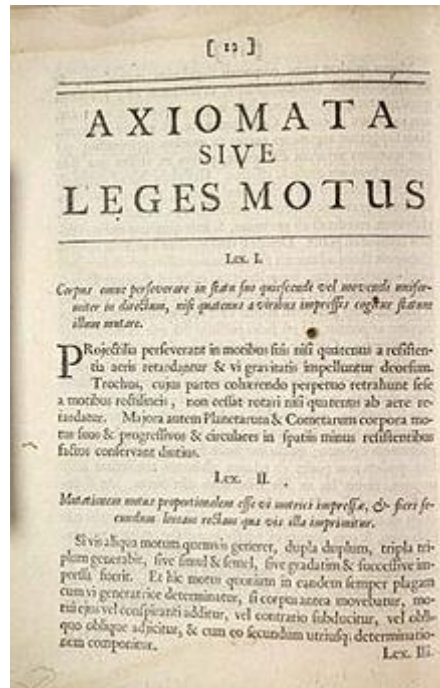


FÍSICA I

Leyes de Newton



La primera y segunda ley de Newton, en latín, en la edición original de su obra *Principia Mathematica*.

Las **leyes de Newton**, también conocidas como **leyes del movimiento de Newton**,¹ son tres principios a partir de los cuales se explican la mayor parte de los problemas planteados por la mecánica, en particular, aquellos relativos al movimiento de los cuerpos. Revolucionaron los conceptos básicos de la física y el movimiento de los cuerpos en el universo.

Constituyen los cimientos no sólo de la dinámica clásica sino también de la física clásica en general. Aunque incluyen ciertas definiciones y en cierto sentido pueden verse como axiomas, Newton afirmó que estaban basadas en observaciones y experimentos cuantitativos; ciertamente no pueden derivarse a partir de otras relaciones más básicas. La demostración de su validez radica en sus predicciones... La validez de esas predicciones fue verificada en todos y cada uno de los casos durante más de dos siglos.²

En concreto, la relevancia de estas leyes radica en dos aspectos:

- Por un lado, constituyen, junto con la transformación de Galileo, la base de la mecánica clásica;
- Por otro, al combinar estas leyes con la Ley de la gravitación universal, se pueden deducir y explicar las Leyes de Kepler sobre el movimiento planetario.

Así, las Leyes de Newton permiten explicar tanto el movimiento de los astros, como los movimientos de los proyectiles artificiales creados por el ser humano, así como toda la mecánica de funcionamiento de las máquinas.

Su formulación matemática fue publicada por Isaac Newton en 1687 en su obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.³

La dinámica de Newton, también llamada *dinámica clásica*, sólo se cumple en los sistemas de referencia inerciales (que se mueven a velocidad constante; la Tierra, aunque gire y rote, se trata como tal a efectos de muchos experimentos prácticos). Solo es aplicable a cuerpos cuya velocidad dista considerablemente de la velocidad de la luz (que no se acerquen a los 300.000 km/s); la razón estriba en que cuanto más cerca esté un cuerpo de alcanzar esa velocidad (lo que ocurriría en los sistemas de referencia no-inerciales), más posibilidades hay de que incidan sobre el mismo una serie de fenómenos denominados *efectos relativistas o fuerzas ficticias*, que añaden términos suplementarios capaces de explicar el movimiento de un sistema cerrado de partículas clásicas que interactúan entre sí. El estudio de estos efectos (aumento de la masa y contracción de la longitud, fundamentalmente) corresponde a la teoría de la relatividad especial, enunciada por Albert Einstein en 1905.

Fundamentos teóricos de las leyes

La base teórica que permitió a Newton establecer sus leyes está también precisada en sus *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

El primer concepto que maneja es el de masa, que identifica con «cantidad de materia». La importancia de esta precisión está en que permite prescindir de toda cualidad que no sea física-matemática a la hora de tratar la dinámica de los cuerpos. Con todo, utiliza la idea de éter para poder mecanizar todo aquello no reducible a su concepto de masa.

