

# FÍSICA DE HOLLYWOOD

Arturo Quirantes

**GRAVITACIÓN**

**glyphos**  
Publicaciones

**NAU  
KAS**

## **7 - GRAVITACIÓN**

*- Echo de menos la gravedad. ¿Podrías tirar algo para que yo lo vea caer?*

*(Howard Wolowitz)*

### **TODO COMENZÓ CON KEPLER**

La Dinámica nos enseña que hay unos agentes llamados fuerzas, responsables de las variaciones en el movimiento de los cuerpos. La Tercera Ley de Newton, entre otras cosas, nos deja claro que todos los objetos que sienten una fuerza actúan simultáneamente como fuentes creadoras de fuerzas. A partir de ahí nos inventamos toda una panoplia de fuerzas: tensión en cuerdas, peso, manos que empujan o tiran. La verdad es que nadie sabe de dónde salen esas fuerzas, tan sólo que existen.

Llega la hora de desvelar la verdad. Resulta que existen cuatro grandes clases de fuerzas en el Universo, y solamente cuatro, que explican cualquier otro tipo de fuerzas imaginables. Hasta ahora no hemos tenido necesidad de acudir a ellas, y si la tensión en una cuerda es en última instancia expresión de las fuerzas electromagnéticas a nivel molecular, no importa en absoluto. Podemos ya comenzar el estudio de las grandes fuerzas de la naturaleza, concretamente la referente a gravitación.

Puede resultar extraño, pero en un universo cinematográfico con montones de películas hay pocos ejemplos buenos de gravitación. No me refiero a las naves espaciales, donde de modo casi invariable los tripulantes disfrutan de gravedad similar a la terrestre. Mucho me temo que esa es una batalla que los físicos hemos perdido hace tiempo (junto con la de los ruidos en el espacio), pero verá usted, si me dicen que en el futuro se han desarrollado dispositivos de gravedad simulada yo estoy dispuesto a aceptarlo sin más. Los fallos a que me refiero tratan de trayectorias, órbitas, cosas de ese tipo.

Desde que Johannes Kepler expresó sus tres leyes para describir el movimiento de los planetas alrededor del sol, sabemos que dicho movimiento es de tipo elíptico. Los planetas siguen órbitas en forma de elipse, que podemos describir a los alumnos como una variante extendida de una circunferencia con algunas diferencias: en lugar de que los puntos de la curva están a la misma distancia del centro, ahora consideramos como

constante la suma de las distancia a dos puntos llamados focos, y en lugar de radio tenemos semiejes mayor y menor.

En la película *Impact* (2008) tenemos un ejemplo casi bueno de órbita elíptica. El argumento va del típico choque interestelar pero con una variante: es la Luna la que recibe el impacto, no la Tierra. Aun así la humanidad está en peligro debido a las perturbaciones sobre las mareas y los objetos en la superficie terrestre, por no hablar de pánico mundial, familias divididas y demás desastres habituales. Mientras los científicos analizan la nueva órbita lunar, uno de ellos explica cómo la Luna sigue una órbita elíptica estrecha. Aparece la inevitable simulación en pantalla, y en ella vemos una curva elíptica incorrecta.

¿Por qué incorrecta? Porque la Tierra está en el centro geométrico de la elipse. Kepler nos dijo hace más de tres siglos que la Tierra debe estar en uno de los focos de la elipse, no en el centro. Cuando la elipse es muy poco excéntrica sus dos focos se encuentran muy cerca, y si ambos coincidiesen se convertiría en una circunferencia. En el caso de la Luna, ahora mismo hace una órbita elíptica muy poco excéntrica, casi circular. En esas condiciones, la posición del centro de la elipse y la de los focos casi coincide. Eso no sucede en una órbita altamente elíptica, como la de la mayoría de los cometas o la de la trayectoria lunar en *Impact*.

En realidad la primera ley de Kepler es incompleta, toda vez que solamente se refiere a cuerpos que siguen órbitas cerradas. La Ley de Newton de Gravitación Universal describe tres tipos de trayectorias: elipses, parábolas e hipérbolas; sólo la primera corresponde a una órbita que se repite. Cuando los astrofísicos descubren un nuevo cuerpo en vuelo libre dentro de nuestro Sistema Solar, digamos un cometa, el análisis de su órbita les indica rápidamente si volverá alguna vez o no.

Podemos verlo en la película *Ultimátum a la Tierra* (2008). Nuevamente tenemos al equipo de científicos rastreando un objeto potencialmente peligroso. Veamos el análisis preliminar:

*"El objeto 07/493 fue divisado más allá de la órbita de Júpiter por el programa Spaceguard. Nos llamó la atención porque no se desplazaba en una elipse asteroidal, más bien trazaba una órbita hiperbólica para atravesar nuestro Sistema Solar... pronto se descubrió que no seguía una trayectoria de caída libre gravitacional."*

¿Tiene sentido todo esto? En parte sí. Aunque no existe un programa llamado Spaceguard, eso no significa que no pueda existir en ficción, y lo cierto es que se usa genéricamente el término Spaceguard ("vigilancia espacial") para describir programas

de observación y vigilancia en el espacio. Tampoco existe algo llamado "eclipse asteroidal," pero en cualquier caso es correcto que el objeto siga una trayectoria elíptica.

