

1 EL PROBLEMA DE LA RELATIVIDAD

*Quien no comprende
el movimiento
no comprende la naturaleza.
Aristóteles*

Para empezar vamos a plantear un problema. Deseamos que el lector tome conciencia del mismo desde el inicio, porque este problema actuará como hilo conductor a lo largo del libro. Para favorecer este objetivo le proponemos que, como punto de partida, realice una pequeña reflexión acerca del posible estado de movimiento o de reposo de un objeto concreto.

A.1 Piense en un determinado objeto fijo en algún lugar de la superficie de la Tierra, por ejemplo, un semáforo. ¿Está en reposo o en movimiento? Si estuviera en movimiento, ¿qué tipo de movimiento tiene? ¿Qué trayectoria describe?

Si nos dejamos llevar por nuestra primera intuición, lo más probable es que sintamos la tentación de considerar que el semáforo está en reposo, dado que resulta evidente que su posición, determinada respecto de cualquier otro objeto que también esté fijo en el suelo, no varía con el transcurso del tiempo (Figura 1.1).

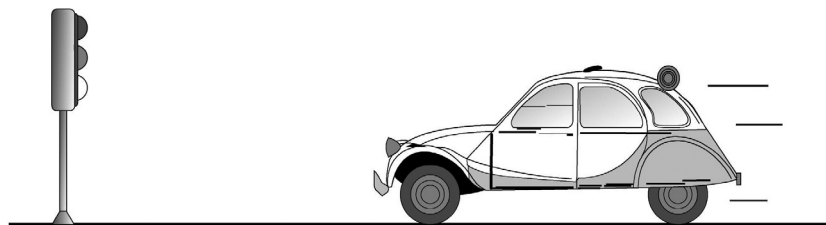


Figura 1.1 ¿Quién está en reposo? ¿Quién está en movimiento?

Sin embargo, debemos admitir que también es lícito considerar al semáforo en movimiento. La Tierra rota alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos geográficos, de tal modo que todos los puntos de su superficie describen un movimiento circular y uniforme alrededor de ese eje, a razón de una vuelta cada 24 horas. Por lo tanto, el semáforo, fijo en el suelo, también realiza un movimiento circular y uniforme respecto de dicho eje (Figura 2.1).

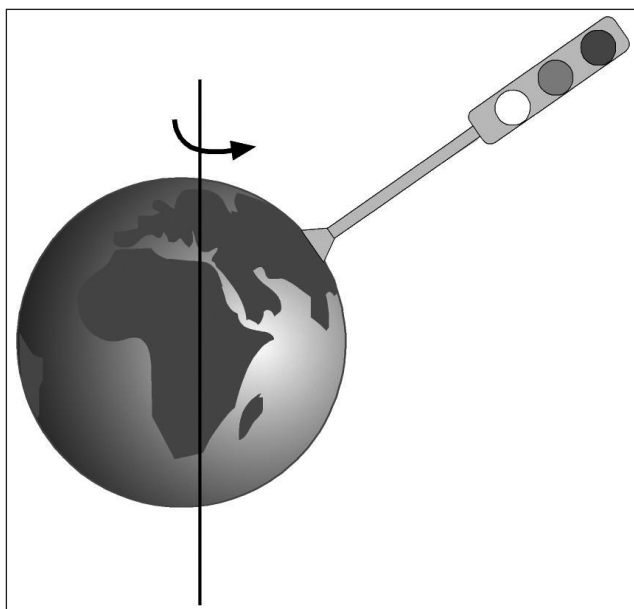


Figura 2.1 El semáforo, ¿en reposo o en movimiento?

Ahora bien, ocurre que la Tierra a su vez se traslada en su conjunto y describe una trayectoria aproximadamente elíptica con el Sol situado en uno de los focos de dicha elipse. En consecuencia, el semáforo traza, respecto del Sol, otro tipo de movimiento cuya trayectoria es algo más compleja: la que resulta de combinar un movimiento de rotación alrededor del eje terrestre y un movimiento de traslación alrededor del Sol (Figura 3.1).

