

El principio de la **inercia**

El análisis de la evolución de las ideas científicas pone de manifiesto el enorme esfuerzo realizado para llegar a algunas de las nociones fundamentales laboriosamente desarrolladas por los grandes genios —esfuerzo que ha significado la superación de grandes obstáculos para que tales nociones sean accesibles e incluso parezcan naturales. Éste es el caso del principio de la inercia. Pero al mismo tiempo, para comprender este principio se requiere un gran proceso de abstracción, por la sencilla razón de que no es posible observarlo directamente en la naturaleza. El principio de la inercia no puede inferirse inmediatamente de la experiencia, sino a través de una especulación que sea coherente con lo observado. Tal y como señala A. Koyré, “el principio de la inercia no surgió ya elaborado del pensamiento de Descartes o de Galileo como Atenea de la cabeza de Zeus”, fue producto de un largo esfuerzo del pensamiento.

Este principio se encuentra al interior del marco del fenómeno del movimiento, el cual fue objeto de estudio desde la Antigüedad, y que tenía que ser explicado por cualquier filosofía que aspirara a ser aceptada. El primer estudio sistemático del movimiento corresponde a Aristóteles, cuyas ideas al respecto dominaron en su propia época y hasta los primeros siglos de nuestra era, para después ser recuperadas y remodeladas por Occidente, vía la tradición árabe, en los finales del siglo XI. Y fue la crítica a las teorías aristotélicas del movimiento, hecha primero por los escolásticos de la Edad Media y después por los pensadores del Renacimiento, lo que constituye el telón de fondo de donde parte Galileo para echar las bases de la nueva ciencia del movimiento, junto con los trabajos de Kepler, Gassendi, Descartes y Huyghens para llegar así a la gran síntesis newtoniana.

Aristóteles es el fundador de la física como ciencia de las cosas naturales; señala que el movimiento y el cambio son los fenómenos básicos de la naturaleza, y que quien no los entienda niega a esta última. Para el filósofo griego,

el estudio del movimiento descansa en las nociones de espacio y tiempo, que para él no son categorías universales, ya que no pueden existir fuera de las cosas. Es así como los objetos particulares determinarán el espacio y los sucesos individuales, el “antes” y el “después”, el tiempo.

Para Aristóteles el espacio o lugar “no es aquello donde algo esté, sino que el lugar existe junto con la cosa, pues junto con lo limitado están los límites”. Teofrasto, su discípulo, describe la concepción aristotélica de espacio: “Quizá no sea, pues, el espacio una realidad en sí, sino que es determinado por la posición y la serie de las cosas conforme a su naturaleza y a sus funciones naturales”. No existe “lugar” fuera de las cosas, sino sólo como la determinación geométrica de una cosa que puede padecer movimiento, es decir, el lugar es la consecuencia en la relación que dos cuerpos tienen entre sí. Por tanto, el espacio vacío carece de estructura y por ello de cualidades. Aristóteles concluye: “Puesto que hemos demostrado que no existe el espacio en sí, se sigue de ello que tampoco existe un espacio vacío”.

El espacio aristotélico posee una estructura determinada por el centro del mundo, y a partir de ahí define los movimientos naturales en el mundo sublunar como aquellos que se dirigen a dicho centro. Los cuerpos son pesados o leves, dependiendo de si se acercan al centro o se alejan de él cuando se les deja libres para moverse, ya que se dirigirán a su lugar natural. Como conclusión, la permanencia del movimiento es imposible, ya que en algún momento el cuerpo en movimiento llegará al lugar que por su naturaleza le corresponde y, por lo mismo, se detendrá. Esto es, que para los movimientos naturales que tienen lugar debajo de la esfera de la Luna es imposible la permanencia del mismo, pero también lo es para los movimientos violentos que, dentro de la física aristotélica, requieren un motor para moverse.

Dentro de la física aristotélica el vacío no puede existir, ya que el espacio está totalmente lleno de materia, divisible



JOSÉ LUIS ÁLVAREZ G.



hasta lo infinito, hasta entre los cuerpos y las pequeñísimas partículas que los componen. Aristóteles niega rotundamente su existencia, pues su aceptación lo conduciría irremediablemente al atomismo. Para que el movimiento pueda darse —continúa— no es necesario en absoluto la existencia del vacío. Más aún, supone que el concepto mismo lleva a conclusiones absurdas: cuanto menor es la resistencia del medio, tanto mayor es la velocidad del cuerpo en movimiento; por consiguiente, en el vacío, donde la resistencia es nula, la velocidad debe ser infinita, lo cual, según él, es imposible.

Respecto al cuestionamiento de por qué los proyectiles continúan moviéndose después de haber abandonado su motor, Aristóteles encontró la solución postulando como motor al aire: éste se abre ante, por ejemplo, la flecha y se cierra detrás de ella, pues la naturaleza no permite la formación del vacío, y de esta manera la impulsa hacia adelante.

Otra vez aplica su rechazo al vacío cuando afirma que si éste existiera no habría resistencia al movimiento y el cuerpo continuaría desplazándose indefinidamente, pero como esto es imposible, el vacío no puede existir. Es inte-

resante ver cómo llega tan cerca del principio de la inercia; sin embargo, su aversión al vacío le impide comprender la permanencia del movimiento.