Sí es posible, por supuesto, que un objeto que entre en nuestro sistema planetario siga una órbita de tipo hiperbólico, de modo que punto a favor para la película, aunque para ser correctos, no es un suceso tan extraordinario. La base de datos para cuerpos pequeños del JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) de la NASA lista a día de hoy 312 cometas con órbita hiperbólica, y otros 1.840 con órbita parabólica, así que no son objetos tan raros como para suscitar interés.

Si el objeto 07/493 es peculiar, será por otros motivos. En la película se indican tres. Primero: el objeto no sigue una "trayectoria de caída libre gravitacional", lo que significa que debe estar sujeto a otras fuerzas aparte de las de la gravedad. Segundo: el objeto caerá con exactitud increíble en el centro de Manhattan, que ya es casualidad. Y tercero: ningún objeto de esa clase jamás avistado en nuestro Sistema Solar tiene una velocidad tan enormemente elevada como la que dicen en la película: nada más y nada menos que treinta mil kilómetros por segundo, una décima parte de la velocidad de la luz.

## **¡ALINEARSE!**

Una vez descritas las tres leyes de Kepler, lo habitual es pasar a estudiar la Ley de Newton de Gravitación Universal. Escribimos la ecuación en la pizarra, vemos de qué factores depende y pasamos a poner ejemplos. ¿Pero por qué molestarnos si Robin Williams puede hacerlo por nosotros? A muchos compañeros (entre los que me incluyo) nos molesta el cliché de físico loco que Hollywood se empeña en perpetuar, y la película *Flubber* y *el Profesor Chiflado* (1997) es un caso típico. Yo estoy dispuesto a hacer la vista gorda porque el simpático profesor me proporciona una divertida descripción de la ley gravitatoria de Newton.

La escena no puede ser más tópica: el profesor con pájaros en la cabeza irrumpe en el aula y comienza a explicar la lección. Su saludo a los alumnos ("*buenos días, o tardes, dependiendo del caso*") es el primer indicativo de que ni él mismo tiene claro en qué planeta vive, una sospecha que se confirma cuando el profe avisa de que el faisán que hay encima de la mesa no le servirá a nadie para subir nota. Y es que se ha equivocado de clase; al menos, yo nunca he dado clase de Física en un aula donde todo

el mundo se encuentra muy ocupado pintando a una pareja de jóvenes casi desnudos (casi, que después de todo esta es una película Disney).

El profesor chiflado, en su mundo, comienza su clase:

*"La última vez hablábamos de la ley de la gravedad de Newton. Repasémoslo. Vemos que esa  $G$  es como la  $c$  de  $E=mc^2$ , es una constante en el Universo, hasta el punto en que algo pueda ser constante en el Universo."*

La  $G$  a la que alude el profesor Brainard es, por supuesto, la que conocemos con el nombre de constante de gravitación universal. Como todos sabemos y nuestro simpático profe nos explica:

*"[ $G$ ] Nos dice que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa."*

Es decir, Fuerza = algo  $\cdot$  producto de las masas / distancia al cuadrado. Ese "algo" es la constante  $G$ , que tiene que tener dimensiones y unidades; dimensiones porque el producto de masas dividido por una longitud al cuadrado no es una fuerza, y unidades porque queremos obtener Newtons cuando expresemos las masas en kilogramos y la distancia en metros.

En este punto lo natural es tomar un cuerpo con gran masa, digamos la Luna o un planeta, y hacer cálculos. Pero el profesor chiflado es más original que eso:

*"Un ejemplo sería ... llamemos a nuestro hombre desnudo  $m_1$  y a la dama,  $m_2$ . Según esta fórmula, su atracción les llevaría a reducir la distancia a cero. ¿Por qué no lo hacen?"*

En este momento las risas y cuchicheos de mis alumnos me dejan claro que están pensando en otro tipo de atracción no gravitatoria. Aun así, aprovechemos el ejemplo de la pareja desnuda. Podemos suponer una masa típica de 80 kilogramos para el chico y 50 para la chica. Si sus centros de masa se encuentran a metro y medio de distancia, la ley de gravitación de Newton nos da una fuerza atractiva de  $1,2 \cdot 10^{-7}$  Newtons. Para dar una idea de lo pequeña que es esa cantidad, representa el peso sobre la superficie terrestre de la dosis diaria recomendada de vitamina B3. Curiosamente, se trata de casi exactamente la misma fuerza ejercida sobre una persona por el planeta Marte en su punto de máxima aproximación a la Tierra.

Esto nos sirve para desmitificar la creencia de la astrología, ya que con la fórmula de Newton en la mano podemos demostrar cómo el efecto gravitatorio de una mosca volando por el paritorio sería superior al producido por un planeta. No creo que

los astrólogos tengan ese tipo de efectos en cuenta, porque si lo hicieran tendrían que cerrar el negocio.

Eso también echa por tierra las películas del tipo "hay una alineación planetaria que va a destruir la Tierra," como por ejemplo *Lara Croft, Tomb Raider (2001)* o *Thor, El Mundo Oscuro (2013)*. Para empezar, es simplemente imposible que los planetas se alineen debido a sus posiciones en sus respectivas órbitas. Si acaso podrán ser vistos en una región del cielo más o menos amplia. Pero imaginemos, por puras ganas de argumentar, que así fuese y que nos unimos a la expedición de una bella arqueóloga para evitar el apocalipsis total.

