

# UNA VISIÓN HISTÓRICA DE LA IDEA DE GRAVEDAD

**Carlos C. Beas**

Una de las características más notables de la investigación histórica en nuestro siglo, y, especialmente, desde el final de la Segunda Guerra Mundial, es el cultivo de la Historia de la Ciencia. Si se considera el modo en que la ciencia ha llegado a asumir una posición central en nuestra cultura, esta circunstancia quizás no sorprenda. Un cierto conocimiento de la Historia de la Ciencia se ha convertido en un elemento indispensable de la adquisición de la conciencia histórica de nuestro tiempo.

En el ámbito de la investigación histórica que se interesa en la formación de las ideas científicas encontramos, sin duda, pocas ideas cuya historia esté más llena de enseñanzas que la historia de la idea de gravedad en la ciencia de la naturaleza, historia que podemos rastrear a lo largo de veinticuatro siglos del pensamiento occidental.

En esta oportunidad, queremos reflexionar sobre dos momentos fundamentales de la historia de esta idea. Estos momentos son:

- La idea de gravedad en Aristóteles (384-322 a.C.)
- La idea de gravedad en Newton (1647-1727 d.C.)

Con la finalidad de reflexionar acerca de este tema hemos seleccionado una serie de textos que constituyen el apoyo de nuestra reflexión. A los textos de Aristóteles y de Newton hemos añadido dos textos de Galileo (1564-1642), por las razones que se harán evidentes más adelante.

Como sabemos que son posibles otros enfoques acerca de este tema inagotable, el título es precisamente, una visión histórica de la idea de gravedad.

En la interpretación de las ideas y de los argumentos de nuestros autores hemos querido, en todo momento, basarnos en las fuentes documentales y en las interpretaciones históricas más autorizadas. En relación a la cosecha que se logra

en el estudio cuidadoso de las fuentes cuando uno acude a ellas con la intención de encontrar respuestas a determinadas preguntas, queremos citar las siguientes líneas del profesor Wolfgang Wieland de su libro sobre la *Física* de Aristóteles:

“Lo pasado puede manifestarse, súbitamente, bajo una nueva luz. Mucho de lo que hasta ahora se había pasado por alto, puede tornarse, de un modo sorprendente, significativo, pues, cada tradición se vuelve realmente viviente cuando uno se confronta con ella exigiendo respuestas a las propias preguntas. Ciertamente, no se debe pretender, en este caso, recibir sólo las respuestas que se esperaba. Uno debe tomar conciencia de que las autoridades de la tradición, una vez que se les ha devuelto la palabra, no se limitan a responder las preguntas que se les había planteado, sino que, más allá de ello, nos conducen irresistiblemente hacia la verdad expresada en su propio pensamiento” (1970).

La noción de gravedad en Aristóteles está ligada estrechamente con el conjunto de su física y de su cosmología. De estas disciplinas sólo hemos de tomar en consideración lo que sea susceptible de aclararla y de mostrar la coherencia de su concepto. Por ello, de la clasificación aristotélica de los movimientos, dejaremos de lado el movimiento según la cantidad o aumento y disminución, y el movimiento según la cualidad o alteración, y solamente trataremos el movimiento según el lugar o movimiento local. Igualmente, de este último movimiento, no hemos de considerar el movimiento circular ni el de los cuerpos que se mueven circularmente, sino únicamente de los cuerpos animados de un movimiento rectilíneo centrípeto o centrífugo en relación al centro del universo.

“El movimiento natural de la tierra, ya se trate de sus partes o de la tierra entera, se efectúa en la dirección del centro del universo; se deriva de ello, que la tierra esté, en realidad, en el centro. Sin embargo, puesto que el centro de la tierra y el centro del universo se confunden, uno podría preguntarse, ¿Cuál es aquel centro hacia el cual van naturalmente los cuerpos pesados y las partes de la tierra, es, acaso, porque es el centro del universo, que los cuerpos ligeros y el fuego, contrariamente a los cuerpos pesados, van hacia el extremo del lugar que contiene el centro? No obstante, el centro de la tierra y el centro del universo son idénticos. Por esta razón, estos cuerpos se mueven, por accidente, hacia el centro de la tierra, ya que el mismo centro de la tierra es, también, el centro del universo. Ahora bien, que sea hacia el centro de la tierra hacia donde se dirigen sus movimientos, está probado por este hecho:

los cuerpos pesados que se mueven hacia la tierra no siguen líneas paralelas, sino forman ángulos iguales, dirigiéndose, así, hacia un centro único, que es el centro de la tierra. Es, pues, manifiesto que la tierra se encuentra necesariamente en el centro y está inmóvil, no sólo por las razones que acabamos de indicar, sino también, porque los cuerpos pesados proyectados hacia arriba en línea recta por un movimiento violento, retornan al mismo punto. En consecuencia, la tierra no se mueve y solamente puede estar situada en el centro. Esto es lo que resulta claro de las consideraciones que anteceden.

Por lo demás, nuestra tesis es confirmada por los cálculos de los matemáticos que se aplican a la astronomía: los fenómenos que observamos en el cambio de las formas que determinan el orden de las estrellas concuerdan con la idea según la cual la tierra está situada en el centro". Aristóteles. *Peri Ouranou*. II. 4, 296<sup>b</sup> 6-297<sup>a</sup> 8.

Lo que se desprende del primer texto es que la tierra está inmóvil en el centro del universo, porque su movimiento natural es tender hacia este centro y ella ya lo ha alcanzado. Escribe Aristóteles en su tratado *Acerca del Cielo*, Libro IV, cap. III 310<sup>b</sup> 3-5:

“Si se pusiera la tierra en el lugar en el que se encuentra la luna actualmente, cada una de las partes de la tierra no se dirigiría hacia allí, sino hacia el mismo lugar en que la tierra se encuentra ahora”.

Ahora bien, puesto que el centro de la tierra coincide con el centro del universo, es hacia este mismo centro común adonde se dirigen por sí mismos los cuerpos pesados, acercándose a él tanto como la presencia de otros cuerpos lo permita. La experiencia, según Aristóteles, proporciona las pruebas de movimiento natural de los graves hacia el centro de la tierra. En primer lugar, es un hecho medible que los graves que descienden hacia la tierra no sigan, donde se los abandona a sí mismos, líneas paralelas, sino formen ángulos, es decir, que, prolongando las líneas de su movimiento, ellas se encuentran en el centro, cosa que, al mismo tiempo, establece la esfericidad de la tierra. Del mismo modo, escribe Aristóteles en el Libro IV. Cap. 4 311<sup>b</sup> del mismo tratado: “El movimiento del fuego hacia lo alto, como lo revela la experiencia, no forma ángulos iguales”.

Cosa que sirve también, para establecer que el universo es esférico. Luego, los cuerpos pesados que son arrojados hacia arriba, es decir, sometidos a un movimiento forzado que violenta su naturaleza, caen en un determinado punto

siguiendo una línea recta. Por último, los fenómenos observados por los astrónomos, a partir de los cuales determinan matemáticamente el orden de las estrellas, concuerdan con la tesis según la cual la tierra se encuentra en el centro del universo.