La física aristotélica es incompatible con el principio de la inercia y en ella el movimiento y el reposo pertenecen a estatus ontológicos diferentes: el reposo es un estado en el cual sí pueden permanecer los cuerpos, mientras que el movimiento es un proceso mediante el cual el cuerpo se dirige al lugar natural que le corresponde y, por tanto, no puede permanecer en movimiento indefinidamente.

Los pensadores medievales

Las teorías aristotélicas que explicaban el movimiento —en lo que respecta al lanzamiento de proyectiles— jamás convencieron a sus adversarios, quienes siempre opusieron a ellas el que el movimiento del proyectil, aun separado del motor, persistiera: la piedra lanzada por la honda, la flecha disparada por el arco, etcétera.

En el siglo VI, Juan Filopón realiza una crítica a las teorías de Aristóteles respecto al movimiento de proyectiles, utilizando el concepto de *impetus*, tomado del astrónomo helenístico Hiparco de Rodas, quien vivió en siglo II a.C.

La teoría del *impetus* consiste en que en cualquier proyectil que ha sido lanzado se halla impreso algo que constituye la fuerza motriz de éste. Tal *impetus* permite al proyectil continuar su movimiento, una vez que ha dejado de actuar el motor. Es una especie de cualidad, potencia o virtud que se imprime al móvil, o mejor dicho que se impregna a consecuencia de su asociación con el motor. Mientras más tiempo esté sometido a la acción de este último, mayor será la cualidad que adquiera el móvil, por lo mismo, esta cualidad dejará paulatinamente de “impresionarlo”, y una vez que éste haya abandonado al motor, su movimiento cesará: el *impetus* es de naturaleza esencialmente perecedera. Entre los ejemplos que los partidarios del *impetus* nombran, está el del sonido que adquiere la campana y cuya cualidad sonora va perdiendo poco a poco. Así también está el ejemplo del hierro, que al ser calentado en el fuego, adquiere la cualidad del calor —hablando en términos aristotélicos— y que al ser retirado de la fuente que le proporciona dicha cualidad, poco a poco la va perdiendo.

Esta teoría —utilizada en el siglo XVI por Jean Buridan, miembro importante de la escuela nominalista de París— es ampliada y profundizada por su discípulo, Nicolás de Oresme, quien critica la refutación que Aristóteles hace

de la teoría de Heráclides, la cual explicaba el movimiento diario de las estrellas mediante la rotación de una Tierra central. Oresme no cree en la rotación de la Tierra, solamente señala que ningún argumento lógico, físico, o incluso bíblico, puede refutar la posibilidad de una Tierra en rotación. Aquí tenemos el principio de la relatividad óptica que jugó un papel importante en las obras de Copérnico y Galileo.

Al final del siglo XIV una versión de la teoría del *impetus*, similar a la expuesta por Buridan, había reemplazado a la defectuosa explicación aristotélica del lanzamiento de proyectiles en prácticamente todas las obras científicas medievales. Así se enseñaba en Padua cuando Copérnico frecuentó esta universidad, y Galileo la aprendió en Pisa de su maestro Bonamico. También en Inglaterra, en el Merton College de Oxford, con base en la teoría del *impetus*, se desarrollaron alternativas para la explicación del movimiento.

Un predecesor muy importante de Galileo es Benedetti quien, en el siglo XIV, criticaba fuertemente la teoría aristo-

télica del lanzamiento de proyectiles. Benedetti continuó los estudios de los nominalistas parisinos e introdujo elementos de la matemática e hidrostática arquimediana, así como los conceptos de peso relativo y peso absoluto. Además planteó que el movimiento en el vacío sí era posible, contradiciendo con ello las enseñanzas de Aristóteles.

Todas las teorías y explicaciones alternativas sobre el movimiento surgieron de los restos del pensamiento aristotélico, desgarrado por la crítica escolástica, y representaron el marco que posibilitó el desarrollo conceptual en los siglos XVI y XVII.

Johannes Kepler

En Kepler se reúnen la innovación de Copérnico y una nueva actitud epistemológica ante los datos observacionales. Ésta la aprendió de Tycho Brahe y lo obligó a ajustar con todo detalle la teoría con los hechos, teniendo como resultado la formulación de sus tres famosas leyes, que serían las primeras leyes de la naturaleza en el senti-



do moderno. Kepler da el salto para atravesar la frontera entre la especulación metafísica del Medioevo y la ciencia empírica moderna, y fue su introducción de la causalidad física en la geometría formal de los cielos la que lo convirtió en el primer constructor de leyes de la naturaleza, lo cual hizo que le resultara imposible ignorar las pequeñas discrepancias entre los datos de la observación y la teoría. Mientras que la cosmología estuvo regida por meras reglas geométricas, independientemente de las causas físicas, las diferencias entre teoría y datos podían ser superadas al insertar otra rueda dentro del sistema, sin embargo, en un Universo movido por fuerzas reales, eso ya no era posible.

Kepler, al estudiar el movimiento de Marte, primero enfrentó el problema por los caminos tradicionales, pero tras su fracaso empezó a abandonar antiguas creencias sobre la naturaleza del Universo, para así, poco a poco, construir una nueva ciencia. Hizo varias innovaciones revolucionarias que lo llevarían a enfrentar el problema; una de éstas fue el cambio del centro del sistema con relación al Sol.