Armados con una calculadora nos disponemos a evaluar la fuerza que ejercerán todos los planetas sobre un kilogramo de masa, suponiendo que éstos se encuentran a la distancia más corta posible de la Tierra. Los datos resultantes son tan pequeños que tenemos que darlos en milmillonésimas de Newton (nanonewtons). Aquí van:

<b>Cuerpo</b>	<b>Fuerza (*nN)</b>
Sol	5.900.000
Luna	38.600
Júpiter	320
Venus	190
Saturno	23
Marte	7
Mercurio	2,6
Urano	0,78
Neptuno	0,36
Plutón	0,000025

Como puede ver, la suma de las atracciones gravitatorias de todos los planetas combinados no llegan al 1,5% de la debida a la luna, y apenas es una diezmilésima parte de la atracción solar. De hecho, la distancia Tierra-Sol no es constante a lo largo del año, y esa diferencia hace que la fuerza gravitatoria entre el Sol y la Tierra varíe hasta en un 7%. ¿Quién necesita alineamientos planetarios cuando todo lo que necesitamos es esperar al invierno?

Antes de que me regañe usted, lector, ya sé que Plutón no es un planeta, pero hace unos años todavía era considerado como tal y la película de Lara Croft de 2001 debía tenerlo en cuenta. Poco hubiera importado no hacerlo, ya que como puede ver su influencia gravitatoria sobre nosotros es insignificante. Para que pueda comparar, el peso de un kilogramo situado en la superficie terrestre, en las mismas unidades, sería una cantidad enorme: 10.000.000.000 de nanonewtons. ¿Mucho? Bueno, entonces le añadiré el peso de otros cuerpos más pequeños:

<b>Cuerpo</b>	<b>Peso (*10<sup>9</sup>N)</b>
Mosca	1.000.000
Mosquito	100.000
Glóbulo rojo	1
Bacteria	0,01

La cuestión es que, incluso si todos los planetas estuviesen alineados, la fuerza gravitatoria sería tan sólo un poco mayor que la que ejerce el planeta Júpiter por sí sólo. Más absurdo aún resulta este hecho: según la tabla, los dos planetas con mayor influencia gravitatoria sobre nosotros serían Júpiter y Venus, pero en caso de alineación planetaria perfecta ambos planetas tirarían de la Tierra en sentidos opuestos. ¡Sus fuerzas gravitatorias se restarían en lugar de sumarse!

El cliché de los alineamientos planetarios es habitual en el cine de serie B. También se ha extendido a otras ramas del cine y la televisión en forma modificada. *2012 (2009)* tiene como argumento un alineamiento entre la Tierra, el Sol y el centro de la Vía Láctea, supuestamente predicho por los antiguos mayas. El propio divulgador Neil deGrasse Tyson tuvo que salir al paso de los rumores, explicando que ese alineamiento se produce efectivamente el 21 de diciembre... todos los años.

Ni siquiera el cine de animación se escapa a los alineamientos. En el episodio de Bob Esponja *La Gran Ola*, los personajes de Fondo de Bikini descubren que los planetas se alinean una vez cada millón de años, lo que provoca la aparición de una ola gigantesca que hará las delicias de los surfistas. Y en la película de Disney *Hércules (1997)*, la alineación de seis planetas indicará al villano de turno la ubicación de los titanes, a quienes desea liberar para derrotar a Zeus y conquistar el Olimpo.

Si es usted fan de vin Diesel puede que haya visto *Pitch Black (2000)*. La tripulación de una nave sufre un accidente y acaba estrellándose en un planeta olvidado,

donde la luz de dos soles lo mantienen en un día permanente. Mientras intentan hacer las consabidas reparaciones para salir de allí, descubren que una vez cada 22 años los planetas y los soles se alinean de tal forma que el planeta se sumerge en oscuridad. Salvando las distancias, encuentro que *Pitch Black* contiene ciertas similitudes con *Cae la Noche*, un relato de 1941 escrito por el maestro de la ciencia-ficción Isaac Asimov. El argumento es muy distinto, por supuesto, pero en ambos casos tenemos un raro período de oscuridad, y cuando eso sucede... bueno, digamos que no querrá usted quedarse en el planeta.

Le resultará curioso si le digo que la NASA aprovechó un alineamiento planetario para una misión de exploración. En esa ocasión, sin embargo, no fue un "alineamiento" de película en el que todos los planetas forman una línea recta. Uno de los trucos para enviar una sonda a otro planeta consiste en lo que se llama asistencia gravitatoria: la nave pasa junto a un planeta y éste le impulsa en otra dirección. La NASA se dio cuenta de que, en los años setenta y ochenta, los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) se situarían en posiciones tales que una sonda podría ir "saltando" de uno a otro, recorriendo y explorando cuatro grandes planetas por el precio de uno.

Este concepto, llamado "Gran Tour," dio lugar a la misión dual Voyager. La sonda Voyager 1 visitó Júpiter y Saturno. Su compañera Voyager 2, además, examinó los sistemas planetarios de Urano y Neptuno. Incluso podría haber hecho, como dicen en lenguaje futbolístico, "una manita," pero en el último momento se decidió sacrificar la visita a Plutón para poder examinar mejor la luna Titán, en Saturno. Ambas sondas se encuentran ahora de camino al exterior de nuestro sistema solar, y a pesar de haber sido lanzadas en 1977 ¡aún funcionan!

