



Las leyes de Newton

R. O. Barrachina

... rational mechanics will be the science of motion resulting from any forces whatsoever, and of the forces required to produce any motion ... and therefore I offer this work as the mathematical principles of philosophy, for the whole burden of philosophy seems to consist in this - from the phenomena of motions to investigate the forces of nature, and then from these forces to demonstrate the other phenomena ...
Isaac Newton: Prefacio a los “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*” (1687).

1. Una reunión de amigos en el Londres de 1684

Esta historia comienza con una reunión mantenida por Robert Hooke (1635 - 1702), Edmund Halley (1656 - 1742) y Sir Christopher Wren (1632 - 1723) en Londres en Enero de 1684. Posiblemente, los dos primeros personajes no necesitan presentación. Hooke nos debe resultar familiar por sus trabajos sobre la ley de fuerza elástica, y Halley por el cometa que lleva su nombre. En cuanto a Wren, fue el arquitecto más famoso de su época. Diseñó el palacio de Kensington, varios edificios públicos y más de 50 iglesias de Londres, destruidas en el gran incendio del 27 de Agosto de 1666¹. Sin embargo su obra cumbre fue la Catedral de St. Paul construida en tiempo

record (apenas 35 años). Es uno de los pocos casos en el mundo de una gran catedral construida íntegramente bajo la dirección de un único arquitecto², lo que explica su perfecta uniformidad de estilo.

En el transcurso de dicha reunión, Hooke afirmó que él había podido demostrar que con una ley de fuerzas de cuadrado inverso de la distancia podía construirse toda la mecánica celeste. Halley, más modesto, comentó que él también había estado trabajando con esa ley, pero que no había logrado ningún resultado. Como para estimular la disputa, Sir Wren lanzó un desafío: Le regalaría un libro con un valor de 40 chelines (¡Tacaño, el hombre!) al primero de los dos que en un lapso no mayor que dos meses pudiese mostrarle una demostración convincente. Hooke respondió que él en efecto



tenía tal demostración, pero que no deseaba mostrarla, de manera que otros, al intentarlo y fracasar, apreciarían más acabadamente sus logros cuando por fin la hiciera pública. Wren no quedó muy convencido con esta justificación y presionó a Hooke para que, al menos, le mostrara a él en forma confidencial tal demostración. Hooke aceptó hacerlo.

Sin embargo, el plazo de dos meses pasó sin que Hooke cumpliera su palabra. Tal vez al revisar sus notas, descubriera un error de su demostración. Pero esto es pura especulación. Halley también había estado continuando con sus cálculos, pero sin lograr ningún resultado. Así hubiese terminado todo, si no fuese por lo que ocurrió siete meses después de la mencionada reunión. Por motivos que desconocemos, Halley viajó a Cambridge y allí se entrevistó con un profesor de 42 años llamado Isaac Newton (1642 - 1727). Durante la charla le preguntó como al pasar si tenía alguna idea de cuál sería la trayectoria de un cuerpo atraído hacia un punto por una ley de cuadrado inverso de la distancia. Para su gran sorpresa, Newton le contestó inmediatamente: *Una elipse, con el centro atractivo en un foco*. Halley le preguntó que cómo podía estar tan seguro, y Newton le respondió lacónicamente que lo había calculado. Halley le pidió que le mostrara la demostración. Enseguida Newton se puso a revisar entre sus papeles, pero -por motivos que veremos más adelante- fingió que se le había extraviado. De cualquier manera le prometió rehacer los cálculos y enviárselos. El mismo Newton le contó años más tarde a DeMoivre que nunca se felicitó lo suficiente por refrenar cualquier apresuramiento, pues cuando intentó repetir la demostración, encontró que no funcionaba. Como al final descubrió, un diagrama dibujado desprolijamente lo había llevado a confundir los ejes de la elipse. Pero no se desanimó. Recomenzó sus cálculos y finalmente, en Noviembre de 1684 Halley recibió una monografía de nueve páginas, que hoy conocemos con el nombre de *De Motu*, es decir *Sobre el Movimiento*. Allí demostraba que una trayectoria elíptica implicaba una fuerza proporcional al cuadrado inverso de la distancia.

