

Capítulo 12

Tierra y cielos: ¿Dos universos separados?

Jaime Carrascosa, Jordi Solbes y Amparo Vilches

Comentario preliminar. El estudio de la gravitación suele plantearse, básicamente, para facilitar el manejo operativo de las fuerzas gravitatorias. Se procede así, habitualmente en los últimos cursos de secundaria, a introducir la ley que determina el valor de la interacción gravitatoria, el concepto de campo gravitatorio, la medida de su intensidad, su estudio energético, etc., con una atención particular al campo gravitatorio terrestre.

Es poco frecuente, sin embargo, que se resalte debidamente lo que supuso el establecimiento de la Ley de la Gravitación *Universal* como culminación de una impresionante –y en muchos sentidos dramática– revolución de las ideas sobre el universo y el lugar de la Tierra en el mismo, que marcó el nacimiento de la ciencia moderna frente al dogmatismo religioso y su negación de la libertad de investigación.

Nuestro propósito con este programa de actividades, por el contrario, es permitir que los estudiantes participen, en alguna medida, en la reconstrucción de ese proceso auténticamente revolucionario que condujo desde la aceptación incuestionable del sistema geocéntrico, al surgimiento del modelo heliocéntrico y al establecimiento de la Ley de la Gravitación Universal. Y resaltar, insistimos, sus enormes implicaciones en nuestras concepciones del universo y en las actuales formas de vida. De este modo, los estudiantes pueden asomarse a aspectos fundamentales de la actividad científica que a menudo son ignorados en la enseñanza y que pueden contribuir a mostrar su naturaleza de desafío apasionante. Algo absolutamente necesario para romper con el creciente desinterés hacia los estudios científicos y, como ha mostrado la investigación didáctica, para un mejor aprendizaje de los conocimientos implicados.

En ese sentido, es necesario salir al paso de la preocupación que algunos pueden sentir de que detenerse “en estas cosas del pasado” es poco menos que perder el tiempo, dificultando así la adquisición de los conocimientos que los alumnos realmente necesitan. Por otra parte, es preciso insistir en algo que la investigación ha mostrado con claridad: nada resulta tan negativo para el aprendizaje de los conceptos como el reduccionismo conceptual.

INTRODUCCIÓN

Ya hemos estudiado que las fuerzas constituyen la causa de los cambios en el movimiento de los cuerpos. Conviene ahora, en primer lugar, detenerse brevemente en la consideración de los diferentes tipos de interacciones y su naturaleza.

A.1. Enumeren los diferentes tipos de fuerzas que conozcan.

Comentarios A.1. Una vez estudiados los principios de la dinámica, y antes de abordar con más profundidad el estudio de una fuerza particularmente importante -la gravitatoria-, conviene tratar brevemente los diferentes tipos de interacción. Los estudiantes se suelen referir a una gran variedad de fuerzas, como, por ejemplo, fuerza de rozamiento, eléctrica, magnética, elástica, de gravedad, atómica, nuclear, de tensión, peso, etc., lo que, en muchos casos, son en realidad diferentes nombres o casos particulares de un mismo tipo de interacción.

Conviene, pues, detenerse en la clarificación de cuáles son las interacciones básicas y su relación con las propiedades de la materia, resaltando que en las experiencias de la vida cotidiana las fuerzas que intervienen son de naturaleza gravitatoria (todos los cuerpos pesan) o electromagnética (tensiones, rozamiento, etc.). Es de suponer que en el estudio de los principios de la dinámica se habrá clarificado la idea de fuerzas de inercia como “seudofuerzas”, es decir, como “evidencias” de sentido común que no están asociadas a interacción alguna. En caso contrario, resulta necesario dedicarles una cierta atención, analizando algunas situaciones de la vida diaria (vehículo que frena o gira, etc.), lo que contribuirá a una profundización de los principios de la dinámica.

Es una buena ocasión para señalar la importancia de los esfuerzos de unificación que han tenido lugar (¡y siguen teniendo!) en este campo y que, aunque se trata todavía de una cuestión abierta que se estudiará en cursos posteriores, existen tres formas de interacción básicas: la electromagnética, la gravitatoria –en las que vamos a detenernos ahora– y la nuclear (que, en realidad, son dos: la “nuclear fuerte” y la “débil”).

Una vez analizada la existencia de diferentes tipos de interacciones, vamos a dedicar el estudio de este tema a una interacción en particular, la gravitatoria, para lo cual conviene que nos planteemos en primer lugar la siguiente actividad:

A.2. ¿Qué interés puede tener el estudio de la fuerza gravitatoria?

Comentarios A.2. Se trata de una actividad crucial en el inicio del estudio de cualquier tema, que aquí permitirá a los estudiantes reflexionar acerca de la importancia de la fuerza de gravedad en la vida cotidiana, de su presencia constante en todo aquello que realizamos cada día, relacionando el estudio que se inicia con los capítulos anteriores y el resto del programa. En este nivel, la mayoría de los grupos suele hacer referencia también a su importancia en el movimiento de los planetas, las estrellas, galaxias y satélites artificiales de la Tierra, los vuelos tripulados alrededor de la Tierra y a la Luna, etc. Sin embargo, la vinculación entre la fuerza gravitatoria sobre los objetos en la superficie terrestre y la atracción entre los astros no es tan obvia y, como sabemos, ha planteado históricamente serias dificultades, en las que resulta conveniente detenerse, pues están asociadas a lo que puede considerarse la primera gran revolución científica.

Estas discusiones iniciales permiten, pues, resaltar la importancia del estudio de la gravitación, comprender el interés del tema que se va a abordar, lo que facilita, a su vez, la toma de decisiones acerca de lo conveniente del estudio, la aproximación cualitativa al mismo, la posterior formulación de problemas concretos, etc.

Estamos ahora en situación de plantearnos qué es lo que nos interesaría estudiar acerca de la gravitación.

A.3. Formulen preguntas que puedan resultar de interés para el estudio de la gravitación.

Comentarios A.3. Las preguntas que los estudiantes sugieren ahora se refieren, normalmente, a cuestiones como: ¿qué relación existe entre la fuerza gravitatoria sobre los cuerpos y el movimiento de los planetas o de los cuerpos en el universo?, ¿por qué no suelen relacionarse ambos fenómenos?, ¿cuál es la naturaleza de esta interacción? También suelen mostrar preocupaciones sobre sus propias concepciones de los cuerpos del sistema solar, del universo, sus relaciones, cómo ha evolucionado históricamente la concepción del universo, por qué han existido y existen tantas dificultades para comprenderlo, así como a aspectos relativos a la utilidad y a las repercusiones que tiene todo esto en el ámbito tecnológico, en nuestra forma actual de entender el universo, en la vida diaria, en el medio, etc.

Las preguntas formuladas pueden dar pie a la introducción del índice del tema, justificando el interés de un aborde siguiendo un hilo conductor histórico, para poder comprender mejor las dificultades, los problemas que hubo que enfrentar y superar, así como sus implicaciones de todo tipo.

Se trata, pues, de iniciar el estudio de un capítulo excepcional desde el punto de vista no sólo científico, sino didáctico, en el que se abordarán con detenimiento, como iremos viendo, aspectos que van a contribuir de forma relevante a mostrar una imagen de la ciencia contextualizada, en toda su riqueza y complejidad: aprovechando 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 ideológicas con las que, a lo largo de muchos años, numerosos científicos tuvieron que enfrentarse (persecuciones, condenas...) y, muy en particular, aproximándonos al surgimiento de un nuevo paradigma, basado en unas mismas leyes para todo el universo y fruto del trabajo de muchas personas (Copérnico, Kepler, Galileo, Newton y un largo etcétera), que unificaba la mecánica terrestre y celeste, poniendo fin a una de las barreras que habían impedido el avance científico a lo largo de más de veinte siglos. Por último, nos va a permitir asomarnos al estudio de una de las ciencias más antiguas, la astronomía, que hoy día sigue despertando un gran interés, no sólo por sus aplicaciones y sus grandes avances tecnológicos, sino porque también nos ayuda a resolver uno de los más antiguos problemas: conocer nuestro lugar en el universo.

Una vez planteadas las posibles cuestiones, se puede presentar a los estudiantes un índice que recoja los aspectos que se van a desarrollar en el tema y que permitirá ir respondiendo a las preguntas formuladas:

1. Antecedentes: primeras ideas sobre el universo.
2. El sistema geocéntrico.

3. El modelo heliocéntrico.
4. La gravitación universal. La síntesis newtoniana.
5. Algunas consecuencias e implicaciones de La ley de la Gravitación Universal.

Después de formular las cuestiones que nos preocupan e interesan, pasamos a abordar el primer apartado del estudio de la interacción gravitatoria.

1. ANTECEDENTES: PRIMERAS IDEAS SOBRE EL UNIVERSO

La mayor parte de los pueblos y civilizaciones, a lo largo de la historia, han elaborado modelos sobre el universo, tratando de explicar los movimientos del Sol, la Luna o las estrellas. El estudio de la astronomía, del movimiento de los astros, jugó desde el principio un importante papel en las diferentes religiones y culturas.

A.4. ¿Qué importancia práctica tuvieron en la antigüedad los conocimientos astronómicos?

Comentarios A.4. Una de las más importantes aplicaciones prácticas de la astronomía ha consistido en la información que nos proporciona para facilitar la orientación o medir el paso del tiempo y establecer un calendario, algo fundamental en todas las actividades que desarrollamos (desde la antigüedad, en que ya resultaba imprescindible para regular actividades como la agricultura, la caza, etc.). A los alumnos les resulta interesante conocer. Por ejemplo, que hacia el año 2000 antes de nuestra era los egipcios regulaban su calendario por los movimientos de la estrella Sotkis, que salía justo antes del alba por la época de la inundación del Nilo. En aquella misma época, los habitantes de Mesopotamia realizaron precisas mediciones astronómicas. Basaban sus mediciones del tiempo en el mes lunar, y el año constaba de 360 días dividido en 12 meses de 30 días cada uno, bautizando los días por el Sol, la Luna y cinco planetas. Otra de sus aportaciones fue la división del día en 12 horas dobles y de la hora en minutos y segundos sexagesimales.

