

¿Por qué resulta tan difícil la comprensión de la astronomía a los estudiantes?

Solbes, J.

Departament de Didàctica de les ciències experimentals i socials.
Universitat de València.

Palomar, R.

Colegio El Prat. Llíria

Resumen:

En este trabajo se muestra como las dificultades de comprensión de la Astronomía están relacionadas con una serie de factores: el hecho de que la historia de la astronomía es uno de los procesos más complejos de toda la historia de la ciencia, la ausencia de observaciones del cielo nocturno y diurno, el problema de las escalas, etc. Se muestra como una presentación de estos temas que siga el desarrollo histórico puede contribuir a mejorar la enseñanza de los mismos y a superar algunas dificultades de los estudiantes.

Palabras clave: astronomía y cosmología, historia de la ciencia, enseñanza y aprendizaje.

Abstract:

This paper shows how the difficulties of understanding of astronomy are related to several factors: the fact that the history of astronomy is one of the most complex processes in the history of science, the absence day and night sky observations, the scales problem, and so on. Shown how an introduction to these topics to follow the historical development can help to improve the education of themselves and to overcome some students' difficulties.

Key Words: astronomy and cosmology, history of science, teaching and learning.

(Fecha de recepción: junio, 2011, y de aceptación: septiembre, 2011)

Introducción

Pocos campos del conocimiento humano tienen tanta presencia en el currículo como la Astronomía, lo que es un reflejo de la importancia que le concede a dicho tema la sociedad. En nuestro país en la educación primaria, en Bloque 1. El entorno y su conservación de la asignatura de Conocimiento del medio natural, social y cultural, aparece en los 3 ciclos. En primer ciclo se tratan: Orientación de elementos del medio físico en relación con el sol. Percepción y descripción de algunos elementos y fenómenos naturales: la luna, las estrellas y el sol, el día y la noche. En 2º ciclo: Orientación en el espacio: los puntos cardinales. Movimientos de la tierra y fases de la luna. Las estaciones del año. Y, en tercer ciclo: El universo. El sistema solar. (BOE, 20-11-2006).

En secundaria aparece en 4 cursos. En las ciencias de la Naturaleza de 1º de ESO en el bloque 2 La Tierra en el Universo. En la Física y Química de 4º de ESO (optativa) en el Bloque 2. Las fuerzas y los movimientos. En las Ciencias para el mundo contemporáneo de 1º de Bachillerato en el Bloque 2. Nuestro lugar en el Universo. En la Física de 2º de Bachillerato en el bloque 2: Interacción gravitatoria, siendo en la primera y tercera de ellas donde la presencia de la Astronomía y Cosmología es más relevante.

Por otra parte, la astronomía es la rama de la ciencia con más aficionados no profesionales posiblemente porque la Astronomía trata problemas de interés para los seres humanos: ¿Cómo empezó el universo? ¿Cómo terminará todo?

¿De dónde provienen los elementos químicos? ¿De dónde proviene el sistema solar? ¿Cómo se origina la vida? Algunas de estas preguntas han acompañado al ser humano desde sus principios y otras han surgido a partir de los conocimientos acumulados. Esta situación es digna de mención dado el poco interés que despierta la ciencia en los estudiantes, convirtiéndose este desinterés en un abandono de los bachilleratos científicos, en particular, de la modalidad de matemáticas y física (Solbes et al, 2007; Solbes, 2011), que produce una reducción, especialmente de chicas, en las titulaciones de Ingeniería, Físicas, etc. Sería pues un error no aprovechar esta rama de la ciencia, que cautiva por sí sola, para despertar el interés por la ciencia en los estudiantes. Por eso, posiblemente, se ha introducido como uno de los bloques de Ciencias para el mundo contemporáneo.

Pese a la reiteración en la enseñanza del tema y al interés del mismo, hay diversas investigaciones (Comins, 1993; Dove, 2002; Trumper, 2001; Trundle et al, 2007; Hanson & Redfors, 2006) que muestran que el aprendizaje sobre astronomía y los diversos modelos de Universo (geocéntrico, heliocéntricos, etc.) presenta grandes dificultades, y una proporción alta de estudiantes no consigue una comprensión adecuada de aspectos básicos de los mismos. Estas investigaciones se han centrado en la astronomía del sistema Tierra-Sol-Luna, dejando de lado las investigaciones astronómicas más recientes (Pasachoff, 2001). Además, distintos estudios ponen de manifiesto las carencias del profesorado de todos los niveles en estos temas, principalmente en maestros de

primaria tanto en activo como en formación (Vega Navarro, 2001; Parker & Heywood, 1998; Camino, 1995; Atwood & Atwood, 1997; Ogan-Bekiroglu, 2007; Mulholland & Ginns, 2008; Kallery, 2001). Esta falta de formación específica se traduce en ideas alternativas del profesorado que acaban transmitiendo al estudiante (Schoon, 1995).

En este artículo se intenta iluminar esta cuestión recurriendo al análisis histórico. Para ello se analizan las teorías y modelos más utilizados a lo largo de la historia de la ciencia para explicar el sistema solar y el universo y, a continuación, se plantean algunas implicaciones didácticas.

Muchas han sido las ideas que las mejores mentes de la humanidad han ido hilvanando desde el comienzo del estudio de la astronomía. Desde el universo del sentido común centrado en la Tierra a las primeras ideas descentralizadoras de Copérnico, pasando por la idea de Bruno según la cual el universo está formado por miles de soles en torno a los que orbitan miles de mundos, o por la de Herschell de la Vía Láctea como galaxia, hasta la imagen actual del universo. E incluso, hasta las teorías de multiversos enunciadas por los más atrevidos cosmólogos que sugieren que el nuestro es uno más de infinitos universos.

Por todo ello, nuestra fundamentación histórica se encuentra dividida en 4 partes:

- **Primeras cosmologías:** Se comienza presentando las ideas que las primeras civilizaciones tuvieron sobre el cosmos. Algunas son mitos pero otras, más basadas en observacio-

nes, plantean un modelo de Tierra plana y de bóveda celeste.

- **La astronomía griega:** La ciencia dio sus primeros pasos con los comienzos de la civilización griega. En este apartado aparecen los modelos de universo geocéntricos basados en observaciones y elaborados por Aristóteles y Ptolomeo. En la Edad Media, otras grandes culturas desarrollaron la astronomía fuera del continente europeo, los árabes que si conocieron los descubrimientos griegos, y los mesoamericanos y chinos que la desarrollaron de forma más aislada.
- **La revolución científica:** Hubo que esperar al siglo XVI para que comenzara el proceso que llevó a desplazar la Tierra del centro del Universo mediante las ideas de Copérnico, Kepler y Galileo. Como colofón al trabajo realizado en el siglo anterior, Newton propone su Ley de la Gravitación Universal, que unificaría las mecánicas celeste y terrestre explicando la dinámica de los cuerpos celestes. También aparecen los éxitos de la Ley de la Gravitación Universal, que proporcionó explicación a fenómenos aparentemente tan dispares como las mareas o las trayectorias de los cometas.
- **Imagen actual del universo:** Con el desarrollo de la astronomía, la astrofísica y la Teoría de la Relatividad General, la ciencia ha podido explicar la evolución del universo desde pocos instantes después de su origen, y establecer el actual principio cosmológico que nos sugiere que

el Universo está formado por miles de millones de galaxias, ninguna de las cuales ocupa un lugar central (físicamente hablando, el universo es homogéneo e isótropo a gran escala), así como comprender los ciclos de vida estelar, la procedencia de los elementos químicos y la formación de sistemas planetarios.

Para realizar esta introducción histórica, nos hemos basado en libros de historia de la ciencia (Bernal, 1976; Bowler & Morus, 2005; Mason, 1985; Kragh, 2007; Sánchez Ron, 2006; Serres, 1991; Solbes, 2002; Belmonte, 1999; Fernández & Montesinos, 2007; Rodríguez, 1998), textos originales (Einstein et al, 1973; Einstein, 1986; Galileo, 1991), libros y artículos de divulgación (Chomaz, 2003; Ferris, 2007; Hawking, 1988; Reeves et al, 2001; Sagan, 2004; Weinberg, 1977; Perucho & Ferrando, 2009), libros de texto y artículos con aspectos históricos (Holton & Bruhs, 1976; Martínez et al, 2001; Martínez Uso, 2007; Valenzuela, 2010; Farrington, 1986), etc.

1. Las primeras cosmologías

A pesar de que muchas de las antiguas civilizaciones han dirigido su mirada a los cielos, su interés ha resultado ser en la mayoría de ocasiones más pragmático que cosmogónico, intentando siempre predecir el mejor momento para la siembra y recogida de sus cosechas, o para la caza.

