

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FILOSOFÍA
Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia



**LA REFERENCIA DE LOS TÉRMINOS DE
MAGNITUDES FÍSICAS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Ana Laura Fleisner Etcheverry

Bajo la dirección del doctor

Luis Fernández Moreno

Madrid, 2010

ISBN: 978-84-693-7996-7

© Ana Laura Fleisner Etcheverry, 2010

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE FILOSOFÍA
DEPARTAMENTO DE LÓGICA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

LA REFERENCIA DE LOS TÉRMINOS
DE MAGNITUDES FÍSICAS

TESIS DOCTORAL

ANA LAURA FLEISNER ETCHEVERRY

DIRECTOR DE TESIS

LUIS FERNÁNDEZ MORENO

A Hou-Chi

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1: Magnitudes Físicas	5
1. Consideraciones sobre la noción de magnitud física.....	5
2. Cinco magnitudes: espacio, tiempo, masa, espín y velocidad.....	13
2.1. Espacio y tiempo	13
2.1.1. Espacio y tiempo en la física clásica	13
2.1.2. Espacio y tiempo o espacio-tiempo en la física moderna: mecánica cuántica, relatividad especial y relatividad general	20
2.1.3. Esquema	27
2.2. Masa	27
2.2.1. La magnitud masa en la mecánica clásica	27
2.2.2. La magnitud masa en el marco de la relatividad especial	32
2.2.3. Usos del término “masa”	33
2.2.4. Esquema	36
2.3. Espín.....	37
2.3.1. Esquema	39
2.4. Velocidad.....	39
2.4.1. Esquema	41
3. Aspectos relevantes en la definición de una magnitud física	41
3.1. Aspecto ontológico	42
3.2. Aspecto experimental	43
3.3. Aspecto formal o matemático.....	47
3.4. Aspecto contextual	48
4. El problema de la identidad de magnitudes.....	50
5. Términos de género natural	56
Apéndice. Formalismo matemático del espín cuántico	60

Capítulo 2: La semántica de los términos de magnitudes físicas	66
1. La teoría descriptiva de la referencia.....	67
1.1. Versiones clásicas.....	67
1.1.1. Frege.....	68
1.1.2. Russell	75
1.2. La teoría descriptiva contemporánea.....	78
1.2.1. Carnap.....	79
1.3. Evaluación de la teoría descriptiva.....	88
2. La teoría causal de la referencia	95
2.1. Kripke.....	96
2.2. Putnam.....	108
2.2.1. Putnam: la teoría de la referencia	108
2.2.2. Consideraciones sobre la teoría de las propiedades físicas de Putnam	115
2.3. Evaluación de la teoría causal	122
3. Teorías híbridas de la referencia.....	127
4. Los términos de magnitudes físicas y las teorías de la referencia.....	130
4.1. El término “masa”	131
4.2. Los términos “espín” e “ímpetu”	137
4.3. El término “velocidad”	141
Capítulo 3: La referencia de los términos de magnitudes físicas en un contexto de cambio teórico.....	147
1. Variación de la referencia: Kuhn y Feyerabend	148
1.1. Kuhn	148
1.2. Feyerabend	156
2. Invariancia de la referencia.....	161
2.1. Putnam.....	161
3. Esquemas.....	170
4. El comportamiento de la referencia de los términos “masa”, “espín”, “ímpetu” y “velocidad” en un contexto de cambio teórico.....	173
4.2. Análisis de los mapas de relaciones de magnitudes en diferentes contextos teóricos	175
4.2.1. El término “masa”	176

4.2.2. El término “espín”	183
4.2.3. El término “ímpetu”	185
4.2.4. El término “velocidad”	189
5. Relación entre las estructuras (mapas) que forman las distintas magnitudes en los marcos de distintas teorías físicas y el comportamiento de la referencia de los términos que las designan en un contexto de cambio teórico	194
5.1. Necesidad y “existencia”	195
5.2. Definición y referencia	198
5.3. Herramienta de análisis. Mapa de relaciones y referencia	200
Capítulo 4: Propuesta de una teoría de la referencia de los términos de magnitudes físicas	203
1. ¿Qué tipo de teoría de la referencia permitiría explicar los comportamientos estudiados en el capítulo 3?	203
2. Hacia una teoría de la referencia de los términos de magnitudes físicas	207
2.1. ¿Cuál es la referencia de un término de magnitud física?	207
2.2. ¿Cómo viene determinada la referencia de un término de magnitud física en el marco de una teoría?	209
2.3. ¿Cómo se transmite la referencia de un término de magnitud física?	211
2.4. Descripción de la nueva herramienta de análisis (mapas)	215
2.5. ¿Qué tipo de teoría de la referencia es la propuesta?	217
3. La referencia total de los términos “masa”, “ímpetu”, “espín” y “velocidad”	219
3.1. La referencia del término “masa”	220
3.2. La referencia del término “ímpetu”	222
3.3. La referencia del término “espín”	223
3.4. La referencia del término “velocidad”	223
Conclusiones	225
Bibliografía	231

INTRODUCCIÓN

La física utiliza un lenguaje técnico para describir y explicar su objeto de estudio, su particular recorte del mundo. Entretejiendo ese lenguaje con estructuras matemáticas y esquemas experimentales define el mundo al que va a referirse, así como las herramientas a través de las cuales va a abordarlo. Esas herramientas son las *magnitudes físicas*, es decir, los conceptos métricos a través de los cuales se pueden cuantificar los hechos, fenómenos y procesos del mundo para describirlos y explicarlos.

En el lenguaje de la física hay distintos tipos de términos: aquellos que denotan *objetos que hay* en el mundo – los términos que designan partículas, por ejemplo – y los que denotan las *herramientas* con las que se analiza al mundo, es decir, los términos de magnitudes físicas. En esta tesis nos ocuparemos de la semántica de estos últimos y, en particular, de la relación que los vincula con el mundo: su *referencia*. El estudio de la referencia de los términos de magnitudes físicas contribuye a comprender la forma en la que la física *ve* el mundo, cómo la física representa el mundo cuando lo transforma en su objeto de estudio.

No es nuestro objetivo en el marco de este escrito llevar a cabo una investigación de carácter ontológico acerca de lo que cada teoría física supone que *hay* en el mundo, sino atender a la manera en la que se *refiere* a aquellas entidades involucradas en la descripción y explicación de las interacciones entre los objetos, y de los fenómenos, cuya existencia se presupone en el contexto de cada teoría. Asumiremos que cada teoría es una de las posibles formas de entender el mundo y que para describir y explicar ese mundo, independientemente de cómo es el mundo realmente y de si es posible conocerlo, se dan por supuestas una serie de partículas, de interacciones entre ellas y de propiedades/magnitudes que – al menos eso se supone – poseen los objetos y

que permiten comprender los fenómenos que ocurren en el mundo. En nuestra investigación llevaremos a cabo una comparación y un análisis de la referencia de los términos que designan esas *magnitudes* que la teoría física asume.

El primer capítulo tiene como objetivo fundamental presentar la noción de magnitud física, caracterizar las magnitudes físicas en general y algunas de ellas en particular, atendiendo a su aparición en algunas teorías físicas; esas magnitudes son el espacio, el tiempo, la masa, el espín y la velocidad. Constataremos que las caracterizaciones de estas magnitudes presentes en distintas teorías son en algunos casos notablemente diferentes y en otros incluso incompatibles.

En el ámbito de la semántica los términos de magnitudes físicas han sido considerados como términos de género natural que denotan – obviamente – magnitudes físicas. En este primer capítulo se aceptará una caracterización muy genérica de este tipo de términos pero, dado que nuestro objetivo es examinar la referencia de los términos de magnitudes físicas, atenderemos a los rasgos involucrados en definiciones de distintas magnitudes físicas para un posterior examen de la referencia del tipo de términos que las designan.

En el segundo capítulo nos centraremos en una de las perspectivas relevantes en el estudio de la semántica y, en particular, de la referencia de los términos, a saber, el debate entre los distintos tipos de teorías de la referencia, especialmente entre la teoría *descriptiva* y la teoría *causal*, aunque también prestaremos atención a teorías *híbridas*. Las teorías de la referencia deben proponer explicaciones de los mecanismos mediante los cuales se determina o fija y se transmite la referencia de un término, por lo que estudiaremos en qué medida los tipos de teorías de la referencia mencionados resultan o no adecuados para el caso de los términos que nos interesan, a saber, los términos de magnitudes físicas.

A este respecto tomaremos en consideración, por un lado, las más importantes versiones clásicas de la teoría descriptiva, es decir, la de Frege y la de Russell, así como la versión contemporánea de la teoría descriptiva debida a Carnap y, por otro, las versiones de la teoría causal formuladas por Kripke y por Putnam. Entre estas teorías se encuentran algunas que toman explícitamente en consideración los términos de magnitudes físicas, como la de Carnap, y otras, como las de Kripke y Putnam, que han sido formuladas acerca de (todos) los términos de género natural, que incluyen, como hemos indicado, los términos de magnitudes físicas. No obstante, es también relevante atender a la posible extensión a estos términos de teorías formuladas no directamente acerca de ellos, como la teoría de los términos conceptuales de Frege y la teoría de los términos universales de Russell.

El último tipo de teorías de la referencia objeto de nuestra atención son las teorías híbridas. Estas teorías tienen un origen posterior a las anteriores y han sido propuestas con la intención de resolver problemas que presentan la teoría descriptiva y la teoría causal de la referencia, intentando combinar las virtudes de cada uno de estos dos tipos de teorías y al mismo tiempo superar sus posibles deficiencias.

En ese segundo capítulo también atenderemos a las ventajas y dificultades que presentan distintas versiones de los tipos de teorías mencionadas a la hora de explicar la referencia de los términos de magnitudes físicas, para lo que centraremos nuestras consideraciones en los términos “masa”, “espín”, “ímpetu” y “velocidad”.

En el capítulo tercero presentaremos dos tesis contrapuestas acerca del comportamiento de la referencia de los términos de magnitudes físicas en un contexto de cambio teórico, a saber, la tesis de la *inconmensurabilidad* referencial y la de la *inmutabilidad* de la referencia. Estas tesis involucran explicaciones del comportamiento de la referencia de los términos en un contexto de cambio teórico vinculadas a las

teorías de la referencia de los dos tipos más importantes examinados en el capítulo segundo, a saber, la teoría descriptiva y la teoría causal. Por este motivo atenderemos a la cuestión de cómo, dependiendo de la forma o mecanismo mediante el cual se suponga que se determina o fija y se transmite la referencia, se podrá optar por defender la tesis de la inconmensurabilidad referencial o una tesis opuesta.

En la parte final del capítulo tercero retomaremos los términos de magnitudes físicas a los que se prestó especial atención en el capítulo segundo, con objeto de alegar que las referencias de estos términos presentan distintos comportamientos en un contexto de cambio teórico y que, dado que las teorías de la referencia que se han presentado en el capítulo segundo no pueden explicar la totalidad de esos comportamientos, es necesario formular un tipo de teoría diferente. Alegaremos también que la referencia de un término de magnitud física cambia cuando se modifica *radicalmente* el mapa de relaciones que forma con el resto de las magnitudes involucradas en su definición inicial, y construiremos esquemas que nos permitirán analizar las relaciones que las magnitudes tomadas como ejemplos tienen con algunas otras magnitudes en el marco de distintas teorías.

En el capítulo cuarto presentaremos una teoría de la referencia para los términos de magnitudes físicas. Esta teoría nos permitirá explicar el modo en el que está determinada la referencia, el mecanismo mediante el cual se transmite y los distintos comportamientos que puede presentar la referencia de los términos de magnitudes físicas en un contexto de cambio teórico. Una vez presentada esta teoría analizaremos en qué sentido resulta superadora de las teorías de la referencia presentadas en el capítulo segundo. Por último se aplicará dicha teoría a los términos de magnitudes físicas analizados en los capítulos segundo y tercero.

CAPÍTULO 1: MAGNITUDES FÍSICAS

Este capítulo tiene como objetivo fundamental presentar la noción de *magnitud física*, caracterizar las magnitudes físicas en general y algunas de ellas en particular, atendiendo a su aparición en algunas teorías físicas; esas magnitudes serán el espacio, el tiempo, la masa, el espín y la velocidad. Constataremos que las caracterizaciones de estas magnitudes presentes en teorías diferentes son, en algunos casos, notablemente distintas y, en otros, incluso incompatibles.

1. Consideraciones sobre la noción de magnitud física

Conviene comenzar nuestras consideraciones sobre la noción de magnitud física presentando la división de los *conceptos científicos*.¹ Es usual dividir los conceptos científicos en clasificatorios, comparativos y métricos, cada uno de los cuales tiene su correspondiente estructura lógica.²

Los conceptos *clasificatorios* ubican un objeto dentro de una clase, es decir, sirven para clasificar los objetos de un dominio. La forma lógica de este tipo de conceptos es la de predicado monádico y su extensión es una clase o conjunto. Ejemplos de conceptos clasificatorios son sustantivos y adjetivos del lenguaje ordinario como “pájaro”, “árbol” o “alto”, pero estos conceptos no determinan unívocamente la clase de los objetos a los que se aplican, por lo que no son ejemplos de conceptos científicos. Las comunidades científicas suelen introducir conjuntos o sistemas de conceptos

¹ Los conceptos pueden considerarse como entidades abstractas – condición necesaria de todo conocimiento –. La relación entre los términos y los conceptos puede formularse indicando que los términos *expresan* conceptos.