Los periodos de los planetas se conocían con bastante precisión desde la Antigüedad. En números redondos, Mercurio tiene un periodo de tres meses, Venus de siete meses y medio, la Tierra de un año, Marte de dos años, Júpiter de doce y Saturno de treinta. A mayor distancia del Sol, mayor tiempo se requiere para completar una revolución en torno a él; esto en términos generales, pero se necesitaba una relación matemática exacta. Así, Saturno se halla dos veces más lejos del Sol que Júpiter, por tanto requeriría dos veces más tiempo para recorrer una órbita del doble de longitud que la de Júpiter, esto es, veinticuatro años; no obstante, requiere treinta años. Lo primero sería cierto si la velocidad del planeta a lo largo de su órbita fuera siempre la misma e igual a la de todos, pero a medida que el planeta se aleja del Sol, su movimiento se torna más lento. Antes que Kepler nadie se había hecho la pregunta del porqué esto era así. La respuesta del astrónomo alemán fue que debía existir una fuerza que emana del Sol y que es la causa de que los planetas se muevan en sus órbitas. Por primera vez desde la Antigüedad, se hacía un intento no sólo por describir los movimientos celestes en términos geométricos, sino de asignarles una causa física.

Recordemos que el centro del sistema de Copérnico no era el Sol, sino el centro de la órbita de la Tierra, y que Kepler, desde un principio, había objetado tal suposición, considerándola físicamente absurda; puesto que la fuerza



que movía los planetas emanaba del Sol, el conjunto del sistema tenía que hallarse en el centro del propio cuerpo de éste. Pero no es así, el Sol no ocupa el centro exacto de la órbita de la Tierra, sino uno de los focos de la elipse. Kepler aún no sabía esto último, creía que la órbita era un círculo. En consecuencia formuló la pregunta de que si la fuerza que mueve los planetas procede del Sol, ¿por qué insisten en girar en torno al centro de la órbita? A lo que respondió suponiendo que cada planeta estaba sujeto a dos influencias conflictivas: la fuerza del Sol y una segunda fuerza localizada en el propio planeta, y esta competencia ocasionaba que unas veces se acercara al Sol y otras se alejara de él.

Estas dos fuerzas son, como sabemos, la gravedad y la inercia, pero nunca llegó a formular tales conceptos; sin embargo, preparó el camino para Newton. Kepler mismo acuñó el término de "inercia", pero la noción kepleriana aún está lejos del principio de la inercia. Para él ésta era la tendencia al reposo de todos los cuerpos en movimiento: sigue manteniendo a este último como un proceso, y al reposo como un estado.

Galileo conocía muy bien la obra aristotélica, y en general la de los clásicos, desde Platón hasta Benedetti, pasando por Ptolomeo y muy probablemente por los nominalistas parisinos y mertonianos, dada la difusión de las ideas de estos últimos. En sus primeras obras destaca su interés por los matemáticos griegos, Euclides y, muy especialmente, Arquímedes, y es a partir de aquí donde co-

mienza su crítica a la teoría del movimiento de Aristóteles. En su obra *De motu* desarrolla esta crítica desde un marco clásico y medieval, desde el punto de vista de la fuerza impresa o *impetus*. Sin embargo, este concepto, ¿implica la formulación del principio de la inercia? Para Galileo el *impetus* es de carácter esencialmente perecedero, pues el movimiento eterno es imposible y absurdo, ya que es consecuencia de la fuerza impresa que se agota al producirlo. Él desarrolla la teoría del *impetus* y sabe —pues ha leído a Benedetti— de la necesidad de la detención del movimiento: la física del *impetus* es incompatible con el principio de la inercia.

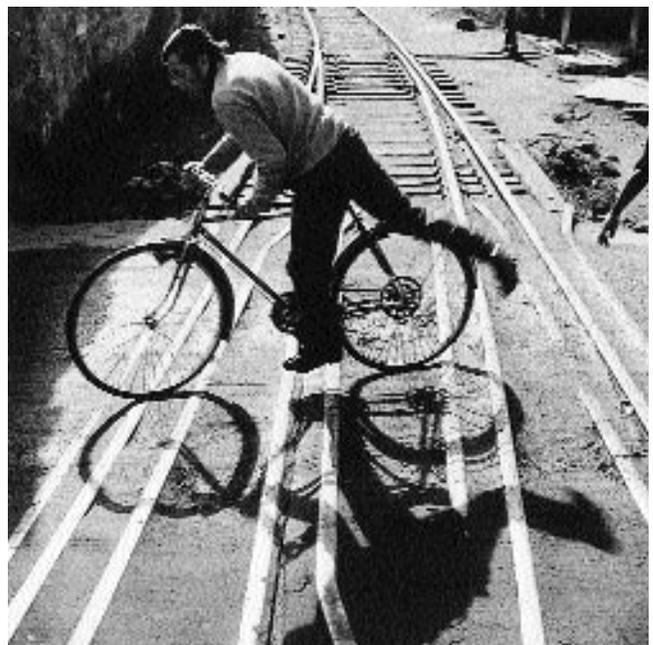
El fenómeno de la caída de los cuerpos ocupó siempre la atención de los estudiosos del movimiento. Para Galileo, la caída de un cuerpo se efectúa debido a una fuerza constante: su peso; por tanto, ésta no puede tener otra velocidad que la constante. La velocidad no está determinada por algo exterior al cuerpo, sino que es algo inherente y propio del objeto. Así, a un cuerpo con mayor peso le corresponde una mayor velocidad, y a un cuerpo de menor peso le corresponde una menor velocidad. De esta manera, señala en *De motu*, la velocidad de caída de un cuerpo es proporcional a su peso y de un valor constante para cada uno.

