

EL LABERINTO DE LAS LEYES DE NEWTON

L. Hernández* y O. de Melo**, Facultad de Física, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

RESUMEN

En el presente artículo se analizan críticamente algunos aspectos relacionados con la enseñanza de las leyes de Newton en el nivel universitario. Se analizan sus contradicciones internas y se discuten los conceptos de sistema de referencia inercial, de espacio y tiempo absoluto, de campo e interacción instantánea.

ABSTRACT

Some critical aspects related to the teaching of the Newton's laws for under-graduated students are considered in the present article. The labyrinth of the ideas in the Newton's laws is presented and their internal contradictions are examined. The conceptions about inertial frame, absolute space and time, field and instantaneous interaction are discussed.

I. INTRODUCCIÓN

La teoría newtoniana del movimiento mecánico marcó, desde su surgimiento a mediados del siglo XVII, un hito en la Historia de la Humanidad. Fue la teoría más completa que existió entonces y aún en la actualidad posee una vigencia permanente. Hechos físicos que no satisfacen las leyes del movimiento de Newton se analizan con gran recelo; baste sólo mencionar la tan nombrada y actual *materia oscura* que no se puede detectar directamente observando la radiación electromagnética en algún rango, pero cuya existencia es inferida a partir de los efectos gravitacionales que causa en estrellas y galaxias. Por ejemplo, las galaxias cercanas a la Vía Láctea giran más rápido de lo que cabría esperar por la cantidad de materia visible que parece haber en ellas. Esta materia oscura da lugar al llamado "problema de la masa desaparecida" que es uno de los temas más debatidos de la cosmología moderna.

Con el surgimiento de la teoría newtoniana, la Humanidad se transformó radicalmente. A partir de entonces, la Ciencia y la Técnica se desarrollaron tan vertiginosamente que podría decirse que en cuanto a desarrollo tecnológico se refiere, la época newtoniana estaba más cerca de los romanos que de nuestros días. Newton con sus teorías logró por primera vez algo a lo que aspiran todos los pensadores: predecir el futuro. Él estableció que para un cuerpo cuyas propiedades (masa, carga eléctrica, volumen, etc.), posición y velocidad se conocen en un instante dado, es posible, a partir del conocimiento de las fuerzas que actúan sobre el mismo, determinar su posición y velocidad para cualquier instante posterior o anterior.

Newton resumió las leyes de la dinámica o del movimiento, en tres: la primera, o ley de la inercia donde incorporó las ideas de Galileo; la segunda que estableció como determinar los cambios de velocidad bajo diferentes interacciones llamadas fuerzas; y la tercera que ofrece una norma para las fuerzas: éstas cuando interactúan entre los cuerpos son iguales y opuestas, o lo que es lo mismo: la acción es igual a la reacción.

En el presente artículo se discutirán las contradicciones internas de las leyes de Newton; los conceptos de sistema de referencia inercial, de espacio y tiempo absoluto, de campo e interacción instantánea. Se mostrarán las dos ideas centrales de Newton: conocidas las fuerzas se puede determinar el movimiento de los cuerpos y la segunda, según la distribución dada de los cuerpos se pueden determinar las fuerzas que actúan sobre ellos. Se evidenciará que si bien la primera logró una solución relativamente completa, ya la segunda, con la ley de la gravitación, contenía en su solución una cierta incongruencia por principio: el concepto de la fuerza.

II. GALILEO, LA LEY DE LA INERCIA Y EL SISTEMA DE REFERENCIA INERCIAL

La primera y más bella teoría de la ciencia moderna fue la Mecánica: la ciencia del movimiento. Su historia en lo que a aportes decisivos y generalidades se refiere comenzó con Galileo Galilei que con sus geniales experimentos y extraordinaria capacidad de abstracción para abarcar los resultados cotidianos, realizó una renovación en las concepciones generales del movimiento. La Física de la primera mitad del siglo XVI respondía a la profunda convic-

E-mail: *(luisman@fisica.uh.cu)

