillantemente confirmadas— desafiaban la intuición:

- **Relatividad de la simultaneidad.** Todo observador inercial tiene, por el principio de relatividad, perfecto derecho a pensar que está en reposo, y que son los demás observadores los que se mueven. Como además para todos ellos valor de la velocidad de la luz en el vacío es el mismo, dos sucesos que son simultáneos para un observador no tienen por qué serlo para otro (véase la ilustración anterior).
- **Dilatación del tiempo y contracción de la longitud.** Como la velocidad es igual al cociente entre la distancia y el tiempo, para que dos observadores en movimiento



Desde los extremos de una nave que se mueve uniformemente respecto de Paco se emiten a la vez dos destellos de luz dirigidos a Ana, en el centro de la nave.  
**A.** Desde el punto de vista de Ana la velocidad de la luz es igual a  $c$  en ambos sentidos, y por lo tanto los destellos la alcanzarán simultáneamente.  
**B.** Para Paco, la velocidad de la luz es también  $c$ , pero como desde su punto de vista Ana se mueve al encuentro de un destello mientras "huye" del otro, observará que la alcanzan en momentos distintos. (A. S. H.)



**Dilatación del tiempo y contracción de la longitud** de una nave en relación con su gemela, cuya tripulante se considera en reposo. (A. S. H.)

# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO

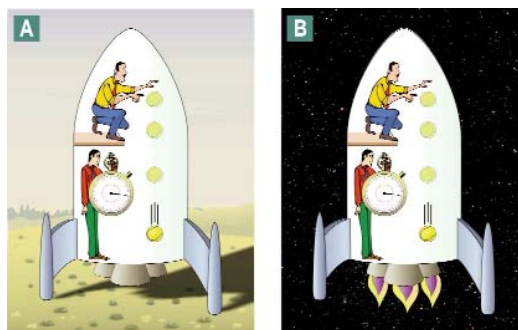
relativo uniforme midan la misma velocidad de la luz deberán modificar a la par sus medidas de la distancia (longitud) y del tiempo. Así, cada uno de ellos advertirá que el reloj del otro va más despacio y que su longitud se ha acortado en la dirección de su movimiento relativo (véase la ilustración adjunta). Y por extraño que pueda parecer, *ambos tendrán razón*.

- **Equivalencia entre masa y energía.** La masa de un cuerpo no es sino una de sus muchas formas de energía mutuamente interconvertibles. Así, al acelerar un objeto aumenta su energía cinética y, por tanto, su masa; ésta, a su vez, podrá convertirse en otros tipos de energía, como la lumínica. Incluso en reposo, todo cuerpo de masa  $m$  tiene una energía  $E$  dada por la famosa ecuación  $E = m c^2$ .
- **Velocidad máxima.** Ninguna señal puede ir a mayor velocidad que la luz; un objeto material ni siquiera puede alcanzarla, porque entonces su masa sería infinita.

### La relatividad general

El principio de relatividad solo es válido para sistemas inerciales (de ahí que la teoría sea *especial*). Es fácil detectar el movimiento acelerado de un sistema no inercial, ya que las leyes físicas tienen distinta forma: un cuerpo sobre el que no actúan fuerzas no se mueve uniformemente, sino que “cae” aceleradamente.

Entre 1907 y 1917 Einstein desarrolló una **teoría general de la relatividad** aplicable a sistemas no inerciales. El punto de partida es una intrigante propiedad de los campos gravitatorios que ya había llamado la atención de Galileo:



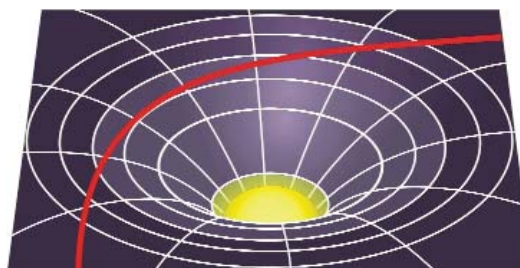
**Equivalencia de las leyes del movimiento** en una nave situada en el campo gravitatorio de un planeta (A) y en una nave uniformemente acelerada gracias a sus propulsores (B). (A. S. H.)

**Principio de equivalencia débil.** Un campo gravitatorio imprime la misma aceleración a todos los cuerpos situados a la misma altura, con independencia de su masa.

Por ejemplo, si se desconectan los motores de un avión en pleno vuelo, todos los objetos que contiene caerán al mismo tiempo que la propia nave. En consecuencia, desde su interior no se apreciará aceleración alguna, y sus tripulantes sentirán que se hallan en un sistema inercial no afectado por la gravedad. Así pues:

**Principio de equivalencia fuerte.** La gravedad puede contrarrestar los efectos de la aceleración y hacer que un sistema no inercial se comporte como uno inercial; esto es, un sistema no inercial equivale a un sistema inercial situado en un campo gravitatorio.

En conclusión, se puede anular un campo gravitatorio simplemente eligiendo un sistema de referencia adecuado. Por tanto, la gravedad no es una fuerza “real” en el sentido que lo es la fuerza electromagnética. Para Einstein, un campo gravitatorio se genera por una **curvatura en el espacio-tiempo**. Cerca de un cuerpo como el Sol el espacio deja de ser euclídeo (es decir, “plano”) y se pliega a su alrededor como una lámina elástica sobre la que se sitúa una bola pesada. En rigor, el Sol no ejerce ninguna fuerza sobre un planeta, por lo que su trayectoria curva es, en realidad, una trayectoria lo más “recta” posible (una **geodésica**) en un espacio-tiempo curvado.



**Analogía bidimensional de la curvatura del espacio** causada por la presencia del Sol y causante de su gravedad. La línea roja representa una **geodésica**. (A. S. H.)

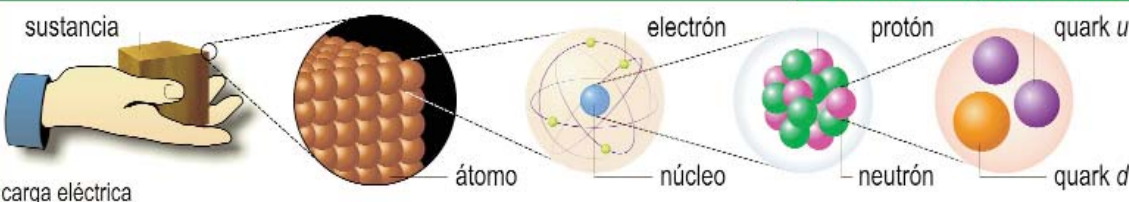
## 2.4. La física cuántica

Einstein generalizó la teoría de la gravitación de Newton para hacerla consistente con los principios relativistas, pero había otras fuerzas fundamentales que debían recibir el mismo tratamiento. El esfuerzo dio sus frutos cuando la relatividad especial se combinó con otra gran teoría del siglo XX: la **mecánica cuántica**.