Newton no asume a continuación que la *cantidad de movimiento* es el resultado del producto de la masa por la velocidad, y define dos tipos de fuerzas: la *vis insita*, que es proporcional a la masa y que refleja la inercia de la materia, y la *vis impressa* (momento de fuerza), que es la acción que cambia el estado de un cuerpo, sea cual sea ese estado; la *vis impressa*, además de producirse por choque o presión, puede deberse a la *vis centripeta* (fuerza centrípeta), una fuerza que lleva al cuerpo hacia algún punto determinado. A diferencia de las otras causas, que son acciones de contacto, la *vis centripeta* es una acción a distancia. En esta distingue Newton tres tipos de cantidades de fuerza: una absoluta, otra aceleradora y, finalmente, la motora, que es la que interviene en la ley fundamental del movimiento.

En tercer lugar, precisa la importancia de distinguir entre lo absoluto y relativo siempre que se hable de tiempo, espacio, lugar o movimiento.

En este sentido, Newton, que entiende el movimiento como una traslación de un cuerpo de un lugar a otro, para llegar al movimiento absoluto y verdadero de un cuerpo compone el movimiento (relativo) de ese cuerpo en el lugar (relativo) en que se lo considera, con el movimiento (relativo) del lugar mismo en otro lugar en el que esté situado, y así

sucesivamente, paso a paso, hasta llegar a un *lugar inmóvil*, es decir, al sistema de referencias de los movimientos absolutos.⁴

De acuerdo con esto, Newton establece que los movimientos aparentes son las diferencias de los movimientos verdaderos y que las fuerzas son causas y efectos de estos.

Consecuentemente, la fuerza en Newton tiene un carácter absoluto, no relativo.

Las leyes de Newton

Primera ley de Newton o Ley de la inercia

La primera ley del movimiento rebate la idea aristotélica de que un cuerpo sólo puede mantenerse en movimiento si se le aplica una fuerza. Newton expone que:

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.⁵

La formulación original en latín de Newton de esta ley fue:

*Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare*⁶

Esta ley postula, por tanto, que un cuerpo no puede cambiar por sí solo su estado inicial, ya sea en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, a menos que se aplique una fuerza o una serie de fuerzas cuyo resultante no sea nulo sobre él. Newton toma en cuenta, así, el que los cuerpos en movimiento están sometidos constantemente a fuerzas de roce o fricción, que los frena de forma progresiva, algo novedoso respecto de concepciones anteriores que entendían que el movimiento o la detención de un cuerpo se debía exclusivamente a si se ejercía sobre ellos una fuerza, pero nunca entendiendo como esta a la fricción.

En consecuencia, un cuerpo con movimiento rectilíneo uniforme implica que no existe ninguna fuerza externa neta o, dicho de otra forma; un objeto en movimiento no se detiene de forma natural si no se aplica una fuerza sobre él. En el caso de los cuerpos en reposo, se entiende que su velocidad es cero, por lo que si esta cambia es porque sobre ese cuerpo se ha ejercido una fuerza neta.

La primera ley de Newton sirve para definir un tipo especial de sistemas de referencia conocidos como Sistemas de referencia inerciales, que son aquellos sistemas de referencia desde los que se observa que un cuerpo sobre el que no actúa ninguna fuerza neta se mueve con velocidad constante.

En realidad, es imposible encontrar un sistema de referencia inercial, puesto que siempre hay algún tipo de fuerzas actuando sobre los cuerpos, pero siempre es posible encontrar un sistema de referencia en el que el problema que estemos estudiando se pueda tratar como si estuviésemos en un sistema inercial. En muchos casos, por ejemplo, suponer a un observador fijo en la Tierra es una buena aproximación de sistema inercial. Lo anterior porque a pesar

que la Tierra cuenta con una aceleración traslacional y rotacional estas son del orden de 0.01 m/s^2 y en consecuencia podemos considerar que un sistema de referencia de un observador dentro de la superficie terrestre es un sistema de referencia inercial.

Segunda ley de Newton o Ley de fuerza

La segunda ley del movimiento de Newton dice que:

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.⁷

En las palabras originales de Newton:

*Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*⁶

Esta ley explica qué ocurre si sobre un cuerpo en movimiento (cuya masa no tiene por qué ser constante) actúa una fuerza neta: la fuerza modificará el estado de movimiento, cambiando la velocidad en módulo o dirección. En concreto, los cambios experimentados en el momento lineal de un cuerpo son proporcionales a la fuerza motriz y se desarrollan en la dirección de esta; las fuerzas son causas que producen aceleraciones en los cuerpos. Consecuentemente, hay relación entre la causa y el efecto, la fuerza y la aceleración están relacionadas. Dicho sintéticamente, la fuerza se define simplemente en función del momento en que se aplica a un objeto, con lo que dos fuerzas serán iguales si causan la misma tasa de cambio en el momento del objeto.