***(omelo@fisica.uh.cu)

ción de que todos los fenómenos físicos se podían reducir al desplazamiento de los cuerpos. Las ideas físicas de Galileo representan una continuación relevante de los principales científicos que lo precedieron. Existen dos aspectos en la investigación de Galileo de carácter imperecedero: el enunciado del Principio de la Inercia y el descubrimiento de que la aceleración de la gravedad es la misma para todos los cuerpos en la vecindad de la superficie de la Tierra. La hipótesis de Galileo de la constancia de la aceleración de la gravedad en la vecindad de la superficie de la Tierra se opuso completamente al pensamiento aristotélico: “un peso dado cae una cierta distancia en un tiempo dado; un peso que sea mayor recorre la distancia en un tiempo menor estando en proporción inversa a los pesos. Así, si un peso es el doble que otro invertirá la mitad del tiempo para un movimiento dado”. La abstracción de Galileo fue inmensa. Es posible que si hoy se realizara una pesquisa entre la población, la idea de Aristóteles sería considerada como absolutamente verdadera para la gran mayoría de los encuestados. La leyenda narra que Galileo hizo su experimento sobre la constancia de la gravedad desde la Torre de Pisa, pero es poco probable que Galileo hubiera podido obtener un resultado experimental satisfactorio ya que la Torre (ya no tan inclinada) de Pisa, tiene una altura de sólo 55 m, y en aquella época era muy inexacto medir tiempos del orden de los segundos. Por supuesto que Galileo nunca pudo medir la caída libre en el vacío, pero el experimento le permitió a Galileo, con su gran genialidad, comprender la influencia del rozamiento del aire y estas ideas extenderlas a su Principio de la Inercia. Es por ello que se encuentra muy vinculada, la constancia de la aceleración de la gravedad con la inercia.

Para su Principio de Inercia, Galileo empleó planos inclinados en donde pudo comprobar que durante la caída, los cuerpos aumentan su velocidad, en tanto durante la subida de los planos esos mismos cuerpos disminuyen su velocidad. De aquí generalizó que el movimiento en un plano horizontal debía ser permanente, pues sería un movimiento sin aumento o disminución de la velocidad. Por supuesto, Galileo sabía perfectamente que tales movimientos horizontales nunca podrían ser permanentes en la práctica, pero comprobó que mientras más pulidas eran las superficies los cuerpos recorrían mayor distancia antes de detenerse. Es la misma abstracción que realizó para explicar la constancia de la gravedad durante la caída libre, eliminando el rozamiento del aire. De esta manera Galileo concluyó: una vez que un cuerpo posea una cierta velocidad, esta mantendrá su valor mientras no actúen sobre él interacciones de otros cuerpos que la modifiquen. Esto constituye el llamado Principio de la Inercia y fue incorporado por Newton en sus leyes del movimiento, denominándolo Primera Ley.

Muchos estudiantes cuando se inician en el estudio de la Mecánica se preguntan por qué es necesario incluir el Principio de la Inercia como Primera Ley, ya que esta podría estar incluida en la Segunda Ley, ya que esta podría estar incluida en la Segunda Ley, ya que esta podría estar incluida en la Segunda Ley: si sobre el cuerpo no se ejercen fuerzas, no hay aceleración y el cuerpo se mueve con velocidad constante o se mantiene en reposo. Pero Newton necesitaba el Principio de la Inercia para que su ley de la fuerza y en particular su teoría gravitacional fuera de carácter universal, es decir una ley válida no sólo para los terrícolas sino también para todos los posibles extraterrestres.

