

Contents

A MASA, MOMENTUM, INERCIA, FUERZA	413
-----------------------------------	-----

Appendix A

MASA, MOMENTUM, INERCIA, FUERZA

IGOR SAAVEDRA
Departamento de Física,
Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas, Universidad de Chile.

El libro de Newton: “Principios matemáticos de la filosofía natural”, publicado en 1687 comienza con ocho definiciones, algunas de las cuales se reproducen a continuación, y cuyo propósito resume así Newton en el esolío que les sigue:

*“... he dado las definiciones de aquellas palabras que son **menos conocidas** y he explicado el sentido en que deseo se les entienda en el discurso que continúa.”*

En el lenguaje de la física de hoy estas definiciones corresponden a los conceptos de masa, momentum o cantidad de movimiento, inercia y fuerza. Dice Newton:

Definición 1:

La cantidad de materia es la magnitud de ella que se obtiene conjuntamente de su densidad y su volumen.

Hoy llamamos **masa** a esta “cantidad de materia”. Evidentemente, Newton supone mejor conocida la densidad de un cuerpo que su masa y por eso define esta última a través de la relación

^{0*} Extractado del Capítulo 2 del libro *Tiempo, Espacio, Movimiento*, Igor Saavedra, Editorial Universitaria 2^a edición (1987).

$$\text{masa} = \text{densidad} \times \text{volumen},$$

que no escribe en forma explícita pero que explica a través de ejemplos.

Agrega Newton:

*Es esta cantidad a que me refiero de ahora en adelante con el nombre de cuerpo o **masa**. Y ella se conoce por el peso de cada cuerpo, porque es proporcional al peso, como yo he encontrado en experimentos de gran precisión hechos con péndulos, los que mostraré más adelante.*

La masa a que se refiere Newton en estas proposiciones corresponden a la que hoy llamamos **masa inercial** de un cuerpo. En los experimentos a que alude encuentra que, en un lugar dado, la razón entre las masas inerciales de dos cuerpos es igual a la razón entre los pesos respectivos. Por otra parte, la ley de gravitación universal establece que en un lugar dado el peso de un cuerpo es proporcional a una masa, que hoy se llama **masa gravitacional**, que en principio podría ser diferente (e independiente) de la masa inercial. Desde un punto de vista contemporáneo, en consecuencia, lo que demuestra este experimento de Newton es que hay una proporcionalidad directa entre ambas masas o, lo que es lo mismo, que la razón entre la masa inercial y la masa gravitacional de un cuerpo es una constante. Resulta en definitiva que, sin pérdida de generalidad, la constante puede elegirse igual a la unidad, esto es, que **ambas masas son iguales**; este hecho constituye el punto de partida de la Teoría General de Relatividad, desarrollada por Einstein en la segunda década de este siglo.

La definición de masa dada por Newton ha sido criticada sobre la base de que se cae en un círculo vicioso cuando se dice que la masa es igual al producto de la densidad por el volumen, puesto que no hay otro modo de definir la densidad que decir que ella es la masa de un volumen unitario, o sea,

$$\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}.$$

De todos modos, lo importante es que Newton se da cuenta, y lo señala así con claridad por primera vez, que todos los cuerpos poseen una propiedad fundamental característica, diferente de su peso, que determina su movimiento; ésta es la propiedad que llama masa. Como alguien ha dicho, la verdad es que Newton, una vez que hubo decidido definir la masa en términos que eran de uso corriente en su época, difícilmente hubiera podido dar una mejor definición que la que dió.¹

¹Hoy, siguiendo a Mach (1883), se puede partir con la definición: “dos cuerpos tienen igual masa cuando, al actuar el uno sobre el otro, se comunican entre sí aceleraciones iguales y opuestas”, para

A continuación Newton define lo que él llama “movimiento”, que hoy llamamos **momentum**, de un cuerpo, de la siguiente manera:

Definición II

La cantidad de movimiento es la magnitud de él que se obtiene conjuntamente de la velocidad y de la cantidad de materia.

En el lenguaje contemporáneo se dice que el momentum es igual al producto de la masa por la velocidad. Como la velocidad es un *vector* también lo es el momentum, ya que no hay un sentido o dirección asociado a la masa (lo cual se expresa diciendo que la masa es una *cantidad escalar*. Obsérvese que, en consecuencia, si la masa es constante, el momentum cambia sólo cuando se acelera o se frena manteniendo la dirección del movimiento, o cuando sin variar la rapidez se cambia la dirección.

El momentum es una cantidad central en la física de Newton, de mayor importancia que la velocidad o que la aceleración. La pregunta fundamental que pretende contestar su teoría es: ¿cómo (y por qué) varía el momentum en un intervalo dado de tiempo? A responder está dirigida la segunda ley.

La tercera definición es la siguiente:

Definición III

*La vis insita, o fuerza innata de la materia, es un poder de resistir mediante el cual cada cuerpo **continúa en su estado presente**, ya sea éste de reposo o de movimiento uniforme hacia adelante en una línea recta.*

Y aclara Newton:

Esta fuerza es siempre proporcional al cuerpo cuya fuerza es y no difiere de la inacción de la masa, excepto en nuestra manera de concebirla.

Hay que recordar al respecto que en la definición I Newton ha dicho que usará las palabras *cuerpo* y *masa* como sinónimos; por lo tanto lo que afirma en este párrafo es que la *vis insita* es proporcional a la masa. Continúa:

Debido a la naturaleza inerte de la materia, no es sino con dificultad que se saca un cuerpo de su estado de reposo o de movimiento. Tomando esto en cuenta, es

introducir luego un cuerpo de masa arbitrariamente elegida como la unidad y decir por definición que “otro cuerpo tiene masa m cuando comunica al primero una aceleración m veces mayor que la que de él recibe”.

posible dar a la **vis insita** el nombre muy significativo de **inercia** (*vis inertiae*), o fuerza de inactividad.

