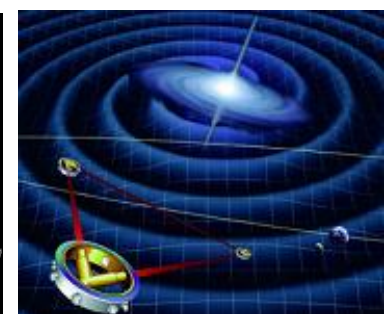
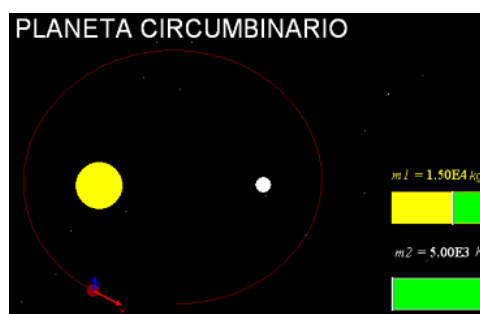
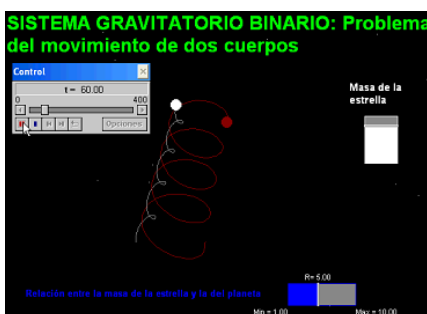
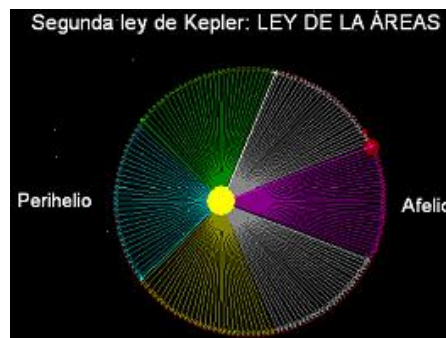
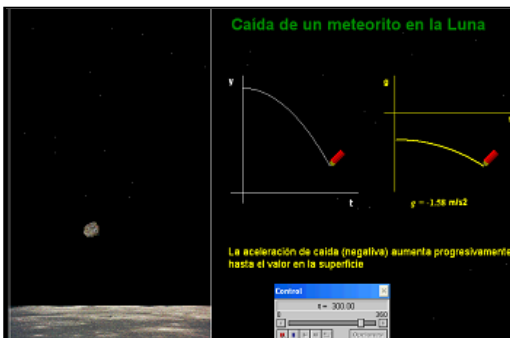
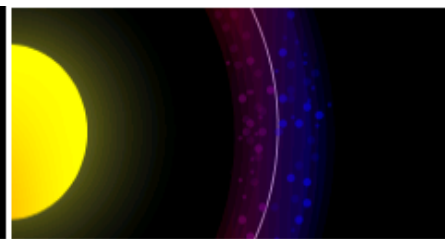
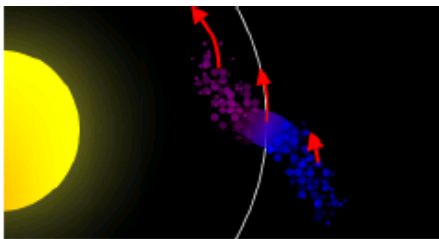
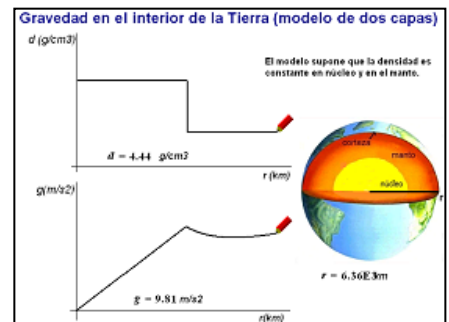
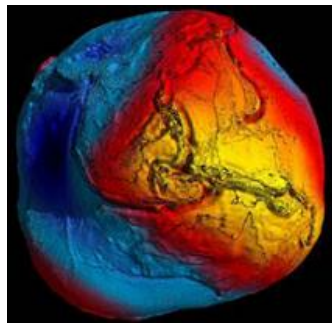


Campo Gravitatorio en 2º Bachillerato. Un tema idóneo para conectar con aspectos de la actualidad científica astronómica y astrofísica

Manuel Alonso Sánchez (IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante)

Con la colaboración de Rafael Bachiller, director del Observatorio Astronómico Nacional



PRESENTACIÓN

En nuestro sistema educativo el estudio de conceptos sobre Gravitación se inicia en 4º ESO y en 1º Bachillerato, dentro de los temas sobre Mecánica Newtoniana. Sobre esta base, en 2º Bachillerato se imparte un tema específico dedicado al Campo Gravitatorio.

Los profesores de Física de Instituto sabemos que durante el desarrollo de este tema los estudiantes muestran mucho interés por cuestiones de Astronomía y/o de Astrofísica. En esto, afortunadamente, poco ha cambiado el ser humano que, desde tiempos inmemoriales siempre mostró una gran curiosidad por los astros o, más en general, por lo mucho que los estudios sobre Gravitación pueden aportar para avanzar en el conocimiento de la Naturaleza y del Universo en general (Rojas y Bustamante, 2013).

Esta predisposición tan favorable de los alumnos resulta muy estimulante y es bienvenida en este tiempo en el que, en términos generales, se padece un descenso del alumnado que quiere una formación superior en ciencias. El Campo Gravitatorio en 2º de Bachillerato brinda una oportunidad para contrarrestar esta tendencia y, quizá, para contribuir a despertar o a alimentar vocaciones científicas en algunos de nuestros estudiantes.

Con estos buenos propósitos empezamos, hace aproximadamente un quinquenio, a desarrollar un proyecto para la enseñanza de este tema, queriendo ir un poco más allá de lo exigido en el currículum oficial y procurando conectar con aspectos de la actualidad científica astronómica y/o astrofísica.

El proyecto se ha enmarcado en un modelo de enseñanza-aprendizaje de la física con una estructura de investigación orientada (Gil, 1993; Furió, 2001; Guisasola, Furió y Ceberio, 2008; Becerra, Grass y Martínez Torregrosa, 2012) y, en coherencia con él, se concibe permanentemente inacabado y sometido a un proceso de continua re-elaboración. Así: **a)** El tema se actualiza frecuentemente para incorporar aspectos de la actualidad científica. **b)** Los materiales se revisan cada año, tras analizar su funcionamiento en el aula. **c)** Todo el proyecto se comparte y se discute exhaustivamente con otros colegas. **d)** El tema se difunde, además de [a través de la Red](#), también en actividades de formación docente que hemos impartido durante estos años.

Terminamos esta escueta introducción destacando en este trabajo la gran aportación de D. Rafael Bachiller García, Director del Observatorio Astronómico Nacional y Académico de la

Real Academia de Doctores de España. D. Rafael Bachiller, antiguo compañero de estudios y amigo personal, nos regala desde hace algo más de cuatro años excelentes [artículos de divulgación sobre la actualidad astronómica y/o astrofísica](#), para incardinarlos aquí (los artículos se publican periódicamente en elmundo.es en la serie [Crónicas del Cosmos](#)). Esto, además de enriquecer de forma destacada el conjunto de materiales disponibles, nos ayuda frecuentemente a replantear y mejorar aspectos del proyecto y hacerlo de forma bien fundamentada.

La guinda de este pastel de colaboración destacada de D. Rafael Bachiller la esperamos en el curso próximo, ya que para entonces realizará una visita al Instituto, para impartir a alumnos y profesores de la zona una charla-conferencia y coloquio sobre astrofísica, ligada a algunos de los aspectos principales de este trabajo.