Sin embargo, el enunciado de la ley de la inercia que se presenta en los textos de mecánica no parece conveniente desde el punto de vista didáctico. Poco ha cambiado de la forma en que Newton la expresó: “Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme hacia adelante, excepto en cuanto es obligado por las fuerzas impresas en él a cambiar su estado”. Newton tenía en mente un espacio absoluto con respecto al cual se podían especificar velocidades sin aclarar nada más. Él definía el espacio absoluto estableciendo que al transitar desde un punto del espacio a otro, cambian los procesos internos en el cuerpo que se traslada, sin importar cuales son los límites espaciales o qué cuerpos inmóviles se hallan en él. De manera tal que la posición de un cuerpo no está vinculada con los límites del Universo ni con otros cuerpos, sino con el mismo espacio donde se encuentra el cuerpo. Los cambios internos a que se refiere Newton están referidos a las fuerzas de inercia, que caracterizan los procesos mecánicos en un sistema que se mueve con aceleración y que modifican la conducta de los cuerpos en el sistema de referencia. Junto al concepto de espacio absoluto, Newton también desarrolló la idea de tiempo absoluto el cual es el tiempo independiente de la posición que ocupa el cuerpo en el espacio en el que se determina el tiempo. En fin, Newton era un convencido del movimiento absoluto que podía establecerse por los cambios internos en un cuerpo en movimiento.

Hoy se sabe que ese espacio absoluto no existe; que no está asociado ni al sol ni a las estrellas fijas y que además no hace falta para nada. Por tanto, referirse a un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme no dice absolutamente nada a no ser que se especifique con respecto a que sistema se está midiendo la velocidad. De hecho, una partícula (libre o no) podrá verse con cualquier velocidad o aceleración (dentro de los límites de la relatividad especial) siempre que escojamos un sistema adecuado a nuestro propósito. A la pregunta de cuales son los sistemas de referencia en los cuales ocurre lo que la ley de inercia dispone, se pudiera responder que estos son los sistemas inerciales. Pero enseguida se llegará a un círculo vicioso al tratar de definir estos sistemas inerciales.

La mayoría de los estudiantes que se enfrentan a un curso universitario de física ya tienen alguna noción de que, contrario a la propuesta aristotélica, la fuerza es responsable del cambio de la velocidad y no de la velocidad misma; sin embargo no consideran necesario especificar cual es el sistema de referencia. ¿Por qué? Porque todavía la mayoría de las personas y también los estudiantes que se inician en la física, siguen pensando en función del espacio absoluto de Newton. Y a cambiar esta forma de pensar no ayuda el enunciado de la ley de la inercia que se presenta en los cursos de mecánica.

La ley de inercia tiene dos aspectos importantes. El primero radica en que declara la existencia de ciertos sistemas de referencia donde todas las partículas libres se ven como si estuvieran en reposo o si se movieran con movimiento rectilíneo uniforme. Esto no es obvio. Obsérvese que por más extraño que nos parezca hoy, una ley de inercia aristotélica hubiera sido algo así como lo siguiente: “una partícula libre se desacelera hasta detenerse y una vez que se detiene la aceleración cesa.” Para partículas como esas no podrían encontrarse sistemas de referencia que las vieran a todas como estando en reposo o en movimiento uniforme. O sea, el hecho de que todas las partículas libres puedan verse en reposo o en movimiento uniforme desde un tipo determinado de sistema, representa en sí un cambio del mundo físico aristotélico al mundo físico galileano. El segundo aspecto es más práctico, constituye una definición de lo que conocemos como sistema inercial, que no tiene otra forma de definirse. Sobre la base de los argumentos anteriores sería más conveniente un enunciado como el siguiente: “existen sistemas de referencia (que llamaremos sistemas inerciales) con respecto a los cuales las partículas libres se encuentran en reposo o se mueven con movimiento rectilíneo y uniforme.” La importancia de estos sistemas radica en que una vez en ellos, todo cambio de la velocidad corresponderá con alguna acción. Esta acción es “real” y siempre que ocurra el cambio de velocidad encontraremos “una tierra que hala”, un “aire que retarda”, o un “cuerpo cargado eléctricamente que empuja.” Utilizando un sistema que no sea inercial, aparecerán “acciones” que no pueden achacarse a ningún cuerpo real y esto casi siempre hace el trabajo más complicado, y la formulación de las leyes físicas menos simple.