“Ahora hemos de hablar acerca de las diferencias de los cuerpos y de los fenómenos que se vinculan con ellos. En primer lugar, siguiendo así la convicción unánime, hemos de distinguir lo grave (pesado) absoluto, que está en lo bajo de todas las cosas y lo ligero absoluto, que se encuentra en la superficie de todas las cosas. Digo “absoluto” refiriéndome al mismo género de lo pesado (grave) y lo ligero y, exclusivamente, en relación a los cuerpos en los que no están unidas estas dos determinaciones. Por ejemplo, es manifiesto que el fuego, sea cualquiera su cantidad, va hacia arriba, si no se le opone ningún obstáculo, y la tierra va hacia abajo. Si la cantidad aumenta, el movimiento se hace más rápido, pero continúa siendo el mismo. Sucede algo muy distinto en relación a lo pesado y a lo ligero considerados en los cuerpos, a los cuales pertenecen ambas cualidades, en efecto, mientras ascienden a la superficie de ciertos cuerpos, en otros se ubican en su fondo. Así acontece con el aire y con el agua: ninguno de ellos es absolutamente ligero ni absolutamente pesado, ambos son más ligeros que la tierra (pues cualquiera de sus partes, tomada al azar, sube a su superficie) y más pesados que el fuego (pues cualquiera de sus partes, sea cualquiera su cantidad, descansa por debajo de él). Sin embargo, comparados entre sí, uno es absolutamente pesado y el otro absolutamente ligero, ya que el aire, cualquiera sea su cantidad, sube a la superficie del agua, y el agua, sea cualquiera su cantidad, descansa por debajo del aire.

Empero, ya que los otros cuerpos poseen, unos, la gravedad, otros, la ligereza, es evidente que la presencia, en ellos, de estas determinaciones, reside en la diferencia de los elementos que los componen; según sea mayor o menor la cantidad de éstos, los cuerpos serán, respectivamente, ligeros y pesados. En consecuencia, debemos hablar de estos elementos puesto que todo lo demás les obedece, y esto es lo que aconsejamos hacer a quienes definen lo pesado por lo lleno y lo ligero por el vacío. Si acontece que los cuerpos mismos no son mirados como siendo enteramente pesados o enteramente ligeros, esto es a causa de las diferentes propiedades de sus elementos. Quiero decir, por ejemplo, que, en el aire, un talento (35 kg.) de madera será más pesado que una mina (600 gr.) de plomo, mientras que en el agua, la madera es más ligera.

La causa de ello es que todos los elementos, con excepción del fuego, pesan, y todos, con excepción de la tierra son ligeros. La tierra pues, y todos los cuerpos en los que ella predomina, es necesariamente pesada, mientras que el agua, que es pesada, no lo es sobre la tierra, y el aire es pesado cuando no está en el agua o en la tierra, pues, en el lugar que les es propio, todos los cuerpos, incluyendo el aire, son pesados, con la única excepción del fuego. Una prueba de ello es que una vejiga inflada pesa más que cuando está vacía. Además, un cuerpo que tiene mayor cantidad de aire que de tierra y de agua, puede ser más ligero en el agua que otro cuerpo, siendo más pesado que él en el aire, puesto que no sube a la superficie del aire; sube, en cambio, a la superficie del agua". Aristóteles. *Peri Ouranou*. IV 4, 311<sup>a</sup> 15<sup>b</sup> - 12.

No obstante, si el universo tiene un centro, tiene, también, una periferia. Esta periferia o extremidad está limitada por una envoltura fija no material, que Aristóteles denomina el lugar (Física Libro IV. 212<sup>a</sup> 221-22). Aquí, igualmente, para probar la existencia del lugar, recurre a la experiencia, a saber, a la posibilidad de reemplazamiento de un cuerpo por otro, en un mismo lugar (Física 208<sup>a</sup> 1-8). Si por ejemplo, vacío un vaso lleno de agua, el aire reemplaza al agua, y es en la misma porción de lugar en donde había un momento antes el agua, donde hay ahora el aire. Pero el lugar no es únicamente una envoltura inmóvil, tiene, también, un poder, es decir, los cuerpos naturales, como el fuego o la tierra, son movidos por el poder del lugar, de acuerdo a su naturaleza, el primero hacia arriba, el segundo hacia abajo, cualquiera sea la dimensión del cuerpo. Aquí se encuentra el punto capital de la concepción aristotélica:

"Cada determinación está definida absolutamente. Arriba, no es algo indiferente, sino el lugar hacia el cual son transportados el fuego y lo ligero, igualmente, abajo, no es algo indiferente, sino el lugar hacia el cual los graves y la tierra son transportados, siendo diferentes tales determinaciones no sólo por su posición sino por su poder" (Física. L. IV. 208<sup>a</sup> 18-22).

Hay, pues. lo ligero absoluto que va hacia la periferia del universo y lo grave absoluto que va hacia su centro. Escribe Aristóteles en su tratado *Acerca del Cielo*, Libro IV. Cap. IV. 311<sup>b</sup>:

"Entiendo por ligero absoluto lo que, en virtud de su misma naturaleza, se mueve siempre hacia arriba, y por grave absoluto lo que, en virtud de su naturaleza, se mueve siempre hacia abajo, con la condición de que,

ambos casos, ningún obstáculo se oponga. Tales son, efectivamente, las dos especies de cuerpos, y, no es necesario creer, como algunos lo hacen, que todos los cuerpos son pesados... El fuego carece de peso y la tierra de ligereza. Y se podrá decir de dos cuerpos pesados, por ejemplo de un objeto de madera y de un objeto de plomo, que uno es relativamente ligero o más ligero que otro, siendo así la experiencia la que proporciona el criterio en un caso determinado: el más ligero de dos cuerpos pesados de igual masa es aquel que es superado por el otro en la velocidad de su movimiento hacia abajo” (*Acerca del cielo*. Libro IV, Cap. I 308<sup>a</sup>).

Lo que añade este segundo texto es, en primer lugar, que si la cantidad de fuego o de tierra es más grande en un cuerpo que en otro, el movimiento conserva su dirección, pero, es más rápido, y este es un teorema propio de la mecánica de Aristóteles. En segundo lugar, este segundo texto intenta explicar el movimiento de traslación de los elementos que son, en cierta forma, intermediarios entre el fuego y la tierra, es decir, del movimiento del aire y del agua. El aire y el agua son más ligeros que la tierra y más pesados que el fuego, no obstante, relativamente entre sí no se puede decir que el agua es absolutamente más pesada que el aire o que el aire es absolutamente más ligero que el agua. Finalmente, Aristóteles quiere explicar el movimiento de traslación de los cuerpos compuestos por la mezcla y la proporción de los elementos o cuerpos simples. El fuego, el aire, el agua y la tierra, en ellos. De este modo, piensa haber tenido en cuenta todas las modalidades de lo grave y lo ligero.

Para terminar esta primera parte, queremos esbozar las líneas esenciales de la concepción aristotélica. Observemos, en primer lugar, que si, según Aristóteles, “el lugar es algo independiente de los cuerpos” y que “todo cuerpo sensible se encuentra en un lugar” (*Física*, Libro IV 208<sup>b</sup> 28), este lugar es un espacio real que no es un receptáculo indiferente. Aristóteles escribe en su tratado de *Física* 208<sup>b</sup> 34-35, 210<sup>a</sup> 1-2:

“El poder del lugar es prodigioso y aventaja sobre todo, pues, aquello sin lo cual ninguna cosa existe y existe sin las otras cosas es primero necesariamente, efectivamente, el lugar no es suprimido, cuando lo que está en el se destruye”.

El mundo es un cosmos, es decir, un todo bien ordenado, donde cada cosa posee un lugar conforme a su naturaleza, a donde tiende para lograr el reposo, ya que el movimiento es como un resultado del desequilibrio cósmico. De ello se concluye

que la gravedad es una cualidad inherente a ciertos cuerpos, cualidad que, como se ha visto, es absoluta o relativa. En este cosmos, o mundo cerrado sobre sí mismo, el centro es, según el lugar, lo contrario de la periferia y todo movimiento se realiza entre contrarios; el movimiento local de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo.

