

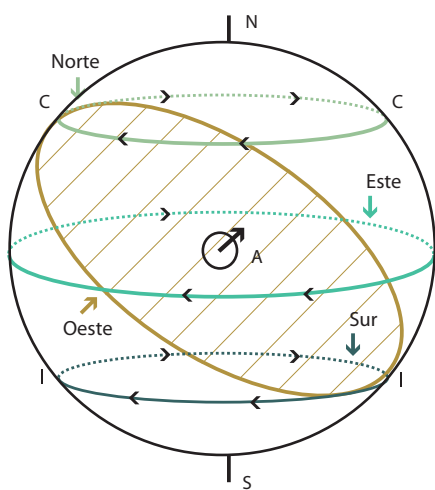
# 1. Introducción histórica

## □ 1.1. Descripción del movimiento en la antigüedad

### 1.1.1 El movimiento de los cuerpos celestes

A partir del siglo IV antes de nuestra era, la mayor parte de los filósofos y astrónomos griegos sostenía que la Tierra era una esfera inmóvil muy pequeña que estaba suspendida en el centro geométrico de una esfera en rotación mucho mayor, que llevaba consigo a las estrellas (ver figura 1.1). El Sol se desplazaba por el espacio comprendido entre la Tierra y la esfera de las estrellas. Más allá de la esfera exterior no había nada, ni espacio, ni materia. Los historiadores modernos llaman a este esquema conceptual, compuesto inicialmente por dos esferas: una interior para el hombre y otra exterior para las estrellas, el universo de las dos esferas. En realidad, el universo de las dos esferas no es una verdadera cosmología, sino un marco estructural en el cual se encuadran concepciones globales sobre el universo.

Dicho marco comprende un gran número de sistemas astronómicos y cosmológicos diferentes y contradictorios que se utilizaron durante los diecinueve siglos que separan el siglo IV a.C de la época de Copérnico.



**Figura 1.1.** El universo de las dos esferas.

Veamos la descripción del movimiento de las estrellas, el Sol y los planetas en este marco conceptual. La figura 1.1 nos muestra una Tierra esférica situada en el centro de una esfera mayor que es la de las estrellas. El observador, situado en el punto A, puede ver toda la parte de la esfera situada por encima del plano del horizonte (ver figura 1.1) rayado en el diagrama. Las estrellas se encuentran engarzadas en la superficie de la esfera exterior. De esta manera, cada estrella mantiene su posición respecto de las demás cuando se la observa desde la Tierra, situada en el centro del sistema global. Si la esfera gira uniformemente alrededor de un eje que pasa por los puntos diametralmente opuestos N y S, todas las estrellas, excepto las situadas en N o S, se verán arrastradas por dicho movimiento. Para un observador situado en A, un objeto situado en el punto N de la esfera exterior

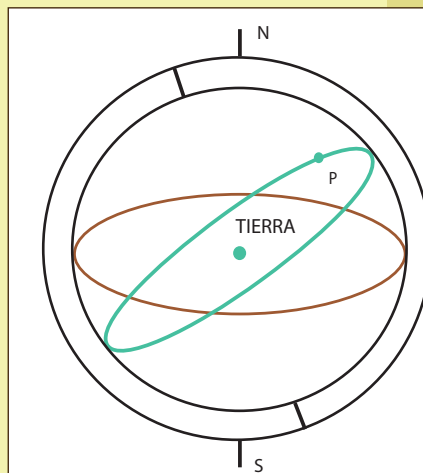
parece girar describiendo círculos alrededor del Polo; si la esfera gira sobre sí misma una vuelta completa cada 23 horas 56 minutos (un día), dicho objeto completa su círculo en idéntico período. De esta manera, las estrellas realizan movimientos circulares sobre la esfera exterior. Todas las estrellas suficientemente próximas al Polo por hallarse situadas por encima del círculo CC (ver figura 1.1) del diagrama son circumpolares, pues la

rotación de la esfera no las hace descender nunca por debajo de la línea del horizonte. Las estrellas situadas entre los círculos CC e II salen y se ponen formando un ángulo distinto respecto de la línea del horizonte en cada una de las rotaciones de la esfera; las más próximas al círculo II apenas si se elevan por encima del horizonte sur y sólo son visibles durante un breve lapso.

Finalmente, las estrellas situadas por debajo del círculo II y cercanas al punto S nunca aparecen ante la vista de un observador situado en A, pues se las oculta el horizonte.

El movimiento del Sol, la Luna y los planetas se representa agregando esferas concéntricas e interconectadas entre la esfera de las estrellas y la Tierra. La rotación simultánea en torno de diferentes ejes reproduce el movimiento del cuerpo celeste que se quiere estudiar.

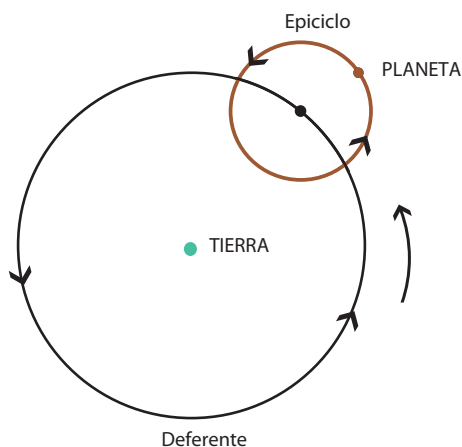
En la figura 1.2 se muestra un corte transversal de las esferas correspondientes al Sol y las estrellas, cuyo centro común es la Tierra y cuyos puntos de contacto son los extremos del eje inclinado de la esfera interior que le sirven de pivotes. La esfera exterior es la esfera de las estrellas, su eje pasa por los polos norte y sur celestes y da una revolución completa alrededor del mismo, en sentido oeste, cada 23 horas 56 minutos. El eje de la esfera interior (esfera correspondiente al Sol) está en contacto con la esfera exterior en dos puntos diametralmente opuestos y situados a una distancia angular de  $23^{\circ}30'$  y en medio de cada uno de los polos celestes; el ecuador de la esfera interior, cuando se lo observa desde la Tierra, coincide con la eclíptica de la esfera de las estrellas, sea cual sea la rotación de ambas esferas. Si añadimos al sistema que acabamos de exponer una nueva esfera animada de un movimiento de rotación muy lento, es posible describir con bastante aproximación el movimiento observado de la Luna.



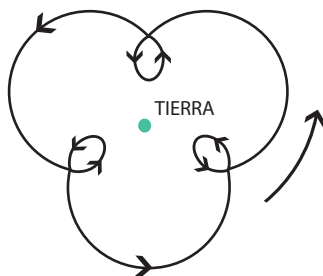
**Figura 1.2.** Trayectoria del Sol en el universo de las dos esferas.