En términos matemáticos esta ley se expresa mediante la relación:

$$\mathbf{F}_{\text{net}} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

Donde:

\mathbf{p} es el momento lineal

\mathbf{F}_{net} la fuerza total o fuerza resultante.

Suponiendo que la masa es constante y que la velocidad es muy inferior a la velocidad de la luz⁸ la ecuación anterior se puede reescribir de la siguiente manera:

Sabemos que \mathbf{p} es el momento lineal, que se puede escribir $m \cdot \mathbf{v}$ donde m es la masa del cuerpo y \mathbf{v} su velocidad.

$$\mathbf{F}_{\text{net}} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}$$

Consideramos a la masa constante y podemos escribir $\frac{dv}{dt} = a$ aplicando estas modificaciones a la ecuación anterior:

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

La fuerza es el producto de la masa por la aceleración, que es la ecuación fundamental de la dinámica, donde la constante de proporcionalidad, distinta para cada cuerpo, es su *masa de inercia*. Veamos lo siguiente, si despejamos m de la ecuación anterior obtenemos que m es la relación que existe entre \mathbf{F} y \mathbf{a} . Es decir la relación que hay entre la fuerza aplicada al cuerpo y la aceleración obtenida. Cuando un cuerpo tiene una gran resistencia a cambiar su aceleración (una gran masa) se dice que tiene mucha inercia. Es por esta razón por la que la masa se define como una medida de la inercia del cuerpo.

Por tanto, si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula no es cero, esta partícula tendrá una aceleración proporcional a la magnitud de la resultante y en dirección de ésta. La expresión anterior así establecida es válida tanto para la mecánica clásica como para la mecánica relativista, a pesar de que la definición de momento lineal es diferente en las dos teorías: mientras que la dinámica clásica afirma que la masa de un cuerpo es siempre la misma, con independencia de la velocidad con la que se mueve, la mecánica relativista establece que la masa de un cuerpo aumenta al crecer la velocidad con la que se mueve dicho cuerpo.

De la ecuación fundamental se deriva también la definición de la unidad de fuerza o *newton* (N). Si la masa y la aceleración valen 1, la fuerza también valdrá 1; así, pues, el newton es la fuerza que aplicada a una masa de un kilogramo le produce una aceleración de 1 m/s². Se entiende que la aceleración y la fuerza han de tener la misma dirección y sentido.

La importancia de esa ecuación estriba sobre todo en que resuelve el problema de la dinámica de determinar la clase de fuerza que se necesita para producir los diferentes tipos de movimiento rectilíneo uniforme (m.r.u), circular uniforme (m.c.u) y uniformemente acelerado (m.r.u.a).

Si sobre el cuerpo actúan muchas fuerzas, habría que determinar primero el vector suma de todas esas fuerzas. Por último, si se tratase de un objeto que cayese hacia la tierra con una resistencia del aire igual a cero, la fuerza sería su peso, que provocaría una aceleración descendente igual a la de la gravedad.

Tercera ley de Newton o Ley de acción y reacción

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.⁷

La formulación original de Newton es:

*Actioni contrariam semper & æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales & in partes contrarias dirigi.*⁶

La tercera ley de Newton es completamente original (pues las dos primeras ya habían sido propuestas de otras maneras por Galileo, Hooke y Huygens) y hace de las leyes de la mecánica un conjunto lógico y completo.⁹ Expone que por cada fuerza que actúa sobre un cuerpo (*empuje*), este realiza una fuerza de igual intensidad, pero de sentido contrario sobre el cuerpo que la produjo. Dicho de otra forma, las fuerzas, situadas sobre la misma recta, siempre se presentan en pares de igual magnitud y de dirección, pero con sentido opuesto.

Este principio presupone que la interacción entre dos partículas se propaga instantáneamente en el espacio (lo cual requeriría velocidad infinita), y en su formulación original no es válido para fuerzas electromagnéticas puesto que estas no se propagan por el espacio de modo instantáneo sino que lo hacen a velocidad finita "c".