III. LA SEGUNDA LEY. LA FUERZA

Estudiando las ideas de Galileo, Newton se planteó nuevas preguntas en lo relativo a la inercia. Si en ausencia de toda interacción, la velocidad de un cuerpo es constante, entonces ¿cuál es la relación entre la fuerza y el movimiento? La fuerza, se respondía Newton, es la causa de la modificación temporal de la velocidad, o lo que es lo mismo, produce una aceleración sobre el cuerpo. Newton se basó en

la práctica y apoyado en sus grandes habilidades como experimentador, encontró que la relación entre la fuerza y la aceleración que producía, venía dada por la masa del cuerpo. Esta relación la conocemos como la Segunda Ley, $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, o en su forma más clásica, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$.

Desde su descubrimiento, existió un gran debate en torno a si esta ecuación representa una verdadera ley o una mera definición de fuerza. Intentar definir la fuerza de manera independiente de la definición de masa sin hacer uso de la relación $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ es un problema bien complicado. Definir la fuerza como la causa de la aceleración y luego establecer esta relación, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$, como ley es algo que no satisface completamente.

El laureado con el premio Nobel de Física, R. P. Feynman en su famoso libro Lectures on Physics [1] escribe: “Preguntémonos, ¿cuál es el significado físico de la Segunda Ley de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$?, ¿cuál es el significado de la fuerza, de la masa y de la aceleración? Bien, nosotros podemos sentir **intuitivamente** (el resalte en negro es de los autores) el significado de masa y podemos *definir* la aceleración si conocemos el significado de la posición y el tiempo. Nosotros no discutiremos estos significados sino nos concentraremos sobre el nuevo concepto de *fuerza*”. Una manera muy pragmática de eludir el conflicto.

Un libro que trata en extenso de definir independientemente la fuerza de la masa y de la ecuación $\vec{F} = m\vec{a}$, es el escrito por los autores R. Portuondo y M. Pérez [2]. Ellos se basan en que “las interacciones de los cuerpos, y por tanto las fuerzas, no se manifiestan sólo por la modificación (aceleración) que causan en el movimiento de un cuerpo, sino también por las deformaciones que producen en estos. Estos efectos, la deformación y la aceleración correspondiente al cambio de velocidad, permiten hallar dos mecanismos para medir las fuerzas”. El intento es loable pues los autores pretenden definir la fuerza a partir de mediciones estáticas, valiéndose únicamente de las deformaciones que se producen en un resorte por la acción de una fuerza. Después, esta fuerza, ya definida, la emplean para producir variaciones de la aceleración en función de la masa y arribar a la ecuación $\vec{F} = m\vec{a}$. Esta tentativa de, por una parte definir la fuerza mediante experimentos estáticos, y por otra la segunda ley a través de experimentos dinámicos presenta sin embargo ciertos puntos confusos. En el enfoque, el bloque que se cuelga del resorte lo deforma y al justificar esta acción como fuerza, los autores asumen que “la Tierra atrae a los cuerpos con cierta fuerza, como lo demuestra el hecho de que estos caen acelerados

hacia el suelo (sistema inercial)". La Segunda Ley expresa precisamente que al aparecer una aceleración la causa es la fuerza, de manera que para calibrar la fuerza estáticamente los autores tuvieron que apoyarse en el concepto dinámico de la fuerza. Así, se postula el precepto **intuitivo** de que la fuerza es proporcional a la aceleración, conclusión a la que, mediante el experimento, se pretende arribar posteriormente. Además, para "demostrar" la ley de Hooke, $F = -kx$, punto de conclusión necesario para definir la fuerza de manera estática, se escribe: "adoptemos ahora un criterio que, por muy lógico o natural que parezca, no es más que un convenio o definición: aceptemos que para sostener dos bloques iguales, el resorte debe realizar una fuerza doble que la necesaria para sostener uno, y que la fuerza es, en general n veces mayor para sostener n bloques iguales que para sostener uno". En este criterio hay también algo de presentimiento al estilo de Feynman.