Esta disciplina, nacida para investigar el comportamiento de la materia a escala atómica, describe el movimiento de una **partícula** como si fuese una **onda**, esto es, como si se difundiese por el espacio en lugar de localizarse en un punto. En estas condiciones, su posición y su velocidad no pueden tener a la vez un valor determinado. En general, tampoco su energía estará bien definida: para saber el valor exacto de la energía habría que estar midiéndola un tiempo infinito. Por tanto, durante un breve lapso de tiempo incluso en el vacío se podrán detectar **fluctuaciones de energía**.

Si una partícula se comporta como una onda, también se da el fenómeno inverso. Una onda de luz, por ejemplo, se asocia a una partícula llamada **fotón**, que transporta una cantidad discreta de energía. Y como la luz es un campo electromagnético, resulta lógico concluir que toda interacción electromagnética se debe al intercambio de fotones; se trataría, no obstante, de **fotones virtuales**, esto es, fotones que existen durante un tiempo muy corto, porque su energía se ha "tomado prestada" de las fluctuaciones del vacío. De hecho, *todas* las fuerzas fundamentales de la naturaleza están mediadas por el intercambio de **partículas virtuales** (véase la ilustración adjunta).

FERMIONES: integran la materia



carga eléctrica $+2/3$ arriba <span style="color: purple;">u</span>	$-1/3$ abajo <span style="color: orange;">d</span>	<b>Quarks.</b> Son sensibles a la fuerza fuerte. Están permanentemente confinados en el interior de protones (composición: $uud$ ), neutrones ( $udd$ ) y otras partículas.
$-1$ <span style="color: green;">e</span> <b>electrón</b>	$0$ <span style="color: yellow;">v</span> <b>neutrino</b>	
<b>Leptones.</b> Son inmunes a la fuerza fuerte. Los electrones portan la carga de la corriente eléctrica; los neutrinos solo aparecen en fenómenos radiactivos.		

BOSONES: transmiten las fuerzas fundamentales

$0$ <span style="color: red;">γ</span> <b>fotón</b>	Transmite la <b>fuerza electromagnética</b> entre partículas cargadas y también forma la luz. Actúa a distancias ilimitadas.	 <p>el intercambio de un fotón desvía las trayectorias de los electrones</p>
$0$ <span style="color: green;">g</span> <b>gluones</b>	Transmiten la <b>fuerza nuclear fuerte</b> que liga a los quarks en los protones y neutrones, y a estos en el núcleo.	
$\pm 1$ <span style="color: blue;">W</span> <b>bosón W</b>	$0$ <span style="color: green;">Z</span> <b>bosón Z</b>	

Transmiten la **fuerza nuclear débil**, responsable de las desintegraciones radiactivas beta.

Tipos de **partículas elementales**, representadas como esferas para comparar sus masas (su volumen es nulo). (A. S. H.)

# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO



### Actividades

7. ¿Cuándo será mayor la velocidad orbital de un planeta: durante su **afelio** o durante su **perihelio**? Razónalo teniendo en cuenta la segunda ley de Kepler.
8. a) Si el período orbital  $P$  de un planeta se expresa en años terrestres, y el semieje mayor de su órbita  $a$  en unidades astronómicas (para la Tierra  $a \approx 1$  ua), ¿qué valor tendrá la constante de proporcionalidad  $K$  de la tercera ley de Kepler?  
b) Puesto que la constante  $K$  es la misma para todos los planetas, ¿cuánto vale un “año marciano”, si el semieje mayor de la órbita de Marte es de 1,524 ua?
9. La ley de la inercia afirma que todo cuerpo sobre el que no se ejerce ninguna fuerza conserva constante su velocidad. ¿Por qué, entonces, una pelota que rueda libremente por una superficie horizontal acaba por detenerse?
10. Según los partidarios del geocentrismo es absurdo que la Tierra gire: si lo hiciera, una piedra inicialmente en reposo soltada desde una torre no debería caer verticalmente, sino desplazada hacia el Oeste (ya que, mientras la piedra caía, el suelo se habría movido varios metros hacia el Este). ¿Es correcto este argumento?
11. ¿Qué postulados de la mecánica clásica cambiaron con la mecánica relativista?
12. Los astronautas a bordo de una nave espacial en órbita alrededor de la Tierra no experimentan gravedad alguna (se dice que están en “gravedad cero”). ¿Por qué, si a esa altura el campo gravitatorio es casi tan intenso como en la superficie?
13. Calcula la carga de un protón y de un neutrón según su composición en quarks.

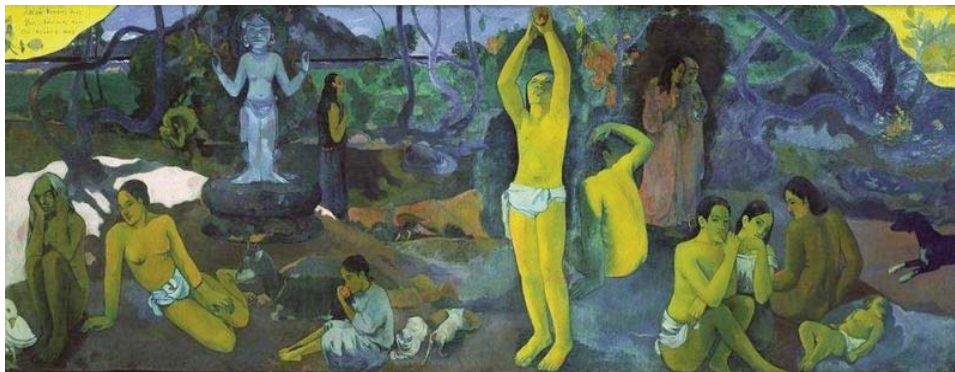


### Recuerda

- ✓ Gracias a los trabajos de Kepler y Galileo, entre otros, Newton pudo establecer las bases de la **mecánica clásica**. Esta teoría se fundamenta en los siguientes postulados:
  - Estructura **euclídea** (plana) del espacio y carácter absoluto del tiempo.
  - **Principio de relatividad de Galileo**: las leyes de la mecánica son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales, es decir, con movimiento rectilíneo y uniforme.
  - **Principio de determinación**: el futuro de un cuerpo depende de su posición y velocidad.
- ✓ La **gravedad** es la fuerza que, junto con la **inercia** (resistencia a modificar el estado de movimiento uniforme y rectilíneo), mantiene a los planetas orbitando en torno al Sol.
- ✓ La **teoría de la relatividad especial** de Einstein destruye el carácter absoluto del tiempo, al establecer la invariancia de la velocidad de la luz, y modifica el principio de relatividad para que sea compatible con las leyes del electromagnetismo. También establece que  $E = mc^2$ .
- ✓ Según la **teoría de la relatividad general** un sistema de referencia no inercial equivale a un campo gravitatorio; la gravedad es una curvatura del espacio-tiempo.
- ✓ Según la **física cuántica** las interacciones ocurren por intercambio de **partículas virtuales**, como los fotones, que poseen cantidades discretas de energía.