También fueron muy notables los avances realizados por amerindios. Podemos referirnos así, por ejemplo, a la “rueda de la medicina”, de los saskatchewan, construida hacia el siglo VI a. de C., que constituye el observatorio astronómico más antiguo de América y que señala la salida del Sol cada solsticio de verano. Tenemos otro ejemplo en el Cañón del Chaco, en Nuevo México, donde los anasazi construyeron un observatorio para medir el paso de las estaciones. También merecen mención las tres losas del suroeste norteamericano, cuyas espirales como galaxias constituyen un sistema único para leer el calendario en el cielo, utilizando el sol del mediodía. Y, por mencionar un último ejemplo, se sabe que los mayas elaboraron tres precisos calendarios basados en el Sol, la Luna y Venus, así como que el edificio conocido como El Caracol, en la ciudad maya de Chichen Itza, pudo haber servido de observatorio astronómico. Y hay que señalar que para todas aquellas culturas, la posibilidad de leer el calendario en el cielo para salir de caza, reunirse, sembrar o segar, etc., era frecuentemente una cuestión de la mayor importancia.

No debemos olvidar, sin embargo, que las observaciones astronómicas estuvieron asociadas, desde sus orígenes, a confusas creencias astrológicas, en las que vale la pena detenerse, dado que la astrología mantiene hoy su presencia (y, desgraciadamente, su atractivo) en ciertos sectores culturales.

Conviene señalar que en la antigüedad, viendo la importancia práctica de la astronomía en la agricultura, la navegación, etc., se llegó a suponer que los cuerpos celestes influían en los asuntos de las personas. Incluso en algunas civilizaciones se los consideraba como dioses.

A.5. ¿A qué puede atribuirse la creencia de que los astros influyen sobre la vida de las personas? ¿Qué valor puede darse hoy a dichas creencias?

Comentarios A.5. Resulta hasta cierto punto lógico que al comprobar cómo la posición del Sol (los solsticios de verano e invierno y los equinoccios) determina las estaciones y éstas, a su vez, las cosechas, se atribuyera a los cuerpos celestes poder sobre los asuntos humanos (e incluso se los divinizará). La astrología se fue desarrollando, pues, como una extraña combinación de observaciones meticulosas y datos y cálculos matemáticos, acompañados de creencias y pensamientos confusos y, en muchos casos, de enormes mentiras. Por ejemplo, la posibilidad de predecir fenómenos inexplicables para la mayoría, como los eclipses, concedía poder e influencia a los sacerdotes egipcios encargados de las observaciones.

De hecho, durante muchos siglos, resulta prácticamente imposible separar los avances astronómicos de las concepciones astrológicas. Astrónomos de la talla de Ptolomeo mantuvieron creencias astrológicas.

Hoy sabemos, sin embargo, que reconocer la importancia del Sol en las estaciones, el ritmo día/noche, la agricultura, la temperatura, etc., o que la Luna controla las mareas, no puede llevar a sostener que el destino de las personas está influido por los astros. No hay ningún argumento científico ni ninguna recopilación sistemática de observaciones que avalen dichas creencias ingenuas, muy al contrario. Es preciso, pues, denunciar el carácter anticientífico de estas creencias, que siguen siendo explotadas hoy en día por desaprensivos. Como sabemos, algunos medios de comunicación siguen avalando estas creencias publicando horóscopos cada semana (en los que se ve fácilmente que predicen cosas distintas o lo suficientemente ambiguas para que sirvan en cualquier caso), realizando numerosos programas sobre astrología, personas que predicen el futuro, médiums, etc. Y aunque muy a menudo dichos programas tengan una intención fundamentalmente lúdica, son muchos los ciudadanos que los toman en serio.

Resulta necesario, pues, clarificar estas cuestiones y que los estudiantes comprendan que la astronomía es una ciencia que estudia el universo, mientras que la astrología es una pseudociencia que pretende, sin pruebas (o, más bien, sin tener en cuenta todas las pruebas en contra), que los planetas influyen en nuestras vidas personales. Y si en tiempo de Ptolomeo la distinción entre ambas no era clara, hoy día sí lo es.

Hasta aquí nos hemos referido al papel de las observaciones astronómicas en cuestiones prácticas de gran interés, como el establecimiento del calendario, la facilitación de los desplazamientos gracias a la orientación que proporciona la posición de los astros, etc. Pero algunas de sus mayores contribuciones están relacionadas con la comprensión del lugar de la Tierra en el universo, una cuestión asociada también, en todas las culturas, a las ideas religiosas que intentan explicar nuestro origen. Merece la pena realizar algunas observaciones que nos familiaricen con la visión del firmamento que nuestros antecesores pudieron obtener y que influyeron en sus creencias sobre el universo. Contemplar el paisaje celeste, además, es algo que merece la pena en sí mismo, por razones puramente estéticas.

- A.6. Procedan a observar el cielo nocturno y poner en común las observaciones realizadas. Anoten la hora en que se realizó la observación y dibujen un “mapa” celeste, indicando mediante puntos los objetos más luminosos.**

Comentarios A.6. Los primeros resultados que cabe esperar de muchos estudiantes en esta actividad van a mostrar la dificultad de realizar observaciones en la gran mayoría de nuestras poblaciones. Ello puede dar pie al inicio de una discusión acerca de los problemas que plantea la contaminación atmosférica y, muy particularmente, la lumínica, que nos está privando literalmente del paisaje celeste, además de afectar a los ciclos vitales de las plantas y los animales que viven en las ciudades, incluidos los seres humanos. Se trata de un aspecto sobre el que incidiremos en una próxima actividad (A.8).

Resulta muy ilustrativo del empobrecimiento que sufre el paisaje celeste al que tenemos acceso, cotejar los mapas celestes dibujados por los estudiantes con un planisferio (a estos efectos puede ser conveniente utilizar algunos de los programas informáticos existentes). Con ayuda del mismo se puede mostrar la existencia de agrupaciones de estrellas o constelaciones, descritas desde los tiempos más remotos y que han jugado un papel esencial para orientar a los viajeros, aunque ese paisaje varía, por supuesto, según estemos en el hemisferio norte o en el sur.

Esta “recuperación” del paisaje celeste se convierte en una actividad particularmente atractiva para muchos estudiantes. Es conveniente, pues, incluir actividades como las siguientes y, a ser posible, organizar observaciones en lugares alejados de las ciudades.

- A.7. Localicen en un planisferio las estrellas y constelaciones que conozcan.**
- A.8. Aunque en la actualidad es difícil observar el cielo nocturno en las ciudades, por la contaminación atmosférica y lumínica, debida a la luz ambiental, aprovechen una noche estrellada para localizar algunas constelaciones (en el hemisferio norte, las Osas Mayor y Menor, Casiopea, Orión...; en el sur, la Cruz del Sur...). ¿Qué problemas plantea la contaminación lumínica y cuáles pueden ser las soluciones que se deberían adoptar?**
- A.9. ¿Qué idea acerca del movimiento de los astros sugieren observaciones del cielo como las que hemos realizado? Con otras palabras, ¿qué idea pudieron formarse al respecto los antiguos observadores del cielo?**

Comentarios A.7 a A.9. Una de las observaciones de mayor interés realizada desde los tiempos más remotos es que la mayoría de estrellas no parece cambiar su posición relativa. Estas denominadas estrellas fijas forman en el cielo un esquema inmutable. Los babilonios dieron nombres a las constelaciones o grupos visibles de ese esquema, aunque nosotros usamos los nombres griegos o sus traducciones latinas. También hay muchos nombres de estrellas procedentes de los árabes, que fueron excelentes astrónomos.

Son conocidos, pues, diferentes nombres que a lo largo de siglos fueron dándose a los grupos de estrellas. Si nos situamos en el hemisferio norte, por ejemplo, podemos mencionar algunos de los que se daban a la Constelación Boreal, llamada: en Norteamérica, El Gran Cucharón en Francia, La Cacerola en Inglaterra, El Arado en China, El Burócrata Celeste en la Europa medieval, El Carro, y en la antigua Grecia, La Cola de la Osa Mayor.

Estas observaciones sistemáticas fueron dibujando un mapa celeste en el que la mayoría de los astros parecían fijos sobre una superficie esférica que giraba alrededor de la Tierra. También, la observación del movimiento del Sol y de la Luna llevaba a pensar en su giro alrededor de la Tierra. Los estudiantes pueden realizar observaciones semejantes. Pero conviene llamar la atención sobre otros cinco objetos celestes, visibles a simple vista, conocidos como Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, cuyas trayectorias no parecen tan regulares y que fueron denominadas por ello “planetas”, palabra que en griego significa “errantes”, es decir, objetos con una trayectoria errática, poco regular.

Como sabemos, esta “pequeña irregularidad” estuvo llamada a jugar un papel fundamental en la dramática evolución de las concepciones acerca del lugar de la Tierra en el universo (muy ligadas a las creencias religiosas), por lo que debe ser destacada.

Al margen de establecer este hecho fundamental del giro aparente de la inmensa mayoría de los objetos celestes en torno a la Tierra –con la sola excepción de los planetas–, con estas actividades se pretende que los estudiantes comiencen a familiarizarse con el cielo nocturno, así como con el uso del planisferio. Algo que deberá ir realizándose a lo largo del tema y, en particular, en los últimos apartados, cuando abordemos una visión más actual del universo, ya que en el planisferio se presentan también nebulosas, cúmulos de estrellas y galaxias, etc.