Es en el llamado Creciente Fértil, una zona que se extiende desde el golfo pérsico y pasando por el Mar Muerto hasta Egipto, donde comenzó la prime-

ra astronomía observacional. Se inventó el primer sistema sexagesimal, se identificaron los planetas y muchas de las constelaciones, y también aquí comienza la hija malquerida de la astronomía, la astrología, alrededor del siglo V a. n. e. (Belmonte, 1999)

En los distintos períodos babilónicos pueden encontrarse desde algunas de las observaciones astronómicas más antiguas de las que se tiene constancia (eclipses de Sol, ortos y ocasos de Venus, representaciones de algunas de nuestras constelaciones actuales, etc.), hasta un catálogo de estrellas, conjunciones planetarias, eclipses de luna, el calendario solar y el uso del gnomon para conocer la hora. Sin olvidar, que el pueblo babilonio estableció las constelaciones zodiacales para usarlas a modo de calendario estelar con el propósito de emitir juicios, controlar el ciclo estacional y adaptarlo al calendario lunisolar oficial (Belmonte, 1999).

A pesar de todo el conjunto de observaciones astronómicas de los babilonios, estas no se plasmaron en un modelo cosmológico científico. Su modelo cosmológico estaba basado en la religión y los mitos. Para los babilonios, el universo estaba formado por una Tierra plana en forma de disco que flotaba en las aguas inferiores, cubierta por una semiesfera de la que colgaban las estrellas. Los cielos se encontraban rodeados de las aguas superiores y los astros salían por los bordes de este mundo para cruzar el cielo y ocultarse por la parte opuesta (Fernández & Montesinos, 2007).

La astronomía en el antiguo Egipto fue una disciplina practicada casi en exclusiva por los sacerdotes egipcios,

dado que las observaciones les proporcionaban el control sobre los ciclos de tiempo y por tanto el poder. Estas ganas de conservar su poder son la causa de la casi total falta de información astronómica en los jeroglíficos (Belmonte, 1999). Los egipcios identificaron a sus divinidades con distintos astros. Uno de los éxitos de la astronomía egipcia fue la creación de un calendario civil que sentaría las bases para nuestro calendario actual.

El pueblo Egipcio, como otros pueblos de la antigüedad, basaba su economía en la agricultura, y predecir la llegada de las estaciones o las fechas más óptimas para la recogida y siembra tenía una importante repercusión. Los egipcios usaban el desbordamiento del Nilo para preparar las tierras de alrededores del cauce para la siembra, así que era de vital importancia conocer este momento con cierta precisión. En ese momento coinciden el solsticio de verano y el orto heliaco (momento en el que una estrella aparece por el horizonte inmediatamente antes de la salida del Sol) de la estrella más brillante del cielo, Sirio. Así, los sacerdotes egipcios tomaron el principio del año justo en el momento en el que Sirio aparecía por el horizonte Este poco antes de la salida del Sol. Comprobaron también que esto tenía lugar cada 365 días y 6 horas (Martínez Uso, 2007; Belmonte, 1999).

La influencia de los cielos en el antiguo Egipto, se pone de manifiesto en la orientación de algunos de sus templos y monumentos, p. e., el templo Meha de Abu Simbel, o la esfinge y las pirámides de Gizeh.

Los egipcios consideraban el universo como una caja en la que la Tierra (Geb)

era la parte inferior con forma de disco cóncavo, rodeado de montañas y flotando en las aguas del abismo Nun. La diosa Nut aparece arqueada, tocando con los dedos de sus pies y de sus manos la tierra, representando las estrellas y con los planetas suspendidos de su cuerpo.

Pero no sólo las grandes civilizaciones han tenido astronomía y cosmología. Muchos son los restos arqueológicos de muy diferentes culturas que demuestran que desde prácticamente los inicios de la humanidad, el ser humano ha sentido fascinación por los cielos y ha utilizado las aplicaciones prácticas de la astronomía. Pueden encontrarse monumentos alineados con los astros diseminados en toda la superficie del planeta. Una muestra de estos es la que sigue: Stonehenge, la rueda de la medicina, el observatorio más antiguo de las Américas, construido por los Saskatchewan alrededor del año 600 a. n. e., o los toros de Guisando (Belmonte, 1999; Fernández & Montesinos, 2007; Sagan, 2004; Stanford Colar Center, 2008)

2. La cosmología geocéntrica

2.1. Las concepciones griegas

El estudio de los fenómenos celestes estuvo ligado desde sus comienzos a la religión y la astrología, y como señala Sagan (Sagan, 2004) “*durante miles de años los hombres estuvieron oprimidos por la idea de que el universo es una marioneta cuyos hilos manejan un dios o dioses, no vistos e inescrutables*”. Esto iba a cambiar con el nacimiento en Jonia de los primeros hombres que comenzaron a

pensar que todo en la Tierra estaba compuesto de átomos, que la Tierra sólo era un planeta que giraba alrededor del Sol y que las estrellas estaban muy lejos de nosotros. Esto generó la idea de que el universo se puede conocer, dado que existen en él regularidades que nos permiten acercarnos a su estructura desde un punto de vista científico, sin necesidad de recurrir a la invención de leyendas.

Pero, ¿qué hizo que esta idea de un universo ordenado apareciera en Jonia?, ¿por qué no surgió en otros pueblos que también habían dirigido sus esfuerzos a observar los cielos? La ventaja de los jonios es que eran un pueblo disperso geográficamente, formado por multitud de islas y sistemas políticos que generaron una diversidad de pensamientos. Una amplia alfabetización y un poder político en manos de mercaderes que buscando la prosperidad, favorecieron el estudio de la tecnología. Además Jonia se encontraba en la confluencia de las civilizaciones egipcia y mesopotámica, que alcanzaron un alto desarrollo técnico, y los sabios jónicos tomaron de estas muchas de sus ideas iniciales (Valenzuela, 2010) purgándolas de sus características astrológicas (Farrington, 1986). Esta revolución del pensamiento humano tuvo lugar alrededor del siglo VI a. n. e., y sentó los cimientos del pensamiento científico (Sagan, 2004).

El primer griego que trató de entender el cosmos racionalmente fue Tales de Mileto (639-547 a. n. e.), huyendo de intervenciones divinas. Tales, por influencia babilónica y egipcia, consideraba la Tierra como un disco plano flotando sobre las aguas, rodeado por la bóveda esférica

del cielo que rota a su alrededor y contiene a las estrellas y al Sol.

Pero este modelo de Tierra plana respaldado por Tales, Anaximandro (610-547 a. n. e.) y Anaxímenes (586-525 a. n. e.), entre otros, no podía explicar observaciones como la desaparición de los barcos en el horizonte, los eclipses, etc. Fue posiblemente Pitágoras (580-500 a. n. e.) el primero en proponer una Tierra esférica en un sistema geocéntrico, aunque otros posteriores rechazaran el sistema geocéntrico (Filolao, finales del S V a. n. e.) o volvieran a la idea de una Tierra plana (Anaxágoras, 499-428 a. n. e.) (Fernández & Montesinos, 2007). Platón (428-347 a. n. e.) y Eudoxo (408-355 a. n. e.), vuelven a considerar la Tierra en el centro del Universo, y el Sol y el resto de los astros moviéndose a su alrededor, explicando así las antiguas observaciones: el Sol y la Luna salen por el este y se ponen por el oeste, las estrellas giran, etc. Esto nos debe hacer pensar que las concepciones del Universo de la antigüedad no eran tan descabelladas, pues se apoyaban en observaciones de la vida cotidiana, en evidencias del sentido común.

Una primera expresión del modelo la realizó Aristóteles (384-322 a. n. e.). Ordenaba todos los cuerpos celestes desde la Tierra hacia afuera: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno. La esfera más externa de las estrellas fijas era movida por el Primer Motor. Todas las cosas por debajo de la esfera de la Luna estaban hechas a base de los cuatro elementos terrestres, tierra, agua, aire y fuego. Los cielos estaban formados por un quinto elemento más puro, la quintaesencia o éter. Los cuerpos celes-

tes eran incorruptibles y eternos, siéndolo también sus movimientos, que eran en consecuencia circulares y uniformes. En la Tierra se daba la generación y corrupción por lo que los movimientos terrestres eran rectilíneos y tenían principio y fin como todos los fenómenos terrestres. Establece así una clara diferencia entre física terrestre y celeste.

Otras contribuciones griegas a la astronomía fueron las de Aristarco (310-230 a. n. e.), que estimó las proporciones entre los radios de la Tierra, la Luna y el Sol y sus distancias relativas y al comprobar que el Sol era mayor que la Tierra, planteó el primer sistema heliocéntrico conocido. Eratóstenes (276-195 a. n. e.), que estimó por vez primera el radio de la Tierra, unos 6400 km lo que permitió calcular los radios y las distancias del Sol y la Luna. Hiparco (190-120 a. n. e.), que determinó las posiciones de unas 1.080 estrellas, clasificándolas en 6 magnitudes de brillo. Claudio Ptolomeo (85-165) que escribió un tratado sistemático que recoge y sistematiza el modelo geocéntrico y toda la astronomía griega, que se conoce por el nombre de su versión al árabe, el *Almagesto*.

2.2. Astronomía árabe y de otras civilizaciones

En la Alta Edad Media (siglos V a XI) Europa sufre una gran transformación. Se produce la decadencia de las ciudades y, con ellas, la de la ciencia, y la emergencia del mundo rural, en el cual domina una cultura religiosa y literaria, que se desarrolla en los monasterios, con escasas contribuciones científicas. Se vuelve entonces a modelos de Tierra

plana, como se puede ver en manuscritos medievales como el Beato de Osma de 1086.