Sin embargo, Galileo estaba obligado a reconocer que una piedra que cae lo hace cada vez más rápido, y esta aceleración sólo ocurre hasta que el cuerpo adquiere su velocidad característica; a partir de este momento su movimiento se efectúa con una velocidad constante. Y esta velocidad está en función del peso, pero no del peso absoluto sino del peso específico de los cuerpos. Un pedazo de plomo caerá más rápido que uno de madera, y dos pedazos de plomo caerán con igual velocidad. Más aún, Galileo —siguiendo a Benedetti— introdujo en su física que no se trata del peso específico absoluto de los cuerpos, sino de su peso específico relativo.

La velocidad de caída de los cuerpos, entonces, no está definida por su peso absoluto, sino por el específico y relativo. Estas precisiones permitieron a Galileo trascender el aristotelismo y la dinámica del *impetus*, al hacer la sustitución de la contraposición de cualidades (levedad y gravedad) por una escala cuantitativa, y este método cuantitativo le fue proporcionado por la hidrostática arquimediana: un trozo de madera, que cae en el aire, se elevará si es colocado en el fondo del agua. De esta manera, la fuerza (y la velocidad) con la cual desciende o sube un objeto, está en proporción a la diferencia entre el

peso específico del objeto y el peso de un volumen del medio que es desalojado por el mismo. De lo anterior, concluye que no hay cuerpos leves, todos son pesados. En la física galileana, el fenómeno de la caída representa un papel de primer orden.

A partir de aquí, Galileo comenzó a construir la nueva física, donde el único movimiento natural que reconoce es el de los cuerpos pesados que son atraídos hacia abajo. La distinción entre el peso absoluto y relativo, y la repetida afirmación de que la velocidad de caída de un cuerpo está en función de su peso relativo en un medio determinado (y no de su peso absoluto), conduce a la inevitable conclusión de que es en el vacío, y sólo en él, donde los cuerpos tienen un peso absoluto y caen a una velocidad propia. A partir de este momento el movimiento ya no será un proceso, como en la física de Aristóteles, sino que comienza a ser algo propio del móvil, y ya no requerirá algo externo para prolongarse. Poco a poco se va geometrizando el espacio, y la consideración de que la velocidad de un móvil en el vacío no se hace infinita al desaparecer la resistencia del aire (y en general toda resistencia), parece “sugerirle” que debe trabajar en un plano absolutamente liso, una esfera totalmente esférica, etcétera. Y es a estos objetos a los que se les puede aplicar el principio de la inercia, al cual se llegará solamente hasta que el cosmos sea completamente sustituido por el espacio euclidiano y los cuerpos físicos por los objetos geométricos. Sólo así el espacio dejará de tener efecto sobre el movi-





miento de los cuerpos, de ser un proceso para convertirse en un estado con el mismo estatus ontológico que el reposo. Y de esta manera no será necesario buscar una causa que mantenga indefinidamente al movimiento. Mientras que para Aristóteles el vacío es imposible, para Galileo sí lo es y, además, sólo en el vacío los cuerpos caen con la misma velocidad.

Galileo realiza otra serie de experimentos en los cuales demuestra que la trayectoria seguida por un móvil después de abandonar un plano inclinado es una línea semi-parabólica. Aquí considera equivalentes los movimientos de un móvil sobre el plano y el de uno en caída libre, y encuentra que el componente horizontal de la trayectoria parabólica que sigue el cuerpo, después de abandonar el plano, se conserva. Además, como buen copernicano, convencido del movimiento terrestre, intenta dar argumentos en favor de este último con su famoso experimento de la bala cayendo a lo largo del mástil de un barco en movimiento, con lo cual establece el principio de las transformaciones galileanas y que más adelante conformarán el concepto de sistemas inerciales.

En otros de los experimentos con planos inclinados, hacía rodar esferas sobre un canal, el cual tenía una pri-

mera porción descendente, luego continuaba con una parte horizontal y la tercera parte volvía a estar hacia arriba. Soltaba las esferas desde la primera y observaba hasta dónde subían en la tercera porción del canal. A continuación iba disminuyendo gradualmente la inclinación de esta última parte, y veía que las esferas lanzadas recorrían cada vez una mayor distancia. Haciendo una genial extrapolación, concluyó que si la tercera porción estuviera totalmente horizontal, la esfera conservaría su velocidad de manera indefinida.

Sin embargo, en esta revolución no le corresponde a Galileo enunciar (al menos de manera explícita) el principio de la inercia, pues no pudo deshacerse de la noción de pesantez ni de la de centro del mundo. Para él, los cuerpos físicos eran, por definición, cuerpos graves, y no pudo realizar la sustitución completa entre los cuerpos físicos y los objetos geométricos. Si privaba a los primeros de la cualidad esencial de pesantez, dejaban de existir por ese solo hecho. Por ello la física galileana es la física de los graves, ya que para Galileo el peso de un cuerpo era algo similar a lo que la masa es para nosotros en la actualidad.