La A.8 constituye, además, una buena oportunidad para hacer referencia y contribuir a la reflexión en torno a la gravedad de la contaminación atmosférica y, singularmente, lumínica. Se trata esta última de un problema al que no se suele prestar atención y que, sin embargo, no sólo en las ciudades altera el ciclo vital de los seres vivos, sino que además impide, como han denunciado los astrónomos, la observación del cielo, por lo que nos vemos privados de ese elemento esencial del paisaje que durante miles de años ha ofrecido el cielo estrellado. Por eso, la UNESCO ha declarado formalmente que el cielo oscuro es un derecho de las generaciones futuras (Vilches y Gil-Pérez, 2003).

Para hacer énfasis en la influencia de la astronomía en la antigüedad en todos los ámbitos se puede proponer, si se considera adecuado, una redacción alternativa a la A.7, como: *Localicen en el planisferio la polar, las estrellas y constelaciones que menciona Homero en La Odisea (canto V, versículos 262-282): “(Ulises) comenzó a regir hábilmente la nave con el timón, ..., fijos los ojos en las Pléyades y el Boyero, que se pone muy tarde, y la Osa, llamada por sobrenombre el Carro, la cual gira siempre en el mismo lugar, acecha a Orión y es la única que no se baña en el océano. Pues Calipso, insigne entre las diosas, le había ordenado que tuviera la Osa a mano izquierda durante la travesía”.*

Las percepciones que tenemos hoy día acerca de los planetas o del Sol, y sus movimientos, que nos parecen algo familiar, evidente, en realidad no lo son en absoluto. Para llegar a la comprensión actual fue necesario un proceso largo en el que no faltaron ni persecuciones ni condenas entre los que defendían ideas distintas a las que se venían manteniendo durante más de veinte siglos. Al estudio de todo ello dedicaremos los siguientes apartados.

2. EL SISTEMA GEOCÉNTRICO

Desde la antigüedad se tenía una imagen del sistema solar y en general del universo conocido que se denominó geocentrismo, ya que se pensaba que la Tierra era el centro de todo.

A.10. Los antiguos griegos pensaban que la Tierra era el centro del universo, estaba inmóvil, y que el Sol y el resto de los astros se movían a su alrededor. ¿En qué creen que se basaban para pensar así, además de en sus observaciones astronómicas?

Comentarios A.10. Algunos estudiantes se refieren también, además de a las observaciones astronómicas que venimos estudiando, a otras experiencias cotidianas, como, muy especialmente, el hecho que no notemos el movimiento de la Tierra. El reposo de la Tierra aparecía, efectivamente, como algo “evidente” e incuestionable y estaba relacionado con otras evidencias “de sentido común”, como la tendencia al reposo de los objetos terrestres, mientras los astros giraban indefinidamente. La aceptación general de este sistema geocéntrico queda puesta en evidencia por el mismo lenguaje ordinario, lleno de expresiones como, por ejemplo, “el Sol sale por...”. Los estudiantes comprenden así que estas ideas no eran descabelladas, sino que se apoyaban, como hemos visto, en experiencias de la vida cotidiana.

Conviene tener presente, por otra parte, que si bien los estudiantes no sostienen hoy el modelo geocéntrico, ya que conocen los movimientos de la Tierra, así como la estructura del sistema solar, sí poseen, como iremos viendo en el desarrollo del capítulo, 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 los mundos celeste y terrestre. Conviene, por lo tanto, que vayan saliendo a la luz sus concepciones, de las que nos ocuparemos a lo largo del desarrollo del capítulo. De este modo, el estudio de la evolución de los modelos acerca de la estructura del universo representa para ellos un verdadero enriquecimiento, que no tiene lugar cuando nos limitamos a transmitir los conocimientos actualmente aceptados.

Una exposición ya muy elaborada de este sistema geocéntrico la encontramos en Aristóteles (384-322 antes de nuestra era). Aristóteles no se limitó a explicar las observaciones astronómicas, sino que integró gran parte de los conocimientos de la época acerca del comportamiento de los objetos celestes y terrestres. Básicamente, dicho sistema sostenía que la Tierra está en reposo en el centro del universo y que todos los astros giran con movimientos circulares en torno a la misma. La aparente inmutabilidad del firmamento, en contraste con los continuos cambios observados, condujo a una visión jerárquica, con una clara distinción entre el mundo sublunar (lugar de imperfección, de objetos corruptibles, que tienden al reposo en ausencia de fuerzas) y el mundo celeste (lugar de perfección formado por esferas incorruptibles, eternas, dotadas de un movimiento perenne, circular uniforme, también perfecto).

Puede ser interesante detenerse en mostrar –proporcionando alguna información elemental al respecto (Holton y Roller, 1963; Sagan, 1980; Gil-Pérez, 1981; Holton, Rutherford y Watson, 1982; Holton y Brush, 1996; Mason, 1985)– cómo el sistema explicaba los cambios observados en la Tierra a partir de la existencia y combinación de cuatro elementos o “esencias” (tierra, agua, aire y fuego), así

como la perennidad del mundo celeste, formado por una “quinta esencia”, de perfección absoluta.

Este sistema fue perfilándose con numerosas contribuciones, particularmente en el mundo de la astronomía. Muy importante, a este respecto, es el período alejandrino, etapa de esplendor de Alejandría y su museo (siglos III y II antes de nuestra era), que fue en realidad la primera universidad que ha existido en el mundo. En ella estudiaron y trabajaron la mayor parte de los científicos de este período, como Euclides, Aristarco, Arquímedes, Eratóstenes, Hiparco, Herón, Ptolomeo y la propia Hipatia, filósofa y astrónoma que murió lapidada a causa del fanatismo y la incompreensión hacia su trabajo, como astrónoma y como mujer. Todo ello es una buena ocasión para mostrar el carácter colectivo de la ciencia, fruto del trabajo de muchas personas, así como las dificultades con que se enfrentaron las mujeres en ese ámbito. Conviene destacar especialmente las aportaciones de Ptolomeo, cuyo libro sobre astronomía fue calificado por los árabes con el nombre de “Almagesto” (lo que significa “el mejor de los libros”) y lo expandieron por toda la Europa medieval.

El sistema geocéntrico era, pues, aceptado en todo el mundo influido por las culturas griega, latina y árabe, llegando a estar vigente durante más de veinte siglos. Conviene detenerse en explicar esta extraordinaria vigencia para mejor comprender la oposición que generó su cuestionamiento en lo que constituyó, volvemos a insistir, la primera gran revolución científica.

A.11. ¿Cómo se explica la gran aceptación del modelo geocéntrico y su persistencia a lo largo de más de veinte siglos?

Comentarios A.11. Para explicar la vigencia del modelo geocéntrico durante más de veinte siglos es preciso referirse, en primer lugar, a su compatibilidad, que ya hemos señalado, con el sentido común. Pero es preciso tener presente también que dicho sistema encajaba perfectamente con la tradición, la filosofía, la religión y, en general, todos los ámbitos culturales de la Europa influida por las culturas griega, latina y arábica.

La Iglesia católica, por ejemplo, favorecía el sistema aristotélico-ptolemaico, pues su visión se acomodaba muy bien a la idea cristiana de seres humanos: únicas criaturas creadas a la imagen de Dios, que constituyen su obra central. Pero esta visión estratificada del universo, que diviniza el cielo como lugar de perfección, estaba ya vigente en la Grecia clásica y daba soporte a la propia jerarquización social, es decir, el sometimiento de los “inferiores” (esclavos, mujeres, simples campesinos...) a los “superiores” (hombres libres, clero, nobleza...).

Es muy conveniente detenerse en discutir estas implicaciones del modelo en el ámbito de las relaciones CTSA, que permiten comprender por qué fue tan difícil su superación y los numerosos obstáculos a los que hubo que enfrentarse para el establecimiento de un nuevo modelo.

El modelo geocéntrico tuvo vigencia durante casi veinte siglos, desde Aristóteles hasta el siglo XVI, donde empezó a desmoronarse debido a la imposibilidad de resolver algunos problemas en el marco de dicho modelo. Al análisis de estos problemas y surgimiento del nuevo modelo dedicaremos el siguiente apartado.

3. EL MODELO HELIOCÉNTRICO

En el año 1543, pocos días después de la muerte de su autor, se publicó la obra *De revolutionibus orbium coelestium* "Sobre las revoluciones de las esferas celestes", de Nicolás Copérnico (1473-1543), astrónomo y sacerdote nacido en Torun (Polonia). En ella se proponía un nuevo modelo del universo, donde la Tierra perdía su papel central, inmóvil, y era el Sol el que constituía el centro del universo. Este nuevo modelo, denominado heliocéntrico y desarrollado e impulsado después por otros muchos científicos, fue atacado durante más de cien años, siendo perseguidos, y muchas veces condenados, sus defensores.

A.12. Indaguen y expongan cuáles pudieron ser las razones que llevaron a cuestionar el sistema geocéntrico.

A.13. El modelo heliocéntrico fue atacado, entre otros, con los siguientes argumentos: Si la Tierra se mueve, ¿no debería quedarse retrasado un objeto que cae hacia el suelo?, y ¿no deberíamos ver que la posición relativa de las estrellas se modifica al irse desplazando la Tierra a lo largo de su trayectoria? Planteen posibles respuestas para cada uno de dichos argumentos.

Comentarios A.12 y A.13. Merece la pena detenerse en las razones que hicieron poner en duda el sistema geocéntrico. El hecho principal que llevó a cuestionarlo fue la sistemática discrepancia entre los datos proporcionados por observaciones astronómicas cada vez más precisas y las predicciones de dicho sistema para el movimiento de los planetas. La idea de que todo astro debía girar con movimiento circular uniforme en torno a la Tierra, o en torno a puntos que giraran alrededor de la misma, no permitía realizar predicciones aceptables, pese a que en la época de Copérnico se había llegado a suponer la existencia de hasta 70 (!) movimientos circulares simultáneos para explicar la trayectoria de Marte.

