

Capítulo 5

La teoría de la gravitación

Contenido:

Movimientos planetarios
Leyes de Kepler
Desarrollo de la dinámica
Ley de la gravitación de Newton
Gravitación universal
El experimento de Cavendish
¿Qué es la gravedad?
Gravedad y relatividad

Movimientos planetarios

En este capítulo discutiremos una de las generalizaciones de mayor alcance hechas por la mente humana. Aunque estamos admirando la mente humana, deberíamos dedicar algún tiempo a reverenciar a una *naturaleza* que pudo seguir con tal perfección y generalidad un principio tan elegantemente simple como la ley de la gravitación. ¿Cuál es esta ley de la gravitación? Se trata de que cualquier objeto en el universo atrae a cualquier otro objeto con una fuerza que para dos cuerpos cualesquiera es proporcional a la masa de cada uno de ellos y varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. Este enunciado puede expresarse matemáticamente mediante la ecuación

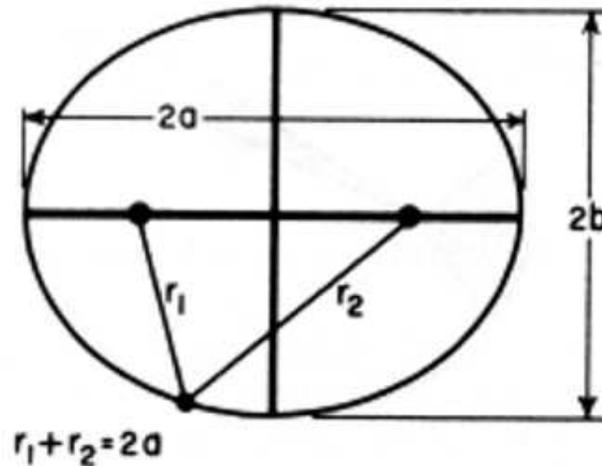
$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

(5.1)

Si a esto añadimos el hecho de que un objeto responde a una fuerza acelerándose en la dirección de la fuerza en una cantidad que es inversamente proporcional a la masa del objeto, habremos dicho todo lo necesario para que un matemático con suficiente habilidad pueda deducir luego todas las consecuencias de estos dos

principios. Sin embargo, puesto que se supone que ustedes todavía no tienen la habilidad suficiente, discutiremos las consecuencias con más detalle, y no nos limitaremos a dejarles sólo con estos dos principios desnudos. Relataremos brevemente la historia del descubrimiento de la ley de la gravitación y discutiremos algunas de sus consecuencias, sus efectos en la historia, los misterios que entraña una ley semejante y algunos refinamientos de la ley hechos por Einstein; discutiremos también las relaciones entre esta ley y las otras leyes de la física. Todo esto no puede hacerse en un capítulo, sino que estos temas serán tratados a su debido tiempo en capítulos posteriores.

La historia empieza con los antiguos observando los movimientos de los planetas entre las estrellas, y deduciendo finalmente que aquéllos daban vueltas alrededor del Sol, un hecho que fue redescubierto más tarde por Copérnico. Para descubrir *cómo* se mueven exactamente los planetas alrededor del Sol, y con *qué movimiento* exacto, se necesitó algo más de trabajo. A comienzos del siglo XV había grandes debates sobre si realmente giraban alrededor del Sol o no. Tycho Brahe tuvo una idea diferente de cualquier cosa propuesta por los antiguos: su idea era que estos debates acerca de la naturaleza de los movimientos planetarios se resolverían mejor si se midiesen con suficiente precisión las posiciones reales de los planetas en el cielo. Si las medidas mostraran exactamente cómo se movían los planetas, entonces quizá sería posible establecer un punto de vista u otro. Esta fue una idea espectacular: que para descubrir algo es preferible realizar algunos experimentos cuidadosos antes que desarrollar profundos argumentos filosóficos. Siguiendo esta idea, Tycho Brahe estudió las posiciones de los planetas durante muchos años en su observatorio de la isla de Hven, cerca de Copenhague. Construyó tablas astronómicas voluminosas que luego fueron estudiadas por el matemático Kepler, tras la muerte de Tycho. A partir de estos datos, Kepler descubrió algunas relaciones muy bellas y notables, aunque sencillas, acerca del movimiento planetario.



5.2 Una elipse.

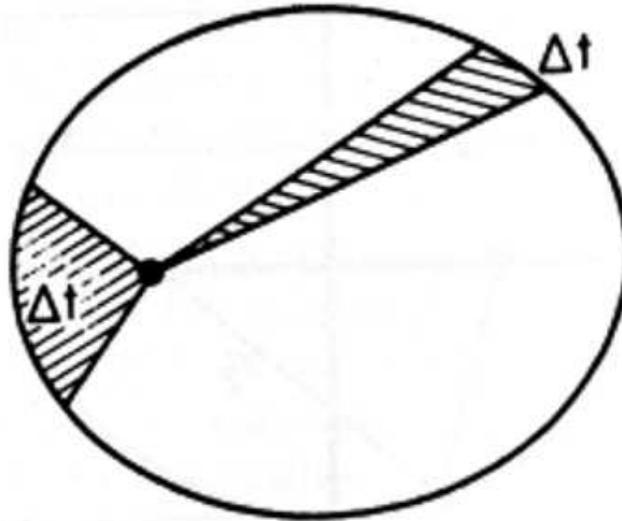
Leyes de Kepler

En primer lugar, Kepler descubrió que cada planeta se mueve alrededor del Sol siguiendo una curva denominada *elipse*, con el Sol en uno de los focos de dicha elipse. Una elipse no es exactamente un óvalo, sino que es una curva muy concreta y precisa que puede obtenerse utilizando dos tachuelas, una en cada foco, un lazo de cuerda y un lápiz; de forma más matemática, es el lugar geométrico de los puntos tales que la suma de sus distancias a dos puntos fijos (los focos) es constante. O, si ustedes quieren, es un círculo en escorzo (5.2).

La segunda observación de Kepler era que los planetas no se mueven alrededor del Sol a una velocidad uniforme, sino que se mueven más deprisa cuando están más próximos al Sol y más despacio cuando están más alejados del Sol, precisamente de la forma siguiente: supongamos que se observa un planeta en dos instantes sucesivos, digamos con un intervalo de una semana, y que se traza el radio vector⁵ hasta el planeta para cada posición observada. El arco orbital recorrido por el planeta durante la semana y los dos radios vectores limitan una cierta área plana, el área rayada que se muestra en la figura 5.3. Si se hacen otras dos observaciones similares con un intervalo de una semana en una parte de la órbita más alejada del Sol (donde el planeta se mueve más lentamente), el área acotada de este mismo modo tiene exactamente el mismo valor que en el primer caso. Así, de acuerdo con

⁵ Un radio vector es una recta trazada desde el Sol a un punto de la órbita del planeta.

la segunda ley, la velocidad orbital de cada planeta es tal que el radio vector «barre» áreas iguales en tiempos iguales.



5.3 Ley de las áreas de Kepler.

Finalmente, una tercera ley fue descubierta por Kepler mucho más tarde; esta ley es de una categoría diferente de las otras dos, porque no trata con un solo planeta sino que relaciona un planeta con otro diferente. Esta ley dice que cuando se comparan los periodos orbitales y los tamaños de las órbitas de dos planetas cualesquiera, los periodos son proporcionales a la potencia $3/2$ del tamaño de la órbita. En este enunciado el periodo es el tiempo que necesita un planeta para recorrer completamente su órbita, y el tamaño se mide por la longitud del diámetro mayor de la órbita elíptica, conocido técnicamente como eje mayor. De forma más sencilla, si los planetas siguieran trayectorias circulares, que es lo que hacen aproximadamente, el tiempo requerido para recorrer el círculo sería proporcional a la potencia $3/2$ del diámetro (o del radio). Así pues, las tres leyes de Kepler son:

- I. Cada planeta se mueve alrededor del Sol en una elipse, con el Sol en uno de los focos.
- II. El radio vector desde el Sol al planeta barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.