## 3. La edad del universo

El título de la obra maestra de Gauguin (véase la ilustración adjunta) resume el más profundo enigma que ha desa-fiado a los pensadores de todos los tiempos. ¿Cómo se originó el universo? ¿Cómo es su presente y cuál será su futuro?



¿De dónde venimos? ¿Quiénes somos? ¿Adónde vamos? es un óleo del pintor francés Paul Gauguin (1848-1903) concebido, poco antes de su fallido intento de suicidio, como una alegoría de la vida. (Wikimedia Commons)

### 3.1. Tiempo cíclico y tiempo lineal

Una primera cuestión a afrontar es si tiene siquiera sentido hablar del origen del universo. La respuesta depende de la visión del tiempo prevalente en cada época y cada lugar y, por insólito que pueda parecernos, no siempre ha sido “sí”.

#### Tiempo cíclico

La periodicidad de las mareas, los movimientos de los cuerpos celestes o la sucesión de las estaciones del año condujeron a muchos pueblos de la antigüedad a aceptar un **tiempo cíclico**. En la antigua Grecia, por ejemplo, los filósofos estoicos pensaban que el mundo es destruido periódicamente, tras lo cual se crea un nuevo mundo en el que se repiten los mismos eventos que en el anterior. Ningún suceso puede entonces ser significativo, ya que tarde o temprano volverá a ocurrir, una y otra vez.

Incluso Aristóteles, que rechazaba esta doctrina del **eterno retorno**, alegaba que “de la nada, nada puede salir” (*ex nihilo nihil fit*), por lo que el mundo debería haber existido siempre; el tiempo se extendería eternamente en el pasado y en el futuro.

#### Tiempo lineal

Como señalaba el escritor argentino Jorge Luís Borges (1899-1986), “si el tiempo es infinito estamos en cualquier punto del tiempo”. La eternidad destruye la historia. Pero el cristianismo ponía el énfasis justamente en acontecimientos históricos *únicos*, como la muerte y la resurrección de Jesucristo; la redención carecería de sentido si hubieran ocurrido hechos similares en ciclos cósmicos diferentes.

La doctrina cristiana defendía, pues, un **tiempo lineal**: el universo fue creado *ex nihilo* por Dios y se extinguirá en un momento concreto. El mundo no era eterno, como creía Aristóteles, sino que tuvo un comienzo y tendrá un fin. Para el teólogo romano Agustín de Hipona (354-430) lo único eterno era Dios; cuando le preguntaban a qué se dedicaba Dios *antes* de crear el universo, contestaba que el tiempo forma parte de lo creado —junto con la materia, la energía y el espacio— y, sencillamente, no había un *antes*.



## 3.2. Primeras estimaciones de la edad del mundo

Para los eruditos cristianos estaba claro que solo se rebatiría definitivamente a Aristóteles cuando se pudiera fijar una fecha para el comienzo del mundo. Estos pensadores aceptaban que Dios había hecho el mundo *para* el ser humano, por lo que no tenía demasiado sentido que la Tierra, tras su creación, hubiese permanecido despoblada durante un largo tiempo. Es decir, la historia de la humanidad sería prácticamente simultánea a la historia de la Tierra y, por extensión, a la historia del universo.

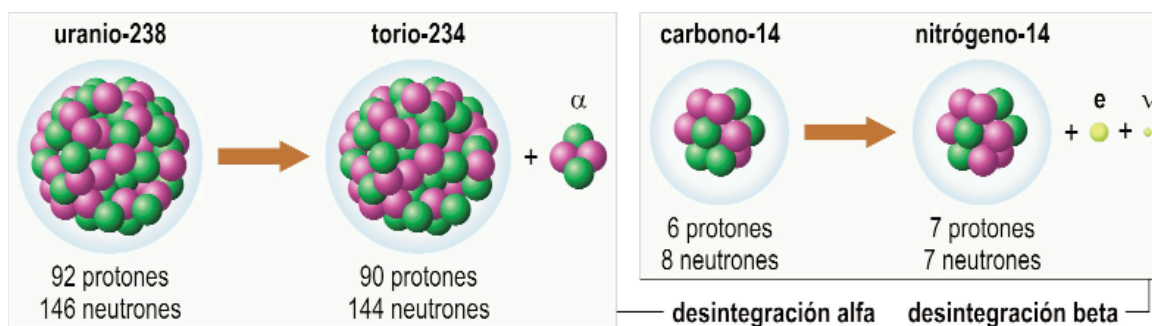
Por tanto, un método razonable para establecer la edad del universo consistía en estudiar la cronología de la humanidad recogida en documentos escritos que, como la Biblia, se remontaban hasta Adán y Eva. Así, el arzobispo irlandés James Ussher (1581-1656) dató la creación del mundo en el mediodía del 23 de octubre de 4004 a. C.

Aun aceptando la cronología de Ussher para la historia humana, a partir del siglo XVIII se empezó a cuestionar que abarcara *toda* la historia de la Tierra. Un número creciente de datos hablaba a favor de una Tierra mucho más vieja que la humanidad:

- El descubrimiento de **fósiles** de organismos marinos en las cordilleras indicaba que la Tierra no había sido siempre igual: las montañas habían emergido lentamente del mar y el nivel de los océanos había oscilado repetidas veces.
- La **evolución** de las especies es un proceso que requiere enormes lapsos de tiempo, de cuando menos varios centenares de millones de años.

La prueba más fiable provino del descubrimiento de la **radiactividad**. Las rocas contienen elementos radiactivos que se desintegran convirtiéndose en otros elementos (véase la ilustración adjunta). Conociendo el ritmo de desintegración y la proporción entre átomos “padres” y átomos “hijos” se pudieron **datar radiométricamente** las rocas.

La moderna aplicación de este método a rocas terrestres y lunares, así como a muestras de ciertos meteoritos, ha arrojado para nuestro planeta una edad que hasta el siglo XX muy pocos se habían atrevido siquiera a soñar: 4540 millones de años.