A partir de aquí se deducen algunos de los principios de la dinámica de Aristóteles. Los tiempos de caída de los graves son inversamente proporcionales a los pesos, y las distancias recorridas en un mismo tiempo por los graves son, entre sí, como los pesos. Por otro lado, la velocidad de un cuerpo que se aproxima a su lugar propio, se acelera, en especial la de los graves, a medida que el grave va acercándose a su lugar natural. En este punto, no debemos olvidar que Aristóteles no tuvo la intención de formular una relación matemática del tipo de las que se encuentra en la teoría dinámica moderna. Su práctica habitual, en su tratado de Física, es proponer razones o proporciones que vinculan, por ejemplo, los tiempos que necesitarán cuerpos diferentes para recorrer la misma distancia, cuando son objeto de esfuerzos de diferentes grados. Admite, además, que más allá de ciertos límites, este tipo de razones ya no se aplica.

Si bien es cierto que la dinámica moderna, a partir de nuevas y diferentes bases, ha de rechazar las que, desde su perspectiva, parecían ser las consecuencias de la dinámica de Aristóteles, no es menos cierto que su física ofrece una coherencia tal que todos los científicos que la han estudiado concluyen, como el físico Pierre Duhem que: *“esta dinámica parece adaptarse tan felizmente a las observaciones corrientes que no podía dejar de imponerse a la aceptación de los primeros que investigaron las fuerzas y los movimientos”* (*Le Systeme du monde*. I. P. 194).

Para construir la dinámica moderna, que llegará a definir la gravedad como una relación, será necesario pasar del espacio real y de sus posiciones absolutas al espacio abstracto de la geometría euclidiana y disolver la antigua idea del cosmos.

Para comprender mejor el profundo cambio que se produjo entonces, comencemos examinando la caricatura de las teorías del movimiento anteriores a Galileo, que, en última instancia, son referidas a Aristóteles. La caricatura sugiere que:

“Las ideas que los hombres se hacían de la dinámica antes de Galileo, reposan sobre un error manifiesto. Aristóteles era un filósofo, en el mejor de los casos un naturalista, no un verdadero científico, era hábil sin duda, para coleccionar especímenes y diversas informaciones sin embargo, la explicación no era su fuerte. Postuló ciertas nociones

erróneas acerca de la relación entre el movimiento de un cuerpo y las fuerzas que actúan sobre él. Perdido en sus tinieblas afirmó que el efecto de una fuerza dada actuando continuamente sobre un cuerpo dado, era mantenerlo en movimiento a una velocidad constante; hoy, luego de haber observado los hechos, vemos que una fuerza constante produce una aceleración constante. Los sucesores de Aristóteles, que cultivaban una idea exagerada de sus capacidades intelectuales, confiaron más en sus palabras que en sus propios ojos y, únicamente, la obra de un genio obstinado como Galileo destruyó la quimera, la cual desapareció en el olvido, su verdadero lugar natural”.

En realidad, nos hallamos ante la caricatura de una caricatura. No obstante, esta concepción es muy frecuente, aún cuando aparezca bajo formas menos extremas solamente parciales o implícitas. Y la imagen de la mecánica aristotélica, así como la de la auténtica contribución de Galileo a la historia del pensamiento, encierra un excepcional conjunto de anacronismos y de leyendas. ¿Qué es lo que está mal en esta caricatura? Para comenzar, atribuye a Aristóteles un intento que él no parece haber considerado nunca, formular una relación matemática del género de las que se encuentra en la teoría dinámica moderna. Esta relación se podría expresar de este modo: *“la fuerza varía según el peso multiplicado por la velocidad”*. Sin embargo, sólo podemos leer esto en la obra de Aristóteles introduciendo en ella un anacronismo. Este tipo de ecuación matemática sólo se encuentra muy raramente antes del siglo XVI. No porque la notación utilizada no se haya inventado todavía, sino porque las ideas implícitas en la utilización de tales ecuaciones fueron concebidas en los últimos años del siglo XVI.

Por otro lado, si admitiésemos que esta ecuación expresa la concepción de Aristóteles y la interpretásemos en los términos modernos, entenderíamos el símbolo correspondiente a la velocidad como “velocidad instantánea” y entenderíamos el símbolo correspondiente a la fuerza confiriéndole su significado newtoniano que es habitual. Empero, no deberíamos olvidar que estas nociones fueron formuladas de un modo perfectamente claro recién en 1687. Naturalmente, interpretándola de ese modo, se presentarían, inmediatamente, una serie de objeciones. El término “peso” nos parecería hoy fuera de lugar y debería ser, sin duda, reemplazado por el de “masa”; si se hiciera eso, la relación entre la fuerza actuando sobre un cuerpo y su masa, determina no su velocidad, sino su aceleración, es decir, la segunda derivada respecto al tiempo de desplazamiento del cuerpo. Debemos plantearnos una pregunta ¿Queremos hacer decir a Aristóteles lo que él realmente quiso decir? Si al interpretarlo de ese modo le atribuimos una posición que no tuvo nunca, ¿Deberíamos, luego, asombrarnos si lo sorprendemos en falta?



¿De qué otro modo es posible comprender la tesis de Aristóteles? Su manera habitual, en la *Física*, es proponer, no ecuaciones, sino relaciones, razones o proporciones que vinculen, por ejemplo, los tiempos que serán necesarios a diferentes cuerpos para recorrer la misma distancia mientras son objeto de esfuerzos de grados diferentes.

Él presenta estos ejemplos como tareas a realizar, y, plantea sus preguntas del modo siguiente: si determinada tarea exige un determinado tiempo, ¿cuánto tiempo será necesario para realizar otra tarea igualmente determinada? Por ejemplo: si un solo hombre puede transportar un cuerpo dado cien metros en una hora, ¿cuál será el tamaño del cuerpo que dos hombres podrán transportar juntos? La misma distancia sobre la cual puede ser desplazado un cuerpo por mi esfuerzo determinado variará en proporción inversa de las dimensiones del cuerpo en cuestión y, del mismo modo, un cuerpo dado puede ser desplazado en un determinado tiempo sobre una distancia directamente proporcional al esfuerzo empleado.

Aristóteles admite que más allá de ciertos límites este tipo de relaciones ya no se aplica. Un cuerpo puede ser tan pesado que no pueda ser desplazado más que por hombres que trabajen en equipo, cita el desplazamiento de una embarcación por un equipo de marineros (*Física*. Libro VII. 5).

Va más lejos, observando, con razón, que el efecto que puede ser obtenido por un esfuerzo dado, depende enteramente de las resistencias que deba vencer (*ibidem*). Siguiendo a Toulmin, es necesario observar tres cosas a propósito de estas relaciones establecidas por Aristóteles, antes de considerar las innovaciones del siglo XVII en materia de dinámica.

La primera es que Aristóteles concentró su atención en los movimientos de los cuerpos a los cuales se opone una resistencia apreciable y sobre la duración necesaria para un cambio completo de posición de un lugar a otro. Por distintas razones, él no abordó nunca el problema de la definición de la “velocidad” en los casos en los que se considera progresivamente duraciones cada vez más pequeñas, es decir, el problema de la velocidad instantánea. Tampoco estaba dispuesto a interesarse seriamente en el modo en que los cuerpos se mueven cuando son suprimidos completa y efectivamente todos los agentes de resistencia.

Aristóteles no se dejaba atraer a la discusión de ejemplos imposibles o extremos. Si dejamos de lado, por el momento, el caso particular de la caída libre, todos los movimientos que observamos alrededor nuestro son producidos por un equilibrio más o menos completo entre dos grupos de fuerzas: las que tienden a mantener el

movimiento y las que tienden a resistirlo. Y en la vida cotidiana, es necesario siempre un tiempo determinado para que un cuerpo pueda recorrer una distancia determinada.