III. Los cuadrados de los periodos de dos planetas cualesquiera son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de sus respectivas órbitas: $T \propto a^{3/2}$.

Desarrollo de la dinámica

Mientras Kepler estaba descubriendo estas leyes, Galileo estaba estudiando las leyes del movimiento. El problema era: ¿qué hace que los planetas den vueltas? (En aquellos días, una de las teorías propuestas decía que los planetas daban vueltas porque en su parte posterior había ángeles invisibles que batían sus alas y empujaban los planetas hacia adelante. ¡Verán ustedes que esta teoría se ha modificado ahora! Resulta que para mantener los planetas dando vueltas, los ángeles invisibles deben volar en una dirección diferente y no tienen alas. ¡Por lo demás, es una teoría en cierto modo similar!) Galileo descubrió un hecho muy notable acerca del movimiento que resultó esencial para comprender dichas leyes. Se trata del principio de *inercia*: si algo se está moviendo, sin que nadie lo toque y completamente imperturbado, continuará moviéndose para siempre, manteniendo una velocidad uniforme en línea recta. (¿Por qué sigue moviéndose? No lo sabemos, pero así es.)

Newton modificó esta idea al decir que la única forma de cambiar el movimiento de un cuerpo es aplicando una *fuerza*. Si el cuerpo se acelera es que ha sido aplicada una fuerza *en la dirección del movimiento*. Por otra parte, si su movimiento cambia hacia una nueva *dirección*, ello implica que una fuerza ha sido aplicada *transversalmente*. Newton añadió así la idea de que una fuerza es necesaria para cambiar la velocidad *o la dirección* del movimiento de un cuerpo. Por ejemplo, si una piedra está atada en el extremo de una cuerda y se la hace dar vueltas en un círculo, se necesita una fuerza para mantenerla en dicho círculo. Tenemos que *tirar* de la cuerda. De hecho, la ley consiste en que la aceleración producida por la fuerza es inversamente proporcional a la masa, o que la fuerza es proporcional a la masa multiplicada por la aceleración. Cuanto más masiva es una cosa, más intensa es la fuerza necesaria para producir una aceleración dada. (La masa puede medirse colocando otras piedras en el extremo de la misma cuerda y haciéndolas girar en el mismo círculo y con la misma velocidad. De esta forma se encuentra que se

requiere más o menos fuerza: cuanto más masivo es el objeto, más fuerza se requiere.) La idea brillante que resulta de estas consideraciones es que no se necesita ninguna fuerza *tangencial* para mantener un planeta en su órbita (los ángeles no tienen que volar tangencialmente) porque el planeta seguiría en dicha dirección por sí mismo. Si no hubiera nada en absoluto que lo perturbara, el planeta seguiría en una *línea recta*. Pero el movimiento real se desvía de la línea que hubiera seguido el cuerpo si no hubiera fuerza, y la desviación se produce esencialmente *a ángulos rectos* respecto al movimiento, no en la dirección del movimiento. En otras palabras, debido al principio de inercia, la fuerza necesaria para controlar el movimiento de un planeta alrededor del Sol no es una fuerza *alrededor* del Sol sino *hacia* el Sol. (Si hay una fuerza hacia el Sol, ¡el Sol podría ser el ángel, por supuesto!)

Ley de la gravitación de Newton

Partiendo de su mejor comprensión de la teoría del movimiento, Newton se dio cuenta de que *el Sol* podría ser la sede u organización de fuerzas que gobiernan el movimiento de los planetas. Newton se demostró para sí (y quizá seremos capaces de demostrarlo pronto) que el hecho mismo de que áreas iguales son barridas en tiempos iguales es un indicador preciso de la proposición según la cual todas las desviaciones son exactamente *radiales*: que la ley de las áreas es una consecuencia directa de la idea de que todas las fuerzas están dirigidas exactamente *hacia el Sol*. Seguidamente, analizando la tercera ley de Kepler es posible demostrar que cuanto más lejos está el planeta, más débiles son las fuerzas. Si se comparan dos planetas a distancias diferentes del Sol, el análisis muestra que las fuerzas son inversamente proporcionales a los cuadrados de las distancias respectivas. Combinando ambas leyes, Newton concluyó que debe haber una fuerza, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, dirigida a lo largo de la línea que une los dos objetos. Siendo un hombre con una gran preferencia por las generalizaciones, Newton supuso, por supuesto, que esta relación era válida para el caso más general y no sólo para el Sol que mantiene a los planetas. Era ya conocido, por ejemplo, que el planeta Júpiter tiene lunas que giran a su alrededor como la Luna de la Tierra gira alrededor de la Tierra, y Newton dio por cierto que cada planeta mantiene a sus

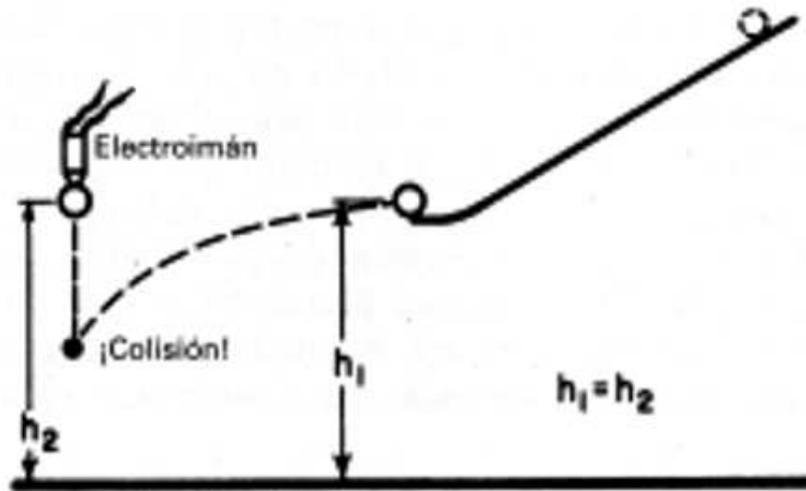
lunas con una fuerza. El conocía ya la fuerza que nos mantiene sobre la Tierra, de modo que propuso que esta era una fuerza *universal: que todas las cosas atraen a todas las demás*.

El problema siguiente era si la atracción de la Tierra sobre sus habitantes era la «misma» que su atracción sobre la Luna, es decir, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Si un objeto en la superficie de la Tierra cae 4,9 metros durante el primer segundo una vez que ha sido liberado partiendo del reposo, ¿cuánto caerá la Luna en el mismo tiempo? Podríamos decir que la Luna no cae en absoluto. Pero si no hubiera ninguna fuerza sobre la Luna, ella seguiría en línea recta, mientras que de hecho sigue en un círculo, de modo que realmente *cae* desde donde habría estado si no hubiera ninguna fuerza. A partir del radio de la órbita de la Luna (que es de aproximadamente 384.000 kilómetros) y el tiempo que necesita para dar una vuelta alrededor de la Tierra (aproximadamente 29 días) podemos calcular cuánto se mueve la Luna en su órbita en 1 segundo, y podemos calcular entonces cuánto cae en un segundo⁶. Esta distancia resulta ser aproximadamente 4/3 mm por segundo. Esto encaja muy bien con la ley de la inversa del cuadrado, porque el radio de la Tierra es de unos 6.400 kilómetros, y si algo que está a 6.400 kilómetros del centro de la Tierra cae 4,9 metros en un segundo, algo que esté a 384.000 kilómetros, o 60 veces más, caería sólo 1/3.600 de 4,9 metros, que también es aproximadamente 4/3 de milímetro. Deseando poner a prueba esta teoría de la gravitación por cálculos similares, Newton hizo sus cálculos con mucho cuidado y encontró una discrepancia tan grande que consideró que la teoría era contradicha por los hechos, y no publicó sus resultados. Seis años más tarde, una nueva medida del tamaño de la Tierra demostró que los astrónomos habían estado utilizando una distancia incorrecta a la Luna. Cuando Newton oyó esto, hizo de nuevo el cálculo, con las cifras corregidas, y encajó a la perfección.