De esta manera, en la antigüedad se podía explicar con dos o tres esferas concéntricas el movimiento diario del Sol y de la Luna. Pero no era posible explicar el movimiento anual <sup>1</sup> de los planetas debido a que éstos realizan un movimiento general hacia el este, pero en determinados momentos de su trayectoria cambian de sentido y se mueven hacia el oeste. Este último movimiento es conocido como la retrogradación de los planetas. Los astrónomos de la antigüedad se dieron cuenta de que agregando esferas al esquema anterior es posible reproducir el movimiento de retrogradación. Sin embargo, no era posible explicar el aumento que se observaba en el brillo de los planetas durante el movimiento de retrogradación. Un astrónomo egipcio, Claudio Ptolomeo (178 - 100) A.C., en el tratado astronómico *Almagesto* propuso un sistema matemático que intentaba solucionar, dentro del marco conceptual del universo de las dos esferas, esta discrepancia entre teoría y observación.

<sup>1</sup> Nos referimos al movimiento correspondiente a las sucesivas posiciones a lo largo de un año.



**Figura 1.3.** En la astronomía de la antigüedad la retrogradación de los planetas se explica mediante epiciclos y deferentes.



**Figura 1.4.** Movimiento de un planeta sobre la esfera de las estrellas en el esquema conceptual de Ptolomeo.

El sistema matemático propuesto por Ptolomeo fue utilizado por varios astrónomos de la antigüedad para explicar el movimiento de los planetas, incluyendo la variación de brillo durante la retrogradación. Se compone de un pequeño círculo, el epiciclo, que gira uniformemente alrededor de un punto situado sobre la circunferencia de un segundo círculo en rotación, el deferente (ver figura 1.3). El planeta P está situado sobre el epiciclo y el centro del deferente coincide con el centro de la Tierra. El sistema epiciclo-deferente sólo pretende explicar el movimiento planetario respecto de la esfera de las estrellas. Si el epiciclo da exactamente tres vueltas alrededor de su centro móvil mientras el deferente efectúa una revolución completa, girando ambos círculos en un mismo sentido, el movimiento total del planeta sobre la esfera de las estrellas tiene lugar según la curva representada en la figura 1.4. Cuando la rotación del epiciclo arrastra al planeta fuera del deferente, los movimientos combinados de éste y del epiciclo obligan al planeta a dirigirse hacia el este, pero cuando el movimiento del epiciclo le coloca dentro del deferente, aquél arrastra al planeta hacia el oeste. Así, cuando el planeta está en su posición más próxima a la Tierra el movimiento resultante es hacia el oeste. De esta manera es posible explicar el aumento del brillo de los planetas durante el movimiento de retrogradación. En el sistema epiciclo-deferente descrito en la figura 1.3, el epiciclo completa exactamente tres revoluciones por cada una de las que efectúa el deferente. Esto es una simplificación que no es característica del movimiento de ningún planeta. Por ejemplo, el epiciclo de Mercurio debe completar algo más de tres vueltas mientras el deferente da un giro completo.

De esta manera, para describir los movimientos de todos y cada uno de los planetas, los astrónomos de la antigüedad utilizaban un sistema epiciclo-deferente particular para cada uno de ellos. A su vez, si bien el sistema es capaz de dar cuenta de la retrogradación de los planetas, no puede describir otras anomalías.

## 1.1.2 El movimiento de los cuerpos sobre la Tierra

Las ideas de Aristóteles, filósofo y científico griego que vivió entre los años 384 y 323 a.C, constituyeron el punto de partida para la mayor parte del pensamiento cosmológico medieval y gran parte del renacentista. El universo de Aristóteles es un universo lleno de materia donde el vacío no existe; es cerrado y no tiene exterior: "afuera" del universo no existe

nada, ni espacio, ni materia. Posee dos regiones bien diferenciadas: la región supralunar y la región sublunar. La región supralunar contiene ocho cáscaras esféricas concéntricas, es decir con un centro común. Comprenden a las estrellas fijas, los cinco planetas conocidos en la antigüedad (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), el Sol y la Luna. La Tierra se encuentra en el centro geométrico de las esferas concéntricas. Todas las estrellas se encuentran sobre la mayor de las cáscaras, es decir, que están a igual distancia de la Tierra. Más allá de la cáscara de las estrellas, donde no hay ni espacio ni tiempo, "está" el motor inmóvil, que ha movido el mundo desde siempre. Este motor inmóvil impulsa la esfera de las estrellas fijas, cuyo movimiento se transfiere hacia la esfera de Saturno y así sucesivamente hasta llegar a la cáscara lunar, y a su vez se trasmite al mundo sublunar. Por lo tanto, las cáscaras no sólo se mueven, sino que también transmiten el movimiento. En la práctica, Aristóteles utilizó 55 esferas para explicar el movimiento del Sol, la Luna y los planetas. Este agregado se debía a cuestiones físicas, ya que si bien todas las esferas adjuntas debían hallarse mecánicamente conectadas, el movimiento individual de cada planeta no debía transmitirse a los demás. Las esferas agregadas se denominaron esferas neutralizadoras y su función era la de compensar los movimientos de algunas de las esferas primarias. Según Aristóteles, el mundo supralunar, cuyo límite inferior lo constituye la cáscara correspondiente a la Luna, se encuentra lleno de éter, un elemento cristalino y transparente sin peso, incorruptible y que no se mezcla con nada. Su movimiento es el más perfecto, es eterno, no tiene principio ni fin; por lo tanto, es un movimiento circular. Los planetas y estrellas, así como las cáscaras esféricas cuya rotación explica los movimientos celestes, están hechos de éter.

La región sublunar está totalmente ocupada por cuatro elementos. Según las leyes aristotélicas del movimiento, en ausencia de empujes o atracciones exteriores, dichos elementos se ordenan en una serie de cáscaras concéntricas de modo similar a como se distribuyen las esferas de éter que los envuelve. La tierra, que es el elemento más pesado, se coloca naturalmente en la esfera que constituye el centro geométrico del universo. Todos aquellos cuerpos en los que ella predomine caen, buscando su lugar natural que es el centro de la Tierra; cuanto más pesados sean, más rápidamente caerán. El agua, elemento también pesado, pero menos que la tierra, forma una envoltura esférica alrededor de la región central ocupada por la tierra. El fuego, el más ligero de los elementos, se eleva espontáneamente para constituir su propia esfera justo por debajo de la Luna. Y el aire, también un elemento ligero, completa la estructura formando una esfera que llena el hueco existente entre el agua y el fuego. Una vez en dichas posiciones, los elementos permanecen en reposo manteniendo toda su pureza. Sin embargo, los elementos y los cuerpos que conforman se ven constantemente arrancados de sus ubicaciones naturales. Para ello es necesaria la intervención de una fuerza, porque según Aristóteles todo elemento se resiste a desplazarse y cuando lo hace siempre intenta volver a su posición natural por el camino más corto posible. Por ejemplo, cuando tomamos una roca, percibimos cómo tira hacia abajo en un intento por alejarse del lugar que está ocupando y recobrar su posición natural en el centro del universo; del mismo modo, en una noche despejada, vemos cómo las llamas de una hoguera forcejean se elevan tratando de recuperar su lugar natural en la periferia de la región sublunar.