Por ello, a Aristóteles le hubiera parecido exageradamente abstracto el problema de la velocidad instantánea. Hubiera reaccionado del mismo modo ante la idea de un movimiento al que no se opondría ninguna resistencia. Con Toulmin, pienso que tenía razón, pues, aún en el así llamado vacío interestelar, en donde los obstáculos, en relación a fines prácticos, son enteramente desdeñables, no es menos verdadero que hay algunas resistencias ínfimas, aún cuando sean intermitentes.

En segundo lugar, si nos interesamos en el género de movimiento que el mismo Aristóteles considera como típicos, descubriremos que sus proporciones conservan un lugar respetable en la física del siglo XX. Si se las interpreta, no como leyes de la naturaleza rivales de las de Newton, sino como generalizaciones de la experiencia, algunas de sus ideas son perfectamente válidas. Mientras él proponía solamente relaciones aproximadas, cualitativas, entre medidas groseras de distancia y de tiempo, la física contemporánea admite una ecuación matemática que les corresponde, si bien, evidentemente, es cierto que esta ecuación pone en relación variables instantáneas, es decir, de un tipo que Aristóteles no utilizó nunca.

Esta ecuación es conocida bajo el nombre de la Ley de Stokes (1851). Establece una relación entre la velocidad en la cual un cuerpo se mueve en un medio que le opone una resistencia, por ejemplo, un líquido, y la fuerza que actúa sobre él, así como la consistencia o viscosidad del medio. De acuerdo con Stokes, la velocidad del cuerpo, en estas circunstancias, será directamente proporcional a la viscosidad del líquido. Supongamos que soltamos sucesivamente una bola de billar en líquidos de viscosidad diferente, por ejemplo, agua, miel, mercurio: en cada uno de los casos, la bola ha de acelerar durante un instante, luego, descenderá regularmente a velocidad límite o terminal, determinada por la viscosidad del líquido en cuestión. Si se duplicara la fuerza inicial, se duplicará la velocidad de caída, si uno de los líquidos es dos veces más viscoso que otro, la bola de billar descenderá dos veces menos rápidamente.

Este tercer punto sintetiza los dos anteriores. Aristóteles funda su análisis en una concepción explicativa particular, formulada a partir de ejemplos cotidianos. Él utilizó estos ejemplos como puntos de comparación al intentar comprender y explicar todos los movimientos. Según él, si se quiere comprender el movimiento de un cuerpo se debe proceder como se haría con relación a una carreta jalada por un

caballo, es decir, se deberían considerar dos factores: el agente externo (el caballo) que mantiene el cuerpo (la carreta) en movimiento, y las resistencias (las asperezas del camino y la fricción de la carreta) que tienden a detener el movimiento. Explicar este fenómeno significa reconocer que el cuerpo se mueve con un movimiento adecuado a un objeto de su peso cuando está sometido a una combinación precisa de fuerzas y de resistencias. Lo que se puede esperar es un movimiento regular que resulta de un equilibrio entre fuerzas y resistencias. Todo movimiento que sea un ejemplo de este equilibrio será considerado como explicado.

El análisis de Aristóteles ya no se aplica, como vemos, en el caso de cuerpos superando resistencias suficientemente débiles. Si se lanza la bola de billar al aire y ya no en el agua o la melaza, continuará acelerándose largo tiempo: en las condiciones terrestres normales, no podrá nunca caer sobre una distancia suficientemente grande para alcanzar la velocidad límite en la cual la ley de Stokes comenzaría a aplicarse. En este caso, el factor más importante sería el período de aceleración inicial, tema del cual Aristóteles no prestó atención.

Straton fue el primero de sus discípulos que, al interesarse activamente en la mecánica, dirigió su atención a este preciso fenómeno. Sin embargo, correspondió a los matemáticos de Oxford al comienzo del siglo XIV añadir una definición adecuada de la aceleración a las concepciones aristotélicas sobre la velocidad, abriendo así la vía a los trabajos de Stevin, de Galileo y de Newton.

Prosigamos ahora, con nuestras reflexiones sobre la transición hacia la física moderna.

“Finalmente en este estudio del movimiento naturalmente acelerado, hemos sido conducidos como de la mano observando la regla que sigue habitualmente la naturaleza en todas las demás operaciones en las que tiene la costumbre de obrar empleando los medios más ordinarios, más simples y más fáciles. Pues no habrá nadie, pienso, que admita que sea posible nadar o volar de un modo más simple o más fácil que el modo del cual los peces y las aves se sirven instintivamente.

Cuando observo, pues, a una piedra que cae desde una cierta altura a partir de un estado de reposo recibiendo continuamente nuevos incrementos de velocidad, ¿por qué no habría de creer que estos incrementos tienen lugar según la proporción más simple y más evidente? Ahora bien, no hemos de encontrar ninguna adición, ningún incremento más simple que el que siempre se repite del mismo modo. Esto lo

comprenderemos fácilmente reflexionando sobre la estrecha afinidad entre el cuerpo y el movimiento. En efecto, del mismo modo que la uniformidad del movimiento se define y se concibe gracias a la igualdad de los tiempos y de los espacios (llamamos movimiento uniforme cuando espacios iguales son franqueados en tiempos iguales), podemos concebir del mismo modo incrementos de velocidad. De este modo, cualquiera que sea el número de partes iguales de tiempo que han transcurrido desde el instante en que el móvil, abandonando el estado de reposo, ha comenzado a descender, el grado de velocidad adquirido al término de las dos primeras partes de tiempo será el doble del grado adquirido durante la primera parte; y así, después de la tercera parte, el grado alcanzado será el triple, y después la cuarta, el cuádruple del grado ganado en la primera parte. De modo que, para mayor claridad, si el móvil debiera continuar moviéndose con el grado o momento de velocidad adquirido durante el primer intervalo de tiempo y conservar, luego, esta misma velocidad uniformemente, su movimiento sería dos veces más lento que si hubiese efectuado con el grado de velocidad adquirido en dos intervalos de tiempo. No nos apartaremos, pues, de la recta razón, si admitimos que la intensificación de la velocidad es proporcional a la extensión del tiempo, de esta manera, la definición del movimiento del que hemos de tratar puede formularse del modo siguiente: digo que un movimiento es igual o uniformemente acelerado cuando a partir del reposo, recibe, en tiempos iguales, momentos iguales de velocidad". Galileo. *Discorsi in torno a due ve Scienze* (1638, p. 131).

El inicio del primer texto, en el que Galileo dice inspirarse en su investigación en el principio de la simplicidad de la naturaleza, puede asombrarnos. Esta forma de hablar no parece ser la de un científico. Recordemos no obstante, que esta referencia a la finalidad de la naturaleza, que se encuentra, por lo demás, en los escritos de Leibniz y de Newton, no debe distraernos. Galileo no llegará a saber la razón por la que los cuerpos caen, y la respuesta obtenida por Newton suscitará, a su vez, nuevas preguntas. Pero la finalidad de las vías naturales está ausente de la obra positiva de Galileo. Obra que consiste en determinar cómo caen los cuerpos.