Esta idea de que la Luna «cae» es algo confusa, porque, como ustedes ven, ella no *se acerca*. La idea es suficientemente interesante para merecer una explicación adicional: la Luna cae en el sentido de que *se aparta de la línea recta que hubiera seguido de no haber fuerzas*. Veamos un ejemplo en la superficie de la Tierra. Un

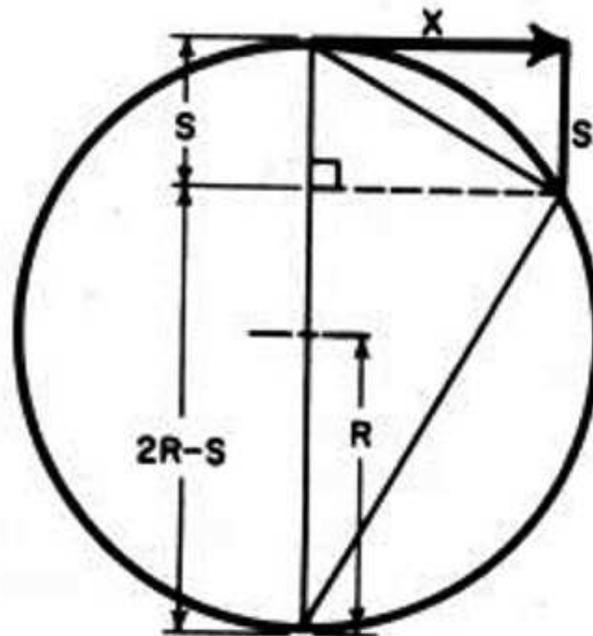
⁶ Es decir, cuánto cae el círculo de la órbita de la Luna por debajo de la tangente; a la órbita en el punto donde estaba la Luna un segundo antes

objeto liberado cerca de la superficie de la Tierra caerá 4,9 metros en el primer segundo.



5.4 Aparato para demostrar la independencia de los movimientos vertical y horizontal.

Un objeto disparado *horizontalmente* también caerá 4,9 metros; incluso si se está moviendo horizontalmente, aún cae los mismos 4,9 metros en el mismo tiempo. La figura 5.4 muestra un aparato que lo pone de manifiesto. En el carril horizontal hay una bola que va a ser impulsada hacia adelante a una pequeña distancia. A la misma altura hay una bola que va a caer verticalmente, y hay un interruptor eléctrico dispuesto de modo que en el momento en que la primera bola deja el carril, se libera la segunda bola. El hecho de que han descendido la misma altura en el mismo tiempo queda de manifiesto porque colisionan en el aire. Un objeto como una bala, disparada horizontalmente, podría recorrer un largo camino en un segundo quizá 700 metros-, pero seguiría cayendo 4,9 metros si está disparada horizontalmente. ¿Qué sucede si disparamos una bala con una velocidad cada vez mayor? No olvidemos que la superficie de la Tierra es curva. Si disparamos con velocidad suficiente, entonces después de haber caído 4,9 metros puede estar precisamente a la misma altura del suelo que estaba antes. ¿Cómo puede ser eso? Sigue cayendo, pero la Tierra se curva por debajo de ella, de modo que cae «alrededor» de la Tierra. La cuestión es: ¿cuánto tiene que recorrer en un segundo para que la Tierra esté a 4,9 metros bajo el horizonte?



5.5 Aceleración hacia el centro de una trayectoria circular. De la geometría plana, $x/s = (2R - S)/x = 2R/x$, donde R es el radio de la Tierra, 6.400 kilómetros; x es la distancia «recorrida horizontalmente» en un segundo; y S es la distancia «caída» en un segundo (4,9 metros).

En la figura 5.5 vemos la Tierra con su radio de 6.400 kilómetros, y la trayectoria tangencial en línea recta que hubiera seguido la bala si no hubiera ninguna fuerza. Ahora bien, si utilizamos uno de esos maravillosos teoremas de la geometría, que dice que nuestra tangente es la media proporcional entre las dos partes en que una cuerda igual divide al diámetro, vemos que la distancia horizontal recorrida es la media proporcional entre los 4,9 metros (0,0049 kilómetros) caídos y los 12.800 kilómetros de diámetro de la Tierra. La raíz cuadrada de $0,0049 \times 12.800$ está muy cercana a 8 kilómetros. Entonces vemos que si la bala se mueve a 8 kilómetros por segundo, continuará cayendo hacia la Tierra a la misma velocidad de 4,9 metros cada segundo, pero nunca estará más cerca de la Tierra porque la Tierra sigue curvándose por debajo de ella. Así es como Gagarin se mantuvo en el espacio mientras viajó 40.000 kilómetros alrededor de la Tierra a aproximadamente 8 kilómetros por segundo. (Él necesitó un tiempo un poco mayor porque estaba un poco más alto.)

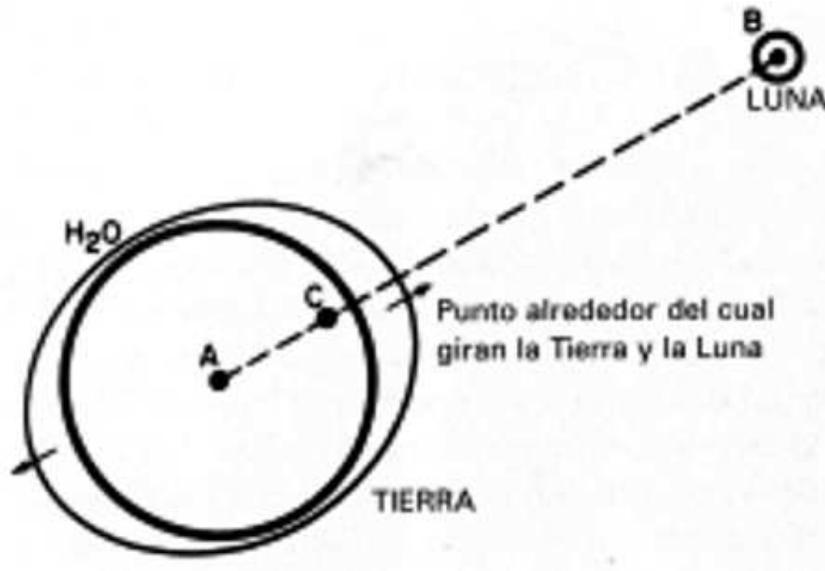
Cualquier gran descubrimiento de una nueva ley es útil sólo si podemos sacar más de lo que hemos introducido. Ahora bien, Newton *utilizó* la segunda y la tercera de las leyes de Kepler para deducir su ley de la gravitación. ¿Qué es lo que él *predijo*? En primer lugar, su análisis del movimiento de la Luna era una predicción porque relacionaba la caída de objetos en la superficie de la Tierra y la de la Luna. En segundo lugar, la pregunta es: *¿es la órbita una elipse?* Veremos en un capítulo posterior cómo es posible calcular exactamente el movimiento, y de hecho podemos probar que debería ser una elipse⁷, de modo que ningún hecho extra se necesita para explicar la *primera* ley de Kepler. Así es como Newton hizo su primera predicción poderosa.