² Esta clasificación es la llevada a cabo por Carnap (1966) y Hempel (1952). Véase también Mosterín (1984) y Díez/Moulines (1999).

clasificatorios – llamados *clasificaciones* – que deben cumplir ciertas condiciones formales de adecuación. De acuerdo con dichas condiciones, debe quedar perfectamente delimitado el ámbito o dominio D de individuos o elementos que se va a clasificar, a cada concepto clasificatorio debe corresponderle al menos un individuo de dicho dominio, ningún individuo puede caer bajo dos conceptos clasificatorios distintos y todo individuo del dominio en cuestión debe caer bajo alguno de los conceptos de la clasificación. Dado que la extensión de un concepto es la clase de los individuos a los que el concepto se aplica, cabe resumir las condiciones anteriores diciendo que toda clasificación debe constituir una *partición*³ del dominio D .

Los conceptos *comparativos* ocupan una posición intermedia entre los clasificatorios y los cuantitativos o métricos, y nos indican de qué manera se relaciona un objeto con otro. Para introducir un concepto comparativo que represente una propiedad que los individuos de un dominio D poseen en mayor o menor grado, es necesario definir dos relaciones – una de coincidencia y otra de precedencia – respecto de esa propiedad; es decir, dos relaciones que permitan indicar cuándo dos objetos del dominio D coinciden con respecto a esa propiedad y cuándo uno precede al otro respecto de ella. Este tipo de conceptos permiten, además de clasificar objetos, ordenarlos y compararlos, por lo que constituyen un paso para la posterior introducción de los conceptos métricos. Muchos conceptos científicos – pero no todos – son introducidos comparativamente antes de transformarse en conceptos métricos.

Por último, los conceptos *cuantitativos o métricos* son los más importantes desde el punto de vista de este trabajo, pues todos los términos de magnitudes físicas –

³ Una colección de conjuntos B es una partición de un dominio D si y sólo si cada uno de los conjuntos B es un subconjunto no vacío de D y si cada elemento de D es miembro de uno y sólo de uno de los conjuntos B .

o, para abreviar, de magnitudes⁴ – expresan conceptos de este tipo. Los conceptos cuantitativos o métricos asignan cantidades – escalares o vectoriales – a los objetos, procesos o fenómenos, por lo que permiten también comparar y clasificar objetos de un dominio. Los conceptos métricos como masa asignan números reales y son denominados *magnitudes escalares* y los conceptos métricos como velocidad asignan vectores, por lo que son denominados *magnitudes vectoriales*. Tales asignaciones de números reales o vectores resultan en muchos casos de cuantificar conceptos comparativos previos – como es el caso de los conceptos de masa o longitud – o de la introducción directa de un concepto métrico a partir de una teoría o como recurso de cálculo – como es el caso de la entropía o la función de onda –. Los conceptos métricos permiten tratar procesos o fenómenos empíricos como si fueran operaciones matemáticas y representar determinadas propiedades de los mismos, y de los objetos involucrados en ellos, denominadas *magnitudes*.

Se suele hablar indistintamente de *propiedades o magnitudes físicas*, aunque muchas veces resulta adecuado establecer una distinción, definiendo las magnitudes como aquellas propiedades o atributos que son susceptibles de medición.⁵ El siguiente ejemplo puede aclarar la relación entre propiedades y magnitudes físicas. La masa, así como la impenetrabilidad, son propiedades físicas de la materia y, por tanto, de los cuerpos. No obstante, la masa es también una magnitud física, ya que es posible, tras un proceso de medición, asignar un número que representa la *cantidad* de masa de un determinado cuerpo, mientras que la impenetrabilidad no es una magnitud, pues no se asigna a cada cuerpo un número que represente el *valor* de su impenetrabilidad. La

⁴ Aquí y a lo largo de todo el trabajo hablaremos en muchas ocasiones, para abreviar, de “magnitud” en vez de usar la expresión completa “magnitud física”.

⁵ Cabe señalar que esta caracterización no constituye la única forma posible de entender las magnitudes. En muchas ocasiones, sobre todo en el contexto de la mecánica cuántica, se entiende por propiedad de un sistema una magnitud más su valor numérico.

mencionada asignación de números puede hacerse de manera directa o indirecta, dependiendo de los procesos de medición que se utilicen.

A cada una de las magnitudes físicas se le asocia un concepto matemático que posea una “estructura análoga”, es decir, un concepto matemático que tenga las mismas leyes de composición y que se comporte de manera similar ante una transformación o cambio de sistema de referencia; en definitiva, un homomorfismo de un sistema empírico en un sistema numérico. Es importante señalar que una magnitud no es sólo su representación matemática. Los enunciados de leyes cuantitativas no contienen íntegramente las magnitudes físicas implicadas, sino sólo algunos de sus componentes, a saber, aquellos con los que resulta posible operar matemáticamente; dichos componentes son sus *variables numéricas*.

Aunque no toda relación es una magnitud, las magnitudes son – o pueden ser expresadas a través de – un tipo específico de relaciones binarias. Así por ejemplo, “ser tío de” expresa una relación, pero no una magnitud. Para que una relación sea una magnitud esta relación binaria debe ser comparativa del tipo “x es más o menos...que y”; más aún, las magnitudes son las propiedades relacionales comparativas que satisfacen algún grupo de condiciones de mensurabilidad, ya que no toda asignación de números es una medición. La metrización es el estudio de las condiciones que hacen posible una asignación numérica que exprese matemáticamente las relaciones que se dan entre los objetos por ejemplificar una propiedad; de este modo es la *metrización* la que establece estos diversos grupos de condiciones de mensurabilidad que debe cumplir una propiedad para ser una magnitud.

Hay autores que parecen no atender a la *distinción* entre propiedades y magnitudes físicas. Entre ellos Putnam (1970), quien utiliza indistintamente los términos “propiedad física” y “magnitud física”, pero sí distingue dos nociones de

propiedad. Por una parte, por “propiedad” cabe entender “predicado” y, por tanto, un tipo de término y, por otra, por “propiedad física”, “magnitud física” o “relación física”, se entiende un tipo de entidades que el autor concibe como extralingüísticas. Dentro ya de las propiedades físicas y atendiendo a una distinción que hace Feigl (1967) entre “físico” en un sentido amplio (aquello que tiene que ver con la causalidad, el espacio y el tiempo) y “físico” en un sentido más estrecho (sólo referido a los enunciados de la física), Putnam establece una diferencia entre las propiedades físicas en el sentido amplio de “físico” y aquellas que son propiedades físicas en un sentido estrecho de “físico”. (Posteriormente, en el apartado 2.2.2 del capítulo 3, atenderemos a la propuesta de Putnam acerca de la semántica de los términos de propiedades físicas en el sentido estrecho de “físico”).

Hemos señalado que las magnitudes pueden ser concebidas como cierto tipo de relaciones. Las magnitudes, concebidas como propiedades relacionales comparativas, pueden ser entendidas al menos de dos maneras. De acuerdo con lo que J. Díez y C.U. Moulines en (1999) denominan “concepción relacional”, una magnitud es una *propiedad relacional cualitativa* y, por tanto, no hay detrás de ella una propiedad absoluta cuantitativa. Las magnitudes, entendidas de esta forma, no existen en el mundo independientemente de nuestro sistema de representación. Esta concepción, que será la que asumiremos en este escrito por ser compatible con los aspectos que suponemos relevantes en la definición de toda magnitud física, supone que en el mundo hay ciertas cualidades que pueden ser cuantificadas siempre en relación a nuestro sistema de representación. Por otra parte, según lo que estos mismos autores denominan “concepción absoluta”, una propiedad relacional es un síntoma de una magnitud, de modo que una magnitud es una entidad existente (en sí misma) en el mundo, además de la propiedad relacional. Es decir, esta concepción considera primitivos los hechos

cuantitativos absolutos e interpreta a partir de ellos los juicios comparativos. De acuerdo con esta segunda forma de interpretar las magnitudes, existe, por ejemplo, una propiedad cuantitativa que es “tener 2 Kg de masa” y que resulta distinta de la propiedad cuantitativa “tener 6 Kg de masa” mientras que, según la primera de las concepciones mencionadas, ambas son modos de representar cuantitativamente la propiedad relacional cualitativa “ser (tan o) más másico que”.

Estas dos maneras de entender las magnitudes implican características distintas para la *referencia* de los términos de magnitudes físicas, pues no es posible atribuir a la referencia de un término de magnitud física las mismas características si se sostiene que la magnitud física en cuestión es una entidad existente en sí misma que si la suponemos dependiente de nuestro sistema de representación. Si consideramos que la magnitud depende del sistema de representación utilizado, dependerá también de este sistema la referencia del término de magnitud correspondiente y, por tanto, su referencia no estará fijada de antemano, sino que podrá variar según el marco o sistema de representación utilizado. Por el contrario, si a la magnitud observada o medida se le supone una existencia independiente de la propiedad relacional, la referencia del término de magnitud se mantendrá fija una vez definida la magnitud dentro del sistema correspondiente de representación.

Como se ha visto, no hay una única forma de concebir e interpretar las magnitudes físicas. Tampoco existe una única forma de clasificarlas; así las magnitudes pueden ser clasificadas con respecto a su estructura matemática, a la información necesaria para determinar su valor (además de una unidad, una o más cantidades dependiendo se si se trata de una magnitud escalar o vectorial), en relación con las particularidades experimentales asociadas a los distintos procesos de medición, respecto a la dependencia de su valor con la cantidad de material analizado al medirla o respecto

a las relaciones que establece cada magnitud con otras al ser definida. De acuerdo con esta última clasificación, entre las magnitudes físicas suelen distinguirse las magnitudes fundamentales⁶ de las magnitudes derivadas.⁷ Según Carnap (1966) esta distinción no debe considerarse básica en el tratamiento de las magnitudes, ya que es sólo una distinción basada en los procedimientos prácticos de los físicos para efectuar mediciones. Se consideran como magnitudes fundamentales aquellas que *no* son definibles mediante otras magnitudes y a partir de las cuales pueden derivarse otras magnitudes, pero no existe un único grupo de magnitudes de las cuales se deriven las restantes magnitudes, por lo que, según el sistema métrico que se utilice, las magnitudes que se consideren como fundamentales varían. Si X_1 y X_2 son magnitudes fundamentales o “de base” en un sistema métrico cualquiera, la ecuación dimensional de la magnitud derivada G en el mismo sistema es una combinación de estas magnitudes,⁸ es decir: $(G) = (X_1)^p (X_2)^q$

En relación con la distinción entre magnitudes fundamentales y magnitudes derivadas, Putnam sostiene en (1970) que *no* puede darse ninguna condición analítica necesaria y suficiente para que una magnitud sea fundamental y, en su opinión, la condición que los físicos utilizan para establecer esa distinción es, en todo caso, empírica, ya que es el resultado de un procedimiento de prueba-y-error. Al problema de no disponer de una condición analítica necesaria y suficiente para determinar si una magnitud es fundamental y no-derivada, se añade el problema consistente en que no toda magnitud definida en términos de magnitudes fundamentales tendrá necesariamente sentido empírico, es decir, no necesariamente será experimentalmente

⁶ En el sistema métrico internacional (SI), el sistema más utilizado actualmente, estas magnitudes son la masa, la longitud, el tiempo, la corriente eléctrica, la temperatura, la intensidad luminosa y la cantidad de sustancia (en este último sentido, por “mol” se entiende la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12).

⁷ Ejemplo de este tipo de magnitudes son la velocidad, la potencia, la fuerza, etc.

⁸ Los exponentes “p” y “q” son las dimensiones de cada una de las magnitudes fundamentales que constituyen la magnitud derivada.

relevante. No toda relación matemática entre dos magnitudes fundamentales proporcionará una nueva magnitud derivada que constituya una propiedad física distinta de otras y, a la vez, significativa en el sentido de aportar nuevos y relevantes datos acerca de un fenómeno.⁹ Así se convierte también en tema de debate la posibilidad de establecer un *criterio* para determinar si una magnitud derivada tiene o no sentido empírico.¹⁰

Para finalizar estas consideraciones sobre la noción de magnitud física, y tras las observaciones precedentes, querría señalar que en la *definición de una magnitud*, entendida – desde aquí y en adelante – *en un sentido amplio* (distinto del “sentido amplio” de Feigl) y no sólo en tanto representación matemática de una magnitud, deben quedar contenidos todos los aspectos relevantes de la misma. Estimo que éstos son cuatro. Por una parte, es necesario tomar en consideración el aspecto que denominaré *ontológico*, que contendrá una explicitación de cuál es la propiedad – o el tipo de propiedad – a la que se quiere asignar un valor numérico. Por otra parte, la asignación de un valor numérico a la propiedad a través de un proceso de medida, que incluye muchas veces otras magnitudes, hace necesario tener en cuenta tres aspectos más: el aspecto *experimental* de la magnitud, que explicita la relación que ha de suponerse entre la magnitud y el montaje experimental; el aspecto *formal o matemático*, expresable mediante una estructura matemática (o fórmula) que la represente, así como el aspecto *contextual*, es decir, la relación entre la magnitud y las demás magnitudes involucradas en la representación matemática y en el montaje experimental que permite medirla.