Los libros de Resnick y Halliday han sido utilizados mundialmente para el estudio de la física universitaria durante más de cuatro décadas. En su primera edición [3] los autores escribían: "Estos enunciados simplemente confirman nuestra aceptación **intuitiva** que la fuerza se considera como la causa de la aceleración. Sin embargo, para fines científicos, debemos hacer nuestra definición de fuerza exacta estableciendo un procedimiento para medirla". La definición exacta y su procedimiento para medirla se basa en la calibración de la fuerza en función de la aceleración que produce en un cuerpo patrón. En su cuarta edición [4], después de 30 años, los autores son más pragmáticos: "Desarrollemos nuestro concepto de fuerza definiéndolo operacionalmente. En el lenguaje cotidiano, una fuerza es un empuje o un jalón. Para medir tales fuerzas en forma cuantitativa, las expresamos en términos de la aceleración que determinado cuerpo estándar experimenta en respuesta a esa fuerza". Nuevamente llegan a la segunda ley calibrando la fuerza en función de la aceleración.

Es entonces $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$, ¿una ley o la definición de fuerza? Si fuera una elemental definición de fuerza serviría de poco porque con ella no se podría predecir hechos físicos o explicar los acontecidos. Sin embargo, la Segunda Ley nos ha mostrado su grandeza al explicar y predecir infinidad de hechos físicos. Newton respondió a la pregunta de ¿cuál es el significado físico de la fuerza?, desarrollando su teoría de la gravitación y con ella no sólo explicó el significado de una fuerza específica, sino que unida a la Segunda Ley pudo demostrar las leyes de Kepler y describir el movimiento de los planetas. Posteriormente a la ley de fuerza gravitacional se reportaron otras leyes aproximadas para las fuerzas: elástica, eléctrica, magnética, viscosa, fricción, etc.

La ley de la Gravitación Universal no tuvo sólo implicaciones cosmológicas al deducir las leyes de Ke-

pler, sino que tuvo una gran connotación en lo relativo al concepto de masa. Para la ley no es necesaria ninguna especulación o referencia a otra propiedad del cuerpo que no sea su masa y esto determina su universalidad, ya que cualquier otro atributo del cuerpo como puede ser su carga o densidad no se relaciona directamente con la fuerza gravitacional. Se sabe también experimentalmente, con un grado elevado de precisión que las masas gravitatoria e inercial de un cuerpo son iguales, esto significa que el valor de la masa utilizado en la ecuación de la ley de la gravitación es igual al valor de la masa del mismo cuerpo que se emplea en la Segunda Ley. Pero el aporte sorprendente de la genialidad de Newton fue considerar que la fuerza de interacción gravitacional es proporcional al producto de las masas. Estas "inspiraciones geniales" han constituido verdaderos motores impulsores del pensamiento científico y muy en particular de la Física.

Existen dos aspectos relativos a la Ley de Gravitación que aún intrigan a la comunidad de los físicos. ¿Cuál es el mecanismo físico que explica la atracción gravitacional? Imaginemos por un instante que en vez de existir la ley de atracción gravitacional existiera la ley de repulsión gravitacional. ¿Cómo se comportaría el Universo?, ¡ni pensarlo! Newton escribía en su gigante obra Principia: "Hasta ahora no he sido capaz de descubrir por el estudio de los fenómenos, la causa de las propiedades de la gravedad y no hago ninguna hipótesis acerca de ella. Es suficiente el hecho de que la gravedad existe y actúa de acuerdo a leyes establecidas, sirviendo correctamente para explicar el comportamiento de los cuerpos celestes y las mareas".

Otro aspecto desconcertante es la causa del por qué la fuerza de atracción gravitacional sea tan pequeña. Por ejemplo, si se toma la fuerza de repulsión entre dos electrones y se compara con la fuerza de atracción gravitacional entre ellos se tendría una relación igual a ¡ $4,17 \cdot 10^{42}$! Es un número inmensamente grande, pero es una constante de la naturaleza. Se espera que con la "Teoría del Todo" la "Ecuación Universal" contenga esta constante. Por el momento, una de las explicaciones más atractivas para revelar el pequeño valor de la fuerza gravitacional es la existencia de infinitos universos paralelos en la Teoría de la Membrana.

La Segunda Ley tiene sus límites de aplicación, pero esto es un problema intrínseco de cualquier teoría y no es de asombrarse que las leyes de Newton se incumplan en un campo no investigado por él. La suposición establecida por Newton de que el espacio y el tiempo eran absolutos limita el rango de aplicación de la ley a cuerpos que se desplazan a velocidades lejanas a las fotónicas. Igualmente, en el micromundo donde es válido el Principio de Incertidumbre no es posible el determinismo preestablecido por la Segunda Ley.

