

LA REFERENCIA DEL TÉRMINO DE MAGNITUD FÍSICA “MASA”

Ana Fleisner
Universidad Complutense de Madrid
Universidad de Buenos Aires

Resumen:

Muchos de los términos con los que se habla de las magnitudes definidas en el marco de la física clásica han sido heredados por la física moderna, pero las significativas diferencias entre estos marcos hacen necesaria una revisión de estos términos y de su uso.

Los diversos usos que pueden encontrarse del término de magnitud “masa” en las distintas teorías físicas exigen la pregunta acerca de si es lícito referirse a dicha magnitud utilizando el mismo término en ambos contextos.

El presente trabajo analiza, desde la perspectiva del debate entre distintas teorías de la referencia, el comportamiento de la referencia del término de magnitud “masa” en un contexto de cambio teórico.

Palabras clave: Teorías de la referencia. Magnitudes físicas. Teorías físicas.

Abstract:

Many physical magnitude terms defined in the classical physics framework have been inherited by modern physics, but the significant differences between these frameworks make necessary a revision of these terms and their use. The diverse uses that can be found for the magnitude term “mass” in the different physical theories raises the question about if it is allowed to talk about this magnitude by using the same term in both contexts. The present work analyzes, from the point of view of the debate between different reference theories, the reference behavior of the magnitude term “mass” in a context of theoretical change.

Key Words: Reference theories. Physical magnitudes. Physical theories.

Introducción

El objeto de este artículo es revisar la referencia de un término de magnitud física y el comportamiento de la misma en un contexto de cambio teórico, a la luz de dos teorías de la referencia. El término es ‘masa’, los contextos son el de la mecánica clásica y la relatividad restringida y las teorías de la referencia son la teoría descriptiva y la

teoría histórico-causal o de la referencia directa¹. De esta manera, para desarrollar la mencionada revisión, es necesario aclarar brevemente cuáles son las características principales de las teorías de la referencia que serán utilizadas como herramientas de análisis.

La tesis central de las teorías descriptivas de la referencia puede resumirse diciendo que la referencia de un término viene determinada por una descripción o por una serie de descripciones que los hablantes asocian con el término. En lo que, de alguna manera parece una aplicación de este tipo de teorías al caso de los términos de género natural y en concreto a los de magnitudes físicas, Kuhn en [1990] sostiene que la referencia de los términos de una teoría viene determinada por los enunciados fundamentales de la teoría en los que aparecen los términos en cuestión o, más específicamente, por las descripciones correspondientes a dichos enunciados. Kuhn en su artículo de [1993] introduce el siguiente matiz: aunque no suceda con todos y cada uno de los términos de los lenguajes de uno y otro paradigma, algunos de los términos de género pertenecientes a dichos lenguajes son intraducibles mutuamente. Se sigue entonces que dado que un cambio de teoría traerá consigo cambios en los enunciados fundamentales de la misma, dicho cambio conllevará cambios en la manera cómo se determina la referencia de los términos de género de la teoría y, por tanto, por regla general, un cambio en la referencia de los términos de magnitudes.

Algunos autores, entre ellos Falkenburg [1997] y [2002], están de acuerdo con Kuhn por lo que respecta a la tesis de inconmensurabilidad respecto de las teorías pero le objeta una subestimación respecto del poder unificador y del valor referencial del lenguaje teórico en el que están expresados los resultados de las mediciones. La inconmensurabilidad entre los conceptos teóricos fundamentales queda salvada, en la propuesta de Falkenburg [2002], por la existencia de ciertos “principios puente” entre los términos cruciales de dos teorías de las que sí puede decirse que son inconmensurables. Fine en [1975], quien entiende que existen términos co-referenciales entre dos teorías rivales, sostiene que es posible comparar dichas teorías gracias justamente a la correlación que puede establecerse entre términos co-referenciales de ambas. Pero la tesis de inconmensurabilidad tal como es concebida por

¹ Los términos de magnitudes físicas suelen ser incluidos, en la bibliografía al respecto, entre los términos de género natural. Detalles sobre la semántica de este tipo de términos pueden verse en Carlson, G. [1991] y en el capítulo 5 de Devitt, M. y Sterelny, K. [1987].

Kuhn en *La estructura de las revoluciones científicas* y en escritos posteriores exige la relatividad de la referencia de los términos².

Por el contrario, la versión bautismal³ de la teoría histórico-causal según la cual la referencia de un término perteneciente a una teoría no viene determinada por los enunciados de la teoría en cuestión, sino, fundamentalmente por el acto inicial de introducción del término, implica que la referencia de este término se ha mantenido por regla general constante en su transmisión a través de cadenas causales de comunicación. Pero, como defiende Fernández Moreno en [2000] y [2001], no todas las versiones de las teorías causales se ven obligadas a defender esta inmutabilidad de la referencia de los términos de género natural. La versión no-bautismal⁴ de la teoría histórico-causal, según la cual la referencia de un término de género natural no queda fijada por el evento introductorio antes mencionado sino por los posteriores usos que los hablantes expertos de una comunidad lingüística hacen de este tipo de términos, no excluye que estos términos puedan estar sujetos a cambios de referencia, aunque sí excluye la posibilidad de que un cambio de teoría traiga necesariamente consigo cambios de referencia.

La magnitud masa en la mecánica clásica

En general suele considerarse a la masa de un cuerpo como una magnitud de base o fundamental, es decir una de las magnitudes a partir de la cuales pueden definirse las restantes magnitudes. Ya en el marco de la mecánica clásica es posible encontrar concepciones diversas del término “masa”, lo que no implicaría necesariamente que el término se refiriese a conceptos diversos. Bien podría cada una de estas concepciones poner especial énfasis en características distintas – no necesariamente opuestas sino probablemente complementarias – de la propiedad. Tal como sostienen autores como Carnap [1969] que es preferible, se pensará a la masa de un cuerpo, al menos en el contexto de la física clásica, como un

² Fernández Moreno en [1998a] sostiene que si bien la tesis de inconmensurabilidad kuhniana posterior a la de *La estructura de las revoluciones científicas* es sólo una tesis semántica, la explicación de ambas está fundada en el concepto de referencia y exigen la relatividad tanto de la referencia como de la verdad.