⁹ En cualquier caso, algo que sí parecería evidente de acuerdo con esta clasificación de magnitudes en fundamentales y derivadas, es que la referencia de un término que designa una magnitud derivada está determinada por la referencia de los términos que designan las magnitudes de las cuales ésta se deriva.

¹⁰ Actualmente se define como el producto de la masa por la velocidad aquello que antiguamente se consideraba una magnitud fundamental denominada cantidad de movimiento o momento lineal $p = m.v$, es decir, para muchos físicos el producto $m.v$ no constituye una nueva magnitud.

Presentaremos a continuación cinco magnitudes físicas prestando atención en cada una de ellas a algunos de los aspectos mencionados.

2. Cinco magnitudes: espacio, tiempo, masa, espín y velocidad

En este apartado no se pretende abordar detalladamente las distintas definiciones de las magnitudes de espacio, tiempo, masa, espín y velocidad, sino presentar brevemente las distintas *propiedades* que las distintas teorías físicas les atribuyen.¹¹ En el caso particular de las magnitudes de espacio y tiempo interesa especialmente, en el marco de este escrito, analizar el modo en el que las definiciones de estas magnitudes implican en una teoría determinados contextos matemáticos y experimentales para el resto de las magnitudes definidas o a definir.

2.1. Espacio y tiempo

2.1.1. Espacio y tiempo en la física clásica

Espacio y tiempo son considerados magnitudes fundamentales. Todos los fenómenos mecánicos se describen mediante sistemas de referencia basados en los conceptos de espacio y tiempo, de ahí que la forma en la que estas dos magnitudes sean definidas será determinante para las restantes magnitudes.

Las siguientes son las definiciones de “espacio” y “tiempo” formuladas por Newton en el escolio de los *Principia*:

- I. “El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza sin relación a nada externo, fluye uniformemente, y se dice con otro nombre duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior (precisa o

¹¹ Más detalles sobre estas magnitudes físicas pueden encontrarse en los siguientes textos. Véase en relación al contexto clásico Goldstein (2002), y Hecht & Zajac (2000) para la óptica; en relación al contexto cuántico Cohen-Tannoudji et al. (1977) y Griffiths (2005), y para la relatividad Einstein (1916).

desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por el vulgo en lugar del verdadero tiempo; hora, día, mes y año son medidas semejantes.”

- II. “El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil. El espacio relativo es alguna dimensión o medida móvil del anterior, que nuestros sentidos determinan por su posición con respecto a los cuerpos, y que el vulgo confunde con el espacio inmóvil; de esa índole es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo o celeste, determinada por su posición con respecto a la Tierra. El espacio absoluto y el relativo son idénticos en aspecto y magnitud, pero no siempre permanecen numéricamente idénticos; por ejemplo, si la Tierra mueve un espacio de nuestro aire, que relativamente y con respecto a la Tierra permanece siempre idéntico, el aire pasará en cierto momento por una parte del espacio absoluto y en otro momento por otra, con lo cual cambiará continuamente en términos absolutos.” (Newton 1687, p. 33)

Tal como puede observarse en las definiciones newtonianas de espacio y tiempo, a ambas magnitudes se les atribuyen las siguientes propiedades.

Al espacio y, por tanto, a la forma en la que podrá ser observado y medido (su métrica), se le atribuyen:

1. Independencia de los objetos en él inmersos. La métrica del espacio no se ve afectada por los mismos.
2. Invariancia a lo largo del tiempo.
3. Homogeneidad: el espacio es igual en todos los puntos, no existiendo puntos privilegiados. Esta homogeneidad del espacio conlleva que las leyes de la física tienen validez en todos los lugares del universo.
4. Isotropía: el espacio es igual en todas las direcciones, no existiendo direcciones privilegiadas. La isotropía del espacio se muestra en el hecho de que la orientación de los ejes de coordenadas, los cuales nos sirven de marco de referencia para analizar un fenómeno físico, es arbitraria. Dicha isotropía conlleva que si un experimento es efectuado en un laboratorio donde el montaje experimental tiene una cierta orientación espacial, los resultados obtenidos seguirán siendo los mismos si la orientación de todos los instrumentos, el sistema que se va a analizar y el medio ambiente se ven modificados.

El espacio se caracteriza por una métrica euclídea, lo que lo convierte en un espacio puntual euclídeo en 3 dimensiones, R^3 .

El tiempo se caracteriza a su vez por las siguientes propiedades:

1. Homogeneidad: en el tiempo no existen instantes privilegiados. La homogeneidad del tiempo, implícita en el hecho de que el origen del tiempo es completamente arbitrario, se refiere a la equivalencia entre dos instantes cualesquiera de tiempo, independientemente de en qué momento se tomen. El concepto de homogeneidad del tiempo se introduce en forma práctica al utilizar marcos de referencia donde el origen de coordenadas puede seleccionarse arbitrariamente.¹²
2. Fluye constantemente en un sentido, por lo que no se puede retroceder ni volver al pasado. Asimismo, los fenómenos futuros no pueden condicionar los presentes. No se cumple por tanto la isotropía, existiendo un único sentido en el que puede discurrir el tiempo.
3. Simultaneidad absoluta: Los fenómenos considerados simultáneos para dos observadores en sendos sistemas de referencia lo son asimismo para cualquier otro observador ligado a cualquier otro sistema de referencia.

En mecánica clásica, el tiempo se considera una variable de naturaleza distinta de las variables espaciales, y la métrica euclídea no está influenciada por él.

Es importante señalar que en el marco de la física clásica, además de concebirse el espacio y el tiempo como entidades existentes en forma independiente la una de la

¹² Una forma equivalente de expresar la homogeneidad del tiempo es afirmar que las leyes de la física son las mismas ahora que hace mil años. La aplicabilidad de este principio se verifica al observar los fenómenos que ocurren en estrellas o galaxias lejanas y usar los conocimientos de la física actual para interpretarlos. La información que llega del espacio exterior es radiación electromagnética, la cual fue emitida hace miles o millones de años, dependiendo de la distancia de la estrella o galaxia que estemos observando. Las conclusiones que pueden obtenerse están basadas en nuestro conocimiento actual de la física, y esto lleva implícito la suposición de que las leyes de la física hace miles o millones de años, cuando se emitió la radiación, son las mismas que las de ahora.

otra, se les atribuye a la vez el ser independientes también de la materia. La total independencia entre el espacio, el tiempo y la materia se manifiesta en la métrica del espacio euclídeo (de tres dimensiones), es decir en la regla para medir distancias en este espacio homogéneo e isótropo; la regla para medir distancias es siempre la misma, no importa dónde se coloque el origen de coordenadas ni cómo se lo oriente. La distancia ΔS entre dos puntos definidos por sus coordenadas cartesianas rectangulares $(x_1; y_1; z_1)$ y $(x_2; y_2; z_2)$ viene dada por:

$$\Delta S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \text{ y el tiempo absoluto.}$$

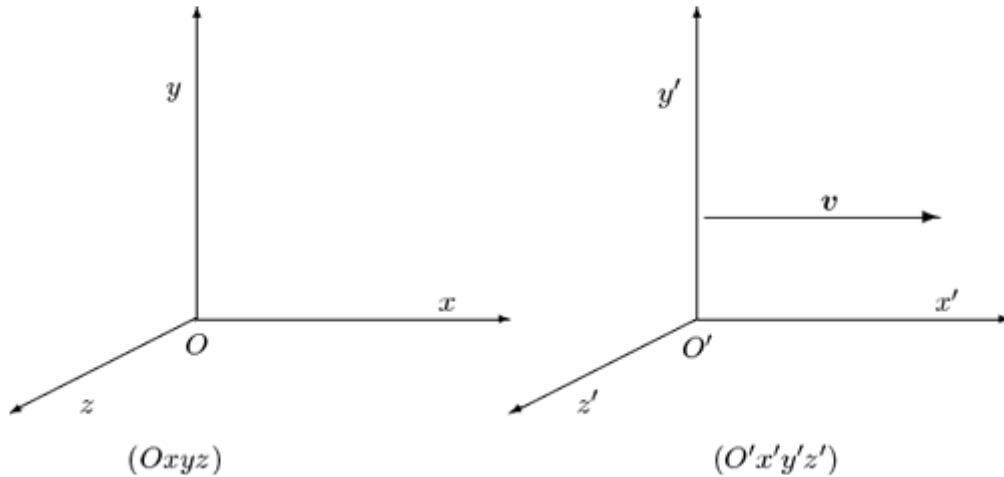
El espacio es, por tanto, plano y no depende ni del tiempo ni de la materia.

Las hipótesis de homogeneidad e isotropía del espacio, así como la homogeneidad del tiempo, son utilizadas permanentemente en toda la física clásica y conducen a las leyes de conservación sobre las que se apoya toda la física: conservación del momento lineal, del momento angular y de la energía. De esta manera a la definición de cualquier magnitud propia de la física clásica subyace la aceptación de estas propiedades mencionadas del espacio y del tiempo.

Los principios de la mecánica clásica, como el de la relatividad galileana,¹³ están basados en estos conceptos de espacio y tiempo absolutos. A este respecto es pertinente señalar que uno de los ejemplos presentados por Galileo es el de un observador viajando en un barco que navega plácidamente sobre un río, en contraste con un observador fijo en la orilla. Ambos observadores interpretan de la misma manera la caída de un cuerpo hacia el suelo en su propio sistema, que, como sabemos, sigue un movimiento vertical uniformemente acelerado. Estas concepciones de espacio y tiempo serán analizadas a través de las transformaciones de Galileo.

¹³ De acuerdo con este principio, dos sistemas de referencia en movimiento relativo de traslación rectilínea uniforme son equivalentes desde el punto de vista mecánico; es decir, los experimentos mecánicos se desarrollan de igual manera en ambos, y las leyes de la mecánica son las mismas.

Sea un sistema móvil ($O'x'y'z'$), que se traslada respecto a otro fijo ($Oxyz$) con velocidad v , manteniéndose paralelos los ejes de ambos sistemas de referencia en movimiento relativo rectilíneo y uniforme, con velocidad v en la dirección de Ox .



Puesto que podemos elegir las direcciones del triedro de referencia, elegimos la dirección Ox según la dirección de la velocidad de traslación (recordemos que el espacio es isótropo, por lo que es lícito elegir una orientación arbitraria para los ejes, sin pérdida de generalidad). Consideraremos también que inicialmente (para $t = 0$) O y O' coinciden. Sean (x, y, z) las coordenadas de un punto en el sistema fijo, (x', y', z') en el móvil y v el módulo de la velocidad.¹⁴ Las ecuaciones de transformación para las coordenadas son:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

¹⁴ A diferencia de las magnitudes escalares, las magnitudes vectoriales necesitan de tres componentes para ser definidas: módulo, dirección y sentido.

Derivando sucesivamente respecto del tiempo, obtenemos las velocidades y aceleraciones en ambos sistemas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}' = \dot{x} - v \\ \dot{y}' = \dot{y} \\ \dot{z}' = \dot{z} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}' = \ddot{x} \\ \ddot{y}' = \ddot{y} \\ \ddot{z}' = \ddot{z} \end{array} \right.$$

(Las derivadas primera y segunda respecto del tiempo se representan, respectivamente, mediante uno y dos puntos sobre las variables).

Se observa entonces que las aceleraciones, que vienen dadas por las derivadas segundas de las ecuaciones de las coordenadas, coinciden. Esto nos permite intuir – admitiendo como postulado el principio de la relatividad galileana – que las leyes de la dinámica están basadas en las derivadas segundas respecto del tiempo, ya que la única forma de que estas leyes sean invariantes es cumpliéndose dicho principio. Efectivamente, en este contexto, el estado de un sistema formado por una partícula en movimiento según una dirección fija se caracteriza, en un instante dado, por su posición y su velocidad (x, \dot{x}) . La evolución del movimiento viene gobernada por la ecuación dinámica $F = m \ddot{x}$.

Dado que en la concepción newtoniana se considera el espacio infinito, isótropo, homogéneo, inmutable y euclídeo, tomando el tiempo como una cantidad unidimensional, escalar y continua, se puede definir formalmente la velocidad de una partícula, respecto a un observador, como su cambio de posición en un cierto intervalo de tiempo: $v = \dot{r}$, donde \dot{r} representa la derivada del vector posición con respecto al tiempo. En esta definición de la velocidad se utilizan los atributos de espacio y tiempo que se acaban de mencionar, ya que implícitamente se está diciendo que la partícula se

puede ubicar en un punto de un espacio euclídeo y que se puede desplazar en forma continua a medida que transcurre el tiempo. Es decir, las leyes de movimiento dejan de tener sentido (ser válidas y aportar información relevante sobre un sistema) si las definiciones de espacio y tiempo no son las de Newton. Un ejemplo particular de ley de movimiento que dejaría de tener sentido es la primera ley de Newton,¹⁵ ya que sólo es válida cuando se mide desde un sistema de referencia que se encuentra en estado de reposo o de movimiento rectilíneo respecto al espacio absoluto. Las leyes de la mecánica de Newton son válidas en el espacio y tiempo absolutos, pero éstos no caen bajo el dominio de las experiencias medibles.