La complejidad creciente del modelo para explicar la trayectoria errática de los planetas y las discrepancias, pese a ello, con los datos experimentales, llevaron a Copérnico a buscar alguna otra posible explicación. Resulta interesante señalar que Copérnico recurrió a la historia para ver si alguien había imaginado otras posibles explicaciones del movimiento de los astros. Así lo reconoce en *De Revolutionibus* y se refiere a que autores griegos como Nicetas o Aristarco habían ya imaginado que el Sol podía ser el centro del universo y que todos los demás astros, incluida la Tierra, giraban en torno al mismo.

Copérnico mostró en su libro que si se aceptaba esta estructura del universo, las predicciones del modelo se ajustaban bastante más a las observaciones, dejando de ser necesarias tantas enrevesadas combinaciones de movimientos circulares para explicar el movimiento de un planeta como Marte.

Copérnico era consciente, sin embargo, de que sus ideas iban a despertar un amplio rechazo, y eso le llevó a contemplar posibles argumentos en contra y a responder cuidadosamente a cada uno de ellos. Los estudiantes pueden concebir algunos de estos argumentos en contra del modelo heliocéntrico. Por ejemplo, si la Tierra se mueve, ¿no debería quedarse retrasado un objeto que cae hacia el suelo? ¿Y no deberíamos ver que la posición relativa de las estrellas se modifica al irse desplazando la Tierra a lo largo de su trayectoria? Copérnico argumentó, en este último caso, que si la circunferencia que recorre la Tierra es muy pequeña en comparación

con la distancia a la que se encuentran las estrellas, es lógico que no se aprecien cambios en las posiciones relativas de las mismas (si dibujamos una pequeña circunferencia y tres cruces bastante alejadas, podemos constatar que, desde cualquier posición de la circunferencia, la posición relativa de las tres cruces se ve idéntica). Respecto a que si la Tierra se moviera el aire tendería a quedarse atrás, nos remitimos al principio de superposición de movimientos establecido por Galileo, que hemos estudiado en cinemática (aunque Copérnico no pudo utilizar argumentos tan claros) y que cualquier observación de la caída de un objeto en el interior de un vehículo en movimiento confirma: no hay retraso alguno.

Pero el principal argumento en contra del modelo heliocéntrico fue de tipo ideológico, al considerar que dicho modelo contradecía a la Biblia, a la que las autoridades religiosas consideraban expresión de la verdad revelada e incuestionable en todos los ámbitos (Sánchez Ron, 1999). Fue este dogmatismo religioso el que generó la mayor oposición a las nuevas ideas, perseguidas por la Inquisición, que incluyó *De Revolutionibus* en el *Índex Librorum Prohibitorum*, pese a que Copérnico hizo notables esfuerzos para convencer de que el nuevo modelo todavía era más acorde con la grandeza de la obra divina y mantuvo la creencia en la mayoría de las tesis del modelo geocéntrico, como la idea de la perfección de los movimientos circulares de los astros, etc. Tuvo lugar así una dramática confrontación entre quienes defendían la libertad de pensamiento e investigación y quienes negaban dichas libertades en nombre de dogmas religiosos. Una confrontación que marcó el nacimiento de la ciencia moderna y en cuyo análisis merece la pena detenerse mínimamente.

Pese a la oposición religiosa, muchos astrónomos comprendieron el valor de las ideas de Copérnico y contribuyeron a confirmarlas y extenderlas, aunque ello les enfrentó a persecuciones y condenas.

A.14. Consulten algún texto de historia de la ciencia para conocer qué otros astrónomos contribuyeron a cuestionar el sistema geocéntrico y a mostrar la validez del modelo heliocéntrico. Indiquen cuáles fueron sus principales aportaciones.

Comentarios A.14. Con esta actividad se pretende, en primer lugar, que los estudiantes se asomen a la historia de la ciencia (se les pueden sugerir libros, videos, CD's) y conozcan su capacidad para contextualizar el desarrollo científico y mostrar su carácter de aventura colectiva. El establecimiento del modelo heliocéntrico fue, efectivamente, el trabajo de muchas personas, que tuvieron que enfrentarse a serios problemas, ya que sus ideas cuestionaban, como ya hemos señalado, más allá del sistema geocéntrico, la visión jerárquica de la sociedad, que negaba la libertad de pensamiento e investigación en nombre de los dogmas religiosos.

Entre las principales aportaciones es preciso mencionar a Johannes Kepler (1571-1630) y a Galileo (1564-1642). El primero fue un astrónomo alemán que trabajó con el también astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) y utilizó sus datos para perfeccionar el sistema heliocéntrico y para buscar regularidades en el sistema solar, que le condujeron a enunciar, tras años de trabajo, tres importantes leyes que llevan su nombre. La primera de ellas señalaba que las órbitas de la Tierra y demás planetas alrededor del Sol no son circulares, sino elípticas, encontrándose el Sol en uno de sus focos. De este modo, Kepler fue más lejos que el propio Copérnico en el cuestionamiento del modelo geocéntrico, pues se atrevió a imaginar

movimientos celestes que no poseían la perfección del circular uniforme. Pero las observaciones astronómicas se ajustaban mucho mejor a órbitas elípticas que a las circulares, y eso prevaleció, a los ojos de Kepler, sobre la aceptación de la perfección de los cielos. La segunda establecía que la velocidad areolar de un planeta (área barrida por el vector de posición del planeta respecto al Sol en la unidad de tiempo) es constante, lo que supone que el planeta se mueve más rápidamente cuando está más cerca del Sol. Y la tercera, que el período de un planeta aumenta cuando lo hace el radio medio de su órbita, cumpliéndose la relación $T^2 = K \cdot R^3$.

Tan importante o más que la aportación de Kepler fue la de Galileo, en la que conviene detenerse por la relevancia que adquirió su caso en la confrontación entre la nueva ciencia y el dogmatismo religioso.

Una gran contribución al nuevo modelo fueron las observaciones astronómicas de Galileo 1564-1642. El telescopio, que él mismo construyó, mejorando el inventado con otros fines por los fabricantes de lentes holandeses (denominado “tubo ampliador”), le permitió descubrir, entre otras cosas, la existencia de manchas en la superficie del Sol, cráteres y montañas en la Luna y la existencia de satélites en torno a Júpiter.

A.15. Comenten qué aspectos clave del modelo geocéntrico resultaban cuestionados por las observaciones realizadas por Galileo con la ayuda del telescopio. Señalen, igualmente, el papel jugado en todo ello por el nuevo instrumento.

Comentarios A.15. De las observaciones realizadas por Galileo con ayuda del telescopio, las correspondientes a las irregularidades (relieves) de la Luna o a las manchas solares (que le permitieron, además, demostrar que el Sol giraba alrededor de su eje en veintisiete días) venían a cuestionar drásticamente la supuesta perfección atribuida a los objetos celestes y con ello la idea de una drástica separación entre el cielo y la Tierra. Estableció, por tanto, la mutabilidad en el cielo que negaban los aristotélicos y ptolemaicos. En cuanto a los satélites de Júpiter, junto con el giro del Sol, echaban por tierra la tesis básica del sistema geocéntrico de que todos los objetos celestes debían girar en torno a la Tierra. También observó que Venus presentaba fases análogas a las lunares, lo que le permitió afirmar que los planetas brillaban por la luz reflejada del Sol. Como consecuencia de todo ello pensó que había llegado el momento de defender el nuevo modelo públicamente y con ese fin fue publicando sus descubrimientos en opúsculos que denominó *Sidereus Nuncius* “El mensajero sideral”, cuya aparición generaba apasionados debates.

Puede ser interesante, a este respecto, leer algún fragmento de la obra *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, a la que nos referiremos más adelante, sobre las repercusiones de sus observaciones de los cometas y las manchas solares (ver pp. 52-56 del libro citado de Sánchez Ron, 1999).

Esta actividad puede ser una buena ocasión para poner de manifiesto las complejas interacciones entre la ciencia y la tecnología, saliendo al paso de la consideración simplista de la tecnología como mera aplicación de la ciencia. En efecto, fue la existencia del telescopio (un artefacto tecnológico) lo que hizo posible observaciones fundamentales en apoyo del modelo heliocéntrico. Y esto es algo que encontramos a menudo en el desarrollo de la ciencia y sobre lo que conviene insistir siempre que haya ocasión. Por eso es necesario clarificar, atendiendo al desarrollo histórico de ambas, que la actividad técnica ha precedido en milenios a la ciencia,

que la tecnología no es, pues, un subproducto de la ciencia, un simple proceso de aplicación del conocimiento científico para la elaboración de artefactos. Y no se trata tan sólo de señalar el impulso que este u otros desarrollos tecnológicos pueden dar a la ciencia, como es el caso que nos ocupa del telescopio de Galileo. El punto de partida de la Revolución Industrial, por ejemplo, fue la máquina de Newcomen, que era fundidor y herrero. Como afirma Bybee (2000), “al revisar la investigación científica contemporánea, uno no puede escapar a la realidad de que la mayoría de los avances científicos están basados en la tecnología”. Y ello cuestiona la visión elitista, socialmente asumida, de un trabajo científico-intelectual por encima del trabajo técnico.

Y volviendo a las contribuciones de Galileo, cabe destacar que los trabajos que realizó, mientras permaneció confinado, acerca del movimiento de los objetos terrestres, fueron igualmente subversivos para la imagen del universo defendida celosamente por la Inquisición. En efecto, como sabemos, sus estudios condujeron a cuestionar la idea de que hacía falta una fuerza para mantener un cuerpo terrestre en movimiento y a mostrar que la fuerza era sólo necesaria para *modificar* un movimiento. Las supuestas diferencias entre los movimientos celestes y terrestres comenzaban, así, a cuestionarse.