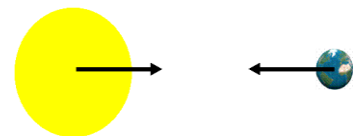
2. RECORRIDO POR EL TEMA

Vamos a recorrer el tema accediendo a su [exposición en formato digital](#) y vinculando, a medida que se vayan citando, los diferentes materiales: el [programa-guía de actividades](#) de clase (Gil y Martínez Torregrosa, 1987, Sanmartí, 2000); las [animaciones interactivas Modellus](#) (Duarte, 1996), de refuerzo de conceptos y de problemas (Alonso y Soler, 2007; Alonso, 2008); los [documentos textuales](#) sobre desarrollos conceptuales, sobre problemas abiertos planteados como investigación (Ramírez y Gil, 1991; Gil y Martínez Torregrosa, 2006), etc.; las [noticias en prensa sobre la actualidad científica](#); los citados [artículos de divulgación sobre astronomía y/o astrofísica](#) de D. Rafael Bachiller.

Inicio del tema

El tema se inicia con el planteamiento de un problema científico (Verdú y Martínez Torregrosa, 2005). Concretamente, se ponen en evidencia limitaciones del concepto newtoniano de fuerza como una acción a distancia (Martín y Solbes, 2001; Ramal, J.F. y Aguilera F., 2001), y a raíz de ellas, se plantean algunas preguntas: ¿Cómo es posible que se ejerzan fuerzas dos cuerpos celestes, sin haber nada entre ellos? ¿Cuál puede ser el mecanismo de la interacción?

Estas cuestiones impulsan la [introducción del concepto de campo gravitatorio](#) (Actividad A.13 del [programa-guía](#)) e intentan contribuir a que se aprecie desde el inicio el gran avance que trajo sustituir una interpretación de la gravitación en función de la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos, por otra que atribuye el mecanismo de la interacción al campo que crea cada uno de ellos.



Introducción y manejo de los conceptos de campo y de potencial gravitatorio

El planteamiento anterior deja a las puertas de los conceptos de campo gravitatorio y de potencial gravitatorio. Estos conceptos nucleares del tema se quieren introducir de forma razonada y tentativa (Gil y otros., 2005). Lo que implica, por ejemplo, que: antes de expresar la definición operativa del concepto de campo gravitatorio, se plantee el problema de cómo detectar la presencia de dicho campo en un cierto punto o lugar (actividad A.14 del [programa-guía](#)); antes de expresar la definición operativa del concepto de potencial

gravitatorio, se relacione a éste con la energía gravitatoria, de forma análoga a como antes se relacionó el campo con la fuerza (actividad A.32 del [programa-guía](#)); etc.

Después, se procura facilitar una asimilación progresiva de estos conceptos, para la que, entre otros recursos, se aportan animaciones interactivas: Sobre la [representación del campo gravitatorio](#) (actividad A.22 del [programa-guía](#)); sobre [la energía potencial de dos masas](#); sobre la [evolución de potencial creado por un cuerpo celeste con la distancia al mismo](#) (actividades A.32 y A.33 del [programa-guía](#)); etc.

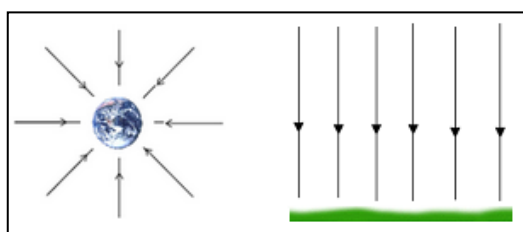


También se practican desarrollos cuantitativos sencillos y se utilizan los conceptos en la resolución de ejercicios y de problemas variados (varias actividades entre la A.14 y la A.37 del [programa-guía](#)).

Y, finalmente, para mostrar que todo ello tiene un nivel básico, a partir del cual existe la posibilidad de profundizar ampliamente, se aportan también algunos documentos textuales con un nivel ligeramente superior (por ejemplo, sobre la [relación entre el campo y el potencial](#)) y vínculos a varios enlaces externos.

Campo gravitatorio terrestre

Una vez introducidos los conceptos anteriores, el estudio específico del [campo gravitatorio terrestre](#) comienza señalando condiciones que interesa imponer inicialmente a nuestro planeta: Considerar la Tierra como una esfera con su masa distribuida de forma homogénea (entonces, las líneas de su campo gravitatorio en el exterior serían radiales), y considerar un



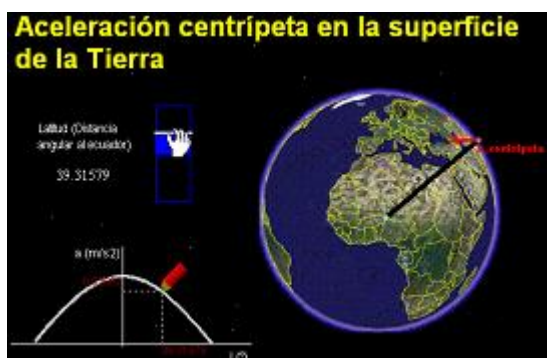
pedazo de superficie terrestre de pequeño tamaño en comparación con el radio de la Tierra y variaciones de altura también pequeñas en esta misma escala (entonces el campo gravitatorio sería uniforme y sus líneas serían verticales y paralelas). Se obtiene el

valor del campo gravitatorio terrestre bajo estas condiciones simplificadoras, y se trata, también, la diferencia entre los conceptos de campo gravitatorio y aceleración de la gravedad (actividad A.18 del [programa-guía](#)).

Variación del campo gravitatorio con la latitud

Tras el estudio básico del campo gravitatorio terrestre, se dedican varios apartados a ampliar algunos conceptos, con el propósito de hacerlos más adecuados para tratar el caso real. [Éste primero](#) comienza señalando que, dado que la Tierra no tiene en realidad la forma de una esfera, sino una forma más próxima a un esferoide achatado por los polos, al ir aumentando la latitud, también aumenta la intensidad del campo gravitatorio y, con ella, la aceleración de la gravedad (Actividad A.19 del [programa-guía](#)).

Se recuerda además que la Tierra rota alrededor de un eje propio y que ello también afecta

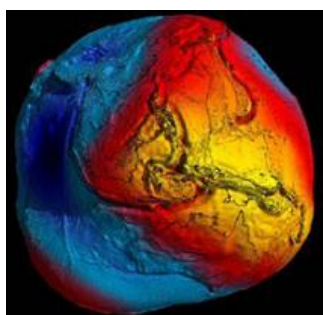


a la aceleración de la gravedad, si se mide en el sistema de referencia (no inercial) que cabe adoptar en cada punto del suelo terrestre. Para ayudar a entender este concepto (normalmente ausente en 2º Bachillerato) se aporta una animación que calcula y representa la variación de la aceleración centrípeta de un punto de la superficie terrestre (causada por

el movimiento rotacional de nuestro planeta) y se explica cómo influye dicha rotación en la trayectoria de los movimientos de caída de los cuerpos. También se explica que en dichos sistemas de referencia no inerciales hay que considerar un "campo centrífugo" que hace disminuir de forma creciente el valor de la aceleración de caída a medida que nos desplazamos desde cualquiera de los polos hacia el ecuador (al disminuir la latitud).

