

Índice

P.	11	1. La ley de la gravedad, un ejemplo de ley física
	39	2. La relación de las matemáticas con la física
	67	3. Los grandes principios de conservación
	95	4. Simetría y ley física
	121	5. La distinción entre pasado y futuro
	141	6. Probabilidad e incertidumbre: la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica
	165	7. En busca de nuevas leyes

La ley de la gravedad, un ejemplo de ley física

Es bien curioso, pero en las pocas ocasiones en que he sido requerido para tocar el bongo en público, al presentador nunca se le ocurrió mencionar que también me dedico a la física teórica. Pienso que esto puede deberse a que respetamos más las artes que las ciencias. Los artistas del Renacimiento decían que la principal preocupación del hombre debía ser el hombre, pero en el mundo hay otras cosas interesantes. Incluso a los artistas les interesan las puestas de sol y las olas del mar y el curso de las estrellas en el cielo. Así pues, está justificado hablar de otras cosas de vez en cuando, si miramos a otro nivel, a un nivel, por así decirlo, de mayor placer estético. Pero hay también ritmos y patrones en los fenómenos naturales que no son aparentes al ojo a simple vista, sino sólo al ojo del análisis. Estos ritmos y patrones son eso que llamamos leyes físicas. En esta serie de conferencias quiero discutir acerca de las características genéricas de estas leyes físicas. Nos situaremos, por lo tanto, a otro nivel, a un nivel de mayor generalidad que el de las propias leyes. En realidad, de lo que se trata es de la naturaleza tal como se la contempla tras un análisis detallado, aunque quiero hablar primordialmente de las cualidades más generales de la naturaleza.

Lo que ocurre es que la propia generalidad del tema hace que tienda a derivar demasiado hacia la filosofía, y cuando se generaliza tanto todo el mundo cree que lo ha comprendido, y que se trata de algo profundísimo desde el punto de vista filosófico. Yo quisiera ser bastante más concreto y as-

piro a ser entendido de una manera franca y no vaga. Por ello, en vez de hablar de generalidades, en esta primera conferencia voy a intentar presentar un ejemplo de ley física para que todos ustedes tengan claro el tipo de cosas a las que voy a referirme. De esta manera, además, podré echar mano de este ejemplo una y otra vez a modo de ilustración y para dar cuerpo a algo que de otra forma resultaría demasiado abstracto. He elegido como ejemplo concreto de ley física la teoría de la gravedad y los fenómenos gravitatorios. No la he elegido por ninguna razón especial. Fue una de las primeras grandes leyes que se descubrieron y tiene una historia interesante. Alguno de ustedes quizás esté pensando: «¿Pero no es una antigualla? Me gustaría que me hablaran de algo más moderno». Más reciente quizá, pero dudo que más moderno. La ciencia moderna pertenece a la misma tradición que la ley de la gravedad. La diferencia es sólo cronológica. Así pues, no lamento en absoluto hablar de la ley de la gravedad, porque al describir su historia y sus métodos, el carácter de su descubrimiento, sus características propias, estoy siendo completamente moderno.

De esta ley se ha dicho que es «la mayor generalización lograda por la mente humana», aunque ya puede deducirse de mi introducción que no me interesa tanto la mente humana como la maravilla de una naturaleza que es capaz de obedecer una ley tan simple y tan elegante como la ley de la gravedad. En consecuencia no me voy a concentrar en lo listos que somos por haber descubierto todo esto, sino en lo lista que es la naturaleza al obedecer a la ley.

La ley de la gravedad afirma que dos cuerpos ejercen una fuerza recíproca que varía inversamente con el cuadrado de la distancia que los separa y directamente con el producto de sus masas. Matemáticamente, la ley puede expresarse mediante la fórmula:

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

una constante multiplicada por el producto de ambas masas, dividido por el cuadrado de la distancia. Si a esto añado el comentario de que un cuerpo responde a una fuerza acelerándose, es decir, cambiando su velocidad cada segundo en relación inversa a su masa, o que el cambio de velocidad es tanto mayor cuanto menor es su masa, entonces habré dicho todo lo que hay que decir sobre la ley de la gravedad. Todo lo demás es una consecuencia matemática de estas dos cosas. Ya sé que no todos ustedes son matemáticos y que no pueden captar de inmediato todas las consecuencias de estas dos observaciones. Por ello, lo que me gustaría hacer a continuación es contarles brevemente cómo se descubrió, cuáles son algunas de sus consecuencias, qué impacto tuvo su descubrimiento sobre la historia de la ciencia, qué clase de misterios entraña esta ley, hablar un poco de los perfeccionamientos añadidos por Einstein y posiblemente de su relación con las demás leyes de la física.