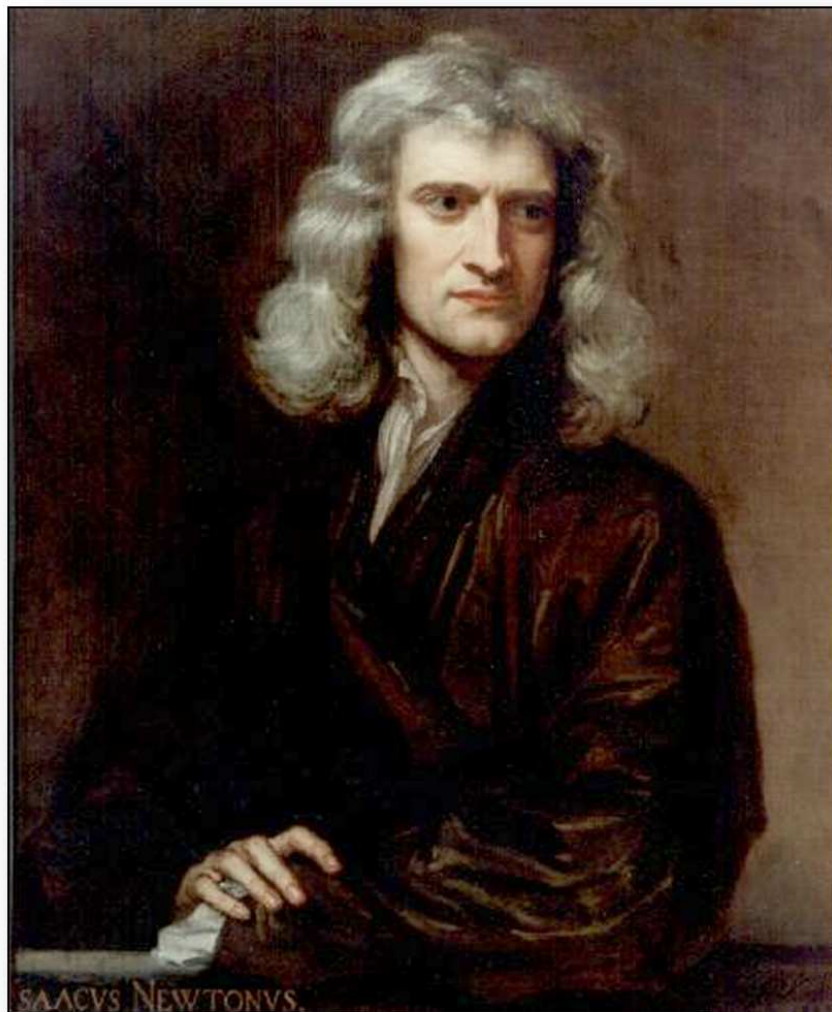
Halley inmediatamente advirtió que esa pequeña monografía representaba un avance tan formidable en mecánica celeste como para constituir una verdadera revolución. Sin demora viajó a Cambridge para charlar con New-

ton. El 10 de Diciembre regresó a Londres y presentó un informe a la Royal Society indicando que Newton le había prometido ingresar su tratado en los registros de la sociedad. Sin embargo, Newton insistió en revisar el manuscrito. Pero Halley no quería esperar más e hizo que el secretario de la Royal Society registrara el manuscrito. Hooke fue uno de los primeros en leerlo, y también el astrónomo Flansteed.



Retrato de Edmond Halley (29 de Octubre de 1656 - 14 de Enero de 1742) pintado por Thomas Murray en la época de su entrevista con Newton (Royal Society, London).

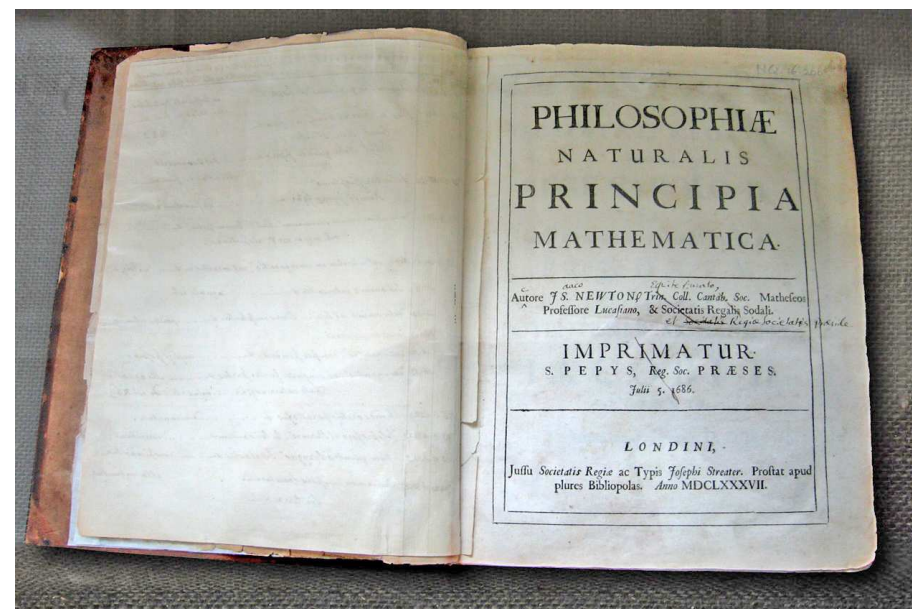




Retrato de Isaac Newton (4 de Enero de 1643 [O.S. 25 de Diciembre de 1642] - 31 de Marzo [O.S. 20 de Marzo] de 1727) pintado en 1689 por Sir Godfrey Kneller (Farleigh House, Farleigh Wallop, Hampshire).