Irregularidad en la superficie terrestre y en la superficie lunar. Geoides

El [segundo apartado de ampliación sobre el campo gravitatorio terrestre](#) conecta con los estudios del campo y del potencial gravitatorio en la superficie, teniendo sobre todo en



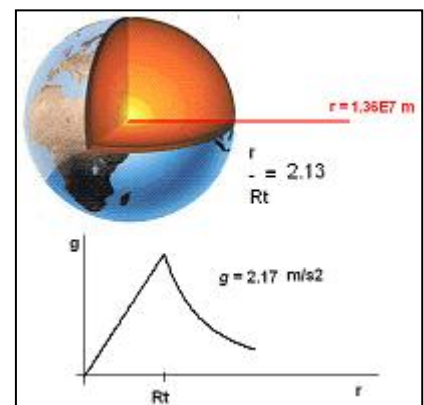
cuenta la irregularidad del suelo. La determinación precisa del campo gravitatorio a escalas locales es un problema científico actual de mucho interés, y en algunas misiones espaciales se están logrando mediciones con una precisión sin precedentes, en la superficie de la Tierra (misión [GOCE](#), de la ESA), y en la superficie de la Luna (misión [Grail](#), de la NASA). Se informa de estos avances

y se plantea de forma muy introductoria el geode terrestre, cuyo estudio tiene aplicaciones en oceanografía, en geofísica, en geodesia, en glaciología y en climatología. También se ve

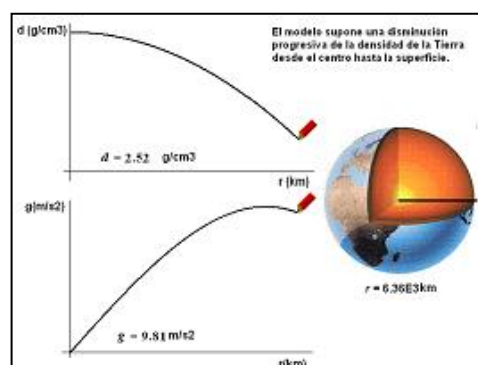
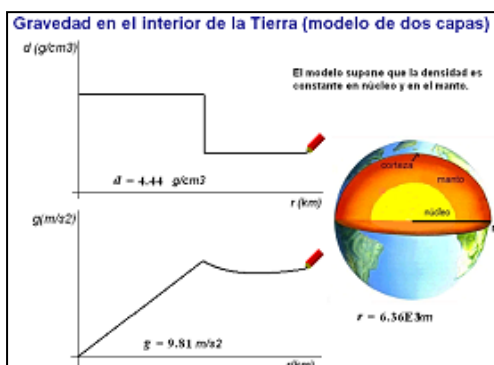
la inestabilidad del campo gravitatorio terrestre, ya que la corteza de nuestro planeta sufre, de cuando en cuando, deformaciones significativas (por ejemplo, cuando ocurren fenómenos violentos como grandes terremotos). Se aportan vínculos a noticias en prensa sobre las misiones [GOCE](#) y [Grail](#), y sobre el [terremoto de 2011 en Japón](#), que, además de causar el tsunami y el accidente nuclear en Fukushima, parece que también cambió localmente el campo gravitatorio de la Tierra.

Variación de la gravedad con la altura y con la profundidad

El [tercer apartado de ampliación sobre el campo gravitatorio terrestre](#) trata la variación del campo gravitatorio (y la de la aceleración de la gravedad) con la altura, ya que la expresión obtenida al principio del tema (actividad A.15 del [programa-guía](#)) únicamente se aplica por encima de la superficie. Por debajo del suelo, si la masa de la Tierra se distribuyera de forma homogénea, el módulo del campo gravitatorio y el de la aceleración de la gravedad aumentarían linealmente con la distancia al centro de la Tierra.



Este modelo de variación del campo gravitatorio con la profundidad suele ser el único que se expone (si se hace) en 2º de Bachillerato. Sin embargo, es poco fiel a la realidad, porque no tiene en cuenta la estratificación del subsuelo. Aquí se añaden otros [dos modelos](#) algo más realistas: El primero divide a la Tierra en sus dos capas principales (el núcleo y el manto). Teniendo en cuenta que existe un salto muy brusco entre la densidad media del núcleo (11.0



g/cm^3) y la del manto ($4.44 g/cm^3$), supone que cada capa tiene una densidad constante. El segundo modelo plantea una

disminución progresiva de la densidad de la Tierra al ir del centro hacia la superficie. Se aportan [desarrollos](#) que resuelven el problema siguiendo los tres modelos y animaciones que muestran las soluciones. De ellas se aprende que, considerando la estratificación del interior de la Tierra, g alcanza su valor máximo en un lugar situado debajo de la superficie.

Interpretación de las mareas oceánicas. Fuerzas de marea.

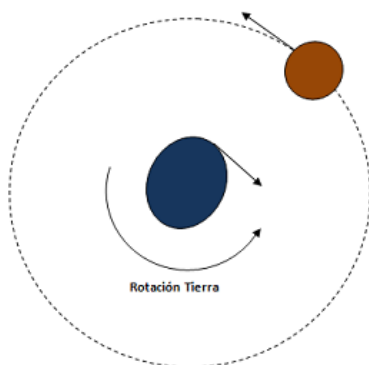
Tras ver el campo gravitatorio terrestre, se estudia una de sus aplicaciones más importantes: la [explicación de las mareas oceánicas](#) (actividad, A.29 del [programa-guía](#)), que fueron un misterio hasta que Newton las interpretó con su teoría gravitatoria (Newton, 1687).

También se explica que las fuerzas de marea, aunque se llaman así por ser responsables de las mareas oceánicas, son un fenómeno gravitatorio mucho más general y causan importantes fenómenos astronómicos y astrofísicos. Se aporta un [documento](#) sobre las fuerzas de marea, que incluye un cálculo sencillo de su valor estimado en la Tierra, y, seguidamente, se dedican varios apartados a ver algunos de sus efectos más importantes (habitualmente no se ve ninguno de ellos en 2º Bachillerato).



Rotación síncrona de satélites

El primer efecto de las fuerzas de marea que se ve es la [rotación síncrona de satélites](#) (además de la Luna, la tienen al menos otros 23 satélites del Sistema Solar). Se explica el proceso natural, llamado acoplamiento de marea, que lleva a los satélites hacia la rotación síncrona y se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#), en el que se detallan etapas de dicho proceso en el caso de nuestro satélite, desde que se formó el sistema Tierra-Luna (hace unos 4.000 millones de años), hasta el momento actual.



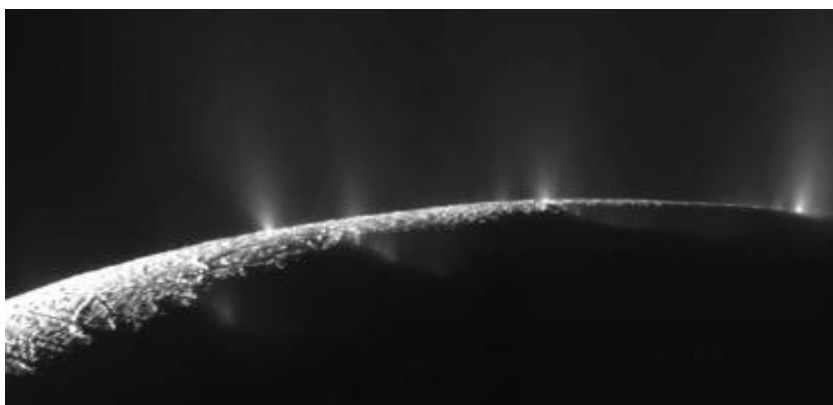
Se explica también que la acción de las fuerzas de marea oceánicas sobre la Tierra está modificando el periodo de rotación de la Tierra y la órbita de la Luna, ya que el par de fuerzas entre la Tierra y la Luna decelera la rotación de la Tierra (alargando los días unos 1.4 milisegundos por siglo; sobre dos horas acumuladas en los últimos 1500 años) y acelera a nuestro satélite en su órbita, por lo que se está alejando de la Tierra ([el radio orbital aumenta aproximadamente 3.8 metros por siglo](#)).

Calentamiento por marea

El segundo fenómeno producido por la fuerzas de marea que se ve es el [calentamiento por marea](#), es decir, el hecho de que las fuerzas de marea calientan internamente cuerpos

celestes, como planetas y satélites (en el Sistema Solar, aproximadamente el 0.85% de su energía se transforma en calor a causa de la fricción por mareas).