Es importante observar que este principio de acción y reacción relaciona dos fuerzas que no están aplicadas al mismo cuerpo, produciendo en ellos aceleraciones diferentes, según sean sus masas. Por lo demás, cada una de esas fuerzas obedece por separado a la segunda ley.

Junto con las anteriores leyes, ésta permite enunciar los principios de conservación del momento lineal y del momento angular.

Generalizaciones

Después de que Newton formulara las tres famosas leyes, numerosos físicos y matemáticos hicieron contribuciones para darles una forma más general o de más fácil aplicación a sistemas no inerciales o a sistemas con ligaduras. Una de estas primeras generalizaciones fue el principio de D'Alembert de 1743 que era una forma válida para cuando existieran ligaduras que permitía resolver las ecuaciones sin necesidad de calcular explícitamente el valor de las reacciones asociadas a dichas ligaduras.

Por la misma época, Lagrange encontró una forma de las ecuaciones de movimiento válida para cualquier sistema de referencia inercial o no-inercial sin necesidad de introducir fuerzas ficticias. Ya que es un hecho conocido que las Leyes de Newton, tal como fueron escritas, sólo son válidas a los sistemas de referencia inerciales, o más precisamente, para aplicarlas a sistemas no-inerciales, requieren la introducción de las llamadas fuerzas ficticias, que se comportan como fuerzas pero no están provocadas directamente por ninguna partícula material o agente concreto, sino que son un efecto aparente del sistema de referencia no inercial.

Más tarde la introducción de la teoría de la relatividad obligó a modificar la forma de la segunda ley de Newton (ver (2c)), y la mecánica cuántica dejó claro que las leyes de Newton o la relatividad general sólo son aproximaciones al comportamiento dinámico en escalas

macroscópicas. También se han conjeturado algunas modificaciones macroscópicas y no-relativistas, basadas en otros supuestos como la dinámica MOND.

Generalizaciones relativistas

Las leyes de Newton constituyen tres principios aproximadamente válidos para velocidades pequeñas. La forma en que Newton las formuló no era la más general posible. De hecho la segunda y tercera leyes en su forma original no son válidas en mecánica relativista sin embargo formulados de forma ligeramente diferente la segunda ley es válida, y la tercera ley admite una formulación menos restrictiva que es válida en mecánica relativista.

Primera ley, en ausencia de campos gravitatorios no requiere modificaciones. En un espacio-tiempo plano una línea recta cumple la condición de ser geodésica. En presencia de curvatura en el espacio-tiempo la primera ley de Newton sigue siendo correcta si sustituimos la expresión línea recta por línea geodésica.

Segunda ley. Sigue siendo válida si se dice que la fuerza sobre una partícula coincide con la tasa de cambio de su momento lineal. Sin embargo, ahora la definición de momento lineal en la teoría newtoniana y en la teoría relativista difieren. En la teoría newtoniana el momento lineal se define según (1a) mientras que en la teoría de la relatividad de Einstein se define mediante (1b):

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad 1a)$$

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad 1b)$$

donde m es la masa invariante de la partícula y \mathbf{v} la velocidad de ésta medida desde un cierto sistema inercial. Esta segunda formulación de hecho incluye implícitamente definición (1) según la cual el momento lineal es el producto de la masa por la velocidad. Como ese supuesto implícito no se cumple en el marco de la teoría de la relatividad de Einstein (donde la definición es (2)), la expresión de la fuerza en términos de la aceleración en la teoría de la relatividad toma una forma diferente. Por ejemplo, para el movimiento rectilíneo de una partícula en un sistema inercial se tiene que la expresión equivalente a (2a) es:

(2b)

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}}$$

Si la velocidad y la fuerza no son paralelas, la expresión sería la siguiente:

(2c)

$$\mathbf{F} = \frac{m\mathbf{a}}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{1}{2}}} + \frac{m(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})\mathbf{v}}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}}$$

Nótese que esta última ecuación implica que salvo para el movimiento rectilíneo y el circular uniforme, el vector de aceleración y el vector de fuerza no serán paralelos y formarán un pequeño ángulo relacionado con el ángulo que formen la aceleración y la velocidad.