2. Publicación de los *Principia*

Simultáneamente con estos acontecimientos Newton había entrado en un estado de absoluta exaltación. La mecánica celeste había tomado posesión de su imaginación, y no la soltaría en los próximos dos años. Desde Agosto de 1684 hasta la primavera de 1686, Newton prácticamente desapareció del mundo. Durante los primeros ocho o nueve meses Newton expandió *De Motu* hasta transformarlo en un tratado aproximadamente diez veces más largo, al que tituló *De motu corporum*. Donde *De Motu* era un tratado sobre dinámica orbital, *De Motu corporum* es una demostración del concepto de gravitación universal.



Copia de la primera edición de los *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* perteneciente a Isaac Newton. Incluye correcciones de su puño y letra para la segunda edición. Para el momento de la segunda edición, Newton era presidente de la Royal Society, tal como aparece en las correcciones a la carátula. Este libro se encuentra expuesto en la Biblioteca Wren del Trinity College, en Cambridge³

Con otros nuevos agregados, la monografía se estaba volviendo demasiado larga, así que Newton decidió dividirla en tres Libros. El 21 de Abril de 1686, en un *Discurso concerniente a la Gravedad*, Halley (quien ese mismo año había sido nombrado escribiente de la Sociedad) dijo a la Royal Society que el tratado de Newton estaba listo para entrar en prensa. Una semana más tarde, Newton materializó esta promesa:

El Dr Vicent presentó a la Sociedad un manuscrito titulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* y dedicado a la [Royal] Society por el Señor Isaac Newton, donde él da una demostración matemática de la hipótesis de Copérnico tal como fue propuesta por Kepler, y deduce todos los fenómenos de los movimientos celestes por la sola suposición de una gravitación hacia el centro del sol decreciente como los cuadrados de las distancias a él, recíprocamente.

Se trataba de la versión final del primero de los tres libros. Los Principia contienen una enorme riqueza de descubrimientos físicos y matemáticos. En particular, partiendo de tres leyes fundamentales desarrolla una teoría completa del movimiento de una manera tan perfecta que permanece intacta aún en nuestros días. En este curso nos dedicaremos a estudiar esta teoría, y -como primer paso- examinaremos sus tres leyes fundamentales en detalle.

3. Economía intelectual de la Mecánica

La forma deductiva que Newton dió a sus Principia, en un estilo similar al utilizado por Euclides para la geometría, llevó a conferir a las tres leyes básicas de la Mecánica la misma evidencia y necesidad que se creía encontrar en los axiomas de la geometría. La mecánica se veía como una ciencia categórico-deductiva muy al gusto cartesiano basada en una pocas verdades necesarias paradójicamente adquiridas por la experiencia⁴. Así es como el físico francés Pierre Duhem (1861-1916) puede definir una teoría física de esta manera⁵:

Es un sistema de proposiciones matemáticas deducidas de un pequeño número de principios que tienen por objeto representar tan simple, tan completa y también tan exactamente como sea posible, un conjunto de leyes experimentales.

Y continúa diciendo que la teoría debe sustituir un gran número de leyes empíricas por “un pequeño número de proposiciones, las hipótesis fundamentales. Una vez conocidas las hipótesis, una deducción matemática permite encontrar, con toda seguridad y sin omisión ni repetición, todas las leyes físicas”. En este sentido la Mecánica desarrollada por Newton constituye un todo autoconsistente basado en tres leyes empíricas. La duda que puede caber es si con estas tres leyes se logra la “economía intelectual” preconizada por Duhem. Veamos, por ejemplo, la segunda ley de la Mecánica, en el orden que Newton les dio en sus Principia. En las propias palabras de Newton esta ley indica que

La variación del movimiento es proporcional a la acción de la fuerza motriz y se produce según la dirección de la recta en la que actúa la fuerza.

En nuestra notación actual se escribe así

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} .$$

Previamente, Newton ha definido la fuerza como “el impulso ejercido para variar el estado [de movimiento] de un cuerpo”.