Como ejemplo se pone, en primer lugar a Io (el satélite más interno de Júpiter), en cuyo interior se alcanzan temperaturas del orden de 2000K. Las variaciones en la fuerza de atracción de Júpiter sobre Io, debidas a la excentricidad de la órbita del satélite, alteran significativamente su abultamiento por marea (hasta 100m de diferencia de altura), lo que, junto con la rotación de Io sobre su propio eje, genera intensas fricciones en su interior.



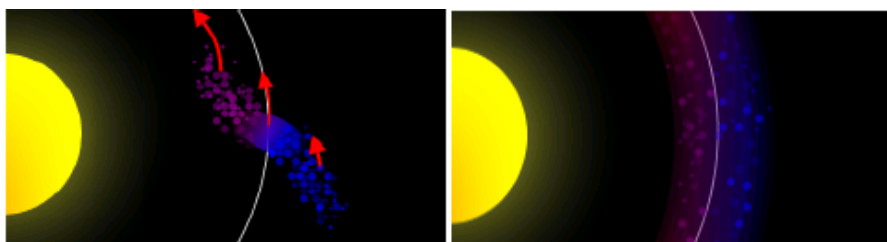
Otro ejemplo que se ve es Encélado, una pequeña luna de Saturno que saltó a la actualidad en 2006 cuando la sonda Cassini detectó grandes géiseres que emergen por su superficie desde océanos líquidos del subsuelo ([noticia](#)).

Se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#), en el que se explica qué, seguramente, el mecanismo físico que calienta el subsuelo de Encélado, son enormes fuerzas de marea ejercidas por Saturno. La investigación sobre Encélado está despertando mucho interés debido a que su subsuelo reúne tres ingredientes que son indispensables para que pueda surgir la vida: agua líquida, compuestos orgánicos y una fuente de energía (el volcanismo).

Límite de Roche. Desintegración de cometas y formación de anillos planetarios.

La tercera cuestión que se ve sobre las fuerzas de marea es el concepto de límite de Roche. Se aporta la [deducción](#) de una fórmula que calcula de forma aproximada la fuerza de marea máxima entre dos puntos opuestos de un cuerpo celeste y se informa de que, viendo que esta fuerza aumenta muy rápidamente al disminuir la distancia entre los dos objetos celestes involucrados, Roche supuso en 1948 que por debajo de una distancia mínima entre ellos, no puede orbitar uno alrededor del otro sin riesgo de desintegrarse.

A modo de ejemplo, se dan datos de los planetas del sistema solar, constatando que todos orbitan con un radio mayor al límite de Roche. En sentido opuesto, se expone el caso del [cometa Shoemaker-Levy 9](#), que en 1992 se partió en pedazos al superar el límite de Roche del planeta Júpiter. Y, también se explica que la formación de los anillos de Saturno fue



atribuida por el propio Roche a distorsiones por marea: las partículas que conforman dicho anillo serían partes de un antiguo satélite natural que se rompió en pedazos al estar dentro del límite de Roche.

satélite natural que se rompió en pedazos al estar dentro del límite de Roche.

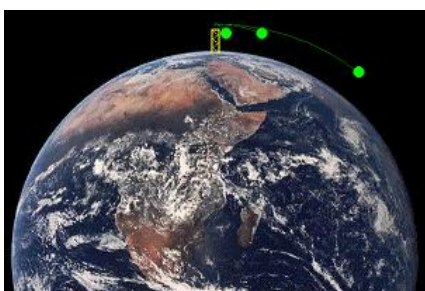
Interacciones entre galaxias

El último fenómeno producido por las fuerzas de marea que se ve son algunos procesos espectaculares que tienen lugar en la interacción entre galaxias. Se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#), sobre el descubrimiento de un interesante par de galaxias enlazadas, en el que se explica que cuando dos galaxias espirales se aproximan, las fuerzas de marea provocan grandes filamentos de materia que viaja entre ellas ("colas de marea").



Movimientos en el campo gravitatorio terrestre. Planteamiento general

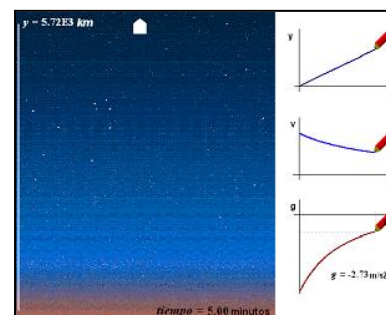
Posiblemente, la mayor contribución de la teoría de gravitación de Newton (apartado 1 del [programa-guía](#)) fue mostrar que no hay diferencias fundamentales entre, por ejemplo, el movimiento orbital de un satélite y el movimiento casi parabólico de una pelota lanzada desde una colina, ya que para estudiar ambos movimientos se precisa usar unas mismas leyes fundamentales: la ley de gravitación universal y los propios principios de la dinámica de Newton. [Aquí](#) se repasa este concepto fundamental con ayuda de una animación (representa diferentes trayectorias que puede seguir un objeto lanzado horizontalmente desde una colina dependiendo del valor de su velocidad inicial), y se amplía adoptando un enfoque energético sobre el problema (apartado 4 del [programa-guía](#)).



Lo cual, deja en disposición de abordar el estudio de movimientos de objetos en el campo gravitatorio.

Movimientos verticales de proyectiles

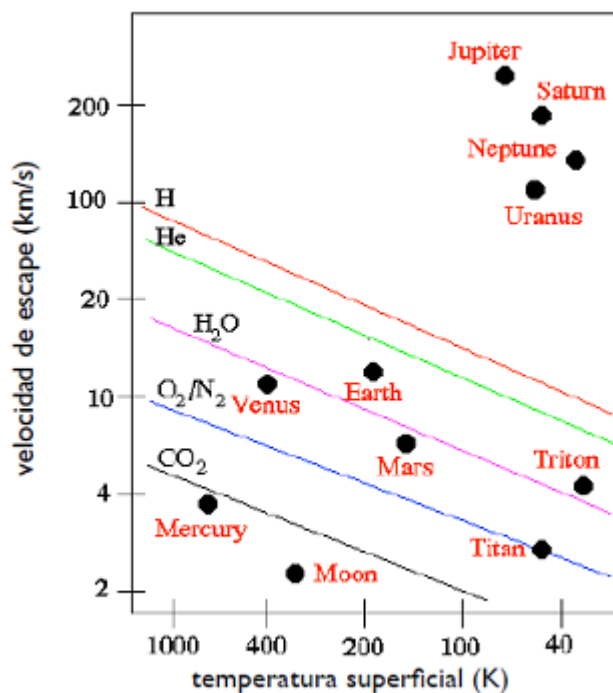
De los movimientos de objetos en el campo gravitatorio, el primero que se ve es el [movimiento de proyectiles](#). Se estudia el caso de un proyectil lanzado desde la Tierra en sentido ascendente, reforzando dicho estudio con ejercicios (A.53 y A.55 del [programa-guía](#)) y con una animación que permite modificar las condiciones iniciales de dicho movimiento. Esto ayuda a plantear el concepto de [velocidad de escape](#) (su expresión se deduce en un problema abierto, actividad A.54 [programa-guía](#)) y también el concepto (normalmente ausente en 2º Bachillerato), de velocidad “límite”, casi constante, que tiende a alcanzar un proyectil si se lanza con una velocidad superior a la de escape.



Atmósferas planetarias

La velocidad de escape y la temperatura en la superficie de un cuerpo celeste, son los parámetros determinantes para la formación y el mantenimiento de una atmósfera alrededor de él. A esta importante cuestión se le dedica [este apartado](#), que comienza obteniendo la expresión de la velocidad cuadrática media de las moléculas de un gas, ya que el criterio estadístico aceptado por la física para considerar que un cuerpo celeste retendrá su atmósfera durante mucho tiempo es que la velocidad de escape sea inferior a seis veces dicha velocidad cuadrática media. De este criterio se deduce que la temperatura en la superficie ha de ser inferior a una cantidad que depende de la masa y del radio del cuerpo celeste, así como de la masa de las moléculas del gas atmosférico.