## **LA GRAVEDAD EN EL CINE**

Estamos acostumbrados al tirón gravitatorio de nuestro planeta, y vayamos donde vayamos notamos que es prácticamente el mismo salvo por algunas inhomogeneidades (una montaña representa una acumulación local de masa, y la gravedad será allí algo menor), las fuerzas no inerciales (la fuerza centrífuga), y en menor medida la atracción que ejercen el Sol y la Luna sobre nosotros; pero en general,



todos los cuerpos que soltemos (en el vacío, por favor) caerán y acelerarán a razón de unos 9,8 metros por segundo cada segundo.

En otros planetas la situación es distinta. Por lo general, a mayor tamaño mayor fuerza gravitatoria en la superficie. Puede parecer contradictorio, toda vez que la fuerza de la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia. Sin embargo, si suponemos cuerpos con densidad similar, resulta que la masa es proporcional al volumen, y éste depende del cubo del radio. Eso significa que, en términos generales, la aceleración gravitatoria sobre la superficie de un cuerpo crece con la masa creciente.

¿Ejemplos? La Luna tiene un radio 3,67 veces inferior al de la Tierra, y su masa es 81 veces menor. Como resultado, la gravedad en la superficie lunar es  $81/3,67^2$  veces menor ( $1,62 \text{ m/s}^2$ ). En el extremo opuesto, el sol tiene un radio 109 veces mayor que el de la Tierra, y su masa es 333.000 veces mayor, de forma que en su superficie la fuerza de la gravedad es  $333.000/109^2 = 28$  veces mayor.

Viajar al sol es difícil, y no digo nada de aterrizar en él, pero ya hemos visto a hombres caminar sobre la superficie de nuestro satélite. Allí los astronautas, a pesar de llevar un pesado equipo, saltan y se mueven con mayor soltura que en la Tierra. Una serie de los años setenta llamada *Espacio 1999* mostraba el trabajo de los hombres y mujeres en la Base Lunar Alfa. Cuando se ponían los trajes espaciales y salían al exterior se movían de forma similar a los astronautas del proyecto Apolo, pero por alguna extraña razón volvían a estar sujetos a una gravedad similar a la terrestre cuando regresaban a la Base Alfa.

La razón, por supuesto, es presupuestaria: ¡filmar una serie de ciencia ficción en la Luna sale demasiado caro! Vale, es broma. Lo cierto es que simular la gravedad lunar es complicado, y puede que al espectador no le guste ver una película donde todo cae de forma lenta. Tampoco esperen ver escenas a gravedad reducida en otras películas, como por ejemplo *Moon* (2009), una película inglesa de bajo presupuesto que le recomiendo. Ni siquiera el clásico de Kubrick *2001 Odisea en el Espacio* (1968) se libra de este fallo, aunque en ciertos momentos usa el truco de caminar con pasos lentos y moverse despacio.

Eso fue también lo que hicieron en *Superman II* (1980). Cuando los malvados kryptonianos rebeldes llegan a la Luna y se encuentran con una expedición de astronautas humanos, éstos se mueven como si realmente se encontrasen en gravedad baja; los malos, por el contrario, andan como si la gravedad fuese la terrestre. Es un

error, aunque no tenemos más remedio que ser generosos porque también son capaces de hablar y respirar en gravedad cero, fallos mucho más gordos.

Tampoco en otros planetas nos vemos libres de errores. Películas como *Planeta Rojo* (2000), *Misión a Marte* (2000) o la más reciente *Marte* (2015) han intentado recrear un viaje a nuestro vecino Marte de la forma más realista posible, pero ninguna de ellas ha superado la prueba de la gravedad. Lo mismo sucede en *Atmósfera Cero* (1981), donde una colonia minera en el satélite Io debería estar sometida a una gravedad similar a la de nuestra luna. En cuanto a otros mundos imaginarios, mejor ni entremos al trapo. Todos los planetas en los que aterriza la tripulación de la *USS Enterprise*, los muchos mundos de la saga *Guerra de las Galaxias*, el asteroide de *Armageddon* (1998)... en general, todo el "planeta Hollywood" parece ser sinónimo de "más o menos como la Tierra."

Sea cual sea el caso, hay que recordar que la ley de Newton para la gravitación tiene un alcance infinito. Por muy lejos que nos encontremos de la Tierra la fuerza nunca será cero, así que cuando oiga en una película que alguien dice "ya nos hemos librado de la fuerza de atracción de la Tierra" no se lo crea. Debemos considerarlo como un abuso del lenguaje del tipo "el Sol sale por el Este."

Vamos con un ejemplo que contiene dos errores gravitacionales de ese tipo: *Space Cowboys* (2000). Cuando los protagonistas consiguen alejar el satélite y lanzarlo hacia la Luna, alguien avisa que "*ha abandonado nuestro campo gravitatorio.*" Estrictamente hablando, no es cierto, aunque podemos ser flexibles y considerarlo una forma de decir "no va a volver a caer a tierra." Lo cierto es que se dirige hacia la Luna, y aquí tenemos nuestro segundo error, ya que poco antes, al hacer los cálculos de combustible, uno de los astronautas dice que lo conseguirá porque solamente tiene que llegar a media distancia y la gravedad de la Luna se ocupará del resto. Esto sería cierto si los campos gravitatorios de la Tierra y de la Luna fuesen idénticos, cosa que no se cumple porque la Tierra tiene mucha más masa. Hay que alejarse hasta 9/10 de la distancia Tierra-Luna para que las fuerzas gravitatorias de ambos cuerpos se equilibren.

