EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XI JORNADAS

VOLUMEN 7 (2001), Nº 7

Ricardo Caracciolo
Diego Letzen
Editores

ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Formulación y problemas epistemológicos de las leyes de Newton

*Eduardo H. Flichman**

1. Introducción

Los tres principios de Newton de la dinámica de partículas configuran la base histórica y una de las bases axiomáticas de la mecánica clásica. Hay quienes agregan la teoría newtoniana de la gravitación universal, lo cual es históricamente correcto. Solo trataré aquí ciertos problemas relacionados con su formulación. Defenderé la idea de que los primeros dos principios, el de inercia y el de masa, conforman una sola ley fundamental, que denominaré "ley de conservación de la masa". La formulación que presentaré de dicha ley intenta mostrar que ambos principios forman parte de una unidad indivisible, y que expresan mucho más de lo que habitualmente se cree: la conservación de la masa inercial y su validez en cualquier sistema de referencia. En cuanto al tercer principio de Newton, lo denominaré "ley de interacción" e intentaré mostrar que su principal aseveración es existencial: la afirmación de la existencia de sistemas de referencia inerciales.

No pretendo que mi interpretación sea la original de Newton ni la de algunos de sus intérpretes. Simplemente creo que vuelve más rica, completa y consistente la interpretación habitual. Usaré los términos "principio" y "ley" –en realidad, "ley fundamental"– como sinónimos y, dado que no me ocuparé de masas gravitatorias, me referiré a la masa inercial simplemente como "masa".

Una aclaración sobre sistemas de coordenadas y sistemas de referencia espaciales y temporales. Será condición ontológica para la formulación, la existencia de cuerpos rígidos. También será condición ontológica la existencia de partículas, así como de procesos y acontecimientos en ellos. No me ocuparé aquí de analizar los correspondientes conceptos; tema apasionante, pero que no tiene cabida en las dimensiones del presente trabajo. Un sistema de referencia será un cuerpo rígido sobre el cual se habrá fijado un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales. Desde el punto de vista empírico, cada cuerpo rígido es un sistema de referencia. Consideraremos que los cuerpos rígidos son conjuntos de partículas unidas por fuerzas de interacción (vínculo) que impiden su deformación o ruptura.

Por otra parte, un mismo cuerpo rígido puede tener fijados infinitos sistemas de coordenadas en reposo respecto de él. De modo que se pueden describir movimientos de partículas y fuerzas actuantes desde más de un sistema de coordenadas fijo a un sistema de referencia. Hasta aquí, funciona la posibilidad de poner a prueba empíricamente las formulaciones para diferentes sistemas de coordenadas de un mismo cuerpo rígido o para diferentes sistemas de referencia. Pero también podemos suponer sistemas de coordenadas no fijos a algún cuerpo rígido sino en movimiento (de cualquier tipo) respecto de él. Es decir, sistemas de coordenadas fijos a sistemas de referencia virtuales. Las transformaciones son perfectamente viables en esos casos, solo que las contrastaciones empíricas solo son factibles en los sistemas de coordenadas fijos a sistemas de referencia reales. De ahora en adelante usaré la expresión "sistema de referencia" para referirme también a uno cualquiera, pero determinado, de

* Universidad Nacional de General Sarmiento. Universidad de Buenos Aires.

los sistemas de coordenadas fijos a un cuerpo rígido. La transgresión semántica no traerá problemas y simplificará el discurso. Más adelante, en las secciones 8 y 9, la expresión "sistema de referencia" se extenderá sin problemas, también a los virtuales.

Podemos repetir lo mismo para sistemas de referencia temporales (procesos) y sistemas de coordenadas temporales lineales, con origen en un acontecimiento (dentro de un proceso). Como se tratará de espacio euclidiano y tiempo lineal, valen las transformaciones galileanas. También consideraremos que espacio y tiempo son isótropos y homogéneos.

2. Ley de conservación de la masa

La formulación debe indicar que la masa toma solo valores numéricos escalares positivos, que los vectores fuerza y aceleración en una partícula tienen la misma dirección y sentido y, lo más importante, que la masa se conserva aun en los casos en que no es calculable mediante el cociente de ambos vectores, como ocurre en el caso en que fuerza y aceleración son nulas. Veremos que no basta el uso de un solo sistema de referencia para realizar las mediciones: se hace necesario manipular las variables físicas para poner a prueba la ley; no basta con observar movimientos.