Se aplican estos conceptos al sistema solar y se aportan varios recursos, como el gráfico adjunto, cuyas líneas coloreadas marcan los valores de la temperatura y de la velocidad de escape, por encima de los cuales el campo gravitatorio no puede retener a algunos de los principales candidatos a componentes atmosféricos (H, línea roja; He, línea verde; H₂O, línea rosa; O₂ y N₂, línea azul; CO₂, línea negra). Al situar en este gráfico a los planetas y a algunos



satélites importantes del sistema solar, se constata el tipo de atmósfera que posee cada uno [los planetas tienen atmósferas dominadas por elementos ligeros, principalmente H_2 y He ; los planetas terrestres tienen atmósferas dominadas por N_2 , O_2 y CO_2].

Termina el apartado dando detalles del proceso de formación y mantenimiento de la atmósfera de la Tierra, desde la atmósfera inicial primaria (compuesta principalmente de H_2 y He), que tenía cuando se formó el sistema solar, hasta la atmósfera actual secundaria.

Caída de meteoritos

Otro apartado sobre movimientos en el campo gravitatorio, trata la [caída de meteoritos](#). Este



movimiento se estudia en un problema abierto (actividad, A.52 del [programa-guía](#), desarrollo en este [documento](#)) y se refuerza con una animación sobre la caída de un meteorito en la Luna. Considerando que nuestro satélite carece de atmósfera, la animación constata que su aceleración aumenta paulatinamente durante la caída hasta alcanzar un valor

máximo de 1.62m/s^2 (valor de g en la superficie lunar), justo antes de impactar en el suelo.

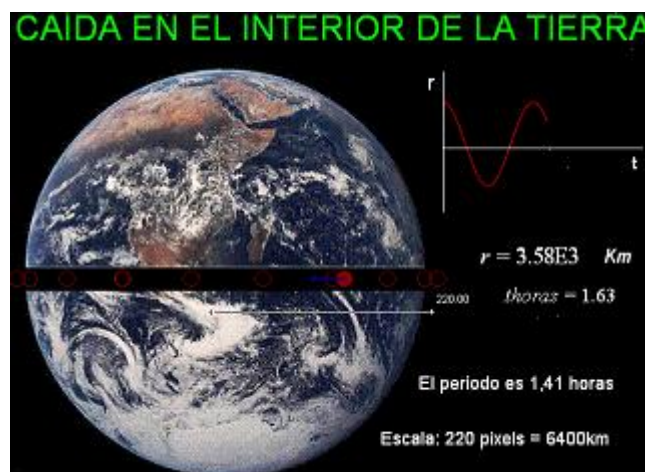
El análisis de los meteoritos tiene gran utilidad para conocer aspectos del Sistema Solar y de su evolución. En este sentido, se ve el caso del [meteorito que cayó en California en 2012](#). Se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#) que expone que el análisis de este meteorito reveló la presencia de moléculas orgánicas no halladas antes en ningún otro meteorito, y que pudieron haber sido de gran importancia para la evolución de la complejidad molecular en la Tierra primitiva y la emergencia de la vida.

También se ve otro estudio aún más reciente (2014) sobre los restos de meteoritos procedentes del planeta Marte. Otro [artículo de D. Rafael Bachiller](#), informa de la hipótesis, recién formulada, según la cual casi todos ellos procederían del gran impacto que creó el cráter Mojave en la superficie de Marte hace unos 3 millones de años. Esta idea ha abierto un gran debate en la comunidad científica, pues, si se confirmase, tendría serias implicaciones en las ideas actuales sobre la formación y evolución de la corteza de Marte.

Hipotética caída en el interior de la Tierra

Teniendo en cuenta que en 2º Bachillerato se estudian los movimientos de oscilación, es interesante dedicar [un apartado](#) del estudio del campo gravitatorio al movimiento que tendría un objeto al que se dejara caer por el interior de un túnel hipotético atravesando a la Tierra.

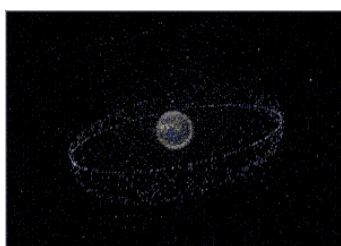
Sobre ello, se aporta un [documento](#) que resuelve el problema usando el modelo más sencillo sobre el campo gravitatorio terrestre por debajo del suelo (aumento lineal de su módulo con la distancia al centro de la Tierra), ya que, bajo esa hipótesis, el planteamiento y la resolución del problema son accesibles al nivel de este curso. También se aporta una animación que resuelve el problema (usa datos reales) y recrea este hipotético movimiento.



Movimientos orbitales de trayectoria circular. Satélites terrestres

El estudio de los [movimientos orbitales de trayectoria circular](#) se inicia con dos problemas abiertos, dedicados a obtener la velocidad de un satélite en este tipo de órbita y la relación entre el periodo y el radio de la misma (actividades A.38 y A.39 del [programa-guía](#)). La solución de ambos problemas se aporta en un [documento](#) y su abordaje se refuerza con un tratamiento energético (actividades A.46 y A.47 del [programa-guía](#)).

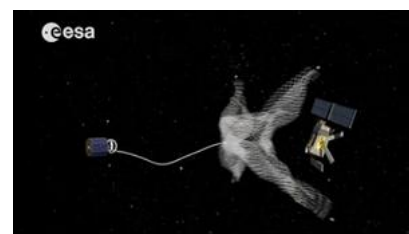
Tras este estudio general, se presta atención prioritaria a la órbita o geoestacionaria. En un problema abierto (actividad A.44 del [programa-guía](#)) se calcula su radio, y se explica que es una órbita óptima para las comunicaciones, ya que permite el uso de antenas fijas para mantener un contacto permanente con el satélite y se precisan pocos satélites para cubrir la totalidad de la superficie de la Tierra. También se mencionan algunos inconvenientes de



esta órbita, como el hecho de que, por su alejamiento, se provoca un retraso (0.24 segundos) entre las señales enviada y recibida del satélite. Y se alerta sobre el problema de la saturación de satélites en ella, aportando una [noticia de prensa](#), que señala que el número de satélites de la órbita geoestacionaria es limitado e

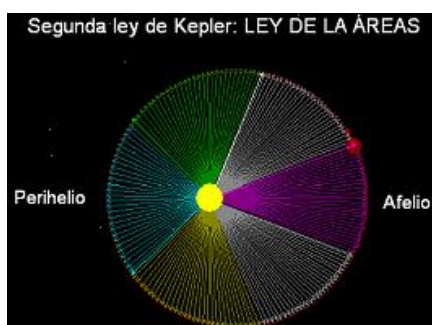
informa de que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y la FCC (en los Estados Unidos) administran sus posiciones.

Termina este apartado llamando la atención sobre el problema general de acumulación de residuos en el espacio, ya que, desde que comenzó la era espacial, se han realizado unos 5000 lanzamientos de satélites y se estima que actualmente hay unos 170 millones de fragmentos de basura espacial de tamaño superior a un milímetro (unos 670.000 son mayores de un centímetro y unos 29.000 tienen más de 10 centímetros). Se informa de que esta basura espacial se acumula especialmente en las órbitas LEO, comprendidas entre 800 y 1.000 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre, y se explica que, debido a la velocidad que tienen estos fragmentos, suponen un grave peligro para los equipos espaciales funcionando. Como ejemplo, se menciona la colisión ocurrida en 2009 entre un satélite estadounidense de comunicaciones (Iridium-33) y un satélite militar ruso (Kosmos-2251) (se destruyeron ambos y se generaron más de 2.200 escombros observables). Y, finalmente se aporta una [noticia de prensa](#) sobre diferentes opciones planteadas por la ESA para recoger y eliminar o expulsar parte de la preocupante basura espacial.