Aún con anterioridad al surgimiento de la relatividad especial, los conceptos de materia, espacio y tiempo de Newton fueron criticados, entre otros autores, por Huygens, Leibniz, Berkeley y Mach, que mantenían concepciones relativas de estas nociones. Tales concepciones se contraponían a las de Newton en el siguiente sentido: el espacio y el tiempo eran pensados más bien como conceptos construidos por el hombre y, en cierta medida, condicionados por la materia. En particular, a la idea de tiempo se llegaba mediante la comparación de movimientos; es decir, a partir de los cambios materiales en los objetos y en las posiciones de los objetos se podía elaborar la idea de tiempo. El movimiento se consideraba uniforme sólo cuando se comparaba con respecto a otro movimiento – ésta es la concepción que se tiene actualmente en la mecánica clásica –. Desde este punto de vista, la primera ley de la mecánica de Newton presupone la existencia de al menos un observador para el que las demás leyes son válidas. Este observador es llamado “inercial” y cualquier otro observador que se mueva con velocidad constante respecto de éste es también un observador inercial.

¹⁵ La primera ley de Newton se conoce como ley de inercia; de acuerdo con esta ley, todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme en tanto no se aplique sobre él una fuerza que lo obligue a modificar su estado.

Además de la formulación hasta aquí presentada, la mecánica newtoniana también puede ser expresada en términos de los métodos desarrollados por Hamilton.¹⁶ En las ecuaciones de esta formulación la coordenada t pertenece al espacio-tiempo y no es una variable dinámica y por tanto no debe ser tomada como operador en el paso hacia la mecánica cuántica.

2.1.2. Espacio y tiempo o espacio-tiempo en la física moderna: mecánica cuántica, relatividad especial y relatividad general

En la presente sección expondremos y examinaremos las definiciones de las magnitudes espacio y tiempo implícitas en las teorías no-clásicas, con el objeto de poner de manifiesto las diferencias y similitudes que existen entre éstas y las definiciones clásicas que ya hemos presentado en la sección anterior.

En la *mecánica cuántica* los observables pasan de ser funciones de las variables canónicas q y p a ser operadores y, a diferencia de la mecánica clásica, éstos ya no son función del estado. Así, por ejemplo, la energía se representa mediante el operador hamiltoniano H .

¹⁶ El *hamiltoniano* es una función H en términos de las coordenadas generalizadas del sistema (las variables q y p), que eventualmente puede depender del tiempo en forma explícita. Las variaciones de las coordenadas generalizadas en el tiempo están dadas por los corchetes de Poisson (operadores de la mecánica hamiltoniana a través de los cuales es posible establecer las leyes de conservación y las ecuaciones del movimiento de un sistema de manera más genérica):

$$\dot{q}_i = \{q_i, H\}, \quad \dot{p}_i = \{p_i, H\}$$

En el marco de esta formulación el espacio-tiempo utilizado generalmente consta de (3+1) dimensiones, caracterizadas por puntos (x, y, z, t) que deben ser distinguidos de las variables dinámicas q y p , que definen un estado. Si bien las relaciones que a veces se toman $q_x=x, q_y=y, q_z=z$, hacen pensar que estas dos variables poseen el mismo significado, las coordenadas (x,y,z) corresponden únicamente a un punto en el espacio, al que no se le asocia ninguna propiedad física y que puede ser ocupado por cualquier partícula de un determinado sistema, mientras que q corresponde a una asociación de ubicación espacial de una partícula puntual que posee masa, velocidad y aceleración, y por tanto un significado físico diferente al caso de las coordenadas (x,y,z) .

La evolución temporal de los sistemas cuánticos en la imagen de Schrödinger se describe mediante la siguiente ecuación lineal: $i\hbar \dot{\psi}(r,t) = H\psi(r,t)$, donde $\psi(r,t)$ representa el estado del sistema que se determina a partir de un estado inicial $\psi(r,t_0)$, H representa el operador energía, \hbar es la constante de Planck partida por el factor 2π e i es un número complejo tal que $i^2 = -1$.

La función $\psi(r,t)$ es un campo escalar, lo que significa que en un instante particular el estado está representado por el conjunto de todos los valores de la función en cada uno de los puntos r accesibles al sistema, y la probabilidad de encontrar la partícula en un instante t en un volumen dr alrededor de r viene dada por la expresión $|\psi(r,t)|^2 dr$. El estado del sistema puede no depender del tiempo, como sucede en la imagen de Heisenberg, donde el observable es descrito mediante un operador que varía con el tiempo, pero no así el estado.

La ecuación de movimiento para un observable A es: $i\hbar \dot{A} = AH - HA + i\hbar \partial_t A$, donde – como en el caso de la imagen de Schrödinger – H representa el operador energía, \hbar es la constante de Planck partida por el factor 2π e i es un número complejo tal que $i^2 = -1$.

Estas dos imágenes (las de Heisenberg y Schrödinger) son equivalentes, debido a que los valores esperados de los observables son los mismos en cada una, de tal forma que los resultados son independientes de la imagen que se esté usando. El paso de una imagen a la otra se hace mediante transformaciones unitarias que contienen el tiempo en forma explícita.

De lo anterior se sigue que el tiempo tiene en la mecánica cuántica un significado diferente del que tiene en la física clásica, ya que, dependiendo de la imagen, tanto el estado como el observable pueden depender del tiempo o no. Es decir,

se obtienen resultados iguales a través de ecuaciones que contienen o no al tiempo explícitamente.

Existe otra posible manera de examinar el papel del tiempo en la mecánica cuántica: mediante la relación de incertidumbre o indeterminación entre energía y tiempo $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$. En esta ecuación puede observarse que la energía del sistema es incierta en al menos una cantidad $\Delta E \geq \hbar/2\Delta t$, donde Δt es el intervalo de tiempo disponible para la determinación de la energía y, por lo tanto, Δt no se puede interpretar como una incertidumbre en el tiempo. Como consecuencia de esto se podrían presentar restricciones sobre los aparatos de medición, en el sentido de que no se puede saber con absoluta precisión qué sucede en el tiempo de resolución del aparato con los posibles valores de energía por los que pasa el sistema. Sin embargo, esta relación de incertidumbre es construida de manera poco rigurosa, ya que formalmente las relaciones de incertidumbre se dan para un conjunto de observables incompatibles. En este caso el tiempo no es considerado un operador, sino un parámetro real.

Cabe señalar que así como la segunda ley de Newton es invariante bajo inversión temporal y esta inversión no está afectada por la medida, en la mecánica cuántica la ecuación de Schrödinger es también invariante bajo inversión temporal, pero el acto de medición rompe esta simetría debido a la reducción del paquete de onda.¹⁷ Esto último representa uno de los postulados de la teoría, que afirma que al medir un observable sólo se pueden obtener *algunos* de los valores propios del mismo y que

¹⁷ De acuerdo con la teoría cuántica ortodoxa, cuando se quiere verificar experimentalmente la evolución de un sistema microfísico se introduce una perturbación en el sistema que modifica su evolución. A esta perturbación se la conoce como reducción del paquete de ondas y con ésta se alude a que la interferencia del observador reduce las ondas de probabilidad y concreta alguna de ellas, materializando la realidad que, antes de la observación, sólo estaba definida como ondas probabilísticas.

inmediatamente después de la medida el sistema queda en el estado propio correspondiente al valor propio encontrado.

En el cambio del contexto de la mecánica clásica al de la cuántica, los observables se convierten en operadores, pero el tiempo no puede ser tratado como tal y sigue siendo un parámetro. Esto conduce a una interpretación de la relación de incertidumbre entre energía y tiempo diferente de las otras relaciones de incertidumbre entre variables canónicamente conjugadas entre sí. En la mecánica clásica el estado puede ser función del tiempo y los observables son función del estado; en la mecánica cuántica la dependencia temporal del estado y de los observables depende de la imagen, y los observables no son función del estado cuántico.

En el cambio del contexto de la mecánica clásica al de la *relatividad especial*, los cambios en la concepción del espacio y del tiempo son más profundos. Algunos de los postulados básicos de la mecánica clásica respecto del espacio y el tiempo ya no son aceptados en el contexto de la mecánica relativista. La teoría de la relatividad especial o restringida establece una referencia en cuatro dimensiones espacio-tiempo proponiendo por tanto una estructura distinta de la clásica.

En (1905) Einstein, intentando salvar las dificultades encontradas en los experimentos para detectar el éter, propone la hipótesis de que la luz se propaga con rapidez constante, independientemente del observador y de la fuente. Esta hipótesis, que trajo consigo un cambio radical en la concepción de las magnitudes espacio y tiempo, constituye uno de los supuestos fundamentales de la teoría de la relatividad especial. De esta manera en la física relativista el espacio y el tiempo quedan ligados indisolublemente y la relación entre ellos depende de las velocidades relativas entre los observadores. Es decir, el espacio y el tiempo absolutos de Newton fueron reemplazados por un nuevo absoluto: el espacio-tiempo relativista. Sin embargo, el

nuevo espacio-tiempo no pierde con esta transformación su carácter de escenario inmutable en donde suceden los fenómenos físicos: el espacio-tiempo es, en el marco de esta teoría, sede de los fenómenos, pero no es modificado por ellos.

En la teoría de la *relatividad especial* el espacio y el tiempo están conectados de forma inseparable; es un espacio de cuatro dimensiones y la geometría que lo describe es la geometría de Minkowski. La ecuación que permite medir “distancias” o pseudo distancias viene dada por:

$$\Delta S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - (t_2 - t_1)^2}$$

En esta ecuación se puede observar la conexión entre tiempo y espacio.

Analizaremos por último las concepciones de espacio y tiempo en el contexto de la *relatividad general*. Es en 1916, con la relatividad general, cuando Einstein propone un espacio-tiempo que se ve modificado por los fenómenos que en él ocurren. En esta nueva teoría el espacio, el tiempo y la materia quedan unidos de forma inseparable. La presencia de materia deforma el espacio y el tiempo, con lo que el espacio-tiempo no es independiente de los objetos en él inmersos.

En la teoría de la gravitación de Einstein el formalismo que describe la estructura espacio-tiempo es la geometría Riemanniana. Se establece entonces un espacio curvado, con métrica Riemanniana no Euclídea, debido a la presencia de masas que la condicionan. Dicha métrica está dada por: $ds^2 = \sum_{\mu=1}^4 \sum_{\nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, siendo ds^2 el cuadrado de la distancia entre dos puntos cuyas coordenadas en el espacio-tiempo son (x, y, z, t) y (xdx, ydy, zdz, tdt) . Se ha usado x^μ con $\mu=1,2,3$ y 4 para las componentes x, y, z y t respectivamente. Las cantidades $g_{\mu\nu}$ son las componentes del tensor métrico y dependen de cómo están distribuidas la materia y la energía en el espacio. En la ecuación anterior se aprecia la interrelación espacio-tiempo-materia.

La relatividad general es a la vez la teoría relativista del campo gravitatorio y también la teoría en la cual desaparece el privilegio, sin origen aparente, de los laboratorios inerciales (según Newton, aquellos que se trasladan con movimiento rectilíneo y uniforme respecto del espacio absoluto). En la física newtoniana, la descripción de los fenómenos desde un sistema no inercial (por ejemplo, un laboratorio que rota respecto del espacio absoluto) requiere la inclusión de fuerzas ficticias, en el sentido de que no son debidas a una interacción; un ejemplo de ellas es la fuerza centrífuga. Estas fuerzas son proporcionales a la masa, como lo es la fuerza gravitatoria. Este hecho bien conocido le sugirió a Einstein que ambos tipos de fuerzas – las ficticias de los sistemas no inerciales y las gravitatorias – podrían tratarse como un único campo gravitatorio/inercial. Además, de acuerdo con el principio de relatividad general, la formulación relativista de la gravedad también respondería al problema del privilegio de los sistemas inerciales, en el sentido de que se podrían formular las leyes de la física de manera que fuesen válidas en cualquier laboratorio.

Para formular su teoría del campo gravitatorio-inercial, Einstein propuso una nueva forma de entender la estructura espacio-tiempo. Para ello, los fenómenos gravitatorios dejaron de modelarse mediante la acción de fuerzas provenientes de cuerpos masivos, para ser vistos como la consecuencia de cambios en la geometría del espacio-tiempo que no está ahora predeterminada, sino que se modifica por la presencia de esos mismos cuerpos. Einstein considera que las propiedades euclidianas atribuidas a la geometría del espacio (o sea, un espacio plano donde dos rectas paralelas nunca se corten) son tan sólo el reflejo de nuestra experiencia limitada a regiones pequeñas comparadas con escalas cosmológicas y alejadas de altas concentraciones de materia. No sólo las propiedades métricas del espacio, sino también la relación entre la marcha de un reloj y el curso de la coordenada temporal resultan modificadas por la

distribución de materia y energía, lo que también puede verse como un efecto geométrico sobre la coordenada temporal.