Pero no se puede decir que la Edad Media, en técnica y ciencia, es una época oscura. Cuando se afirma esto se está utilizando una perspectiva eurocéntrica, que olvida las contribuciones de otras civilizaciones como como el Islam, China y Mesoamérica o incluso, más estrictamente, cristianocéntrica, porque excluye el Califato de Córdoba de Europa.

Así, en la Edad Media destacan los árabes que siguen utilizando el modelo geocéntrico y son grandes observadores porque las mediciones astronómicas son indispensables en la práctica del Islam. Estas mediciones sólo fueron superadas por Tycho Brahe cinco siglos después. Los musulmanes mostraron un interés especial por la astronomía, considerándola una de las ciencias más nobles y bellas. La necesidad de orientarse a la Meca para realizar ceremonias, el estudio de los movimientos de la luna para fijar su calendario lunar, o el estudio de la astrología fueron algunos de los aspectos tratados por los astrónomos árabes (Fernández & Montesinos, 2007).

Las precisas observaciones sobre la oblicuidad de la eclíptica de Al-Battani (869-929), las Tablas Toledanas de Al-Zarqali (Azarquiel de Córdoba), los modelos de universo de Abubacer (1105-1185) y su discípulo Al-Betrugi (¿-1204) y las correcciones al modelo de Ptolomeo de Al-Tusi (1201-1273), son algunas de las contribuciones de los árabes a la astronomía.

Podemos ver que el Universo para los antiguos se limita a los planetas más interiores del Sistema Solar y a las

estrellas fijas, es decir, el Universo visible con los ojos. Esta idea limitada del Universo prevaleció hasta que los telescopios, a partir del siglo XVII, permitieron ampliar la imagen y tamaño del Universo.

La astronomía china se desarrolló de forma independiente a la occidental dada la lejanía entre las distintas culturas. Los astrónomos chinos fueron capaces de realizar un catálogo de 1464 estrellas agrupadas en 283 constelaciones, impulsados por la creencia de que las posiciones de los distintos astros servirían para predecir el futuro. La predicción de los eclipses jugaba un papel importante dado que estos presagiaban buenos o malos augurios.

El calendario chino es un calendario lunisolar, construido de nuevo con fines tanto prácticos como astrológicos, con una supuesta capacidad predictiva que otorgara poder a la dinastía correspondiente, de ahí el apoyo de estas a la astronomía. Los astrónomos chinos realizaron medidas del movimiento de precesión de la Tierra, de importancia no sólo para el calendario sino también para conocer la posición de las estrellas y la navegación (Universidad de Mayne, 2007).

La astronomía Maya también es independiente de occidente. Pero la conquista del nuevo mundo trajo consigo la destrucción de mucho del legado escrito, quedando oculto gran parte del conocimiento astronómico del pueblo maya. Igual que en otras culturas, la práctica astronómica estaba relacionada con la búsqueda del poder por parte de los gobernantes mediante la predicción, sin olvidar de sus aplicaciones más prácti-

cas como las relacionadas con la agricultura.

La medida del tiempo y los ciclos astronómicos jugaron un papel preponderante en la astronomía maya. Elaboraron 3 precisos calendarios basados en el Sol, la Luna y Venus, y que el edificio conocido como el caracol en la ciudad maya de Chichen Itza pudo haber servido de observatorio astronómico. Dichos calendarios coincidían en largos períodos de años (Rodríguez, 1998; Fernández & Montesinos, 2007). También fueron capaces de obtener cálculos muy exactos del período lunar con tan solo 24 segundos de diferencia con la precisión actual, proporcionándoles la habilidad de predecir eclipses con mucha precisión. La vía Láctea, Marte, las Pléyades y Orión fueron otros de los objetos estudiados.

3. Del modelo geocéntrico al modelo heliocéntrico

El problema más grave con el que se toparon los astrónomos de la época era el de dar cuenta de los movimientos de los planetas, el Sol y la Luna sobre la esfera celeste de las estrellas fijas. Nuestra estrella, nuestro satélite, y los cinco planetas visibles sin instrumentos ópticos, no giran solidariamente con las estrellas, sino que su posición varía respecto a estas en el transcurso de un año.

Aristarco de Samos ya había sugerido varios siglos antes, que estos problemas se simplificarían al considerar el Sol en el centro del Universo y la Tierra girando en torno a él. La aparente contradicción del modelo con el sentido común,

y las corrientes filosóficas clásicas que consideraban que la Tierra debía ocupar un lugar especial en el universo, hicieron que su teoría no lograra una gran aceptación.

El modelo geocéntrico no fue superado fácilmente. Tuvo vigencia durante casi 20 siglos, desde Aristóteles hasta que Nicolás Copérnico (1473-1543) publicó en 1543 su libro *De las revoluciones de las esferas celestes*, donde se expone el modelo heliocéntrico. Copérnico, que además de astronomía y matemáticas, estudió leyes, pintura y medicina, no menciona en su obra los motivos que le llevaron a desplazar a la Tierra del centro del universo en beneficio del Sol. Uno de esos motivos pudo ser la variabilidad del brillo de Marte, que indicaba variabilidad en su distancia a la Tierra, algo inexplicable con la teoría geocéntrica.

El sistema propuesto por Copérnico no fue aceptado de inmediato, pero sembró la semilla en el momento histórico adecuado para que hombres de la talla de Kepler, Bruno y Galileo empezaran a cuestionarse la visión del universo que había estado vigente durante tanto tiempo.

El astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) trabajó con el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) y utilizó sus datos para perfeccionar el sistema heliocéntrico. Encontró que las posiciones de Marte no se ajustaban a las órbitas circulares de Copérnico. Esto le llevó a enunciar, tras años de trabajo, las leyes que llevan su nombre: Primera, todos los planetas se mueven en órbitas elípticas (casi circulares), ocupando el Sol uno de los focos. Segunda, la rapidez del planeta en la elipse es mayor cuanto

cuanto más próximo está del Sol. Tercera, el período de un planeta aumenta cuando lo hace el radio medio de su órbita.

La teoría heliocéntrica de Copérnico suponía la ruptura radical con las concepciones vigentes, y por ello se encontró con una fuerte oposición tanto científica como ideológica. Fue muy atacada durante más de cien años porque rompía con el modelo geocéntrico, que era coherente con las concepciones feudales dominantes, tanto religiosas como sociales: el papel central de la Tierra en la historia de la salvación del hombre, la necesidad de un primer motor y la existencia de jerarquías naturales.

Los argumentos de tipo ideológico contra el sistema copernicano derivan de su oposición a dichas concepciones apoyadas por la nobleza y el clero. Se utilizaron, en particular, textos de la Biblia como el que afirma que el Sol se detuvo y la Luna se paró (Josué 10, 13). Estos argumentos se basaban en una interpretación literal de la Biblia, que no distinguía el mensaje de la forma literaria en que estaba escrito, fruto de la antigua cultura judaica. Esta literalidad interpretativa de la Biblia se ha continuado utilizando hasta el siglo XIX en contra de las teorías científicas sobre el origen del hombre o la edad de la Tierra. Pero lo peor es que los defensores del geocentrismo no se limitaron a los argumentos, y sus oponentes fueron sometidos a persecuciones. Aunque Copérnico se libró de ellas al publicar su libro el mismo año de su muerte, Martín Lutero le tachó de loco y hereje y la iglesia católica incluyó las *Revoluciones* en el *Índice de libros prohibidos*.

Además, había dificultades “científicas” porque las observaciones efectuadas a simple vista estaban en perfecta concordancia con el modelo geocéntrico y no existía explicación más natural de las mismas. Se argumentaba que si la Tierra se movía los objetos, incluida la atmósfera, saldrían despedidos; un objeto dejado caer verticalmente desde una torre chocaría con la pared o se alejaría de ésta; se observaría paralaje de las estrellas fijas, etc. Pero estos argumentos físicos eran incorrectos. Para comprenderlo fue necesario recorrer el largo proceso en el que fueron construidos conocimientos sobre gravitación (Newton), cinemática (Galileo) y astronomía.

3.1. Las contribuciones de Galileo

Otra gran contribución al nuevo modelo fueron las observaciones astronómicas de Galileo (1564-1642) publicadas en latín en el libro *Sidereus Nuncius (El mensajero celestial, 1610)*. En él expone como el telescopio que él mismo construyó le permitió observar la existencia de cráteres y montañas en la Luna, descubrir los 4 mayores satélites de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes y Calixto) y observar que las estrellas fijas siguen siendo puntuales como a simple vista. Estas observaciones supusieron un importante apoyo a la teoría heliocéntrica porque muestran que los cuerpos celestes no aparecían como perfectos e inmutables, que no todos giraban en torno a la Tierra y que las estrellas se encuentran muy alejadas. En el año 1616, la inquisición juzga y condena al heliocentrismo, por lo cual libros como las *Revoluciones* de Copérnico entra-

ron en el *Índice*, como ya hemos dicho, y Galileo es advertido por el cardenal Bellarmino (que presidió el tribunal que condenó a Bruno) y el padre Seghizzi, comisario general de la inquisición, de que si enseñaba o publicaba sobre heliocentrismo, la inquisición incoaría un proceso contra él.