Casi toda la Física posterior se apoyó en el concepto de fuerza que aún se define o se establece prácticamente con las mismas palabras que utilizó Newton. La lógica de formulación de la Segunda Ley no es clara, ya que Newton empleó ideas intuitivas que él mismo nunca consideró como verdades establecidas, de aquí que algunos sean propensos a confundir la ley con la definición de fuerza. Pero no, la Segunda Ley es una ley con todas las de la ley.

IV. LA TERCERA LEY. LA ACCIÓN Y LA REACCIÓN

Si bien Newton no pudo definir la fuerza con el rigor que nos hubiera gustado y que pudo establecer sólo una ley, la fuerza de atracción gravitacional, si tuvo la gran sagacidad de expresar que las fuerzas operaban en pares, la acción y la reacción, que son iguales y opuestas, actuando sobre los cuerpos que interaccionan. Esta ley permite resolver numerosos problemas sin necesidad de conocer exactamente la ley de la fuerza.

De la ley de atracción gravitacional entre dos cuerpos de masa M_1 y M_2 se intuye claramente como funciona el par de fuerzas de acción y reacción, opuestas y actuando sobre cada cuerpo, tal y como se muestra en Figura 1. El suponer que ambas fuerzas poseen el mismo valor fue una idea genial de Newton. De hecho, a los que comienzan en el estudio de la física, hay que corregirles rápidamente su falso "sentido común" el cual le dice: que el cuerpo de mayor masa debiera ejercer una fuerza mayor sobre el de menor masa que la fuerza que ejerce el cuerpo de menor masa sobre el cuerpo de mayor masa. La fuerza de acción que ejerce la Tierra sobre un objeto es la misma que la fuerza de reacción que ejerce el objeto sobre la Tierra. Esta idea newtoniana es de gran abstracción y genialidad.

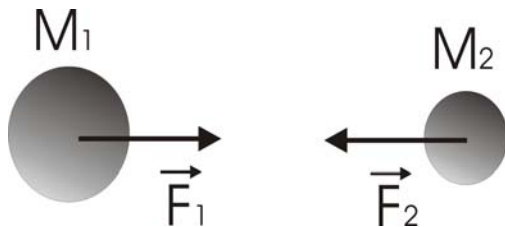


Figura 1. Interacción entre las masas M_1 y M_2 mostrando la ley de atracción gravitacional.

Pero la gran utilidad de la Tercera Ley aparece cuando están presentes más de dos cuerpos. Por ejemplo, en el caso de tres cuerpos como se muestra en la Figura 2, sobre el cuerpo de masa M_3 se ejerce una fuerza \vec{F} a la cual no le corresponde ninguna reacción. Pero si se conoce cuantos cuerpos están interactuando, esta fuerza por su carácter vectorial puede descomponerse en partes, siendo cada parte la interacción entre dos cuerpos cuya fuerza de interacción mutua es igual en magnitud y opuesta en dirección.

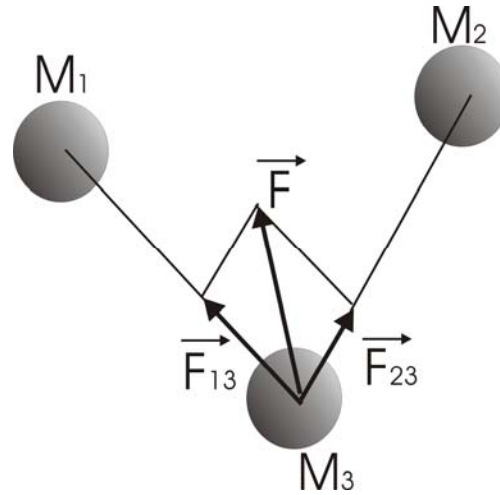


Figura 2. Interacción entre tres cuerpos.