Tercera Ley de Newton. La formulación original de la tercera ley por parte de Newton implica que la acción y reacción, además de ser de la misma magnitud y opuestas, son colineales. En esta forma la tercera ley no siempre se cumple en presencia de campos magnéticos. En particular, la parte magnética de la fuerza de Lorentz que se ejercen dos partículas en movimiento no son iguales y de signo contrario. Esto puede verse por cómputo directo. Dadas dos partículas puntuales con cargas q_1 y q_2 y velocidades \mathbf{v}_1 y \mathbf{v}_2 , la fuerza de la partícula 1 sobre la partícula 2 es:

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{v}_2 \times \mathbf{B}_1 = \frac{\mu q_2 q_1}{4\pi} \frac{\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times \hat{\mathbf{u}}_{12})}{d^2}$$

donde d la distancia entre las dos partículas y $\hat{\mathbf{u}}_{12}$ es el vector director unitario que va de la partícula 1 a la 2. Análogamente, la fuerza de la partícula 2 sobre la partícula 1 es:

$$\mathbf{F}_{21} = q_1 \mathbf{v}_1 \times \mathbf{B}_2 = \frac{\mu q_2 q_1}{4\pi} \frac{\mathbf{v}_1 \times (\mathbf{v}_2 \times (-\hat{\mathbf{u}}_{12}))}{d^2}$$

Empleando la identidad vectorial $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$, puede verse que la primera fuerza está en el plano formado por $\hat{\mathbf{u}}_{12}$ y \mathbf{v}_1 y que la segunda fuerza está en el plano formado por $\hat{\mathbf{u}}_{12}$ y \mathbf{v}_2 . Por tanto, estas fuerzas no siempre resultan estar sobre la misma línea, aunque son de igual magnitud (siempre que $\hat{\mathbf{u}}_{12}$ no sea paralela a \mathbf{v}_1 o \mathbf{v}_2 , ya que entonces ni siquiera se cumpliría la forma débil.)

Versión débil de ley de acción y reacción

Como se explicó en la sección anterior ciertos sistemas magnéticos no cumplen el enunciado fuerte de esta ley (tampoco lo hacen las fuerzas eléctricas ejercidas entre una carga puntual y un dipolo). Sin embargo si se relajan algo las condiciones los anteriores sistemas sí cumplirían con otra formulación más débil o relajada de la ley de acción y reacción. En concreto los sistemas descritos que no cumplen la ley en su forma fuerte, si cumplen la ley de acción y reacción en su forma débil:

La acción y la reacción deben ser de la misma magnitud (aunque no necesariamente deben encontrarse sobre la misma línea)

Todas las fuerzas de la mecánica clásica y el electromagnetismo no-relativista cumplen con la formulación débil, si además las fuerzas están sobre la misma línea entonces también cumplen con la formulación fuerte de la tercera ley de Newton.

Teorema de Ehrenfest

El teorema de Ehrenfest permite generalizar las leyes de Newton al marco de la mecánica cuántica. Si bien en dicha teoría no es lícito hablar de fuerzas o de trayectoria, se puede hablar de magnitudes como momento lineal y potencial de manera similar a como se hace en mecánica newtoniana.

En concreto la versión cuántica de la segunda Ley de Newton afirma que la derivada temporal del valor esperado del momento de una partícula en un campo iguala al valor esperado de la "fuerza" o valor esperado del gradiente del potencial:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\langle p \rangle &= \int \Phi^* V(x, t) \nabla \Phi \, dx^3 - \int \Phi^* (\nabla V(x, t)) \Phi \, dx^3 - \int \Phi^* V(x, t) \nabla \Phi \, dx^3 \\ &= 0 - \int \Phi^* (\nabla V(x, t)) \Phi \, dx^3 - 0 = \langle -\nabla V(x, t) \rangle = \langle F \rangle,\end{aligned}$$

Donde:

$V(x, t)$ es el potencial del que derivar las "fuerzas".

Φ, Φ^* , son las funciones de onda de la partícula y su compleja conjugada.

∇ denota el operador nabra.

Conceptos de Masa y Fuerza: Discusión de las Leyes de Newton

Las leyes de Newton reposan sobre las definiciones básicas de masa y fuerza. Sin embargo, examinando dichas leyes con espíritu crítico, es fácil ver que las definiciones realizadas por Newton de estos conceptos adolecen de algunas deficiencias.