En ausencia de fuerzas, los cuerpos siguen las trayectorias inerciales (las geodésicas) del espacio-tiempo curvado. Así, por ejemplo, el Sol curva el espacio-tiempo, y las órbitas de los planetas son las trayectorias naturales en esa geometría espacio-temporal curvada. Einstein, en el contexto de esta teoría, considera que no sólo las distancias y los intervalos de tiempo no son absolutos, sino que el espacio-tiempo no es un escenario inmutable donde ocurren los fenómenos: el espacio-tiempo participa en los fenómenos. Así la geometría del espacio-tiempo desempeña en este contexto un papel distinto en la dinámica: es modificada por, y modifica, la distribución de materia y energía.

Las ecuaciones de Einstein para el campo gravitacional¹⁸ tienen la siguiente forma: $R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = K T_{\mu\nu}$, donde $K = 8\pi G$. La expresión $R_{\mu\nu}$ es el tensor de curvatura de Ricci, $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico, R es el escalar de curvatura de Ricci y representa la curvatura del espacio y $T_{\mu\nu}$ es el tensor de energía y depende de la distribución de materia y energía. El miembro izquierdo de la ecuación se refiere a la geometría del espacio-tiempo y el miembro derecho a la distribución de masa y energía en ese espacio.

La idea central detrás de estas ecuaciones es que la materia causa que el espacio se curve y suele expresarse, en la literatura de divulgación, de la siguiente forma: curvatura del espacio-tiempo = densidad energética de la materia. De este modo el espacio, el tiempo y la materia no existen de forma independiente el uno del otro, sino que se entrelazan en lo que suele denominarse “la estructura de la realidad”.

¹⁸ Son ecuaciones diferenciales parciales no lineales, de una gran complejidad. No existe un método general para resolverlas y la primera solución fue obtenida por Schwarzschild en 1916, para el caso del espacio “vacío” exterior a una estrella sin rotación y de simetría esférica.

2.1.3. Esquema

Propiedades atribuidas en distintos contextos a las magnitudes de espacio y tiempo:

Contexto	Magnitud	
	Espacio	Tiempo
Mecánica Clásica	Absoluto, homogéneo, isótropo, constante en el tiempo, independiente de los objetos en él inmersos. Geometría euclídea.	Homogéneo, fluye de manera constante pero en un único sentido; simultaneidad absoluta. La métrica euclídea no se ve afectada por él.
	Espacio-tiempo	
Relatividad especial	Espacio y tiempo se integran en una única estructura. Dependiente del observador e independiente de los fenómenos que en él ocurren. Estructura de 4 dimensiones descrita por la geometría de Minkowski	
Relatividad general	Estructura espacio-tiempo. Dependiente de la masa de los objetos en él inmersos Estructura descrita por la geometría de Riemann.	

2.2. Masa

2.2.1. La magnitud masa en la mecánica clásica

Suele considerarse a la masa de un cuerpo como una magnitud de base o fundamental; es una magnitud – como espacio y tiempo – no definible a partir de otras magnitudes físicas y mediante la cual se definen otras magnitudes. Ya en el marco de la mecánica clásica es posible encontrar distintas concepciones de la masa, lo que no implicaría

necesariamente que el término “masa” se refiriese a conceptos distintos, pues podría ocurrir que cada una de estas concepciones pusiese especial énfasis en propiedades diferentes – no necesariamente opuestas, sino complementarias – de dicha magnitud. Carnap sostiene en (1966) que es preferible concebir la masa de un cuerpo, al menos en el contexto de la física clásica, como un 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 cuerpos materiales y es aplicada a un conjunto R de números reales. De este modo, 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, $M_c: C \times U_M \rightarrow \mathbb{R}^+$

Las definiciones parciales del concepto de masa pueden ser de diversos tipos. Dentro de las definiciones que recogen el aspecto ontológico de una magnitud – véase la sección 3.1. de este capítulo –, y a las que cabría denominar *ontológicas*, conviene señalar que Newton inicia los *Principia* definiendo 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” (1687, p. 121).¹⁹ 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 cuerpo y no se diferencia en nada de la inercia de la

¹⁹ Falkenburg sostiene en (1997) que esta definición de Newton del concepto de masa necesita de un concepto de densidad entendido como cantidad de átomos por volumen.

masa” (1687, p. 122).²⁰ Pero también se encuentra una importante alusión a 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” (1687, p. 635). Es decir, las tres concepciones de la masa que se pueden encontrar aquí son “cantidad de materia”, “inercia” y “masa gravitatoria”, cada una de las cuales posee una diferente definición formal.

El segundo tipo de definiciones de una magnitud que vamos a presentar es el que recoge el aspecto contextual de una magnitud – véase la sección 3.4. de este capítulo – y a las que cabe denominar definiciones *contextuales*. Comenzaremos por aquellas que suelen denominarse *operacionales*. Estas definiciones proporcionan una forma de definir una magnitud a través de algún procedimiento de medida. La primera de las definiciones mencionadas que Newton hace de la magnitud masa puede entenderse como una definición operacional, pero, aunque Newton no lo especifica en su definición, ésta se basa en conceptos que se refieren a átomos, es decir, a entidades atómicas inobservables que resultaban empíricamente inaccesibles en aquellos tiempos. Esta definición no sólo no proporciona un método experimental para medir la masa, 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 una nueva definición que proporcionaba un método para medir dicha magnitud: “la razón de la masa de dos cuerpos es la razón inversa negativa de las aceleraciones mutuamente inducidas por dichos cuerpos” (Mach 1883, p. 218). Así, la masa de un cuerpo cualquiera referida a la masa de un objeto patrón p cuando ambas interactúan formando un sistema aislado, queda definida así:

²⁰ Por “cuerpo” se entiende 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” (1687, p. 121).

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

Conuerdo con Falkenburg (1997, p. 478) en que esta definición de masa tampoco es estrictamente operacional – ya que sólo permite medir el cociente entre dos masas –, pero hace posible definir un concepto relacional que tiene la ventaja de que sus unidades están empíricamente dadas. A tenor de lo anterior, algunas de las ecuaciones de la mecánica clásica en las que se ve involucrada la masa, y las relaciones de ésta con otros conceptos, pueden ser concebidas como definiciones operacionales, mientras que otras sólo permiten comprender otros aspectos de la extensión del término más allá de los involucrados en las definiciones que hemos denominado “ontológicas”.

De acuerdo con la segunda ley de Newton, la masa inercial puede ser determinada en función de una fuerza conocida aplicada a un cuerpo x y de la aceleración que ésta le produce a dicho cuerpo, y viene definida mediante la siguiente fórmula:

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

Pero de acuerdo con la ley de gravitación universal, es posible determinar la masa de un cuerpo x midiendo la fuerza gravitatoria que sobre dicho cuerpo ejerce la tierra. Es posible entonces obtener otra expresión matemática a través de la cual determinar la masa de un cuerpo:

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

En opinión de Eisntein, “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” (1936, 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. En el primer caso se trata de una medida de la resistencia que tienen los objetos a cambiar su estado de movimiento cuando se les aplica una fuerza: la masa inercial de un cuerpo es la constante de proporcionalidad que surge de la relación entre las fuerzas que se aplican al cuerpo y las aceleraciones que cada una de estas fuerzas provoca en el mismo. Por el contrario, en el segundo caso se trata de una propiedad de la materia en virtud de la cual dos cuerpos se atraen. El hecho de que ambas magnitudes coincidan numéricamente no es una condición que se siga de sus definiciones; de hecho, se ha comprobado experimentalmente que son numéricamente iguales, pero podrían no haber coincidido.

Es una cuestión importante la de si toda magnitud física debe poder definirse mediante un proceso específico de medición o si, por el contrario, este tipo de definiciones – las operacionales – son sólo una herramienta útil para la atribución de un significado físico a los conceptos métricos. En todo caso, de la definición misma de la noción de magnitud física se sigue que tal tipo de magnitud debe poder medirse al menos mediante un proceso de medición específico, que involucre procesos distintos a los utilizados para otras magnitudes. Pero también parece seguirse de ella que el significado físico de una magnitud no puede estar determinado sólo por su proceso de medición específico ya que, de ser así, una simple variación o una mejora técnica en el proceso de medición de una magnitud, transformaría dicha magnitud en otra.

En todos los casos anteriores la masa clásica, por entenderse como independiente de la posición y del movimiento del cuerpo con respecto al sistema de referencia elegido, se concibe 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.

2.2.2. La magnitud masa en el marco de la relatividad especial

La definición de la magnitud masa 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.²¹

Como hemos señalado anteriormente, 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 cual se los está observando. El dominio del concepto de masa en física relativista es el producto cartesiano del conjunto C por el conjunto F de marcos de referencia y el conjunto U_M : $M_r: C \times F \times U_M \rightarrow \mathbb{R}^+$. 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 el concepto de masa pierde su universalidad.

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

²¹ Andrés Rivadulla, tanto en (2003) como en (2004), 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 cual la masa aparece desvinculada de la velocidad. No obstante, en mi opinión, esto no constituye 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 cual la velocidad no aparece explícitamente no implica necesariamente que no exista tal dependencia.

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:

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

Pero también puede determinarse mediante 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):

$$m = E/v^2, \tag{a}$$

$$m = p/v, \tag{b}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{c}$$

2.2.3. Usos del término “masa”

Como se ha indicado, 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 es la relatividad especial, se sigue utilizando el término “masa”, pero para hacer referencia a una magnitud que, al menos en principio, parece muy distinta de la magnitud clásica.

Respecto del lenguaje matemático utilizado en uno y otro marco podemos constatar 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 la masa como el cociente entre la fuerza neta aplicada a un cuerpo y la aceleración que dicha fuerza produce en el cuerpo. De manera similar puede definirse operacionalmente la masa en el marco de la teoría de la relatividad especial como el cociente entre una fuerza 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. En la bibliografía sobre esta temática – véase nota 11 *supra* –, 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 especial, se sustenta la demostración en el aspecto formal de la magnitud masa, alegando 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 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. En base a que el

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

No obstante, ya hemos señalado que, en el contexto de la relatividad especial, la masa de un cuerpo se concibe como una magnitud equivalente a la energía y dependiente del estado de movimiento de dicho cuerpo. Estas nuevas caracterizaciones no son sólo distintas de las clásicas, sino que son también incompatibles con respecto a aquéllas. 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.

En muchas ocasiones se ha intentado asimilar la masa newtoniana sólo a 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 y que es análogo al principio de conservación de la masa en la mecánica clásica. Como ejemplo de problema que se deriva de asimilar la masa newtoniana sólo a la masa en reposo relativista consideremos la aniquilación de un par electrón–positrón dando lugar a dos fotones. Supongamos al par electrón–positrón inicialmente en reposo. De acuerdo con la interpretación tradicional, la masa total se mantiene constante y con valor igual al doble de la masa del electrón en reposo $2m_{e0}$, (donde m_{e0} es la masa del electrón en reposo), pero la masa total en reposo no se conserva.

Muchas de las diferencias en la definición de la magnitud masa pueden observarse al comparar la magnitud en el contexto clásico y en el contexto de la relatividad especial, tal como se ve en el cuadro comparativo de la página siguiente. Fuera del cuadro queda una de las propiedades atribuida a la masa en el contexto de la relatividad general, que supone una diferencia muy significativa con respecto a los demás contextos. La cuestión, que ya ha sido mencionada al revisar distintas definiciones de espacio y tiempo, es la siguiente: la presencia de objetos con masa

afecta a la estructura espacio-tiempo propuesta por la relatividad general y esta estructura modifica el movimiento de dichos cuerpos.

2.2.4. Esquema

Propiedades atribuidas en distintos contextos a la magnitud masa:

Masa

Contexto
Clásico

Cantidad de materia o sustancia que posee un cuerpo u objeto material, en relación directa con la capacidad que el cuerpo posee para resistirse a un cambio en su estado de movimiento y proporcional a la gravedad a la que están sometidos todos los cuerpos. Es una propiedad escalar y universal de los cuerpos independiente de la posición y del estado de movimiento de los mismos.

Es posible atribuir a los objetos un valor escalar m , mediante algún procedimiento experimental que podrá ser determinado en relación con un objeto patrón. Los valores asignados cumplen las propiedades de aditividad, transitividad e independencia del patrón.

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

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

Contexto
Relativista

La masa y la energía de un cuerpo (de una partícula) son dos formas de presentación de un mismo fenómeno. No son propiedades medibles diferenciadas, sino magnitudes equivalentes. 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 del 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 cual el objeto se mueve con velocidad v .

La masa de un cuerpo es una propiedad escalar que depende del estado de movimiento del mismo.

Es posible atribuir a los objetos un valor escalar m . Dicho valor cumple las propiedades de aditividad, transitividad e independencia del patrón.

