Capítulo 2

Las magnitudes físicas y sus relaciones

Las Leyes de Newton. Las bases de la Mecánica

Introducción

No creo que exista nada más citado y usado, en los ambientes donde se estudian ciencias, que las Leyes de Newton.

Según la traducción de los Principia (Desiderio Papp, Historia de la Física, Espasa-Calpe, S.A., Madrid, 1961, pag. 335) las Leyes de Newton se enuncian como:

I. Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y en línea recta, salvo en cuanto mude su estado obligado por fuerzas exteriores.

Los proyectiles perseveran en su movimiento, salvo en cuanto son retardados por la resistencia del aire, o por la fuerza de la gravedad que los impele hacia abajo. El trompo cuyas partes coherentes son perpetuamente desviadas del movimiento rectilíneo no cesa de girar sino en cuanto es retardado por el aire. Sin embargo, los cuerpos mayores de los planetas y cometas conservan por más tiempo sus movimientos progresivos y circulares, que se efectúan en espacios menos resistentes.

II. El cambio del movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y se efectúa según la línea recta en dirección de la cual se comunica dicha fuerza.

Si alguna fuerza comunica un movimiento cualquiera, la fuerza doble, tri-

ple, etc., generará doble o triple movimiento, ya sea que esas fuerzas se apliquen simultáneamente o de modo graduado y sucesivo. Y este movimiento (en el mismo plano determinado con la fuerza generatriz), si el cuerpo se movía ya antes, se agrega a aquel movimiento, si él obra en el mismo sentido, o, al contrario, lo disminuye o lo desvía oblicuamente y se compone con él, según la acción de ambos.

III. A toda acción se opone siempre una reacción contraria e igual: es decir, que las acciones entre dos cuerpos son siempre iguales entre sí y dirigidas en sentido contrario.

Es muy frecuente encontrar libros en los cuales los axiomas o postulados que se utilizan como punto de partida para el análisis del movimiento de los cuerpos y sus causas, son precisamente las leyes enunciadas. Tal vez el hecho refleja un respeto profundo por la genialidad de Newton, pero también manifiesta una falta de criterio y rigor. A mi entender, respetar a Newton es reconocerlo como el primer físico teórico, es decir, como el primer físico que intentó dar una explicación de un gran conjunto de observaciones experimentales admitiendo como verdaderas un reducido conjunto de declaraciones inferidas de los experimentos. Sin desmerecer a Newton bajo ningún punto de vista y agradeciendo su legado, vamos a reinterpretar sus declaraciones, a fin de discutir los axiomas modernos que permiten establecer un marco de discusión para los procesos mecánicos.

Actualmente contamos con un poderosísimo lenguaje simbólico que han desarrollado los matemáticos (y muchos físicos, entre ellos Newton) con el cual podemos representar hechos de la realidad. El álgebra numérica, el álgebra vectorial (y de elementos más complicados como tensores), el análisis

funcional, el cálculo integral y diferencial, etc., son conocimientos indispensables para la simbolización de la realidad y en particular, el movimiento de los cuerpos. Si tales conocimientos se poseen, es posible formalizar, reproducir y predecir hechos relacionados con el movimiento. La manera de reproducir y predecir depende de la formalización y ésta última será adecuada si las predicciones realizadas se aproximan a los resultados experimentales. ¿Cómo podemos formalizar la descripción del movimiento? Trataremos de construir una secuencia de ideas basándonos en lo que sabemos sobre posición, velocidad, aceleración y fuerza. Lo último, la fuerza, es tal vez la idea menos elaborada: ¿Qué entendemos realmente por fuerzas? ¿Son realmente esas sensaciones que algunos libros describen como evidentes al tocar un objeto o son algo más simple o más complicado?

La palabra fuerza deriva de la palabra fuerte, con la cual está emparentada forte que es la voz de mando en faenas marineras. Es decir, la actitud, la coordinación y el comportamiento que se obtiene en una tripulación para que actúe según lo requieran las circunstancias provienen de un forte o son consecuencia de un forte. De esta manera, la palabra fuerza es usada, en un contexto moderno, como aquéllo que representa la influencia necesaria e indispensable para conseguir un resultado. En el área de la mecánica, la fuerza es lo que representa la influencia de un cuerpo sobre otro. La fuerza es la manera con que un cuerpo manifiesta su influjo en virtud de que forma parte del medio ambiente en el que otro cuerpo (el que estudiamos) se mueve. Ahora, esto de "cómo influye" parece ser importante en la comprensión del concepto. Los resultados de los experimentos nos muestran "cómo influye" un cuerpo sobre otro y los experimentos nos indican que la influencia que un objeto hace sobre otro, es decir, la fuerza que un objeto puede hacer so-