Según la física aristotélica, la esfera de la Luna no sólo divide al universo en dos regiones con diferente composición natural, también lo divide en dos regiones con diferentes leyes.

Todos los movimientos se dan respecto de un punto: el centro del universo. Los movimientos sublunares son rectilíneos y consisten en alejarse hacia arriba o hacia abajo del centro (según la pesadez o la liviandad). Los movimientos supralunares son desplazamientos circulares alrededor del centro del universo.

Como en este libro nos interesan las leyes del movimiento, vamos a discutir, con un poco más de detalle, la caída de los cuerpos en distintos casos. Dice Aristóteles en *Del Cielo*:

*"Si se colocara la Tierra en la posición actualmente ocupada por la Luna, cada una de sus partes no se vería atraída hacia el conjunto sino hacia el lugar que ahora ocupa dicho conjunto."*

Es decir, que cada una de sus partes se ve atraída hacia su "lugar natural" en el centro del universo. Todo proceso de cambio, como el que involucra el movimiento de los cuerpos terrestres, no constituye un estado, por el contrario, es algo transitorio. El verdadero estado de los cuerpos sublunares es el reposo. Siguiendo con la misma línea de pensamiento, según la descripción física de Aristóteles, el movimiento natural de una piedra sólo está regido por el espacio y no por su relación con otros cuerpos, ni por su movimiento previo. Por ejemplo, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba se aleja del suelo y retorna a él a lo largo de una línea recta fijada de una vez por todas en el espacio, y si la Tierra se mueve mientras la piedra está en el aire no caerá sobre el mismo punto del que partió. Análogamente, las nubes que ocupan ya los lugares naturales que les han sido asignados, serían dejadas atrás por una Tierra en movimiento. La única posibilidad que cabría para que una piedra o una nube siguieran a la Tierra en su movimiento sería que ésta arrastrara el aire que la circunda y, aún en tal caso, el movimiento del aire no empujaría a la piedra con la fuerza necesaria para comunicarle la misma velocidad que posee la Tierra en su rotación. Este tipo de razonamientos pueden aplicarse para explicar el movimiento de un proyectil. Este es uno de los puntos más débiles de la teoría de Aristóteles.

Supongamos el problema de un proyectil lanzado desde una cierta altura con velocidad inicial en la dirección horizontal. Aristóteles suponía que el aire perturbado era la fuente del impulso que prolonga el movimiento del proyectil una vez perdido todo contacto con el elemento propulsor. Sostenía que el proyectil abandona con toda rapidez la posición que ocupaba y que la naturaleza, que no tolera vacío alguno, envía de inmediato el aire tras él para que llene el vacío creado. El aire, desplazado de tal forma, entra en contacto con el proyectil y lo empuja para adelante. Este proceso se repite continuamente a lo largo de una cierta distancia. Esta concepción errónea fue el objeto de una de las primeras agudas críticas de Galileo a la mecánica aristotélica.

---

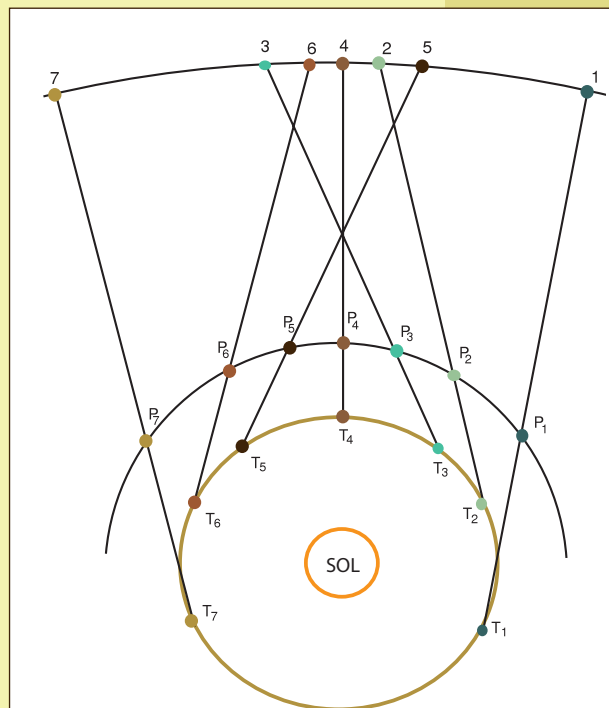
## □ 1.2. El movimiento de los cuerpos celestes para los astrónomos modernos