La caída de los cuerpos es un movimiento uniformemente acelerado. Tal es la ley que funda la ciencia moderna, ley enunciada por Galileo en 1604. En su enunciación completa, se formula de este modo: "La velocidad de un cuerpo que cae, aumenta proporcionalmente al tiempo de caída y esta aceleración de la velocidad es la misma para todo los cuerpos". El método seguido por Galileo para llegar a este punto difiere totalmente del método de Aristóteles. Como hemos indicado,

Aristóteles generaliza y sistematiza las condiciones de la experiencia cotidiana. Galileo parte del dato sensible e irrecusable de que el movimiento de caída no es uniforme, y de que la velocidad de caída aumenta. Sobre esta base comienza a razonar un matemático, es decir, define rigurosamente los elementos que están en este movimiento cualquiera sea el cuerpo que caiga. Un grave que se hallaba en reposo y desciende en caída libre, adquiere en el primer instante (o primeros segundos) de su movimiento un cierto grado o momento de velocidad y, luego, de segundo en segundo, este mismo momento se repetirá, confiriendo al móvil nuevos incrementos de velocidad. De esta manera, el movimiento de caída será reconstruido a partir de una unidad elemental de incremento.

Es muy fácil concebir este incremento elemental idéntico de instante en instante. Ahora bien, si se ha definido el movimiento uniforme de un móvil como el recorrido en tiempos iguales de espacios iguales, se deducirá de ello que el movimiento uniformemente acelerado es aquel en el que incrementos iguales de velocidad se adicionan unos a otros en tiempos iguales. Así, pasa Galileo a la simplicidad matemática por la sumatoria de instante en instante de cantidades elementales.

“Un cuerpo pesado posee, por naturaleza, un principio intrínseco para moverse hacia el centro común de los graves, es decir, de nuestro globo terrestre, con un movimiento continuo y siempre igualmente acelerado, es decir, que en tiempos iguales se adicionan momentos y grados iguales de velocidad. Se debe comprender que es así, al menos cada vez que hayan sido apartados todos los obstáculos accidentales y exteriores; ahora bien, hay un obstáculo que no podemos suprimir, a saber, el medio pleno que el móvil, al caer, debe apartar al penetrarlo: por fluido, por tenue o tranquilo que sea el medio, se opone efectivamente al movimiento que lo atraviesa con una resistencia cuya magnitud depende directamente de la rapidez con la cual debe abrirse para ceder el paso al móvil; y como éste, por naturaleza, va acelerando continuamente, encuentra, de parte del medio, una resistencia sin cesar creciente de la que resulta una disminución en adquisición de nuevos grados de velocidad, tanto que, a fin de cuentas, la velocidad, por una parte, y la resistencia del medio, por la otra, alcanza una magnitud en la que, al equilibrarse ambas, es impedida toda aceleración y el móvil es obligado a un movimiento regular y uniforme que conservará constantemente en adelante. Hay, pues, aumento en la resistencia del medio, no porque su esencia cambie, sino porque hay variación en la velocidad con la cual debe abrirse y apartarse para dar paso a un móvil cuyo movimiento es continuamente acelerado. Advirtiendo, pues, que si el aire ofrece una

gran resistencia al momento ligero de la vejiga y se opone muy débilmente al peso del plomo, tengo por cierto que la ventaja que resultaría de la supresión total del aire seña tan importante para la vejiga y tan insignificante para el plomo que sus velocidades se bañan iguales”. Galileo. *Discorsi in torno a due nuove Scienze* (1638, pp. 62-63).

En el segundo texto aparece otro aspecto del método de Galileo. Se puede hablar, si se quiere, del método experimental, con la condición, no obstante, de advertir que la parte de la razón es, en él, predominante. En Galileo la razón supera siempre la experiencia bruta y, en muchos casos, el razonamiento que la razón construye, o bien se prolonga más allá de los límites de la observación, o sustituye a la experimentación que Galileo no está en condiciones de realizar o hace que sea superflua.

Galileo parte, pues, del principio según el cual una fuerza immanente de todos los cuerpos los arrastra hacia el centro de la tierra con la misma velocidad y conforme a un movimiento uniformemente acelerado, sean o no estos cuerpos del mismo peso específico y cualquiera sea su volumen. Pero la ley de este movimiento solamente se aplica a los graves en caída libre en el vacío, lo que significa para Galileo que se trata de una caída teórica, ¿cómo llega a esta conclusión? En primer lugar, observa lo que *“acontece a móviles de gravedades diferentes colocados en medios de resistencia diferente”*. Ahora bien, ¿qué es lo que muestra la experiencia? *“En el medio más tenue, aunque no vacío, para pesos muy desiguales, la diferencia de velocidad es muy pequeña y casi insensible”*. Por el contrario, las diferencias de velocidad se hacen muy notables cuando el medio es de una densidad mayor, es decir, cuando ofrece una mayor resistencia a los graves. *“Determinado móvil, que cae en el aire, no sólo no ha de descender en el agua, sino permanecerá perfectamente inmóvil o remontará a la superficie”*. Las diferencias de velocidad en la caída de los diferentes cuerpos, tales como las revela la experiencia corriente, se explican como efecto de una disminución debida al medio en el cual cae. Galileo no se detiene en este punto y declara: *“Es entonces que me vino a la mente que si se suprimía totalmente la resistencia del medio, todos los cuerpos descenderían a la misma velocidad”*. Ahora bien, *“únicamente un espacio absolutamente vacío de aire, y de cualquier otra cosa, por tenue y fácil de penetrar que sea, haría perceptible lo que queremos descubrir”*. Empero, las condiciones de este experimento no eran realizables en esta época. Por lo cual, Galileo extrapola, mediante el razonamiento, el significado de las constataciones parciales y deduce la ley. Se advierte que la ley de la caída de los cuerpos le ha sido sugerida por la observación, pero él generaliza y concluye por medio de un paso al límite.

No obstante, si bien es cierto que Galileo realiza la extrapolación ya que no puede proceder a una observación completa, no se resigna a ello. Por este motivo, posteriormente, inventa una experiencia confirmativa, la de los dos péndulos. Galileo ata, a dos hilos finos de la misma longitud (alrededor de 2.5 m.) respectivamente, una bola de plomo y una bola de corteza. Suspende los dos péndulos a un punto fijo y, apartándolos igualmente de la perpendicular, los suelta simultáneamente. Ambos péndulos realizan regularmente sus oscilaciones al mismo tiempo, pero, en compensación la amplitud de las vibraciones del péndulo de corteza, disminuye mucho más rápidamente que la del péndulo del plomo. Galileo concluye de ello que el primero es menos apto para vencer la resistencia del aire y que, si se suprimiera la acción retardadora del medio, los movimientos de los dos péndulos serían idénticos.

Parece que la parte del razonamiento es aún mayor en la explicación que Galileo da de los que denominamos la velocidad límite. Si la resistencia del medio aumenta proporcionalmente a la de la velocidad, llegará un momento en el que el crecimiento continuo y regular de la fuerza de aceleración imprimida, al grave encontrará una resistencia cada vez más grande del medio que atraviesa, de modo que, en el límite, esta fuerza deberá aplicarse enteramente al vencer la resistencia del medio y, en ese momento, haciéndose imposible la aceleración, el movimiento proseguirá de modo uniforme. Esta consecuencia vale para todos los cuerpos y para todos los medios. No obstante, es también la observación la que le sugirió la idea de esta extrapolación aun cuando la experiencia haya permanecido grosera y no medida, advirtiendo, entre otros ejemplos, que un proyectil arrojado desde lo alto de una torre, hace en el suelo una marca menos importante que la que hace cuando es arrojado desde una distancia corta.