En su libro *Desarrollo Histórico - Crítico de la Mecánica*, el físico austriaco Ernest Mach (1838-1916) reconoce que la segunda ley de Newton “está dada en las precedentes definiciones de fuerza. [...] Por lo demás es una tautología totalmente inútil repetir, después de haber fijado la aceleración como medida de la fuerza, que la variación del movimiento es proporcional a la fuerza”. Mach somete a una crítica similar a la primera ley de Newton, ó ley de inercia

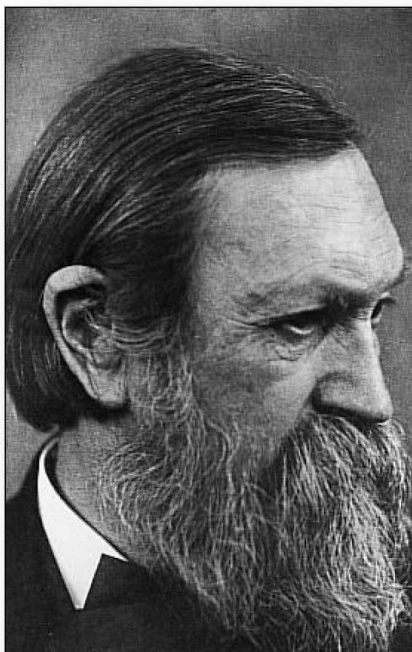
Todo cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, mientras una fuerza que actúe sobre él no le obligue a cambiar de estado.



Esta ley puede deducirse de la primera, ya que “sin fuerza no existe aceleración y por ende sólo existe o reposo o movimiento rectilíneo uniforme”. Solo la tercera ley

A cada acción se le opone siempre una reacción igual. Las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones contrarias.

contiene una novedad muy importante. Mach concluye que los enunciados de Newton revisten un carácter “pleonástico⁶, tautológico y superabundante”, pero concede que esto “se explica psicológicamente si se le representa como a un investigador que, partiendo de los enunciados de la estática, para él familiares, se propone establecer los principios fundamentales de la dinámica”.



Ernest Mach. Nacido el 18 de febrero de 1838, en Turas, Moravia, Imperio Austriaco, Fallecido el 19 de febrero de 1916, en Múnich, Alemania.

4. Primera Ley de Newton o Ley de Inercia

Mach expone la epistemología de la mecánica newtoniana a una crítica severa, y propone una formulación alternativa que busca la economía intelectual señalada anteriormente. Comencemos analizando con mucho cuidado la Primera Ley de Newton o Ley de Inercia

Toda partícula libre (de toda interacción) persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme

Así enunciada esta ley parece ser un corolario de la segunda ley de Newton, aplicada a una sola partícula libre de toda interacción. En dicho caso, la aceleración es nula y -por lo tanto- la velocidad es constante. En este punto parece difícil evitar la caída en un círculo vicioso. Sin embargo, es evidente que esta ley depende del sistema de referencia considerado. Todo sistema para el cual se verifica recibe el nombre de *sistema inercial*. O sea que más que una ley es una definición:

Llamaremos “inercial” a todo sistema de referencia donde toda partícula libre (de toda interacción) persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme

La posición de una partícula a respecto de un sistema de referencia 2 que se mueve con velocidad $\mathbf{v}_{21}$ respecto de un sistema inercial 1 es tal que $\mathbf{r}_{a1} = \mathbf{r}_{a2} + \mathbf{r}_{21}$. Derivando respecto al tiempo, obtenemos una relación similar para la velocidad, $\mathbf{v}_{a1} = \mathbf{v}_{a2} + \mathbf{v}_{21}$. Ahora, si la velocidad de la partícula a es constante en el sistema de referencia 1, también lo es con referencia al sistema de referencia 2 siempre que este se mueva con velocidad constante respecto de aquel. Vemos entonces que -en dicho caso- el sistema de referencia 2 es también un sistema inercial. Concluimos que todo sistema de referencia que se mueva con velocidad constante respecto de un sistema inercial, es también un sistema inercial.

Históricamente, la Ley de Inercia fue un concepto de muy difícil adquisición para la ciencia. La idea aristotélica de que se necesita la aplicación