El mismo procedimiento se engrandece cuando se tienen cuerpos con distribución continua de masas, así en el simple ejemplo que se muestra en la Figura 3, se analiza la interacción entre un cuerpo puntual o partícula de masa M_1 y una barra homogénea cilíndrica de masa M , de sección transversal A y longitud L que se encuentran separados una distancia H . La barra cilíndrica se divide en iguales diferenciales de masa dM y se halla su contribución a la fuerza que ejerce sobre el cuerpo M_1 . La fuerza resultante será entonces la suma de cada una de las contribuciones: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$. Se puede inferir inmediatamente a partir de la Tercera Ley y sin necesidad de conocer la ley explícita de la fuerza de interacción, que si la altura H se encuentra en el punto medio del cilindro, la fuerza resultante sobre M_1 tendrá esa misma dirección. Bajo estas condiciones, la barra cilíndrica pudiera también considerarse como una partícula, concentrada su masa en el punto medio y separada de M_1 por una distancia $r = \frac{1}{2}\{LH/\arctan(L/4H)\}^{1/2}$. Cuando no coincidan el punto medio y la altura, la fuerza resultante estaría dirigida hacia la parte del cilindro con mayor masa.

La Tercera Ley también presenta sus contradicciones porque establece la fuerza mediante la interacción entre dos cuerpos, enfoque muy diferente al establecido en las dos primeras leyes. Por otra parte, es aceptado implícitamente que la interacción se transmite a velocidad infinita entre los cuerpos. Cualquier cambio de uno de ellos se "siente" instantáneamente en el otro, para que las fuerzas entre ellos sean iguales y opuestas en el mismo instante. La propagación "instantánea" es una buena aproximación cuando el tiempo de duración del cambio de posición de los cuerpos es grande comparado con el tiempo que emplearía una señal luminosa en recorrer ese desplazamiento. Esta condición se cumple satisfactoriamente cuando chocan dos bolas de billar pero no se satisface cuando colisionan dos partículas atómicas.

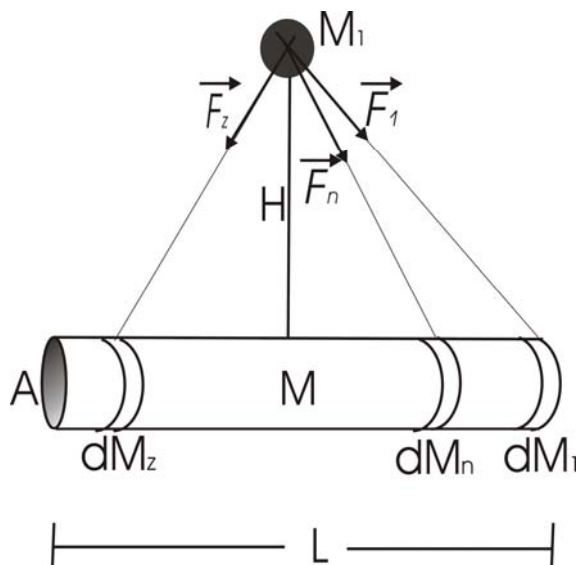


Figura 3. Interacción entre un cuerpo puntual de masa M_1 y una barra cilíndrica de masa M , de sección transversal A y longitud L que se encuentran separados una distancia H . La barra cilíndrica se divide en iguales diferenciales de masa DM y se halla su contribución a la fuerza que ejerce sobre el cuerpo M_1 .

Einstein modificó la Ley de la Gravitación de Newton incorporando la relatividad a la gravitación y estableciendo que no se podía propagar la interacción a velocidades superiores a la de la luz. La teoría einsteiniana de la relatividad además de desechar el modelo de acción a distancia demostró la inexistencia del éter y postuló el concepto de campo gravitacional. A partir de este concepto se considera que una partícula de masa M_1 modifica de "alguna manera" el espacio que la rodea, creando un campo gravitacional que a su vez, ejerce una fuerza de interacción sobre otra partícula de masa M_2 al cabo de un tiempo finito, que viene dado por la relación entre la distancia que separa los cuerpos y la velocidad de propagación de la perturbación. Según la Teoría General de la Relatividad, esta velocidad coincide con la velocidad de la luz.