---

### 1.2.1 Nicolás Copérnico

---

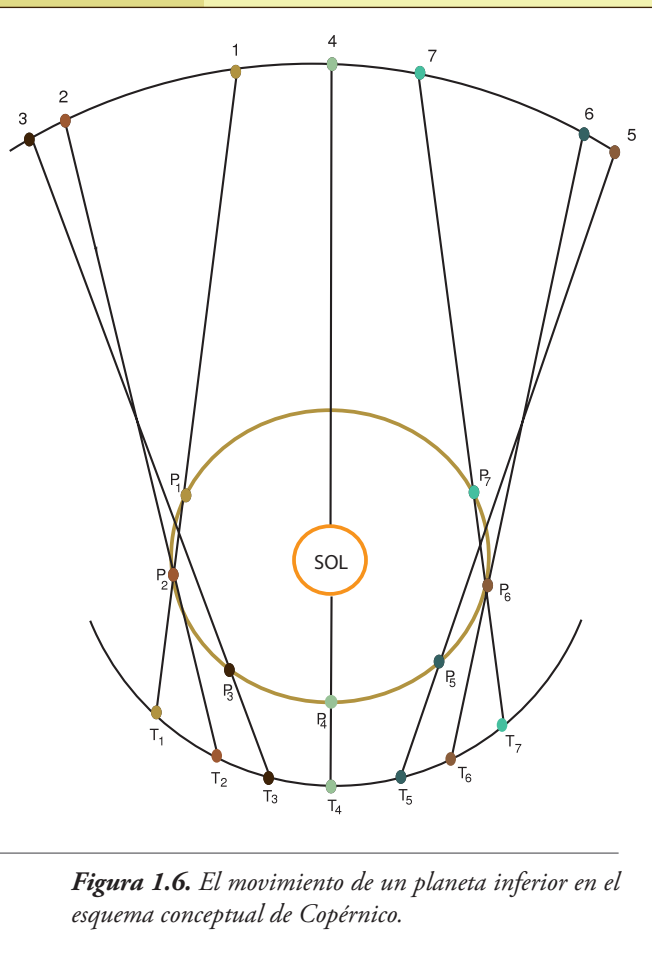
Nicolás Copérnico (1473-1543) fue a la vez: el último astrónomo ptolemaico y el primer astrónomo moderno. En 1507 difundió el primer esbozo de su sistema heliocéntrico: el *Commentariolus*. Su obra más importante titulada *De revolutionibus* se publicó en 1543. En ella describe con todo detalle su sistema cosmológico. En el centro del universo, fijo, se encuentra el Sol. La Tierra es transportada alrededor del Sol por una esfera similar a la que hasta entonces se había usado para arrastrar el Sol alrededor de la Tierra. Copérnico atribuyó a la Tierra tres movimientos circulares simultáneos: una rotación cotidiana axial, un movimiento orbital anual y un movimiento cónico y anual del eje. La rotación diaria hacia el este es la que explica los círculos cotidianos aparentes descritos por las estrellas, el Sol, la Luna y los planetas. El movimiento retrógrado de un planeta a través de las estrellas sólo es aparente, y está producido, lo mismo que el movimiento aparente del Sol a lo largo de la eclíptica, por el movimiento orbital de la Tierra. Según Copérnico, el movimiento que los astrónomos de la antigüedad explicaban con la ayuda de epiciclos mayores era el de la Tierra, atribuido por el observador a los planetas a causa de su creencia en la propia inmovilidad. En la figura 1.5 se muestran en proyección sobre el fondo fijo de la esfera estelar sucesivas posiciones aparentes de un planeta superior en movimiento. La figura 1.6 nos muestra sucesivas posiciones aparentes, vistas desde una Tierra móvil, de un planeta inferior. Tanto en uno como en otro caso, sólo se han indicado los movimientos orbitales; se ha prescindido de la rotación diaria de la Tierra, que es la que produce el rápido movimiento aparente hacia el oeste del Sol, los planetas y las estrellas. Las sucesivas posiciones de la Tierra sobre su órbita circular centrada en el Sol se han rotulado en las figuras 1.5 y 1.6 por los puntos T1, T2, . . . , T7 y las correspondientes posiciones sucesivas del planeta por P1, P2, . . . , P7; las respectivas posiciones aparentes del planeta están indicadas en la figura 1.5 con 1, 2, . . . , 7. Dichas posiciones se obtienen prolongando la recta que une la Tierra con el planeta hasta cortar la esfera de las estrellas. De las figuras 1.5 y 1.6 se puede ver que el movimiento aparente del planeta a través de las estrellas es hacia el este de 1 a 2 y de 2 a 3. A continuación el planeta retrograda de 3 a 4 y de 4 a 5. Finalmente, invierte de nuevo la dirección de su movimiento y se desplaza con normalidad de 5 a 6 y de 6 a 7. Cuando la Tierra completa su giro orbital, el planeta prosigue su movimiento normal hacia el este, desplazándose con mayor rapidez cuando se encuentra en posición diametralmente opuesta a la Tierra respecto del Sol. Así, en el sistema de Copérnico los planetas observados desde la Tierra parecerán moverse hacia el este durante la mayor parte del tiempo; sólo retrogradan cuando la Tierra, en su movimiento orbital los sobrepasa (planetas superiores) y cuando



**Figura 1.5.** El movimiento de un planeta superior en el esquema conceptual de Copérnico.

son ellos los que sobrepasan a la Tierra (planetas inferiores). El movimiento retrógrado sólo puede producirse cuando la Tierra ocupa su posición más próxima respecto del planeta cuyo movimiento se estudia, hecho totalmente acorde con los datos de observación (los planetas brillan más cuando retrogradan). El movimiento retrógrado y la variación del tiempo empleado en recorrer la eclíptica constituyen las dos irregularidades planetarias que, en la antigüedad, habían impulsado a los astrónomos a emplear epiciclos y deferentes para tratar el problema de los planetas. Copérnico consiguió ofrecer una misma explicación cualitativa de los movimientos aparentes con sólo siete círculos. Le bastó con emplear un sólo círculo centrado en el Sol para cada uno de los seis planetas conocidos y un círculo para la Luna. De esta manera, su sistema era mucho más simple que cualquier sistema ptolemaico, y explicaba, de la misma manera, las observaciones disponibles.

### 1.2.2 Tycho Brahe y Johannes Kepler



**Figura 1.6.** El movimiento de un planeta inferior en el esquema conceptual de Copérnico.

Tycho Brahe (1546 - 1601) fue el astrónomo europeo más importante de la segunda mitad del siglo XVI. Fue el responsable de cambios de enorme importancia en las técnicas de observación astronómica. Diseñó y construyó un gran número de nuevos instrumentos, más grandes, más sólidos y mejor calibrados que los usados hasta entonces. Buscó y corrigió muchos errores debidos al empleo de instrumentos imprecisos, estableciendo de este modo, un conjunto de nuevas técnicas para recoger información precisa sobre las posiciones de estrellas y planetas. A su vez, Brahe inauguró la técnica de efectuar observaciones regulares de los planetas, modificando la práctica tradicional de observarlos sólo cuando estaban situados en algunas configuraciones particularmente favorables. La precisión de sus observaciones de las posiciones de los planetas parece haber sido, por lo general, de unos 4' de arco. Precisión más de dos veces superior a la alcanzada por los mejores observadores de la antigüedad.

Johannes Kepler (1571-1630) fue el primer astrónomo que intentó introducir una física cuantitativa para la descripción de los fenómenos observados en los cielos, buscando explicaciones mecánicas que pudiesen ser formuladas en términos matemáticos. Kepler suponía que el movimiento de los planetas se debía a una fuerza invisible proveniente del Sol, y le disgustaba la idea de Copérnico de que el centro del sistema debía ser un punto en el vacío.



En el sistema de Ptolomeo, los planos de todas las órbitas se intersecaban en el centro de la Tierra. Copérnico conservó una propiedad similar para la Tierra al suponer que lo hacían en el centro de la órbita terrestre, un punto ligeramente corrido del Sol. En cambio, para Kepler la intersección debía darse en el Sol, dado que suponía que la fuerza que provocaba los movimientos planetarios sólo podía provenir de él.

Kepler efectuó sus descubrimientos esenciales estudiando el movimiento de Marte, un planeta cuya excentricidad y proximidad a la Tierra eran responsables de las irregularidades que habían constituido un problema permanente para los astrónomos. Ptolomeo había sido incapaz de explicar el movimiento de Marte de forma tan satisfactoria como el de los restantes planetas y Copérnico no había aportado nada nuevo al respecto. Utilizando los datos obtenidos por Tycho Brahe, Kepler intentó, sin éxito, explicar con combinaciones de círculos y luego con óvalos la órbita observada de Marte. Finalmente, reparó en que las discrepancias entre sus tentativas teóricas y las observaciones variaban según una ley matemática familiar, y estudiando esta regularidad descubrió que podían reconciliarse teoría y observación si se consideraba que los planetas se desplazaban con velocidad variable sobre órbitas elípticas. Estas conclusiones se conocen como la primera y segunda ley de Kepler:

1. Los planetas se desplazan a lo largo de elipses, en uno de cuyos focos está el Sol.
2. La velocidad orbital de los planetas varía de tal manera que una línea que una el Sol con el planeta barre áreas iguales, sobre la elipse, en intervalos de tiempo iguales.