## **FUERZAS DE MAREA**

La Ley de Gravitación Universal de Newton es válida para objetos puntuales. Ciertamente ni la Luna ni la Tierra son puntuales, pero podemos suponer que sus masas

están concentradas en sendos puntos, y gracias a eso tendremos una descripción válida del movimiento de ambos cuerpos, sus períodos, velocidades, en principio todo lo que nos interesa.

Implícita está la suposición de que los cuerpos son sólidos perfectamente rígidos, y nada más lejos de la realidad. La Tierra, como otros planetas o satélites, está compuesta por capas de rocas y material fundido, y los cuerpos como el Sol o la Luna ejercen fuerzas distintas sobre las diferentes regiones de nuestro mundo. Para verlo con un ejemplo, va usted a imaginarse que se encuentra a bordo del mayor superpetrolero del mundo. Un millón de toneladas se desplaza suavemente por el mar en calma mientras usted se sirve la tercera taza de café para aguantar la guardia nocturna. Qué diferencia respecto a la calurosa jornada diurna que acaba de terminar.

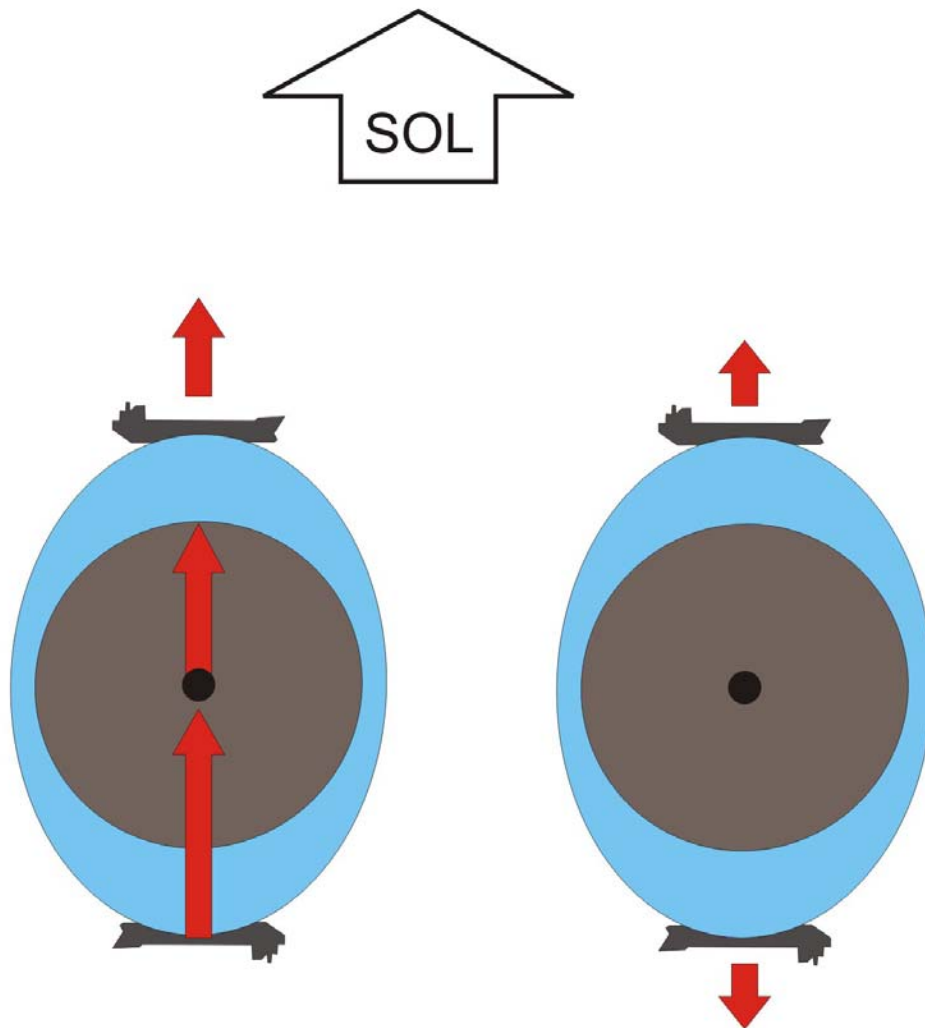
Agradecido de que en este momento la Tierra se interponga entre usted y el abrasador calor del Sol, cae usted en la cuenta de que ahora la atracción gravitatoria del Sol es menor precisamente porque se encuentra algo más lejos de nosotros. Durante el día sucede justo al revés: el Sol se encuentra sobre el cielo, algo más cerca, y su fuerza de atracción será mayor. ¿Significa eso que el barco pesa más durante el día, cuando el Sol lo atrae con mayor fuerza? ¿Habría diferencia si pesamos el barco de día o de noche? La respuesta a ambas esas preguntas es sí. El peso aparente del enorme buque varía en unos cincuenta kilogramos entre el día y la noche.

Pero espera, se dice usted a sí mismo, si eso le sucede al barco, ¿le pasará lo mismo a los demás cuerpos? ¿Qué hay del agua por donde navego ahora mismo? ¿Subirá y bajará según sea de día o de noche? Un momento, un momento, ¡ahora lo entiendo! ¡Por eso existen las mareas!

Efectivamente, capitán, tiene usted razón. La fuerza gravitatoria del Sol ejerce fuerzas de diferente intensidad sobre los diversos puntos de la Tierra, dando lugar al efecto de las llamadas fuerzas de marea. El océano tiende a elevarse y el nivel del mar a subir cuando el Sol está alto en el horizonte, lo que nos da marea alta. También el Sol atrae al centro del planeta con más fuerza que el agua en el lado opuesto, lo que hace que aparezca una segunda marea alta.