En su última obra, los *Discorsi*, que supone al Galileo maduro, vemos cómo siguen prevaleciendo las ideas de pesantez y de centro del mundo: “Imaginemos un móvil proyectado sobre un plano horizontal del que se ha quitado el más mínimo roce; sabemos ya que en tal caso, y según lo hemos expuesto detenidamente en otro lugar, dicho movimiento se desenvolverá sobre tal plano con un movimiento uniforme y perpetuo, en el supuesto de que este plano se prolongue hasta el infinito. Si, por el contrario, nos imaginamos un plano limitado y en declive, el móvil, el cual se supone está dotado de gravedad, una vez que ha llegado al extremo del plano y continúe su marcha, añadirá al movimiento precedente, uniforme e inagotable, esa tendencia hacia abajo, debida a su propia gravedad”.

No obstante, su física está tan impregnada del principio de la inercia que sus discípulos podrán extraerlo sin ninguna dificultad y siempre atribuyéndoselo a su maestro. Pero incluso ellos (Cavalieri y Torricelli), a pesar de que lo utilizan de manera natural, jamás lo presentan como un principio fundamental de la física.

Pierre Gassendi

La obra de Gassendi está fuertemente inspirada por la de Galileo, y aquél comprendió con profundidad a este últi-

mo. Siguiendo a Demócrito, a Gilbert y a Kepler, Gassendi logró deshacerse de los últimos obstáculos de la tradición y del sentido común que habían trabado el avance del pensamiento galileano, y fue el primero en publicar —si no el primero en enunciar— una formulación correcta del principio de la inercia.

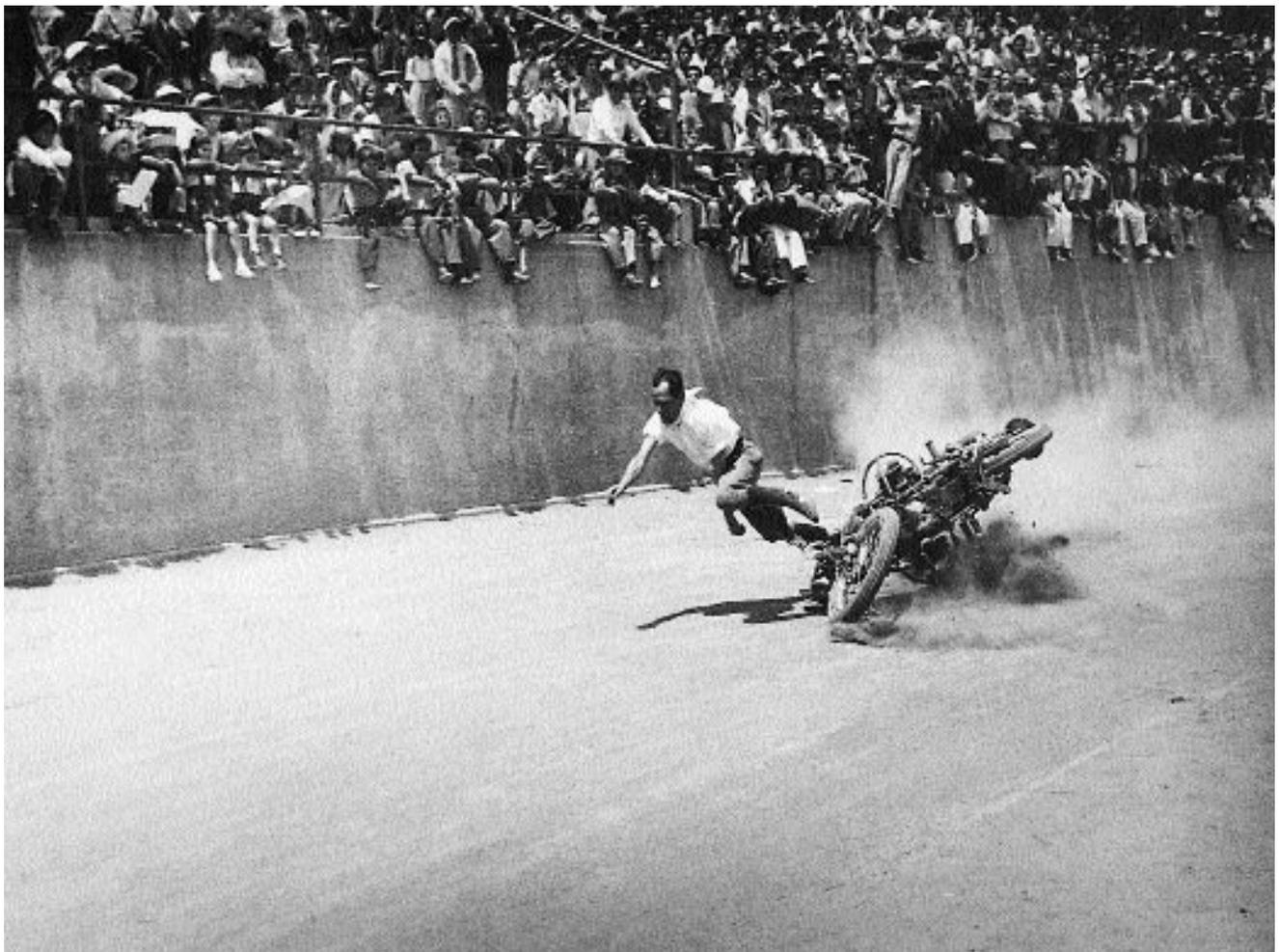
Aclara ya el efecto de la pesantez como el efecto de una fuerza exterior, como una interacción con otro cuerpo, como lo es la atracción del imán sobre el hierro, que ya no es una propiedad intrínseca de los cuerpos, como lo era para Galileo.