Una primera aproximación a la fórmula, donde todavía no aparece la masa es la siguiente:

(1) $(r)(p)(t)(\exists!\mathbf{f})(\exists!\mathbf{a})\{[\mathbf{f}(p,t,r)=k(p)\ \mathbf{a}(p,t,r)]\cdot[k(p)>0]\}$

En un comienzo pensé separar los contenidos del principio de inercia y el de masa mediante una disyunción:

(1') $(r)(p)(t)(\exists!\mathbf{f})(\exists!\mathbf{a})\{[\mathbf{f}(p,t,r)=0\cdot\mathbf{a}(p,t,r)=0]\vee[\mathbf{f}(p,t,r)\neq 0\cdot\mathbf{f}(p,t,r)=k(p)\ \mathbf{a}(p,t,r)\cdot k(p)>0]\}$

Pero luego comprendí que ello no era necesario, como veremos.

Las negritas en las fórmulas indican vectores numéricos, mientras que las letras no negritas indican escalares numéricos. p y r son variables sobre números naturales. t y k son variables sobre números reales. Cada caso de p es el número indicativo de la partícula correspondiente y para r es el número indicativo del cuerpo rígido correspondiente. Los de las variables t, $\mathbf{f}$ y $\mathbf{a}$ son los escalares y/o vectores numéricos, respectivamente indicativos de la medida de instantes, fuerzas y aceleraciones, respecto de alguna escala, lo cual implica la elección de unidades de medida. Para pasar de los números a las cantidades físicas correspondientes se requiere del álgebra dimensional, que no trataremos aquí.

La masa se introduce del siguiente modo: la constante $k(p)$ (constante respecto de cualquier variable que no sea la partícula misma o las unidades) es una característica de la partícula, ya que solo puede cambiar cuando se cambia de partícula, si no se modifican las unidades. Por lo tanto, podemos suponer que dicha constante mide una propiedad de la partícula o es proporcional a la medida de dicha propiedad, según la unidad elegida. A esa propiedad la denominamos "masa".

Una vez que se introduce la masa y se dejan implícitas las variables independientes, la fórmula se vuelve más simple (eligiendo unidades adecuadas para la masa):

(2) $(r)(p)(t)(\exists!\mathbf{f})(\exists!\mathbf{a})(\exists!m)[(\mathbf{f}=m\mathbf{a}\cdot m>0)]$

m es una variable sobre números reales (la fórmula los restringe a los reales positivos). Sus valores son escalares numéricos indicativos de la medida de la masa.

3. Puesta a prueba de la ley de conservación de la masa

Veamos cuáles son los pasos previos, que solo mencionaré, pero no desarrollaré aquí, requeridos para su puesta a prueba, que indicarán su carácter empírico. Veremos también que dicho carácter no es totalmente empírico. Algo habrá que postular.

Partimos de las magnitudes físicas fundamentales y aditivas fuerza, longitud y duración. Para ello debemos indicar previamente cómo construir escalas de medición de cada una, para algún rango macroscópico de dimensiones humanas. Para rangos que excedan lo macroscópico por exceso o por defecto, la medición pasa a ser indirecta y requiere otras teorías. En esos casos, la contrastación de nuestra ley pone a prueba en conjunción, a la ley y a las otras teorías usadas. Pero nos mantendremos en el rango macroscópico.

A partir de la escala de longitudes podemos definir una escala de posiciones (magnitud no aditiva) con respecto a algún sistema de referencia. Del mismo modo, a partir de la escala de duraciones podemos definir una escala de tiempos (también magnitud no aditiva) con respecto a algún acontecimiento de un proceso, tomado como inicial (sistema temporal de referencia). Diré que un sistema de referencia es galileano respecto de otro, cuando se obtiene uno de ellos a partir del otro mediante una transformación galileana. Son los sistemas que se mueven unos respecto de otros con traslación pura y con movimiento rectilíneo y uniforme. La aceleración es una magnitud física derivada, cuya escala resulta de calcular la derivada matemática segunda de la posición respecto del tiempo (la derivada primera nos da la escala de velocidades).

La puesta a prueba consiste en medir la fuerza y la aceleración de una partícula cualquiera y realizar el cociente de sus medidas en diferentes momentos y desde distintos sistemas de referencia, observando que dicho valor, es decir, su masa, se conserva, no varía. Y esto para cualquier partícula. Cada partícula tendrá su masa, pero dicha masa no variará con el tiempo ni con el sistema de referencia respecto del cual se midan fuerza y aceleración, si bien en algunos casos esto último deberá ser postulado. Por supuesto, se trata de la *medida* de la masa, de modo que si se cambian las unidades de fuerza y aceleración, la medida variará, puesto que la unidad de masa, que depende de aquéllas, también habrá variado.