Las **desintegraciones radiactivas** son procesos que transforman los núcleos de ciertos átomos en otros diferentes. Aunque tienen carácter aleatorio, ya que no se puede decir cuándo se desintegrará un núcleo en particular, sí se puede predecir el porcentaje de núcleos de una roca recién formada que “sobrevivirán” al cabo de un tiempo dado.

Las interacciones responsables de las **desintegraciones alfa** son la fuerza fuerte y la electromagnética, gracias a las cuales un núcleo atómico emite una partícula alfa (un núcleo de helio) y queda transformado en un núcleo con dos protones y dos neutrones menos. La interacción responsable de las **desintegraciones beta** es la fuerza débil, que transforma a un neutrón en un protón más un electrón y un neutrino. (A. S. H.)

### 3.3. La expansión del universo

Cuando las dataciones radiométricas comenzaron a dar sus frutos, allá por 1930, estaba claro que la Tierra es solo uno de los planetas que orbita en torno a una estrella de tantas en una de las muchas galaxias que pueblan el universo. Las estrellas, las galaxias y el universo en su conjunto podían ser incluso más viejos que la Tierra.

Más aún: el universo podía ser *infinitamente* viejo; de hecho, podía ser infinito tanto en el tiempo como en el espacio. A esta conclusión había llegado ya Newton al advertir que, en un universo finito y limitado, la mutua atracción gravitatoria entre las estrellas causaría su caída hacia el centro del conjunto. En cambio, si un número infinito de estrellas se distribuía uniformemente en un espacio infinito, cualquier estrella sería atraída con la misma fuerza en todas direcciones, evitando su desplazamiento neto y manteniendo estático al universo.

Sin embargo, un universo infinito no estaba exento de problemas, el más llamativo de los cuales era el conocido como **paradoja de Olbers** (véase el recuadro “¿Por qué el cielo nocturno es oscuro?”). Por tal razón, cuando Einstein aplicó en 1917 las ecuaciones de la relatividad general para describir el universo buscó una solución estática, pero finita.

#### El Big Bang

Einstein sugirió que la cantidad de materia en el universo sería suficiente para curvar *globalmente* el espacio (y no solo *localmente* alrededor de cada estrella), de modo que su geometría sería el equivalente tridimensional de la superficie de una esfera. Para evitar que en este espacio finito, aunque sin bordes, ocurriera el **colapso gravitatorio** que preocupaba a Newton, Einstein introdujo en sus ecuaciones la llamada **constante cosmológica**; representaba una hipotética fuerza de repulsión, detectable solo a escala cósmica, que compensaría la atracción gravitatoria entre las galaxias.

Pero en 1922 el cosmólogo ruso **Alexander Alexandrovich Friedmann** (1888-1925) obtuvo soluciones de las ecuaciones de Einstein en las que el universo se **expandía**, esto es, unas galaxias se alejaban de otras como fragmentos de una bomba que ha estallado. Esta **gran explosión** (*Big Bang*) no solo podía contrarrestar la gravedad intergaláctica, sin necesidad de constantes cosmológicas; implicaba, además, que el universo no era estático ni eterno, sino que tuvo un comienzo definido.

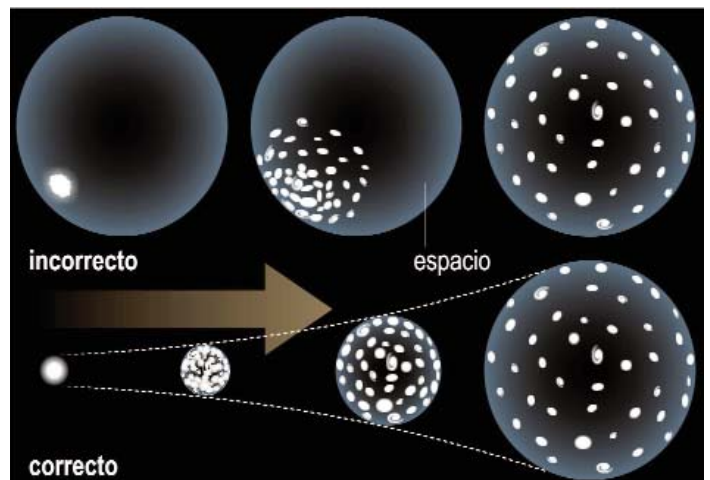
#### Predicciones de la hipótesis de la expansión

Para entender qué significa el *Big Bang* conviene imaginar el espacio como una membrana de goma elástica infinitamente extensa; las galaxias estarían representadas en este modelo por bolas que se hunden en la membrana creando depresiones y pozos, de la misma forma que las galaxias reales generan curvaturas locales en el espacio-tiempo.

Las bolas están fijas en sus “pозos”, pese a lo cual, al estirarse la lámina se distanciarán unas de otras.

#### ¿Por qué el cielo nocturno es oscuro?

El astrónomo alemán Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (1758-1840) planteó en 1823 la siguiente paradoja. El brillo aparente de cada estrella *disminuye* con su distancia a la Tierra, pero en un universo con infinitas estrellas distribuidas uniformemente el número de ellas *aumenta* con la distancia en la misma proporción. En consecuencia, cualquier línea visual acabaría por encontrar una estrella, y cada punto del cielo nocturno debería brillar con la intensidad del Sol.



Contrariamente a una idea popular, la expansión del universo no es el resultado de una explosión en un lugar concreto del espacio vacío (arriba), sino de una extensión del propio espacio (abajo). (A. S. H.)

# UNIDAD 1

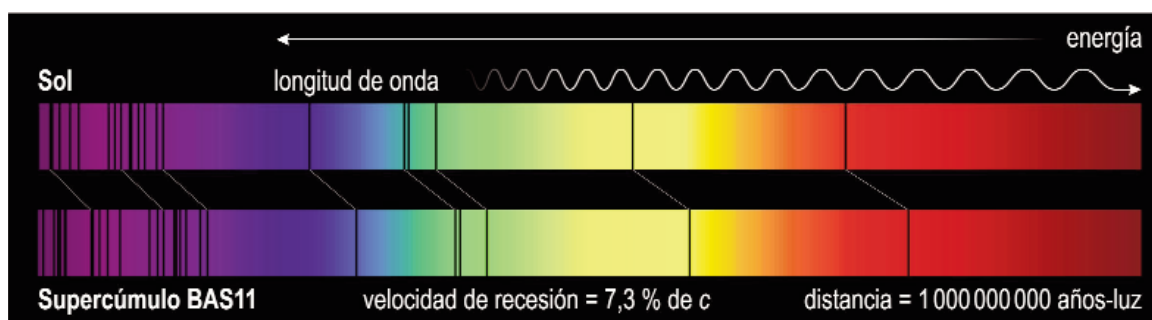
## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO

Análogamente, las galaxias están esencialmente en reposo —o a lo sumo se mueven irregularmente debido a la atracción gravitatoria de otras galaxias—, y es el espacio el que “crece” entre ellas (véase la ilustración adjunta). Decir que las galaxias viajan por el espacio como los restos de una bomba es solo una forma de hablar. El *Big Bang* no fue una explosión *en* el espacio, sino *del* propio espacio.