bre otro está caracterizada por tener intensidad, dirección y sentido. Se influye de arriba hacia abajo, de derecha a izquierda y otras tantas posibilidades. No ocurre así con otro tipo de magnitudes como por ejemplo la temperatura pues los experimentos nos indican que no se tiene frío hacia el sudeste. La fuerza, como símbolo que representa la influencia de un cuerpo sobre otro, se revela en los experimentos como una magnitud vectorial y, retomando la discusión, intentaremos establecer alguna relación entre las particularidades del movimiento de un cuerpo y las influencias del medio en el que se desarrolla dicho movimiento.

En primer lugar diremos que el movimiento de todo cuerpo es un concepto relativo. Es decir, sin interesarnos en qué cuerpo se está moviendo, diferentes observadores advertirán diferentes tipos de movimientos. Distintos observadores podrán declarar de un mismo cuerpo, que está en reposo o que describe una trayectoria recta o curva o que da vueltas o que va y viene o lo que sea. Todas las observaciones serán válidas en el sentido que las posiciones, velocidades, etc., son el resultado de medidas objetivas hechas con instrumentos y métodos adecuados. Nada ganamos peleándonos con alguien que afirme (del movimiento de un cuerpo) cosas diferentes de las que nosotros observamos. Ambos tendremos razón.

Si el lector se ha convencido de la relatividad del movimiento, podemos hacer una nueva pregunta: ¿las diferencias evidenciadas por distintos observadores, serán consecuencia de diferentes cosas que influyen sobre el cuerpo analizado? Evidentemente, cada observador podrá extraer diferentes conclusiones según lo que haya visto[1]. Con seguridad todos los observadores coin-

[1] "Visto" quiere decir lo que ha establecido experimentalmente en su carácter de observador.

cidirán en algo muy pero muy general: “el cuerpo que estoy estudiando no está solo en el universo sino más bien inmerso en él, así que lo que observo será una consecuencia de esta situación (la de estar inmerso en un universo)”. Así parece, entonces, que el comportamiento del movimiento de un cuerpo depende no sólo de quien lo observa sino de la manera en que el universo influye sobre él. Planteamos ahora una nueva pregunta: ¿será posible relacionar la manera con que el universo influye sobre un objeto con las características del movimiento que se le observa? De existir tal relación no se trataría de una sola cosa pues el mismo objeto analizado por diferentes observadores presenta características distintas de movimiento, lo que induce a pensar que para cada observador la influencia del universo se manifiesta de diferentes formas.

Como hemos propuesto más arriba, la fuerza es el concepto que sintetiza la idea de influencia entre cuerpos. Si admitimos ahora que el universo es único y fuera de él no existe ninguna otra cosa que influya sobre el cuerpo que estudiamos (esto está contenido en lo que entendemos por universo) deberíamos admitir que la influencia es también única y por lo tanto independiente del observador. Si esto es así, el problema de las variantes en el movimiento de un objeto determinadas por diferentes observadores y su relación con la influencia que ejerce el universo, es un problema del observador en particular. En otras palabras, el universo influye de manera única y distintos observadores advierten movimientos diferentes de un mismo cuerpo. Así que, de existir una relación entre influencias y movimiento, ésta no será necesariamente evidente o explícita para cualquier observador.

Nueva pregunta: ¿cuáles serán los observadores que puedan ponerse de acuerdo en algún tipo de relación entre fuerzas y comportamiento del movi-

miento? Aceptar que no cualquier observador posee la virtud de vincular fuerzas y tipo de movimiento (en acuerdo con otros) es la esencia del primer axioma de la mecánica y es el contenido de la Primera Ley del Movimiento enunciada por Newton (y que debe reformularse para que las palabras reflejen adecuadamente sus ideas).