Este efecto de marea no depende de la fuerza gravitatoria en sí misma, sino de la diferencia entre las fuerzas de atracción en puntos opuestos de nuestro globo. Cuanto mayor sea esa diferencia mayores serán las mareas. Eso explica el hecho de que también la Luna provoque mareas. Como vimos en su momento, la fuerza con que la Luna atrae objetos terrestres es más de cien veces inferior a la fuerza debida al Sol; sin embargo, la

Luna se encuentra mucho más cerca, lo que hace que la fuerza varíe más rápidamente según nos alejemos, y eso hace que su efecto de marea sea comparable al del Sol.



*Fuerza gravitatoria. Izquierda: fuerza neta. Derecha: fuerza relativa (respecto a la que se ejerce en el centro de la Tierra)*

Si la Luna girase más cerca de la Tierra las fuerzas de marea sobre nuestro planeta se harían más grandes, y para una distancia inferior a una cantidad llamada límite de Roche esas fuerzas serían lo bastante intensas para desgajar nuestro planeta. Ese fue precisamente uno de los problemas que tuvieron los guionistas de la película *Interstellar* (2014). El director Christopher Nolan quería un planeta que se encontrase muy cerca de un agujero negro. El problema era que un agujero negro de masa solar tendría un límite de Roche tan pequeño que destrozaría cualquier cuerpo que orbitase en

sus cercanías. El planeta solamente sobreviviría si el agujero negro fuese de gran tamaño, con una masa estimada de más de cien millones de soles.

Incluso si la Luna de nuestro mundo se quedase donde está, su destrucción podría acarrear el fin de la Humanidad. Ese, al menos, es el argumento inicial de la película *Oblivion* (2013), donde la Tierra había sido arrasada décadas antes por una raza alienígena que destruyó la Luna. El propio protagonista nos lo narra al comienzo:

*"Sin la Luna, la Tierra se sumió en el caos. Los terremotos derruyeron las ciudades en horas. Los tsunamis arrasaron lo que quedaba en pie..."*

Al mirar al cielo, vemos en efecto cómo a la Luna le falta un gran trozo, y a su alrededor se extiende una nube de polvo y fragmentos menores. La escena es impresionante, pero por desgracia incorrecta, ya que si la destrucción de la Luna sucedió décadas atrás, ¿por qué esos fragmentos siguen en órbita lunar? A esas alturas, una de dos: o chocan entre ellos y caen de nuevo sobre nuestro satélite, o bien salen disparados para no volver más. En lo que respecta al gran fragmento lunar que queda, su propia gravedad lo aplastaría hasta darle una forma aproximadamente esférica. Realmente importa poco, ya que nada de eso produciría terremotos devastadores. La única forma que se me ocurre para acabar con la raza humana destruyendo la Luna es que todos los humanos fuesen hombres-lobos y enloqueciesen por la pérdida.

Romper una luna y esperar que los fragmentos se queden cerca es algo que aparece también en el universo de Star Trek. En la película *Star Trek VI, Aquel País Desconocido* (1991), una de las lunas de Klingon es destruida por una enorme explosión. Los escáneres de la Federación solamente consiguen detectar un gran trozo. Años después, en las películas *Star Trek* (2009) y *Star Trek: En la Oscuridad* (2012), los títulos finales de crédito desfilan tras varias escenas de mundos desgajados, muy similar al de *Oblivion*.

En cualquier caso, estas no son las únicas películas o series en las que aparece el tema de la destrucción lunar. Les dejo dos ejemplos más. En *La Máquina del Tiempo* (2002), el viajero temporal llega al año 2037 para encontrarse con un mundo en estado de caos debido a que la Luna ha sufrido un accidente y está desgajada en trozos. Saltamos hasta el año ochocientos mil y pico, y al mirar al cielo resulta que la Luna se encuentra en la misma situación que antes. No parece que la atracción gravitatoria entre los fragmentos haya actuado lo más mínimo.

En un registro muy distinto tenemos *The Big Bang Theory*. En el episodio *La Excitación Lunar* (3x23), los chicos se preparan para disparar un rayo láser a la Luna.

La idea es hacer que el haz rebote en los retrorreflectores dejados allí por las misiones Apolo y detectar el reflejo, pero Zack, el novio de la vecinita rubia, no es precisamente un genio y lo interpreta de otra forma:

*"Zack: Una pregunta, ¿cómo puedes saber que no explotará?"*

*Leonard: ¿El láser?"*

*Zack: ¡La Luna!"*

Al final, Leonard le explica que no pasará nada porque el láser está en posición de aturdir. La seguridad ante todo.

## **VIAJANDO POR EL ESPACIO INTERIOR**

El propio Newton pudo demostrar que su ley de gravitación, aplicable a partículas puntuales, es también válida en el caso de cuerpos esféricos homogéneos. En otros casos, como galaxias, asteroides irregulares, estrellas con estructura en capas, la situación se complica, pero no vamos a estudiarlos. Tengo una idea mejor en mente. En lugar de explorar las profundidades del espacio exterior a estilo Star Trek, ¿qué le parece una excursión al interior de la Tierra?