Así pues, la gravedad no sólo es un fenómeno exterior y un componente esencial de los cuerpos físicos, es también un efecto que se puede eliminar con bastante facilidad (en la imaginación, no en la realidad). En efecto, para sustraer un cuerpo de la acción de la gravedad no hay más que situarlo suficientemente lejos. Gassendi, así como Gilbert y Kepler, imaginan que la acción de la atrac-

ción es finita. Fue preciso el genio de Newton para extender su acción hasta el infinito.

En su obra, *De motu impresso a motore translato*, Gassendi escribe: “Me preguntas lo que ocurriría a esa piedra que, según he admitido, puede ser concebida en los espacios vacíos si, sacada del reposo, fuera empujada por una fuerza cualquiera. Respondo que probablemente se moverá con un movimiento uniforme y sin fin [...] En cuanto a la prueba, la saco de la uniformidad, ya expuesta, del movimiento horizontal; y puesto que éste no parece terminarse si no es por la admisión del movimiento vertical, se desprende que, puesto que en los espacios vacíos no habrá ninguna mezcla del [movimiento] vertical, el movimiento, en cualquier dirección que se haga, será similar al horizontal, y ni se acelerará ni se retardará y, por tanto, nunca cesará”.

En lo que se refiere al concepto de inercia, Gassendi se encuentra ya muy lejos de las vacilaciones de un Gali-





leo y de los errores de un Kepler. La eliminación consciente de la noción de *impetus*, la posesión de una teoría de la pesantez y la geometrización definitiva del espacio, permiten a Gassendi traspasar las fronteras que habían detenido a estos dos grandes pensadores.

René Descartes

Pasar de Galileo a Descartes, esto es del *Dialogo* y los *Discorsi* al *Mundo*, es trasladarse a dos distintos escenarios en la historia de las ideas. En las obras de Galileo está presente la lucha por el establecimiento de las bases de las nuevas concepciones del mundo en contra de las tradicionales; son libros de “combate”. En cambio, en la última, ya no se discute en contra del sistema geocéntrico, el copernicanismo es la única concepción posible del mundo; ya no se rebaten las ideas tradicionales sobre el movimiento, la física aristotélica está muerta. En el *Mundo*, de

lo que se trata es de fundar y desarrollar una nueva física, y se procede a construir *a priori* un mundo que tiene que obedecer a las leyes de la naturaleza. En el universo cartesiano el reemplazo del espacio físico por el espacio euclidiano y la sustitución de los cuerpos reales por los objetos geométricos están plenamente realizados; el universo cartesiano es espacio y movimiento.

La ley suprema en este universo es la ley de la persistencia. Las dos realidades del universo cartesiano, espacio y movimiento, una vez creadas, permanecen eternamente; el espacio no cambia, ni tampoco el movimiento. Más precisamente, la cantidad de movimiento no varía, permanece constante. Señala Descartes: “No me detengo a buscar la causa de sus movimientos: pues me basta pensar que han comenzado a moverse tan pronto como el mundo ha comenzado a ser. Y siendo así encuentro por mis razones que es imposible que cesen nunca sus movimientos, e incluso que cambien como no sea de objeto. Es de

cir, que la virtud o la potencia de moverse a sí mismo, que se encuentra en un cuerpo, puede perfectamente pasar toda o parte a otro, y así no estar ya en el primero, pero no puede ya no estar en absoluto en el mundo [...] Y, sin embargo, podéis imaginar, si os parece, como hacen la mayoría de los doctos, que hay algún primer móvil que, al rodar alrededor del mundo a una velocidad incomprendible, es el origen y la fuente de todos los demás movimientos que allí se encuentran”.

Este “primer móvil” en el mundo de Descartes es muy diferente al del mundo aristotélico. Puede muy bien ser la fuente y el origen de todos los movimientos de este mundo; pero a eso limita su función, pues una vez producido el movimiento, éste ya no tiene ninguna necesidad de él. Ahora el movimiento se conserva y se mantiene solo, sin “motor”. Así pues, el movimiento cartesiano es anterior a todas las otras esencias materiales, incluso a la forma espacial; y no es en forma alguna un proceso sino una cualidad o estado.

Descartes nos señala que una de las principales reglas con las que actúa la naturaleza es “que cada parte de la materia, en particular, continúa siempre estando en un mismo estado, mientras que el encuentro con las otras no le obligue a cambiarlo. Es decir, que si esa parte tiene cierto grosor jamás se hará más pequeña si las otras no la dividen; si es redonda o cuadrada jamás cambiará de figura si las otras no la obligan a hacerlo; si está quieta en algún lugar jamás partirá de allí a menos que las otras la expulsen; y una vez que ha comenzado a moverse continuará siempre, con igual fuerza, hasta que las otras la detengan o la retarden”. Como se ve, todo cambio tiene necesidad de una causa, por eso ningún cuerpo puede cambiar y modificarse por sí mismo.