Movimientos orbitales de trayectoria elíptica. Leyes de Kepler.

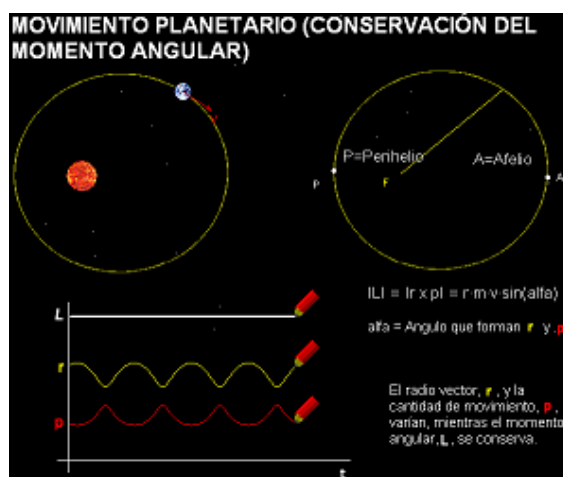
En esta apartado sobre los [movimientos orbitales de trayectoria elíptica](#) se ven con detalle las tres leyes de Kepler. Se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#), que expone aspectos históricos y científicos sobre ellas, y tres animaciones interactivas para reforzar su estudio.



La primera de las animaciones ilustra la segunda ley de Kepler. Reproduce el movimiento de un planeta alrededor del Sol y dibuja de un color diferente sucesivos conjuntos de radios vectores que barren la órbita en intervalos iguales de tiempo. Así quedan señaladas áreas iguales barridas en tiempos iguales. Este concepto se justifica cualitativamente

en una actividad que solicita que se dibuje el vector aceleración en varios puntos de la órbita y se vea la orientación de sus componentes normal y tangencial (actividad A.8 del [programa-guía](#), desarrollo en este [documento](#)).

La segunda animación también trata de la segunda ley de Kepler, ahora de forma cuantitativa. Recrea el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol y deja modificar las condiciones iniciales del movimiento. Permite constatar que, en un rango de valores de la velocidad inicial, la trayectoria es elíptica y también que, mientras el radio vector y la cantidad de movimiento de nuestro planeta varían, el momento angular permanece constante (actividad A.9 del [programa-guía](#), desarrollo en este [documento](#)).



La tercera animación es sobre la tercera ley de Kepler. Permite atribuir al radio de la órbita



un valor que puede oscilar desde el radio medio de la órbita de Mercurio hasta el radio medio de la órbita de Marte. La animación obtiene los periodos de los cuatro primeros planetas del sistema solar y sus velocidades de traslación, constatando que coinciden con los valores reales. Éstos, se aportan en una [tabla de datos de los planetas del Sistema Solar](#).

Determinación de la masa de la Tierra

Este apartado incluye un problema abierto que solicita obtener la masa de un planeta a partir del estudio del movimiento orbital de uno de sus satélites (Actividad A.42 del [programa-guía](#)). La solución del problema, aplicada en concreto a [la determinación de la masa de la Tierra](#), da pie para informar de que Newton, poco después de formular la ley de gravitación universal, propuso dos métodos diferentes para determinar por separado la constante, G o la masa de la Tierra, M. Se explica que, teniendo en cuenta estas propuestas, a lo largo de la historia se ha podido medir la masa de la Tierra cada vez con mayor precisión.

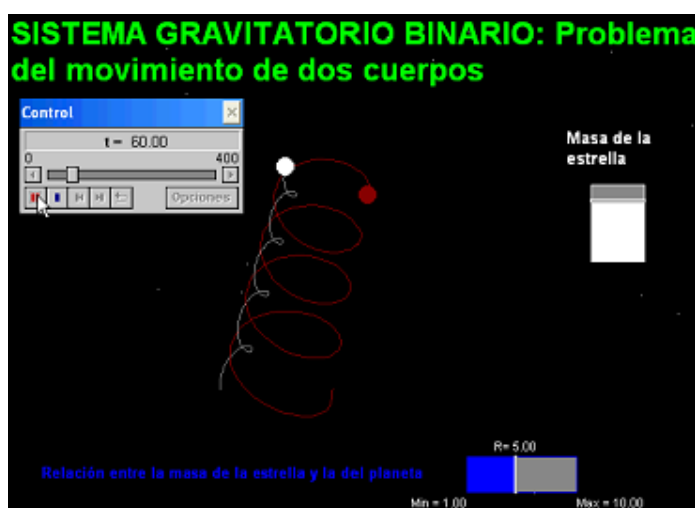
Finalmente se aporta un artículo de [D. Rafael Bachiller](#), sobre un trabajo actual de Ben Harris (ingeniero experto en sistemas de posicionamiento de satélites terrestres), que ha tomado datos muy precisos del movimiento durante nueve meses de los satélites de los

sistemas GPS, GLONASS y los primeros ya operativos de Galileo. Con esos datos la masa de nuestro planeta sería mayor que el valor establecido hasta ahora por la Unión Astronómica Internacional y Harris ha formulado la hipótesis de que esto podría deberse a la existencia de un anillo terrestre de materia oscura alrededor de la Tierra. Esta atrevida hipótesis, de candente actualidad, también explicaría algunas anomalías que se han observado en el movimiento de varias naves espaciales.



Sistema gravitatorio binario

[Este apartado](#) comienza señalando la dificultad que, en general, tiene el estudio del movimiento de un cuerpo celeste inmerso en alguna de las diferentes agrupaciones de materia en el Universo (sistemas planetarios, cúmulos estelares, galaxias, nubes de gas, agrupaciones galácticas, polvo, etc.), lo que da pie a la introducción del concepto de centro de masas. A continuación se aplica este concepto al sistema binario. Con ayuda de una



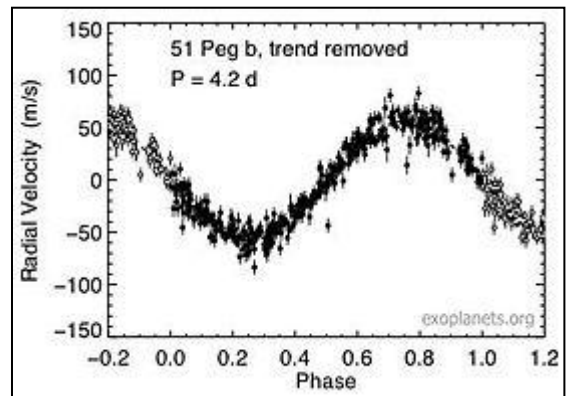
animación, se constata que el centro de masas de los dos cuerpos celestes se sitúa en un punto del segmento que une sus centros y también que, mientras la velocidad de cada cuerpo (con respecto al otro) sea menor que la velocidad de escape, pero a la vez suficiente para que no lleguen a colisionar, cada cuerpo celeste describe una órbita circular o elíptica con respecto al otro. También se

ve que, con respecto al centro de masas, los cuerpos realizan trayectorias periódicas variadas (dependiendo de sus masas y velocidades iniciales), siendo el periodo orbital de cada uno alrededor del otro el mismo, e igual también al periodo de cualquiera de ellos respecto del centro de masas.