¿El interior? ¡Sí! Podemos hacerlo, al menos conceptualmente, y Hollywood ya se encargará de convertirlo en película más o menos realista. Resulta que la fuerza gravitatoria dentro de un planeta varía con la distancia de forma diferente a como lo hace en el exterior. Le propongo, amigo lector, un viaje imaginario al interior de la Tierra. En el centro exacto nuestro peso es cero, ya que las diferentes partes de la Tierra tiran de nosotros en todas direcciones, y si suponemos que existe simetría radial esos "tirones" acabarán anulándose entre sí.

Conforme nos dirigimos hacia el exterior las cosas cambian. La parte de la Tierra que dejamos atrás, a popa, será mayor que la que tenemos a proa, y el resultado neto es un tirón gravitatorio hacia el centro. Si suponemos una Tierra totalmente homogénea, puede demostrarse que la fuerza gravitatoria varía directamente con la distancia al centro. Es decir, a 2.000 kilómetros de distancia la fuerza será el doble que a 1.000 kilómetros, el cuádruple que a 500 kilómetros y así sucesivamente.

Esto sería un serio problema para los protagonistas de la novela *Viaje al centro de la Tierra* de Julio Verne, así como de sus adaptaciones cinematográficas. Las pasaré por alto y no las utilizaré como ejemplo porque es evidente que un viajero al centro del

planeta tendría problemas más graves que una mera disminución en la fuerza gravitatoria. Está claro que el "centro de la Tierra" a que se refiere Verne es tan sólo una región a cierta profundidad, muy alejada del centro geométrico de nuestro planeta.

¿Recuerdan *El Núcleo* (2003), esa película donde un grupo de científicos pretenden poner en marcha el núcleo interno de la Tierra? De entre la multitud de errores que no podemos atribuir a propiedades mágicas o a la habitual suspensión de incredulidad, podemos reseñar el peso de los tripulantes. Durante todo el viaje vemos a los protagonistas moverse y actuar como si la gravedad fuera la habitual, pero como hemos visto, la fuerza gravitatoria decrece con la distancia dentro de la Tierra.

Nuestros terranautas han llegado a su destino, una zona del núcleo externo a 2.200 kilómetros del centro. Si suponemos un radio planetario de 6.370 kilómetros, eso significa que la fuerza gravitatoria en esa capa es  $2.200/6.370 = 0,35$  veces la de la superficie. Puesto que el peso aparente de los viajeros se ha reducido a poco más de un tercio, deberían ir dando saltos por los pasillos y, en general, moviéndose en un ambiente de gravedad reducida. No lo hacen. Y no estamos en un ambiente futurista donde podamos inventarnos compensadores de gravedad, así que esto es un caso de tarjeta roja.

En la película *Total Recall* (2012), un túnel horadado de parte a parte de la Tierra une las regiones de Europa y Australia. Los viajeros se suben a una especie de ascensor gigante que cae por su propio peso y salen por el otro extremo a los pocos minutos. El tren, metro o como quiera usted llamarlo, recibe en la película el nombre de Catarata; en la versión original se tiene un juego de palabras, ya que el término *fall* (catarata) también tiene el significado de caída.

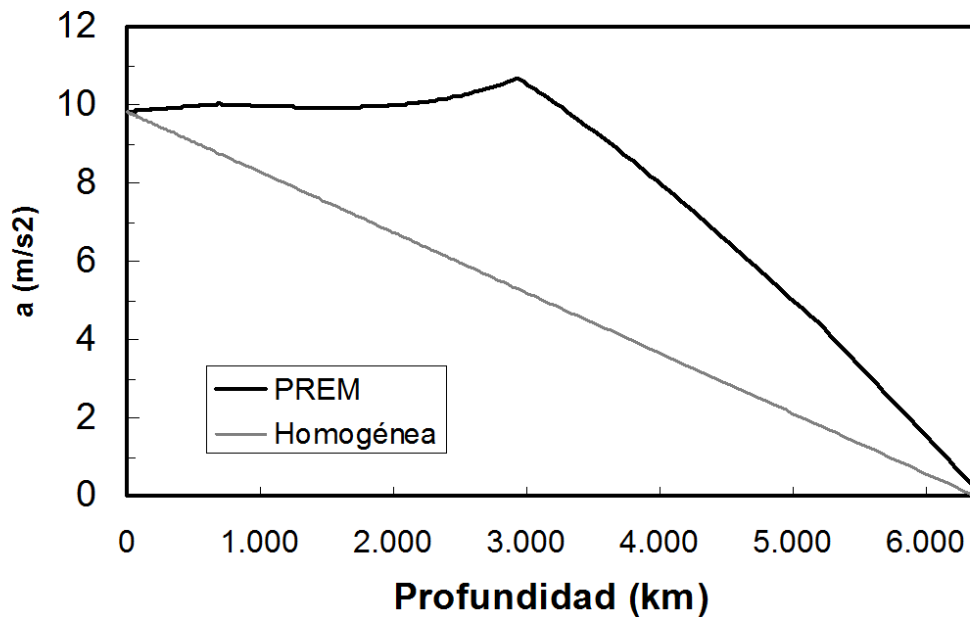
El concepto de la Catarata, o caída a través de un diámetro terrestre, es algo que ya de por sí impresiona, sobre todo cuando nos enteramos que el concepto viene de antiguo. Ya en 1680 Robert Hooke consideró el movimiento de un cuerpo en caída libre por un túnel que atravesase el centro de la Tierra. Según Hooke, dicho cuerpo efectuaría un movimiento armónico simple, con un período de algo más de ochenta minutos.