La idea de que para algunos observadores habrá acuerdo al vincular fuerzas con tipos de movimiento impone la necesidad de distinguir para cuáles sí y para cuáles no se podrá entablar la vinculación. El camino adecuado para diferenciar entre observadores pasa por ponerse en alguna situación crítica que ponga en evidencia algo que nuestra razón acepte (es decir, algo que admitamos como una verdad). En pocas palabras, debemos encontrar un método razonable de "calibrar" un observador. En primer lugar nos limitaremos a describir cuerpos para los cuales la especificación de una velocidad sea suficiente para caracterizar completamente su movimiento, es decir cuerpos cuyo movimiento pueda homologarse al de un único punto del espacio. El modelo de representación del movimiento de un cuerpo mediante el movimiento de un punto del espacio se llama modelo de partícula y al cuerpo cuyo movimiento está bien descripto por el modelo de partícula se lo denomina también partícula o punto material (el concepto encerrado por la palabra partícula no contiene, en este contexto, la idea de elemento y tal vez debamos ampliarlos al estudiar conjuntos de partículas).

2.1 - Las bases de la Mecánica

Bien, para distinguir entre observadores que puedan llegar a un acuerdo al vincular fuerzas y tipo de movimiento y los que no lo puedan hacer, nos pre-

guntaremos por la siguiente situación: ¿qué características admitiremos como razonables al observar el movimiento de una partícula totalmente libre de fuerzas? Uno espera que el movimiento de una partícula libre de toda fuerza sea un movimiento que no presente rasgo particular alguno.

Siendo la velocidad la magnitud apropiada para hablar de movimiento, deberíamos admitir en consecuencia, que lo que se debe determinar en el movimiento de una partícula libre de fuerzas es una velocidad sin variaciones o cambios: una velocidad constante. No está de más enfatizar que constante significa siempre igual a medida que el tiempo transcurre.

Pongámonos ahora en la situación de que tal partícula libre de fuerzas exista y que diferentes observadores estudien su movimiento. Los resultados de las observaciones serán variados porque es natural que distintos observadores determinen diferentes peculiaridades del movimiento del mismo cuerpo. ¿Habrá algún observador para el cual la partícula libre se presenta con velocidad constante? De ser así, ese observador es especial pues observa lo que se admite como razonable de una partícula libre de fuerzas. Es más, tal observador no será el único en determinar que una partícula libre posee velocidad constante; también lo harán todos los observadores que se muevan respecto a él a velocidad constante. Concretemos: admitiremos como una verdad que **existe al menos un observador que determina que una partícula libre de fuerzas posee velocidad constante; tal observador se denomina observador inercial**.

Esta última declaración (de contenido tan parecido a la primera Ley de Newton) que establece un observador de privilegio entre los posibles observadores del movimiento de una partícula libre, constituye el primer postulado de la mecánica. Todo observador que se mueva a velocidad constante con res-

pecto al observador inercial, también será un observador inercial. Con toda seguridad Newton apuntó (en un lenguaje científico poco desarrollado para su época) a caracterizar un observador pero el hecho es que no lo mencionó y de ahí que hoy día debemos reinterpretar su declaración. La relatividad del movimiento impone no sólo prestar atención al cuerpo que se mueve sino a quien lo describe.

Una vez establecidas las propiedades que debe poseer un observador para poder relacionar fuerzas y comportamiento cinemático, es decir, una vez que admitimos que un observador (al menos) determina velocidad constante para una partícula libre de fuerzas, podemos afirmar lo siguiente (que es trivial): si para un observador inercial una partícula libre posee velocidad constante, para ese mismo observador una partícula no libre poseerá velocidad no constante (aceleración).

La relación entre las fuerzas y la aceleración habrá que proponerla de manera coherente con todo lo que hemos discutido hasta ahora. En particular, recordemos que hemos admitido que la partícula bajo estudio está sometida a la influencia del medio en el que desarrolla su movimiento y que nos pareció adecuado admitir que el medio influye de una sola manera sobre un cuerpo. Sosteniendo esto último diremos que: **la aceleración de una partícula no libre** (determinada por un observador inercial) **está directamente relacionada con el resultado de las fuerzas** (influencias) **que cada cuerpo del medio ejerce sobre la partícula estudiada**.

La relación entre la resultante de las fuerzas y la aceleración de la partícula es una característica exclusiva de la partícula durante su movimiento, denominada **masa inercial**. Con seguridad la palabra masa merece una discusión

mucho más amplia. Ya de entrada la hemos calificado de inercial sin ningún argumento evidente. Aún cuando en un sentido doméstico la palabra masa se usa para indicar cantidad de material, el concepto de masa inercial es algo más complicado que escapa del alcance de estos apuntes. Lo que podríamos indicar sin profundizar mucho en el tema es que una partícula debe poseer alguna característica propia no relativa al observador que le permita detectar la influencia de otras partículas. En el campo de la mecánica esa característica se llama masa inercial. Sin masa inercial, una partícula es insensible a la influencia mecánica de otro cuerpo así como la falta de carga hace insensible a un cuerpo de la influencia eléctrica de otros cuerpos cargados.