La definición de fuerza (definición IV, Apto 1.4) es claramente circular con la primera ley. En efecto, se podría entender ésta como una definición de fuerza, obviando la definición anterior dada por Newton. Aun aceptando esto, tampoco se puede considerar esta ley como una definición precisa de fuerza, ya que no proporciona una manera de medir su valor de forma cuantitativa. En realidad tan solo se podría deducir de la primera ley cuándo la fuerza es nula o cuándo no lo es. La segunda ley sin embargo si se puede interpretar como una definición cuantitativa de fuerza, pero esto la privaría a su vez de su consideración como principio.

En cuanto a la definición de masa (definición I, Apto 1.4), Newton la refiere a la densidad (ρ) y volumen (V) que integran un cuerpo ($M = \rho V$).

¿Cuál es la definición de densidad? Es difícil aceptar que la densidad sea un concepto más fundamental que el de masa.

Un procedimiento aparentemente más riguroso para definir la masa es debido a E. March (1858 - 1916) que resumimos a continuación.

Sean dos partículas, a y b, formando un sistema binario aislado. Expresamos la segunda ley de Newton para la partícula a:

$$m_a a_a = F_{ab}$$

Donde F_{ab} es la fuerza ejercida sobre a por b.

Análogamente para b:

$$m_b a_b = F_{ba} = -F_{ab}$$

Donde F_{ba} es la fuerza ejercida sobre b por a. Mucho cuidado con la convención de subíndices.

Además se ha utilizado la 3^{ra} ley al escribir $-F_{ab}$.

Así:

$$m_a a_a = -m_b a_b$$

y empleando los módulos de las aceleraciones a_a y a_b .

$$\frac{m_b}{m_a} = -\frac{a_a}{a_b}$$

Suponiendo que la masa m_a como valor de referencia o definición de unidad de masa, este procedimiento nos permite medir la masa de cualquier partícula b a partir de la medición de las aceleraciones a_a y a_b .

Aunque aquí, por clarificar la explicación, se ha llegado a esta definición partiendo de las leyes de Newton, sería posible considerarla como definición básica de masa, para comprobar posteriormente que, efectivamente, es consistente con las leyes de Newton.

De esta forma, con el espíritu crítico mencionado, cabría considerar las leyes primera y segunda de Newton como definiciones de fuerza, con lo que la única ley que expresa un postulado básico de la mecánica sería la ley tercera. *Según Mach por tanto, es la ley tercera de Newton (principio de acción y reacción) la que reviste mayor importancia en la axiomática de la mecánica clásica.*

En relación con esta última ley, puede ser objeto de cierta polémica la consecuencia implícita de existencia de acciones a distancia, es decir acciones que se propagan de manera instantánea (con velocidad infinita). En efecto, si se suponen dos cuerpos alejados entre sí con fuerzas de interacción centrales (dirigidas según la recta que las une), y uno de ellos sufre un cambio de posición, la ley de acción y reacción obligaría a que la fuerza de reacción sobre la otra partícula modificase su dirección de manera instantánea¹⁰.

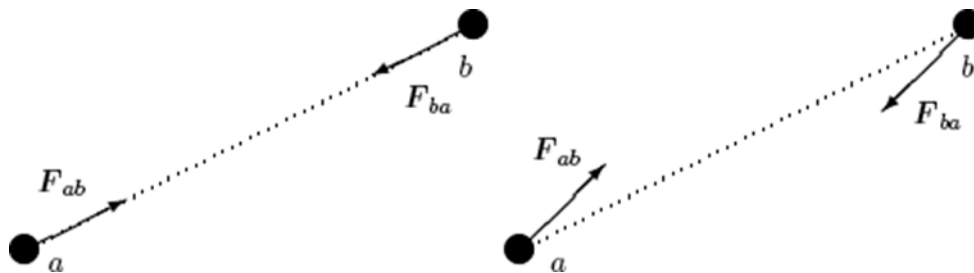
En la realidad física parece que no existen tales interacciones instantáneas; respondiendo a ello la teoría de la relatividad restringida establece un límite a la velocidad de propagación de las interacciones, que es la velocidad de la luz en el vacío (c). Esto origina una cierta inexactitud de la mecánica clásica, error que sin embargo es muy pequeño para las fuerzas gravitatorias o elásticas en objetos «cotidianos.»