En definitiva, como consecuencia de estos razonamientos se deduce que el estado y el tipo de movimiento del semáforo no es una cualidad absoluta, que se pueda atribuir a él, sino que depende

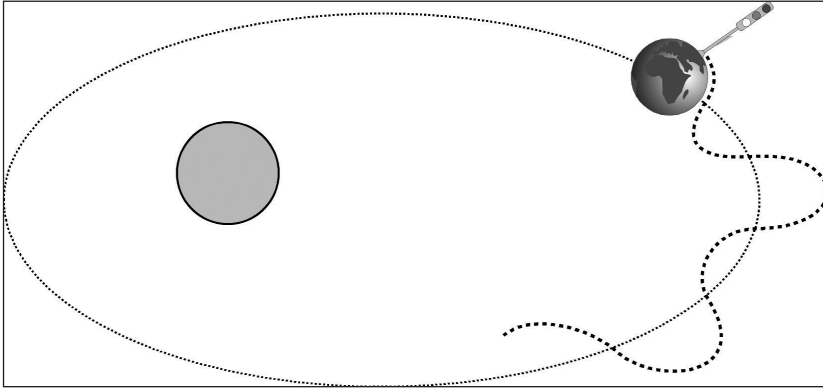


Figura 3.1 Trayectoria descrita por el semáforo para una referencia situada en el Sol y trayectoria (elipse) descrita por la Tierra respecto del Sol.

del sistema de referencia* que se adopte para estudiarlo (en nuestros ejemplos, con origen en un punto de la superficie terrestre y ejes fijos al suelo, en el centro de la Tierra o en el centro del Sol y ejes orientados hacia las estrellas fijas; etc). Se constata, en otras palabras, que no se puede establecer la posición de ningún objeto, ni por tanto hablar de su movimiento, si no es con referencia a otro. A esta evidente, pero, como veremos enseguida, perturbadora conclusión, llamaremos a lo largo de todo el libro problema de la relatividad de los movimientos. Como se comprenderá, este problema es tan antiguo como cualquiera de los intentos que haya podido realizar el ser humano por estudiar y comprender los movimientos y, por esto, el concepto básico de relatividad ha de acompañar siempre a la mecánica,* planteando un problema tan difícil, como estimulante para su desarrollo. Ahora veremos por qué.

A.2 ¿Por qué el carácter relativo de los movimientos plantea un problema para el desarrollo de la mecánica?

Es fácil comprender porqué el carácter relativo de los movimientos, es decir, el hecho de que la descripción física de cualquier movimiento es diferente en función del sistema de referencia adoptado, se ha vivido a lo largo de la historia de las ideas como un hecho muy

molesto. Ciertamente este hecho plantea un problema muy serio a la fundamentación de cualquier teoría* mecánica que pretenda estudiar los movimientos. Hay que tener en cuenta que una teoría sobre los movimientos se ha de conformar con unas leyes* que expresen unas relaciones operativas entre las magnitudes* utilizadas para describirlos. Por ejemplo, ha de poseer leyes que permitan calcular la posición que ocupa el móvil en el transcurso del tiempo, leyes que permitan determinar la velocidad que tiene el móvil en cada instante, etc. Sin embargo, debido al carácter relativo de los movimientos, los valores que para cada móvil tomen estas magnitudes (la posición, la velocidad, etc.) deberán ser diferentes dependiendo del sistema de referencia adoptado. Entonces, ¿qué leyes tan excepcionales pueden ser aquéllas que, en cada sistema de referencia, han de proporcionar un valor distinto de éstas y otras magnitudes?

Algún lector, al hilo de estas reflexiones, quizá esté intuyendo una posible y sencilla solución a este problema: Encontrar en el Universo un objeto (una estrella, por ejemplo) en reposo. Si esto fuera posible, ese objeto se podría utilizar como origen de un sistema de referencia privilegiado desde donde estudiaríamos los movimientos de todos los demás. Entonces, se podría elaborar una teoría mecánica que fuera aplicable desde ese hipotético sistema de referencia privilegiado en reposo. Ésta es, en efecto, la solución más evidente que cabe plantear frente al problema de la relatividad y seguramente también la razón principal de que el mismo no formara parte de las preocupaciones científicas durante siglos. Porque, como es bien conocido, durante mucho tiempo dominó en el pensamiento humano una visión cosmológica que atribuyó a un objeto del Universo este papel privilegiado y, en consecuencia, eludió el problema de la relatividad. Ahora recordaremos brevemente esta etapa.

A.3 Una solución posible al problema de la relatividad sería encontrar un objeto en el Universo en reposo absoluto y utilizarlo como sistema de referencia privilegiado, desde donde se estudiarían los movimientos de todos los demás. ¿Qué objetos del Universo han jugado este papel a lo largo de la historia?

Desde la misma génesis de la astronomía antigua hasta los albores de la primera gran revolución científica que se consolidó en el siglo XVII con el establecimiento de la síntesis newtoniana, prevaleció en el pensamiento humano una visión del mundo que supuso que la Tierra permanecía en reposo en el centro del Universo y que el resto de cuerpos celestes giraban a su alrededor. Este modelo geocéntrico fue dominante, aunque, hay que decir que no totalmente exclusivo. En este sentido, hay que apuntar que desde tiempos muy remotos constan contribuciones que plantearon imágenes del mundo alternativas y, en algún caso, conscientes del movimiento de la Tierra. Por ejemplo, hace unos 2.300 años el matemático griego Aristarco de Samos imaginó al Sol en el centro del Universo y a la Tierra rotando sobre su eje y dando una vuelta alrededor del Sol una vez al año. No obstante, ésta y otras propuestas alternativas al geocentrismo prácticamente no fueron tenidas en cuenta, siendo, insistimos, la posición «oficial» de los astrónomos y de los filósofos de la antigüedad considerar a la Tierra fija en el centro del Universo (Figura 4.1). Este



Figura 4.1 Hasta la Edad Media estuvo vigente el sistema del mundo aristotélico-ptolemaico.

fue, de hecho, el modelo cosmológico que utilizó en la misma época la física de Aristóteles y se consolidó aún más cuando el astrónomo alejandrino Ptolomeo (100–168) lo desarrolló después con detalle en una gran obra, conocida como *El Almagesto*. Los cinco últimos libros de esta obra tenían como principal objetivo explicar los movimientos no regulares de los planetas, observados desde la Tierra. Además de hacerlo, presentaron unos argumentos muy convincentes en defensa del supuesto estatismo de la Tierra en el centro del Universo. Por ejemplo, se argüía que si la Tierra rotara alrededor de su eje una vez al día, los puntos de su superficie tendrían velocidades de unos 2.000 km/h, y estas velocidades provocarían vientos y tormentas de polvo de tal envergadura que destruirían la propia faz de la Tierra.

Como consecuencia de todo esto, para el desarrollo de la física en la antigüedad el carácter relativo de los movimientos no tuvo relevancia, no porque no fuera un dato conocido (curiosamente fue señalado por el propio Aristóteles), sino porque desde una concepción geocéntrica del mundo este hecho no planteó mayores problemas. Aceptando que la Tierra tenía el privilegio de encontrarse en reposo en el centro del Universo, lo más sencillo y «natural» fue elaborar una teoría que interpretó los movimientos de los objetos tomando como sistema de referencia a nuestro planeta. Hay que tener en cuenta además que la imagen de una Tierra en reposo en el centro del Universo era profundamente satisfactoria, no sólo desde el punto de vista científico, sino también por sus implicaciones de tipo filosófico y religioso. Esto contribuyó a que siglo tras siglo la Tierra permaneciera oficialmente inmóvil y el problema de la relatividad de los movimientos no tuviera siquiera ocasión de manifestarse.

Fue en el siglo XVI cuando se removió a la Tierra del lugar privilegiado que se le había asignado. Esto sucedió en gran medida gracias a la contribución que hizo en este sentido el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473–1543). Copérnico, a pesar de tener una sólida formación teológica, defendió ya en su opúsculo *Commentariolus* (1514) que no era la Tierra sino el Sol el objeto que estaba en reposo en el centro fijo del Universo: «Todas las esferas giran en torno al Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la

cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol» (Figura 5.1). La propuesta de Copérnico es análoga a la planteada por el griego Aristarco de Samos dieciocho siglos antes. Pero ahora el astrónomo polaco se podía apoyar en las dificultades que había acumulado el modelo de Ptolomeo y en la riqueza de detalles matemáticos del modelo heliocéntrico. A pesar de ello, esta última propuesta tardó en imponerse y sólo pudo hacerlo de una manera clara cuando, en los dos siglos posteriores (XVI y XVII) se acompañó de otras importantes contribuciones, que preludiaron la revolución científica culminada luego por Newton (1642–1727). Destacamos, en particular, la formulación de las leyes de Kepler (1551–1630), relativas al movimiento de los planetas, y las aportaciones teóricas de Galileo (1564–1642), avaladas por las primeras observaciones del Cosmos con el telescopio que él mismo construyó.

Así, tras casi dieciocho siglos de dominio del modelo geocéntrico la humanidad fue asumiendo finalmente el movimiento de la Tierra. Sin embargo, en aquel tiempo el problema de la relatividad

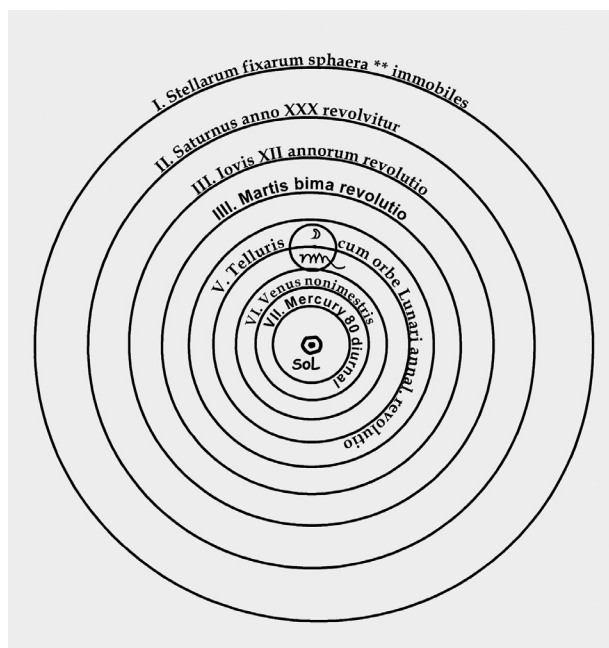


Figura 5.1 Sistema heliocéntrico propuesto por Copérnico.

siguió sin plantearse de un modo explícito. La aceptación del movimiento de nuestro planeta afectó notoriamente a concepciones muy importantes para el ser humano (insistimos, no sólo de tipo científico, sino también de carácter social, religioso, etc.), pero, por lo que se refiere al problema de la relatividad, únicamente provocó entonces el traslado a otro objeto del Universo de la presunción de encontrarse en reposo absoluto. En este sentido, podemos decir que el modelo heliocéntrico arrebató a la Tierra un privilegio y se lo traspasó al Sol. Por lo tanto, no alteró en lo esencial el carácter no relativista de las antiguas teorías sobre los movimientos, sólo modificó el origen del sistema de referencia desde donde debían ser aplicadas las leyes de la mecánica: del centro de la Tierra al centro del Sol.

Ahora bien, una vez abierta definitivamente la brecha que rompió con la idea de una Tierra estática, no hubo más remedio que admitir, no mucho después, que el Sol también se mueve alrededor del centro de nuestra Galaxia, que ésta se mueve a su vez respecto de otras galaxias y así indefinidamente. En realidad, los mismos argumentos con los que la mecánica clásica refutó el reposo absoluto de la Tierra, podían refutar igualmente la posibilidad de atribuir ese mismo privilegio a cualquier otro objeto del Cosmos.

Alcanzado este estadio del desarrollo de la física en relación con el estudio de los movimientos, se tropieza otra vez con el hecho inquietante de que a ningún objeto del Universo se le puede atribuir el privilegio de estar en reposo absoluto. Entonces, ¿cómo elaborar una teoría que estudie los movimientos?

A.4 Asumiendo el hecho de que no hay ningún objeto del Universo en reposo absoluto, ¿se le ocurre alguna manera de abordar el problema de la relatividad de los movimientos?