Galileo, cuando realizó estos descubrimientos, era profesor de la Universidad de Padua, en la república de Venecia. Lo fue desde 1591 a 1610, pero no estaba satisfecho con su posición y por esto dedicó su *Sidereus Nuncius* a Cosme Médicis Duque de Florencia e incluso denominó a los satélites descubiertos de Júpiter estrellas de Mediceas, para que el Duque le diera trabajo.

Años después, ya en Florencia, pensando que la coyuntura era favorable, porque había sido designado papa su amigo el cardenal Barberini, amplía los argumentos en favor del sistema copernicano en su gran obra *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo* (1632). Este libro nos permite entender que los objetos son atraídos por la Tierra y, por tanto, no son despedidos; que los cuerpos que caen verticalmente llevan la velocidad de la Tierra y, en consecuencia, no se alejan de la vertical; y que las estrellas se encuentran a una distancia prácticamente infinita lo cual justifica la ausencia de paralaje. Pero, de hecho, en aquella época, no existía ninguna observación o experimento “crucial”, que pudiera explicarse sólo por una teoría. Hubo que esperar al descubrimiento de las aberraciones estelares o al experimento del péndulo de Foucault.

Como esta obra no se publica en latín, lenguaje de la iglesia, la cultura y la

ciencia, sino en italiano y en forma de diálogo, entre tres personajes (Salviati, defensor de las ideas de Galileo; Simplicio, defensor de las ideas geocéntricas y Sagredo, que actúa de árbitro entre los dos) y con un carácter muy divulgativo, que aún la hace legible en la actualidad, consiguió hacer sus ideas accesibles a la sociedad. Por ello, se inicia una auténtica persecución contra él, pese a su edad avanzada. Fue juzgado por la Inquisición, amenazado con tortura y obligado a renunciar de sus ideas, cosa que Galileo hizo para salvar su vida. De hecho, años atrás, en 1600, Giordano Bruno, había sido sometido a torturas para que renunciase a sus ideas, el heliocentrismo y la infinitud del Universo, formado por miles de soles en torno a los que orbitan un gran número de mundos habitados (anticipando así, aunque a pequeña escala, la imagen actual del universo). Al no hacerlo, fue quemado en la hoguera.

La abjuración de Galileo fue leída públicamente en todas las iglesias de Italia, siendo condenado a permanecer confinado hasta su muerte (que tuvo lugar en 1642) en una villa en el campo. En este encierro escribió *Discursos y demostraciones sobre dos nuevas ciencias pertenecientes a la mecánica y el movimiento global* que se publicó en Holanda, dado que había sido incluida en el "Índice" (donde permaneció junto al de Copérnico y otro de Kepler hasta 1835). Cabe señalar que esta condena de las teorías de Galileo se ha prolongado varios siglos, hasta muy recientemente. El Vaticano no anunció hasta 1968 la conveniencia de anularla y sólo la hizo efectiva en 1992.

3.2. *La gravitación universal*

En los cincuenta años siguientes los científicos siguieron abordando el problema de la gravitación. En el siglo XVII Descartes, que identificaba la materia con el volumen, negaba que pudiese existir el vacío y proponía que el movimiento de los planetas alrededor del Sol (o satélites en torno a planetas) estaba provocado por el movimiento de rotación de un vórtice situado en el cuerpo mayor.

También son reseñables los trabajos de Huygens en astronomía, que construyó un telescopio con el que descubrió Titán, un satélite de Saturno, y aclaró que las protuberancias laterales de este planeta, vistas y dibujadas por Galileo, eran los anillos.

Pero el más destacado fue Isaac Newton (1642-1727) que en 1661 ingresó en el Trinity College de Cambridge como asistente de los pensionistas, donde tuvo como profesor de matemáticas a Barrow y formuló el teorema del binomio. Durante el otoño de 1665 y el año 1666, recién graduado como bachiller de artes, tuvo que retirarse a su granja por la terrible peste de Londres. En este período formuló su hipótesis sobre la fuerza de gravitación, suponiendo que la fuerza que retiene a la Luna en su órbita es la misma que actúa sobre una piedra que cae. En 1667 regresó a Cambridge y, ya maestro en Artes, fue nombrado catedrático de matemáticas en 1669. Esto le dio a Newton la libertad de proseguir sus estudios en mecánica, matemáticas, óptica, astronomía, alquimia y teología y, aunque su fama se debe a las primeras, dedicó buena parte de su tiempo a las dos últimas. En 1672 publi-

ca su teoría acerca de la luz y los colores que le envolvió en tan amargas controversias con sus rivales que y resolvió no publicar nada.

Los científicos ingleses Halley, Hooke y Wren a partir de la fuerza centrípeta de Huygens y de la tercera ley de Kepler, dedujeron que la fuerza que actuaba sobre los planetas era inversa del cuadrado de la distancia, pero no pudieron deducir la órbita que debería seguir un planeta sometido a dicha fuerza. Por eso en 1684 Halley fue a consultarle a Newton dicho problema. Este le dijo que ya lo había calculado. Halley le persuadió a que publicase este trabajo y en 1687 se publicaron los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, (*Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*) escrito en latín. El gran éxito de esta obra, de difícil lectura en la actualidad y que seguía la estructura deductivo-matemática de los *Elementos* de Euclides, influyó considerablemente en el estilo de los escritos científicos posteriores. Consta de tres libros. En el 1º estudia los aspectos causales del movimiento de uno o dos cuerpos en el vacío, a partir de las tres leyes de la dinámica. En el 2º libro estudia el movimiento de los cuerpos en medios con rozamiento. Y es en el tercero de ellos, donde Newton deduce la fuerza gravitatoria y trata el sistema del mundo, es decir, la gravitación, utilizando la herramienta matemática desarrollada en los dos primeros libros.

Con la nueva concepción de fuerza, el problema de los movimientos de los cuerpos celestes se planteaba de forma distinta a como lo hizo Descartes. Efectivamente, cualquier cuerpo que no tenga

un movimiento rectilíneo y uniforme estará sometido a fuerzas. Así pues, es lógico plantearse qué fuerza debe estar actuando sobre la Luna para que describa su órbita.

Según señala Newton en los 'Principia': "*El que los planetas puedan ser retenidos en sus órbitas es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada, por su propio peso, se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea... viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a ese camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Y cuanto mayor sea la velocidad con que se proyecta, más lejos va antes de caer a tierra. Podemos suponer por tanto que la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de (muchas) millas antes de llegar a la Tierra, hasta que finalmente, excediendo de los límites de la Tierra, pasará totalmente sin tocarla*". Como vemos, con esta analogía entre el movimiento de un proyectil y el de la Luna o el de un planeta, Newton estableció, por primera vez, la relación entre el movimiento de los cuerpos terrestres y celestes, superando una de las más grandes barreras del avance del conocimiento científico en la historia de la ciencia.

A pesar de la debilidad de las fuerzas gravitatorias para cuerpos utilizables en el laboratorio, unos cien años después, Cavendish (1731-1810) realizó la verificación experimental directa de la ley de Newton midiendo la atracción entre dos esferas de plomo mediante una balanza de torsión y, consiguientemente, determinó la constante de la gravitación universal G , aunque realmente, el experi-

mento de Cavendish buscaba calcular la densidad de la Tierra y no la constante universal como suele atribuírsele (Moreno, 2000). Una vez conocido el valor de G podemos determinar la masa de la Tierra. Por ello se dice que Cavendish fue el primer hombre que “pesó” la Tierra. Además, con la tercera ley de Kepler podemos calcular la masa del Sol o cualquier planeta con satélites (cuyo periodo y distancia con respecto al planeta conozcamos).

3.3. Aplicaciones de la Gravitación universal

La ley de gravitación universal, permitió explicar una serie de fenómenos. En primer lugar, las perturbaciones en la trayectoria de la Luna por la influencia gravitatoria de los restantes cuerpos del sistema solar. Así mismo, las mareas oceánicas porque la Luna (y en menor proporción el Sol) atraen la parte más próxima del océano y tienden a elevar las aguas; y la forma de esferoide achatado de los planetas por el efecto combinado de la gravitación (que formaría esferas a partir de la materia inicialmente dispersa) y de la rotación alrededor del eje (ensanchamiento en el ecuador y aplastamiento en los polos). Por último, las distintas trayectorias que pueden describir los cometas. Si los cometas son periódicos, su trayectoria será una elipse muy excéntrica. El más famoso de ellos es el cometa que Halley estudió cuando apareció en 1682 y para el que predijo un periodo de aproximadamente 75 años. Su vuelta en 1756 y tres veces más desde entonces, tras recorrer una amplia elipse que se extiende más allá

del último planeta, fue interpretada como un importante triunfo de la mecánica newtoniana. Si los cometas no son periódicos, su trayectoria será abierta, es decir, una hipérbola o una parábola.