Conviene observar también que de la tercera ley se pueden hacer dos enunciados. En su forma débil, ciñéndose estrictamente al enunciado Newtoniano, establece que las fuerzas son iguales en magnitud y dirección y de sentido opuesto. Sin embargo, no presupone que tengan la misma dirección que la recta que une a las dos partículas sobre las que actúan. En el caso en que sí se verifique esta última hipótesis más restrictiva, se dice que se cumple el principio de acción y reacción en su forma fuerte, siendo las fuerzas centrales. En numerosos casos prácticos se verifican ambos enunciados del principio de acción y reacción, como son las fuerzas gravitatorias, elásticas, o electrostáticas. Sin embargo, existen fenómenos importantes en los que no se verifica en ninguna de sus dos formas. Estos casos corresponden a fuerzas que dependen de la velocidad, ligadas por lo general a campos que se propagan con velocidad finita, como son las fuerzas electrodinámicas debidas a cargas en movimiento.

En resumen, podemos clasificar las fuerzas citadas esquemáticamente como sigue.

Fuerzas centrales

Están asociadas a campos que suponen una acción a distancia, propagándose por tanto de manera instantánea. Se trata de fuerzas dirigidas hacia las partículas que las originan, cumpliendo la tercera ley de Newton en su forma fuerte.



a) Fuerzas centrales b) Fuerzas no centrales

Figura 1: Las fuerzas centrales están dirigidas según la recta que une los cuerpos, mientras que las fuerzas no centrales no verifican esta hipótesis, aun siendo iguales en magnitud y dirección y de sentido opuesto.

En mecánica clásica se admite esta hipótesis como adecuada para algunos de los tipos más usuales de fuerzas:

Fuerzas gravitatorias

La hipótesis de fuerza central e instantánea se considera adecuada para las mediciones en escalas usuales.

Sin embargo, para mediciones a escalas astronómicas o cosmológicas se trata de una hipótesis cuestionable. Sería más correcto interpretarlas mediante ondas de gravedad, que se propagan con la velocidad de la luz.

Fuerzas electrostáticas o magnetostáticas

De atracción o repulsión debidas a cargas eléctricas o magnéticas en reposo. Al igual que en el caso gravitatorio, de forma rigurosa para escalas astronómicas puede ser necesario considerar la transmisión de dichas fuerzas a través de ondas electromagnéticas.

Fuerzas elásticas

Ejercidas entre las partículas en contacto de un medio continuo. Por lo general, podría admitirse que son manifestaciones macroscópicas de las fuerzas electrostáticas entre las moléculas.

Fuerzas no centrales

Ocurren, por lo general, cuando las interacciones dependen de la velocidad, estando asociadas a campos que se propagan con velocidad finita:

Fuerzas Electromagnéticas

Cuando son debidas a cargas móviles pueden no cumplir tampoco el principio de acción y reacción en su forma débil.

Debe quedar claro que en este curso admitiremos la hipótesis de fuerzas centrales, por lo que será válido el principio de acción y reacción en su forma fuerte.

La definición de masa según el procedimiento de Mach arriba descrito no proporciona sin embargo un método viable para medirla. Sería prácticamente imposible aislar completamente un sistema binario y al mismo tiempo realizar mediciones. Una forma más práctica de medir la masa, aunque de forma indirecta, es con una balanza de resorte. En ésta lo que se mide directamente es el peso, o atracción gravitatoria hacia el centro de la Tierra. Basta dividir el peso (w) por la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra (g) para obtener la masa¹¹:

$$w = m g \rightarrow m = \frac{w}{g}$$



9. E. Mach, The science of mechanics, traducción al inglés, Open Court, 1902.

10. Históricamente ha existido siempre, antes y después de Newton, una contestación a la posibilidad de tales acciones a distancia. Antiguamente se defendía que todo el espacio estaba lleno de una sustancia invisible, llamada éter, vehículo transmisor de las fuerzas.

Este concepto sobrevivió a Newton, alcanzando su mayor predicamento dos siglos después para explicar el campo electromagnético, siendo la Teoría de la Relatividad la que acabó de desterrarlo.