La película nos muestra material de filmación interesante, como la habitual animación por ordenador que va mostrando la posición del tren y la trayectoria que seguirá por el interior del planeta. También acierta en algunos aspectos, como cuando nos muestra escenas en gravedad cero conforme el tren se acerca al centro del planeta. A pesar de ello, hay diversos problemas de Física (no digo ya de ingeniería) que harían el concepto prácticamente inviable, al menos tal y como se plasma en la película.

Eso sí, el tema es apasionante desde el punto de vista físico y matemático. No suelo ser proclive a darme publicidad a mí mismo, pero si le interesa el concepto, yo escribí hace algún tiempo un libro titulado *La Física de la Catarata* (disponible en formato electrónico en Amazon) donde puede descubrir mucho más sobre el tema. Entre otras cosas, efectué cálculos realistas en los que se considera la estructura real de la Tierra. Como ya sabe, nuestro planeta no es homogéneo sino que consta de capas con diferente densidad, y eso afecta a los cálculos que hagamos.

Como ejemplo, puede ver aquí la dependencia de aceleración gravitatoria con la profundidad. Los datos se basan en el llamado modelo PREM (*Preliminary Reference Earth Model*), desarrollado en 1981 por A.M. Dziewonski y D.L. Anderson para modelar la estructura del interior de la Tierra, y se pueden comparar con los que tendríamos en el caso de que nuestro planeta fuese homogéneo.

### **Aceleración en el interior de la Tierra**



Como ven, la variación de la aceleración con la profundidad es algo distinta, ya que hasta llegar a la frontera manto-núcleo permanece casi igual a la de la superficie. El motivo es que el núcleo tiene mayor densidad que el manto o la corteza. La conclusión es que los terranautas de El Núcleo disfrutarán de una gravedad similar a la de la superficie durante gran parte de su viaje. Incluso al llegar a su punto de destino la gravedad habrá caído hasta el 76% de su valor inicial, no el 35% que dije antes.



¡Sorpresa! Se trata de uno de esos casos en los que simplificar demasiado nos lleva a resultados erróneos, y más de un compañero divulgador habrá criticado este error. Lo cierto es que, si la película ha acertado en este punto, debe ser más por casualidad que por otra cosa. Aun así, prefiero no ser exigente y si le parece a usted bien, amigo lector, anularemos la tarjeta roja y la dejaremos en amarilla.

### **EJEMPLO DE PELÍCULA: LA MUJER EN LA LUNA**

Volvamos al espacio exterior. Por lo general, cuando lanzamos un cuerpo hacia arriba suele volver a tierra; de ahí la expresión "todo lo que sube tiene que bajar." Eso es estrictamente cierto para aceleración gravitatoria constante, una aproximación útil al comenzar a estudiar la gravedad; pero tarde o temprano tenemos que tener en cuenta que la fuerza gravitatoria disminuye con el cuadrado de la distancia, y en ese caso las cosas cambian. Puede demostrarse que hay una velocidad inicial mínima (llamada velocidad de escape) a partir de la cual un objeto no volverá a caer. Esa velocidad depende de la masa del planeta y de su radio, según la expresión  $v=(2GM/R)^{1/2}$ . Para la superficie terrestre, el valor de la velocidad de escape es de unos 11.200 metros por segundo (unos 40.000 kilómetros por hora).

Uno de los primeros ejemplos de película que mencionan la velocidad de escape es el clásico de Fritz Lang *La Mujer en la Luna* (1929), una película vanguardista y adelantada a su tiempo. Fue la primera en la que un cohete era lanzado al espacio tras la habitual cuenta atrás 5,4,3,2,1... una tradición que fue copiada décadas más tarde por la NASA y demás agencias espaciales. Uno de los datos que se mencionan es la velocidad que debe alcanzar el cohete: 11.200 metros por segundo. No en vano la película contó con el asesoramiento del ingeniero y pionero en cohetes Hermann Oberth, pero la verdad es que los cálculos son sencillos. La propia obra de Julio Verne *De la Tierra a la Luna* menciona una velocidad de 12.000 yardas (casi 11.000 metros) por segundo.

La velocidad de escape en la Luna es inferior a la de la Tierra por la misma razón por la que la aceleración en su superficie es menor. Gracias a ello los astronautas del proyecto Apolo pudieron despegar de la Luna con un cohete mucho más pequeño que el que despegó de Cabo Cañaveral en la Tierra. Como ya vimos, cuanto mayor sea la masa del cuerpo tanto más aumenta la intensidad de su campo gravitatorio. La

velocidad de escape es más alta en Júpiter, y más alta aún en el Sol, y más alta todavía en una estrella supergigante.

*La Mujer en la Luna* es una obra precursora en muchos aspectos, y como cinéfilo se la recomiendo. No es habitual ver películas ambientadas en el espacio donde los protagonistas son alemanes y los malos malísimos resultan ser norteamericanos. (ups, spoiler). Tampoco es que la superficie lunar sea tal como allí se muestra, pero le aseguro que eso no le quita interés.

© 2016 Arturo Quirantes Sierra

Capítulo 7 autorizado para su lectura con fines no lucrativos

*“Física de Hollywood” está disponible en Glyphos:*

<http://glyphos.net/divulgacion-cientifica/fisica-de-hollywood/>

[http://elprofedefisica.es/libro\\_fdh.htm](http://elprofedefisica.es/libro_fdh.htm)