³ Un desarrollo de la versión bautismal de la teoría histórico-causal de la referencia puede verse en Kripke [1995]. En la tercera conferencia de dicho texto Kripke sostiene que los términos de género natural funcionan de un modo similar a los nombres por lo que aplica la teoría de la referencia de los nombres propios que desarrolla previamente en las primeras conferencias.

⁴ Véase Putnam [1975] -en particular el artículo “Language and reality” pp. 272-290.- un desarrollo de su teoría de la referencia de los términos de género natural.

único concepto de magnitud, que está parcialmente definido por todo el sistema de la física, incluyendo las reglas de todos los procedimientos operacionales utilizados en su medición.

Una magnitud puede ser analizada, en general, como una función de los objetos que son susceptibles de poseerla, expresada en una escala. Más específicamente, una magnitud puede ser analizada como una función del producto cartesiano de n colecciones tal que por lo menos una de estas colecciones está formada por cosas materiales y es aplicada a un conjunto R de números. Entonces, en el caso de la magnitud masa en física clásica, el dominio de la función masa es el producto cartesiano del conjunto C de los cuerpos por el conjunto U_M de las unidades de masa, es decir, $M_c: C \times U_M \rightarrow R^+$

Las definiciones parciales del concepto pueden ser, entonces, de diversos tipos. Dentro de las definiciones que se pueden denominar ontológicas, referenciales o extensionales, se observa que Newton inicia los *Principia* definiendo a la masa o cantidad de materia de la manera siguiente: “la cantidad de materia es la medida de la misma originada por su densidad y volumen conjuntamente.” [Newton, 2004, p.121] Posteriormente define la fuerza insita de la materia como “una capacidad de resistir por la que cualquier cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo”, aclarando que ésta es “siempre proporcional al cuerpo⁵ y no se diferencia en nada de la inercia de la masa”. Pero también se encuentra una importante mención de la masa en la Proposición VII del Libro III de los *Principia*: “La gravedad ocurre en todos los cuerpos y es proporcional a la cantidad de materia existente en cada uno.” [Newton, 2004, p. 635]. Es decir, las tres concepciones del término masa que se pueden encontrar aquí son “cantidad de materia”, “inercia” o “masa gravitatoria”. Cada una de las cuales posee diferente definición formal. Cabe señalar que la definición de Newton del concepto de masa -según la cual ésta es el producto del volumen y la densidad- necesita de un concepto de densidad entendido como cantidad de átomos por volumen.

El segundo tipo de definiciones de un concepto que se presentará es el de aquellas que pueden ser denominadas definiciones operacionales. Estas definiciones proveen una forma de conocer una magnitud a través de algún procedimiento de medida. La primera de las mencionadas

⁵ Cuerpo significa en este contexto lo mismo que masa. Newton, una vez definida la masa como una cantidad en función de la densidad y el volumen, hace notar que “a esta cantidad llamo en lo sucesivo cuerpo o masa”. [Newton, 2004, p.121]

definiciones que Newton hace de la magnitud masa puede pensarse como una definición operacional pero, aunque Newton no lo especifica en su definición, ésta está fundada en conceptos que se refieren a átomos, es decir, se refiere a entidades atómicas inobservables que resultaban empíricamente inaccesibles en aquellos tiempos. Esta definición no sólo no proporciona un método experimental para medirla sino que presenta, al menos según Mach, el problema de contener una magnitud, la densidad, que denota la relación existente entre la masa y el volumen. Mach propuso entonces, una nueva definición que proporcionaba simultáneamente a definirla, un método para medir dicha magnitud y que puede expresarse de la siguiente forma: la razón de la masa de dos cuerpos es la razón inversa negativa de las aceleraciones mutuamente inducidas por dichos cuerpos. Así, la masa de un cuerpo cualquiera referida a la masa de un objeto patrón p cuando interactúan mutuamente formando un sistema aislado, queda definida como:

$$m/m_p = -a_p/a$$

Esta definición de masa de Mach tampoco es estrictamente operacional pero hace posible definir un concepto relacional que tiene la ventaja de que sus unidades están empíricamente dadas.

Así, algunas de las ecuaciones de la mecánica clásica en las que se ven involucradas la masa y las relaciones de ésta con otros conceptos pueden ser concebidas como definiciones operacionales; otras sólo permiten comprender otros aspectos de la extensión del término más allá de los involucrados en las definiciones que podríamos denominar ‘ontológicas’. Según la segunda ley de Newton, la masa inercial puede ser determinada en función de una fuerza conocida aplicada a un cuerpo x y la aceleración que ésta le produce a dicho cuerpo a través de la siguiente expresión:

$$m(x) = F/a(x)$$

Pero de acuerdo a la ley de gravitación universal, es posible determinar a la masa de un cuerpo x , midiendo la fuerza gravitatoria que sobre dicho cuerpo ejerce la tierra. Entonces:

$$m(x) = F_{t_x} \cdot r^2 / G \cdot m_t$$

En opinión de Einstein,

“Una característica poco satisfactoria de la mecánica clásica es la de que en sus leyes fundamentales la misma masa constante aparece en dos papeles

diferentes: como masa ‘masa inercial’ en la ley de movimiento y como ‘masa pesante’ en la ley de gravedad” [Einstein, 1981, p.278]

Dado que los valores que se obtienen en una y otra determinación coinciden puede sostenerse que las masas inercial y gravitatoria son la misma. Pero también puede observarse que la masa inercial y la masa gravitatoria son magnitudes conceptualmente distintas. El hecho de que coincidan numéricamente, no es una condición que venga impuesta desde las definiciones de ambas, de hecho, se comprobó experimentalmente que son numéricamente iguales, pero podrían no haber coincidido.