La tercera ley de Kepler, formulada 10 años después, es una ley astronómica de un nuevo género ya que establece una relación cuantitativa entre las velocidades de planetas situados en órbitas diferentes:

3. Si  $T_1$  y  $T_2$  son los respectivos períodos que tardan dos planetas en completar sus correspondientes revoluciones y  $R_1$  y  $R_2$  las distancias medias de tales planetas al Sol, entonces se cumple la siguiente relación:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \propto \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 \quad (1.1)$$

donde  $\propto$  indica proporcionalidad. Estas leyes juegan un papel central en la formulación ulterior de la ley de Newton de la gravitación.

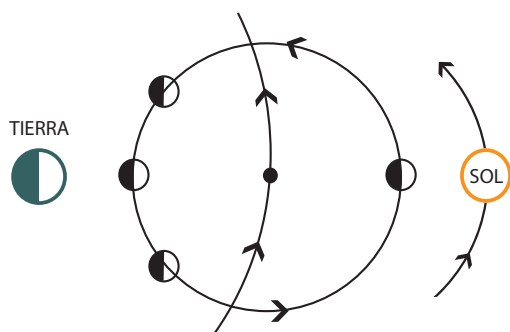
---

### 1.2.3 Galileo Galilei

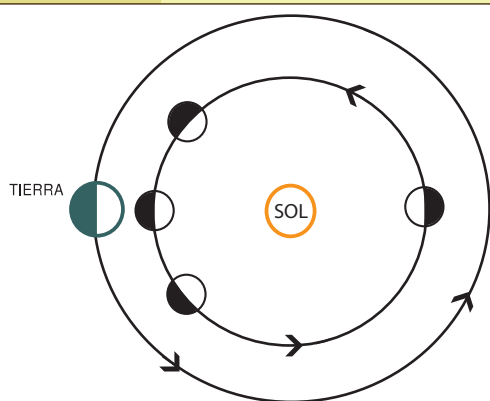
---

En 1609 Galileo Galilei (1564-1642) observó por primera vez el cielo a través de un telescopio, aportando a la astronomía los primeros datos cualitativos nuevos desde los recopilados en la antigüedad. El tamaño del Sol, la Luna y los planetas era aumentado por el uso del telescopio; en cambio, las estrellas seguían viéndose como puntos. Cuando Galileo dirigió su telescopio a la Luna, descubrió que su superficie estaba cubierta por cavidades, cráteres, valles y montañas. Midiendo la longitud de las sombras proyectadas en los





**Figura 1.7.** Las fases de Venus en el sistema ptolemaico; un observador terrestre siempre estaría limitado a ver una delgada "media luna" de la cara iluminada de Venus.



**Figura 1.8.** Las fases de Venus en el sistema copernicano; un observador terrestre puede ver casi toda la cara iluminada.

cráteres y las montañas, consiguió estimar la profundidad de los declives y protuberancias lunares, iniciando con ello una descripción de la topografía lunar. Galileo encontró que dicha topografía era bastante similar a la terrestre. Esto entraba en total contradicción con la división aristotélica entre la región celeste y la región terrestre.

Además, las observaciones telescópicas del Sol, mostraban también una serie de imperfecciones, entre ellas una serie de manchas sombreadas que aparecían y desaparecían sobre su superficie. La existencia de tales manchas contradecía la supuesta perfección de la región celeste; su aparición y desaparición contradecían la inmutabilidad de los cielos. A su vez, Galileo observó a Júpiter con el telescopio y descubrió cuatro puntos iluminados muy próximos a dicho planeta. Observaciones múltiples efectuadas en noches sucesivas mostraron que las posiciones relativas de dichos puntos se modificaban de tal forma, que la explicación más simple era suponer que giraban continuamente y de forma muy rápida alrededor de Júpiter. Estos cuerpos celestes eran las cuatro lunas principales de Júpiter. Muchas de las observaciones telescópicas de Galileo contribuyeron a recopilar datos que apoyaban el sistema astronómico de Copérnico. Sin embargo, las observaciones de las fases de Venus aportaron una prueba directa de la correcta fundamentación de la propuesta de Copérnico. En la figura 1.7 se muestra el caso de Venus fijado a un epiciclo que se mueve sobre un deferente centrado en la Tierra. Si la Tierra, el Sol y el centro del epiciclo están alineados, un observador situado sobre la Tierra nunca podrá ver otra cosa que un sector, en fase creciente, del planeta. Por el contrario, si la órbita de Venus circunda al Sol (ver figura 1.8), un observador situado sobre la Tierra podrá ver un ciclo casi completo de las fases de Venus.

## □ 1.3. El movimiento sobre la Tierra a partir de Galileo

### 1.3.1 La caída de los cuerpos y la ley de inercia

Galileo no creía que el espacio estuviese estructurado en forma absoluta, ni que existiesen un arriba y un abajo absolutos (como lo eran para Aristóteles la esfera de las estrellas fijas y el centro de la Tierra, respectivamente). Para Galileo, el lugar natural de un cuerpo estaba

determinado por su "fuente". Así el lugar natural de un trozo de tierra era la Tierra y una piedra, cuando cae, no hace sino regresar a su lugar natural. De igual manera, un trozo de Luna, abandonado libremente, debía retornar a la Luna. A su vez, Galileo sostuvo que todos los cuerpos, independientemente de su tamaño, peso y composición, debían caer incrementando su velocidad de igual forma. En relación con esta afirmación propuso el experimento de la torre de Pisa, en el que se dejaban caer balas de cañón de distinto tamaño para ver si llegaban al suelo al mismo tiempo. Por otro lado, Galileo enunció la ley de caída de los cuerpos que relaciona la distancia recorrida con el cuadrado del tiempo transcurrido. En sus *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias* estableció el Teorema II, Proposición II, que dice:

"Si un móvil cae, partiendo del reposo, con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios por él recorridos en cualquier tiempo que sea están entre sí como el cuadrado de la proporción entre los tiempos, o lo que es lo mismo, como los cuadrados de los tiempos".