Pero Galileo se equivocó al pensar que hechos tan contundentes harían aceptar el sistema heliocéntrico. Por ello, al margen de sus notables contribuciones a la comprensión del comportamiento de la materia, celeste o terrestre, su vida y obra han quedado como paradigmas del enfrentamiento entre dogmatismo y libertad de investigación. Puede ser interesante a este respecto acercarse a la vida de Galileo, descrita en innumerables biografías, documentales, obras de teatro (*Galileo Galilei*, de Bertold Brecht) o películas (de Liliana Cavani o Joseph Losey).

A.16. Realicen un debate en clase sobre los problemas con los que tuvo que enfrentarse Galileo, después de ver fragmentos de alguna película o documental sobre su vida.

Comentarios A.16. La visión de películas, o fragmentos de las mismas, como las mencionadas en los comentarios de la actividad anterior, o bien el capítulo III de la serie *Cosmos* de Carl Sagan (“La armonía de los mundos”), pueden contribuir a que los estudiantes conozcan la apasionante aventura que supuso el surgimiento de la ciencia moderna. Cuando en 1632, Galileo, como consecuencia del permiso que le concedió el Papa Urbano VIII para discutir el sistema copernicano en un libro, “siempre que diese una igual e imparcial discusión de los argumentos a favor del sistema ptolemaico” (Sánchez Ron, 1999), publica su obra *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano* (1632), en italiano y en forma de diálogo, haciéndola accesible a la sociedad, se inicia una auténtica persecución contra él, pese a su avanzada edad. Fue juzgado por la Inquisición, amenazado con tortura y obligado a renunciar a sus ideas, cosa que Galileo hizo para salvar su vida. De hecho, años atrás, en 1600, Giordano Bruno fue sometido a torturas para que abjurase de sus ideas (defensa del heliocentrismo, de la infinitud del universo y la existencia de un gran número de mundos habitados) y, 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 en Italia sus libros estaban prohibidos. 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, mientras que desde la Congregación para la Doctrina de la Fe (ex Santo Oficio), todavía se pretende hoy justificar y exculpar a la Inquisición.

Vale la pena extender estas reflexiones acerca de la libertad de investigación y sus obstáculos a otros momentos de la historia de la ciencia y contribuir así a cuestionar el mito de su neutralidad.

A.17. Citen ejemplos de otros conflictos que, a lo largo de la historia de la humanidad, hayan enfrentado a la ciencia y la tecnología con posturas dogmáticas.

Comentarios A.17. La historia de la ciencia es pródiga, desgraciadamente, en conflictos entre dogmatismos y libertad de investigación. La quema de Miguel Servet por atreverse a investigar en el interior del cuerpo humano y la inclusión del *Origen de las especies* en el *Índex Librorum Prohibitorum*, oponiéndose a la revolución científica que supuso el evolucionismo, son dos de los casos más conocidos, que suelen ser señalados por algunos estudiantes. Pero los ejemplos pueden multiplicarse y llegar a nuestros días. Se puede mencionar, por ejemplo, la oposición frontal de determinados sectores de ideología conservadora a la investigación con células madre embrionarias.

Pero es importante que los estudiantes comprendan que el rechazo del heliocentrismo constituye el ejemplo más paradigmático de resistencia a la libertad de investigación y de oposición absoluta al avance científico. De hecho, como ya hemos señalado, la "rehabilitación" del heliocentrismo por la Iglesia católica tuvo que esperar a fines del siglo XX. La última gran contribución al hundimiento del modelo geocéntrico la constituye, sin duda, la obra de Newton, al mostrar que el giro de los objetos celestes eran movimientos "forzados", que carecía, pues, de fundamento la distinción entre movimientos terrestres (forzados) y celestes (naturales). De dicha contribución nos ocuparemos con detenimiento en el siguiente apartado.

Los fundamentos de la concepción aristotélico-escolástica del universo resultaron definitivamente cuestionados, como veremos en el siguiente apartado, gracias al establecimiento por Isaac Newton de la Teoría de la Gravitación Universal.

4. LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL. LA SÍNTESIS NEWTONIANA

Después de Copérnico y Galileo, fueron muchos los que abordaron el estudio del movimiento de los cuerpos celestes. Científicos ingleses, entre otros, como Hooke, Wren, Halley y, muy en particular, Newton (que nació el año 1642, precisamente el mismo que murió Galileo), enfocaron los problemas de forma diferente: utilizando el nuevo concepto de fuerza y los principios de la dinámica, estudiados en un capítulo anterior, analizaron la última gran diferencia supuestamente existente entre los movimientos terrestres y celestes.

A.18. Según la concepción aristotélico-escolástica del universo, el movimiento de los objetos celestes era considerado “natural”, no sometido a fuerzas. ¿Qué argumentos podemos aducir para afirmar que, por ejemplo, la Luna no está sometida a fuerzas, o que sí lo está?

Comentarios A.18. Digamos de entrada que, como han mostrado numerosas investigaciones, muchas personas piensan que “un objeto en órbita no pesa”, puesto que no “cae” hacia la Tierra. Así, cuando se pide a los estudiantes que “dibujen las fuerzas que actúan sobre un objeto que cae en las proximidades de la superficie terrestre y sobre un satélite puesto en órbita alrededor de la Tierra”, muchos estudiantes consideran que la fuerza neta sobre el satélite ha de ser nula, puesto que “se encuentra en equilibrio”. La separación cielo-tierra no es, pues, “una idea absurda del pasado”, sino que responde al sentido común, como tantos otros aspectos del modelo aristotélico. Pero la aplicación consecuente de los principios de la dinámica llevaron a Newton –y ha de llevar a los alumnos– a comprender que si la Luna gira (cambia la dirección de la velocidad), debe estar actuando sobre ella alguna fuerza resultante, ya que si no llevaría un movimiento rectilíneo uniforme. ¿Pero cuál podría ser esa fuerza?

A.19. El giro de la Luna alrededor de la Tierra o de los planetas alrededor del Sol obligó a Newton a admitir que se trataba de movimientos forzados. Pero, ¿cuál podría ser esa fuerza? ¿Cuál fue la gran intuición de Newton al respecto?

Comentarios A.19. La gran intuición de Newton, facilitada por los pasos dados por sus predecesores, fue atreverse a pensar que la misma fuerza que hace caer un objeto que soltamos, o que hace describir una parábola a un proyectil, es la que hace girar la Luna alrededor de la Tierra, o a los planetas alrededor del Sol; atreverse a pensar, en suma, en la existencia de una fuerza *universal*, por la que *todos* los objetos, *terrestres o celestes*, se atraerían entre sí.

Resulta interesante la lectura del texto de Newton (citado por Mason, 1985, p. 103) que expresa la conexión que estableció la idea de la gravitación universal entre los movimientos de objetos en la Tierra y el movimiento de objetos celestes, como la Luna: *“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 se ve forzada por su propio peso 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 la 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 al suelo, hasta que, finalmente, excediendo de los límites de la Tierra, pasará totalmente sin tocarla”*. Ése podría ser el caso de la Luna girando alrededor de la Tierra, o el de los planetas alrededor del Sol, debido, *en todos los casos*, a la atracción gravitatoria.

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.

Las aportaciones de Newton venían a culminar la primera gran revolución científica que supuso el desplazamiento del modelo geocéntrico por el heliocéntrico. Cabría, pues, preguntarse ahora:

A.20. ¿Por qué Newton tuvo menos dificultades que Galileo para que fueran aceptadas sus ideas?

Comentarios A.20. Podemos referirnos, en primer lugar, a la ausencia de la Inquisición en los países protestantes y al hecho de que el protestantismo, en ese momento, era más favorable a la ciencia que el catolicismo. Pero, sobre todo, es preciso referirse al hecho de que, pese a todas las condenas, los astrónomos habían comenzado, desde la publicación del libro de Copérnico, a utilizar regularmente el sistema heliocéntrico por la mayor validez de sus predicciones, como un “artificio de cálculo” que en realidad no pretendía desplazar a la “verdad revelada”. De este modo, los conocimientos científicos empezaron a ser vistos por algunos como un sistema paralelo que no tenía por qué afectar a las creencias religiosas y sus dogmas. Ello hacía menos peligroso el trabajo de los científicos, pero reducía la capacidad de la ciencia para modificar la ideología dominante. De hecho, el pastor luterano Osiander añadió una nota preliminar a la obra de Copérnico, señalando que la nueva teoría no era necesariamente verdadera, que podía considerarse simplemente como un modelo matemático conveniente para dar cuenta de los movimientos de los cuerpos celestes (Mason, 1985). Y aunque Copérnico no compartió nunca esa idea, ya que consideraba que su sistema del mundo era real, fue utilizada como excusa por muchos astrónomos para poder utilizar sin problemas el modelo de Copérnico, más sencillo que el ptolemaico.

En cualquier caso, con la Teoría de la Gravitación Universal culmina lo que ha sido considerado el paradigma de las revoluciones científicas: por lo profundamente que afectó a los conocimientos científicos; por su repercusión en las concepciones acerca del lugar que los seres humanos ocupamos en el universo; por las dificultades que tuvo que superar (dogmas, fanatismos, persecuciones...); por realizar la integración de dos campos del conocimiento (astronomía y mecánica terrestre) que parecían inconexos... Y aún podríamos añadir: por las repercusiones que siglos después tendría la puesta en órbita de satélites artificiales, que iban a contribuir a transformar radicalmente la vida de los seres humanos. Pero de eso hablaremos más adelante. Ahora es preciso completar el estudio del establecimiento de la Ley de la Gravitación Universal, lo cual exigía pasar de las intuiciones cualitativas a las formulaciones operativas y a someter a prueba sus predicciones cuantitativas.

A.21. ¿De qué factores cabe suponer que dependa la interacción gravitatoria entre dos cuerpos?