Es una importante discusión si toda magnitud física debe poder definirse mediante un proceso específico de medición o si por el contrario, este tipo de definiciones operacionales son sólo una herramienta útil para la atribución de un significado físico a los conceptos métricos. En todo caso parece claro que, por la definición misma de “magnitud física”, éstas deben poder medirse al menos mediante un proceso de medición específico, que involucre alguna característica distinta respecto del proceso utilizado para otras magnitudes. Pero también, que el significado físico de una magnitud no puede estar determinado sólo por su proceso de medición específico ya que, de ser así, una variación -una mejora técnica, por ejemplo- en el proceso de medición de una magnitud transformaría a dicha magnitud en otra.

En todos los casos anteriores la masa clásica, por concebirse como independiente de la posición y movimiento del cuerpo respecto al sistema de referencia elegido, se entiende como una propiedad universal de los cuerpos. Esta universalidad de la masa de los cuerpos parece estar asociada a las concepciones de tiempo absoluto que fluye uniformemente y de espacio absoluto que siempre permanece igual e inmóvil, tal como los define Newton.

La magnitud masa en el marco de la relatividad restringida

La definición que de la magnitud masa se puede hacer en el marco de la mecánica relativista es un tanto distinta. Si bien la masa sigue siendo una propiedad escalar característica de los objetos materiales y conserva algunas de las propiedades del concepto clásico, la masa de una partícula deja de ser invariante respecto de su estado de movimiento y depende en este nuevo contexto especialmente de la velocidad a la que se mueve el cuerpo.

Las distancias y los tiempos en el marco de la relatividad dejan de ser universales y pasan a depender del sistema de referencia desde el cuál se

los está observando. El dominio del concepto masa en física relativista es el producto cartesiano del conjunto C por el conjunto F de marcos de referencia y el conjunto U_M : $Mr: C \times F \times U_M \rightarrow R^+$. De esta manera, las medidas que se efectúan sobre los sucesos que se observan en un sistema de referencia dado varían respecto de otros sistemas de referencia. Así pierde su universalidad el concepto de masa.

Operacionalmente y en el contexto de la relatividad especial, la masa, puede definirse de varias maneras. Inicialmente debemos diferenciar entre la masa en reposo y la masa en movimiento. La masa en reposo puede determinarse a través de la relación entre el cuadrimomento y la velocidad de la luz en el vacío c , de la siguiente forma:

$$m = \sqrt{(E^2 - p^2 c^2)} / c^2$$

así como también a través de la relación entre las componentes espacial y temporal de la velocidad (v_s, v_t) en un choque inelástico,

$$m/m_p = (v_e/V - v_t/c)$$

La masa en movimiento queda determinada a través de las ecuaciones de relación entre energía total y velocidad (a), del momento (trimomento) (b) y velocidad o de la masa en reposo (c):

$$(a) \quad m = E/v^2$$

$$(b) \quad m = P/v$$

$$(c) \quad m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

El término “masa” y las teorías de la referencia

Si, tal como sostienen las diversas versiones de la teoría descriptivista de la referencia de los términos generales, la referencia de un término general está determinada por una serie de descripciones que los hablantes asocian con el término, debería ser posible construir un conjunto de descripciones que expresen el sentido del término “masa” y que este sentido determine su referencia aunque, tal como indica Carnap, no se logre en forma acabada y definitiva.

Referencia del término “masa” desde la perspectiva de las teorías descriptivistas: racimo de descripciones que la comunidad científica asocia al término

El racimo de descripciones que se asocian con el término “masa” varía no sólo en el marco de cada teoría – en particular en los marcos que han sido denominados “mecánica clásica” y “mecánica relativista” – sino que, como se ha visto, dentro de un mismo marco se pueden encontrar distintos tipos de “definiciones”. Independientemente de que las descripciones provengan de definiciones operacionales, relacionales, formales u ontológicas, el conjunto de descripciones que se asocian en mecánica clásica con el término “masa” podría ser el siguiente:

D₁: La masa es la cantidad de materia o sustancia que posee un cuerpo u objeto material.

D₂: Esa cantidad de materia que posee un cuerpo está en relación directa con la capacidad que el mismo cuerpo posee para resistirse a un cambio en su estado de movimiento. En notación formal

$$m(x) = F/a(x)$$

D₃: La masa existente en cada cuerpo es proporcional a la gravedad que sucede en todos los cuerpos. $m(x) = \frac{F_{t_x} \cdot r^2}{G \cdot m_t}$

D₄: La masa es independiente de la posición y del estado de movimiento de los cuerpos. Es una propiedad universal de los cuerpos.

D₅: La masa es una propiedad escalar característica de los objetos materiales.

D₆: Es posible atribuir a los objetos un valor escalar m , mediante algún procedimiento experimental, que podrá ser determinado en relación a un objeto patrón.

D₇: Los valores de la cantidad escalar m asignados a los distintos objetos cumplen las propiedades de aditividad y transitividad.

D₈: La masa de un cuerpo puede determinarse empíricamente mediante diversos procesos que consistan en medir magnitudes que estén en una relación funcional con la masa, en las distintas leyes fundamentales en las que ésta está incluida.

D₉: La masa total de un sistema aislado permanece constante a través del tiempo.

LA REFERENCIA DEL TERMINO DE MAGNITUD FÍSICA “MASA”

De manera análoga podemos construir un conjunto de descripciones que posiblemente sea el que asocia la comunidad científica al término masa en el contexto de la mecánica relativista.