continuada de una fuerza para *mantener* la velocidad de un cuerpo parece ser evidente, ya que no hay nada en nuestra experiencia cotidiana que se comporte de otro modo. Galileo fue el primero en advertir que, a pesar de parecer tan razonable, esta idea estaba equivocada. Para ello tuvo que dar un gran salto de imaginación, y meditar sobre lo que pasaría si se pudiese eliminar toda resistencia al movimiento. Este fue un alejamiento completo y revolucionario de los conceptos aristotélicos; y aunque Galileo no logró desarrollar una dinámica fructífera, su principal contribución fue haber corregido este error de concepto que bloqueaba el progreso de la mecánica. A pesar de ello, Galileo no logró desarrollar el Principio de Inercia en forma correcta. No advirtió -por ejemplo- que para que un cuerpo realice un movimiento circular, es imprescindible que actúe una fuerza dirigida hacia el centro. En su concepción, la órbita de un planeta alrededor del Sol no requería de ninguna fuerza de interacción entre ambos. El filósofo francés René Descartes (1596 - 1650) fue uno de los primeros en advertir este error conceptual. Esta es la idea que finalmente toma Newton, aclarando que el movimiento uniforme debe ser “en línea recta”. Sin embargo, inclusive Newton llegó a esta idea crucial de manera penosa y lenta. El texto original del tratado *De Motu* que enviara a Halley en Noviembre de 1684, todavía se basa en dos conceptos básicos: la fuerza inherente y la fuerza imprimida, siendo la dinámica una interacción entre ambas. Según Newton, la fuerza inherente es *aquella por la cual un cuerpo persiste en su movimiento en línea recta*, mientras que la fuerza imprimida es toda acción externa que cambia el estado de movimiento de un cuerpo. Es durante los ocho ó nueve meses que empleó Newton para desarrollar la segunda versión de dicho tratado *De motu corporum*, cuando acepta finalmente la Ley de Inercia y, adaptando ciertas ideas de Hooke sobre la órbita circular, interpreta a este movimiento como uniformemente acelerado. Una vez aceptada la Ley de Inercia, el resto de la Mecánica encajó rápidamente en su lugar. Tal como vimos, esto cristalizaría en Abril de 1686 con la presentación la Royal Society del manuscrito titulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

5. Definición de la masa inercial

Uno de los puntos fundamentales de las críticas de Mach se basa en una definición operativa del concepto de masa. Destaca que la definición dada por Newton

La cantidad de materia se mide por la reunión de su densidad y su volumen.

“es una definición aparente. El concepto de masa no se hace más claro porque se defina la masa como el producto del volumen por la densidad, o porque se defina la densidad como la masa por unidad de volumen”. El círculo vicioso es evidente. “Newton presintió claramente que todo cuerpo lleva consigo una característica determinante del movimiento que es diferente del peso [...] más no logró expresar correctamente este conocimiento”. Mach propuso -en cambio- una definición esencialmente dinámica de la masa inercial⁷.

Consideremos la colisión dos partículas 0 y 1, aisladas de toda influencia externa. Observadas desde un sistema inercial, ambas partículas se mueven con velocidades constantes, excepto durante un dado lapso donde actúa una interacción mutua de cualquier naturaleza. Una vez terminada la interacción, ambas partículas han alterado sus velocidades. Sean $\Delta \mathbf{v}_0$ y $\Delta \mathbf{v}_1$, las correspondientes variaciones de la velocidad. Experimentalmente se verifica que estas dos cantidades vectoriales son proporcionales y de sentido opuesto

$$\Delta \mathbf{v}_0 = -m_{10} \Delta \mathbf{v}_1 .$$

La constante de proporcionalidad es positiva y totalmente independiente del mecanismo de interacción. Sólo depende de las partículas que efectuaron la colisión. La llamaremos *masa inercial* del cuerpo 1 en unidades del cuerpo 0.

Si cambiamos la partícula 1 por otra 2, la misma operación de colisión nos permite definir la masa inercial m_{20} del cuerpo 2 respecto del cuerpo 0. Si ahora hacemos chocar la partículas 2 y 1, podríamos definir la masa inercial m_{21} de 2 en unidades de 1 a partir de la relación

$$\Delta \mathbf{v}_1 = -m_{21} \Delta \mathbf{v}_2 .$$



En dicho caso se verifica “experimentalmente” que

$$m_{21} = \frac{m_{20}}{m_{10}} .$$

Esto nos impulsa a usar la partícula 0 como unidad patrón de masa inercial, y anotar -simplemente- $m_1 = m_{10}$ y $m_2 = m_{20}$. La relación anterior puede escribirse, entonces, como

$$m_1 \Delta \mathbf{v}_1 = -m_2 \Delta \mathbf{v}_2 .$$

Por último, si repetimos este experimento haciendo chocar nuestra masa patrón 0, primero con una partícula a , después con otra partícula b y -por último- con ambas partículas a y b rígidamente unidas, se observa experimentalmente que en el rango de velocidades y masas a escala humana

$$m_{a+b} = m_a + m_b .$$

Estas *operaciones* permiten definir la masa inercial como una magnitud extensiva, definida con respecto a una masa “patrón” correspondiente a la partícula 0, que representa la mayor o menor resistencia de un cuerpo para variar su velocidad en una colisión. Es importante notar que esto lo hemos logrado sin la previa introducción de la fuerza como un concepto primitivo.

La unidad de masa del sistema SI es el kilogramo. Es igual a la masa del prototipo internacional que se guarda, junto con otras seis copias oficiales, en el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) en París. En la actualidad, el kilogramo es la única unidad básica del sistema internacional SI que está definida por medio de un artefacto material.