Si bien nos hemos escapado de los conceptos mecánicos para intentar esclarecer la idea de masa ya que mencionamos la carga eléctrica, un lector ajeno a la idea de carga eléctrica no debería estar leyendo estos apuntes. Y ya que estamos digamos algo más en relación al concepto de masa: si la masa inercial es la característica que debe poseer una partícula para detectar la influencia de otros cuerpos manifestándola con su manera de moverse (visto por un observador inercial y de ahí su nombre), la masa gravitatoria es la característica que debe poseer una partícula para ser susceptible de participar de la atracción gravitatoria con otra partícula. No hay todavía un experimento que muestre que la masa inercial y la masa gravitatoria sean cosas diferentes así que admitiremos que son la misma característica y que la palabra masa sin calificativo ninguno basta para indicarla (Principio de equivalencia).

Bien, retomando y resumiendo: la manera de representar la relación entre fuerzas y aceleración es la bien conocida expresión:

$$\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{F}_i = m\,\boldsymbol{a}$$

siendo $\boldsymbol{F}_i$ la fuerza ejercida por el cuerpo i del medio sobre la partícula que estamos estudiando, m la masa de la misma y $\boldsymbol{a}$ su aceleración (determinada en un sistema inercial). Si denominamos cantidad de movimiento $\boldsymbol{p}$ de una partícula al producto de su masa por su velocidad, el término $m\boldsymbol{a}$ se puede escribir como $d\boldsymbol{p}/dt$ y la relación entre fuerzas y características de movimiento se puede enunciar como:

La resultante de las fuerzas actuantes sobre una partícula coincide con el cambio en el tiempo de su cantidad de movimiento:

$$\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{F}_i = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt}$$

Entablar esta igualdad para un observador inercial, constituye el segundo postulado de la mecánica.

Del segundo postulado de la mecánica se deduce que las unidades en las cuales hay que expresar las fuerzas son equivalentes a $kg\ m/s^2$ (ya que éstas son las que resultan de $d\boldsymbol{p}/dt$. Tales unidades se denominan Newtons.

Hasta ahora hemos caracterizado a un observador especial y a la relación que éste puede establecer entre las características del movimiento y el resultado de las fuerzas que actúan sobre una partícula cualquiera, elegida arbitrariamente del universo de partículas que podemos estudiar. Esta última libertad de elección tal vez nos lleve a hacer una nueva propuesta.

Si un observador inercial elige una partícula cualquiera y a través del estudio de su movimiento determina cómo esa partícula experimenta la influencia de las otras, ¿las características de la influencia se revelarán diferentes

según la elección? Se complica un poco imaginar una respuesta ya que lo que el observador inercial determina son las características de la influencia conjunta de todas las partículas del universo y elegir otra partícula es cambiar las influencias, así que bien podría (bah, con seguridad) determinarse un resultado diferente. Tratemos entonces de imaginar un experimento donde sólo intervengan dos partículas de manera que estudiar el movimiento de una de ellas revele alguna característica de la influencia a la que la "somete" la otra. Tal experimento es ideal pero sabemos que la imaginación es grandiosa y acompañada de la lógica, más todavía. A su vez adoptemos definitivamente a la fuerza como símbolo de la influencia.

El mecanismo con que se ejerce la fuerza de una sobre otra no puede depender de cuál elijo para estudiar. La fuerza que surja en una de ellas debida a la existencia de la otra deberá tener la dirección de la recta que une las partículas ya que tal recta marca la dirección del espacio de donde proviene la influencia. Así, admitida una dirección para la fuerza, ésta puede tener dos posibles sentidos. Si por estudiar una de las partículas se concluye que la fuerza es atractiva (o repulsiva), al estudiar la otra (bajo la influencia de la anterior) se debe obtener la misma conclusión (admitiendo, claro, que este universo de dos partículas es único). Estudiar una u otra debe llevarme a las mismas conclusiones sobre este universo único. ¿Por qué? Bueno, porque si estudiando una partícula la fuerza resulta atractiva y estudiando la otra, resulta repulsiva, ambas fuerzas apuntan en el mismo sentido y tal cosa sugiere que ese universo de dos partículas tiene predilección por una orientación en particular y tratándose del universo eso no debería ocurrir.