D₁: La masa y la energía de un cuerpo (de una partícula) son dos formas de presentación de un mismo fenómeno. La masa no es una propiedad medible diferenciada de la energía sino una magnitud equivalente a la misma.

D₂: Es posible diferenciar entre la masa en reposo y la masa en movimiento. La masa en reposo es la masa de un objeto, relativa a un sistema de referencia inercial respecto de cual el objeto se encuentra en reposo. La masa en movimiento es la masa de un objeto relativa a un sistema de referencia inercial respecto del cuál el objeto se mueve con velocidad v .

D₃: La masa de un cuerpo depende del estado de movimiento del mismo, es decir, de la velocidad v con la que se mueve un cuerpo respecto de un sistema de referencia inercial. Así $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

D₄: La masa es una propiedad escalar que representa una relación entre un objeto y el sistema de referencia respecto del que su movimiento en descrito.

D₅: Es posible atribuir a los objetos un valor escalar m que podrá ser determinado en relación a un objeto patrón, mediante algún procedimiento.

D₆: Los valores de la cantidad escalar m asignados a los distintos objetos cumplen las propiedades de aditividad y transitividad.

D₇: La masa de un cuerpo puede determinarse empíricamente mediante diversos procesos que consistan en medir magnitudes que estén en una relación funcional con la masa, en las distintas leyes fundamentales en las que ésta está incluida.

D₈: La masa total de un sistema aislado permanece constante a través del tiempo.

Se puede notar que algunas de las descripciones asociadas con el término “masa” en el contexto de la física clásica difieren de las que se asocian en el contexto de la física relativista. Pero antes de analizar si el término “masa” en cada uno de estos contextos tiene la misma referencia, se analizará dicho término de acuerdo a las teorías de la referencia directa.

Referencia del término “masa” desde una perspectiva histórico-causal: evento introductorio, usos del término y propiedades esenciales.

Resulta complicado encontrar un evento introductorio o bautismo inicial para el término “masa” por lo que – y dado que algunas versiones de la teoría histórico-causal de la referencia no sostienen este tipo de eventos como único evento fijador de la referencia – observaremos exclusivamente los usos del término por parte de la comunidad científica, en el marco de las dos teorías que hemos estado estudiando y las propiedades esenciales que poseen cada una de las entidades que caen bajo la extensión de dicho término.

Usos del término

Como se ha visto, ya en el marco de la mecánica clásica observamos distintos usos del término “masa”. Ha sido (y es) usado para hacer referencia a la cantidad de materia que posee un cuerpo, a la inercia y también a la masa gravitatoria de un cuerpo. En el marco de otras teorías no newtonianas, como lo es la relatividad especial, se sigue utilizando el término “masa” pero para hacer referencia a una magnitud que, al menos en principio, parece un tanto diversa de la magnitud clásica.

Respecto del lenguaje matemático utilizado en uno y otro marco podemos ver algunas similitudes. El término “masa” se refiere en ambos contextos a una propiedad escalar y los posibles valores asignables a dicha magnitud cumplen similares propiedades matemáticas. En mecánica clásica es posible definir a la masa como el cociente entre la fuerza neta aplicada a un cuerpo y la aceleración que dicha fuerza produce en el cuerpo. De igual forma puede definirse operacionalmente la masa en el marco de la teoría de la relatividad especial como el cociente entre una fuerza f^μ y la aceleración: $m = f^\mu / a^\mu$ pero en este contexto la fuerza y la aceleración son tensores. También es posible observar que la masa de un sistema aislado en uno y otro contexto permanece constante a través del tiempo.

Ya se ha señalado que, en el contexto de la relatividad especial, se describe la masa de un cuerpo como una magnitud equivalente a la energía y dependiente del estado de movimiento de dicho cuerpo. Estas nuevas descripciones no son sólo distintas de las anteriores, son también contradictorias. La masa no puede ser una magnitud independiente y dependiente de la velocidad simultáneamente. O al menos, no puede serlo si se sostiene el principio de no contradicción.

Se ha intentado muchas veces asociar la masa newtoniana sólo con la masa en reposo relativista, pero esto presenta también algunos problemas en relación al principio de conservación de la masa que puede formularse en el contexto de la relatividad especial análogo al principio de conservación de la masa en la mecánica clásica.

Propiedades esenciales de las entidades que conforman la extensión del término

Se analizarán distintas posibilidades respecto de las propiedades esenciales que, se supone, poseen las entidades que forman parte de la extensión de un término. Puede que estas propiedades coincidan totalmente con aquellas propiedades que una comunidad científica atribuye al término “masa”, que coincidan casi todas pero que alguna de las propiedades esenciales no sea aún conocida por dicha comunidad o que alguna de las propiedades atribuidas al término pueda resultar finalmente incorrecta a la luz de experiencias o descubrimientos que aún no han sido hechos. Es decir, que en el marco de distintas teorías se supongan distintos conjuntos de propiedades esenciales para el término masa.

Si las propiedades esenciales que una entidad que cae en la extensión del término “masa” debe poseer son iguales a aquellas que conforman el racimo de descripciones que la comunidad científica asocia al término, el problema de saber si el término “masa” refiere a la misma magnitud en un contexto y en otro, se reduce a la selección que se haga de las propiedades que se suponga que deben permanecer invariantes en un contexto de cambio de teoría.

Tanto si se está sosteniendo para la referencia de este término una postura acorde con las teorías descriptivas de la referencia como si se sostiene una postura histórico causal de la misma, el problema parece reducirse a la verificación de si bajo la extensión del término de la magnitud a la que denominamos “masa”, caen sólo objetos que poseen las propiedades que se hayan escogido por esenciales, es decir, las propiedades concernientes a la estructura interna de dichas entidades u objetos.

Dado que la referencia de un término viene determinada por la identidad entre las entidades que pertenecen a la extensión de un término y ésta a su vez por las propiedades esenciales, siguiendo la teoría de la referencia directa, todo objeto o entidad que posea esas propiedades pertenece a la extensión del término y aquel que no las posea no pertenece.

De igual forma si seguimos las teorías descriptivas; un objeto pertenece o no a la extensión de un término si cumple la mayoría (o una mayoría ponderada) de las descripciones que la comunidad científica le atribuye a la magnitud designada por dicho término.

Por ejemplo, para quienes sostengan que la invarianza de la masa newtoniana respecto de la velocidad del objeto no es una propiedad esencial, seguramente no será problemático sostener que, tras el cambio de teoría, el término “masa” sigue refiriéndose a la misma magnitud. Pero para quienes sostengan que la mencionada propiedad pertenece al conjunto de las propiedades esenciales de la magnitud masa, será imposible sostener que tras el cambio de teoría la referencia del término permanece constante.

Es claro que nunca se tendrá la absoluta certeza de estar en posesión de todos los conocimientos necesarios para asegurar que un conjunto de propiedades son efectivamente las esenciales de una magnitud física. Nada asegura que no pueda hacerse un nuevo descubrimiento que muestre que una propiedad, hasta ahora pensada como esencial, no lo sea o que exista una propiedad esencial hasta ahora no considerada como tal. De esta forma no es posible saber si las propiedades esenciales son o no las mismas que aquellas que una comunidad científica asocia al término que designa la magnitud en cuestión.

Pero podría suceder que alguna de las propiedades esenciales que debe poseer una magnitud para pertenecer a la extensión de un término fuese desconocida en un determinado momento por una determinada comunidad científica, o que alguna de las propiedades que se le exige que posea no sea en realidad una propiedad esencial.

Si dichas propiedades esenciales no son las mismas que las propiedades que se describen y atribuyen al término, ya sea porque alguna de éstas no ha sido “descubierta” o porque alguna de las actuales es incorrecta, el problema de la referencia del término masa debe ser analizado de manera distinta si se sigue una teoría de la referencia directa que si se hace desde la perspectiva de una teoría descriptiva.

Así como en el caso de concebir la referencia del término “masa” desde una perspectiva descriptivista debemos verificar si varía o no un número significativo de las descripciones que se asociaban al término “masa” en un contexto de cambio de teoría, desde la perspectiva de las teorías de la referencia directa, parecería que no son tan relevantes las propiedades que en un contexto dado asociamos a una propiedad sino aquellas que esta propiedad posee independientemente de si es o no conocida por la comunidad científica. Ahora bien, si no se conocen todas esas

propiedades esenciales es necesario formular la pregunta acerca de cómo podemos saber si el término “masa” se refiere en el marco de las dos teorías a la misma propiedad.

Podría resultar irrelevante el hecho de que estas descripciones puedan seguir atribuyéndose o no al término en cuestión, ya que siempre podremos suponer que el término sigue teniendo la misma referencia y que actualmente conocemos nuevas propiedades de la magnitud que antes desconocíamos. Pero ¿qué sucedería si una propiedad que en el marco de una teoría suponemos esencial es contradictoria con otra que, en el marco de la vieja teoría suponíamos también esencial? Esto es lo que sucede con el término de magnitud “masa”. En un contexto clásico la masa de cualquier objeto que pertenece a la extensión del término “masa”, posee como propiedad esencial el que su masa sea independiente del estado de movimiento de dicho objeto. En un marco relativista esta propiedad no sólo no es verdadera de cualquier objeto que pertenece a la extensión del término de magnitud “masa”⁶ sino que entra en contradicción con una nueva propiedad considerada esencial: la dependencia de la masa con la velocidad⁷. En ninguno de los dos contextos es posible renunciar a la propiedad esencial de las entidades u objetos que poseen la magnitud masa, respecto del movimiento. La única salida que queda para poder sostener que el término masa se refiere a la misma propiedad en uno y otro contexto, es asegurar que la independencia o dependencia de la masa con la velocidad no es una

⁶ Según Mosterín “Se trata de un concepto muy distinto de masa, que (con buena voluntad) puede considerarse como una ampliación del concepto clásico a objetos que se mueven con velocidades próximas a la de la luz, extensión conservadora (dentro de los márgenes de medida efectiva) respecto a los objetos a baja velocidad.” [Mosterín , 2000, pp. 57]

⁷ Andrés Rivadulla en su artículo “Inconmensurabilidad y relatividad. Una revisión de la tesis de Thomas Kuhn” sostiene que puede demostrarse que la masa de una partícula es invariante pues su valor no depende del estado dinámico del sistema de referencia en que se mida, es decir, que la masa relativista no depende de la velocidad a la que se mueva un sistema de referencia solidario a dicha partícula. En dicho artículo muestra cómo aplicando las transformaciones de Lorentz a las ecuaciones del momento p^{μ} y a sus componentes espaciales y temporales, en las que intervienen las magnitudes masa y velocidad, puede lograrse una ecuación en la cuál la masa aparece desvinculada de la velocidad. Creo que esto no construye una demostración de que la masa relativista no depende de la velocidad sino que depende de la velocidad de movimiento relativa entre un sistema solidario a ella y el sistema desde el cual se la observa. El hecho de que se pueda construir una representación matemática de la magnitud masa relativista en la cuál la velocidad no aparece explícitamente no implica necesariamente que no exista tal dependencia.

propiedad esencial para los objetos o entidades que posean dicha magnitud.

Ahora bien, ¿cómo es posible afirmar que dos magnitudes, masa clásica y masa relativista, tienen la misma referencia si es posible que exista alguna propiedad esencial que desconocemos, pero que alguno de los objetos que caen en la extensión de una de ellas los posee y un objeto que cae bajo la extensión de la otra no? Si de acuerdo con autores como Kripke, el contenido del término es subsidiario de su capacidad referencial y la referencia del término de magnitud queda fijada por una propiedad que le es contingente, nuevos descubrimientos científicos sobre la esencia de esta magnitud no implican un cambio en el sentido del término. Así la identidad entre propiedades parecería también estar asegurada aun después de producidos nuevos descubrimientos científicos, salvo que dichos descubrimientos señalen que las entidades que caen bajo una de las magnitudes poseen propiedades esenciales contradictorias respecto de las propiedades esenciales que poseen las entidades que pertenecen a la extensión de la otra. Nuevamente el problema parece estar en la determinación de las propiedades esenciales, por lo que resultan pertinentes las preguntas que formula Kuhn en su artículo de [1990] acerca de la posibilidad de que la teoría causal de la referencia se encuentre frente al mismo problema que pretendía resolver ya que a dicha teoría le queda por proponer un método eficaz para distinguir cuáles de las propiedades son esenciales y cuáles sólo contingentes.

Identidad entre la masa clásica y la masa relativista. Tipos de definiciones

Como ya se ha visto, el concepto masa conserva, en el cambio de la teoría clásica a la relativista, alguna de sus propiedades y cambia otras. El problema parece quedar reducido a determinar cuáles son las características que debe conservar un concepto en un contexto de cambio de teoría para que resulta posible afirmar que el concepto es el mismo. ¿Cuáles son las descripciones asociadas a un término de magnitud que deben permanecer invariantes o, dicho de otro modo, cuáles son las propiedades que deben pensarse como esenciales de las entidades que caen bajo la extensión del término?

En la bibliografía sobre esta temática, cuando se pretende demostrar que el término de magnitud “masa” puede ser utilizado sin inconvenientes tanto en el contexto de la mecánica clásica como en el de la relatividad restringida, se sustenta la demostración en el aspecto formal de la

magnitud masa. Se suele mostrar que cuando la velocidad relativa v con la que se mueve una partícula respecto de un observador es muy pequeña en comparación con la velocidad de la luz en el vacío c , el valor de la masa relativista m coincide con el de la masa en reposo m_0 . Formalmente:

$m = \gamma \cdot m_0$ donde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ El hecho de que el coeficiente γ

tienda al valor uno cuando el cociente v^2/c^2 se aproxima a cero y, por tanto, las transformaciones de Lorentz se reduzcan a las transformaciones de Galileo, se utiliza para decir que la teoría clásica y la teoría de la relatividad restringida coinciden cuando las velocidades son pequeñas, es decir, que la relatividad especial contiene como caso límite a la mecánica clásica.

Ahora bien, a este respecto cabe sostener que, aunque los valores obtenidos en la medición de la masa clásica y de la masa relativista coincidan en un dominio, esto no significa que lo medido sea lo mismo en ambos casos: lo que se mide en el caso clásico es una propiedad intrínseca del sistema considerado y lo que se mide en el caso de la relatividad es una relación entre el sistema y ciertas características del dominio en el que la teoría clásica es válida. Es decir, el concepto de masa que era absoluto en el marco de la mecánica clásica en el sentido de no estar influido por su movimiento en el sistema de referencia elegido se convierte en el marco de la relatividad en un concepto relacional cuya especificación necesita de la indicación del sistema de coordenadas al que se refieren todas las descripciones espacio-temporales.

Pero el análisis no debería detenerse ahí, ya que la definición formal de una magnitud no es la única definición posible y tampoco resulta evidente que sea la más importante de las definiciones. Si la definición de la magnitud masa, aunque sea pensada como definición incompleta y no definitiva, está formada a su vez por distintos tipos de definiciones tales como las observacionales y las formales entre otras, cabe la pregunta acerca de qué tipo de definición del concepto masa es más representativa del mismo.

Llegado este punto parece necesario analizar diversos aspectos. Un aspecto, que puede denominarse ontológico, obliga a considerar si es posible, en el marco de la relatividad restringida, mantener la definición del término “masa” según la cuál ésta es la cantidad de materia que posee un cuerpo. Probablemente en este contexto sea más pertinente definir a la masa respecto de su equivalencia con la energía.

El aspecto matemático o formal de la magnitud masa nos lleva a comparar las ecuaciones de definición o las expresiones formales de las leyes físicas en las que participan. Es cierto que, dejando de lado otros aspectos, en lo estrictamente matemático a bajas velocidades las expresiones formales de una y otra masa coinciden. Pero también puede observarse que una misma expresión formal puede representar distintos fenómenos y que el comportamiento matemático de una variable sea similar al de otra no implica que estas variables sean idénticas en todos los aspectos.

El aspecto al que puede denominarse contextual, es uno de los aspectos que más varía para la magnitud masa de un contexto clásico a uno relativista. La mecánica clásica presupone conceptos de espacio y tiempo que son muy parecidos a lo que nos sugiere la percepción sensible; responden al viejo esquema del espacio caja, como contenedor de la materia, en cuyo seno se mueve. El espacio clásico es homogéneo, continuo, indefinidamente divisible, físicamente inactivo, independiente del tiempo, de la materia y del movimiento, y tiene tres dimensiones. El tiempo clásico es homogéneo, uniforme, continuo e indefinidamente divisible, independiente del espacio y de la materia, tiene una sola dimensión y se distingue del espacio en que está orientado. En el marco de la teoría de la relatividad restringida el espacio y el tiempo no son independientes, sino que forman un continuo tetradimensional, de modo que los puntos del espacio y los instantes del tiempo se funden en los sucesos, formados por la asociación de un punto y de un instante. El espacio-tiempo sigue siendo físicamente inactivo pero su estructura métrica es ahora pseudoeuclídea.