Desde Halley hasta la actualidad se han producido una serie de descubrimientos astronómicos relacionados con la ley de gravitación que han puesto de manifiesto su carácter universal, es decir, que el movimiento y la posición de los cuerpos celestes están regidos por las mismas leyes que los cuerpos terrestres. Así, por ejemplo, el descubrimiento de nuevos planetas a partir de las perturbaciones que producen en sus órbitas los planetas ya conocidos: las irregularidades en la órbita de Urano, descubiertas en 1781 por Herschel, condujeron al descubrimiento de Neptuno en 1846 por Leverrier y Adams; por las perturbaciones que producía en este último fue descubierto Plutón en 1930 por Tombaugh. Pequeñas perturbaciones en la órbita de Mercurio fueron atribuidas a un planeta más próximo al Sol y no detectado, hasta que fueron explicadas por la teoría general de la relatividad de Einstein.

Hacia 1784 Herschel mostró que las estrellas observables constituían un sistema con forma de lente, es decir, una galaxia. En consecuencia si miramos en la dirección del plano de la galaxia vemos muchas estrellas y, en dirección perpendicular a él pocas, por tanto la Vía Láctea corresponde al plano de nuestra galaxia. El mismo Herschel observó en 1803 que algunas parejas de estrellas próximas giran una alrededor de la otra (estrellas binarias), según la ley de la gravitación. También se observó (Halley en 1714, Messier en 1781) que las estre-

llas tienden a agruparse por efecto de la gravitación, formando cúmulos globulares y abiertos. Por último, desde que en 1923 Hubble, director del Observatorio del Monte Wilson, mostró la existencia de otras galaxias y como veremos más adelante, se ha observado que éstas se agrupan en cúmulos y supercúmulos galácticos.

4. Cosmología: Imagen actual del universo

Con el avance de la astronomía, la astrofísica y la llegada de la Teoría de la Relatividad General, el ser humano se encuentra con la posibilidad de encontrar una explicación al universo. Gamow formula el problema de la cosmogonía científica “*en el sentido de reconstruir el proceso evolutivo que permitió llegar de la sencillez de los primeros días a la inmensa complejidad actual del universo que nos rodea*” (Gamow, 1993). A este problema se llevan enfrentando los físicos desde que en 1917, Einstein trató de encontrar una solución a sus ecuaciones de la teoría general de la relatividad que describa la geometría del Universo. A partir de las ideas cosmológicas de su época supuso que el Universo era estático, pero al ver que sus ecuaciones no proporcionaban una solución estática, se vio obligado a introducir la constante cosmológica, que implicaba una repulsión entre las galaxias para compensar la atracción gravitatoria, debida a la expansión del propio espacio. Años después lo calificó del “*peor error de mi vida*”. Sugirió que la curvatura del espacio podía hacer el Universo cerrado, pero

sin límites, ya que un haz de luz propagándose se curvaría por la presencia de materia y acabaría volviendo a su punto de partida. Esto implica que el Universo posee un radio pero no un centro o un límite. El mismo año William de Sitter obtuvo otra solución estacionaria.

4.1. La expansión del Universo

En 1922 el soviético Alexander Friedmann obtuvo unas soluciones generales no estáticas de las ecuaciones de Einstein que implicaban un Universo en expansión (o contracción), que no fueron inmediatamente conocidas en Occidente, por lo que el belga George Lemaître, que había estudiado con Eddington, las obtuvo independientemente en 1927. Implicaban un radio que crece con el tiempo, lo que le llevó en 1931 a proponer una solución con radio nulo en el origen del tiempo, es decir, a la idea del “átomo primordial” (nombre que no tuvo fortuna) como origen del Universo.

Pero estos trabajos medio olvidados por su carácter matemático cobran actualidad cuando Edwin Hubble, astrónomo en el gran telescopio de Monte Palomar (EEUU), observa que muchos objetos denominados nebulosas son realmente galaxias exteriores a la Vía Láctea y descubre en 1929 que las líneas espectrales de dichas galaxias estaban desplazadas hacia longitudes de onda mayores (desplazamiento hacia el rojo). Hubble encontró una relación lineal entre el desplazamiento al rojo y la distancia a las galaxias, según la expresión $c \cdot z = H_0 \cdot d$, donde H_0 es la constante de Hubble. Este hecho, explicado por un efecto similar al efecto Doppler, y la relación

del desplazamiento al rojo con la velocidad, $v=cz$, mostró que las galaxias se alejaban de la Tierra con una velocidad v mayor cuanto mayor era su distancia d a nosotros. Esta H es igual a la inversa de la edad del Universo, por lo que la velocidad de alejamiento de las galaxias nos da datos sobre esa edad. Estos datos se ven confirmados por otros, como la abundancia en la Tierra de los isótopos de Uranio 235 y 238 y los cálculos sobre la evolución de las estrellas, e indican que la expansión del Universo comenzó hace unos 13700 millones de años, lo que a su vez nos indica que el tamaño del Universo visible sería de unos 13700 millones de años luz. Debido a la expansión del universo, los objetos que emitieron su luz hace 13700 Ma, se encuentran actualmente a 46000 Ma, distancia que es conocida como radio del universo observable (Davis & Lineweaver, 2004).

En 1946 Georges Gamow, que había estudiado con Friedmann, y sus colaboradores Ralph Alpher y Robert Herman elaboran una teoría que explica el origen del Universo a partir de la explosión de un núcleo inicial que contenía toda la materia y la energía del Universo actual, denominada con ánimo de ridiculizarla “*big bang*” (Gran Explosión) por Fred Hoyle, nombre que actualmente denomina la teoría. Las condiciones tan particulares de dicho objeto tuvieron como consecuencia que su densidad, temperatura y gravedad alcanzaran valores máximos. Como consecuencia de la gran explosión inicial, empezó la expansión del Universo (no se trata de que el núcleo proyectase violentamente hacia el exterior toda la materia que contenía sino de que el espacio se crea

en la expansión), disminuyendo la temperatura y la densidad. Al mismo tiempo que se expandía, se formaron las partículas elementales, los átomos sencillos (hidrógeno, deuterio, helio), las galaxias, estrellas y sistemas solares y, finalmente, la vida. Dos años después predijeron una radiación de fondo de unos 5 K (grados Kelvin).

El universo en expansión creado a partir de un núcleo inicial compitió con la idea de un universo estacionario para convertirse en la teoría más aceptada en la década de los 50. La mejor forma de dilucidar la cuestión que enfrentaba a ambas teorías es, en palabras de Gamow (1993), “*acumular datos sobre la edad probable de las distintas partes fundamentales y hechos que caracterizan el estado presente de nuestro universo*”. En su libro recopila las edades obtenidas con distintos métodos, de átomos, rocas, océanos, la Luna, el Sol y las estrellas, los cúmulos galácticos y la Vía Láctea, obteniendo para todas ellas un valor que coincidía de forma aproximada. El autor concluye que “... *los hechos básicos que caracterizan al universo tal cual lo conocemos hoy, son el resultado directo de algún proceso evolutivo que debe haber comenzado hace (...) miles de millones de años*”.

La predicción de Hubble se olvidó hasta que en 1964 el astrofísico Arno Penzias y el físico Robert Wilson, investigadores de los laboratorios Bell, que trabajaban en la detección de ondas de radio de la galaxia fuera del plano de la Vía Láctea, encontraron la existencia de un ruido proveniente de todas las direcciones del espacio con una longitud de onda de 7,35 cm (microondas). Trataron

de descartar todas las posibles fuentes del ruido (electrónica, excrementos de paloma alojados en su antena, foco de ondas de las cercanías, etc.). Estas microondas de temperatura alrededor de los 3K, coincidían con la predicción realizada ese mismo año por Robert H. Dicke y James Peebles. Estos físicos habían reproducido de manera independiente los estudios de Gamow, Alpher y Herman, llegando a la misma conclusión: El universo primitivo, como consecuencia de su elevada temperatura, había emitido radiación, que actualmente y debido a la expansión del espacio ahora debía encontrarse muy desplazada al rojo. Cuando Dicke y Peebles se disponían a verificar su predicción teórica recibieron la noticia de que el grupo de Penzias y Wilson se habían adelantado a su descubrimiento.

En resumen, la teoría de la Gran Explosión se considera confirmada por esos tres hechos: 1) La existencia de la radiación de fondo de microondas. 2) La separación de las galaxias o su desplazamiento hacia el rojo. 3) una cuarta de helio y pequeñas cantidades de deuterio y tritio.

La solución de las ecuaciones de la Teoría General de la Relatividad de Einstein, que Alexander Friedmann elaboró en 1922 ofrece tres modelos de evolución del Universo. Es una situación análoga a cuando se lanza desde la Tierra un proyectil hacia el cielo a una velocidad menor, mayor o igual a la velocidad de escape, 11,2 km/s (considerando despreciable el rozamiento con la atmósfera). Si es menor, caerá de regreso a la Tierra. Si es igual, empezará a escapar

y no regresara. Si es mayor escapa con facilidad.

El primer modelo predice un Universo que se expande indefinidamente. La cantidad de materia que contiene no es suficiente para equilibrar la expansión por medio de la fuerza gravitatoria. El Universo es, por tanto, abierto e infinito. Corresponde a una geometría espacio-tiempo de curvatura negativa como la de una silla de montar.

En el segundo modelo, la evolución del Universo corresponde a una expansión en la que la velocidad de separación de las galaxias disminuye gradualmente aunque no llega a ser nula. Como consecuencia, el Universo es infinito. La geometría espacio-tiempo pertenece al tipo plano: geometría euclídea.