En otros casos, parece que Galileo estimara que no tiene ninguna necesidad de la experiencia y es entonces cuando el físico razona como un matemático. ¿Cómo explicar, por ejemplo, que una bola de plomo caiga mas rápidamente en el aire que un puñado del mismo peso de plomo pulverizado? El razonamiento es enteramente característico del modo de pensar de Galileo. Si tomo un dado cúbico, y cada una de cuyas aristas mide 2 pulgadas, cada una de sus caras tiene 4 pulgadas cuadradas y su superficie total 24 pulgadas cuadradas. Si ahora divido este dado en 8 dados cúbicos iguales, cada cara de estos 8 dados tendrá una pulgada cuadrada, la superficie de cada dado pequeño será de 6 pulgadas cuadradas: y la superficie total de los 8 dados será de 48 pulgadas cuadradas. Puedo continuar la división y advierto que “el volumen, y al mismo tiempo, el peso, disminuye mucho mas rápidamente que la superficie”. Se debe concluir, pues, que “la resistencia engendrada por el contacto entre la superficie del móvil y el medio, crece más

rápidamente para los cuerpos más pequeños que para los más grandes”. Esta resistencia es, pues importante para el plomo pulverizado que para la bola de plomo. Este tipo de experiencia imaginaria es lo que el físico Ernest Mach en su libro *Conocimiento y error* ha denominado *Gedankenexperiment*, y consiste en un razonamiento geométrico decisivo que podría hacer superflua la experimentación.

Con frecuencia se alude al platonismo de Galileo citando su famosa declaración:

“La filosofía está escrita en este muy vasto libro que está abierto ante nuestros ojos, quiero decir el universo, pero no se puede comprenderlo si no se aprende a comprender la lengua y los caracteres en los que está escrito. Ahora bien, el universo está escrito en lengua, sus caracteres son los triángulos, los círculos y las demás figuras geométricas, sin las cuales es absolutamente comprender una sola palabra; sin las cuales uno yerra, en verdad, en un laberinto obscuro” (II Saggiatore. Q. 6).

Sin embargo, este texto no indica que, para Galileo, la mente pueda prescindir de la experiencia. El texto traduce una fe, en cierta forma, racional, en la aptitud del hombre para penetrar en los secretos de la naturaleza, ya que, si se nos permite utilizar una expresión de Leibniz, hay una armonía preestablecida entre la naturaleza y la mente. “*La naturaleza ha producido, primero, las cosas a su guisa, luego ha fabricado la razón humana haciéndola capaz de descubrir (aunque no sin dificultad) una parte de sus secretos*”.

No obstante, lo que caracteriza propiamente a Galileo es que esta fe directriz no dispensa de verificar la realidad de esta armonía y es precisamente el tratamiento matemático del fenómeno lo que permite esta verificación. En una carta a Carcary del 5 de junio de 1637, Galileo muestra que para estudiar científicamente un fenómeno es necesario reducirlo a sus elementos esenciales, es decir, si es posible, a elementos matemáticos mensurables. Dicho en otros términos, como se diría hoy, construye un modelo matemático reduciendo los datos de la experiencia a un hecho científico abstracto. Luego, deduce las consecuencias de este modelo y las verifica, si es posible, por la observación. Los objetos físicos que ingresan en los teoremas de la dinámica de Galileo son todos fenómenos abstractos. De este modo, puede Galileo estudiar cada fenómeno en sus relaciones cuantitativas más simples con otros fenómenos igualmente abstractos. Es la construcción de estos hechos geométricos cuantitativamente determinados lo que fecunda la experiencia y le confiere la inteligibilidad.



Los textos de Newton que hemos elegido lo han sido no tanto para recordar la fórmula clásica de la ley de la atracción universal como para reflexionar sobre los presupuestos de su método y de su teoría.

“Siendo móviles todos los cuerpos que conocemos y estando dotados de una cierta fuerza (que llamamos fuerza de inercia) por la cual perseveran en el movimiento o en el reposo, debemos concluir que todos los cuerpos, en general, tienen estas propiedades. La extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad y la inercia del todo, vienen pues, de la extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad y la inercia de las partes; de aquí concluimos que todas las partes pequeñas de todos los cuerpos son extensas, duras, impenetrables, móviles y dotadas de la fuerza de inercia. Y este es el fundamento de toda la física.

Finalmente, puesto que es constante y verificable por las experiencias y observaciones astronómicas que todos los cuerpos que están cerca de la superficie de la tierra pesan sobre la tierra, según la cantidad de su materia; que la luna pesa sobre la tierra en razón de su cantidad (la materia; que nuestro mar pesa a su vez, sobre la luna, que todos los planetas pesan naturalmente unos en relación a los otros, y que los cometas pesan también sobre el sol, se puede concluir según la tercera regla (“Las cualidades de los cuerpos que no son susceptibles de aumento o disminución y que pertenecen a todos los cuerpos sobre los que se pueden realizar experiencias deben ser consideradas como pertenecientes a todos los cuerpos en general”) que todos los cuerpos gravitan mutuamente, unos en relación a los otros. Y este razonamiento a favor de la gravedad universal de los cuerpos, extraído de los fenómenos, será más fuerte que el razonamiento por el cual se concluye su impenetrabilidad: puesto que no tenemos ninguna experiencia ni observación ninguna que nos asegure que los cuerpos celestes son impenetrables. Sin embargo, no afirmo que la gravedad sea, esencial a los cuerpos. Y entiendo por la fuerza que reside en los cuerpos la sola fuerza de inercia, que es inmutable, mientras que la gravedad disminuye a medida que algo se aleja de la tierra”. Libro III. Vol. 11. Newton. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. 1687, pp. 2-5.

El primer texto comienza con una referencia al principio de inercia, que se puede enunciar más explícitamente del siguiente modo: un cuerpo en reposo permanecerá en él indefinidamente, un cuerpo dejado a sí mismo con una cierta velocidad conservará esta velocidad, si ninguna acción exterior o interior se ejerce sobre él.

Además, el principio se aplica tanto a las partes del cuerpo como a su totalidad. Es, pues, la inercia una propiedad esencial de los cuerpos o de la materia, y Newton añade que es el fundamento de toda la física, lo que significa que el conjunto de los fenómenos físicos debe poder explicarse de un modo puramente mecánico.

Puede advertirse una cierta ambigüedad en el modo de pensar. Newton se expresa como si extrajese de la experiencia esta universalidad de la inercia; no obstante, la inducción por la cual él la plantea como esencial a todos los cuerpos y a todas las partes de estos cuerpos parece exceder la observación. En compensación, luego de haber afirmado la gravedad universal de los cuerpos, añade ulteriormente, sin corregir el texto primitivo, que la gravedad disminuye a medida que se aleja de la tierra. Se puede admitir que el pensamiento final de Newton es que la inercia, que está en función de la masa del cuerpo, es una propiedad inherente de la materia; mientras que la gravedad está en función de la atracción, cuya fuerza disminuye con la distancia. La indicación es discreta, como si los datos de la experiencia no lo autorizaran a seguir la idea hasta el final.