Otro aspecto que resulta importante analizar es el que se denominará aspecto_lingüístico. Es decir las reglas de formación que deben seguirse para la construcción de los enunciados en los que intervengan los términos masa clásica y masa relativista. Este aspecto fue muy debatido en Copenhague, aunque no específicamente respecto del término masa, sino en relación con la interpretación de la mecánica cuántica. La conclusión a la que arribaron los físicos en aquel momento es que no era necesario crear un nuevo lenguaje para comunicar los resultados experimentales de la nueva teoría, pero que sí resulta necesario utilizar el lenguaje clásico pero sujeto a nuevas reglas de aplicación que vendrían dadas por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. En las propias palabras de este autor, “La interpretación de Copenhague parte de una paradoja. Todo experimento de física, refiérase a fenómenos de la vida diaria o a acontecimientos atómicos, debe ser descrito en términos de la

física clásica, con los cuales se forma el lenguaje usado para describir la organización de nuestras experiencias y para expresar sus resultados. No podemos ni debemos reemplazar estos conceptos por otros. Sin embargo su aplicación está restringida por las relaciones de incertidumbre...” [Heisenberg, 1959, p. 30]

En el caso de la mecánica relativista el problema del lenguaje no resulta tan grave como en el caso de la mecánica cuántica pero, aun así, fue necesario discutir sobre el lenguaje que sería apropiado usar para referirse a las características que esta teoría postulaba para el espacio y el tiempo y, por tanto, para todas las magnitudes que participan en los fenómenos que se producen en el espacio y el tiempo. El lenguaje anterior a esta teoría, fundado en los antiguos conceptos de espacio y tiempo no permitía explicar los nuevos experimentos. Es decir los antiguos conceptos no resultaban aplicables en todos los casos de forma consistente. Entonces, para poder seguir utilizando los antiguos términos fue necesario establecer una nueva relación entre los símbolos matemáticos, dichos términos y las mediciones efectuadas. (Según entiende Heisenberg, esta situación fue la que determinó que se encontrara la transformación de Lorentz.)

Por último, el aspecto experimental es también relevante en el análisis de la identidad entre dos magnitudes. Una magnitud como la masa puede necesitar de montajes experimentales muy diversos para ser medida en todos sus posibles valores. Las mediciones de la masa de un planeta y de la masa de un electrón implican montajes experimentales muy distintos y relaciones con distintas variables, pero esto no debería significar por sí mismo que la magnitud medida no fuese en cada caso la misma. Sí podría significar una diferencia en las magnitudes una alteración en el modo de concebir la interacción entre el objeto de estudio o fenómeno a medir y el montaje experimental incluido el observador en cada contexto. En el caso de la relatividad restringida no hay una tal alteración respecto de la mecánica clásica, siempre que el observador y lo observado se encuentren en dos sistemas de referencia sin velocidad relativa entre ellos. Es decir, no existe entre la teoría de la relatividad restringida y la mecánica clásica, la notable diferencia de concepción sobre el modo de interacción del objeto o fenómeno a medir y el instrumento con el que se efectúa la medición que existe entre la segunda y la mecánica cuántica. En esta última, dado el ya mencionado carácter discontinuo de los procesos atómicos, resultado de la introducción de Planck de una cantidad mínima de acción, resulta prácticamente imposible medir en

forma simultánea magnitudes complementarias con precisión arbitrariamente pequeña.

En definitiva, formal o matemáticamente la masa relativista queda transformada en la masa clásica cuando ésta se mueve a baja velocidad, pero el término “masa” está sujeto en cada contexto a distintas reglas de aplicación, a estructuras métricas diversas y la relación experimental entre observador y fenómeno han variado en el sentido de que, dependiendo del estado de movimiento del sistema de referencia desde el que se mida dicha magnitud se obtendrá un valor u otro. Entonces, ¿es lícito referirse a la magnitud masa en el contexto de la relatividad especial utilizando el mismo término que en el marco de la mecánica clásica? La respuesta a esta pregunta depende de cuáles de las propiedades que se han mencionado respecto de la magnitud masa se consideran esenciales, o de cuáles de las descripciones asociadas al término (pertenecientes al racimo que conforma de definición del término masa) se considere que deben permanecer constantes. Como se ha dicho, si se considera que el tipo de relación que tenga la masa de un cuerpo con el estado de movimiento del mismo, sea la definida en el contexto clásico o en el contexto relativista, es una propiedad esencial y no contingente, está claro que se deberá aceptar que la referencia del término ha variado. Tanto como si se piensa que cualquier definición de un término de magnitud tiene un carácter contextual y esto afecta a la referencia del término, ya que la concepción del esquema espacio-temporal clásica es notablemente distinta de la relativista.

Conclusiones

La definición de una magnitud física en general y en particular la definición de la magnitud masa involucra distintos aspectos, a saber, el aspecto formal, en el que intervienen a su vez cuestiones matemáticas, lógicas y relacionales o contextuales, el aspecto experimental y lo que puede denominarse el aspecto ontológico. Ninguno de estos aspectos resulta claramente más relevante que otro, por el contrario parecen estar en relación de mutua dependencia. El análisis de un término de magnitud física debe involucrar, por tanto, similares aspectos, además de una revisión de las diversas teorías disponibles sobre la referencia de este tipo de términos.

Desde la perspectiva de este trabajo, el problema más grave que presentan las teorías descriptivas es que adolecen de un mecanismo que permita delimitar cuáles de las descripciones que se han asociado a un término son las más relevantes para definir al término y para analizar el

carácter de su referencia. Por otra parte, las teorías de la referencia directa presentan una dificultad semejante ya que tampoco ofrecen una forma fiable para la diferenciación entre las propiedades esenciales y las contingentes de las entidades que forman la extensión de cada término.

De esta manera y dado que el debate entre las teorías descriptiva e histórico causal y la perspectiva del cambio teórico en ciencia son complementarias, los problemas que presentan cada una de las mencionadas teorías de la referencia traen consigo problemas en la explicación del carácter variable o constante de la referencia de los términos de magnitudes físicas según se sostenga o no la tesis de inconmensurabilidad referencial. Es posible entonces encontrar el mismo problema al intentar establecer un criterio para la identidad de magnitudes en el marco de cualquiera de los dos grupos de teorías de la referencia analizados.

Concluyendo, se puede decir que tanto en el caso de la teoría descriptiva como en el de la teoría histórico causal, establecer o justificar el comportamiento de la referencia de un término de magnitud física en función de las descripciones asociadas a un término de magnitud física o de las propiedades esenciales que deben poseer las entidades que forman la extensión de un término de magnitud física, conduce a las mismas preguntas: ¿cuáles son? y ¿cómo se determinan?

En definitiva la pregunta por la referencia de un término de magnitud física encamina a quien se la formule a una pregunta que parece anterior. Para quien postula que las magnitudes físicas existen en el mundo por sí mismas y en forma independiente de cómo sean observadas y medidas, queda claro que no es posible que por cambiar de contexto científico se pueda cambiar la referencia de los términos que las designan. El mundo es así uno, independientemente de cómo se intente conocerlo, a través de qué teorías y disponiendo de qué dispositivos experimentales.

Para quienes sostengan que una magnitud es un concepto teórico, elemento miembro de un esquema conceptual, red interpretativa o molde aplicable al mundo creado de manera más o menos artificial con el único fin de ‘manejarnos’ con ese mundo, la referencia de un término que designe una magnitud variará cada vez que el molde interpretativo lo haga o lo requiera.

En definitiva y como se ha dicho un análisis semántico de los términos de magnitudes físicas invita a un análisis ontológico sobre las magnitudes designadas por estos términos.

Bibliografía

- Carlson, G., [1991], "Natural Kinds and Common Nouns". *En Semantics an International Handbook of Contemporary Research*. Berlín. New York. Walter de Gruyter. pp. 370-398.
- Carnap, R., [1969], *Fundamentación lógica de la física*. Buenos Aires. Sudamericana.
- Devitt, M. y Sterelny, K. [1987]: *Language and Reality*. Oxford. Basil Blackwell.
- Einstein, A., [1981], *Mis ideas y opiniones*. Barcelona. A. Bosch.
- Falkenburg, B., [1997], "Incommensurability and measurement". *En Theoria* 12/3. pp. 467-491.
- Falkenburg, B., [2002], "Correspondence and the Non-Reductive Unity of Physics". En Mataix, C y Rivadulla, A. (ed): "Física Cuántica y realidad". *Philosophica Complutensia* Nro. 18. pp. 215-229. Madrid.
- Fernández Moreno, L. [1998a], "Incommensurability, Reference and Truth." In C. Martínez, et. al., eds., *Truth in Perspective*, pp. 399-417, Aldershot: Ashgate.
- Fernández Moreno, L., [2001], "Consideraciones sobre el cambio de referencia." en J.M. Saguillo, J.L. Falguera y C. Martínez (eds.), *Formal Theories and Empirical Theories*, Santiago de Compostela, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela. pp. 583-594.
- Fernández Moreno, L., [2000], "La referencia de los términos de género natural: Putnam y la teoría descriptiva de la referencia." en Cuadernos de Materiales Nro. 12 (<http://www.filosofia.net/materiales/num/num12/num12a.htm>)
- Fine, A., [1975], "How to compare theories: Reference and Change" en *Noûs* vol. 9 Nro. 1. pp. 17-32.
- Heisenberg, W., [1972], *Diálogos sobre física atómica. Capítulo XI: Discusiones sobre el lenguaje*. Madrid. B.A.C.
- Heisenberg, W., [1962a], "Cuestiones de principio de la física moderna" En *Los nuevos fundamentos de la ciencia*. Madrid. Editorial Norte y Sur. Pp. 175-191.
- Heisenberg, W., [1962a], "El desarrollo de la mecánica cuántica" En *Los nuevos fundamentos de la ciencia*. Madrid. Editorial Norte y Sur. Pp. 192-210.
- Heisenberg W., [1959], *Física y Filosofía*. Buenos Aires. Ediciones La Isla.
- Kripke, S., [1995], *El nombrar y la necesidad*. México. UNAM, Instituto de Investigaciones Filosóficas.
- Kuhn, T., [1975], *La estructura de las revoluciones científicas*. Madrid. Fondo de Cultura Económica de España.
- Kuhn, T., [1990], "Dubbing and redubbing: The vulnerability of rigid designation". En C.W. Savage [ed.], *Scientific Theories* [Minnesota Studies in Philosophy of Science, vol. 14], Minneapolis, University of Minnesota Press. pp. 298-318.
- Kuhn, T., [1993], "Afterwords" en Horwich, P (ed.), *World Changes. Thomas Kuhn and the Nature of Science*. MIT Press. Cambridge. pp.311-341.

LA REFERENCIA DEL TERMINO DE MAGNITUD FÍSICA “MASA”

- Mosterín, J., [2000], *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid. Alianza Editorial.
- Newton, I., [2004], *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid. Alianza Editorial. [1^{ed} 1687]
- Putman, H., [1983], “De las propiedades” En *Cuadernos de Crítica*. México. Instituto de Investigaciones Filosóficas. U.N.A.M.
- Putnam, H., [1975], *Mind, Language and Reality*. (*Philosophical Papers*, Vol. 2). Cambridge. Cambridge University Press.
- Putman, H., [1995], *Representación y realidad*. Barcelona. Gedisa.
- Rivadulla, A., [2003], “Incommensurability and relativity. A revision of the thesis of Thomas Kuhn” en *Revista de Filosofía*. Volumen 28. Nro. 2. pp. 237-259.

Recibido el 29 de julio de 2008; aceptado el 31 de mayo de 2009.