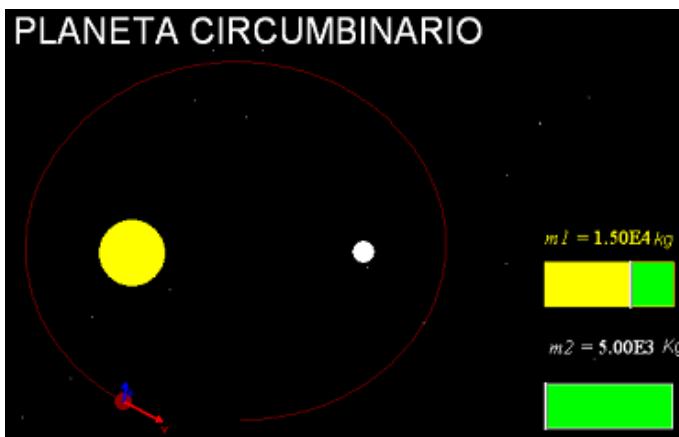
Planetas extrasolares y planetas circumbinarios

Para empezar, se explica el principal método usado actualmente para detectar [planetas extrasolares](#), basado en determinar los cambios en la velocidad radial de la estrella alrededor de la cual orbitan. Estos cambios, a su vez, se deducen midiendo el efecto

Doppler de bamboleo observado en la luz recibida de la estrella. Se aporta un [artículo de D. Rafael Bachiller](#), que informa de que los astrónomos Michel Mayor y Didier Queloz utilizaron este método para detectar en 1995 el primer planeta extra-solar (51 Pegasi b), situado a 50 años-luz de la Tierra.



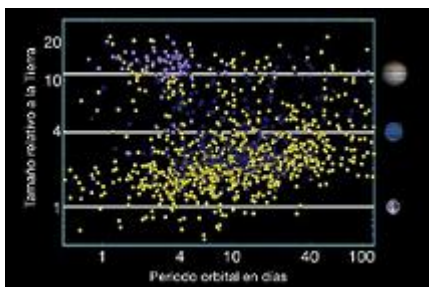
Como cuestión curiosa, se habla de los planetas circumbinarios (orbitan en torno a dos estrellas), ya que, aunque lógicamente son minoritarios, se cree que sólo en la Vía Láctea



puede haber millones de ellos. Se aporta una animación que simula el movimiento de un planeta de este tipo (permite modificar las masas de las dos estrellas) y vínculos a dos artículos de prensa sobre los descubrimientos, con el satélite Kepler de la NASA, de los primeros planetas así: "[Kepler 16b](#)", que se localizó en

septiembre de 2009; [Kepler-34b](#) y [Kepler-35b](#), que se encontraron muy poco después.

Para terminar, se aporta otro artículo de [D. Rafael Bachiller](#) donde se informa de que el satélite Kepler, durante su vida útil (terminó en 2013), analizó la luz de cientos de miles de



estrellas y aportó datos de que al menos 3.466 planetas podrían haber estado pasando por delante de ellas. El análisis de estos datos ha confirmado la existencia de numerosos sistemas planetarios, que incluyen planetas similares en tamaño a la Tierra y situados en zonas de habitabilidad en torno a su estrella o, en algunos casos, en

torno a un sistema doble de estrellas.

El gravitón y las ondas gravitacionales

A lo largo de todo el tema se ha mostrado que el concepto de campo gravitatorio trajo un gran avance al estudio de la gravitación. Después de desarrollar varios de los principales aspectos que evidencian este avance, el tema termina haciendo una breve incursión en la

[concepción actual de las interacciones](#) (generada en el marco de la Mecánica Cuántica) y en algunos de los principales problemas científicos que dicha interpretación está impulsando.

Se explica que dicha concepción considera que toda interacción se debe al intercambio de partículas mediadoras que portan el campo de fuerza correspondiente y que, de acuerdo con ello, la interacción gravitatoria se debería asociar al intercambio gravitones y el campo gravitatorio debería viajar por el espacio mediante ondas gravitacionales (en 2º Bachillerato, los estudiantes ya saben que las cargas aceleradas emiten ondas electromagnéticas, por lo que pueden entender que, similarmente, las masas aceleradas han de emitir ondas gravitacionales).

Se aporta una tabla de las partículas portadoras de las cuatro interacciones fundamentales y se informa de que, por el momento, esta interpretación de ellas se aplica con éxito a la fuerza electromagnética (intercambio de fotones), a la interacción débil (intercambio de bosones W y Z) y a la interacción fuerte (intercambio de gluones), pero que hay problemas importantes justamente, con la interacción gravitatoria, de tal forma que, por el momento, no se ha detectado experimentalmente el gravitón, ni tampoco, de un modo directo, las ondas gravitacionales.

Acerca del gravitón, se informa de que esta partícula muy probablemente no tiene masa o, en todo caso, porta muy poca energía y esto hace extremadamente difícil su detección por los débiles efectos que puede ocasionar (la mayoría de los físicos apuestan por un alcance infinito de la fuerza gravitatoria y, en coherencia con ello, por una masa nula del gravitón; aunque no fuera así, los cálculos a partir del alcance medido de la interacción gravitatoria darían un máximo posible de masa al gravitón de unos 10^{-69} kg).

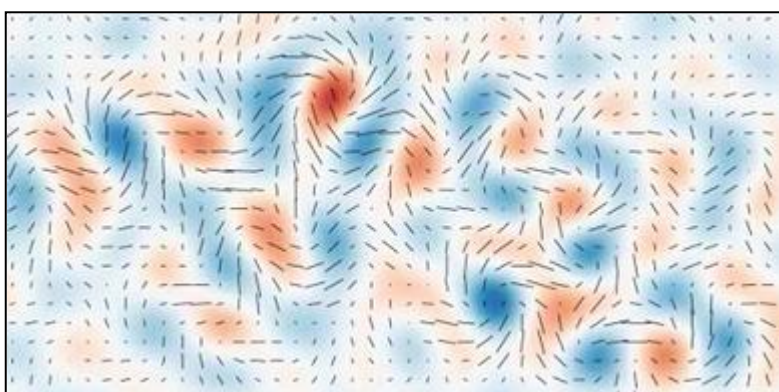
En cuanto a las ondas gravitacionales, en primer lugar, se comenta el experimento pionero que realizaron Taylor y su alumno de tesis Hulse en 1974 (merecedor del Nobel en 1993), en el que, midiendo las pulsaciones y el movimiento de un pulsar binario, comprobaron una disminución de su período orbital y lo interpretaron como una indicación de la existencia de ondas gravitacionales emitidas entre ellos (los componentes de un sistema binario siguen trayectorias curvas, por tanto, aceleradas).

Se informa de experimentos posteriores que han obtenido resultados similares y se pone el ejemplo del recién realizado (2012) con el Gran Telescopio de Canarias, en este caso referido a un sistema binario de enanas blancas, la cuales, probablemente a causa las

ondas gravitacionales que emiten, orbitan cada vez más rápido y se están acercando entre sí.



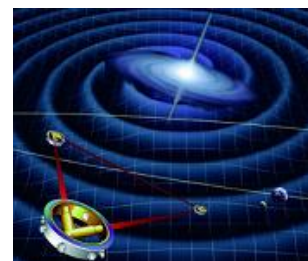
Otro experimento actual que se expone es la observación de las huellas que dejaron en la radiación de fondo las ondas gravitacionales generadas en los primeros instantes de la formación del Universo. Se explica que, en los años setenta, Alan Guth formuló la teoría del universo inflacionario, según la cual en los primeros instantes del Universo se habrían generado fluctuaciones cuánticas que, tras ser estiradas por la expansión del Universo, deberían producir ondas de densidad y ondas gravitacionales. Las ondas de densidad fueron observadas inicialmente por el satélite COBE, en 1992, y más tarde por los WMAP y Planck y sus propiedades concuerdan con la teoría de inflación. Por su parte, las ondas gravitacionales constituían una de las predicciones más buscadas de la teoría y parece ser que en marzo de 2014 se ha confirmado su existencia. En relación con esto, se vincula un artículo publicado en prensa por D. Juan García Bellido,



catedrático de Física de la universidad Autónoma de Madrid, donde explica que dicha confirmación se basa en que las ondas gravitacionales producidas en los primeros instantes del universo han de generar un patrón característico en la orientación de la

polarización del fondo de radiación. Como dicho fondo de radiación está muy débilmente polarizado, la señal que se buscaba era muy pequeña, lo que explica por qué se ha tardado mucho tiempo en descubrirla.