El movimiento es un estado, pero además, es una cantidad. En el mundo existe una cantidad determinada de movimiento, y cada cuerpo en movimiento posee una cantidad del mismo, perfectamente determinada. Y cuando algún cuerpo pierde cierta cantidad de su movimiento mediante algún choque o interacción con otro, este último adquirirá con exactitud la misma cantidad de movimiento que perdió el primero.

Christian Huyghens

Huyghens constituye un eslabón importante entre Galileo, Descartes y Newton. Él adopta y extiende la física galileana de la caída de los cuerpos, la independencia de los

componentes del movimiento compuesto y la relatividad del movimiento. Huyghens se restringió al fenómeno de las colisiones elásticas y adoptó la concepción cartesiana de la conservación de la cantidad de movimiento. Sus investigaciones fueron reunidas en el volumen póstumo *De motu corporum ex percussione*, publicado en 1700, y están basadas en tres hipótesis: 1) el principio de la inercia; 2) la conservación de la cantidad de movimiento en las colisiones elásticas; y 3) la relatividad del movimiento.

En lo que respecta al principio de la inercia, su enunciado ya está muy cerca del que Newton hace en los *Principia* en la primera ley: “Un cuerpo en movimiento tiende a moverse en línea recta con la misma velocidad en tanto no encuentre un obstáculo”.

Este enunciado carece de la profundidad metafísica del de Descartes, pero es ya muy conciso. Sin embargo, está todavía a un paso del de Newton, pues faltan las precisiones que éste hace por medio de las nociones de fuerza impresa y fuerza ínsita (íntimamente inserta en la naturaleza).

En sus estudios sobre colisiones elásticas, se muestra francamente cartesiano y adopta el principio de conservación de la cantidad de movimiento: “Dos cuerpos iguales que están en impacto directo uno con el otro y tienen iguales y opuestas velocidades antes del impacto, rebotarán a velocidades que son, aparte del signo, las mismas”.

La tercera hipótesis asevera la relatividad del movimiento y afirma: “Las expresiones ‘movimiento de cuerpos’ y ‘velocidades iguales y desiguales’ deben ser entendidas relativamente a otros cuerpos que son considerados en reposo, no obstante, puede ser que el segundo y el primero participen en un movimiento común. Y cuando dos cuerpos chocan, aun si ambos están sujetos a un movimiento uniforme, para un observador que tenga este movimiento común, ellos se repelerán uno al otro tal y como si este movimiento parásito no existiera”. Aquí asume la relatividad galileana que más adelante permite la definición de los sistemas inerciales.

Isaac Newton

El genio de Newton realiza la gran síntesis con toda la herencia que recibe de sus predecesores. Galileo y Kepler estudiaron un conjunto particular de movimientos (caída libre, lanzamiento de proyectiles, movimiento rectilíneo uniforme y movimientos planetarios); Newton extendió su estudio a todos los movimientos en la naturaleza. Los



estudios que realizó Galileo son estudios cinéticos, esto es, que se refieren solamente a la descripción del movimiento. En los estudios de Newton ya aparece la idea de fuerza como causa de los movimientos, es el inicio de la ciencia de la dinámica.

Newton construye un cuerpo organizado de teorías que nos dan una visión y comprensión general del Universo. En su obra *Principios matemáticos de filosofía natural* (los *Principia*) aparece una actitud metodológica que podríamos resumir en los siguientes puntos: 1) no suponer ninguna causa más que las necesarias para explicar los fenómenos; 2) relacionar, tan completamente como sea posible, efectos análogos a una misma causa; 3) extender a todos los cuerpos las propiedades que se encuentran asociadas con aquellos sobre los cuales se hacen experimentos (esto es lo que le permite enunciar su ley de la gravitación universal); y 4) considerar toda proposición obtenida por inducción a partir de los fenómenos observados como válida, hasta que nuevos fenómenos ocurran y contradigan la proposición o limiten su validez.

Newton toma el principio de la inercia, ya plenamente establecido en esta época, y se enfrenta al problema de hallar el sistema referencial en el cual este principio y todas las otras leyes de la mecánica sean válidas. El principio de la inercia se refiere al estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo en ausencia de fuerzas que actúan sobre él. La pregunta que surge de inmediato es: ¿reposo o movimiento rectilíneo uniforme respecto a qué? La Tierra gira sobre su propio eje y alrededor del Sol, así que no puede ser respecto a ella como tampoco respecto al Sol. Además, al generalizar sus leyes a todos los cuerpos del Universo, él estaba consciente de que todos los objetos celestes se mueven bajo sus interacciones.

Probablemente éstas sean las razones que llevaron a Newton a la convicción de que un sistema de referencia empírico fijado por cuerpos materiales nunca podría ser el fundamento de una ley que involucrara la idea de inercia. De este modo, llega a la conclusión de que hay un espacio y un tiempo absolutos. La definición que realiza de espacio absoluto está muy relacionada con la geometrización del espacio real que ya había comenzado con Galileo y había sido continuada por Descartes. Las definiciones de espacio y tiempo absolutos aparecen en los *Principia*. La de espacio es la siguiente: “El espacio absoluto, por su naturaleza y sin relación a cualquier cosa externa, siempre permanecerá igual e inmóvil; el relativo es cualquier cantidad o dimensión variable de este espacio, que se define por nuestros sentidos según su situación respecto a los cuerpos, espacio que el vulgo toma por el espacio inmóvil [...] Y así, usamos de los lugares y movimientos relativos en lugar de los absolutos y con toda tranquilidad en las cosas humanas: para la Filosofía, en cambio, es preciso abstraer de los sentidos, y considerar las cosas por ellas mismas, lo cual es distinto de lo que son las medidas sensibles de ellos. Por esto es que puede ser que no haya cuerpo realmente en reposo al cual los lugares y movimientos de otros puede ser referido”.