Concretando: si una partícula influye sobre otra, ésta última se comportará de la misma manera influyendo sobre la primera de manera equivalente. Ad-

mitiremos sin demostración que **si una partícula ejerce una fuerza sobre otra partícula, ésta última ejercerá sobre la primera una fuerza igual y de sentido contrario; ambas fuerzas tendrán la dirección de la recta que une las partículas**.

Admitir como verdadera esta última declaración constituye el tercer axioma de la mecánica. El tercer postulado establece la equivalencia entre partículas en tanto niega la posibilidad de que una partícula, por motivo alguno, pueda ejercer sobre otra una fuerza de diferente naturaleza de la que esta última pueda ejercer sobre ella. Es más, define lo que entendemos por interacción: la acción mutua.

Debe notarse que no se ha puesto en juego ninguna relación causal: una fuerza no es consecuencia de la otra sino más bien existen de manera simultánea aunque al enunciar el postulado no quede más remedio que describir una secuencia como si una fuerza fuera consecuencia de la otra. Tal vez una mejor manera de establecer la afirmación sea:

Dos partículas se ejercen entre sí fuerzas iguales y opuestas en la dirección de la recta que une las partículas.

El hecho de que las fuerzas surjan de a pares nos permite asegurar que para cada fuerza $\boldsymbol{F}_i$ (del segundo postulado) existe, sin excepción, una fuerza $-\boldsymbol{F}_i$ influyendo sobre la partícula que aplicó $\boldsymbol{F}_i$ en la que se estudia.

Si queremos extender la discusión a casos de tres o más partículas creeremos verdadero que lo que se discutió para dos partículas es verdad aún en presencia de otra u otras partículas (Principio de superposición).

Síntesis: admitiremos por verdaderas las siguientes declaraciones e intentaremos explicar el movimiento de partículas y conjunto de partículas sin en-

trar en contradicción con ellas. A su vez, si el resultado de alguna observación o experimento no puede ser predicho a partir de estas declaraciones, las mismas serán modificadas para evitar la contradicción con la observación.

Primer postulado de la Mecánica:

> **Existe al menos un observador que determina que una partícula libre de fuerzas posee velocidad constante; tal observador se denomina observador inercial**.

Segundo postulado de la Mecánica:

> **La resultante de las fuerzas actuantes sobre una partícula coincide con el cambio en el tiempo de su cantidad de movimiento**.

$$\sum_i \boldsymbol{F}_i = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt}$$

Tercer postulado de la Mecánica:

> **Dos partículas se ejercen entre sí fuerzas iguales y opuestas en la dirección de la recta que une las partículas**.

El primer postulado se enuncia con relación al observador. El segundo se refiere a lo observado y su relación con el medio en el cual se encuentra y el tercero caracteriza la interacción.

Los postulados seguirán siendo llamados Leyes o Principios de Newton como homenaje a quien los concibió.

Naturalmente que se puede discutir la veracidad de los postulados de la Mecánica. ¿Qué respondería el lector a las siguientes preguntas?:

- ¿Existe una partícula libre que pueda ser observada?
- ¿Exite un observador inercial?
- ¿No es el observador en sí una influencia sobre lo observado?
- ¿Será cierto que la influencia del universo se puede pensar como la suma de las influencias individuales de cada partícula que lo componen?
- El tercer postulado se refiere estrictamente a la fuerza entre dos partículas que constituyen en sí un todo y como tal sin orientaciones privilegiadas. La existencia de alguna otra característica de una partícula que no sea la masa, como por ejemplo la carga ¿cambiará el rumbo de la discusión?
- Si los experimentos los hemos hecho en nuestro planeta y algunos pocos fueron hechos fuera de nuestro planeta (en la Luna, por ejemplo) ¿Qué indicios tenemos para creer que lo que descubrimos es verdad en cualquier otro lugar del universo?

En tanto lo que se deduzca de los postulados sea una buena descripción de los resultados de la observaciones, admitiremos que los postulados son buenos, es decir, son verdaderos. El acierto en la predicción será alentador y el desacierto fatal. La existencia de un único contraejemplo bastará para ponerlos en duda. Mientras tanto...