Termina este espacio dedicado a las ondas gravitacionales mencionando uno de los proyectos en curso para su futura detección: la misión espacial LISA (Laser Interferometer Space Antenna) en la que se espera construir el primer observatorio espacial de ondas gravitacionales, que podría estar operativo alrededor del 2020. LISA prevé utilizar tres naves espaciales idénticas, ubicadas en los vértices de un triángulo equilátero de cinco millones de kilómetros de lado. Cuando las ondas gravitacionales atraviesen la región del espacio en que se encuentren las naves, sus distancias relativas deberán modificarse por una perturbación espacio-temporal, de la que darán cuenta



instrumentos a bordo (medirán pequeñas variaciones de fase de los haces laser que las conectan).

De todo lo tratado en este último apartado se aportan vínculos a noticias de la actualidad científica, concretamente, una [entrevista a Hulse](#), realizada en Barcelona (en 2005), una noticia en prensa sobre el [experimento de las enanas blancas](#), otra noticia en prensa sobre la [detección de las ondas gravitacionales del primer instante del universo](#), y otra más sobre la [participación de científicos de Barcelona y de Baleares en el proyecto LISA](#).

Para terminar, podemos decir que la atención preferente que se presta en la parte final de este proyecto a la detección directa de ondas gravitacionales está motivada por el altísimo interés científico actual de dicha cuestión, ya que es un tema que abrirá una vía a nuevas investigaciones. Cuando el desarrollo de la tecnología lo permita y, se detecten de hecho las ondas gravitacionales, se abrirá una nueva ventana por la que asomarnos al conocimiento del mundo físico y presumiblemente permitirá explorar fenómenos que son inaccesibles a través de otras vías de acceso consolidadas, como es la del espectro electromagnético.

COMENTARIOS FINALES

Durante los años que se lleva implementando este tema, comprobamos que los estudiantes, en general, muestran enorme interés y muchos se muestran dispuestos a profundizar y en numerosas cuestiones van mucho más allá de lo que exige el programa oficial. Este interés y motivación se observa cada día en clase y tiene también un reflejo concreto en sus producciones: desde un trabajo de ampliación de los contenidos básicos que se les propone realizar y exponer a lo largo del tema (propuestas varias actividades del [programa-guía](#)), hasta sus respuestas a algunas de las preguntas contenidas en los exámenes ordinarios.

También interesa señalar, aunque ello no se ha de atribuir en exclusiva a este tema, que los resultados académicos en la prueba externa de selectividad en la asignatura de Física vienen siendo todos los años notables, en conjunto entre un punto y un punto y medio por encima de la media de todos los estudiantes que se examinan por la Universidad de Alicante (obsérvese que muchas de las actividades del [programa-guía](#) son ejercicios preguntados en esta prueba externa). Este resultado adquiere mayor valor si tenemos en cuenta que el IES “Leonardo da Vinci” está situado en una zona desfavorecida de la ciudad y que los

resultados de la evaluación diagnóstica en 2º ESO, aunque son conformes con los de otros centros de la misma zona, son bastante peores a la media de todos los centros.

Lo que más nos satisface es comprobar que prácticamente todos los años algunos alumnos se decantan por proseguir estudios de ciencias, no pocas veces de Física (un grado por cierto que no hay en Alicante) y se declaran encantados con la asignatura.

Por todo ello, queremos aprovechar esta ocasión para manifestar también nuestra total disposición a incrementar los abundantes lazos profesionales que ya tenemos con otros colegas. Ya hemos comentado que a la par del desarrollo de este proyecto y en paralelo con nuestra actividad docente, hemos impartido algunos cursos de formación del profesorado en los que se ven contenidos del tema (con atención particular a los aspectos metodológicos involucrados en el mismo). Pero, más allá de esto, nos gustaría también aprovechar esta ocasión para invitar a cualquier colega que esté utilizando o prevea utilizar algunos de los recursos aportados, a colaborar con nosotros. El hecho de que el tema, con todos sus recursos, se exponga en la Red nos obliga a ser más exigentes a la hora de re-elaborarlo, y, en este sentido, toda colaboración y/o crítica es bienvenida.

Referencias:

ALONSO, M. 2008. Animaciones Modellus para las clases de física. *Revista Española de Física*, vol. 22, 3, 52-57 (<http://rsef.uc3m.es/images/REF/vol22n3/8.pdf>)

ALONSO, M, SOLER, V. 2007. Animaciones *Modellus* y videos de experiencias de laboratorio para dar un nuevo impulso a la enseñanza de la mecánica newtoniana. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*. Vol. 6, Nº 3, 729-745 (http://www.saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen6/ART14_Vol6_N3.pdf)

BECERRA, C., GRAS, A., MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (2012). Effects of a problema-based structure of Physics contents on conceptual learning and the ability to solve problems. *International Journal of Science Education*. 34, 1235-1253.

DUARTE, V. 1996, *Modellus*, <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/>, Universitat de Lisboa

FURIÓ, C. 2001, La enseñanza-aprendizaje de las ciencias como investigación: un modelo emergente. *Investigaciones en didáctica*, 15-42. J. Guisáosla (Ed.) UPV-EHU.

GIL, D. (1993) Contribución de la historia y la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo en enseñanza/aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las ciencias*, 9(1), 69-77

GIL, D., y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. 1987, Los programas-guía de actividades: Una concreción del modelo constructivista del aprendizaje de las ciencias, *Investigación en la Escuela*, 3, 3-12

GIL, D., MARTÍNEZ TORREGROSA, J. 2006 ¿Cómo convertir los problemas de lápiz y papel en auténticos desafíos de interés? Cap. 5 del libro: *¿Cómo promover el interés por la cultura científica?* Libro digital gratuito editado por la UNESCO (<http://www.campusoei.org/decada/promocion08.pdf>)

GIL, D. y otros. 2005 ¿Cómo hacer posible el aprendizaje significativo de conceptos y teorías? (Capítulo 6 del libro ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Libro digital gratuito editado por la UNESCO) (<http://www.oei.es/decada/libro.htm>)

GUISASOLA, J., FURIÓ, C., CEBERIO, M. 2008. Science Education base for the developing guided research. En V. Thomse (ed.) *Science Education in Focus* 5, Nueva York: Novapublisher Inc.

MARTÍN, J., SOLBES, J. 2001. Diseño y evaluación de una propuesta de enseñanza del concepto de “campo” en física. *Enseñanza de las Ciencias*, 19, 3 (disponible la versión digital en: <http://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/viewArticle/21761/0>)

NEWTON, I. (1687): *Principios matemáticos de la Filosofía natural* [*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*]. Ediciones Altaya, S.A. Grandes Obras del Pensamiento, 21. (Barcelona, 1993) [Estudio preliminar y traducción Antonio Escohotado]

RAMAL, J.F, AGUILERA, F., 2001. De la acción a distancia al campo. Un programa-guía (de actividades) sobre electrostática. *Alambique*, 22, 107-114.

RAMÍREZ, J.L. y GIL, D. (1991), “La resolución de problemas de física y de química como investigación en la enseñanza media: un instrumento de cambio metodológico”. *Resúmenes de premios nacionales de investigación e innovación educativas 1990*, 206-247, Centro de publicaciones del Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.

ROJAS, W.A., BUSTAMANTE, A.J., 2013. Mecánica Clásica, una puerta para la enseñanza de la astronomía en la educación básica y media. *Latin American Journal of Physics Education*.7, 2. 294-297.

VERDÚ, R. y MARTÍNEZ TORREGROSA, 2005. *La estructura problematizada de los temas y cursos de física y química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje*. Tesis doctoral editada por la autora (en <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/2782>)