A su vez, Galileo entiende el problema del tiro horizontal de un proyectil como una superposición de movimientos: un movimiento horizontal con velocidad constante y un movimiento vertical acelerado. Para Galileo, si un movimiento cesa es porque existen causas para que ello ocurra así. Esto es totalmente opuesto a la concepción aristotélica de que los cuerpos supralunares se encuentran naturalmente en reposo. En su obra *Mecánica*, Aristóteles sostuvo: "El cuerpo en movimiento se detiene cuando la fuerza que lo empuja deja de actuar". Sobre el mismo punto, Galileo expuso en *Dos nuevas ciencias*:

"Toda velocidad, una vez impartida a un cuerpo, se conservará mientras no existan causas externas de aceleración o frenado, condición que se cumple solamente sobre los planos horizontales; pues el movimiento de un cuerpo que cae por una pendiente se acelera, mientras que el movimiento hacia arriba se frena; de esto se infiere que el movimiento sobre un plano horizontal es perpetuo; pues si la velocidad es uniforme, no puede disminuirse y menos aún destruirse."

En el caso del proyectil, éste tiende a mantener su movimiento horizontal a pesar de la existencia del aire que le opone una resistencia. Si no hubiese aire, se movería con más facilidad. La desaparición del aire haría que el proyectil se moviese manteniendo la misma velocidad horizontal (aunque en la práctica no pueda mantenerse, pues la gravedad lo hace caer y finalmente chocar con el piso). Esta clave acerca del movimiento de los cuerpos encontrada por Galileo (el principio de inercia) será formalizada por Newton:

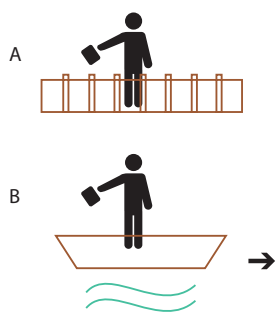
"Un cuerpo en reposo o en movimiento se mantendrá en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme, a menos que sobre él actúen fuerzas exteriores que lo obliguen a modificar dichos estados."

---

### 1.3.2 Relatividad del movimiento

---

Imaginemos la siguiente situación: un barco se desplaza a velocidad uniforme y pasa debajo de un puente. En el puente hay un hombre que sostiene una piedra; en el barco, un marinero, subido a su mástil, sostiene otra. Cuando el barco pasa por debajo del puente y ambos hombres



**Figura 1.9.** Dos hombres, uno ubicado en un puente, y otro exactamente debajo en un barco, con sus respectivas piedras.

están situados sobre la misma vertical, dejan caer sus respectivas piedras (ver figura 1.9). No existe duda acerca de que la piedra A del hombre del puente cae por debajo de él. El problema se refiere a la piedra B. Para quienes abordaron este problema antes de Galileo (incluyendo por ejemplo a Tycho Brahe), las dos piedras deben caer en el mismo sitio, independientemente de su estado de movimiento anterior. Ambas deben buscar su lugar natural, y para alcanzarlo, deberán bajar en línea recta. En consecuencia, sus caídas deberían ser idénticas. Por lo tanto, el marinero tendría que ver su piedra caer hacia atrás y al pie del puente (ver figura 1.10). Para Galileo, la piedra B cae al pie del mástil y no al pie del puente debido a que en la piedra B existe una superposición de movimientos, que se pueden identificar analizando lo que verían el hombre del puente y el hombre del barco. Ambos observadores, coinciden en que A cae al pie del puente y B al pie del mástil. Pero mientras que el hombre del puente ve caer a la piedra A verticalmente y a la piedra B describiendo una parábola (ver figura 1.11 izquierda), el marinero ve que A describe una parábola hacia atrás y B una vertical (ver figura 1.11 derecha). En resumen, para Galileo el movimiento y la forma del movimiento *son relativos al sistema de referencia*.

Ahora bien, supongamos que el barco estuviese cubierto y que el marinero no pudiese ver el exterior. Si al realizar la experiencia se obtiene como resultado que su piedra, la B, cae al pie del mástil, él también podría pensar que su barco se encuentra en reposo, anclado en algún puerto, dado que es eso mismo lo que observa cuando deja caer una piedra en tierra firme.

Vemos, entonces, que las experiencias realizadas por el marinero en un barco anclado en puerto, o en el mismo barco moviéndose con velocidad constante, serían indistinguibles y deberían dar cuenta del mismo resultado. Esto es lo que se conoce como el *principio de relatividad* de Galileo y suele ser formulado de la siguiente manera:

"Si las leyes de la mecánica son válidas en un sistema de referencia inercial, también se cumplen en cualquier sistema de referencia que se mueva uniformemente respecto del primero".

Volveremos sobre este tema en los capítulos posteriores.

## □ 1.4. Unificación de las leyes del movimiento

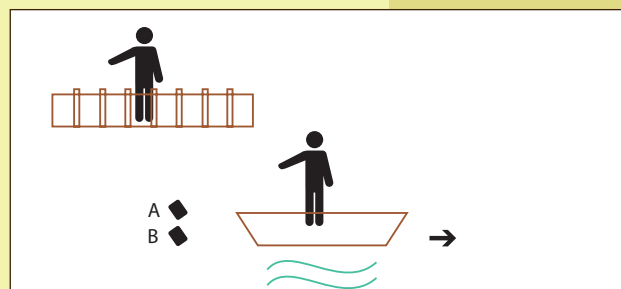
En 1666 Isaac Newton (1642 - 1727) logró determinar matemáticamente en qué grado un planeta debe "caer" hacia el Sol, o la Luna hacia la Tierra, para mantenerse estable en una órbita elíptica determinada. Posteriormente, descubrió que los valores matemáticos que regían la caída variaban en función de la velocidad del planeta y del semieje mayor de su órbita elíptica. A partir de estos cálculos, Newton pudo deducir dos consecuencias físicas de enorme importancia. Por un lado, estableció que si la velocidad de un planeta y el semieje mayor de su órbita elíptica están vinculados entre sí por la tercera ley de Kepler, la atracción de un planeta hacia el Sol debe

decrecer en razón de la inversa del cuadrado de la distancia entre ambos. El segundo de los descubrimientos de Newton fue igualmente importante. Advirtió que esta misma ley que regía la atracción entre el Sol y los planetas explicaba perfectamente bien las diferencias entre las velocidades con que "caían" a la Tierra la Luna y una piedra. Supongamos que en la superficie de la Tierra y desde la cima de una montaña exageradamente alta, un cañón lanza proyectiles cada vez con mayor velocidad inicial. Según Galileo, estos proyectiles describen parábolas <sup>2</sup>. En la figura 1.12 se puede ver que el proyectil E correspondería al caso de un cuerpo que en su "caída" sigue la forma de la Tierra. Algo parecido ocurre con la Luna. Horrocks, un científico inglés, había calculado la órbita de la Luna utilizando las leyes de Kepler. Estos datos, acoplados a los resultados de los cálculos de Galileo para el movimiento parabólico de los proyectiles, le proporcionaron a Newton la información necesaria para identificar la órbita kepleriana de la Luna con la de un proyectil. La idea era que, si la Luna no caía por la acción de la fuerza gravitatoria, era debido a que su velocidad inicial era similar a la del proyectil E de la figura 1.12. Lo mismo sucede al hacer girar una piedra con un hilo: la tensión del hilo hace las veces de fuerza gravitatoria y la piedra describe circunferencias hasta que se la suelta. La forma de la acción gravitatoria que permite explicar las órbitas de los planetas en torno del Sol, y de la Luna alrededor de la Tierra, se inspira en lo que se experimenta con los cuerpos terrestres. Con Newton, los conceptos de lugar natural o de tendencias a volver a un todo desaparecen definitivamente. Además, el concepto mismo de caída experimenta una transformación: se trata de un movimiento que se efectúa bajo la acción de la fuerza gravitatoria.