Si prescindimos del paréntesis sugerido por nuestro párrafo anterior, la concepción de la gravitación ha sido claramente presentada como una acción recíproca universal que los cuerpos ejercen unos sobre otros, según la cantidad de materia que, los compone, es decir, proporcionalmente a su masa. Por ejemplo, la luna pesa sobre la tierra, mientras que el mar pesa sobre la luna, y así sucesivamente. De este modo, el peso, del cual tenemos una experiencia cotidiana, es como un caso particular de la gravitación universal. Newton lo muestra en el hecho de emplear indiferentemente los términos de peso y de gravedad. No obstante, es necesario advertir que esta asimilación representa el paso inmenso que ha sido dado con relación a Galileo, ya que desde entonces, la mecánica celeste se identifica con la mecánica terrestre. No es, sin duda, una casualidad que, de todos los ejemplos (la gravitación, Newton cite en primer lugar el de la luna que pesa sobre la tierra, si recordamos la anécdota referida por Voltaire, según la cual Newton, viendo caer una manzana, habría comprendido el movimiento de la lima y habría sugerido, entonces la idea de la atracción universal (*Lettres Philosophiques*. 15)). No obstante, debemos cuidarnos de creer que la analogía que existe entre la caída de una manzana al suelo y el movimiento de la luna alrededor de la tierra sea una revelación de la experiencia. La rotación de nuestro satélite es comparable a la rotación de una piedra fijada en la extremidad de una honda. Si la piedra no se escapa “siguiendo la tangente” de la órbita que realmente describe, es que es retenida por una fuerza elástica que proviene de la cuerda. Del mismo modo, la luna se encuentra sometida, de parte de la tierra, a una fuerza denominada gravitatoria o gravífica, que le impide abandonar su órbita y que es, justamente, la

fuerza que determina la caída de una manzana. Esto se desprende del testimonio directo de un contemporáneo: “Sir Isaac tuvo la idea de preguntarse sino era la misma fuerza la que, por una parte, mantiene la tierra en su órbita, a pesar de su elevada velocidad, de la cual él sabía que tiende siempre a hacerla desplazar a lo largo de una recta que es tangente en relación a su órbita, y que, por otra parte, hace caer hacia abajo las piedras y todos los cuerpos pesados, fuerza que denominamos gravedad. Asumiendo como postulado -cosa que ya se había pensado antes- que una tal fuerza podría decrecer en proporción doble de las distancias a partir del centro de la tierra” (Whiston. *Memoirs*. 1749).

Empero, si bien es verdad que Newton tuvo precursores, él fue el primero en construir una teoría matemática susceptible de ser sometida a una verificación experimental precisa, al mismo tiempo que, de este modo, pasa de una conjetura a una proposición establecida científicamente, ampliando su concepción a las dimensiones del universo. Efectivamente, él hallará la misma relación entre los planetas, luego entre los cometas y el sol, estando, finalmente, en la situación de concluir que todos los cuerpos se atraen proporcionalmente a sus masas y en razón inversa del cuadrado de su distancia mutua.

Se advertirá que Newton no hace uso del término “abstracción”, ya que, si hablamos rigurosamente, es gracias a un razonamiento extremadamente complejo que pudo pasar de la pesantez o gravedad, que es una cualidad sensible, directamente percibida en los cuerpos naturales, a la gravitación, que aún la recuerda y, finalmente, a la atracción, que supone una acción a distancia que se ejerce entre dos cuerpos cualitativamente determinados. Debieron transcurrir casi 20 años entre la idea y su demostración, pues, es solamente alrededor de 1685 que Newton establece la ley según la cual una esfera (la tierra) atrae un cuerpo ubicado fuera de ella como si toda su masa estuviera concentrada en su centro. Es cuando pudo disponer de las medidas del francés Picard sobre las dimensiones de la tierra y, también, sin duda, de las del holandés Huygens sobre la aceleración de la gravitación en la superficie de la tierra, que pudo comparar la gravedad terrestre y la atracción cósmica para concluir en su identidad.

Se ve que la teoría de Newton es la culminación de una reflexión muy larga, en el curso de la cual un acontecimiento particular como la caída de una manzana pudo haber ocasionado la primera intuición. Newton mismo, interrogado acerca de la vía que condujo a su descubrimiento, respondió: “*pensando siempre en ello*”. De acuerdo a otro testimonio, habría precisado: “*conservo el tema de mi investigación constantemente ante mí, esperando que las primeras claridades se anuncien lentamente y poco a poco, hasta convertirse en una plena claridad total*”.

Concluyamos la presentación de este primer texto esbozando lo que caracteriza el mundo de Newton en sus líneas fundamentales. Mientras el mundo de Descartes se reduce a la extensión y al movimiento de esta extensión, el mundo de Newton está constituido por cuatro elementos. En primer lugar, la materia, es decir, un número infinito de partículas discontinuas, inmutables, no idénticas; luego, el movimiento que no modifica la naturaleza de las partículas, transportándolas en el vacío de un lugar a otro; enseguida, el espacio, es decir, este vacío continuo y homogéneo, que no ejerce ninguna acción sobre el movimiento; finalmente, la atracción, que confiere a este mundo su coherencia y su unidad. Un mismo sistema de leyes gobierna todos los movimientos del universo conocido. ¿Qué es la atracción para Newton?

“Hasta ahora he explicado los fenómenos celestes y los marinos por la fuerza de gravitación, pero no he asignado ningún lugar a la causa de esta gravitación. Esta fuerza proviene de alguna causa que penetra hasta el centro del sol y de los planetas sin perder nada de su actividad; no obra según la magnitud de sus superficies (como las causas mecánicas) sino según la cantidad de la materia; y su acción se extiende a todas partes y a distancias inmensas, decreciendo siempre según la razón doble (el cuadrado) de las distancias.

Aún no he logrado deducir de los fenómenos la razón de estas propiedades de la gravedad y no quiero inventar hipótesis. Todo lo que no se deduce de los fenómenos es una hipótesis; y las hipótesis sean metafísicas, físicas o mecánicas, o como la de las cualidades ocultas, no deben ser admitidas, en la filosofía experimental.

En esta filosofía, se extraen las proposiciones de los fenómenos y se las generaliza luego por inducción. Es así como la impenetrabilidad, la movilidad, la fuerza (impulsora) de los cuerpos, las leyes del movimiento y las de la gravedad, han sido conocidas. Es suficiente que exista la gravedad, que actúe según las leyes que hemos expuesto, que pueda explicar todos los movimientos de los cuerpos celestes y de los que se encuentran en el mar.

Aquí deberíamos decir algo sobre este espíritu sutil que penetra todos los cuerpos sutiles y que está oculto en su substancia; es por la fuerza y por la acción de este espíritu que las partículas de los cuerpos se atraen mutuamente en las distancias más cortas y se unen cuando son contiguas; es también por medio de este espíritu que la luz emana, se

refleja, se desvía, se retrae y calienta los cuerpos; es por él que los cuerpos eléctricos actúan a las mayores distancias ya sea para atraer o para rechazar los corpúsculos vecinos; todas las sensaciones son excitadas y los miembros de los animales movidos cuando su voluntad lo ordena, por las vibraciones de los sentidos, por los hilos firmes de los nervios, hasta el cerebro, y después, desde el cerebro a los músculos. No obstante, estas cosas no se pueden explicar con pocas palabras; no se tiene aún un número suficiente de experiencias para poder determinar exactamente las leyes según las cuales actúa este espíritu universal”. Newton. *Philosophiae naturalis Principia Mathematica*. 1687. Escolia general. Vol. R. P. 178-180.