Ante el fracaso en la búsqueda histórica de un objeto material en el Universo en reposo absoluto, para utilizarlo como un sistema de referencia privilegiado desde donde estudiar los movimientos del resto, no queda otra opción que plantear enfoques alternativos en relación con el problema de la relatividad. Recordemos que, por

una parte, se desea elaborar una teoría mecánica global y coherente, constituida por un conjunto único de leyes. Al mismo tiempo se exige que esas leyes tengan una flexibilidad extraordinaria, porque en cada sistema de referencia los valores de magnitudes como la posición, la velocidad..., que caracterizan a un mismo movimiento, son diferentes.

Este es el gran reto relativista: la búsqueda de unas leyes únicas y, al mismo tiempo, capaces de proporcionar descripciones diferentes de todo movimiento según cual sea el sistema de referencia que se adopte. El lector notará que encontrar tales leyes significaría un logro realmente importante pues implicaría que observadores* situados en sistemas de referencia distintos (por ejemplo, en la Tierra o en el Sol) pudieran utilizar esas leyes compartidas para estudiar cada movimiento (por ejemplo, el movimiento de la Luna) y que, sin embargo, al hacerlo, cada uno de ellos obtuviera un valor distinto de las magnitudes relativas* que lo caracterizan, como la posición, la velocidad, etc.

Todavía ha de tener otra cualidad una solución de este tipo en relación con el problema de la relatividad. Además de poseer esa capacidad extraordinaria de adaptación de las leyes a cada sistema de referencia, una buena teoría sobre los movimientos debería incluir un conjunto adicional de ecuaciones adecuado, para trasladar los valores de las magnitudes que caracterizan a cada movimiento al pasar de un sistema de referencia a otro. Pues, en otro caso, ¿cómo podrían sus usuarios (en general, en sistemas de referencia distintos) intercambiar sus datos, mediciones, predicciones, etc.?

Nos gustaría transmitir a nuestro lector el reto imponente que exige hacer frente al problema de la relatividad. Teniendo en cuenta los comentarios realizados hasta ahora, resumimos este reto mediante los dos interrogantes siguientes:

- ¿Será posible elaborar una mecánica o teoría sobre los movimientos, estructurada con unas leyes generales únicas y, a la vez, capaces de adaptarse a las diferentes descripciones que tiene un mismo movimiento en cada sistema de referencia?

- Dos observadores cualesquiera que, en sistemas de referencia distintos, describen cada movimiento de forma diferente, ¿podrán comparar sus interpretaciones diferentes del mismo hecho?, ¿Se podrá dotar a la física de unas expresiones adecuadas para trasladar magnitudes como posiciones, velocidades, etc., al pasar de un sistema de referencia a otro?

El propósito del libro es mostrar algunos de los avances más importantes que la física ha producido en respuesta a estas cuestiones. Dicho de otro modo, desarrollaremos aspectos de la mecánica y su evolución a lo largo de la historia como una secuencia de respuestas cada vez mejor elaboradas en relación con las preguntas anteriores. Con esta línea argumental, en el capítulo 2 mostraremos que fue con el establecimiento de la mecánica de Newton (siglo XVII), cuando se concretó por primera vez una teoría física que da una solución (en cierto grado, no explícita) al problema de la relatividad. Después, en el capítulo 3, veremos por qué esta solución no fue definitiva y la razón de que el reto relativista se planteara por primera vez de una manera explícita a finales del siglo XIX. Será entonces cuando dedicaremos la mayor parte del libro a desarrollar aspectos de la teoría de Einstein de la relatividad especial* (capítulos 4, 5 y 6), destacando avances que esta teoría supone en relación con el problema de la relatividad y aludiendo también a los profundos cambios que exige respecto de la mentalidad newtoniana.

Para terminar, en el capítulo 7 haremos una breve introducción a la Teoría de la Relatividad General* del propio Einstein, una teoría que consiguió extender la aplicabilidad de las leyes de la física a todos los sistemas de referencia.

Animamos al lector a que comparta con nosotros esta aventura del pensamiento científico y esperamos que las cuestiones que iremos planteando a lo largo del libro, le ayuden a avanzar paulatinamente en la construcción del contenido que, poco a poco, desarrollaremos.