La ley de la gravitación explica muchos fenómenos que no se entendían antes. Por ejemplo, la atracción de la Luna sobre la Tierra provoca las mareas, hasta entonces misteriosas. La Luna atrae el agua que hay debajo de ella y causa las mareas (había gente que habían pensado antes en eso, pero no eran tan inteligentes como Newton y por ello pensaban que debería haber sólo una marea cada día). El argumento era que la Luna atrae el agua que está debajo de ella, dando lugar a una marea alta y una marea baja; y puesto que la Tierra está girando alrededor de su eje bajo la Luna, esto hace que la marea en un lugar suba y baje cada 24 horas. En realidad, la marea sube y baja cada 12 horas. Otra escuela de pensamiento afirmaba que la marea alta debería producirse en el lado opuesto de la Tierra porque, razonaban ellos, la Luna atrae a la Tierra apartándola del agua! Ambas teorías son erróneas. Realmente funciona así: la atracción de la Luna hacia la Tierra y hacia el agua está «equilibrada» en el centro. Pero el agua que está más próxima a la Luna está más atraída que la media y el agua que está más alejada de la Luna es atraída *menos* que la media. Además, el agua puede fluir mientras que la Tierra es más rígida y no puede hacerlo. La imagen correcta es una combinación de estas dos cosas.

¿Qué entendemos por «equilibrada»? ¿Qué es lo que equilibra? Si la Luna atrae a toda la Tierra hacia ella, ¿por qué la Tierra no «sube» directamente hacia la Luna? Porque la Tierra hace el mismo truco que la Luna, da vueltas en un círculo alrededor de un punto imaginario que está en el interior de la Tierra pero no en su centro. La Luna tampoco da vueltas exactamente alrededor de la Tierra, sino que la Tierra y la

⁷ No daremos la demostración en este curso.

Luna giran alrededor de un punto central, cayendo cada una de ellas hacia este punto común, como se muestra en la figura 5.6.



5.6 El sistema Tierra-Luna, con mareas.

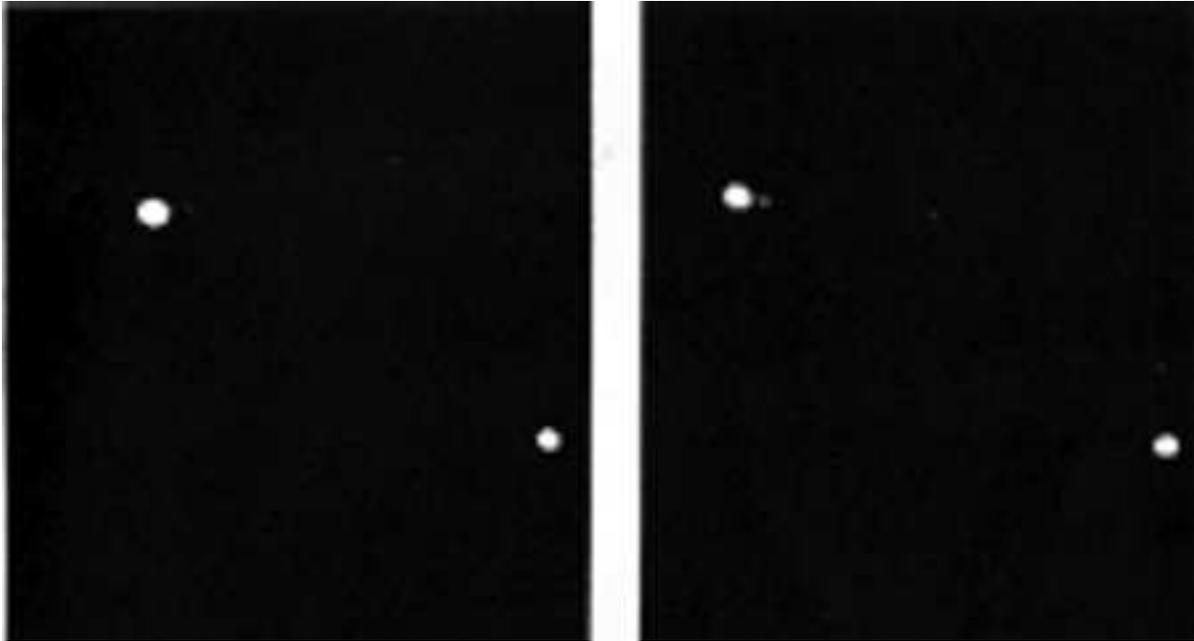
Este movimiento alrededor del centro común es el que equilibra la caída de cada una de ellas. Así pues, la Tierra tampoco sigue una línea recta; viaja en un círculo. El agua en el lado lejano está «desequilibrada» porque la atracción de la Luna allí es más débil que en el centro de la Tierra, donde justamente equilibra a la «fuerza centrífuga». El resultado de este desequilibrio es que el agua se eleva, alejándose del centro de la Tierra. En el lado próximo a la Luna, la atracción de ésta es más fuerte, y el desequilibrio está dirigido en dirección opuesta en el espacio, pero de nuevo *alejándose* del centro de la Tierra. El resultado neto es que tenemos *dos* abultamientos de marea.

Gravitación universal

¿Qué otra cosa podemos entender cuando entendemos la gravedad? Todo el mundo sabe que la Tierra es redonda. ¿Por qué la Tierra es redonda? Es fácil; es debido a la gravitación. Se puede entender que la Tierra es redonda simplemente porque cada cosa atrae a todas las demás, y así itiene que atraerse a sí misma entera todo lo que pueda! Si vamos un poco más lejos, la Tierra no es *exactamente* una esfera porque está girando sobre su eje y esto produce efectos centrífugos que tienden a

oponerse a la gravedad en la proximidad del ecuador. Resulta que la Tierra debería ser elipsoidal, e incluso obtenemos la forma correcta para el elipsoide. Podemos así deducir que el Sol, la Luna y la Tierra deberían ser (casi) esferas, solamente a partir de la ley de la gravitación.

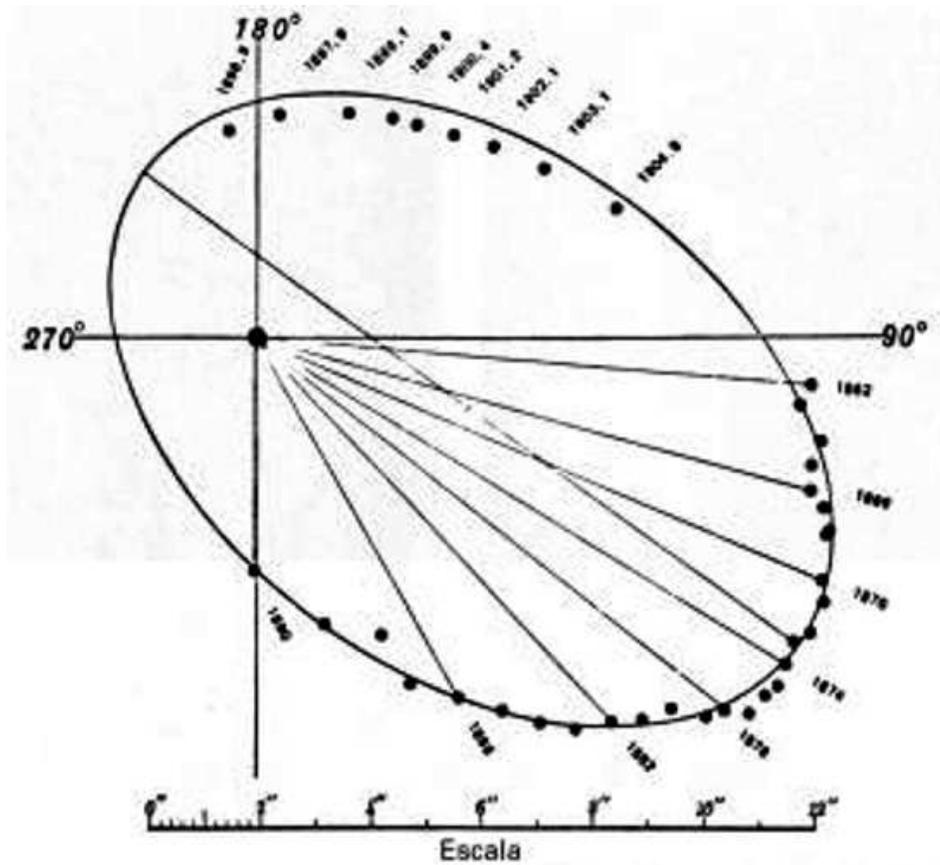
¿Qué otra cosa pueden hacer ustedes con la ley de la gravitación? Si miramos las lunas de Júpiter podemos entenderlo todo sobre la forma en que se mueven alrededor del planeta. Dicho sea de paso, hubo en tiempos una cierta dificultad con las lunas de Júpiter que vale la pena comentar. Dichos satélites fueron estudiados muy cuidadosamente por Roemer, quien notó que las lunas parecían a veces ir adelantadas respecto a su horario, y a veces retrasadas. (Podemos calcular sus horarios esperando un largo tiempo y midiendo cuánto tiempo se necesita en promedio para que las lunas den una vuelta.) Resulta que estaban *adelantadas* cuando Júpiter estaba particularmente *próximo* a la Tierra, y estaban *retrasadas* cuando Júpiter estaba más *alejado* de la Tierra. Esto hubiera sido algo muy difícil de explicar según la ley de la gravitación; hubiera sido, de hecho, la muerte de esta maravillosa teoría si no hubiera otra explicación. Basta que una ley no funcione tan sólo en *una situación* en donde debiera hacerlo para que sea sencillamente errónea. Pero la razón para esta discrepancia era muy simple y bella. Se necesita un pequeño intervalo para *ver* las lunas de Júpiter debido al tiempo que tarda la luz en viajar desde Júpiter hasta la Tierra. Cuando Júpiter está más cerca de la Tierra el tiempo es algo menor, y cuando está más alejado de la Tierra el tiempo es mayor. Esta es la razón de que las lunas parezcan estar, en promedio, un poco adelantadas o un poco retrasadas, dependiendo de si están más próximas o más alejadas de la Tierra. Este fenómeno demostró que la luz no viaja instantáneamente, y proporcionó la primera estimación de la velocidad de la luz. Esto sucedió en 1656. Si todos los planetas se empujan y se atraen, la fuerza que controla, digamos, el viaje de Júpiter alrededor del Sol no es solamente la fuerza del Sol; existe también una atracción de, digamos, Saturno. Esta fuerza no es realmente muy intensa, puesto que el Sol es mucho más masivo que Saturno, pero existe cierta atracción, de modo que la órbita de Júpiter no debería ser una elipse perfecta, y no lo es; se aparta de ella ligeramente y «oscila» alrededor de la órbita elíptica correcta.



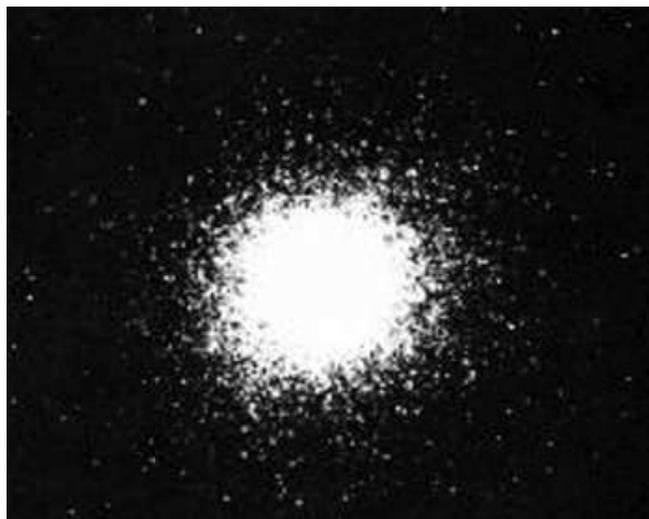
5.7 Un sistema de estrella doble.

Semejante movimiento es un poco más complicado. Se hicieron intentos de analizar los movimientos de Júpiter, Saturno y Urano basados en la ley de la gravitación. Se calcularon los efectos de cada uno de estos planetas sobre cada uno de los demás para ver si podían entenderse por completo las minúsculas desviaciones e irregularidades de dichos movimientos a partir de esta sola ley. Como por arte de magia, para Júpiter y Saturno, todo iba bien, pero Urano era «extraño». Se comportaba de una manera muy peculiar. No estaba viajando en una elipse exacta, pero eso era comprensible debido a las atracciones de Júpiter y Saturno. Pero incluso si se tenían en cuenta dichas atracciones, Urano aún no seguía la curva correcta, de modo que las leyes de la gravitación estaban en peligro de ser desbordadas, una posibilidad que no podía descartarse. Dos hombres, Adams y Leverrier, en Inglaterra y Francia, llegaron independientemente a otra posibilidad: quizá hubiera *otro* planeta, oscuro e invisible, que los hombres no habían visto. Este planeta, *N*, podría atraer a Urano. Ellos calcularon dónde tendría que estar semejante planeta para provocar las perturbaciones observadas. Enviaron mensajes a los respectivos observatorios, diciendo: «Señores, apunten su telescopio a tal y cual lugar, y ustedes verán un nuevo planeta». A menudo, el que se les preste o no atención depende de con quien estén ustedes trabajando. Prestaron atención a

Leverrier; miraron y ¡allí estaba el planeta *N* ! El otro observatorio se apresuró en mirar también en los días siguientes y también lo vio.

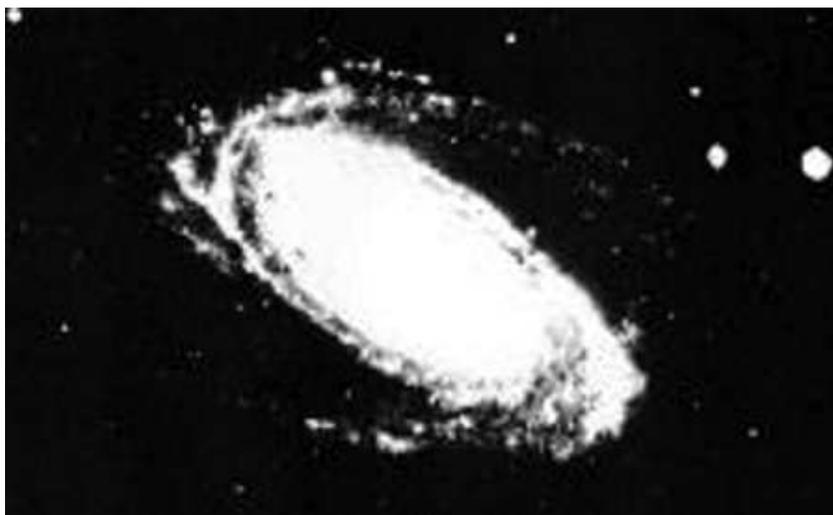


5.8 Órbita de Sirio B con respecto a Sirio A.



5.9 Un cúmulo globular de estrellas.

Este descubrimiento muestra que las leyes de Newton son absolutamente correctas en el Sistema Solar; pero ¿se extienden más allá de las distancias relativamente pequeñas que hay hasta los planetas más próximos? El primer test radica en la cuestión ¿se atraen las *estrellas entre sí*, igual que lo hacen los planetas? Tenemos evidencia precisa de que sí lo hacen en las *estrellas dobles*. La figura 5.7 muestra una estrella doble: dos estrellas muy próximas (hay también una tercera estrella en la imagen que nos permitirá saber que la fotografía no está invertida). Las estrellas se muestran también tal como aparecen varios años más tarde. Vemos que, con respecto a la estrella «fija», el eje que une el par ha rotado; es decir, las dos estrellas han girado cada una alrededor de la otra. ¿Rotan de acuerdo con las leyes de Newton? Medidas cuidadosas de las posiciones relativas de un sistema semejante de estrellas dobles se muestran en la figura 5.8. En ella vemos una bella elipse, con medidas que empiezan en 1862 y continúan hasta 1904 (en el momento actual deben haber girado otra vuelta). Todo coincide con las leyes de Newton, excepto que la estrella Sirio A *no está en el foco*. ¿A que podría deberse esto? Se debe a que el plano de la elipse no coincide con el «plano del cielo». No estamos mirando perpendicularmente a la órbita plana, y cuando una elipse se ve con cierta inclinación sigue siendo una elipse pero el foco ya no está en el mismo lugar. Así pues, podemos analizar estrellas dobles, moviéndose una alrededor de la otra, de acuerdo con los requisitos de la ley gravitatoria.

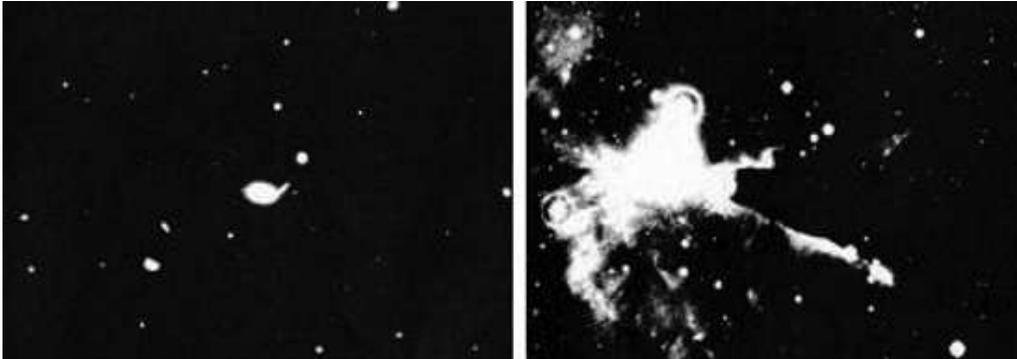


5.10. Una galaxia.

El hecho de que la ley de la gravitación es verdadera a distancias incluso mayores viene indicado en la figura 5.9. Si alguien no puede ver aquí la gravitación en acción, es que no tiene alma. Esta figura muestra una de las cosas más bellas que hay en el cielo: un cúmulo globular de estrellas. Todos los puntos son estrellas. Aunque se ven como si estuviesen sólidamente agrupados en el centro, eso es debido a la falta de precisión de nuestros instrumentos. En realidad, las distancias entre las estrellas incluso más próximas al centro son muy grandes y muy raramente colisionan. Hay más estrellas en el interior que en la región más externa, y a medida que nos movemos hacia afuera hay cada vez menos. Es obvio que hay una atracción entre estas estrellas. Está claro que la gravitación existe a estas dimensiones enormes, quizá 100.000 veces mayores que el tamaño del Sistema Solar. Vayamos ahora más lejos, y miremos una *galaxia completa*, mostrada en la figura 5.10. La forma de esta galaxia indica una tendencia obvia de su materia a aglomerarse. Por supuesto, no podemos demostrar que la ley aquí sea exactamente de la inversa del cuadrado, sino sólo que sigue habiendo una atracción a estas enormes dimensiones que mantiene unido el conjunto. Uno podría decir: «Bien, todo esto es muy ingenioso, pero ¿por qué no es simplemente una bola?». Porque está *girando* y tiene *momento angular* que no puede ceder cuando se contrae; debe contraerse fundamentalmente en un plano. (Dicho sea de paso, si ustedes están buscando un buen problema, los detalles exactos de cómo se forman los brazos y qué es lo que determina las formas de dichas galaxias todavía no han sido calculados.) Está claro, sin embargo, que la forma de la galaxia se debe a la gravitación incluso si las complejidades de su estructura no nos han permitido analizarla completamente por el momento. En una galaxia tenemos una escala de quizá 50.000 a 100.000 años-luz. La distancia de la Tierra al Sol es de $8 \frac{1}{3}$ minutos-luz, así que ustedes pueden ver qué grandes son estas dimensiones.

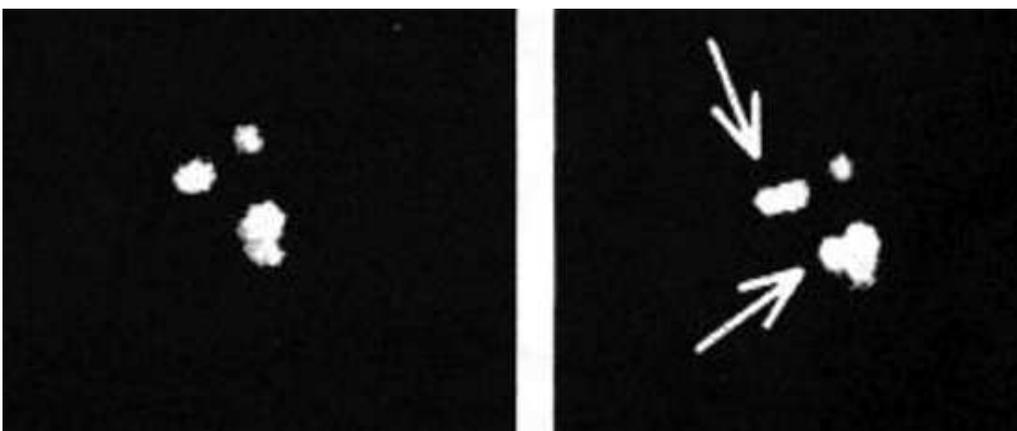
La gravedad parece existir a dimensiones incluso más grandes, como se indica en la figura 5.11 que muestra muchas cosas «pequeñas» acumuladas. Se trata de un *cúmulo de galaxias*, similar a un cúmulo de estrellas. Así pues, las galaxias se atraen mutuamente a tales distancias y están también agrupadas en cúmulos. Quizá la gravitación exista incluso a distancias de *decenas de millones* de años-luz;

hasta donde sabemos ahora, la gravedad parece seguir para siempre inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.



5.11. Un cúmulo de galaxias y 5.12. Una nube de polvo interestelar.

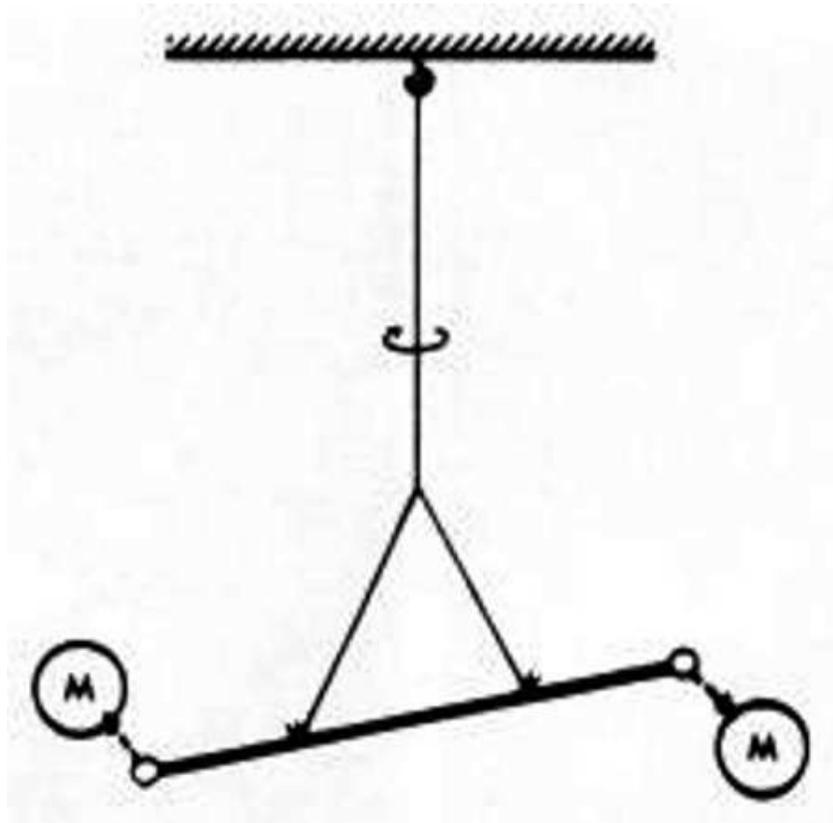
No sólo podemos entender las nebulosas, sino que a partir de la ley de la gravitación podemos incluso hacernos alguna idea sobre el origen de las estrellas. Si tenemos una nube grande de polvo y gas, como se indica en la figura 5.12, las atracciones gravitatorias mutuas de los fragmentos de polvo podrían hacerles formar pequeños grumos. Apenas visibles en las figuras hay «pequeños» puntos negros que quizá sean el comienzo de las acumulaciones de polvo y gases que, debido a su gravitación, empiezan a formar estrellas. Aún se debate si hemos visto o no formarse una estrella alguna vez.



5.13. ¿Formación de nuevas estrellas?

La figura 5.13 muestra la única pieza de convicción que sugiere que sí lo hemos visto. A la izquierda hay una fotografía de una región de gas con algunas estrellas

en ella tomada en 1947, y a la derecha hay otra fotografía, tomada sólo 7 años más tarde, que muestra dos nuevos puntos brillantes. ¿Se ha acumulado gas, ha actuado la gravedad con fuerza suficiente y ha reunido una bola lo bastante grande para que en su interior se inicien reacciones nucleares estelares y la conviertan en una estrella? Quizá sí, y quizá no. Es poco razonable que en sólo 7 años tuviéramos la suerte de ver una estrella transformarse en forma visible; es mucho menos probable que viéramos *dos*!



5.14. El experimento de Cavendish. Un diagrama simplificado del aparato utilizado por Cavendish para verificar la ley de la gravitación universal para objetos pequeños y medir la constante gravitatoria G .

La gravitación, por lo tanto, se extiende sobre distancias enormes. Pero si hay una fuerza entre *cualquier* par de objetos, deberíamos ser capaces de medir la fuerza entre nuestros propios objetos. En lugar de tener que observar estrellas que giran una alrededor de la otra, ¿por qué no tomar una bola de plomo y una canica y observar cómo la canica va hacia la bola de plomo? La dificultad de este

experimento, cuando se hace de una forma tan simple, es la propia debilidad o delicadeza de la fuerza. Debe hacerse con extremo cuidado, lo que significa cubrir el aparato para mantenerlo al abrigo del aire, estar seguros de que no está eléctricamente cargado, y cosas parecidas; entonces puede medirse la fuerza. Fue medida por primera vez por Cavendish con un aparato que se muestra esquemáticamente en la figura 5.14. Esto mostró por primera vez la fuerza directa entre dos bolas grandes y fijas de plomo y dos bolas más pequeñas de plomo situadas en los extremos de un brazo sustentado por un hilo muy fino, llamado hilo de torsión. Midiendo cuánto se retuerce el hilo, uno puede medir la intensidad de la fuerza, verificar que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y determinar su intensidad. Así, uno puede determinar de forma precisa el coeficiente G en la fórmula

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

(5.15)

Todas las masas y distancias son conocidas. Ustedes pensarán: «Ya lo conocíamos para la Tierra». Pero lo cierto es que no conocíamos la *masa* de la Tierra. Obteniendo G a partir de este experimento y conociendo con qué fuerza atrae la Tierra, ¡podemos saber indirectamente cuál es la masa de la Tierra! Este experimento se denominó «pesar la Tierra». Cavendish afirmó que él estaba pesando la Tierra, pero lo que estaba midiendo era el coeficiente G de la ley de la gravedad. Esta es la única manera en que puede determinarse la masa de la Tierra. G resulta ser

$$6,670 \times 10^{-11} \text{ newton} \times \text{m}^2/\text{kg}^2$$

(5.16)

Es difícil exagerar la importancia del efecto producido en la historia de la ciencia por este gran éxito de la teoría de la gravitación. Comparemos la confusión, la falta de confianza, el conocimiento incompleto que prevalecía en épocas anteriores, cuando

había debates y paradojas interminables, con la claridad y simplicidad de esta ley: este hecho según el cual hay una *regla tan simple* que gobierna todas las lunas, los planetas y las estrellas; y además, ¡que el hombre pudo *entenderla* y deducir cómo deberían moverse los planetas! Esta fue la razón del éxito de las ciencias en los años siguientes, pues hizo concebir esperanzas de que los otros fenómenos del mundo podrían tener también leyes tan hermosamente simples.

¿Qué es la gravedad?

Pero ¿es esta una ley tan simple? ¿Cuál es su mecanismo? Todo lo que hemos hecho es describir *cómo* se mueve la Tierra alrededor del Sol, pero no hemos dicho *qué la hace moverse*. Newton no hizo hipótesis sobre esto; se contentó con encontrar *qué* hacía sin entrar en su mecanismo. *Nadie ha proporcionado desde entonces ningún mecanismo*. Es característico de las leyes físicas el que tengan este carácter abstracto. La ley de la conservación de la energía es un teorema concerniente a magnitudes que tienen que ser calculadas y sumadas sin mención del mecanismo; y, del mismo modo, las grandes leyes de la mecánica son leyes matemáticas cuantitativas para las que no se dispone de ningún mecanismo. ¿Por qué podemos utilizar las matemáticas para describir la naturaleza sin un mecanismo subyacente? Nadie lo sabe. Tenemos que continuar porque descubrimos más cosas de ese modo.

Se han sugerido muchos mecanismos para la gravitación. Es interesante considerar uno de ellos, en el que han pensado muchas personas de cuando en cuando. Al principio, uno se siente bastante excitado y feliz cuando lo «descubre», pero pronto comprende que no es correcto. Fue propuesto por primera vez alrededor de 1750. Supongamos que hubiera muchas partículas moviéndose en el espacio a gran velocidad en todas direcciones y que son sólo ligeramente absorbidas al atravesar la materia. Cuando *son* absorbidas por la Tierra, le comunican un impulso. Sin embargo, puesto que hay tantas marchando en una dirección como en cualquier otra, todos los impulsos se compensan. Pero cuando el Sol está próximo, las partículas que llegan hacia la Tierra a través del Sol son parcialmente absorbidas por éste, de modo que llegan menos procedentes del Sol que las que llegan del lado opuesto. Por consiguiente, la Tierra experimenta un impulso neto hacia el Sol y no

se necesita mucho tiempo para ver que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, debido a la variación del ángulo sólido que subtiende el Sol en función de la distancia. ¿Qué está mal en este mecanismo? Implica algunas consecuencias nuevas que *no son ciertas*. Esta idea concreta presenta la siguiente dificultad. La Tierra, al moverse alrededor del Sol, sería golpeada por más partículas procedentes del lado frontal que del lado posterior (cuando ustedes corren bajo la lluvia, ¡la lluvia en su cara es más intensa que en la parte trasera de su cabeza!). Por consiguiente, la Tierra recibiría más impulso desde la parte frontal, y la Tierra experimentaría una *resistencia al movimiento* y se estaría frenando en su órbita. Podemos calcular el tiempo que sería necesario para que la Tierra se parase como consecuencia de esta resistencia y esto nos dice que no pasaría mucho tiempo antes de que la Tierra se quedase quieta en su órbita, de modo que este mecanismo no funciona. No se ha concebido nunca ningún mecanismo que «explique» la gravedad sin predecir también algún otro fenómeno que no existe.

A continuación discutiremos la posible relación entre la gravitación y otras fuerzas. No hay ninguna explicación de la gravitación en términos de otras fuerzas en el momento actual. No es una variante de la electricidad o nada semejante a eso, de modo que no tenemos explicación. Sin embargo, la gravitación y las otras fuerzas son muy similares, y es interesante advertir las analogías. Por ejemplo, la fuerza de la electricidad entre dos objetos cargados es muy semejante a la ley de la gravitación: la fuerza de la electricidad viene dada por una constante, con signo menos, multiplicada por el producto de las cargas, y varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Está dirigida en dirección opuesta: los iguales se repelen. Pero ¿no sigue siendo muy notable que en las dos leyes aparezca la misma función de la distancia? Quizá la gravitación y la electricidad estén relacionadas mucho más estrechamente de lo que pensamos. Se han hecho muchos intentos para unificarlas; la denominada teoría de campo unificado es sólo un intento muy elegante de combinar electricidad y gravitación; pero, al comparar la gravitación y la electricidad, lo más interesante está en las *intensidades relativas* de las fuerzas. Cualquier teoría que contenga a ambas debe ser capaz de deducir también qué intensidad tiene la gravedad.

posibilidades; una consiste en relacionarla con la edad del universo. Evidentemente, tenemos que encontrar *otro* número grande en alguna parte. Pero ¿queremos decir la edad del universo en *años*? No, porque los años no son «naturales»; fueron ideados por los hombres. Como ejemplo de algo natural, consideremos el tiempo que tarda la luz en atravesar un protón, 10^{-24} segundos. Si comparamos este tiempo con la *edad del universo*, 2×10^{10} años, la respuesta es 10^{-42} . Tiene aproximadamente el mismo número de ceros, de modo que se ha propuesto que la constante gravitatoria está relacionada con la edad del universo. Si fuera así, la constante gravitatoria cambiaría con el tiempo, porque a medida que el universo se hace más viejo la razón entre la edad del universo y el tiempo que necesita la luz para atravesar un protón estaría aumentando poco a poco. ¿Es posible que la constante gravitatoria esté cambiando con el tiempo? Por supuesto, los cambios serían tan pequeños que es bastante difícil estar seguros.

Un test que podemos imaginar para ello consiste en determinar cuál habría sido el efecto del cambio durante los últimos 10^9 años, que es aproximadamente el tiempo transcurrido desde la aparición de las formas de vida más primitivas en la Tierra hasta ahora, un intervalo equivalente a una décima parte de la edad del universo. Durante este tiempo la constante gravitatoria habría aumentado aproximadamente en un 10 por 100. Resulta que si consideramos la estructura del Sol el balance entre el peso de su material y el ritmo al que se genera energía radiante en su interior-, podemos deducir que, si la gravedad fuera un 10 por 100 más intensa, el Sol sería mucho más que un 10 por 100 más brillante: el brillo iría como la *sexta potencia* de la constante gravitatoria! Si calculamos lo que le sucede a la órbita de la Tierra cuando la gravedad está cambiando, encontramos que la Tierra habría estado entonces *más cerca*. En conjunto, la Tierra estaría aproximadamente 100°C más caliente, y el agua no habría estado en el mar sino en forma de vapor en el aire, de modo que la vida no habría comenzado en el mar: Por esta razón *no* creemos ahora que la constante de la gravedad esté cambiando con la edad del universo. Pero argumentos tales como el que acabamos de dar no son muy concluyentes, y el tema no está completamente cerrado.

Es un hecho que la fuerza de la gravitación es proporcional a la *masa*, la magnitud que es fundamentalmente una medida de la inercia, de con cuánta fuerza hay que

sujetar algo que está dando vueltas en un círculo. Por consiguiente, dos objetos, uno pesado y uno ligero, que giran alrededor de un objeto más grande debido a la gravedad, describiendo un mismo círculo y a la misma velocidad, permanecerán juntos porque para ir en un círculo se *requiere* una fuerza que es más intensa cuanto más grande es la masa. Es decir, la gravedad es más intensa para una masa dada en *la proporción exacta* para que los dos objetos sigan dando vueltas juntos. Si un objeto estuviera dentro del otro seguiría *estando* dentro. Es un balance perfecto. Por lo tanto, Gagarin o Titov encontrarían las cosas «ingrávidas» dentro de una nave espacial; si ellos soltasen un trozo de tiza, por ejemplo, éste seguiría dando vueltas a la Tierra exactamente de la misma forma que la nave espacial entera, y por lo tanto parecería estar suspendido ante ellos en el espacio. Es muy interesante que esta fuerza sea *exactamente* proporcional a la masa con gran precisión, porque si no fuera exactamente proporcional habría algún efecto en el que la inercia y el peso diferirían. La ausencia de un efecto semejante ha sido verificada con gran precisión mediante experimentos hechos por primera vez por Eötvös en 1909 y más recientemente por Dicke. Para todas las sustancias ensayadas, las masas y los pesos son exactamente proporcionales dentro de un margen de 1 parte en 1.000 millones, o menos. Este es un experimento notable.

Gravedad y relatividad

Otro tema que merece discusión es la modificación de Einstein a la ley de la gravitación de Newton. A pesar de toda la excitación que creó, la ley de la gravitación de Newton no es correcta! Fue modificada por Einstein para tener en cuenta la teoría de la relatividad. Según Newton, el efecto gravitatorio es instantáneo, es decir, si moviéramos una masa, experimentaríamos de golpe una nueva fuerza debido a la nueva posición de dicha masa; por medios semejantes podríamos enviar señales a velocidad infinita. Einstein presentó argumentos que sugieren que *no podemos enviar señales más rápidas que la velocidad de la luz*, de modo que la ley de la gravitación debe ser errónea. Corrigiéndola para tener en cuenta los retrasos, tenemos una nueva ley, llamada ley de la gravitación de Einstein. Una característica de esta nueva ley que es bastante fácil de entender es la siguiente: en la teoría de la relatividad de Einstein, cualquier cosa que tenga

energía tiene masa; masa en el sentido de que es atraída gravitatoriamente. Incluso la luz, que tiene una energía, tiene una «masa». Cuando un haz de luz, que tiene energía, pasa cerca del Sol hay una atracción sobre él por parte del Sol. Así pues, la luz no sigue en línea recta, sino que es desviada. Durante un eclipse de Sol, por ejemplo, las estrellas que se ven cerca del Sol aparecerán desplazadas del lugar donde se verían si el Sol no estuviera allí, y esto ha sido observado.

Para terminar, comparemos la gravitación con otras teorías. En años recientes hemos descubierto que toda la masa está hecha de partículas minúsculas y que existen varios tipos de interacciones, tales como fuerzas nucleares, etc. Todavía no se ha encontrado ninguna de estas fuerzas nucleares o eléctricas que explique la gravitación. Los aspectos mecanocuánticos de la naturaleza no han sido todavía trasladados a la gravitación. Cuando la escala es tan pequeña que necesitamos los efectos cuánticos, los efectos gravitatorios son tan débiles que la necesidad de una teoría cuántica de la gravitación no se ha desarrollado todavía. Por otra parte, para la consistencia de nuestras teorías físicas sería importante ver si la ley de Newton modificada en la ley de Einstein puede ser modificada posteriormente para ser consistente con el principio de incertidumbre. Esta última modificación no ha sido todavía completada.