Comentarios A.21. Los alumnos conjeturan fácilmente que la fuerza de atracción entre dos cuerpos crecerá con el valor de sus masas y disminuirá con la distancia que les separa. El profesor puede indicar que ésas son conjeturas razonables y coinciden con las realizadas por el propio Newton, quien argumentó, mediante cuidadosos razonamientos, que la fuerza gravitatoria F sería proporcional al producto de las masas de ambos cuerpos, m_1 y m_2 , e inversamente proporcional *al cuadrado* de la distancia que les separa, r^2 . Newton suponía así que el debilitamiento de la fuerza de atracción era debido al aumento de la superficie ($4\pi r^2$) sobre la que se distribuía

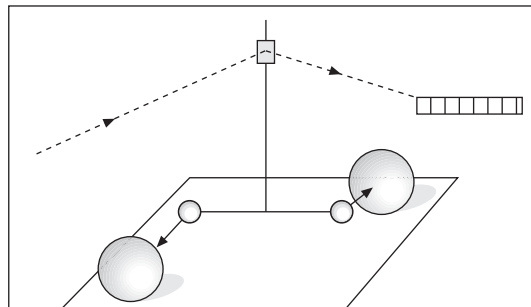
dicha atracción a la distancia r . De este modo, las hipótesis de Newton pueden expresarse con la proporcionalidad $F / (m_1 m_2 / r^2) = \text{constante}$, siendo dicha constante *universal*, es decir, la misma para dos cuerpos cualesquiera. Designando a dicha constante como G (de gravitación), la expresión anterior puede escribirse así: $F = G m_1 m_2 / r^2$.

Ésta es la hipótesis, sin duda plausible, enunciada por Newton, pero en la que también realizaron contribuciones otros investigadores, como Hooke y Halley. Una hipótesis que, naturalmente, debía someterse a prueba.

A.22. Propongan formas de contrastar las hipótesis enunciadas acerca de los factores que determinan el valor de la fuerza gravitatoria.

Comentarios A.22. Como es lógico, los estudiantes proponen estudiar cómo varía la fuerza de atracción entre dos cuerpos al variar cada uno de los factores, es decir, variando la distancia entre los mismos (manteniendo fijas las masas) y variando las masas (manteniendo fija la distancia). Es el tipo de diseño mediante “separación de variables”, con el que se han familiarizado. Pero el diseño debe completarse resolviendo algunas dificultades, especificando cómo van a medirse las fuerzas, cómo hacer que sean apreciables frente a otras interacciones presentes, etc. Merece la pena detenerse en el estudio de estos diseños experimentales, que juegan un papel fundamental en la construcción de los conocimientos.

Un primer problema surge con el hecho de que la atracción de la Tierra sobre cada uno de los cuerpos va a ser mucho más intensa que la atracción entre ambos. Resulta interesante, pues, pedir a las estudiantes que conciban algún procedimiento para que se pueda apreciar la fuerza entre dos cuerpos esféricos sin que la atracción de la Tierra enmascare su mutua atracción. Surge así la idea de colocar dos esferas en los extremos de una varilla que cuelga de un hilo por su centro, con lo que queda en equilibrio y la atracción de la Tierra queda anulada; Ahora, basta acercar a cada extremo de la varilla, es decir, a cada esferita, una esfera de masa suficiente para que las atracciones sean capaces de hacer girar la varilla (ver el esquema siguiente).



Esta idea de la balanza de torsión puede ser concebida por los estudiantes, pero el profesor ha de ir señalando las muchas dificultades a superar. Por ejemplo, ¿cómo lograr que las únicas fuerzas atractivas sean las dibujadas en el esquema? (¿no se atraerán todas las esferas entre sí?). Surge así la necesidad de que la varilla sea suficientemente larga

para que la interacción entre las esferas alejadas sea despreciable. Otro problema es el de qué distancia considerar entre las esferas, resuelto, no sin dificultad, por el propio Newton, quien mostró que un cuerpo con distribución esférica de masa se comporta como si ésta estuviera concentrada en su centro.

También es preciso concebir la forma de medir esas fuerzas extraordinariamente débiles. En el dibujo anterior se esquematiza un haz de luz que se refleja en un espejo sujeto al hilo e incide en una escala graduada, que ha habido que calibrar previamente con fuerzas conocidas capaces de hacer girar la varilla. Esta actividad se convierte así en una nueva ocasión de comprender el papel de la tecnología en la actividad científica y, muy concretamente, en la concepción y realización de los diseños experimentales.

Conviene ahora señalar que un diseño semejante fue utilizado, efectivamente, para medir las fuerzas gravitatorias. Pero los experimentos los realizó el físico inglés Cavendish, a fines del siglo XVIII, con masas ligeras en los extremos de la varilla, a las que aproximaba, en la forma que indica el dibujo, dos esferas de masa muy superior. Cavendish buscaba determinar la densidad de la Tierra con sus experimentos, pero contribuyeron, posteriormente, a determinar el valor de la constante G (cuyo valor es $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$).

La precisión que requiere un diseño como el de la balanza de torsión no era factible, obviamente, en la época de Newton. No era posible, en aquel momento, someter a prueba directamente la hipótesis de la gravitación universal. Newton tuvo que recurrir, pues, a *pruebas indirectas*. Esto es algo que ocurre muy a menudo en la ciencia. ¿Qué predicción indirecta podría realizar Newton utilizando su hipótesis de la gravitación universal como causa del giro de la Luna o de los planetas? Con otras palabras, ¿qué datos cuantitativos correspondientes a dicho movimiento debían ser obtenidos al aplicar la hipótesis?

Planteada así la cuestión si se considera conveniente, por ejemplo, para el caso de los últimos cursos del bachillerato, los alumnos pueden pensar en el período de giro de la Luna T_L , que habría de poder obtenerse sin más que tener en cuenta que la fuerza centrípeta que hace girar la Luna ($M_L v_L^2 / R_{TL}$) es precisamente la fuerza gravitatoria entre la Tierra y la Luna ($G M_T M_T / R_{TL}^2$). Es decir:

$$G M_T M_T / R_{TL}^2 = M_L v_L^2 / R_{TL}$$

Y teniendo en cuenta que la velocidad de giro de la Luna, v_L , puede expresarse en función del período, T_L ($v_L = 2\pi R_{TL} / T_L$), obtenemos, tras simplificar y agrupar:

$$G M_T = 4\pi^2 R_{TL}^3 / T_L^2$$

Conocido el radio de giro de la Luna era posible así obtener el período de la Luna, siempre que se conociera el producto $G M_T$. Pero, naturalmente, ni la masa de la Tierra ni el valor de G eran conocidos. Entonces, ¿a qué otros datos podía recurrir Newton para obtener ese producto?

Podemos aplicar la hipótesis de la gravitación universal a un cuerpo sobre la superficie terrestre, con lo que se tendría $mg = GmM_T/R_T^2$ y, por tanto, $G M_T = g R_T^2$, datos estos perfectamente conocidos. Los estudiantes pueden utilizar ahora los valores de g , el radio de la Tierra y la distancia Tierra-Luna para calcular el período de la Luna, obteniendo un valor muy próximo al real. Conviene hacer notar que, al mismo tiempo que se comenzaba a verificar la hipótesis de Newton, se daba explicación al hecho de que la aceleración de caída g fuera la misma para todos los cuerpos.

Newton también aplicó su hipótesis al estudio de la relación entre el período T y el radio r de la órbita de los planetas, deduciendo así una de las leyes que Kepler había

obtenido por laborioso ensayo y error. Los estudiantes pueden obtener fácilmente, para el caso de órbitas circulares, la expresión $T^2 / r^3 = \text{cte.}$, siendo dicha constante la misma para todos los planetas del sistema solar, $4\pi^2 / GM_S$, puesto que sólo depende de la masa del Sol.

La hipótesis de Newton fue afianzándose así hasta ser aceptada como Ley de la Gravitación Universal, culminando uno de los edificios teóricos más extraordinarios construidos por la ciencia.

Naturalmente, el establecimiento de la Ley de la Gravitación Universal no puso punto final, ni mucho menos, a la investigación en este campo. Los nuevos conocimientos generaron nuevas preguntas e impulsaron numerosos desarrollos que han llegado hasta nuestros días. Nos asomaremos, a continuación, a algunos de ellos.

5. ALGUNAS CONSECUENCIAS E IMPLICACIONES DE LA LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Una primera cuestión relacionada con el establecimiento de la Ley de Gravitación Universal es la explicación de cómo tiene lugar la interacción gravitatoria.

A.23. ¿Cómo podemos explicar la interacción de dos cuerpos separados una cierta distancia?

Comentarios A.23. La idea newtoniana de acción a distancia entre los cuerpos presenta una serie de dificultades que no pasaron desapercibidas para el propio Newton. De hecho, antes de Newton se pensaba que todas las fuerzas se producían por contacto, por eso cuando él introdujo las fuerzas gravitatorias a distancia se produjeron grandes controversias. Algunos afirmaban que dichas fuerzas eran un retorno a cualidades "ocultas" desterradas de la física por Galileo. Puede ser conveniente, a este respecto, leer las propias palabras de Newton en una carta a Bentley en la que decía: *"Es inconcebible que la materia bruta inanimada, sin la mediación de algo más que no sea material, influya y afecte a otra materia sin contacto mutuo... Una gravedad... tal que cualquier cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de algo más, a través de lo cual pueda conducirse la acción y la fuerza, es para mí un absurdo tan grande que no creo exista un hombre que con facultad de pensamiento sobre materias filosóficas pueda creer en ello. La gravedad debe estar causada por un agente que actúa constantemente según ciertas leyes"* (citado por Holton y Roller, 1963).