No trataré aquí la manera de medir aceleraciones a partir de posiciones espaciales y temporales. En cuanto a la fuerza, solo diré que podemos suponer como instrumento de medición al dinamómetro. Si la partícula está acelerada en el sistema de referencia (sistema de laboratorio), el dinamómetro deberá anular la aceleración de la partícula. En ese momento su escala nos indicará la fuerza actuante sobre la partícula, que no es sino la que ejerce el dinamómetro para anular la aceleración, pero con sentido contrario.

El problema fundamental a resolver es cómo obtener el valor de la masa de una partícula cuando, en un sistema de referencia, la fuerza y, por lo tanto, la aceleración, son nulas. Parecería que en ese caso la ley no nos da ninguna pauta y que para que la ley incluya la conservación de la masa se debería postular que la masa de la partícula conserva su valor cuando la fuerza es nula.

Sin embargo, si tenemos en cuenta que la fórmula se aplica y se puede poner a prueba en cualquier sistema de referencia, podemos *manipular* la partícula, midiendo la fuerza en ese mismo instante y sobre esa misma partícula desde un sistema de referencia que se encuentre en movimiento acelerado respecto de aquél desde el cual se ha medido la aceleración y la fuerza y se ha obtenido el valor nulo. Durante la interferencia implicada por la medición, por pequeña que sea, la partícula estirará el dinamómetro hasta llegar al equilibrio. Lo que nos permitirá medir una fuerza (y una aceleración) no nula y así conocer la masa. Obtendremos así empíricamente el valor de la masa, respecto de cualquier sistema de referencia acelerado con respecto al que generó el problema.

Se objetará seguramente que, debido a la manipulación, la partícula no tenía fuerza y aceleración nulas; pero en realidad la manipulación y el cambio de sistema de referencia se puede hacer en principio tan pequeño como plazca. Se objetará que aun así, la fuerza sobre ella y su aceleración no serán nulas durante la medición. Mi contestación es que en los casos más comunes en los que la fuerza y la aceleración no son nulas y por lo tanto se puede realizar el cociente sin problemas, la situación es la misma. Para conocer el cociente es necesario realizar mediciones. Y ellas modificarán momentáneamente el valor que tenía la fuerza. Para medir la fuerza se requiere que el dinamómetro quede en equilibrio, es decir, que su fuerza neutralice o equilibre la fuerza que actúa sobre la partícula en ese momento. Durante el proceso de medición, la fuerza total sobre la partícula será nula. El dinamómetro nos permite medir la fuerza que actúa sobre la partícula mediante la medición de la propia fuerza que con sentido opuesto realiza el dinamómetro sobre ella para equilibrarla. En consecuencia, también en el caso común la partícula es manipulada y su aceleración modificada. Y también el efecto de la medición se puede disminuir tanto como se quiera en principio (por ejemplo, acortando en principio el tiempo durante el cual se efectúa la medición tanto como se quiera). Esa es una característica de la mecánica clásica, aun en sistemas caóticos.

Es claro que, de cualquier manera, con respecto a los sistemas de referencia en los que fuerza y aceleración son nulas, no tenemos más remedio que postular el valor de la masa. Porque la medición se realizó en otro sistema de referencia. De modo que la postulación se reduce a los sistemas de referencia donde la aceleración de la partícula es nula. Pero la masa de la partícula queda fijada empíricamente para ese instante con relación a todo otro sistema de referencia acelerado con respecto al que presentó el problema.

Por supuesto, la fórmula debe estar acompañada, no solo por la explicación del significado de los símbolos sino también por la explicación de los métodos de medición y por la indicación acerca de que el espacio es euclidiano, el tiempo lineal y la homogeneidad e isotropía señaladas al comienzo.

Obsérvese que esta ley, que sintetiza las dos primeras leyes de Newton con una interpretación que no necesariamente deba haber sido la de su creador ni la de algunos de sus intérpretes, logra convertirla en el principio de conservación de la masa. Tal vez podríamos pensar que dicha interpretación haya estado en la mente de muchos, desde el momento que se la ha denominado "ley de masa", aunque es muy posible que esta denominación haya estado más bien relacionada con el hecho de que la fórmula permite definir en algún sentido la masa. Por otra parte, esta interpretación libera a esta ley, de la necesidad de que se cumpla solo en los sistemas inerciales. Más aun, ni siquiera sabemos todavía lo que es un sistema inercial. Esta ley se cumple en cualquier sistema de referencia y ello se puede poner a prueba empíricamente, con las excepciones recién mencionadas.

5. Introducción a la ley de interacción

Solo cuando se enuncia la otra ley de la dinámica newtoniana, denominada "ley de acción y reacción" o, como prefiero llamarla, "ley de interacción", aparecerán, en mi interpretación, las nociones de *sistema inercial*, *fuerzas de interacción* y *fuerzas inerciales*.

Más aun, el correcto enunciado de esa ley, o mejor, su real contenido empírico, siempre según mi interpretación, nos indica la existencia de los sistemas inerciales, que son aquéllos desde los cuales todas las fuerzas son fuerzas de interacción. Es decir, son aquéllos desde los cuales no existen fuerzas inerciales, fuerzas sin su par de interacción, sin su reacción.

El principio de interacción señala que, dado un conjunto o sistema de partículas, las fuerzas que actúan sobre cada una de ellas se pueden separar en dos grupos: las fuerzas de interacción y las fuerzas inerciales.

6. Fuerzas de interacción

Las fuerzas de interacción son aquéllas para las cuales encontramos siempre un par de interacción. Es decir, encontramos sobre otra partícula, dentro o fuera del conjunto, una fuerza de igual intensidad, sobre la misma recta, de sentido contrario. Por lo tanto, los pares de interacción son de atracción o de repulsión.

Los pares de interacción responden a leyes de fuerza, como por ejemplo, la ley de atracción gravitatoria de Newton. Como sobre cada partícula actúan por lo general muchas fuerzas de interacción, provenientes de diferentes partículas y de diferentes leyes de fuerza, se vuelve nuevamente necesario manipular las partículas para descubrir los pares de interacción. Cuando se mide la fuerza sobre una partícula, se mide la fuerza total. Aquí es fundamental recordar que consideramos que las fuerzas son vectores y que, por lo tanto, se suman vectorialmente. La regla del paralelogramo es en realidad parte de la caracterización de lo que es un vector.

Las fuerzas sobre una partícula se suman vectorialmente, independientemente de su origen. Una puede ser gravitatoria y otra de otro origen. Del mismo modo se descomponen. Y la única manera de que la descomposición revele los pares de interacción es la manipulación. No basta con observar el movimiento de las partículas. Esto ha sido demostrado con toda precisión por muchos autores.

7. Fuerzas inerciales

Una vez encontrados, en principio, todos los pares de interacción, tanto interiores como exteriores al conjunto, nos encontramos con el siguiente hecho, contrastable empíricamente: respecto de cada sistema de referencia, en cada instante y en cada posición, todas las fuerzas restantes que actúan sobre las partículas del conjunto, o bien son todas nulas, o bien sus intensidades son proporcionales a las correspondientes masas, en cada punto. Con lo cual resulta que, para cada instante y para cada posición, y con respecto a cada sistema de referencia, a cualquier partícula le corresponde la misma aceleración. Por supuesto, me refiero a la aceleración producida por dichas fuerzas, desglosadas (también la aceleración es un vector) de las aceleraciones producidas por las fuerzas de interacción.

Este resultado, totalmente empírico, vale para cualquier conjunto de partículas. Estas fuerzas, que son aquéllas que no son las fuerzas que conforman los pares de interacción, se denominan "fuerzas inerciales". A ese tipo pertenece la fuerza centrífuga, la fuerza de Coriolis, la fuerza que actúa sobre una partícula que está sobre el piso de un tren cuando el tren arranca o cuando el tren frena respecto de la tierra (donde el tren es el sistema de referencia), y muchas otras. La manipulación es fundamental para poner a prueba estos resultados. Por ejemplo, podemos repetir una situación aproximadamente *ceteris paribus*, pero colocando una partícula con el doble de masa en el punto donde estaba otra. Y podemos medir una fuerza doble. La fuerzas inerciales funcionan de un modo aparentemente similar a lo que se suele denominar en una teoría más amplia que la mecánica, "campo de fuerzas", con la diferencia fundamental de que las fuerzas producidas por los campos son siempre proporcionales a la carga (masa gravitatoria, carga eléctrica, etc.), mientras que en nuestro caso son proporcionales a la masa (masa inercial).

8. La ley de interacción

Pues bien, lo que la ley de interacción afirma es que existe al menos un sistema de referencia respecto del cual, en todo punto donde haya una partícula y en todo instante, no hay fuerzas inerciales sobre ninguna partícula del universo. Inmediatamente, usando las transformaciones de Galileo, podemos demostrar que existen infinitos sistemas inerciales (reales o virtuales), que se mueven unos respecto de los otros con movimiento de traslación pura, rectilíneo y uniforme.

Newton denominó "ficticias" a las fuerzas inerciales, justamente porque tales fuerzas dependen del sistema de referencia y en los sistemas inerciales son nulas. Tomó los sistemas inerciales como sistemas ontológicamente privilegiados porque no contenían fuerzas inerciales, cambiantes y sin par de interacción. Y dado el privilegio ontológico de dichos sistemas, las fuerzas que, respecto de dichos sistemas, son nulas, no existen. Es por eso que las denominó "ficticias". Coincido (si nos ubicamos en la teoría mecánica de Newton, aun con mi interpretación) con el privilegio ontológico supuesto por Newton. Lo que podríamos denominar "labilidad" de las fuerzas inerciales nos da (desde dentro de dicho paradigma) una pista ontológica acerca de la realidad de las fuerzas de interacción y de la falta de realidad de las fuerzas inerciales.

Hasta hace no mucho tiempo, mi planteo consistía en que las fuerzas inerciales son tan reales (en los sistemas no inerciales correspondientes) que hasta pueden golpear o matar. Pero he cambiado de parecer. Cuando una fuerza inercial nos empuja y chocamos contra una pared dura, es un miembro del par de interacción entre la pared y nosotros lo que nos golpea o mata. Una, la fuerza de la pared contra nuestra cabeza, nos golpea o mata. Su par de interacción, la fuerza que ejerce nuestra cabeza contra la pared, la abolla. Pero ninguna de las dos es la fuerza inercial, sin par de interacción, que nos empujó.

9. Formulación de la ley de interacción

(2) $(\exists r)(p)(t)\ \{[(q)(\exists! \mathbf{f})\ (\mathbf{f}(r,p,q,t) = -\ \mathbf{f}(r,q,p,t))\ ] \cdot [(\exists! \Sigma q)(\exists! \mathbf{f}_\Sigma)\ (\mathbf{f}_\Sigma(r,p,\Sigma q,t) = \mathbf{f}_T(r,p,t))]\}$

La nomenclatura es la misma que en las fórmulas anteriores y se agrega *q*, que representa a las partículas, igual que *p*. Además, *f(r,p,q,t)* es la fuerza con que *q* actúa sobre *p*. Y *f(r,q,p,t)* es la fuerza con que *p* actúa sobre *q*. El signo "menos" debe ser interpretado no solo como sentido contrario sino como aplicado a un vector sobre la misma recta. El símbolo *Σ q* refiere al conjunto de las partículas *q* que interactúan con *p*. f_Σ refiere a la fuerza suma de todas las fuerzas que todas las *q*, es decir, *Σ q*, realizan sobre *p*. Finalmente, $\mathbf{f}_T$ refiere a la fuerza total que actúa sobre *p*.

El primer corchete nos informa que la fuerza con que una partícula actúa sobre *p* es de la misma intensidad, sentido contrario y está sobre la misma recta que la fuerza con que actúa *p* sobre esa partícula. El segundo corchete nos dice que todas las fuerzas de interacción sobre *p* suman la fuerza total sobre *p*. Es decir, que solo hay fuerzas de interacción.

Las hipótesis agregadas a la ley de conservación de la masa (espacio euclidiano, etc., etc.) son en realidad las hipótesis que se agregan a ambas leyes, para conformar la teoría mecánica.

10. Conclusión

Hemos visto que las leyes fundamentales de la mecánica de Newton, con la interpretación que he dado aquí, son solo dos, a las que se debe agregar el conjunto de hipótesis auxiliares que mencionamos más arriba. Una de las leyes fundamentales es una ley de conservación y la otra, una ley de existencia. La primera indica la conservación de la masa. La otra, la existencia de sistemas inerciales. A partir de dichas hipótesis se puede reconstruir toda la teoría de Newton sobre bases que considero claras y sintéticas. Por supuesto, no incluye, como tampoco incluyen las interpretaciones actuales, la definición de masa como cantidad de materia ni la existencia del espacio y del tiempo absolutos. Evito también una formulación como la de Mach, que tiene el problema de cómo descubrir un sistema inercial. La referencia a las estrellas fijas es obviamente incorrecta, desde el momento en que no son fijas. Lo mismo ocurre con las interpretaciones que plantean que los sistemas inerciales son aquéllos en los que se cumplen los tres principios de Newton. Los tres principios, como se los plantea habitualmente, se cumplen en cualquier sistema de referencia. Inclusive el tercero, de acción y reacción, puesto que solo habla de fuerzas que son pares de interacción. Y dichos pares existen en todos los sistemas de referencia.