Junto a la existencia del campo aparecen las ondas gravitacionales, perturbaciones en el espacio-tiempo que en teoría se propagan a la velocidad de la luz desde los lugares donde se acelera rápidamente una masa. Para detectar las ondas gravitacionales se necesita medir los cambios que ellas producen en el espacio-tiempo. El problema es que estas ondas son de naturaleza muy débil y la inexistencia de la radiación bipolar significa que solamente una pequeñísima fracción de energía mecánica de la fuente se convierte en radiación gravitacional. Se predice que las ondas gravitacionales más intensas producirían cambios en las dimensiones del espacio-tiempo menores de una parte en 10^{22} . Una comprobación experimental de las ondas gravitacionales

proporcionaría una ratificación más de la Teoría de la Relatividad, facilitándole a la Astronomía nuevas informaciones sobre el colapso de las estrellas, la interacción de los agujeros negros y la velocidad de expansión del Universo. La detección de estas ondas y su partícula asociada, el gravitón, es uno de los mayores retos de la actual física experimental y varios son los experimentos que se realizan en todo el mundo [5].

Como el concepto de campo se presenta tan artificioso como el del éter, los físicos siguen empeñados en encontrar un modelo que permita describir de manera más acertada las interacciones entre los cuerpos. En los últimos años se ha desarrollado la teoría de las supercuerdas buscando la Teoría del Todo que pueda unir en un sólo modelo todas las interacciones fundamentales de la naturaleza: gravitacionales, electromagnéticas, nucleares y débiles. En esta teoría, los átomos, ya no son átomos como pensábamos desde la época de Demócrito, sino vibraciones de una cuerda o membrana. Con el postulado de la oncenava dimensión en la Teoría de la Membrana, la Gravitación pudiera explicarse como intercambio de vibraciones entre membranas que se encuentran en universos paralelos. ¿En fin, vale la pena rechazar tantas "verdades" alcanzadas con teorías previas en aras de lograr la tan anhelada unificación de los campos?

V. CONCLUSIONES

Se discutieron las contradicciones internas de las leyes de Newton, los conceptos de espacio y tiempo absoluto, la interacción instantánea y el concepto de campo. Se mostraron las dos ideas centrales de Newton: conocidas las fuerzas se determina el movimiento de los cuerpos y la segunda, según la distribución dada de los cuerpos determinar las fuerzas que actúan sobre ellos. Se evidenció que si bien la primera logró una solución relativamente completa, ya la segunda, con la ley de la gravitación, contenía en su solución una cierta incongruencia, por principio: el concepto de la fuerza.

Se ha presentado el laberinto de las ideas en las leyes de Newton: ¿existirá un sistema de referencia inercial donde sea válida la ley fundamental de la dinámica?, ¿es la Segunda Ley una simple definición de fuerza?, ¿cuál es la naturaleza física de la gravitación?, ¿por qué la fuerza gravitacional es tan pequeña?, ¿qué es el campo gravitacional? Es muy probable que estas y otras interrogantes no pudieran responderse satisfactoriamente; pero de lo que si no hay dudas es que la teoría de Newton representó un momento cumbre del pensamiento humano y ha contribuido como ninguna al desarrollo impetuoso de la sociedad moderna.

REFERENCIAS

- [1] FEYMAN, RICHARD P.; ROBERT B. LEIGHTON and MATTHEW SANDS (1967) : Lectures on Physics.
- [2] PORTUONDO, RAÚL y MEDEL PÉREZ (1983): **Mecánica**. Editorial Pueblo y Educación.
- [3] RESNICK, ROBERT y DAVID HALLIDAY: Physics For Students of Science and Engineering, Part I, Second Edition (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962), pp. 1090, 1091.
- 4] HALLIDAY, DAVID; ROBERT RESNICK and KENNETH S. KRANE (2003): Physics, 4th Edition. John Wiley & Sons Inc / March 1992
- [5] HOUGH, JIM and SHEILA ROWAN (2005): **Physics World**, 18, 37.