De toda la obra de Newton, este es el texto que ha suscitado hasta hoy el mayor número de comentarios. En él, Newton se esfuerza en caracterizar la filosofía natural, es decir, lo que llamaríamos nosotros la ciencia experimental. Determina los límites dentro de los cuales ha circunscrito su investigación, al mismo tiempo que define el método que ha de seguir y del que no pretende apartarse. ¿Qué es la gravitación o atracción? Newton recuerda, primero, los efectos de los cuales ella es la causa, su modo de acción y la ley que los gobierna. No se pronuncia sobre la naturaleza de esta causa porque “no ha podido todavía deducir de los fenómenos” la razón de las propiedades de la gravedad. Esta expresión “deducir de los fenómenos”, sorprende. En el lenguaje epistemológico moderno se diría más bien, que se induce las leyes a partir de los fenómenos y que se deducen los fenómenos a partir de las leyes o de los principios de la teoría que domina estas leyes. En julio de 1672, escribe Newton a Oldenburg: “como usted sabe, el verdadero método para averiguar las propiedades de las cosas es deducirlas de las experiencias”. En otros términos, Newton llama deducción a todo razonamiento que permite establecer matemáticamente un resultado. Al proponerse “deducir las causas de los efectos”, reserva la palabra inducción para las generalizaciones. En su tratado de *Optica* de 1704 define más claramente su método:

“Tanto en la física como en las matemáticas se debe emplear, en la investigación de las cosas difíciles, el método analítico antes de recurrir al método sintético. El primer método consiste en hacer experiencias y observaciones y, extraer de ellas, por inducción, conclusiones generales y no admitir ninguna objeción contra estas conclusiones, que no se derive de alguna experiencia o de otras verdades ciertas. Pues, para las hipótesis, no se debe tener ningún miramiento en la filosofía experimental. Y aún cuando los razonamientos fundados por inducción sobre experiencias y observaciones no establezcan demostrativamente

conclusiones generales, esta es, no obstante, la mejor manera de razonar que pueda admitir la naturaleza de las cosas. Debiendo ser reconocida como tanto mejor fundada, cuanto más general sea la inducción... En cuanto a la síntesis consiste en asumir como principios causas conocidas y bien probadas, en explicar por medio de ellos los fenómenos que de ellos se derivan y en probar estas explicaciones” (L. III. Q.21).

Tal es la tarea que se ha fijado Newton, la cual, en su opinión, representa un considerable progreso en la filosofía y, a la cual dice Newton limitarse. Él ha descubierto los principios del movimiento, “dejó a otros el cuidado de descubrir sus causas”.

Así, pues, si se está en la incapacidad de conocer la naturaleza de estas causas, el imperativo de la ciencia experimental es abstenerse de toda hipótesis. ¿Qué es una hipótesis? Le incumbe a Newton alguna responsabilidad en el equívoco que sus escritos hicieron pesar sobre el vocablo y en la desconfianza que trajo consigo, mucho tiempo después de él, la condenación mal comprendida de las suposiciones inverificables, con las cuales se confundió lo que es actualmente el motor más importante de la investigación científica. Por lo demás, inicialmente, Newton atribuyó al vocablo un significado positivo. En ocasión de la primera lectura de los *Principia* en la Royal Society de Londres, la obra de Newton fue presentada como conteniendo “una demostración matemática de la hipótesis copernicana planteada por Kepler” (Sesión del 28 de abril de 1686). Aquí la hipótesis es conceptualizada como la base de la teoría. Por otra parte, Newton no vaciló en la óptica en recurrir expresamente a una hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz porque consideró que conducía a cálculos controlables por la experiencia. No obstante, él reemplazó ulteriormente el vocablo hipótesis -tomado en estas acepciones- por el vocablo *regia*, y en adelante, sólo ha de utilizarlo para designar una conjetura arbitraria o fantástica, una ficción fabricada especialmente para un caso, sin nada que la justifique.

Newton percibió claramente las dificultades suscitadas por la idea de la atracción. Escribe a Berkeley:

“Admitir que la gravitación pudiera ser innata, inherente y esencial a la materia, de tal modo que un cuerpo pudiese obrar sobre otro a distancia a través del vacío, sin necesitar un intermediario gracias al cual su acción puede ser llevada de uno a otro, es para mí un absurdo tan grande que no puedo creer que alguien, que tenga una cierta capacidad en materia filosófica, pueda incurrir en él. La gravedad debe tener como

causa un agente que obre constantemente de acuerdo a ciertas leyes; yo he dejado a mis lectores decidir si este agente es material o inmaterial” (carta del 25 de febrero de 1692).

No se debe, pues, entender literalmente el vocablo atracción. Todo sucede como si los cuerpos se atrajesen mutuamente: el principio de gravitación universal se impone, es un hecho de experiencia, y cuando un conocimiento es cierto, es necesario admitirlo aún si no es enteramente inteligible. La ignorancia de las causas no es un obstáculo al progreso de la investigación.

En el último párrafo del segundo texto, advirtamos un punto esencial de la teoría de Newton, punto que confirma el rechazo de las hipótesis físicas. Únicamente las atracciones moleculares son reales, es decir, aquellas que se ejercen entre las partículas que componen los cuerpos. La atracción global sólo tiene una existencia matemática.

Finalmente, si bien es cierto que, en el pensamiento de Newton, el dominio de la ciencia y los dominios de la metafísica o de la religión son muy distintos, no es menos cierto que la concepción que tiene Newton de la ciencia, está ligada a una metafísica defista que admito que es necesario un relojero para el reloj del universo. Sin duda, Newton delega al lector la responsabilidad de atribuir a la atracción una causa material o inmaterial. En cuanto a él, no se puede dudar que hizo su elección:

“Ciertamente, Dios está presente en el mundo y obra constantemente. La causa primera, no es mecánica, es un agente poderoso, siempre viviente, único capaz de formar y reformar las partes del universo. Habiendo despachado estas cosas correctamente, ¿no se sigue de los fenómenos que hay un ser incorpóreo, viviente, inteligente, omnipresente, que ve íntimamente las cosas mismas en el espacio infinito, como si fuera en su sensorio, percibiéndolas plenamente y comprendiéndolas totalmente por su presencia inmediata ante Él?” (Optica L. IR. 1 parte. Cuestión 28. 1718). □

## BIBLIOGRAFÍA

ARISTÓTELES  
1965

*Du Ciel*. Texte établi et traduit par Paul Moraux. Paris: Societé d'Édition “Les Belles Lettres”.

## UNA VISIÓN HISTÓRICA DE LA IDEA DE GRAVEDAD

1996 *Física*. Texto revisado y traducido por José Luis Calvo Martínez. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

GALILEI, G.

1956 *Diálogo acerca de dos nuevas ciencias*. Anotado por el Dr. T. Isnardi. Traducido por José San Roman Villasante. Buenos Aires: Editorial Losada.

1966 *Dialogues et lettres choisies*. Choix, traduction, préface de P. H. Michel. Paris: Hermann.

NEWTON, Isaac

1966 *Principia. Motte's Traslation*. Revised by Cajori. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.

1977 *Óptica*. Introducción, traducción, notas e índice analítico de Carlos Solís. Madrid: Ediciones Alféguara.

## BIBLIOGRAFÍA SECUNDARIA

BOAS, M.

1970 *Nature and Nature's Laws of the Scientific Revolution*. Edited by Marle Boas Hall. New York: Harper and Row.

COHEN, I. B.

1980 *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*. Madrid: Alianza Editorial.

1985 *El nacimiento de una nueva Física*. Madrid: Alianza Editorial.

HEATH, Sir Thomas

1970 *Mathematics in Aristotle*. Oxford: Oxford University Press.

HECHT, E.

1987 *Física en perspectiva*. Versión en español de Félix González Díaz. Wilmington: Addison Wesley Iberoamericana.

KOYRÉ, A.

*Newtonian Studies*. London. Chapman and Hall.

1968 *Metaphysics and Measurement*. London: Chapman and Hall.



- LINDBERG, D.  
1992 *The Beginnings of Western Science*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- MACH, E.  
1949 *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*. Versión de la séptima versión alemana por el Ing. José Babini. Buenos Aires: Espasa Calpe Argentina S.A.
- SAMBURSKY  
1978 *Der Weg der Physik*. Nördlingen: Deutscher Taschenbuch Verlag.
- TOULMIN/GODFIELD  
1963 *La trama de los cielos*. Traductor: Nestor Míguez. Buenos Aires: Eudeba.
- TOULMIN, St.  
1961 *Foresight and Understanding*. Indiana: Indiana University Press.
- TEICHMANN, J.  
1990 *Triumph und Krise der Mechanik*. München: Serie Piper.
- WIELAND, W.  
1970 *Die aristotelische Physik*. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht.