

Capítulo 5

Las diferentes ‘opiniones’ sobre lo mismo

Introducción

La importancia del Primer Principio de Newton como declaración que afirma la existencia de observadores de privilegio para los procesos mecánicos, no sólo reside en la especificación de tales observadores sino también en lo que descarta. El Primer Principio es una necesidad que surge por el carácter de relatividad que el concepto de movimiento posee en esencia y la pretensión de describir las propiedades del medio en el que se desarrolla un movimiento a través del estudio de este último. Es por eso que se efectúa una selección previa de observadores: los que podrán satisfacer las pretensiones y los que no. Indicar que ciertos observadores no podrán conseguir caracterizar el medio a través de determinaciones mecánicas no es, de manera alguna, declarar que sus resultados no son válidos, sino decir que no serán útiles a tales fines. Si el lector lo recuerda bien, el Primer Principio se apoya en la existencia de una partícula libre de influencias (o fuerzas) que se usa como experimento de calibración para los diferentes observadores. Si bien no es posible asegurar que exista tal partícula, el estudio experimental de la manera con que los objetos de la realidad se aplican fuerzas entre sí, nos lleva a proponer situaciones donde, sobre un objeto, las fuerzas aplicadas por otros están muy bien compensadas y así, el objeto se comporta como casi, casi, casi libre. Se trata de apuntar, por ejemplo, al tan declamado experimento con una esfera (pretendidamente perfecta) rodando sin deslizar, sobre una mesa (pretendidamente plana) lo más horizontal posible e imaginar que las

condiciones experimentales son llevadas al extremo de perfección. Un observador (que no muera al hacer vacío para eliminar la influencia del aire) declararía que si se pone a rodar la esfera, nunca se detendría sino más bien se movería en línea recta a velocidad constante. ¿Qué declararía del mismo experimento un observador que por ejemplo esté en órbita (no geoestacionaria) alrededor del planeta? Y, diría que eso de horizontal no está claro, y que si la esfera continúa en movimiento lo haría en una trayectoria circular, así que lo de velocidad constante no le constará.

De todas maneras, creyendo que se puede obtener una partícula libre con buena aproximación, se da pie a que exista un observador que determina para esa partícula una cantidad de movimiento constante (tal el contenido del Primer Principio).

Hasta qué punto nos apartamos de lo predecible en un sistema inercial de referencia, es el motivo de la siguiente discusión.

5.1 - La comparación entre diferentes observaciones

Veamos cómo es posible relacionar observaciones realizadas en distintos sistemas de referencia. Supongamos que a través de un sistema de coordenadas S representamos a un cierto observador O y con otro sistema de coordenadas S' a otro observador O' que se mueve, relativo a O , de cualquier manera. Es decir, el origen del sistema S' se desplaza en relación al origen de S y la orientación de los ejes x' , y' y z' cambia a medida que el tiempo transcurre. Supongamos además que ambos observadores describen el movimiento de la misma partícula. El observador O marcará, en el instante considerado t , la

posición de la partícula con un vector posición $\mathbf{r}$ construido en su sistema S como:

$$\mathbf{r} = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}$$

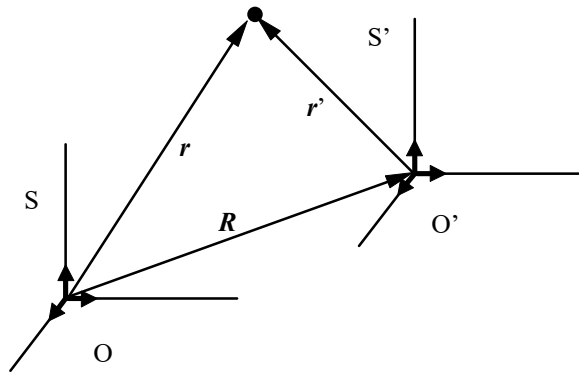
La figura esquematiza la situación en un cierto instante. A su vez, el observador O' hará lo propio en su sistema de referencia S', expresando la posición de la partícula (en el mismo instante) como:

$$\mathbf{r}' = x'(t)\mathbf{i}' + y'(t)\mathbf{j}' + z'(t)\mathbf{k}'$$

Si con el vector $\mathbf{R}$ el observador O indica la posición del origen de S' respecto a S como

$$\mathbf{R} = X(t)\mathbf{i} + Y(t)\mathbf{j} + Z(t)\mathbf{k}$$

la relación entre las posiciones determinadas por los observadores O y O' es, evidentemente,



$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{r}'$$

en todo instante.

Debe enfatizarse que, en virtud de lo genérico del movimiento del sistema de coordenadas S', el observador O advierte que los versores del sistema S'

son diferentes instante a instante (los versores $\widetilde{\mathbf{i}}'$, $\widetilde{\mathbf{j}}'$ y $\widetilde{\mathbf{k}}'$ que mantienen el módulo cambiando la orientación relativa al sistema S son funciones del tiempo). Si los cambios de orientación de los versores $\widetilde{\mathbf{i}}'$, $\widetilde{\mathbf{j}}'$ y $\widetilde{\mathbf{k}}'$ están determinados por una manera de rotar descrita en S mediante una velocidad angular $\boldsymbol{\omega}$, las derivadas respecto al tiempo de los versores serán:

$$\frac{d\widetilde{\mathbf{u}}'}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \widetilde{\mathbf{u}}'$$

donde $\widetilde{\mathbf{u}}'$ representa a cualquiera de los versores $\widetilde{\mathbf{i}}'$, $\widetilde{\mathbf{j}}'$ y $\widetilde{\mathbf{k}}'$.

Siendo así, estamos en condiciones de evaluar la relación entre las velocidades determinadas por ambos observadores. De la relación entre posiciones se obtiene (derivando ambos miembros respecto al tiempo):

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{R}}{dt} + \frac{d\mathbf{r}'}{dt}$$

Llamemos $\mathbf{V}$ al primer término de la derivación. El nombre común de este vector es el de velocidad relativa de S' respecto a S ($-\mathbf{V}$ es la velocidad relativa de S respecto a S'). Entonces

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \frac{d}{dt} [x'(t) \widetilde{\mathbf{i}}'(t) + y'(t) \widetilde{\mathbf{j}}'(t) + z'(t) \widetilde{\mathbf{k}}'(t)]$$

y recordando la derivación de un producto de funciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = \mathbf{V} + & \frac{dx'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{i}}'(t) + \frac{dy'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{j}}'(t) + \frac{dz'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{k}}'(t) + \\ & + x'(t) \frac{d\widetilde{\mathbf{i}}'(t)}{dt} + y'(t) \frac{d\widetilde{\mathbf{j}}'(t)}{dt} + z'(t) \frac{d\widetilde{\mathbf{k}}'(t)}{dt} \end{aligned}$$

Usando la expresión para la derivada de los versores indicada más arriba

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \frac{dx'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{i}}'(t) + \frac{dy'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{j}}'(t) + \frac{dz'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{k}}'(t) + \\ + x'(t)[\boldsymbol{\omega} \times \widetilde{\mathbf{i}}'(t)] + y'(t)[\boldsymbol{\omega} \times \widetilde{\mathbf{j}}'(t)] + z'(t)[\boldsymbol{\omega} \times \widetilde{\mathbf{k}}'(t)]$$

y agrupando las coordenadas primadas con los versores primados para reconstruir el vector posición $\mathbf{r}'$

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \frac{dx'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{i}}'(t) + \frac{dy'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{j}}'(t) + \frac{dz'(t)}{dt} \widetilde{\mathbf{k}}'(t) + \\ + [\boldsymbol{\omega} \times x'(t) \widetilde{\mathbf{i}}'(t)] + [\boldsymbol{\omega} \times y'(t) \widetilde{\mathbf{j}}'(t)] + [\boldsymbol{\omega} \times z'(t) \widetilde{\mathbf{k}}'(t)]$$

se tiene:

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'$$

donde todos los vectores son nuevamente funciones del tiempo.

La comparación entre aceleraciones determinadas por los observadores O y O' será (apelando a las mismas consideraciones anteriores respecto cómo hacer la derivación):

$$\mathbf{a} = \mathbf{A} + \mathbf{a}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}' + \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r}' + \boldsymbol{\omega} \times [\mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}']$$

y reagrupando:

$$\mathbf{a} = \mathbf{A} + \mathbf{a}' + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}') + \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{r}'$$

Evidentemente, las relaciones entre velocidades y aceleraciones de una misma partícula, determinadas por dos observadores cualesquiera O y O' son algo complicadas y es evidente también, que la complicación surge del hecho que un observador rota respecto al otro.

En la última relación, el término que depende de la velocidad de la partícula $2 \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}'$ se denomina aceleración de Coriolis y el término $\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}')$ es

conocido como aceleración centrífuga. El último término no tiene un nombre particular.

5.2 – Observadores inerciales y no inerciales

Diferentes variedades de discusiones se pueden plantear en base los resultados obtenidos. Por ejemplo:

- Si el observador O es inercial, ¿es inercial O'? En otras palabras, si O observa una partícula libre, determinará que su velocidad es constante. ¿Qué observará O' de la misma partícula?
- Si para un observador la partícula estudiada está en reposo, ¿qué determina el otro?
- Si para un observador la partícula estudiada se mueve a velocidad constante, ¿qué determina el otro?
- Si un observador no se desplaza relativo al otro pero rota, ¿qué diferencias aparecen en la descripción del movimiento de la partícula estudiada?

La respuesta a estos interrogantes pasa por evaluar hasta qué punto el término que contiene a la aceleración relativa entre los sistemas y los que contienen a la velocidad angular de rotación y su derivada (la aceleración angular) hacen muy diferentes las respectivas aceleraciones obtenidas para la partícula que se estudió. Si por ejemplo el observador O es inercial y el O' está fijo a la superficie de nuestro planeta, el lector debería determinar el cambio de velocidad de traslación de nuestro planeta y la velocidad angular de rotación de la tierra y sus eventuales modificaciones (todo durante el tiempo que dure la observación de la partícula bajo estudio).

La simplificación que se obtiene al considerar observadores que no rotan uno respecto del otro es considerable. En efecto, si la velocidad angular ω es nula en todo momento, también lo será la aceleración angular α y entonces, las relaciones entre velocidades y aceleraciones se reducen a:

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$$

y

$$\mathbf{a} = \mathbf{A} + \mathbf{a}'$$

de notable sencillez.

Y si además, el movimiento de un observador respecto al otro es a velocidad constante, la simplicidad es extraordinaria:

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}'$$

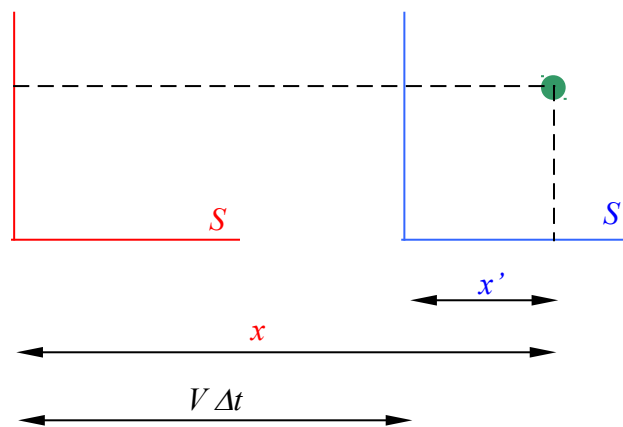
Discutamos sobre esto último.

5.3 - Transformaciones de coordenadas

No perdamos de vista que la discusión es sobre dos diferentes observaciones de una misma partícula. Si uno de los observadores determina que la partícula se comporta como libre (o está sometida a un cierto conjunto de influencias), es decir mantiene su velocidad constante (o presenta una cierta aceleración), el otro coincidirá plenamente ya que $\mathbf{V}$ ha sido supuesta constante. Así, resulta simple admitir que si el Primer Principio propone como verdadero la existencia de al menos un observador inercial, entonces hay muchos mas: todos los que se muevan a velocidad constante (sin rotar) respecto al que se admitió existir. Dado que la orientación de los ejes del sistema de coordenadas no influye en el establecimiento de las igualdades que

estamos analizando, elijamos una orientación adecuada que nos permita establecer qué particularidades tiene la relación entre las coordenadas determinadas en los dos sistemas de referencia para que las conclusiones que obtiene uno de ellos sean las mismas que las obtenidas por el otro. Tomemos los respectivos ejes x y x' en la misma dirección y también por simplicidad propongamos que cuando el origen de S' pasa por el origen de S , los observadores disparan sus respectivos relojes.

Al cabo de un intervalo Δt marcado por los relojes en S , admitimos (convencidos por muchos experimentos) que los relojes en S' marcarán un intervalo $\Delta t' = \Delta t$. Si los relojes fueron disparados en $t_o = t_o' = 0$ de manera que los respectivos intervalos estén representados por los instantes t y t' , las coordenadas en ambos sistemas se relacionarán de la siguiente manera (ver y pensar



sobre el esquema):

$$\begin{aligned}x' &= x - V t \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

Estas relaciones se conocen con el nombre de transformaciones de Galileo y expresan una relación simple y obligatoria entre diferentes observaciones para que dichas observaciones conduzcan a las mismas conclusiones.

Aclaremos qué significa eso de “las mismas conclusiones”. Tratándose de dos sistemas inerciales, para ambos vale la Segunda Ley de Newton y lo que de ella se deduce: en ambos el impulso es el modificador de la cantidad de movimiento, el trabajo de la resultante es la variación de la energía cinética, el trabajo de las fuerzas no conservativas da la variación de la energía mecánica, el impulso angular produce el cambio del momento angular, etc. Pero -siempre los hay- no necesariamente coincidirán en los valores determinados para las magnitudes ni en los valores de los cambios de las magnitudes.

Veamos algunos ejemplos:

Si el impulso de la resultante de las fuerzas ha producido en S un cambio en la cantidad de movimiento, tal cambio es el mismo que el observado en S'. Efectivamente

$$\Delta \mathbf{p} = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 = m(\mathbf{V} + \mathbf{v}'_2 - \mathbf{V} - \mathbf{v}'_1) = m\mathbf{v}'_2 - m\mathbf{v}'_1 = \Delta \mathbf{p}'$$

Por otra parte, supongamos que la partícula observada se encuentra en un medio que la influye, siendo $\mathbf{F}_R$ la resultante de las fuerzas. Enfatizando que las influencias del medio sobre la partícula y la masa de la partícula son independientes del observador, el observador O encontrará, en virtud del trabajo realizado por la resultante, que la energía cinética de la partícula cambió en ΔE_c . Para O' la energía cinética deberá haber cambiado en:

$$\Delta E'_c = \frac{1}{2} m\mathbf{v}'_2{}^2 - \frac{1}{2} m\mathbf{v}'_1{}^2 = \frac{1}{2} m(\mathbf{v}_2 - \mathbf{V})^2 - \frac{1}{2} m(\mathbf{v}_1 - \mathbf{V})^2 = \Delta E_c - m\mathbf{V}\Delta \mathbf{v}$$

Evidentemente no determinan las mismas variaciones de energía cinética.

El lector, haciendo uso de las relaciones $\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{r}'$, $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$ y $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ (o las transformaciones de Galileo) entre sistemas inerciales podrá encontrar lo común y no común en las determinaciones de los respectivos observadores. Es recomendable analizar situaciones que involucren partículas más que sistemas de partículas pues en estos últimos las comparaciones son algo más complicadas.

5.4 - Limitaciones en el uso de las Leyes de Newton

Los objetivos de estos apuntes no son que el lector comprenda cabalmente lo que se va a discutir a continuación sino más bien que posea alguna información al respecto.

La discusión relativa a la validez de lo que la Leyes de Newton pueden predecir se basa en resultados experimentales en el campo de la óptica. Michelson y Morley, a fines del siglo pasado, hicieron un experimento para el cual la dirección y sentido de propagación de la luz respecto a un sistema inercial era de suma importancia. El experimento consistió en dividir un rayo de luz en dos rayos que se propaguen en direcciones perpendiculares y al cabo de hacerlos recorrer un camino muy bien determinado (de la misma longitud para ambos), juntaban los rayos nuevamente en un punto para estudiar las características de la imagen resultante. La idea era forzar a que uno de los rayos acompañe (a favor o en contra) el movimiento del laboratorio debido a la rotación de la Tierra y el otro (viajando en dirección perpendicular) no. La rapidez del rayo que viajara en la misma dirección que la de la velocidad del laboratorio (hacia el Este), evaluada con la relación $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$, debía resultar diferente que la del rayo viajante en la dirección perpendicular y la

imagen obtenida al juntar dos rayos que habían recorrido el mismo camino con diferente velocidad sería diferente según cuán diferentes fueran las velocidades. Pues el resultado del experimento no mostró diferencia alguna entre las imágenes de manera tal que la velocidad de la luz o no satisface la relación de suma de velocidades o se propaga a la misma velocidad en todas direcciones y respecto a cualquier sistema de referencia o vaya a uno saber qué, pues no hubo manera de entender qué estaba pasando.

El experimento llevó a los físicos a una encrucijada: o los fenómenos ópticos no se pueden combinar con los mecánicos (note el lector que en la relación $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$, $\mathbf{V}$ es la velocidad del laboratorio —que es un conjunto de objetos con masa que rota junto con la Tierra— $\mathbf{v}'$ es la velocidad de un rayo de luz relativa a ese laboratorio y $\mathbf{v}$ la velocidad resultante del rayo de luz respecto a un sistema inercial) o la relación $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$, que tan bien funcionara para tantos experimentos, no es más válida y hay que encontrar otra que permita describir por igual fenómenos mecánicos y ópticos. El experimento fue tan contundente que se terminó aceptando que la regla de composición de velocidades no era adecuada.

Se demoró bastante en hacer una propuesta adecuada pero cuando se la hizo, las consecuencias fueron tan novedosas que se dio lugar a lo que hoy se denomina Física Moderna.

En relación al concepto de velocidad o manera de propagarse en el espacio, hoy se admite (siempre en base a resultados experimentales) que, independientemente del proceso estudiado, los cambios ocurridos en una cierta porción del universo no influyen instantáneamente sobre otras regiones del universo. Podemos decir entonces que si no hay ningún hecho cuyas conse-

cuencias se propaguen a velocidad infinita, entonces existe al menos un hecho cuyas consecuencias se propagan a la mayor de todas las velocidades posibles. En pocas palabras, se está admitiendo que existe una velocidad máxima de propagación de un fenómeno. Admitir tal cosa tiene consecuencias obvias y extrañas a la vez, porque si el fenómeno se propaga a la máxima velocidad respecto a algún observador, no podrá hacerlo a mayor velocidad respecto a otro observador, a lo sumo a la misma. De alguna manera estamos justificando el resultado del experimento de Michelson y Morley.

A. Einstein en 1905 (a la edad de 26 años) propone admitir que:

La velocidad de propagación de la luz en el vacío tiene el mismo valor para todos los observadores inerciales.

Las Leyes de la Física resultan ser las mismas en todos los sistemas inerciales de observación.

Estas declaraciones se conocen como los Postulados de la Teoría Especial de la Relatividad o Teoría de la Relatividad Restringida.

Convengamos de ahora en adelante que sólo nos referiremos a observadores inerciales ya que los postulados están exclusivamente enfocados sobre ellos y que cuando mencionamos la velocidad de propagación de la luz nos referimos a la propagación en el vacío.

Los postulados de la Relatividad Restringida indican que si un observador determina que un rayo de luz se propaga a la velocidad c y ese observador se mueve a velocidad V en la misma dirección y sentido respecto a otro observador, el último determinará para la velocidad del rayo de luz el valor c . Ésto, que parece extraño, muestra que no podemos combinar las velocidades como $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$ tal como se deduce de las transformaciones de Galileo en-

tre coordenadas de distintos sistemas inerciales. No son válidas entonces las relaciones:

$$\begin{aligned}x' &= x - V t \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

sino que valen otras denominadas Transformaciones de Lorentz.

Las Transformaciones de Lorentz son relaciones entre determinaciones en dos sistemas de coordenadas que se mueven a velocidad relativa V e involucran tanto las determinaciones de coordenadas como de intervalos de tiempo. Lo último es una consecuencia directa de admitir que existe una velocidad máxima y constante para todos los observadores. Veamos...

El concepto de velocidad es aquel que se introduce para vincular desplazamiento con el transcurrir del tiempo. En su manera más expresiva, la idea de velocidad debe ser presentada (para mi gusto) como $d\mathbf{r} = \mathbf{v} dt$, es decir, asegurar que si algo posee $\mathbf{v}$ (no nula) se puede afirmar que al transcurrir el tiempo (dt) habrá desplazamientos ($d\mathbf{r}$). En ese sentido y retomando la discusión sobre la constancia e igualdad de la velocidad de propagación de la luz en el vacío para todos los observadores, si $\mathbf{v}$ es la velocidad de la luz, los diferentes observadores, que determinan diferentes desplazamientos, deberán determinar diferentes intervalos de tiempo.

Las Transformaciones de Lorentz que establecen cómo se relacionan las determinaciones en un dado sistema de referencia S con las de otro sistema S' son:

$$x' = \frac{x - V t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{V}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

y viceversa las de S' con las de S:

$$x = \frac{x' + V t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad y = y' \quad z = z' \quad t = \frac{t' + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Las Transformaciones de Lorentz contienen como límite (si se hace tender c a infinito) a las Transformaciones de Galileo.

Usando las Transformaciones de Lorentz veamos cómo resulta la composición de velocidades. Ajustemos (por simplicidad) los ejes x en la dirección del desplazamiento de una partícula.

Tomemos modificaciones diferenciales en las coordenadas y tiempo del sistema S' que admitimos moverse con velocidad V respecto a S:

$$\begin{aligned} dx &= \frac{dx' + V dt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \\ dy &= dy' \\ dz &= dz' \\ dt &= \frac{dt' + \frac{V}{c^2} dx'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \end{aligned}$$

Así la velocidad determinada en S será

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + Vdt'}{dt' + \frac{V}{c^2} dx'} = \frac{v' + V}{1 + \frac{V}{c^2} v'}$$

Esta relación de velocidades nuevamente admite (si $c \rightarrow \infty$) la relación de velocidades que fuera descartada por el experimento de Michelson y Morley.

Discutir otras consecuencias de la adopción de las Transformaciones de Lorentz como enlace obligatorio entre sistemas inerciales de referencia, para que las leyes determinadas en uno sean las mismas relaciones en todos los otros, es algo atrevido pues no se ha hecho acá otra cosa más que una presentación informativa. Discusiones más aventuradas sobre la denominada contracción de longitudes y/o dilatación temporal requieren para su comprensión de una introducción a lo que se entiende por simultaneidad, medida o medición de una magnitud y naturalmente de un análisis más detallado de las transformaciones de Lorentz.

Espero haber generado en el lector la curiosidad y el interés indispensable para que haga alguna investigación bibliográfica al respecto y/o consulte a especialistas haciendo buenas preguntas.

Síntesis conceptual

Las relaciones de causa-efecto que dan cuenta de los fenómenos de la realidad y conducen a las Leyes de la Física no pueden ser el resultado de los experimentos de un observador particular sino que deben ser constatadas por todos los observadores en condiciones de realizar los experimentos pertinentes. La creencia más profunda que sustenta a las denominadas Ciencias es la de la existencia de las Leyes. Se parte de que las Leyes existen y la tarea

consiste en descubrirlas o encontrarlas. Como el método de búsqueda de las Leyes de la Física es el experimento y su representación en términos relativos a un dado observador, y por su parte una Ley debe manifestarse para todo observador (si no, no sería una Ley), debe existir alguna relación entre los observadores que constatan experimentalmente una Ley. Lo determinado por un observador no puede estar completamente divorciado de lo que otro concluya en relación a lo mismo, si lo mismo significa una Ley. La representación simbólica de la existencia de Leyes únicas para todo observador es lo que se conoce como transformaciones de coordenadas. Las transformaciones de coordenadas establecen relaciones que permiten darle al método científico un carácter universal.

En este capítulo se mostraron las relaciones que deben establecerse entre observadores inerciales para que las Leyes de la Mecánica establecidas por Newton puedan ser confirmadas por experimentos.