6. Conservación de la cantidad de movimiento

El resultado anterior nos lleva a definir el *impulso* ó *cantidad de movimiento* de una partícula como el producto de su masa y su velocidad,

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} ,$$

con lo cual, podemos escribir las expresiones anteriores en la siguiente forma

$$(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)_{\text{antes de la colisión}} = (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)_{\text{después de la colisión}} ;$$

O sea que para dos partículas en única y exclusiva interacción mutua, la cantidad de movimiento se conserva. Basados en la experiencia, podemos ver que esta ley mantiene su validez inclusive durante la colisión. Con esto estamos enunciando una ley de conservación que podemos generalizar para la cantidad de movimiento total $\mathbf{P} = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i$ de un número arbitrario N de partículas en interacción mutua,

Para un sistema de partículas en única y exclusiva interacción mutua, la cantidad de movimiento total se conserva.

Volveremos sobre esta ley de conservación en el próximo capítulo.

7. Segunda ley de Newton

Nos proponemos ahora introducir el concepto de “Fuerza”, como ente representativo de lo que intuitivamente entendemos por “intensidad de una interacción”. A priori parecería razonable calificar una interacción entre dos cuerpos por la aceleración producida. Pero esto no sirve pues la aceleración puede ser distinta para ambas partículas y no sabríamos cual tomar como ente representativo. Sin embargo, lo visto hasta ahora nos indica que esto no ocurre si utilizamos la variación de la cantidad de movimiento. Definimos entonces la fuerza,

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt ,$$

como una medida de la intensidad de una interacción. Esta definición nos conduce a enunciar la segunda ley de Newton para partículas de masa constante,

Toda partícula sometida a la acción de una fuerza, recibe una aceleración proporcional a su intensidad y de la misma dirección y sentido



$$\mathbf{F} = m \mathbf{a} .$$

Tal como ocurría con la ley de inercia, esta ley es tautológica, a menos que la adoptemos como la definición misma de fuerza.

A primera vista esta ley agrega poco a los resultados de Galileo sobre la caída de los cuerpos, pero lo poco que agrega es crucial. Aquellos resultados decían como era el movimiento cuando la fuerza aplicada al objeto era la atracción de la Tierra. El poder de la segunda ley, en cambio, radica en la posibilidad de descubrir ecuaciones para los distintos tipos de fuerza que actúan en cada caso particular, y en base a ello predecir el movimiento del sistema. Por ejemplo, la fuerza de la resistencia del aire puede obtenerse con una fórmula que relaciona la forma, el tamaño y la velocidad del objeto. La fuerza ejercida por un resorte depende de su deformación. A partir de la formulación de la segunda ley y hasta nuestros días, el estudio del movimiento se reduce a buscar fórmulas de este tipo. Este será el tema del tercer capítulo de estas notas. Una vez que se conoce la fuerza, cada detalle del movimiento puede predecirse por medio de la segunda ley.

En los *Principia*, sin embargo, una fuerza recibió más atención que cualquier otra. Esta fue la fuerza de atracción entre los cuerpos, la famosa “Ley de la Gravitación Universal”. Con ella Newton logró explicar el movimiento de la Luna y los Planetas. Este fué el gran triunfo de la Mecánica Newtoniana, y a ello dedicaremos un próximo capítulo.

8. Tercera Ley de Newton o Ley de Acción y Reacción

El principio de conservación de la cantidad de movimiento nos indica que para dos partículas aisladas en interacción mutua $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \text{constante}$. Derivando respecto del tiempo, obtenemos que $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$, o -en palabras del mismo Newton-

A cada acción se le opone siempre una reacción igual. Las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en

direcciones contrarias.

En los *Principia* este concepto se aclara en los siguientes términos:

Si Ud. presiona una piedra con un dedo, el dedo también es presionado por la piedra. Si un caballo jala de una cuerda atada a una piedra, el caballo será igualmente jalado hacia la piedra...

Esta era una idea completamente original. Todos los otros conceptos que se encuentran en los *Principia* tienen alguna historia previa de desarrollo y discusión. Pero los historiadores no han podido encontrar precedentes para esta ley en los escritos de investigadores previos. Ni siquiera existe indicación explícita de ella en ninguno de los propios escritos de Newton anteriores a la publicación de los *Principia* en 1687. Aparentemente se trató de un verdadero chispazo de genialidad.

Esta ley es engañosamente simple en su enunciado y excesivamente poderosa en su aplicación. En las clases prácticas de todo curso introductorio de física se advierte que representa una de las ideas más difíciles de asimilar por parte de los estudiantes⁸.