Newton plantea sus leyes del movimiento al interior de tales conceptos. Y estas leyes se referirán a los conceptos absolutos de tiempo y espacio, puesto que “las causas por las cuales los movimientos verdaderos y los relativos deben distinguirse unos de otros, son las fuerzas que se deben imprimir a los cuerpos para generar movimiento. El movimiento verdadero ni se genera ni se altera excepto cuando al cuerpo en movimiento se le imprime una fuerza; pero el movimiento relativo puede ser generado sin

que se imprima ninguna fuerza sobre el cuerpo”. La definición de marco de referencia inercial viene dada con estas palabras en el concepto de espacio absoluto.

La razón por la cual Newton asume el espacio y el tiempo absolutos, es porque sin ellos la ley de la inercia carecía de sentido. Pero surge la cuestión de qué tanto esos conceptos merecen el término de “reales”, en el sentido que usamos en física. Un lugar fijo en el espacio absoluto de Newton no tiene realidad física. Para llegar a una formulación definida se introduce el concepto de sistema inercial, el cual es considerado como un sistema de referencia donde vale la ley de la inercia. Para esto se recurre al principio de relatividad utilizado por Galileo, el cual señala en esencia que las leyes de la mecánica tienen exactamente la misma expresión, ya sea desde un sistema de referencia con movimiento rectilíneo y uniforme o desde uno en reposo en el espacio.

La importancia de este principio radica en el hecho de que está relacionado directamente con la noción de espacio absoluto planteada por Newton. Si se consideran dos sistemas que se mueven uno con respecto al otro a velocidad constante, ¿qué sentido tiene preguntar cuál es el que está en reposo y cuál es el que se mueve? Pero, en cambio, la cuestión es que si en alguno de ellos “el movimiento verdadero ni se genera ni se altera excepto cuando al cuerpo en movimiento se le imprime una fuerza”, en el otro ocurrirá lo mismo. Esto es, los dos sistemas son inerciales y podemos ver que no es necesaria la existencia de un sistema en reposo absoluto al cual referir todos los movimientos, sino que existe una infinidad de sistemas inerciales, todos ellos efectuando un movimiento de

traslación, uno con respecto al otro, y en los cuales valen las leyes de la mecánica. De esta manera, al caracterizar a los sistemas inerciales, ya no es necesario el concepto de espacio absoluto.

Es en este contexto de conceptualización donde Newton enuncia sus leyes del movimiento: las tres leyes de la dinámica y su ley de la gravitación universal. Y es en ellas donde sintetiza una concepción general del Universo, con lo que culmina una revolución en el pensamiento que se había iniciado casi ciento cincuenta años atrás.

Primera ley. “Todos los cuerpos continúan en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta excepto en la medida de que sean obligados a cambiar dichos estados por fuerzas impresas sobre ellos”.

Segunda ley. “El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza impresa y se produce en la dirección de la línea recta en la cual se ha impreso la fuerza”.

Tercera ley. “Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria, o sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas”.

Las dos primeras leyes establecen las interrelaciones cuantitativas de espacio, tiempo, materia y movimiento. La tercera ley viene a dar una coherencia definitiva a las dos primeras, estableciendo la idea de interacciones mutuas de los cuerpos materiales. Establece una unidad del mundo material al atribuir una acción recíproca entre los cuerpos materiales que provoca sus diferentes estados de movimiento, desechando la concepción del mundo como una simple suma de objetos y fenómenos dispersos y desligados entre sí. ✚



José Luis Álvarez G.
Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Manuel Lozano Mejía por la observación sobre la importancia de Christian Huyghens en el desarrollo del principio de la inercia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dugas, R. 1988. *A History of Mechanics*. Dover Publications, New York.
- Galilei, G. 1638. *Consideraciones y demostraciones sobre dos nuevas ciencias*. Editora Nacional, Madrid, 1981.
- Gómez, R., V. Marquina y J. E. Marquina. 1984. “Sobre las leyes de Newton”, en *Revista Mexicana de Física*, núm. 30 (4), p. 693.
- Koestler, A. 1987. *Kepler*. Salvat, Barcelona.
- Koyré, A. 1981. *Estudios galileanos*. Siglo XXI, México.

Newton, I. 1687. *Principios matemáticos de filosofía natural*. Alianza Editorial, Madrid, 1987.

IMÁGENES

- P. 5: Manuel Álvarez Bravo, *Bicicletas en domingo*. P. 6: Hermanos Mayo, *Lechero*; p. 7: *Bicicleta*, ca.1944. P. 8: Pedro Valtierra, La Habana, 1998. P. 9: Lázaro Blanco, ca. 1975. P. 10: Hermanos Mayo, *Policia*; p. 11: *Carrera de motos*, ca. 1944. Mariana Yampolsky, *Danzante y bicicleta*, Huejotzingo, 1988. P. 14: Jill Hartley, La Habana, 1999.