Esta conjetura de la existencia del algún "agente" material a través del cual tiene lugar la interacción es también propuesta por algunos alumnos cuando se plantean cómo puede tener lugar la interacción de cuerpos distantes entre sí. Posteriormente, los científicos se plantearon la misma pregunta al estudiar otras fuerzas "a distancia", como las electromagnéticas. Para contestarla, Faraday y otros científicos, en el siglo XIX, introdujeron la idea de campo y hoy hablamos de campo gravitatorio y campo electromagnético como formas de existencia de la materia, a través de las cuales se propagan las interacciones. Sabemos, además, que el campo electromagnético está constituido por fotones y que posee propiedades físicas, como energía y cantidad de movimiento.

El campo gravitatorio es, por ahora, mucho menos conocido y aunque se sigan realizando experimentos para mostrar la existencia de “gravitones”, los resultados hasta el momento han sido negativos.

Estas limitaciones en el conocimiento del campo gravitatorio no deben esconderse a los estudiantes. Se evita así la visión deformada de ciencia acabada, en la que todos los problemas han sido resueltos. Por el contrario, conviene resaltar los desafíos que siguen reclamando el estudio y transmitir como algo positivo la idea de que una investigación fructífera genera más problemas que los que resuelve.

Pese a estas “dificultades” en la comprensión de la naturaleza de la gravitación, otros aspectos de la nueva teoría experimentaron un pujante desarrollo, al que merece la pena asomar a los estudiantes. Previamente, sin embargo, conviene plantear a los alumnos por qué, pese a tratarse de la forma de interacción más débil (la electromagnética tiene una intensidad 10^{38} veces mayor que la gravitatoria), a escala astronómica constituye la interacción dominante.

A.24. ¿Por qué a escalas astronómicas la interacción dominante es la gravitatoria?

Comentarios A.24. Basta con hacer notar que aunque las interacciones electromagnéticas tienen una intensidad muy superior a las gravitatorias, hay dos clases de carga eléctrica en la naturaleza que globalmente se equilibran, por lo que no hay objetos celestes con carga neta capaces de interactuar electromagnéticamente. En cuanto a las interacciones nucleares, no cuentan a escala macroscópica porque son de muy corto alcance. Las interacciones gravitatorias resultan, pues, pese a su mucha menor intensidad, de una enorme importancia a escala microscópica, cuyo estudio se vio facilitado por el establecimiento de la Teoría de la Gravitación Universal.

Antes de iniciar la siguiente actividad queremos señalar que, si se considera adecuado, por el nivel en el que se imparte el programa de actividades, puede abordarse con una mayor profundidad el estudio del campo gravitatorio, tomando en consideración sus características, así como el valor de la intensidad de campo en cada punto del mismo, su visualización y, muy en particular, el tratamiento de los aspectos energéticos en la interacción gravitatoria. Esto es lo que habitualmente encontramos en los libros de texto del nivel de secundaria superior, y por eso preferimos desarrollar aquí aspectos frecuentemente ausentes pero absolutamente necesarios para cualquier nivel educativo.

A.25. Conjeturen qué avances científicos y tecnológicos pueden haberse derivado del establecimiento de la Ley de la Gravitación Universal.

Comentarios A.25. Unas de las primeras aplicaciones de la ley de la Gravitación Universal, que fueron desarrolladas en su mayor parte por el propio Newton, se refieren a la explicación de fenómenos hasta entonces inexplicables, como las mareas oceánicas. Pero debe dejarse claro que la explicación de este fenómeno no puede hacerse de manera completa sobre la base de esta ley, pues intervienen muchos otros factores que hicieron fracasar los intentos de Newton de dar una explicación cuantitativa a este fenómeno. En el caso de la atracción del Sol, aunque es muy superior a la que ejerce la Luna, no hay diferencias tan significativas entre los distintos puntos de la Tierra, dada la enorme distancia Tierra-Sol, por lo que influye menos, pero todavía de forma apreciable en la intensidad con que se producen las mareas.

(Precisamente cuando la Luna está alineada con el Sol y la Tierra se producen las mareas vivas, mientras que si la Luna se encuentra en cuadratura con el Sol tienen lugar las mareas muertas).

La Ley de Gravitación también permitió explicar el comportamiento de los cometas. Éstos habían sido un misterio desde la antigüedad, habiendo asociado su presencia a funestos presagios. La teoría gravitatoria de Newton permitió explicar su comportamiento: si los cometas aparecen periódicamente, su trayectoria será una elipse, sólo que muy excéntrica. El más famoso de ellos es el cometa que Edmund Halley estudió cuando apareció en 1682 y para el que predijo un período 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.

Otra consecuencia notable de la Teoría de la Gravitación Universal fue la predicción de la existencia de nuevos planetas en el sistema solar, debido a las perturbaciones observadas en las órbitas de los planetas ya conocidos. Así, las irregularidades en la órbita de Urano, descubierto en 1781 por Herschel, fueron interpretadas como debidas a la existencia de algún otro planeta y condujeron, efectivamente, al descubrimiento de Neptuno en 1846 por Leverrier y Adams. Del mismo modo, por las perturbaciones que producía en este último, fue descubierto Plutón en 1930 por Tombaugh.

Podríamos seguir refiriéndonos a fenómenos como la existencia de galaxias, estrellas binarias, etc., cuyo conocimiento, que nos ha asomado a una mejor comprensión de la estructura del universo, es en buena medida deudor de la Teoría de la Gravitación Universal. Ésta es una posibilidad abierta a la decisión de cada equipo docente, en función de sus circunstancias concretas (y muy en particular del tiempo disponible), y nos ocuparemos, para terminar, de los satélites y naves espaciales, a los que los estudiantes se refieren, acertadamente, como uno de los campos de aplicación de mayor interés de la gravitación.

Para terminar, nos referiremos ahora a la aplicación de la gravitación universal en un campo que ha sufrido un enorme desarrollo en las últimas décadas: los satélites artificiales.

A.26. La posibilidad de poner un objeto en órbita alrededor de la Tierra fue ya concebida por Newton, al menos implícitamente, al considerar que la parábola descrita por un objeto lanzado desde una torre con velocidad creciente va abriéndose y haciendo caer el objeto cada vez más lejos, de forma que si le damos suficiente velocidad puede llegar a no caer al suelo, cerrándose una trayectoria elíptica. Sin embargo, fue tan sólo en 1957 cuando la antigua Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial. ¿A qué pudo ser debido este retraso?

Comentarios A.26. La discusión de esta actividad permite de nuevo referirse a la complejidad del desarrollo tecnológico. La idea simple de lanzar un objeto con suficiente velocidad no puede llevarse a la práctica sin contar con el combustible necesario para acelerar el objeto el tiempo suficiente para alcanzar dicha velocidad o sin la existencia de materiales capaces de resistir las elevadas temperaturas que se producen al atravesar la atmósfera a gran velocidad, etc. Algunos graves accidentes sufridos por los vehículos espaciales son buena prueba de esas dificultades.

A.27. ¿Qué aplicaciones conciben para los satélites artificiales?

Comentarios A.27. Como en tantas otras ocasiones, la primera motivación para el lanzamiento de satélites artificiales fue, desgraciadamente, la militar (espionaje, colocación de armas en órbita dispuestas para el lanzamiento de proyectiles en cualquier momento...), y ésta sigue siendo una de las principales “aplicaciones” previstas en la llamada “guerra de las galaxias” con la que, entre otras cosas, el Gobierno de Estados Unidos pretende dotarse de un “escudo inexpugnable” capaz de destruir cualquier misil enemigo. No podemos ocultar esta triste realidad que ha absorbido recursos impresionantes en una demencial carrera armamentista y que impide hoy en día atender las necesidades de miles de millones de seres humanos que viven en la miseria.

Pero no podemos olvidar tampoco que hoy en día gran parte del intercambio y difusión de la información que circula por el planeta, casi en tiempo real, tiene lugar con el concurso de satélites (como el *Echo*, encargado de reflejar ondas de radio), incluido el funcionamiento de Internet, o de la nueva telefonía móvil. Y lo mismo se puede señalar del comercio internacional, del control de las condiciones meteorológicas (con ayuda del *Meteosat*), de la detección de bancos de pesca, el seguimiento de la evolución de los ecosistemas amenazados (incendios, debilitamiento de la capa de ozono, procesos de desertización, extinción de especies...), la instalación de telescopios capaces de observar el firmamento sin la limitación de la atmósfera terrestre, las denominadas sondas como las *Pionner*, *Voyager*, etc., cuyos espectrómetros ultravioletas envían datos sobre las galaxias, enanas, blancas, etc. Son pocas las actividades humanas que no se ven hoy facilitadas por la combinación de ordenadores, telefonía y satélites artificiales.

Puede ser interesante referirse a que la vida de un satélite está limitada a unos cuantos años, ya que para mantener su órbita necesita utilizar sus cohetes propulsores de gas cada cierto tiempo, lo que supone que se va gastando su combustible en un cierto número de años, en función de su tamaño y la altura de la órbita, puesto que si ésta aumenta el roce con la atmósfera disminuye. Todo ello supone el abandono en el espacio de numerosos objetos denominados chatarra espacial, lo que está creando un problema al que dedicaremos la siguiente actividad.

El impresionante desarrollo de los satélites artificiales ha generado un problema de “chatarra espacial” al que es preciso prestar atención.

A.28. ¿Qué consecuencias tiene la existencia de la chatarra espacial? ¿Qué tipo de medidas se deberían adoptar para resolver el problema?

Comentarios A.28. En general, las personas no solemos preocuparnos por la contaminación del espacio orbital, pese a que ya en la década de los ochenta la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, en su documento “Nuestro mundo común”, alertaba de que los residuos que continúan en órbita constituyen una amenaza creciente para las actividades humanas realizadas en el espacio o desde el espacio. La contribución de los satélites a hacer del planeta una aldea global es fundamental, pero, como ha enfatizado la Agencia Espacial Europea, si no se reducen los desechos en órbita, dentro de algunos años no se podrá colocar nada en el espacio.