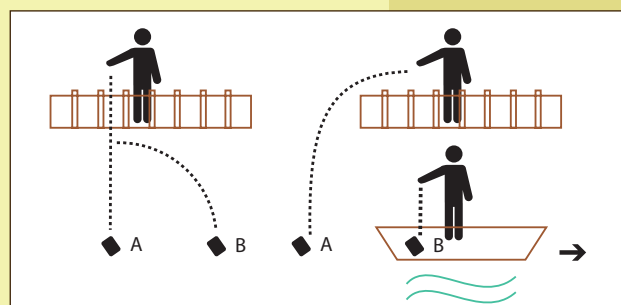
## □ 1.5. La teoría de la Relatividad

Las leyes que gobiernan los fenómenos electromagnéticos fueron concebidas por James Clerk Maxwell (1831 - 1879), luego de las investigaciones sobre la inducción electromagnética llevadas a cabo por Faraday hacia 1831. Las leyes de Maxwell predicen que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas coincide con el valor medido de la velocidad de la luz, lo cual llevó a Maxwell a concluir que la luz es un fenómeno electromagnético. Así como las ondas

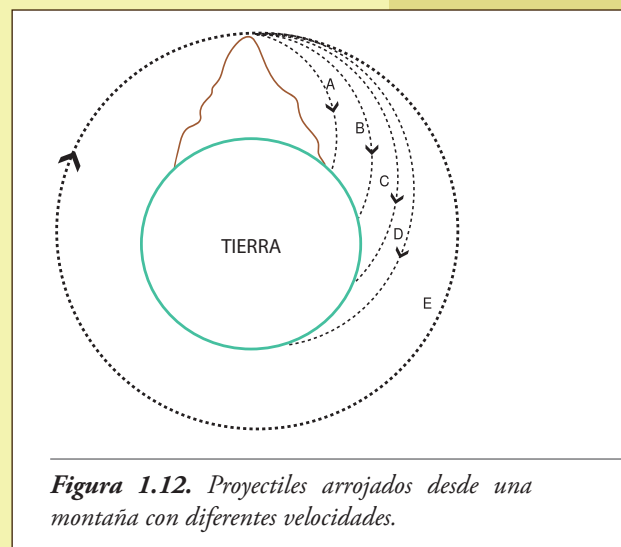
<sup>2</sup> Esta es una aproximación válida para alturas pequeñas; en realidad, describen arcos de elipses.



**Figura 1.10.** El problema del movimiento relativo antes de Galileo.



**Figura 1.11.** El problema del movimiento relativo según Galileo. Izquierda: lo que observaría el hombre del puente. Derecha: lo que observaría el hombre del barco.



**Figura 1.12.** Proyectiles arrojados desde una montaña con diferentes velocidades.

sonoras necesitan de un medio material (aire, agua, etc,...) para propagarse, en esa época se postuló que la luz se propaga en un medio denominado *éter*, que se encontraba en todo el espacio llegando hasta las estrellas. Como la luz viaja tan rápido, se postuló que el éter era un elemento muy poco denso, y muy difícil de comprimir. Por otro lado, el éter debía permitir a los cuerpos sólidos atravesarlo libremente, o de lo contrario los planetas irían reduciendo su velocidad. Por todos estos motivos, la detección directa del éter era muy difícil de realizar.

Sin embargo, Michelson (1852 - 1931), físico nacido en Estados Unidos, observó que si fuera posible medir la velocidad de la luz con suficiente precisión, también se podría medir la velocidad de la luz que viaja, para un observador en la Tierra, a favor del éter y compararla con la velocidad de la luz que viaja contra el éter. A partir de estas mediciones, se podría deducir la velocidad del éter. Basado en este principio, Michelson diseñó un interferómetro (ver esquema en la figura 1.13) para detectar el movimiento de la Tierra con respecto al éter. Un haz de luz es separado por una lámina semiplataada. Luego de la separación, cada parte recorre caminos de ida y vuelta distintos, para reunirse nuevamente en la lámina separadora. Si el laboratorio (la Tierra) se mueve con velocidad  $V$  respecto del éter, entonces el tiempo de viaje de ida y vuelta de cada rayo dependerá de  $V$  de manera diferente, ya que recorren caminos distintos. Si suponemos que la dirección del movimiento de la Tierra coincide con la del rayo 2 (ver figura 1.14), entonces respecto de la Tierra el rayo 2 recorre el camino de ida con velocidad  $c - V$  y el camino de vuelta con velocidad  $c + V$ . Por lo tanto, el tiempo de viaje de ida y vuelta del rayo 2 es:

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{l_2}{c - V} + \frac{l_2}{c + V} \\ &= \frac{2l_2/c}{1 - V^2/c^2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

El tiempo de viaje de ida y vuelta del rayo 1 se puede calcular más fácilmente en el sistema de coordenadas fijo al éter. Recordemos que en la teoría clásica, los tiempos y las distancias se consideran cantidades invariantes. El recorrido del rayo 1 en el sistema fijo al éter se muestra en la figura 1.15. En el sistema fijo al éter la luz viaja con velocidad  $c$  en todas las direcciones. Los tramos de ida y vuelta demandan cada uno un tiempo  $t_1/2$ ; este tiempo se puede calcular, notando que cada tramo es la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyo cateto mayor es  $l_1$  y cuyo cateto menor es  $Vt_1/2$  (ver figura 1.15). Entonces, aplicando el teorema de Pitágoras resulta que:

$$\left(\frac{ct_1}{2}\right)^2 = l_1^2 + \left(\frac{Vt_1}{2}\right)^2 \quad (1.3)$$

De aquí se obtiene:

$$t_1 = \frac{2l_1/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (1.4)$$

De esta manera, la diferencia de tiempos de viaje es:

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_2 - t_1 \\ &= \frac{2l_2/c}{1 - V^2/c^2} - \frac{2l_1/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Si se gira el interferómetro en 90° habrá un intercambio entre los rayos 1 y 2, de manera que la diferencia de tiempos cambia a

$$\begin{aligned}\Delta t_{90^\circ} &= t_2 - t_1 \\ &= \frac{2l_2/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{2l_1/c}{1 - v^2/c^2}\end{aligned}\quad (1.6)$$