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

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

2.3. Espín

En el marco de la mecánica clásica un cuerpo rígido admite dos tipos de momentos angulares. Uno de ellos es el momento angular orbital, $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, donde \vec{r} es el vector posición y \vec{p} es el vector cantidad de movimiento o momento lineal asociado al movimiento del centro de masa del cuerpo. El otro suele denominarse, en algunos textos,²² espín o momento angular de espín, $\vec{S} = I\vec{\omega}$, donde I es el tensor de inercia en el caso de un sólido rígido y el momento de inercia en el caso de partículas, y $\vec{\omega}$ es la velocidad angular, asociada con el movimiento alrededor del centro de masa.²³ Si bien en este contexto el espín es simplemente la suma total del momento angular orbital, en el contexto de la mecánica cuántica la distinción entre el momento angular orbital y el espín es fundamental: las partículas elementales tienen un momento angular intrínseco S además de un momento angular extrínseco L . Aunque L puede ser descrito a través de esféricos armónicos, S , al no estar relacionado con un movimiento en el espacio, no puede ser descrito por una función de las variables de posición. En el contexto cuántico para determinar por completo el estado de una partícula deben darse no sólo sus coordenadas sino también la dirección del vector espín.

²² Cabe señalar que no todos los textos de mecánica clásica utilizan el término “espín” para referirse al movimiento alrededor del centro de masa y que algunos, por ejemplo, Goldstein (2002), lo utilizan entrecomillándolo con el fin de hacer notar el exceso cometido en tal designación. Más frecuente resulta la utilización de este término, aplicado al movimiento antes mencionado, en textos introductorios de mecánica cuántica como por ejemplo Griffiths (2005) y Landau & Lifshitz (2001) con fines didácticos (véase la nota siguiente).

²³ El ejemplo más citado en la bibliografía introductoria sobre el espín es el siguiente: la Tierra tiene un momento angular atribuible a su revolución de período un año alrededor del Sol y un momento angular de espín que proviene de su rotación diaria sobre su propio eje norte-sur. También el electrón tiene, en el caso del átomo de hidrógeno, además de su giro alrededor del núcleo atómico, otro momento angular que nada tiene que ver con un movimiento en el espacio, pero que es similar al espín clásico.

El espín²⁴ es así una propiedad atribuida al electrón y a otras partículas elementales en el marco de la física moderna. Será considerado como una magnitud, y no solamente como una propiedad, en el sentido de que es posible atribuirle un valor numérico que la represente, aunque en este caso particular los valores adjudicables sean sólo (como se explicará más adelante) $2S + 1$, y a pesar de que sea aún hoy muy discutible la posibilidad de medir esta propiedad. Según sostenían Bohr y Pauli, el espín no puede ser medido al menos mediante experimentos clásicos. Se han diseñado algunos experimentos con la intención de refutar dicha tesis de Bohr y Pauli, pero, tal como se afirma en Morrison (2007), hay una serie de ambigüedades a tener en cuenta en torno a los resultados obtenidos mediante ellos.

Como se ha indicado, el espín es una magnitud física atribuida a las partículas subatómicas, definida como el momento angular intrínseco de valor fijo, como la masa o la carga eléctrica, que tiene toda partícula elemental. Así, aunque el número cuántico²⁵ l que describe el momento angular orbital puede tomar cualquier valor entero y cambiar de un valor a otro si el sistema es perturbado, cada partícula elemental tiene un valor específico e inmutable de espín: piones tienen $S = 0$, los electrones $S = \frac{1}{2}$, los fotones $S = 1$, deltas $S = \frac{3}{2}$ y gravitones $S = 2$.

El formalismo matemático necesario para describir la magnitud espín en el marco de la mecánica cuántica²⁶ está basado en dos constructos: funciones de onda o función de estado y operadores. También cabe señalar que el contexto experimental cuántico en el que es posible trabajar con esta magnitud está basado en el carácter

²⁴ El espín fue descubierto experimentalmente en 1921 por Stern y Gerlach, pero no fue introducido hasta 1925 por George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit para explicar las características de los espectros de átomos con un solo electrón y siguiendo la idea de que el electrón tiene un movimiento de rotación.

²⁵ Los números cuánticos denotan los valores de las variables dinámicas que se conservan en los sistemas cuánticos y caracterizan los estados propios de los electrones. Son los cuatro números siguientes: n (número cuántico principal), l (número cuántico de momento angular), m (número cuántico magnético) y s (número cuántico momento de espín).

²⁶ Véase el Apéndice a este capítulo.

discontinuo en la interacción entre el objeto o fenómeno a medir y el instrumento con el que se efectúa la medición.²⁷

2.3.1. Esquema

Espín

Contexto Clásico	Magnitud asociada con el movimiento alrededor del centro de masa. En este contexto el espín no es nada más que la suma total del momento angular orbital.
Contexto Moderno	Propiedad de los electrones y otras partículas subatómicas. Valor fijo. En el contexto de la mecánica cuántica la distinción entre el momento angular orbital y el espín es fundamental: las partículas elementales tienen un momento angular intrínseco S además de un momento angular extrínseco L . El espín no está relacionado con un movimiento en el espacio, por lo que no puede ser descrito mediante una función de las variables de posición.

2.4. Velocidad

A diferencia de la masa, la velocidad es una magnitud derivada, ya que la velocidad de un objeto puede definirse como la variación en la posición de dicho objeto en función de la variación temporal. Es decir, como una relación entre otras magnitudes. Así la velocidad media de un objeto puede expresarse como $v = \Delta x / \Delta t$ y la velocidad instantánea como $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta x / \Delta t$ o $v = dx / dt$. Para definir la velocidad de un objeto debe considerarse no sólo la distancia que éste recorre o el cambio de su posición por

²⁷ Véase en el Apéndice a este capítulo el apartado “El experimento de Stern-Gerlach”.

unidad de tiempo, sino también la dirección y el sentido del desplazamiento, por lo cual la velocidad se expresa como una magnitud vectorial.

Por ser la velocidad una relación entre el espacio y el tiempo,²⁸ las propiedades que se le atribuyen a esta magnitud en cada contexto vienen determinadas por el tipo de estructura espacio-tiempo que supone cada teoría física. Así, como sucede con toda magnitud derivada, la forma en la que se la represente matemáticamente o la forma en la que se la pueda medir está sujeta a las de las magnitudes mediante las que se la define.

La velocidad en mecánica relativista se define de manera muy similar a como se hace en mecánica clásica: $v^i = dx^i/dt$. Así la velocidad (cuadrivelocidad) de una partícula es la derivada temporal de las coordenadas de posición respecto del tiempo propio de dicha partícula. Pero algunas de las propiedades que se desprenden de la nueva definición son distintas. Por una parte, la velocidad (cuadrivelocidad) no es proporcional al momento lineal, aunque sí lo es al cuádrimomento lineal. Por otra parte, la velocidad medida por diferentes observadores inerciales no tiene una ley de transformación matemáticamente tan sencilla como en el caso de la mecánica clásica.

En el contexto de la mecánica cuántica (no relativista), dado que el estado de una partícula se describe mediante una función de onda $\psi(x)$ que satisface la ecuación de Schrödinger, la velocidad de propagación media de la partícula viene dada por la

$$\text{expresión } v = \frac{i\hbar}{2m} \left(\frac{\nabla \psi^*}{\psi^*} - \frac{\nabla \psi}{\psi} \right).$$

²⁸ Dado que ya se han presentado las propiedades principales de las magnitudes a través de las cuales se define la velocidad en el marco de distintas teorías físicas, la presentación que aquí hacemos de esta magnitud es breve y sólo se desarrollarán algunas de sus características específicas en el capítulo 3.

2.4.1. Esquema

Velocidad

Contexto Clásico	Magnitud derivada definida – para un objeto – como la variación en la posición de dicho objeto en función de la variación temporal. Magnitud vectorial que puede representarse matemáticamente como la derivada de la posición respecto del tiempo.
---------------------	---

Contexto Moderno	Magnitud derivada que expresa un tipo particular de relación entre la posición y el tiempo. La velocidad (cuadrivelocidad) de una partícula se representa matemáticamente como la derivada temporal de las coordenadas de posición respecto del tiempo propio de dicha partícula.
---------------------	---

3. Aspectos relevantes en la definición de una magnitud física

La *definición* de una magnitud física, entendida ésta en el sentido amplio que hemos indicado al inicio del presente capítulo – página 17 – involucra una serie de aspectos relevantes. Las observaciones precedentes acerca de las magnitudes físicas de espacio, tiempo, masa, espín y velocidad, han evidenciado que para definir *completamente* una magnitud no basta su representación matemática, sino que resulta necesario tener en cuenta una serie de aspectos. Dichos aspectos, lejos de tener algún orden jerárquico, parecen estar en relación de mutua dependencia a la hora de dar cuenta de las distintas propiedades de una determinada magnitud. Se dejará para el capítulo 3 el estudio de las relaciones existentes entre estos distintos aspectos, por lo que en lo siguiente sólo serán presentados y analizados separadamente.

3.1. Aspecto ontológico

Cuando se define una nueva magnitud, con esa definición se quiere describir generalmente una regularidad/característica que se ha observado en un determinado conjunto de entidades o que permitirá explicar algún determinado fenómeno. El aspecto de una magnitud al que llamaremos *ontológico* es el correspondiente a la parte de la definición de una magnitud que pretende acotar aquello que la magnitud *es*, sin contener obligatoriamente toda la información necesaria y suficiente para una precisa identificación de la regularidad/característica que se desea especificar. Es decir, este aspecto de la definición sólo delimita alguna propiedad con independencia de la forma en la que la magnitud podrá ser luego medida y con independencia también de las relaciones que pueda establecer con todas y cada una de las restantes magnitudes definidas en una determinada teoría. Ejemplos de este aspecto de una definición pueden ser las definiciones de la magnitud masa como la cantidad de materia que posee un cuerpo, como capacidad de los cuerpos a cambiar su estado de movimiento o como propiedad en virtud de la cual los objetos se atraen.

Muchas veces, en el marco de distintas teorías físicas, se usa un mismo término de magnitud aún cuando las magnitudes que designan son definidas ontológicamente – en el sentido anteriormente indicado – de manera distinta. Éste es el caso de algunos de los términos de magnitudes físicas que se han presentado. Se atribuye al espacio, al tiempo, a la masa, al espín y a la velocidad propiedades distintas, y hasta incompatibles en algunos casos, no sólo en lo que se refiere a la forma en la que serán medidas, a las relaciones que guardan con otras magnitudes y a las leyes físicas en las que aparecen involucradas, sino también en lo concerniente a lo que la magnitud *es*. Ejemplo de esto son las definiciones de espacio-tiempo como estructura inmutable contenedora de todos

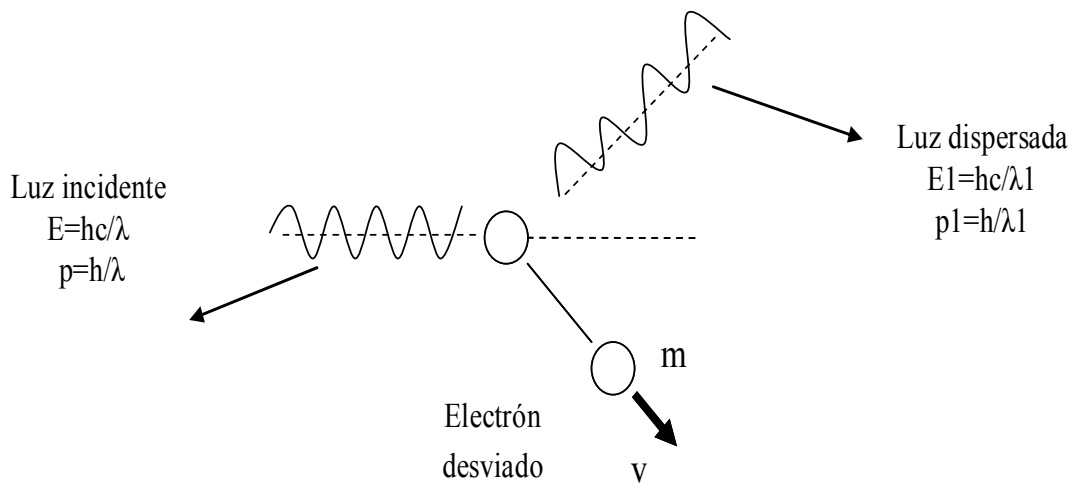
los objetos existentes y como estructura modificable a través de la presencia de los objetos en ella inmersos.

La cuestión probablemente más discutible es si aquello que una magnitud *es* puede o no excluir parte de la información acerca de dicha magnitud y, en caso afirmativo, qué parte.

3.2. Aspecto experimental

El aspecto *experimental* de la definición de una magnitud da cuenta de la relación entre la magnitud a medir y el montaje experimental mediante el cual se la mide; es decir, este aspecto pone de manifiesto el modo de interacción que se supone entre objeto-instrumento de medición.