En el tercer tipo evolutivo de Friedmann la fuerza de atracción gravitatoria de la materia del Universo alcanza un valor lo suficientemente grande como para detener la expansión y volver, mediante una Gran Implosión, al estado original y, tal vez, originar nueva Gran Explosión. La geometría que implica este modelo corresponde a una de curvatura positiva como la de una esfera. El Universo tiene un volumen infinito pero es cerrado.

De acuerdo con lo anterior se puede concluir que la masa que contiene el Universo determina su evolución de acuerdo con uno de los tres modelos citados. En Cosmología se acostumbra a no utilizar la masa sino la relación entre la densidad de la materia del Universo y la llamada "densidad crítica". Dicha relación se simboliza por la letra W . La "densidad crítica" se refiere a la que tendría un universo que evolucionara de acuerdo

con el segundo modelo de Friedmann. Según la Teoría General de la Relatividad, dicha “densidad crítica” tiene un valor de unos 10^{-30} g/cm^3 . Por tanto, si W es menor que 1, el Universo tendrá una evolución como la descrita por el modelo uno y si el valor de W es mayor que 1, la evolución será la correspondiente al modelo tercero.

Después de realizar medidas reales de la masa de las galaxias contenidas en un volumen determinado del Universo, se ha obtenido para W un valor de 0,1 lo cual implica que nuestro Universo evolucionaría de acuerdo con el modelo uno, es decir se expandiría indefinidamente. Otros datos suministrados por el telescopio espacial Hubble apoyan la teoría de que el universo nunca dejará de estar en expansión. En efecto, los datos de su espectrógrafo, cuyo funcionamiento no se ha visto afectado por el defecto en el espejo, indican que la cantidad de deuterio (isótopo del hidrógeno) es de 15 partes por un millón de partes de hidrógeno, inferior a la prevista. Esto indica que no existe suficiente materia en el universo para llevarlo hacia un colapso final.

Sin embargo investigaciones posteriores han puesto de manifiesto la existencia de “materia oscura” que no se había computado con anterioridad por sus efectos gravitacionales. Algunos cosmólogos explican dicha materia oscura a partir de la masa de los neutrinos, otros, como Stephen Hawking mediante agujeros negros microscópicos y otros con partículas exóticas aún no detectadas. Recientemente, datos sobre la velocidad de alejamiento de supernovas lejanas parecen poner de manifiesto que la velocidad de expansión del universo se

está acelerando, debido a una expansión del propio espacio. Si dos partículas se separan, no se conserva la energía del sistema, por lo cual se ha introducido una energía del vacío (u oscura), recuperando así la constante cosmológica de Einstein. Estos 3 ingredientes, materia ordinaria y oscura y energía oscura harían que $W=1$. Pero lo cierto es que en la actualidad no se conoce con exactitud el valor de W y no se puede asegurar si nuestro Universo es abierto, cerrado o plano ni su evolución futura.

Volviendo al descubrimiento de la radiación de fondo de microondas, el hecho de que se observe con igual intensidad y con un grado de precisión muy elevado, indica que el universo tenía una temperatura y densidad casi uniformes. Esto sugiere que en algún momento las regiones que emiten esta radiación estuvieron en equilibrio, pero el tiempo transcurrido entre el Big Bang y este momento fue demasiado pequeño para que alguna interacción se propagara, como máximo a la velocidad de la luz. Este es el llamado “Problema del horizonte”.

Existe otro problema que surge de la teoría del Big Bang, y radica en el delicado equilibrio entre la potencia del estallido y la fuerza de gravedad. Este equilibrio puede decantarse por un modelo de universo u otro, tal y como se señala antes, de entre las posibles soluciones obtenidas por Friedmann. El conocido como “Problema de la planitud del Universo”, es un problema porque cualquier mínima desviación en la densidad del universo respecto a la densidad crítica, habría supuesto un universo muy distinto al que conocemos. Un 1% por enci-

ma habría formado un universo que en poco más de tres minutos se hubiera vuelto a contraer, y un 1% por debajo un universo sin la densidad necesaria para formar las galaxias.

La teoría de la inflación propuesta por Alan Guth en 1981, intenta resolver ambos problemas sugiriendo que muy poco después del nacimiento del universo (10^{-35} s), este experimentó un aumento de su tamaño de 10^{50} veces durante un breve intervalo de tiempo (10^{-20} s). La idea de Guth es que el universo primigenio contenía una materia singular capaz de ejercer una fuerza antigravitatoria. Desde la física de partículas vio respaldada su idea con el concepto de fluctuaciones cuánticas del vacío (Vilenkin, 2006).

4.2. *Astrofísica: Evolución de las estrellas*

Las primeras ideas sobre la fuente de la energía en las estrellas fueron propuestas en el siglo XIX por Kelvin y Helmholtz, que sugirieron provenía de la energía de la gravedad al contraerse la estrella. En 1920 Arthur Eddington propone la energía nuclear como solución, basándose en la equivalencia masa-energía (Solbes & Tarin, 2008), pero no fue hasta el 1938 cuando el físico Hans Bethe descubrió el proceso de fusión nuclear estelar, lo que se conoce como ciclo del carbono. Por su descubrimiento recibió el Nobel en 1967.

El origen de las estrellas se encuentra en la agregación, producida por la fuerza de gravitación, de núcleos de hidrógeno y helio que forman el gas estelar. A medida que dicha fuerza atrae a los núcleos,

se juntan y se produce un calentamiento del gas. Cuando la temperatura es del orden de 10 a 20 millones de grados, los núcleos de hidrógeno sufren un proceso de fusión nuclear y se origina helio. Mientras la estrella se encuentra en esta fase se dice que evoluciona siguiendo la secuencia principal. En el caso de una estrella del tamaño del Sol dicho periodo tiene una duración aproximada de diez mil millones de años.

La fusión del hidrógeno tiene como consecuencia un aumento de la concentración de helio en el núcleo de la estrella y una disminución de los núcleos de hidrógeno. Al incrementarse la proporción de átomos más pesados, el núcleo de la estrella se hace más denso, se contrae y se calienta más. El aumento de temperatura permite el desarrollo de reacciones nucleares del helio que tienen como resultado la formación de elementos más pesados (carbono y oxígeno). El calor producido en estas nuevas reacciones de fusión hace que la estrella aumente su tamaño y se enfríe. Se ha convertido en una gigante roja.

Después de agotado el helio, se realizan reacciones de fusión dando como resultado núcleos cada vez más pesados. Cuando se obtiene hierro, las fusiones nucleares terminan porque las reacciones necesitarían energía para producirse.

Las fases siguientes de la evolución estelar vienen determinadas por la masa de la estrella. En los cuerpos de masa inferior a 1,5 veces la del Sol (límite de Chandrasekhar) la estrella se colapsa por las fuerzas gravitatorias dando lugar a enanas blancas, cuerpos de miles de km de radio y una densidad muy

grande (10^4 kg/cm^3). La energía emitida disminuye con el tiempo y la estrella se transforma en un cuerpo oscuro y frío llamado enana negra.

Si la masa de la estrella está comprendida entre 1,5 y 2,5 veces la masa del Sol (límite de Landau-Oppenheimer), el colapso gravitatorio hace que los electrones caigan al núcleo y reaccionen con los protones que se encuentran en él. De esta manera se forman neutrones y neutrinos. La estrella se transforma en una estrella de neutrones, con radios de decenas de km y densidades de 10^{10} kg/cm^3 . Una variedad de estas estrellas la constituyen los pulsares que emiten ondas de radio de forma periódica como consecuencia de su movimiento de rotación, como un faro. Por ellos sus descubridores, Hewish y Jocelyn Bell inicialmente pensaron que se podía tratar de una señal de inteligencia extraterrestre. La materia exterior de la estrella de neutrones es expulsada violentamente por la onda expansiva creada en el núcleo. En este caso se dice que ha tenido lugar la explosión de una supernova. En Europa se han observado explosiones de ese tipo en 1572, 1604 y 1987. La variedad descrita pertenece a la clase denominada supernova tipo II.

El sistema formado por dos estrellas se llama estrella binaria. Si una de ellas es una enana blanca, puede pasar materia de la mayor a la enana produciendo una violenta explosión de esta última. En este caso se dice que se trata de una supernova tipo I. Las dos variedades de supernovas presentan características diferentes: en las longitudes de onda comprendidas entre 6.000 y 7.000 Å del

espectro de las supernovas tipo II aparece un pico, llamado H-alfa.

Cuando la masa de la estrella es superior a 2,5 veces la masa del Sol, la contracción gravitatoria del núcleo resulta tan grande que ni los neutrones pueden soportar el colapso. Este hecho da lugar a un cuerpo llamado agujero negro que es otro ejemplo de predicción de la Teoría General de la Relatividad, obtenido como una solución de las ecuaciones de la Relatividad General por Karl Schwarzschild, pocos meses después de que en 1915 Einstein enunciara su teoría. Como la densidad de este objeto es tan grande, la atracción gravitatoria resulta enorme y dentro del radio crítico o de Schwarzschild, nada puede escapar a su acción, ni siquiera la luz. De ahí el nombre de agujero negro que propuso Wheeler en 1969. Para hacernos una idea de estas densidades es suficiente ver que si en un agujero negro se iguala la velocidad de escape a la velocidad de la luz, se obtiene el radio de Schwarzschild, que para agujeros negros cuya masa sea igual a la de la Tierra valdría 0.8 cm, a la del Sol 3 km y a la de 3 soles, 9 km.