El satélite francés *CERISE*, que costó miles de millones, fue destruido por uno de esos escombros. De hecho, este peligro ha encarecido ya enormemente el coste de

los blindajes con los que hay que proteger a los nuevos satélites, cada vez más necesarios. Se podría pensar que “el espacio es muy grande” y que los riesgos de colisiones son, pues, pequeños. Pero no hay que olvidar que hay una órbita “preferida” para los satélites de comunicaciones, la denominada *autopista geoestacionaria*, que presenta muchas ventajas porque en ella los artefactos giran a la misma velocidad angular que la Tierra y quedan aparentemente fijos en el cielo respecto a la superficie del planeta. El número de satélites colocados allí se acerca a la saturación, y las posibilidades de colisiones en esa zona son enormes.

Una de las mayores fuentes de esta chatarra, según la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo (CMMAD), ha sido la actividad militar, con el ensayo de armas espaciales. Y ello se vería gravemente incrementado si se llevan adelante los planes de “guerra de las galaxias” que prevén la colocación de grandes cantidades de armas y de detectores de armas en los satélites, así como ensayos de destrucción de misiles en el espacio. Por eso, la medida más importante para reducir los residuos espaciales, afirma la misma CMMAD, consiste en evitar que continúen los ensayos y el despliegue de armas espaciales que se utilizarán contra objetos colocados en el espacio. Se trata de medidas necesarias para evitar dejar en órbita esa herencia a las próximas generaciones, lo que resulta, según los expertos de la Subcomisión de Asuntos Científicos y Técnicos de la ONU, una negligencia tan grave como acumular residuos radiactivos cuya actividad puede durar cientos o miles de años, envenenar los océanos, salinizar las aguas subterráneas o destruir los bosques del planeta (Vilches y Gil-Pérez, 2003).

Algunos técnicos señalan la posibilidad de reducir las consecuencias de los impactos reforzando las cubiertas exteriores o limitando las posibilidades de colisión modificando la orientación de los aparatos. Pero también señalan que no hay forma de escudar adecuadamente a los más de 100.000 objetos en órbita (frente a más de dos millones de kg de chatarra en un radio de 2.000 km alrededor de la Tierra) o de controlarlos desde la Tierra. Y medidas como limpiar de basura espacial ese espacio que rodea nuestro planeta parecen inviables por el momento. Por eso se apunta que la mejor solución es controlar el número de objetos, limitar el vertido de residuos en órbita, preparar los artefactos para que no produzcan problemas cuando dejen de funcionar: retirándolos de las órbitas útiles, evitando que se deshagan en piezas peligrosas, etc.

Para terminar esta consideración de la revolución científica y tecnológica que supuso el desplazamiento del sistema geocéntrico por el heliocéntrico y el establecimiento de la Teoría de la Gravitación Universal, propondremos a continuación algunas actividades de síntesis del estudio realizado en esta unidad.

RECAPITULACIÓN

A modo de revisión y recapitulación realizaremos las siguientes actividades:

A.29. En los medios de comunicación suelen aparecer expresiones como: “Un astronauta en un satélite en órbita terrestre se encuentra en estado de ingravidez”. Comenten dicha afirmación.

Comentarios A.29. Muchos alumnos han visto en la TV, cine, etc., que los astronautas parecen “flotar”. Por ello piensan que se han liberado de la atracción terrestre, lo

que no tiene sentido porque la gravedad apenas se ha debilitado a la distancia a la que se suelen encontrar las naves espaciales en órbita alrededor de la Tierra (escasos centenares de kilómetros). Si la gravedad se hubiera debilitado realmente, ni los astronautas ni las naves girarían en torno a la Tierra. En realidad, como ya hemos visto, el movimiento orbital es una caída libre. Si una persona que fuera en un ascensor en caída libre soltara un lápiz, éste no caería al suelo. Para un observador inercial exterior, el lápiz cae con aceleración g . Pero también lo hace el suelo del ascensor, con lo que el lápiz se quedaría flotando respecto al mismo. De forma idéntica ocurre en el interior de un satélite artificial.

- A.30.** Indiquen las aportaciones de interés que haya supuesto para ustedes el estudio del tema.
- A.31.** ¿Qué campos del conocimiento quedan integrados a partir del modelo heliocéntrico y su desarrollo?
- A.32.** ¿Qué relación existe entre la evolución de los conocimientos abordados en este tema y las transformaciones de la propia sociedad?
- A.33.** Visiten un planetario con el fin de realizar un trabajo posterior sobre sus aportaciones para la comprensión de los conceptos abordados en el tema.
- A.34.** Realicen un seguimiento de las noticias aparecidas en la prensa durante varias semanas relacionadas con la gravitación, viajes espaciales, origen del universo, etc., confeccionando un mural con las mismas para la clase y realizando un debate posterior acerca de sus repercusiones en la vida actual.

Comentarios A.30 a A.34. A lo largo del tema ya se han ido realizando pausas de reflexión, a la vez que se ha resaltado el carácter revolucionario del paso del geocentrismo al heliocentrismo, permitiendo comprender el modo de crecimiento de la ciencia, evitando visiones de crecimiento lineal, a la vez que se analizan esos momentos culminantes en la historia del pensamiento que supusieron la remodelación del cuerpo de conocimientos tras el cuestionamiento de tesis aceptadas durante milenios.

Pero queremos señalar que el final del tema constituye una ocasión privilegiada para abordar aspectos fundamentales de la actividad científica, como lo referido a la recapitulación y las perspectivas abiertas con los desarrollos abordados. Por esta razón, se propone ahora un grupo de actividades que permiten recapitular todo lo estudiado en el tema, revisando y sintetizando lo que supuso esa gran revolución científica, el hundimiento de la barrera que separaba el cielo de la tierra, el surgimiento de un nuevo paradigma y la integración, por primera vez en la historia de la humanidad, de dominios aparentemente inconexos.

Una ocasión, también, para tratar de nuevo las relaciones CTSA, que han sido contempladas desde el inicio del tema pero que, tras avanzar en el estudio de la problemática abordada, es necesario analizar con mayor profundidad, conectando los aspectos tratados con los desarrollos tecnológicos y la sociedad y el medio en que se desarrollan (Solbes, 2002). Así, ya nos referimos a lo que supuso la búsqueda de

una mejora en las predicciones astronómicas, fundamental para los largos viajes alejándose de las costas que tuvieron lugar en el siglo XV y que influyeron en el impulso que recibieron en esos años las investigaciones en el campo de la astronomía. También abordamos las barreras ideológicas a aceptar el movimiento de la Tierra, lo que constituye un magnífico ejemplo del papel subversivo del desarrollo científico, de cuestionamiento de dogmas y barreras a la libertad de pensamiento. Y es posible referirse a la contribución de todos estos desarrollos en acciones transformadoras en la Tierra, facilitando los grandes descubrimientos y con ellos la primera gran globalización y los cambios sociales y del medio físico que provocó en todo el planeta.

Y si extendemos la consideración de estas implicaciones hasta nuestros días, nos encontramos con consecuencias aún mayores, como, por ejemplo, las posibilidades por los satélites artificiales que han modificado en profundidad la vida en la Tierra, haciendo posible la transmisión casi instantánea de información y de transacciones de todo tipo, así como la predicción de fenómenos atmosféricos, el estudio de la evolución de los ecosistemas, la detección de incendios, etc., sin olvidar las repercusiones negativas que todo esto puede conllevar y que se relacionan con la contemplación de las perspectivas abiertas y la toma de decisiones al respecto.

Se trata, en definitiva, de aspectos fundamentales de la educación científica, a cuya comprensión puede contribuir la realización de la visita a un planetario, que permiten relacionar la gravitación con la revolución científico-técnica del siglo XX y profundizar en el conocimiento de la evolución de las ideas científicas, porque ayudan a mostrar una imagen de la ciencia en conexión con el mundo que nos rodea, con los avances científicos, con temas de actualidad, a ir aproximándonos al conocimiento de nuestros orígenes y, en definitiva, a contestar muchas de las preguntas que los seres humanos teníamos planteadas desde hace mucho tiempo, de una forma abierta, desprovista de mitos y supersticiones.

Es frecuente encontrar en la prensa noticias relativas a estos conocimientos científicos y sus repercusiones; en algunos casos, se les dedica una sección, por lo que no será difícil recopilar en pocos días numerosa información a este respecto. Es una ocasión para comprender el papel relevante que puede jugar la prensa en la educación científica y también para ir abordando cuestiones de actualidad que no caben en un tema como éste, pero que pueden discutirse en situaciones más informales, tales como las relacionadas con la posible existencia de vida en otros lugares del universo, los ovnis, etc.

NOTA:

Este capítulo ha sido preparado originalmente para este libro

Referencias bibliográficas en este capítulo

BYBEE, R. (2000). Achieving Technological Literacy: A National Imperative. *The Technology Teacher*, September 2000, 23-28.

GIL- PÉREZ, D. (1981). Evolución de la idea de materia. (Un hilo conductor para el estudio de la física). Valencia: ICE Universitat de València.

HOLTON, G. y BRUSH, S. (1996). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.

HOLTON, G. y ROLLER, D. (1963). *Fundamentos de la Física Moderna*. Barcelona: Reverté.

HOLTON, G., RUTHERFORD, F. J. y WATSON, F. G. (1982). *Project Physics*. New York: Holt-Rinehart-Winston.

MASON, S. F. (1985). *Historia de las ciencias*, Vol. 5. Madrid: Alianza.

SAGAN, C. (1982). *Cosmos*. Barcelona: Planeta.

SÁNCHEZ RON, J. M. (1999). *Como al león por sus garras*. Madrid: Debate.

SOLBES, J. (2002). *Les emprems de la Ciència. Ciència, Tecnologia, Societat: Unes relacions controvertides*. Valencia: Germania.

VILCHES, A. y GIL-PÉREZ, D. (2003). *Construyamos un futuro sostenible. Diálogos de supervivencia*. Madrid: Cambridge University Press.