En la práctica, la dirección del movimiento del laboratorio respecto del éter sería desconocida. Sin embargo, girando el interferómetro paulatinamente se debería poder detectar que el desfase producido por la diferencia de tiempos de viaje varía continuamente entre dos valores extremos. El fenómeno debería evidenciarse a través de un desplazamiento de las franjas de interferencia. El experimento fue realizado por primera vez en 1881 y luego repetido en 1886 junto a Edward Morley (1838-1923), químico nacido en Estados Unidos. En ambos casos el resultado fue nulo, es decir, no se observaron franjas de interferencia. En consecuencia, no se pudo medir la velocidad de la Tierra respecto del éter ni probar la existencia de un sistema inercial privilegiado donde el valor de la velocidad de la luz sea  $c$ . De esta manera, se concluyó que *la luz se propaga en vacío con la misma velocidad en todo sistema de referencia inercial*. Ante los resultados nulos en el experimento de Michelson y Morley, surgieron intentos de explicar estos resultados, como, por ejemplo, las teorías de emisión, en las cuales se postulaba que la luz viaja con velocidad  $c$  en el sistema fijo a su fuente. Sin embargo este tipo de teorías no lograban explicar los resultados de otros experimentos. Otros intentos teóricos dejaban de lado la naturaleza ondulatoria de la luz, postulada por Maxwell y corroborada en el laboratorio en 1887.

En la teoría clásica, la relación entre tiempos y posiciones de dos sistemas inerciales está dada por las transformaciones de Galileo. Supongamos un sistema de referencia inercial  $K$  y otro sistema también unidimensional  $K'$  que se mueve con velocidad constante respecto de  $K$ ; la relación entre posiciones y tiempos de ambos sistemas está dada por:

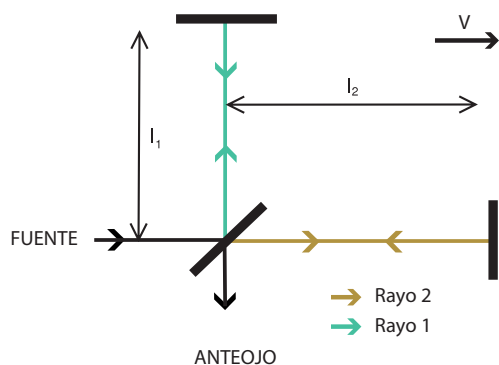
$$x' = x + vt \quad (1.7)$$

$$t' = t \quad (1.8)$$

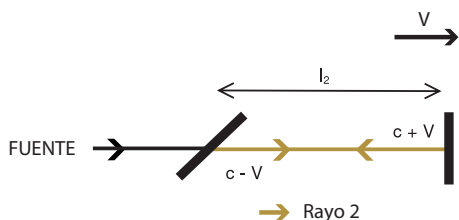
Estas transformaciones conducen al teorema de adición de velocidades de Galileo:

$$v' = v + v \quad (1.9)$$

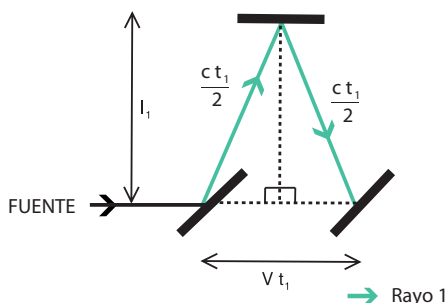
Albert Einstein (1879 - 1955) pensaba que las leyes de Maxwell son leyes fundamentales de la naturaleza, y que debían entonces formar parte del conjunto de leyes que satisfacen el principio de relatividad de Galileo, es decir, son válidas en todo sistema inercial. Sin embargo, la invariancia de la velocidad de la luz es incompatible con las transformaciones de Galileo. Einstein propuso entonces reemplazar dichas transformaciones y el teorema de adición de velocidades, lo cual implica una nueva noción de espacio y tiempo compatible con la validez de las leyes de Maxwell en todo sistema inercial. Las transformaciones de coordenadas que dejan invariantes las leyes de Maxwell eran conocidas en la época de Eins-



**Figura 1.13.** Esquema del interferómetro de Michelson y Morley. Un haz es separado en dos partes por una lámina semispejada. Ambas partes recorren caminos de ida y vuelta diferentes, y se reúnen para formar franjas de interferencia localizadas que se observan con un anteojo.



**Figura 1.14.** Marcha del rayo 2 en el sistema del laboratorio.



**Figura 1.15** Marcha del rayo 1 en el sistema fijo al éter.

tein, y se denominan transformaciones de Lorentz (volveremos sobre este punto en el capítulo 6). Este cambio dio lugar a la teoría especial de la relatividad, en cuyo marco los tiempos y longitudes no son invariantes al pasar de un sistema inercial a otro.<sup>3</sup>

Una vez desarrollada la teoría especial de la relatividad, Einstein advirtió que la ley de gravitación de Newton no era invariante ante las transformaciones de Lorentz, debido a que la fuerza entre dos masas depende de la distancia que las separa y ésta no es una cantidad invariante en el marco de la relatividad especial. Einstein hizo algunos intentos, que no resultaron satisfactorios, por formularla de tal modo que resultara invariante respecto de las transformaciones de Lorentz y no de las de Galileo. Finalmente, Einstein se propuso formular una ley de gravitación que tuviera la misma forma en todos los sistemas de referencia, y no solamente en los sistemas de referencia inerciales. Esto dio origen a la teoría general de la relatividad. En esta teoría, un campo gravitatorio no se entiende como un campo de fuerzas, sino como un cambio de la geometría del espacio-tiempo.

La ley de gravitación es diferente de la ley de Newton, en tanto que la forma de la ley es la misma en todos los sistemas de referencia, independientemente de si son inerciales o no. Esto, por cierto, no quiere decir que los fenómenos físicos sean los mismos en todos los sistemas. La forma general de la ley es la misma en todos los sistemas de referencia, pero esta forma general se escribe en función de una cantidad que describe la geometría del espacio-tiempo. Estos conceptos serán desarrollados con todo detalle en los capítulos 6, 7 y 8.

<sup>3</sup> Las dificultades usuales con la relatividad se originan en malas interpretaciones, generalmente debidas a sus aspectos poco intuitivos que en muchos malos libros o publicaciones de divulgación se muestran como paradojas, lo cual sugiere, erróneamente, la posibilidad de contradicciones lógicas en la teoría. Ninguna de las numerosísimas contrastaciones experimentales (directas e indirectas) de la relatividad especial han dado resultados que sugieran la necesidad de reemplazarla por otra descripción de los fenómenos físicos a los cuales se aplica.