Como un agujero negro es pequeño y no emite radiación, era difícil dar crédito a su existencia, pero actualmente existen varios candidatos firmes a agujero negro en la constelación del Cisne, en Circe, etc. Son fuentes intensas de rayos X que provienen de sistemas binarios, en los que una estrella visible gira alrededor de un compañero invisible. La mejor explicación es que se está quitando materia de la superficie de la estrella visible que cae en espiral hacia la invisible, adquiriendo una temperatura

elevada y emitiendo rayos X. A partir de la órbita observada de la estrella se puede determinar la masa de su compañero invisible y, como en el caso de Cisne X-1 es 6 veces la solar, es muy probable (hasta un 95 %) que se trate de un agujero negro.

Los astrofísicos se encuentran cada vez más seguros de que existe un agujero negro en el centro de algunas galaxias, por ejemplo, en M 87, una galaxia gigante que, se encuentra en Virgo, distante unos 52 millones de años luz de la Tierra. Las últimas pruebas las aportó el telescopio espacial Hubble puesto en órbita en abril de 1990, que ha tomado imágenes de la galaxia mejores que las obtenidas hasta ahora. Las imágenes muestran que las estrellas de esta galaxia se encuentran muy concentradas en su centro, como si fueran siendo atraídas hacia el centro y retenidas por el campo de gravedad de un agujero negro con una masa 2600 millones de veces mayor que la del Sol. La existencia del agujero negro no podrá ser confirmada hasta que se mida la velocidad de rotación de las estrellas situadas en sus cercanías y se confirme que concuerda con las predicciones teóricas.

Dificultades de la Astronomía y sus implicaciones didácticas

Posiblemente, una parte de la dificultad del tema está relacionada con el hecho de que la historia de la astronomía es uno de los procesos más complejos de toda la historia de la ciencia. Llegar hasta el punto de conocimiento en el que nos encontramos nos ha costado miles de años, habiendo tenido que pasar por

toda una serie de hipótesis, observaciones, experimentos, etc. En el proceso se ha pasado de universos del sentido común centrado en la Tierra (plana en las primeras versiones y esférica después) al modelo heliocéntrico desarrollado por Copérnico, Kepler, Galileo y Newton y, de éste, a la imagen actual del Universo, con precursores como Bruno o Herschell, que nos dice que el Universo está formado por miles de millones de galaxias, ninguna de las cuales ocupa un lugar central (principio cosmológico). Por otra parte, como hemos podido ver en el desarrollo histórico, son necesarios una serie de conceptos básicos, aunque sea a nivel divulgativo, de todos los campos de la física, en particular, sobre fuerzas y movimientos, gravitación, óptica, ondas (Doppler), espectro electromagnético, física nuclear, relatividad, etc.

Si los estudiantes de secundaria no sostienen hoy el modelo geocéntrico, ya que conocen los movimientos de la Tierra, así como la estructura del sistema solar, sí poseen, concepciones que les hacen pensar que la explicación del movimiento de los cuerpos en la Tierra y sus proximidades es distinta a la de los cuerpos muy alejados de ella, manteniendo todavía, en alguna medida, una clara diferencia entre el mundo celeste y terrestre (Lanciano, 1989). Conviene, por lo tanto, hacer que vayan saliendo a la luz esas concepciones. Tampoco son capaces de usar pruebas y argumentos a favor de la esfericidad de la Tierra o la centralidad del Sol. En consecuencia, el alumnado *acepta* estas proposiciones por la *autoridad* del profesorado, del libro de texto y, de la misma forma, las olvida.

Pero para realizar estas argumentaciones el alumnado tendría que realizar (o haber realizado en cursos anteriores) una serie de observaciones básicas del cielo nocturno y diurno que en muy escasas ocasiones han realizado. Esto es especialmente cierto con las del cielo nocturno, porque no es observable en horario escolar y porque, actualmente, en las ciudades es imposible decir “*el cielo estrellado sobre mi*” (Kant), por la gran contaminación atmosférica y lumínica (que, a su vez, implica un elevado consumo energético). Esta es una buena oportunidad para reflexionar en torno a la gravedad de dicha contaminación que impide la observación del cielo nocturno, por lo que nos vemos privados de ese elemento maravilloso del paisaje que durante miles de años ha ofrecido el cielo estrellado. Observación que, por otra parte, resulta de gran interés a los estudiantes que la realizan.

Por otra parte, es difícil que el alumnado comprenda y, en consecuencia, pueda aprender, proposiciones difíciles de entender por el ser humano, ya que implican dimensiones (p.e., el radio del sistema solar, de la galaxia o del Universo observable) y tiempos (la vida de la Tierra es de 4500 Ma) que superan con mucho la escala humana (1,7 m y 70 años). Este problema se ve incrementado porque la mayoría de los textos introducen dichas escalas de forma incorrecta, siendo las representaciones correctas y los ejercicios de escala los menos abundantes (Cardete, 2009; Causeret et al, 2008; Saballs, 2004; García, 1986)

En resumen, la comprensión de la astronomía requiere tiempo de trabajo de los estudiantes. Antes se disponía de

la asignatura optativa de Astronomía (con 2 horas semanales en la ESO), pero la administración educativa valenciana decidió suprimirla, a pesar de que el alumnado la elegía allí donde se ofertaba y pese a que existían buenas propuestas y manuales sobre el tema (Grup Astre, 1998; Bella et al, 1989; Osuna et al, 1998). Con lo cual, en la actualidad sólo se dispone del escaso tiempo que establece el currículo oficial en las asignaturas de la ESO y Bachillerato antes mencionadas. Pero la mayoría de los textos de Ciencias de la Naturaleza de 1º de ESO y de Ciencias del Mundo Contemporáneo responde a un criterio meramente cronológico. Empieza con lo más antiguo y grande, el Universo y su origen, para pasar a las galaxias, el sistema solar y el sistema Tierra Luna, es decir, a lo más próximo y reciente.

Para superar estas dificultades estamos elaborando una propuesta para el tema Nuestro lugar en el Universo de Ciencias del Mundo Contemporáneo. A nivel conceptual esta propuesta aprovecha los acontecimientos históricos para una mayor comprensión de los conocimientos científicos, considerando los problemas planteados que llevaron a la construcción de dichos conocimientos, abordando las dificultades científicas e ideológicas con las que, a lo largo de muchos años, numerosos científicos tuvieron que enfrentarse. De este modo el estudio de la evolución de los modelos acerca de la estructura del universo representa para los estudiantes un verdadero enriquecimiento, que no tiene lugar cuando nos limitamos a transmitir los conocimientos actualmente aceptados. Por otra parte, la astronomía puede

contribuir al pensamiento crítico y a la argumentación, con la búsqueda y uso de pruebas de los diversos enunciados y modelos y con el cuestionamiento de la autoridad.

A nivel procedimental hay que tener en cuenta que la astronomía es una ciencia observacional y no tenerlo en cuenta puede ofrecer una visión deformada de esta. Los libros de texto no contribuyen a una mejora de esta situación, porque no ofrecen actividades relacionadas con la observación (Lanciano, 1989). Dentro de la astronomía diurna se puede comenzar con la construcción y utilización de un reloj de Sol (Arribas, 2001) o de un Gnomon (Grup Astre, 1998). Con el objetivo de suprimir la creencia de que el único astro visible por el día es el Sol, pueden realizarse observaciones diurnas de Venus y la Luna, esta última asociada a la noche tanto por alumnos como por profesores (Vega Navarro, 2001b), que además ayudarán a comprender el fenómeno de las fases lunares. Tampoco conviene dejar pasar la oportunidad de realizar alguna observación nocturna, en la que se tenga la oportunidad de manejar el planisferio. Así a astronomía también puede ayudar a fomentar el pensamiento crítico y desechar supersticiones, eliminando relaciones causa-efecto de dónde no debería haberlas. Conviene realizar modelos a escala a fin de que el estudiante forme su representación mental de las dimensiones del sistema estudiado (Sistema solar, galaxia, universo) (Solbes et al, 2010). Las representaciones a escala del sistema solar son las más explotadas (Cardete, 2009; Causseret et al, 2008; García, 1986). A pesar de la dificultad que entraña, conviene

realizar escalas de mayor envergadura, en la que pueda mostrarse el tamaño de la galaxia, de distancias entre galaxias o del propio universo (Saballs, 2004).