Supóngase ahora que la membrana doblara su tamaño cada segundo. Un observador anclado en un punto de la misma vería que una bola *A* situada inicialmente a un metro de distancia se hallaría al cabo de un segundo a dos metros, y una bola *B* que estaba a cinco metros distaría diez metros un segundo después. Así, mientras que la bola *A* parecería desplazarse a una velocidad de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , la *B* parecería hacerlo a  $5 \text{ m s}^{-1}$ .

Podemos formular entonces una predicción de trascendental importancia:

Si el espacio se expandiera, deberíamos observar que, cuanto más distante se hallara una galaxia de la Tierra, mayor sería la velocidad con que parecería alejarse aún más.



Los átomos del Sol emiten y absorben luz a ciertas longitudes de onda, que aparecen como líneas en su espectro (arriba). Las mismas pautas aparecen en la luz de un lejano supercúmulo (es decir, una agrupación de cúmulos de galaxias), pero desplazadas hacia mayores longitudes de onda (abajo). Este fenómeno se llama **corrimiento al rojo**. (A. S. H., a partir de una imagen en el dominio público de H. T. Stokes)

### Corrimiento al rojo

Para verificar que el universo se expande era preciso, pues, medir la **velocidad de recesión** aparente de las galaxias. Una forma de hacerlo consistía en medir la **longitud de onda** de la luz que emiten, esto es, la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda. La razón es que, a medida que el espacio se expande, las ondas se estiran, y la luz se torna más roja. Cuanto más se aleje una galaxia, más tiempo estará viajando la luz que emite y, si el espacio se expande a un ritmo constante, mayor será su desplazamiento hacia el extremo rojo del espectro (véase la ilustración superior).

Tras múltiples mediciones, Hubble y su colega **Milton Lasell Humason** (1891-1972) demostraron que, conforme a lo predicho, el **corrimiento al rojo** de las galaxias y, por lo tanto, su velocidad de recesión aparente, es proporcional a su distancia a la Tierra:

$$\text{velocidad} = H_0 \times \text{distancia}$$

Esta relación, formulada en 1929, se conoce desde entonces como **ley de Hubble**. La constante  $H_0$  que aparece en ella —la **constante de Hubble**— mide el ritmo de distanciamiento de las galaxias. Su inverso es, entonces, el tiempo en el que todas las galaxias estuvieron juntas. Ese momento coincidiría con el origen del universo.

Las estimaciones más recientes de  $H_0$ , obtenidas con la ayuda del telescopio espacial Hubble, implican que la edad del universo es de **13 750 millones de años**. Vale decir, superior a la calculada por Ussher en un factor de ¡casi 2,3 millones!



## COMPRENDER LA CIENCIA

### Hipótesis

Se puede definir una **hipótesis** como una explicación provisional o tentativa para un fenómeno dado que se apoya en la experiencia previa, en el conocimiento adquirido, en observaciones preliminares o en la lógica. No se trata, pues, de una mera suposición o conjetura.

A menudo los científicos proponen varias **hipótesis alternativas** para explicar un mismo fenómeno, y decantarse por una u otra exige valorar una serie de criterios:

- **Posibilidad de ser contrastada empíricamente.** Es preferible aquella hipótesis que permita formular **predicciones** más específicas —expectativas concretas de qué deberíamos observar si fuese correcta— corroborables mediante experimentos u observaciones.
- **Mayor poder explicativo.** Por ejemplo, la hipótesis de que se flota mejor en el mar que en un río tiene escaso poder explicativo; en realidad no es una hipótesis, sino una predicción experimental. Pero si se reformula la hipótesis en términos de densidades relativas, da una idea de *por qué* ocurre y, además, se puede extender a otros fenómenos similares.

**Principio de la parsimonia o navaja de Occam.** Ante dos hipótesis con igual poder explicativo es preferible la más simple, la que asume menos supuestos y postulados nuevos.

**Falsabilidad o refutabilidad.** “Falsable” no significa que la hipótesis sea falsa; quiere decir que *si* fuese falsa, dicha falsedad podría ser demostrada empíricamente.

### 4. La génesis de los elementos

La hipótesis de la expansión cósmica se sustentaba en soluciones particulares de las ecuaciones de Einstein que describían correctamente la geometría variable del espacio-tiempo, pero omitían el origen del otro ingrediente del universo: la materia. La formación de los elementos químicos y la explicación de sus abundancias relativas eran problemas a abordar por la física nuclear, no por la cosmología relativista. Fue el físico ruso **George Gamow** (1904-1968) quien combinó en 1945 ambas disciplinas y puso los cimientos de la que, con el tiempo, llegaría a ser la descripción más completa y coherente de la historia total del universo: la **teoría del Big Bang**.

#### 4.1. La infancia del universo

Una importante predicción de la teoría atañe a la temperatura del universo. Tal y como se puede colegir de la ilustración adjunta, a medida que aumenta la longitud de onda de la luz en su viaje por el universo disminuye proporcionalmente su energía, y se reduce la temperatura asociada a la misma. Así, el universo se enfría mientras se expande.

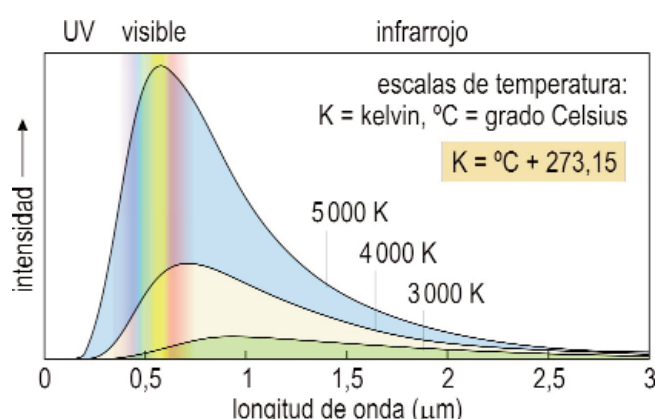
Si proyectáramos estas tendencias hacia atrás en el tiempo hallaríamos que el universo sería cada vez más caliente y también más denso, al comprimirse toda la materia y la energía en un espacio progresivamente menor. La temperatura del universo en sus primeros nanosegundos de vida debió ser de billones de grados, de modo que ni siquiera los protones y neutrones que forman el núcleo de los átomos podían existir. El universo era una “sopa” de quarks y gluones que chocaban entre sí, aderezada con algunos electrones, fotones y demás partículas elementales ligeras. Una región de esa sopa caliente y densa, no mayor que un pomelo, se expandió hasta convertirse en nuestro universo observable.