9. Ley de superposición de fuerzas

Consideremos tres partículas aisladas en interacción mutua. Se comprueba que la fuerza $\mathbf{F}_1$ que actúa -por ejemplo- sobre la partícula 1 puede descomponerse vectorialmente en dos componentes $\mathbf{F}_{12}$ y $\mathbf{F}_{13}$ que caracterizan a las dos interacciones con las otras dos partículas del sistema. Por la tercera ley de Newton la acción $\mathbf{F}_{ij}$ de una partícula sobre otra se equilibra por la correspondiente reacción $\mathbf{F}_{ji}$, es decir $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$. Es importante aclarar que no estamos suponiendo que la interacción de dos cualesquiera de ellas no se altera por la presencia de la tercera, ya que -de hecho- ello puede ocurrir. Lo único que estamos diciendo es que las fuerzas son aditivas. Si una dada partícula i está sujeta a varias interacciones $\mathbf{F}_{ij}$, el efecto es el mismo que si se le imprimiera una sola interacción,

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{F}_{ij} ;$$



llamada *resultante*. Este es el principio de superposición de fuerzas.

10. Las leyes científicas

Sería conveniente detenernos un momento a considerar lo que hemos estado haciendo en este apunte, ni más ni menos que estudiar “leyes científicas”. Conocemos pocas cosas que tengan tanta importancia. Las leyes científicas nos proveen de la técnica, nos curan las enfermedades, son lo claro, lo cierto, el apoyo último de toda acción racional⁹. Hay cada vez más personas, que podríamos llamar automáticas, que se sirven tranquilamente de un instrumento sin tener la menor idea sobre su estructura ó funcionamiento. Ustedes están cursando una carrera que eventualmente los llevará a edificar un conocimiento basado en leyes científicas, y muy especialmente en estas tres que discutimos en este capítulo. Esperemos que no nos ocurra que en el apresuramiento de una carrera nos volvamos científicos automáticos, simples calculistas ó técnicos experimentales, aplicando una serie de recetas sin habernos nunca preocupado en avanzar un poco más allá en su comprensión.

Entonces, planteemos la siguiente cuestión: ¿qué es una ley científica? Al principio puede parecer una pregunta bastante simple. Todos sabemos qué es una ley científica. Pero tal vez, si reflexionamos un poco al respecto encontraremos que el asunto no es tan simple como parecía, y que las leyes científicas son algo muy notable y extraño.

Por ejemplo, el mundo que nos rodea consta de muchas cosas. Todas estas cosas ó *entes* parecen compartir ciertas cualidades comunes. Primeramente están en algún lugar y están o suceden en determinado tiempo. En segundo lugar han tenido algún origen, y -hasta donde sabemos- cambian en el tiempo y eventualmente desaparecen. Por otro lado cada cosa es individual y única. Por último -y esto es muy importante- todas las cosas que conocemos en el mundo podrían ser también de otro modo, o dejar de existir.

Así son las cosas ó, al menos, así nos parecen ser. Ahora bien, las leyes científicas -y en particular las leyes de Newton- no tienen ninguna de estas cualidades que acabo de enumerar, ¡ni una sola! En primer lugar, no tiene

sentido decir -por ejemplo- que la segunda ley de Newton está en algún lugar. Me puedo formar una idea de esa ley, o escribirla en un trozo de papel. Pero la ley no es la idea o el trazo de tinta.

Las leyes están fuera del tiempo. No tiene sentido decir que la segunda ley nació cuando Newton la pensó por primera vez (Las manzanas habían caído hacia la Tierra de igual manera antes del nacimiento de Newton), o que dejó de existir cuando se cayó en la cuenta de que no era universalmente válida (si no, estaríamos aquí hablando de algo que no existe). La segunda ley de Newton es atemporal. Tampoco cambia, la fuerza sigue siendo igual al producto de la masa por la aceleración tanto hoy como hace trescientos años.

Por último la segunda ley de Newton es necesaria, es decir que no puede ser de otro modo que como se enuncia. Si la fuerza fuera proporcional al producto de la masa por la velocidad, viviríamos en un mundo aristotélico, pero no en este donde estamos.

De esta manera se ha colado en nuestro mundo aparentemente temporal y espacial, de lo perecedero, individual y contingente, un trasmundo espectral de leyes científicas fuera del tiempo y del espacio, universales, eternas y necesarias. ¿Cómo las explicamos? Cabe opinar, por ejemplo, que las leyes científicas son *entes de la razón*. El mundo sería totalmente material y las leyes serían ficciones de nuestro pensamiento. Esta solución se ha propuesto frecuentemente. Según el gran filósofo escocés David Hume las leyes reciben su necesidad del hecho de que nos acostumbramos a ellas. Sin embargo contra esta solución surgen varios e importantes reparos. Por ejemplo, si la segunda ley de Newton es sólo un hábito del hombre, ¿cómo puede ser que un puente calculado según ella se mantenga en pie, y se hunda otro erróneamente calculado? ¿Cómo es posible que un simple hábito del hombre sea decisivo para el comportamiento de una gran estructura de hierro y hormigón? Parecería más bien que la segunda ley de Newton rige efectivamente en el mundo y sólo secundariamente tiene su asiento en nuestro pensamiento. Así pues, en la realidad y junto a las cosas o *entes reales*, hay algo más, las leyes o *entes ideales*. Ante este planteo, tres son -a grandes rasgos- las interpretaciones que se dan de la existencia de estos nuevos entes:



1. Podemos pensar que lo ideal existe independientemente de lo real, en un mundo especial sin espacio ni tiempo donde todo es puro, eterno, inmutable y necesario. Esta teoría se atribuye frecuentemente a Platón, quien fue el primero en plantear el problema de la ley.
2. Podemos pensar también que lo ideal existe sólo en lo real. En el mundo sólo hay estructuras o construcciones de las cosas de tal naturaleza que podemos deducir o abstraer de ellas las leyes. Las leyes sólo se dan en relación con las cosas y por ello rigen el mundo. Esta es la solución planteada por Aristóteles, el gran discípulo de Platón
3. Finalmente, una tercera postura no niega existencia a las leyes, pero opina que sólo se dan en el pensamiento. El hecho de que rijan el mundo procede de que la estructura de las cosas se origina de una proyección de las leyes del pensamiento. Tal es la explicación del gran filósofo alemán Immanuel Kant y de su discípulo Arthur Schopenhauer¹⁰



En su gran mural “La escuela de Atenas” en el Vaticano, Rafael representa a Platón señalando al cielo, y a Aristóteles a la tierra, como si estuvieran discutiendo sobre la naturaleza de los entes ideales.

Desde que Platón planteara el problema e inclusive hasta nuestros días, casi todo filósofo importante ha profesado una de estas soluciones. Es un problema eterno y para quienes seguimos una carrera cuyo objetivo es la búsqueda, estudio y aplicación de leyes científicas, acaso más acuciante. No se debe menospreciar este problema. Ya se les volverá a presentar en una forma mucho más impactante y abrumadora, cuando dentro de algún tiempo comiencen a estudiar la física cuántica. Allí las cualidades que mencionamos en relación con las cosas, con los entes reales, comenzarán a desdibujarse, y los mismos entes reales se les presentarán como algo tanto o más fantasmagórico que el mundo espectral de las leyes. Al llegar a dicho punto, la -ahora extraña- reformulación de Schopenhauer de la filosofía kantiana (*El mundo es mi representación*) les sonará muy plausible en la denominada interpretación de Copenhague de la física cuántica hecha por Niels Bohr. ¡Qué familiar les resultará entonces esta frase introductoria de *El mundo como voluntad y representación* de Schopenhauer, con sólo cambiar la palabra *sujeto* por *observador*!

Todo aquello que de alguna manera pertenece o puede pertenecer al mundo está inevitablemente asociado y condicionado por el observador, y solo existe para el observador.

Notas

¹Puesto que Inglaterra no adoptó el calendario Gregoriano hasta varios años después, las fechas correspondientes están 10 días fuera de fase con las del continente antes del año 1700 y 11 días después de ese año. Así el 1 de Setiembre corresponde al 11 de Setiembre en el calendario actual, o al 12 de Setiembre si el año es posterior a 1700

²La tumba de Wren está en la misma Catedral, con una placa que dice *Lector, si monumentum requiris, circumspice*, es decir “Lector, si buscas un monumento [funerario], mira a tu alrededor”



³Fotografía tomada por Andrew Dunn. [This image is licensed under the Creative Commons Attribution ShareAlike License v. 2.0: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>]

⁴W. Whewell, *Novum organon renovatum* (1858)

⁵P. Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure* (Ed. M. Rivière, París, 1914), pag. 23

⁶Con redundancia viciosa de palabras.

⁷La discusión que sigue se mantiene en la misma línea de razonamiento empleada por Mach, aunque es básicamente distinta que la propuesta original basada en aceleraciones y no en velocidades.

⁸Lev Tarasov and Aldina Tarasova, *Questions and Problems in School Physics* (Mir Publishers, Moscow, 1973). El capítulo 2 de este excelente libro da una descripción muy clara de estas dificultades.

⁹La discusión que sigue fue adaptada del libro de J. M. Bochenski: *Introducción al pensamiento filosófico* (Ed. Herder, Barcelona, 1965).

¹⁰Una de las mejores explicaciones de la difícil teoría kantiana se puede encontrar en el apéndice *Criticism of the Kantian Philosophy* del primer libro de *The World as Will and Representation*, traducción al inglés realizada por E. F. J. Payne a partir de la tercera edición de 1859 de *Die Welt als Wille und Vorstellung* (Dover Publ. New York, 1966).