Su historia, brevemente, es ésta. En la antigüedad se descubrió por primera vez el movimiento aparente de los planetas en el cielo y se llegó a la conclusión de que todos ellos, incluida la Tierra, giraban alrededor del Sol. Esto mismo fue redescubierto por Copérnico después de que la gente lo hubiera olvidado. La pregunta que siguió fue: ¿cómo se mueven exactamente los planetas alrededor del Sol, es decir, con qué tipo de movimiento? ¿Ocupa el Sol el centro de una circunferencia o bien trazan los planetas otro tipo de curva? ¿A qué velocidad se mueven?, etc. Las respuestas a estas preguntas tardaron más en llegar. La época posterior a Copérnico fue un periodo de grandes debates sobre si la Tierra se hallaba en el centro del universo o también giraba alrededor del Sol junto a los otros planetas. Fue entonces cuando a un hombre llamado Tycho Brahe* se le ocurrió que quizá fuese una buena idea hacer observaciones muy precisas de la posición de los planetas en el cielo para así distinguir unas teo-

* Tycho Brahe, 1546-1601, astrónomo danés.

rías de otras. Ésta es justamente la base de la ciencia moderna y el principio del verdadero conocimiento de la naturaleza: la idea de fijarse en una cosa, anotar los detalles y confiar en que esta clase de información pueda contener la clave para distinguir una interpretación teórica de otra. Con esta idea en mente, Tycho, que era un hombre rico, habilitó grandes circunferencias de bronce y varios puestos especiales de observación en una isla que poseía cerca de Copenhague y se dedicó a anotar la posición de los planetas noche tras noche. Sólo a base de trabajar duro puede descubrirse algo.

Una vez recopilados los datos, éstos llegaron a manos de Kepler,* quien intentó analizar el tipo de trayectoria que describen los planetas alrededor del Sol. Para ello empleó el método de prueba y error. En cierta ocasión pensó que había dado con la respuesta. La idea era que los planetas trazaban circunferencias con el Sol desplazado del centro; pero Kepler vio que un planeta (creo que era Marte) estaba fuera de sitio por unos ocho minutos de arco y decidió que la diferencia era demasiado grande para pensar que Tycho Brahe se había equivocado, por lo que no podía dar su respuesta por buena. Así pues, gracias a la precisión de las mediciones de Tycho Brahe, Kepler continuó probando para llegar finalmente a descubrir tres cosas.

Lo primero que descubrió es que los planetas describían elipses alrededor del Sol, con éste en uno de los focos. Éstas son curvas conocidas de todos los dibujantes porque son como un círculo aplastado. A los niños también les resultan familiares, porque alguna vez les han contado que si se ata un anillo a una cuerda fija por sus extremos y se coloca un lápiz en el anillo, se puede dibujar una elipse (figura 1).

Los dos puntos A y B son los focos. La órbita de un planeta es una elipse con el Sol en uno de los focos. La pregunta siguiente es: ¿de qué manera describe el planeta la

* Johann Kepler, 1571-1630, astrónomo y matemático alemán, ayudante de Brahe.

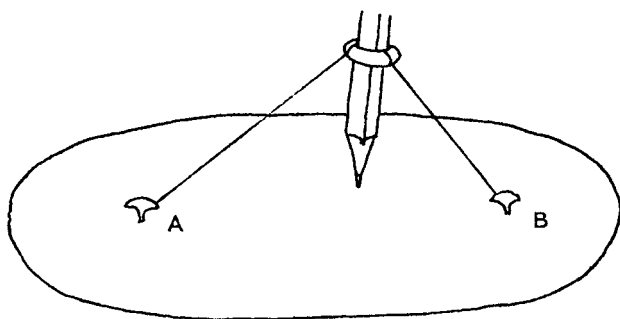


Figura 1

elipse? ¿Va más rápido cerca del Sol? ¿Va más despacio lejos del Sol? Kepler también dio con la respuesta a esta cuestión (figura 2).

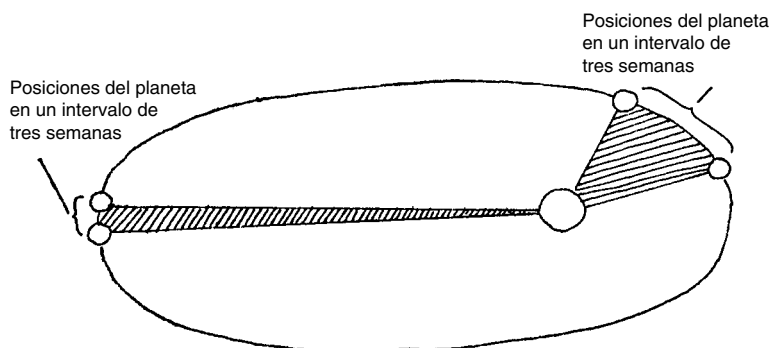


Figura 2

Si se fija primero la posición de un planeta en dos momentos distintos separados por un lapso de tiempo determinado (pongamos tres semanas) y posteriormente, en otra parte de la órbita, se fijan otras dos posiciones del planeta separadas de nuevo por un lapso de tres semanas y se trazan las líneas que unen el Sol con el planeta (radios vectores, en lenguaje técnico), el área definida por el arco de la órbita planetaria, correspondiente al recorrido del planeta en un lapso de tres semanas, y los dos radios es la misma en cual-