Lógicamente, el universo observable por los hipotéticos habitantes de otra galaxia será distinto al nuestro, aunque en parte se solapará con él: estos seres verán galaxias que no alcanzamos a distinguir porque su luz no ha llegado todavía hasta nosotros (pero sí hasta ellos, que están más cerca). Si repitieran los razonamientos anteriores también concluirían que su universo observable tuvo el tamaño de un pomelo. En definitiva, se podría concebir el universo primordial como un conjunto infinito de “pomelos” parcialmente superpuestos que se extendían por todas direcciones.

##### Los primeros núcleos atómicos

Se ha comprobado experimentalmente que a los  $10^{-34}$  segundos después de la gran explosión existía ya la **sopa de quarks**. Las ideas sobre qué había anteriormente son algo especulativas, pero la reconstrucción de las etapas por las que atravesó el universo de aquí en adelante cuenta con una base más firme:

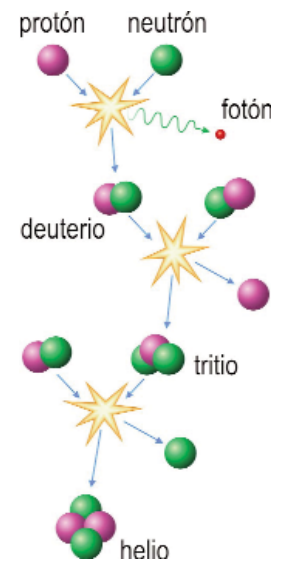
- **Inflación.** Entre  $10^{-36}$  y  $10^{-32}$  segundos tras el *Big Bang* tuvo lugar una expansión cósmica tan fabulosamente rápida (inflación) que al final de la misma el universo multiplicó su tamaño en al menos un factor de  $10^{78}$ .



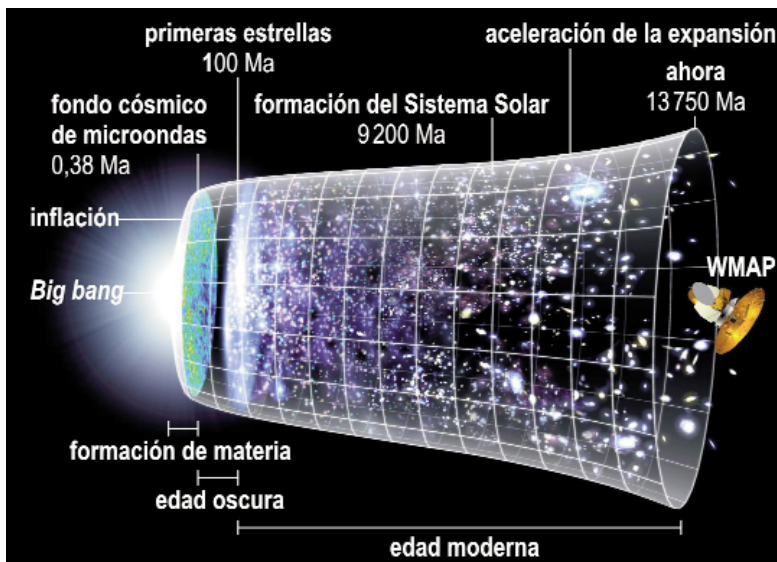
Todo cuerpo emite radiación electromagnética. Su intensidad (la cantidad de energía que transporta) será mayor, y su longitud de onda menor, cuanto más elevada sea la temperatura del cuerpo: solo un cuerpo muy caliente emite luz visible. (A. S. H.)

Se atribuye ese fenómeno a la energía de un nuevo campo, el **inflatón**, en cierto modo análogo al campo electromagnético. No se sabe qué dio al inflatón una energía tan grande, pero se admite que parte de ella se liberó al final de la época inflacionaria y, gracias a la equivalencia entre masa y energía, generó la sopa de quarks.

- **Formación de protones y neutrones.** A los  $10^{-5}$  segundos, el rápido enfriamiento debido a la expansión “congeló” la sopa de quarks y gluones, dejando a estas partículas confinadas para siempre en el interior de protones y neutrones.
- **Nucleosíntesis primordial.** Cuando el universo contaba con unos pocos segundos de edad, el descenso térmico permitió que un 25 % de los protones se acercaran lo suficiente a los neutrones como para que la fuerza fuerte los combinara formando **núcleos atómicos** de helio, litio y berilio (véase la ilustración lateral); el 75 % restante permaneció en forma de protones (núcleos de hidrógeno). La etapa solo duró unos minutos, ya que el ulterior descenso de temperatura detuvo dichas **reacciones nucleares de fusión** e impidió que se formaran núcleos más pesados.



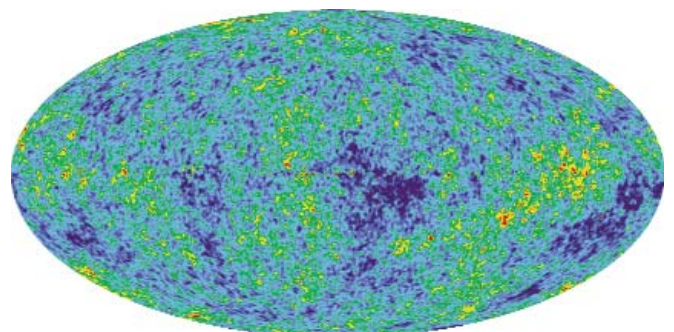
Algunas **reacciones de fusión nuclear**. El deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno. (A. S. H.)