En resumen, entonces, la *inercia* de un cuerpo es su tendencia a continuar en su estado de reposo o de movimiento uniforme en una línea recta y es proporcional a su masa.

Definición IV

Una fuerza aplicada es una acción ejercida sobre un cuerpo a fin de cambiar su estado, ya sea éste de reposo o de movimiento uniforme en línea recta.

Aparece aquí el otro concepto fundamental: **la fuerza**. Para Newton, ésta *consiste en la acción solamente, y no permanece en el cuerpo cuando termina la acción. Porque un cuerpo mantiene cada nuevo estado que adquiere, debido sólo a su inercia.*

Newton señala que

las fuerzas aplicadas son de diferentes orígenes, como choque, presión, fuerza centrípeta,

pero no define sino la última, lo que debe entenderse en el sentido de que da por bien conocidas las dos primeras.

Definición V

Una fuerza centrípeta es aquella debido a la cual los cuerpos son atraídos o impelidos, o de alguna manera tienden, hacia un punto como hacia un centro.

Ejemplos de estas fuerzas, agrega Newton, son

la gravedad, mediante la cual los cuerpos tienden hacia el centro de la tierra; el magnetismo, mediante el cual el fierro tiende hacia el imán; y esa fuerza, cualquiera que sea, mediante la cual los planetas son sacados continuamente de sus movimientos rectilíneos, en los que continuarían si ella no existiera y que los obliga a dar vueltas en órbitas curvilíneas.

Newton va a demostrar más adelante que “esa fuerza, cualquiera que sea” es la misma que la de gravedad, unificando así los fenómenos de caída de objetos hacia la tierra y de movimiento de tipo planetario.

Continúa Newton:

*Una piedra que se hace girar en una onda trata de alejarse de la mano que la hace dar vueltas, y debido a ello estira la honda con una fuerza que es tanto mayor cuanto mayor es su velocidad y se escapa tan pronto como se le suelta. Llamo fuerza centrípeta a la fuerza que se opone a este proceso y mediante la cual la honda continuamente atrae la piedra hacia la mano y la retiene en su órbita, porque está dirigida hacia la mano (**que actúa**) como el centro de la órbita. Y lo mismo debe entenderse respecto de todos los cuerpos que dan vueltas en órbitas cualesquiera. Todos tratan de alejarse de los centros de sus órbitas; y si no fuera por la oposición de una fuerza contraria que los reprime y los mantiene en ellas, a la cual por lo tanto llamo centrípeta, se escaparían moviéndose en líneas rectas con un movimiento uniforme.*

Y todavía da otros ejemplos:

*Un proyectil, si no fuera por la fuerza de gravedad, no se desviaría hacia la tierra sino que se alejaría en una línea recta con un movimiento uniforme, en el caso en que no existiera la resistencia del aire Si una bola de plomo proyectada desde lo alto de una montaña por la fuerza de la pólvora con una velocidad dada y en una dirección paralela al horizonte, se mueve a lo largo de una curva hasta caer al suelo a una distancia de dos millas, si no existiera la resistencia del aire y su velocidad se doblara o decuplicara, recorrería una distancia doble o diez veces mayor. Y aumentando la velocidad podríamos aumentar la distancia como quisiéramos, y disminuir la curvatura de la línea que podría describir, de modo que por último podría caer a la distancia de 10, 30 ó 90 grados, o aún podría dar una vuelta alrededor de la tierra antes de caer, o, finalmente, podría no volver jamás a caer a la tierra, sino que irse hacia los espacios celestiales y proseguir en su movimiento **in infinitum**.*

Es una reflexión interesante al comparar el carácter altamente especulativo que esta proposición de Newton necesariamente tuvo en su momento con el carácter casi rutinario que tiene hoy, poco más de trescientos años más tarde. Obsérvese también, además, que el colocar un satélite en una órbita terrestre, o enviar un vehículo en un viaje interplanetario, no es hoy un hecho científico sino un hecho **tecnológico**. La teoría básica necesaria ya fue formulada por Newton.

Y termina Newton esta discusión de su definición V haciendo explícita su tarea como científico:

“Y de la misma manera que un proyectil, debido a la fuerza de gravedad puede hacerse girar en una órbita, y dar vueltas alrededor de la tierra, así también la

*luna, ya sea debido a la fuerza de gravedad, si es que tiene gravedad, o cualquiera otra fuerza que la empuja hacia la tierra, puede ser continuamente atraída hacia ella y sacada del camino rectilíneo que seguiría debido a su fuerza innata (inercia), y obligada a girar en la órbita que ahora describe; ni tampoco podría la luna continuar en su órbita sin una fuerza semejante. Si esta fuerza fuera demasiado pequeña no sacaría lo suficiente a la luna de su trayectoria rectilínea; si fuera demasiado grande la sacaría demasiado y la haría caer en la tierra. Es necesario que la fuerza sea una cantidad justa, y es **la tarea de los matemáticos** (hoy decimos **físicos**) encontrar la fuerza que puede servir exactamente para retener un cuerpo en una órbita dada con una velocidad dada; y viceversa, determinar la trayectoria curvilínea hacia la cual un cuerpo proyectado desde un lugar dado con una velocidad dada se puede desviar de su trayectoria rectilínea natural por medio de una fuerza dada.”*