quier parte de la órbita. En consecuencia, el planeta tiene que ir más deprisa cuando está próximo al Sol y más despacio cuando está lejos (de lo contrario las dos áreas no serían idénticas).

Algunos años más tarde, Kepler descubrió una tercera regla relativa al tiempo que tarda un planeta en dar una vuelta completa alrededor del Sol. Este tiempo se relaciona con el tamaño de la órbita, entendido como la longitud del diámetro mayor de la elipse, y varía según la raíz cuadrada del cubo del tamaño de la órbita. Las tres leyes obtenidas por Kepler se resumen diciendo que *la órbita tiene forma de elipse, que áreas iguales se cubren en tiempos iguales y que el tiempo que tarda un planeta en dar una vuelta entera es proporcional al tamaño de la órbita elevado a tres medios*. Estas tres leyes de Kepler ofrecen una descripción completa del movimiento de los planetas alrededor del Sol.

La siguiente pregunta fue: ¿qué es lo que hace que los planetas se muevan alrededor del Sol? Una de las respuestas que se dieron en tiempos de Kepler fue que detrás de los planetas había ángeles que los impulsaban batiendo sus alas. Como veremos, esta respuesta no está tan lejos de la verdad. La única diferencia es que los ángeles están sentados en una dirección diferente y sus alas empujan hacia dentro.

Mientras tanto, Galileo estaba investigando las leyes del movimiento de los objetos terrestres. De su estudio y de cierto número de experimentos encaminados a entender, por ejemplo, de qué manera rodaba una bola sobre un plano inclinado o cómo se movía el péndulo, Galileo descubrió un gran principio, el llamado principio de inercia, que establece lo siguiente: si nada actúa sobre un objeto y éste avanza a una velocidad determinada en línea recta, esta velocidad se mantendrá para siempre y el objeto seguirá describiendo la misma línea recta. Por increíble que pueda parecernos si alguna vez hemos tratado de conseguir que una bola no pare de rodar, en el caso de que esta idealización fuera correcta y nada, ni siquiera la fricción del suelo, influ-

yera sobre ella, entonces la bola conservaría su velocidad para siempre.

El siguiente descubrimiento lo hizo Newton, quien consideró otra cuestión: «Si el objeto no va en línea recta, ¿qué pasa *entonces?*». La respuesta que dio es que se necesita una fuerza para modificar de alguna manera la velocidad. Por ejemplo, si se empuja la bola en el sentido del movimiento, crecerá su velocidad. Si resulta que cambia de dirección, entonces la fuerza debe haberse aplicado lateralmente. La fuerza puede medirse por el producto de dos efectos. ¿Qué cambio experimenta la velocidad en un pequeño intervalo de tiempo? A esto se le llama aceleración, y cuando se multiplica por el coeficiente de inercia de un objeto (es decir, su masa) se obtiene la fuerza. Y la fuerza es medible. Por ejemplo, si tenemos una piedra atada a un cordel y la hacemos girar alrededor nuestro, descubrimos que hay que tirar del cordel porque, aunque la velocidad de la piedra no cambia mientras gira sobre nuestra cabeza, su dirección sí que lo hace. Por lo tanto, debe existir una fuerza que tire constantemente hacia dentro, y esta fuerza es proporcional a la masa. De manera que si cogemos dos objetos distintos y los hacemos girar uno tras otro alrededor nuestro a la misma velocidad, y medimos la fuerza de cada uno de ellos, resultará que una fuerza será tanto mayor que la otra cuanto mayor sea la masa del primer objeto respecto de la del segundo. Ésta es una manera de medir las masas a partir de la fuerza necesaria para cambiar la velocidad. De ahí Newton sacó la conclusión de que si un planeta, por poner un ejemplo sencillo, describe un círculo alrededor del Sol, *no es necesaria fuerza alguna para hacer que escape en línea recta, tangencialmente*; de no existir fuerza alguna continuaría en línea recta. Pero no es esto lo que ocurre; el planeta no escapa, sino que se inclina hacia el Sol (figura 3). En otras palabras, su velocidad, su movimiento, han sido desviados hacia el Sol. Así, lo que los ángeles tienen que hacer es batir sin parar sus alas en dirección al Sol.