Concepción artística de la expansión del universo. El espacio se representa mediante secciones circulares espaciadas regularmente, que dan una idea del tamaño del universo cada 1000 millones de años (Ma). La expansión asociada al período de la inflación no está representada a escala. WMAP (siglas de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) es la sonda que desde 2003 mide la radiación del fondo cósmico de microondas. A la izquierda de la ilustración pueden observarse algunas imágenes tomadas por el WMAP. También se han representado estrellas en etapas distintas de su desarrollo. (NASA/WMAP. Dominio público)

### El fondo cósmico de microondas

Tras la nucleosíntesis, el universo era un plasma casi uniforme de electrones y núcleos atómicos inmerso en un baño de fotones. Los fotones transmiten las fuerzas electromagnéticas, por lo que interactuaban con los núcleos atómicos y los electrones (dotados respectivamente de carga eléctrica positiva y negativa), que les impedían avanzar grandes distancias antes de ser dispersados. Así, el universo era opaco a la radiación. La situación cambió cuando el universo, a sus 380 000 años de vida, se enfrió hasta unos 3000 K:



La sonda WMAP midió diferencias de temperaturas en el **fondo cósmico de microondas** del orden del 0,001 % por todo el cielo. Las regiones cálidas se representan en rojo, y las frías en azul. (NASA / WMAP. Dominio público)

- **Recombinación.** A esa temperatura, los núcleos y los electrones se combinaron en **átomos** eléctricamente neutros (hidrógeno, helio...) que ya no dispersaban la radiación. El universo se volvió transparente: los fotones podían atravesar el espacio sin obstáculos, y el cosmos quedó bañado en una intensa luz anaranjado-rojiza.

La expansión del universo desplazó esta radiación hasta más allá del infrarrojo y la enfrió; hoy solo queda una débil señal de microondas a 2,725 K (unos  $-270$  °C) que inunda todo el cielo. Cuando, en 1964, los físicos estadounidenses Arno Allan Penzias (n. 1933) y Robert Woodrow Wilson (n. 1936) detectaron este **fondo cósmico de microondas** (FCM) con su antena de radio, una de las principales predicciones de la teoría del *Big Bang* quedó espectacularmente confirmada.

- **Edad oscura.** Tras la emisión del FCM, el universo se apagó. Durante por lo menos 100 millones de años no hubo ninguna fuente de luz y todo era esencialmente negro. En esa época oscura, sin embargo, comenzaron a ensamblarse las estructuras que habrían de ponerle fin: las primeras galaxias y estrellas.

Las mediciones astronómicas han revelado pequeñas variaciones en la temperatura del FCM (véase la ilustración última de la página anterior) que se interpretan como variaciones en la distribución de la materia. La gravedad de las regiones más densas atrajo a la materia circundante y frenó localmente la expansión que afectaba al resto del universo: dichas regiones se desplomaron sobre sí mismas para formar **galaxias**.

Inicialmente se formaron galaxias enanas que más tarde se fusionaron en unidades mayores. La Vía Láctea, por ejemplo, se ha ensamblado a partir de cientos de galaxias menores; y el proceso aún continúa, como lo atestigua la existencia de más de 20 “minigalaxias” que orbitan a su alrededor a la espera de ser anexionadas.

## 4.2. Nacimiento y muerte de estrellas

El gas que formaba las galaxias embrionarias era esencialmente hidrógeno. En su forma molecular el hidrógeno pudo emitir radiación infrarroja y enfriarse, lo que significa que la velocidad de las partículas del gas disminuyó y ya no pudieron vencer su mutua atracción gravitatoria. Las regiones más densas del gas se contrajeron descontroladamente y formaron cuerpos centenaes de veces más grandes que el Sol.

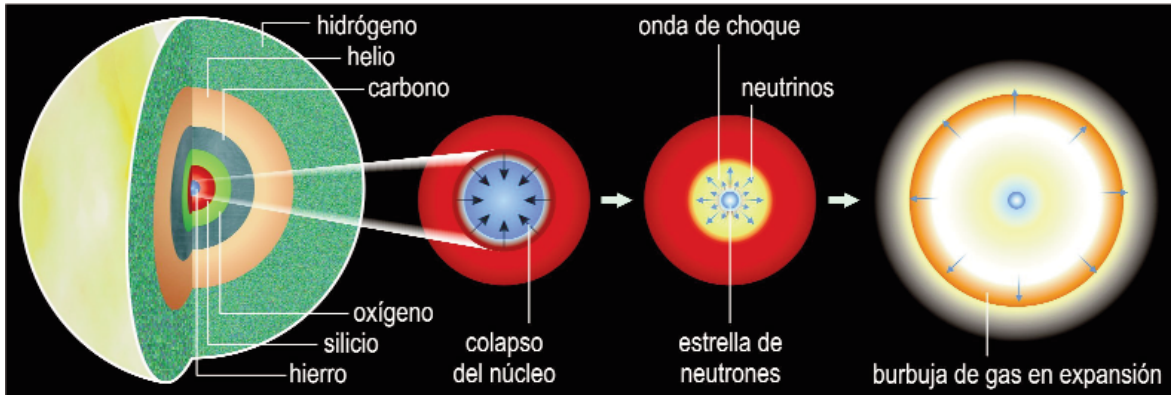
### Las estrellas primigenias

En el interior de esas enormes masas los choques entre átomos calentaron el gas, que alcanzó temperaturas capaces de iniciar la **fusión nuclear** del hidrógeno. A diferencia de lo que ocurrió en los primeros minutos del universo, la fusión no se detuvo en la formación de helio o litio, sino que prosiguió con la **nucleosíntesis** de elementos más pesados, que se dispusieron en capas con un núcleo de hierro (véase la ilustración página siguiente). La fusión también liberó ingentes cantidades de energía y calentó las capas superficiales, que irradiaron una intensa luz ultravioleta. Habían nacido las primeras estrellas.

### Las primeras supernovas

La vida de las primeras estrellas, como la de todas las estrellas muy masivas, fue breve. El núcleo de hierro de estas estrellas no puede sufrir reacciones de fusión cuyo calor compense la gravedad, y se colapsa formando una **estrella de neutrones** superdensa. Este proceso genera neutrinos que calientan la capa que rodea al núcleo y la empujan hacia fuera, creando una onda de choque que en cuestión de horas barre la estrella entera y la revienta. Se produce, así, una **explosión de supernova** (véase la ilustración página siguiente), cuyo brillo puede llegar a superar al de toda una galaxia.

Las supernovas esparcieron por el espacio los elementos pesados originados en su interior. Y gracias a esos elementos pudieron formarse más adelante estrellas como el Sol, planetas como la Tierra y seres vivos como el que está leyendo estas líneas.



Al final de su vida, una estrella muy masiva está formada por capas de elementos progresivamente más pesados. El núcleo de hierro se colapsa y se transforma en una **estrella de neutrones**; los neutrinos que emite empujan al material que forma las capas exteriores de la estrella, que estalla violentamente y forma una **supernova**. (A. S. H.)