A nivel axiológico se puede mostrar la utilidad y a las repercusiones que tiene la astronomía en el ámbito tecnológico, en la vida diaria, etc. Por ejemplo, en la orientación, la agricultura, el calendario, la arquitectura, etc. Pero quizás una de las aplicaciones de más influencia en la vida actual es el lanzamiento de satélites artificiales, pudiéndose realizar actividades basadas en las novelas de Julio Verne *De la Tierra a la Luna* (1872) y *Alrededor de la Luna* (1872). También la enseñanza de la astronomía puede ayudar a que el estudiante cuestione el eurocentrismo, la astrología o destacar el papel de las mujeres en el desarrollo de la astronomía, desde Hypatia de Alejandría, a Maria Mitchell, Williamina Fleming, Henrietta S. Leavitt, Cecilia Payne-Gaposchkin o Jocelyn Bell (Sánchez Ron, 2006; Solbes, 2002)

Se trata, pues, de un capítulo excepcional desde el punto de vista no solo científico sino didáctico, que permite a los estudiantes asomarse a aspectos fundamentales de la actividad científica y tecnológica que a menudo son ignorados en la enseñanza y que pueden contribuir a mostrar la naturaleza de la ciencia, a cuestionar nuestras concepciones del universo y a mostrar una imagen de la ciencia contextualizada. Algo absolutamente necesario para romper con el creciente desinterés hacia los estudios científicos, tal y como ha mostrado la investigación didáctica (Solbes et al, 2007; Solbes, 2011).

Referencias bibliográficas

- Arribas, A. (2001). *Astronomía paso a paso*. Madrid: Equipo Sirius.
- Atwood, R. & Atwood, V. (1997). Effects of instruction on preservice elementary teacher's conceptions of the causes of night and day and the seasons. *Journal of Science Teacher education*, 8(1), 1-13.
- Bella, T., Casasus, E., Cebrián, J., Domenech, M. & Domenech, A. (1989). *Diseño curricular de Astronomía*. Generalitat Valenciana.
- Belmonte, J. (1999). *Las leyes del cielo*. Madrid: Temas de Hoy.
- Bernal, J. (1976). *Historia social de la ciencia*. Barcelona: Península.
- Bowler, P. & Morus, I. (2005). *Making Modern Science*. University Of Chicago Press.
- Camino, N. (1995). Ideas previas y cambio conceptual en astronomía. Un estudio con maestros de primaria sobre el día y la noche, las estaciones y las fases de la luna. *Enseñanza de la ciencias*, 13(1), 81-96.
- Cardete, S. (2009). El sistema solar no nos cabe en el techo. *Alambique*, 61, 38-47.
- Causeret, P., Fouquet, J. & Sarrazín-Vilas, L. (2008). *El cielo al alcance de la mano*. Madrid: Libsa.
- Chomaz, P. (2003). *Arbres en les estrelles*. Alzira: Universitat de Valencia i Bromera.
- Comins, N. (1993). Sources of misconceptions in astronomy. *Proceedings of the Third International Sminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York: Cornell University.
- Davis, T. & Lineweaver, C. (2004). Expanding confusion: Common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the universe. *Astronomical Society of Australia*, 21(1), 97-109.
- Dove, J. (2002). Does the man in the moon ever sleep? An analysis of student answers about simple astronomical events: a case study. *International Journal of Science Education*, 24(8), 823-834.
- Einstein, A. (1986). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza.
- Einstein, A., Newton, I., Mach, E. et al. (1973). *La teoría de la relatividad: sus orígenes e impacto en el mundo moderno*. Madrid: Alianza.
- Farrington, B. (1986). *La civilización de Grecia y Roma*. Leviatán.
- Fernández, T. & Montesinos, B. (2007). *El desafío del Universo*. Madrid: Espasa Calpe.
- Ferris, T. (2007). *La aventura del Universo*. Madrid: Crítica.
- Galileo. (1991). *Antología*. Barcelona: Península.
- Gamow, G. (1993). *La creación del Universo*. Barcelona: RBA Editores.
- García, S. (1986). Herramientas astronómicas baratas. *Cuadernos de pedagogía*, 136, 27-33.
- Grup Astre. (1998). *Materials didàctics per a l'ensenyament de l'Astronomia*. Valencia: Nau Llibres. Premi Baldiri Reixach 1997.

- Hanson, L. & Redfors, A. (2006). Swedish upper secondary students' view of the origin and development of the universe. *Research in Science Education*, 36(4), 355-379.
- Hawking, S. (1988). *La historia del tiempo*. Madrid: Alianza.
- Holton, G. & Bruhs, S. (1976). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- Kallery, M. (2001). Early-years educators' attitudes to science and pseudo-science: the case of astronomy and astrology. *European Journal of Teacher Education*, 24(3), 329-342.
- Kragh, H. (2007). *Generaciones Cuánticas*. Madrid: Ediciones Akal.
- Lanciano, N. (1989). Ver y hablar como Tolomeo y pensar como Copérnico. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(2), 173-182.
- Martínez Uso, M. (2007). Sirio y el calendario Egipcio. (Instituto Valenciano de Egiptología, Ed.) *La puerta de Maat*(8), 14-17.
- Martínez, V., Miralles, J. & Marco, E. (2001). *Astronomía fundamental*. Valencia: PUV.
- Mason, S. (1985). *Historia de las ciencias Vol. 5*. Madrid: Alianza.
- Moreno, A. (2000). "Pesar" la tierra: Test newtoniano y origen de un anacronismo. *Enseñanza de las ciencias*, 18 (2), 319-332.
- Mulholland, J. & Ginns, I. S. (2008). College MOON project Australia: Preservice teachers learning about the moon's phases. *Research in Science Education*, 38 (3), 385-399.
- Ogan-Bekiroglu, F. (2007). Effects of model-based teaching on pre-service physics teachers' conceptions of the moon, moon phases and other lunar phenomena. *International Journal of Science Education*, 29 (5), 555-594.
- Osuna, L. et al. (1998). *Astronomía*. Alicante: Aguaclara.
- Parker, J. & Heywood, D. (1998). The earth and beyond: developing primary teacher's understanding of astronomical events. *International Journal of Science Education*, 20, 503-519.
- Pasachoff, J. M. (2001). What Should Students Learn? *The Physics Teacher*, 39, 381.
- Perucho, M. & Ferrando, J. (2009). Monográfico: La mirada de Galileo. 400 anys d'Astronomia moderna. *Mètode*, 64, 46-107.
- Reeves, H., De Rosnay, J. & Coppens y Simonet, D. (2001). *La història més bella del món*. Barcelona: Edicions 62.
- Rodríguez, J. (1998). Astronomía en el mundo Maya. *Astronomía Digital*(1).
- Saballs, P. (2004). Del microcosmos al macrocosmos. *Alambique*, 42, 111-117.
- Sagan, C. (2004). *Cosmos*. Madrid: Editorial Planeta.
- Sánchez Ron, J. (2006). *El poder de la ciencia*. Madrid: Crítica.
- Schoon, K. (1995). The origin and extent of alternative conceptions in the Earth and space sciences: a survey of pre-service elementary teachers. *Journal of Elementary Science Education*, 7(2), 27-46.
- Serres, M. (1991). *Historia de las ciencias*. Madrid: Cátedra.

- Solbes, J. (2002). *Les emprentes de la ciència*. Alzira: Germania.
- Solbes, J. (2011). ¿Por qué disminuye el alumnado de ciencias? *Alambique*, 67, 53-62.
- Solbes, J., Marco, D., Tarín, F. & Traver, M. (2010). El lugar de la tierra en el universo. En J. Solbes (coord.) et al, *Ciencias para el mundo contemporáneo. Libro para el alumnado* (págs. 1-25). Madrid: Ministerio de Educación. Disponible en: http://leer.es/wp-content/uploads/web_cmc/CMC_LibroEstudiantes/T_1_ElLugardeLaTierraEnElUniverso.pdf
- Solbes, J., Montserrat, R. & Furió, C. (2007). El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 21, 91-117.
- Solbes, J. & Tarín, F. (2008). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 22, 155-180.
- Stanford Colar Center. (2008). *Ancient Observatories*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2011, de Bighorn Medicine Whell: <http://solar-center.stanford.edu/AO/bighorn.html>
- Trumper, R. (2001). A cross-age study of junior high school students' conceptions of basic astronomy concepts. *International Journal of Science Education*, 23 (11), 1111-1123.
- Trundle, K. C., Atwood, R. K. & Christopher, J. E. (2007). Fourth-grade elementary students' conceptions of standards-based lunar concepts. *International Journal of Science Education*, 29 (5), 595-616.
- Universidad de Mayne. (2007). *Solar System - Chinese Astronomy*. Recuperado el Octubre de 2010, de <http://hua.umf.maine.edu/China/astroonomy/index.html#7>
- Valenzuela, M. (2010). El nacimiento de la astronomía antigua: Estabilizaciones y Desestabilizaciones culturales. *A Parte Rei*, 70.
- Vega Navarro, A. (2001). Tenerife tiene seguro de Sol (y de luna): Representaciones del profesorado de primaria acerca del día y la noche. *Enseñanza de las Ciencias*, 19 (1), 31-44.
- Vega Navarro, A. (2001b). *Sol y luna, una pareja precopernicana. Estudio del día y de la noche en educación infantil*. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna.
- Vilenkin, A. (2006). *Muchos mundos en uno*. Barcelona: Alba Editorial.
- Weinberg, S. (1977). *Los tres primeros minutos del universo*. Madrid: Alianza.