Tomemos como ejemplo para entender la importancia del aspecto experimental, y las modificaciones sustanciales que puede generar en la definición de una magnitud, la revisión del concepto de posición en el contexto de cambio teórico entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica. Para determinar (observar y medir) la posición de un electrón, Heisenberg en (1927) elige describir la experiencia que debería llevarse a cabo si se quisiera localizar a un electrón mediante un microscopio de suficiente potencia. Para observarlo dentro de este instrumento es necesario iluminarlo, es decir, hacerlo interactuar con luz. Independientemente del cuidado con el que se efectúe la experiencia, nos encontramos al efectuar dicha observación y medición con un fenómeno denominado *efecto Compton*, que puede esquematizarse de la siguiente forma:



Cuando un fotón interactúa con el electrón, aquél transfiere energía y momento lineal al electrón provocando la dispersión de ambos. El fotón incidente tiene un momento lineal igual a h/λ entonces, como resultado de la colisión, la incertidumbre asociada a la medición en el momento del electrón debe ser al menos $\Delta p \geq \frac{h}{\lambda}$. Además, dado que la luz con la que iluminamos al electrón tiene una longitud de onda λ , la incertidumbre en la medición de la posición del electrón debe estar dentro de ese orden, $\Delta x \approx \lambda$. Por tanto, multiplicando ambas incertidumbres obtenemos $\Delta p \cdot \Delta x \geq h$ o, llamando P a la precisión con la que es conocida la posición y Q a la precisión correspondiente a la cantidad de movimiento: $PQ \sim h$.

Esta relación entre las incertidumbres en la medición de la posición y de la cantidad de movimiento representa la imposibilidad teórica de medir con precisión arbitrariamente alta (es decir con incertidumbre arbitrariamente pequeña) dichas magnitudes en forma simultánea. Al ser posición y cantidad de movimiento (o momento lineal) magnitudes conjugadas, cuanto mayor sea la precisión con la que se mide una de las magnitudes, menor será la precisión con la que se pueda conocer la otra. Es decir, la teoría marca límites máximos de precisión en la operación de medición,

independientemente de los instrumentos utilizados, y limita así la validez en la aplicación de los conceptos clásicos. En palabras de Heisenberg, $PQ \sim h$ es una consecuencia matemática de la ecuación $PQ-QP = -ih$ y una interpretación física de la misma.

A modo de análisis de la nueva situación experimental y de su relación con el contexto clásico se pueden hacer las siguientes observaciones. Al medir magnitudes físicas existe, siempre e independientemente de que el contexto sea el de la física clásica o el de la mecánica cuántica, una incertidumbre experimental asociada a la interacción entre el objeto a medir y el instrumento con el cuál se efectúa la medición. En el marco de la física clásica la interacción entre objeto e instrumento se establece mediante magnitudes continuas; no existe en dicho contexto una barrera teórica para el perfeccionamiento de los instrumentos y los procedimientos experimentales, de modo que, en principio, sería posible efectuar las mediciones con una incertidumbre arbitrariamente pequeña. Por el contrario, en el contexto de la mecánica cuántica, dada la introducción de Planck de una cantidad mínima de acción y, en consecuencia, asumido el carácter discontinuo de los procesos atómicos, resulta prácticamente imposible medir en forma simultánea magnitudes complementarias (por ejemplo, la posición y la velocidad de una partícula) con precisión infinita (o, al menos, arbitrariamente alta). En otras palabras, existe una incertidumbre asociada a la determinación de los valores de algunas magnitudes (aquellas que son complementarias) que es introducida como resultado de efectuar una medición.

Este carácter discontinuo en la interacción entre el objeto o fenómeno a medir y el instrumento con el que se efectúa la medición trae aparejada una imposibilidad de diferenciar entre dichos elementos. Se torna así necesario concebir el objeto a medir y el instrumento como un conjunto experimental, en algún sentido, sin partes diferenciables.

Observemos también que en este nuevo marco teórico, tanto como en el clásico, las condiciones de observabilidad se establecen desde la teoría, es decir que no vienen dadas por las condiciones de experimentación. En el caso de la mecánica cuántica, el principio de indeterminación establece la máxima precisión con la que pueden conectarse formalismo matemático y experiencia. Este límite puede ser postulado como una ley de la naturaleza. De este modo queda fijado también el máximo contenido intuitivo que es posible conceder a la mecánica cuántica. Puede decirse que, como señala Rioja en (1995), Heisenberg ha cubierto tres etapas: definición de los conceptos a partir de contextos experimentales no clásicos, deducción teórica de los límites de validez de dichos conceptos y la comprobación experimental de los límites deducidos.

Aquello que suele denominarse “método experimental” de la física en el cambio del contexto clásico al moderno en general no sólo se hace más amplio y complejo, sino que, como sostiene Falkenburg en (2007), cambia radicalmente nuestro acceso empírico a la realidad. Falkenburg se pregunta entonces si es adecuado afirmar que la red de teorías físicas representa algo de la naturaleza sólo si estas teorías estructuran y extienden nuestro acceso empírico a la realidad. Si la respuesta es negativa, muchos objetos físicos no están empíricamente dados, y si es afirmativa, nuestro acceso a la realidad es altamente teórico. Llega así a la conclusión de que el cambio radical de nuestro acceso empírico a la realidad desemboca en otra cuestión importante: resultan necesarios nuevos criterios filosóficos para la demarcación entre los componentes empíricos y metafísicos de las teorías.

3.3. Aspecto formal o matemático

La definición de cualquier magnitud involucra, al menos implícitamente, definiciones de magnitudes como el espacio y el tiempo. Estas magnitudes implican a su vez una determinada *estructura matemática*, ya que definen cuestiones tan básicas como el tipo de lugar en el que las entidades que presentan la propiedad o atributo – que hemos denominado magnitud física – están contenidas, y la relación entre este lugar y el orden temporal de los distintos sucesos. Así la estructura que forman el espacio y el tiempo en el contexto de la física clásica es distinta de la estructura del espacio y el tiempo en un contexto cuántico, y distinto a su vez de la estructura del espacio-tiempo en el contexto relativista.

A cada una de estas estructuras de relación entre espacio y tiempo o espacio-tiempo se le asocia una estructura *matemática* que la representa. Estas estructuras matemáticas implican un tipo de métrica que influirá en la representación del resto de las magnitudes definidas en el marco de los distintos contextos. De esta forma, aunque dos ecuaciones de una supuesta misma magnitud presenten una estructura similar pueden implicar métricas distintas. Por este motivo, en relación con la referencia de los términos que designan magnitudes físicas será necesario analizar en qué grado la relación entre una magnitud y la estructura matemática que la representa implica que existe una variación en la propiedad o atributo que se pretende captar con la definición de dicha magnitud cuando la estructura matemática varía significativamente.

A lo largo del desarrollo de las distintas teorías físicas se ha atribuido a las magnitudes espacio y tiempo, como hemos visto, distintas propiedades y, por tanto, distintas estructuras matemáticas. Así, por ejemplo, la métrica propia de la estructura

formada por el espacio y el tiempo clásicos es euclidiana,²⁹ la propia de la estructura espacio-tiempo en el contexto de la relatividad especial es la métrica de Minkowski³⁰ y la utilizada en el contexto de la relatividad general es la métrica de Riemann.³¹

Este aspecto matemático de una magnitud está en estrecha relación con lo que puede ser denominado el aspecto contextual.

3.4. Aspecto contextual

Además de las ya mencionadas magnitudes espacio y tiempo, la definición de la mayoría de las magnitudes físicas involucra otras magnitudes, de forma tal que en conjunto conforman la *estructura conceptual* de una teoría.

Se ha visto en la presentación anterior de cinco magnitudes que en sus definiciones en el marco de cada teoría física, se suelen involucrar relaciones con otras magnitudes a través de alguna ley de la física.³² Sostendré, tal como lo hacen autores

²⁹ Una métrica es euclidiana si el producto interior cumple:

1) Conmutatividad:

$$\forall x, y \in V^2, x \bullet y = y \bullet x$$

2) Distributividad con respecto a la suma vectorial:

$$\forall x, y, z \in V^3, x \bullet (y + z) = x \bullet y + x \bullet z$$

3) Asociatividad mixta:

$$\forall x, y \in V^2 \alpha \in K, \alpha \bullet (x \bullet y) = (\alpha \bullet x) \bullet y = x \bullet (\alpha \bullet y)$$

4) Definición positiva:

$$\forall x \in V, x \bullet x \geq 0$$

5) No degeneración:

$$x \bullet x = 0 \Rightarrow x = 0$$

³⁰ Para \mathbb{R}^4 , dada la base canónica $\{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3\}$, $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$ e $y = (y_0, y_1, y_2, y_3) \in \mathbb{R}^4$, la métrica de Minkowski se define como: $\langle x, y \rangle = -x_0 y_0 + x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3$ que cumple las condiciones de simetría, bilinealidad y es no degenerada como en el caso de la métrica euclidiana.

³¹ Así como en el espacio *euclídeo* o plano la distancia entre dos puntos infinitamente próximos, o *métrica*, viene dado por el teorema de Pitágoras, en el espacio asociado a la relatividad restringida Minkowski agrega el tiempo y Riemann generalizó estos conceptos a hipersuperficies en espacios n-dimensionales generales, no necesariamente euclídeos.

³² Las magnitudes espacio, tiempo y masa suelen ser consideradas fundamentales. Pero, a pesar de tratarse de magnitudes mediante las cuales es posible definir las restantes magnitudes de una teoría, cabe observar que, en los marcos de las distintas teorías en las que dichas magnitudes son relevantes, ellas están vinculadas por medio de leyes físicas con otras magnitudes. Por ejemplo, en el marco de la

como Kuhn y Feyerabend, que esto sucede con la gran mayoría de las magnitudes. Es decir, más allá de que, como hemos indicado, la definición de cualquier magnitud implica – aunque pueda no hacerlo explícitamente – definiciones de magnitudes como espacio y tiempo, implica también una relación explícita con alguna otra magnitud y a través de situaciones en las que conjuntamente ejemplifican alguna ley de la naturaleza.

En el caso del espacio y el tiempo o del espacio-tiempo, se evidencian dos grandes cambios contextuales, referidos a las relaciones entre ellos y a las relaciones entre ellos y la masa de los objetos que contienen. El primero tiene lugar entre la mecánica clásica y la relatividad especial: el espacio y el tiempo dejan de ser dos magnitudes independientes para transformarse en una única magnitud con una estructura distinta. El segundo cambio es quizás más significativo y es el que acontece en el paso de las teorías clásicas y cuánticas no relativistas a la teoría de la relatividad general. El espacio-tiempo es, en este nuevo marco, una estructura que se relaciona de una manera completamente distinta con la masa de los objetos que en ella están inmersos. La presencia de materia deforma, de acuerdo con esta teoría, el espacio-tiempo.

La magnitud masa involucra relaciones con la velocidad o con la energía, y en el marco de la mecánica clásica éstas son notablemente distintas y opuestas a las que figuran en el marco de la relatividad especial. En la primera teoría la masa de un objeto no depende del estado del movimiento del mismo, mientras que en la segunda teoría sí, lo que implica una relación muy distinta entre las magnitudes masa y velocidad en uno y otro marco. Lo mismo sucede con las relaciones involucradas en estos dos contextos

mecánica clásica, la segunda ley de Newton vincula las causas del movimiento de un cuerpo de masa m con los efectos del mismo, relacionando para ello la magnitud fuerza con la magnitud aceleración y, por tanto, con magnitudes como la velocidad, el espacio y el tiempo. En el caso del espín, en el marco de la mecánica cuántica el valor de esta magnitud no cambia dependiendo de otras magnitudes, ya que es una propiedad intrínseca de cada partícula, pero está relacionada, en su definición, con el momento angular total de una partícula en un estado electrónico particular, ya que éste contiene tanto una contribución orbital L como una de espín S .

entre las magnitudes masa y energía. De acuerdo con las teorías clásicas, masa y energía son dos magnitudes distintas, mientras que de acuerdo con la relatividad especial son dos magnitudes equivalentes.

En el caso del espín, se trata de una magnitud que establece relaciones con magnitudes como el momento angular orbital, la velocidad angular y el momento de inercia en el contexto clásico, pero de una magnitud relacionada con el momento angular extrínseco, aunque de valor fijo para cada partícula, en el contexto cuántico.

4. El problema de la identidad de magnitudes

Como ya se ha indicado, los conceptos tiempo, espacio, masa y espín conservan, en el cambio de la teoría clásica a la relativista, sólo algunas de sus propiedades. El problema que se suscita es el de determinar cuáles son las propiedades que debe conservar un concepto en un contexto de cambio de teoría para que resulte posible afirmar que el concepto es el *mismo*. Este problema – enunciado en términos de la distinción que se establecerá en el capítulo 2 – puede formularse de la siguiente manera: cuáles son las descripciones o propiedades asociadas con un término de magnitud que identifican la magnitud en cuestión o cuáles son las propiedades que deben considerarse como esenciales de las entidades que caen bajo la extensión del término.

A continuación haremos algunas observaciones acerca de algunas de las magnitudes ya presentadas con el fin de enmarcar el problema de la identidad entre magnitudes físicas.

Respecto de la magnitud masa Feyerabend sostiene en (1962) que, aunque los valores obtenidos en la medición de la masa clásica y de la masa relativista coincidan en un dominio (y también sus expresiones matemáticas coincidan en el mismo dominio),

esto no significa que la entidad medida sea la misma en ambos casos: lo que se mide en el caso clásico es una propiedad intrínseca del sistema considerado, mientras 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 examen de la cuestión de la identidad o diferencia entre magnitudes no debería detenerse ahí, ya que para la identidad de una magnitud *no* sólo es relevante el aspecto formal o matemático de la misma. Una definición de una magnitud basada únicamente en el aspecto formal de la misma no es completa y, por tanto, no puede ser más importante que otras definiciones basadas en los restantes aspectos relevantes de una magnitud. Si la definición más detallada posible de una magnitud – en particular de la magnitud masa –, aunque sea pensada como definición no definitiva, está formada a su vez por distintas definiciones que involucran información proveniente de los distintos aspectos relevantes de una magnitud, cabe suscitar la cuestión de qué tipo de definición del concepto métrico masa es más característica del mismo.