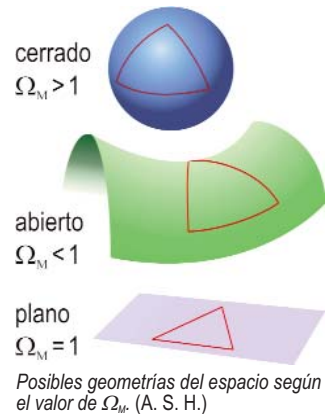


## COMPRENDER LA CIENCIA

### El futuro del universo

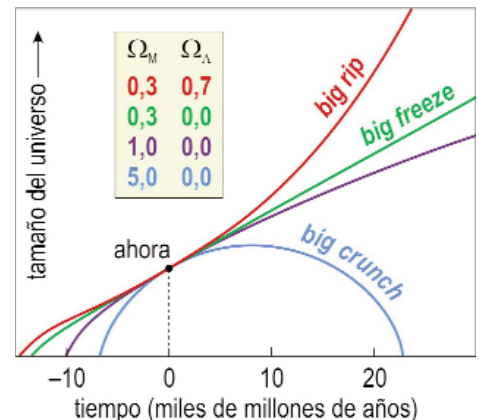
¿Continuará para siempre la expansión cósmica? ¿Habrá un final para el universo? En los modelos de Friedmann la respuesta dependía del valor de un parámetro,  $\Omega_M$ , igual a la **densidad media** de la materia dividida por una **densidad crítica** (que hoy se estima en unos cinco átomos de hidrógeno por metro cúbico):

- Si  $\Omega_M > 1$ , la densidad de la materia sería superior a la crítica y la gravedad frenaría la expansión. El espacio se curvaría como la superficie de un balón (geometría **cerrada**) y el universo terminaría por colapsarse en una **gran implosión** (*big crunch*).
- Si  $\Omega_M < 1$ , la geometría del espacio sería **abierto**, como la superficie de una silla de montar. La gravedad no podría detener la expansión, que continuaría indefinidamente, y la temperatura tendería al cero absoluto (el **gran frío** o *big freeze*).
- Si  $\Omega_M = 1$ , la densidad sería exactamente igual a la crítica. El universo sería espacialmente **plano** y también se expandiría sin fin, aunque a velocidad siempre decreciente.



Tan sencillo esquema dio un giro radical a partir de 1998. Ese año, dos equipos de astrónomos anunciaron un descubrimiento asombroso: desde hace 5 000 millones de años la expansión está **acelerándose**, no frenándose. La responsable parece ser una misteriosa **energía oscura** que ejerce una fuerza repulsiva o antigravitatoria, y podría coincidir con la **constante cosmológica** de Einstein.

Por tanto, el futuro del universo depende no solo de la densidad de materia ( $\Omega_M$ ), sino también de la densidad de energía oscura ( $\Omega_\Lambda$ ). El escenario más inquietante predice que el universo se expandirá a un ritmo tal que toda la materia, desde las galaxias hasta los átomos, terminará disgregada, y sus partículas elementales se separarán a distancias infinitas: será el **gran desgarrón** (*big rip*), el fin del universo.



Possible futures of the universe in function of the values of  $\Omega_M$  and  $\Omega_\Lambda$ . (A. S. H.)



# UNIDAD 1

## ORGANIZACIÓN Y ORIGEN DEL UNIVERSO



### Actividades

14. Tras leer el recuadro “Hipótesis”, discute si la idea de que el universo se expande, introducida por Friedmann, puede considerarse una buena hipótesis.
15. Olbers sugirió que el espacio contiene gran cantidad de polvo que bloquea la mayor parte de la luz estelar. ¿Se evitaría así la paradoja que lleva su apellido?
16. Propón una solución a la paradoja de Olbers coherente con la expansión cósmica.
17. Puesto que todas las galaxias parecen alejarse de la nuestra, ¿significa eso que nos hallamos justo en el centro de la gran explosión?
18. Cuando el personaje que interpreta Woody Allen en la película *Annie Hall* (1977) afirma que el universo se expande junto con *todo* su contenido, su madre replica que “Brooklyn no se está expandiendo”. ¿Quién tiene razón, la madre o el hijo?
19. El espectro electromagnético de la galaxia de Andrómeda presenta corrimiento *al azul*. ¿Qué significa este dato? ¿Entra en conflicto con la ley de Hubble?
20. Según la ley de Hubble, las galaxias que se hallen más allá de 13 750 millones de años-luz se alejarán más deprisa que la luz. ¿Cómo es posible esto, si la teoría de la relatividad asegura que nada puede moverse más rápido que la luz?
21. Utiliza los datos de la ilustración en la que se explica el fenómeno del corrimiento hacia el rojo para calcular la edad del universo.
22. La gravedad parece ser la única fuerza capaz de frenar la expansión del universo. Sin embargo, la fuerza electromagnética es un sextillón de veces más intensa que la gravitatoria. ¿Por qué su papel a escala cósmica es mucho menos relevante?
23. He aquí una versión actualizada de la paradoja de Olbers. Cuando el universo se hizo transparente tras la era de la recombinación, todo punto del cielo brillaba intensísimamente. ¿Por qué no vemos esa luz en la actualidad?
24. Se piensa que un débil resplandor de radiación *infrarroja* captado por el telescopio espacial Spitzer en 2005 proviene de estrellas primigenias. Pero dichas estrellas, por lo que parece, emitían radiación *ultravioleta*. ¿Hay aquí una contradicción?
25. Al bioquímico catalán Joan Oró (1923-2004) le gustaba decir que “venimos de polvo de estrellas y en polvo de estrellas nos convertiremos”. ¿A qué se refería?



## Recuerda

- ✓ La Tierra tiene una edad de 4 540 Ma (millones de años) según las **dataciones radiométricas**. La edad del universo se estima, analizando su tasa de **expansión**, en 13 750 Ma.
- ✓ La **teoría del Big Bang** (gran explosión) explica el origen y la historia posterior del universo a partir de un estado extremadamente denso y caliente que experimentó una rápida expansión. Esta teoría se apoya en tres predicciones que han sido ampliamente confirmadas:
  - **Ley de Hubble**. La velocidad de alejamiento aparente de las galaxias es proporcional a su distancia, tal y como se deduce del **corrimiento al rojo** de la luz que emiten.
  - **Abundancia de elementos primordiales**. En los primeros minutos del universo los protones y neutrones se combinaron mediante **nucleosíntesis** para formar un 25 % de helio y otros elementos ligeros, dejando sin reaccionar un 75 % de núcleos de hidrógeno.
  - **Fondo cósmico de microondas**. Cuando el universo se enfrió lo suficiente los núcleos y los electrones formaron **átomos**; la luz pudo viajar libremente y llegó hasta hoy en forma de radiación de microondas, análoga a la que emitiría un cuerpo a 2,725 K.
- ✓ La nucleosíntesis de los elementos más pesados que el helio tuvo lugar cuando aparecieron las primeras estrellas, que los liberaron al espacio gracias a **explosiones de supernova**.