Llegados a este punto es pertinente atender a los diversos aspectos de la definición de una magnitud. El aspecto *ontológico* obliga a considerar si es posible, en el marco de la relatividad especial, mantener la definición del término “masa” según la cuál ésta es la cantidad de materia que posee un cuerpo, la capacidad de resistirse al cambio de estado de movimiento, o una propiedad en virtud de la cual los cuerpos se atraen. Probablemente en este contexto sea más pertinente definir la masa respecto de su

equivalencia con la energía, ya que ésta es la propiedad más relevante que la teoría de la relatividad especial atribuye a la magnitud masa.

El aspecto *formal* o *matemático* de la magnitud masa nos lleva a comparar las ecuaciones de definición o las expresiones formales de las leyes físicas en las que figura. Es cierto que, con respecto a este aspecto, 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.

Otra cuestión relacionada con el aspecto formal que resulta importante analizar en relación con la definición de una magnitud, es la de las reglas de formación que deben seguirse para la construcción de los enunciados en los que intervenga el término que la designa. Así habría que analizar, por ejemplo, si los términos “masa clásica” y “masa relativista” son términos intercambiables en los enunciados en los que aparecen. 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 llegaron los físicos en aquel momento es que no era necesario crear un nuevo lenguaje para comunicar los resultados experimentales de la nueva teoría; 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 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 1958, 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, aún así, fue necesario discutir sobre el lenguaje que sería apropiado usar para referirse a las propiedades 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, que asumía los antiguos conceptos de espacio y tiempo, no permitía explicar los nuevos experimentos. Es decir, los antiguos términos no resultaban aplicables en todos los casos de forma consistente. Por este motivo, para poder seguir utilizándolos fue necesario establecer una nueva relación entre los símbolos matemáticos, dichos términos y las mediciones efectuadas. Según entiende Heisenberg,³³ esta situación fue la que determinó que se encontrara la transformación de Lorentz.

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 esquema del espacio caja, como contenedor de la materia, en cuyo seno se mueve. Como ya indicamos, el espacio clásico es homogéneo, continuo, indefinidamente divisible, físicamente inactivo, independiente del tiempo, de la materia y del movimiento, y tiene tres dimensiones; también hemos señalado que 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. Por el contrario, en el marco de la teoría de

³³ Estas ideas de Heisenberg pueden encontrarse desarrolladas en Heisenberg (1969) y (1935).

la relatividad especial 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.

Por último, el aspecto *experimental* es también relevante en la determinación 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, en cambio, 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 especial no hay 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 especial 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 mecánica clásica 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 distintas 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 son las descripciones o propiedades asociadas con el término “masa” que se considera que son las que identifican esta magnitud. Como se ha indicado, 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, habría que aceptar que la referencia del término ha variado. Lo mismo ocurriría si se estima 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 clásico es notablemente distinta del relativista.

Respecto de las magnitudes espacio y tiempo y espacio-tiempo se puede llevar a cabo un análisis similar a través de los distintos aspectos de sus definiciones, aunque se dejarán de lado las cuestiones que ya se han presentado en el tratamiento de la identidad entre las masas clásica y relativista. No obstante, es digno de mención que el aspecto ontológico de las definiciones de dichas magnitudes nos muestra claros e importantes cambios tanto en el paso de la mecánica clásica a la relatividad especial como en el paso de todas las teorías anteriores a la relatividad general. Espacio y tiempo se transforman primero en una estructura inmutable espacio-tiempo, para terminar siendo una estructura activa. Pero cabe la pregunta acerca de si esta transformación es suficiente

para sostener que, sin lugar a dudas, ya no se trata de las mismas magnitudes. Se impone entonces una revisión del resto de los aspectos, que no será aquí desarrollada, ya que consideramos que las cuestiones a tratar han sido suficientemente mencionadas en el caso de la magnitud masa.

Por lo que concierne a la identidad entre la magnitud espín en el contexto clásico³⁴ y en el cuántico conviene señalar que en el primer contexto se está en presencia de una magnitud continua y en el segundo en presencia de una magnitud discreta. De esta manera, partiendo de una diferencia ontológica tan sustancial, es obvio que la forma en la que esta magnitud podrá ser observada y medida es radicalmente distinta, así como lo son el formalismo matemático que pueda utilizarse para representarla y las relaciones que establezca con otras magnitudes, en uno y otro contexto.

Para ahondar en la cuestión de la identidad entre magnitudes examinaremos en el siguiente capítulo las distintas perspectivas desde las cuales la referencia de un término de magnitud puede ser analizada.

5. Términos de género natural

Los términos de magnitudes físicas son usualmente considerados como *términos de género natural*. No obstante, los términos de género natural a los que más se ha atendido en la bibliografía sobre la semántica de este tipo de términos son los términos de especies biológicas, como “gato” o “limón”, y los términos de sustancias químicas, como “oro” o “agua”, habiéndose prestado mucha menos atención a los términos de magnitudes físicas.

³⁴ Suponiendo que en el contexto clásico sea lícito utilizar el término espín del modo en que lo hacen algunos textos (véase la nota 22 de este capítulo). Esta cuestión será abordada en el apartado 4.2.2 del capítulo 3.

Aunque no hay una definición precisa y unánimemente aceptada de la noción de término de género natural, una de las caracterizaciones más frecuentes se encuentra en Putnam (1975a) y Carlson (1991), donde se los caracteriza como términos que designan las clases de entidades que resultan importantes para la explicación de la naturaleza y la investigación científica, incluyendo tipos de entidades tan distintos como especies biológicas (ya sean animales o vegetales), sustancias químicas y entidades de las teorías físicas, entre las que habría que destacar las magnitudes físicas.³⁵ Se intenta distinguir así los términos que designan géneros naturales de otros tipos de términos. Pero aquí se suscitan distintos problemas. Uno de ellos está asociado a la distinción términos de *género natural*/términos de *género artificial*. García Suárez (en 1997, p. 54) pone como ejemplo de términos que designan géneros artificiales términos como “silla”, “botella” o “mesa”. Si bien no explica cuál es la diferencia entre los géneros naturales y los artificiales, parecería que los primeros son aquellos que se encuentran directamente en la naturaleza y los segundos aquellos que son fabricados o contruidos por el hombre. Si la distinción es simplemente ésta, dadas algunas magnitudes físicas, resulta bastante problemático distinguir si constituyen o no un género natural. Así como una persona puede seleccionar unos trozos de madera existentes en la naturaleza y construir una mesa, un campo eléctrico puede existir en una determinada región del espacio por la presencia de una carga eléctrica, pero también puede crearse uno – de la magnitud que se desee – “artificialmente”, produciendo una variación de un campo magnético en el tiempo. De esta manera, el debate sobre lo natural/artificial que pueda ser un género está abierto.

La búsqueda de regularidades o, dicho de otro modo, la clasificación de particulares en distintos géneros que suele hacer la ciencia, es necesaria para abordar su

³⁵ En Fernández Moreno (2000) puede encontrarse un examen de la cuestión de si los términos de género natural constituyen o no una categoría semántica.

objeto de estudio. Ahora bien, por una parte, no hay acuerdo acerca de una caracterización precisa de la noción de género natural, ya que la unanimidad que puede encontrarse sería la que se sigue de la caracterización de los términos de género natural presente en Putnam (1975c) o Carlson (1991), a la que hemos aludido, y que es muy genérica y un tanto imprecisa.

Por otra parte, los géneros naturales pueden concebirse desde distintas perspectivas. Así como puede pensarse que las clasificaciones y taxonomías hechas por la ciencia se corresponden exactamente con un género en la naturaleza,³⁶ siendo *independientes* de los criterios de los seres humanos que han hecho dichas clasificaciones, es posible sostener desde otra perspectiva que dichos géneros son *convencionales*³⁷ y que no existen con independencia de quienes los hacen ni se corresponden con clasificaciones privilegiadas dadas o existentes en la naturaleza. Obviamente existen posiciones intermedias entre estas dos señaladas. Ejemplos de este tipo de posiciones consistirían en sostener que existen géneros naturales en la naturaleza, pero que resulta muy difícil para la ciencia descubrir dichos géneros, o que sólo algunos de los géneros estudiados por la ciencia son naturales en el sentido de corresponder a un género independiente de los criterios humanos, existente en la naturaleza.

Por último, es pertinente mencionar otra cuestión suscitada en torno a la noción de género natural, a saber, qué carácter *ontológico* poseen los géneros naturales; en concreto, si se trata de entidades básicas como los particulares y universales o, por el

³⁶ De acuerdo con esta concepción acerca de los géneros naturales, los criterios para la demarcación de géneros naturales son los siguientes: un género natural debe permitir hacer inferencias inductivas, participar en las leyes de la naturaleza, tener una jerarquía y, dados dos géneros naturales, éstos deben ser distintos entre sí. Así como los candidatos a género natural deben cumplir con los criterios anteriores, sus miembros deben tener algunas propiedades (propiedades intrínsecas) en común para formar un género. Un examen de esta concepción puede consultarse en Khalidí (1998).

³⁷ Esta es la posición que suele denominarse “relativismo ontológico”, de acuerdo con la cual todas las entidades, procesos, relaciones y postulados teóricos son relativos a un cierto marco o esquema conceptual. Véase al respecto Goodman (1978).

contrario, se trata de algún tipo de universales o sencillamente de un racimo de propiedades. Así, los seguidores de perspectivas a las que suele denominarse *reduccionistas* sostienen que los géneros naturales no son una categoría distinta de los universales. Por el contrario, desde una posición realista *fundamentalista* de los géneros naturales se sostendrá que éstos no sólo existen con independencia de los científicos que llevan a cabo las clasificaciones, sino que son además un cierto tipo de entidades que forman una categoría ontológica irreducible. De acuerdo con Ellis (1996), la ciencia actual necesita de una ontología más sofisticada que la tradicional en la que se incluya las distintas categorías de géneros naturales como entidades fundamentales.

En lo siguiente asumiremos la definición de término de género natural que se ha mencionado al comienzo de esta sección, reconociendo que es muy genérica y un tanto imprecisa, y aceptaremos que los términos de magnitudes físicas son un subgrupo dentro de este tipo de términos, aunque, como hemos indicado, su semántica ha sido menos objeto de examen – al menos en el ámbito de las teorías de la referencia – que la de otros tipos de términos de género natural. En el próximo capítulo examinaremos distintas teorías de la referencia, entre ellas algunas que pretenden tener aplicación a (todos) los términos de género natural, con objeto de dilucidar si dichas teorías pueden dar cuenta de la referencia de los términos de magnitudes físicas.

APÉNDICE

Formalismo matemático del espín cuántico

Presentaremos brevemente el formalismo matemático necesario para describir la magnitud espín en el marco de la mecánica cuántica y el experimento de Stern-Gerlach, con objeto de poner de manifiesto las diferencias notables entre el formalismo matemático y el tratamiento experimental empleados por la mecánica cuántica y aquellos utilizados por la mecánica clásica para describir, representar y medir aquella magnitud a la que, en cada contexto, se denomina “espín”.

1. El formalismo matemático para el espín en el marco de la mecánica cuántica

Dos son los constructos en los que se basa la mecánica cuántica: funciones de ondas o función de estado y operadores. Así, el estado de un sistema está representado por una función de onda ψ , que contiene toda la información del sistema obtenida por observación, y los observables son representados por operadores. La función ψ es una función compleja y $|\psi|^2 = \psi \cdot \psi^*$ es la densidad de probabilidad.¹ Para representar un posible estado físico la función de onda ψ debe ser normalizada:

$$\int |\psi|^2 dx = 1$$

Cada cantidad observable se representa a través de un operador hermético y al hacer una medición el resultado que se obtiene es un *autovalor* del operador. Si la i ésima *autofunción* de un operador \hat{A} es ϕ_i (normalizada) y su *autovalor* es a_i ,

¹ La función ψ^* es la función compleja conjugada de ψ y la densidad de probabilidad determina la probabilidad de encontrar una partícula en una posición r y en un determinado tiempo t .

entonces: $\hat{A}\phi_i = a_i\phi_i$. El valor esperado que se obtiene tras la medición del operador \hat{A} viene dado por: $\langle \hat{A} \rangle = \int d\tau \psi^* \hat{A} \psi$, donde $d\tau$ es un elemento de volumen. Como la función ψ puede ser escrita en función de autofunciones de \hat{A} según la ecuación $\psi = \sum_i c_i \phi_i$, entonces $\langle \hat{A} \rangle$ está dado por: $\langle \hat{A} \rangle = \sum_i |c_i|^2 a_i$

Las funciones de onda de la mecánica cuántica están en este espacio con características particulares denominado espacio de Hilbert. Cabe notar que de acuerdo con la interpretación de Copenhague y dado que en ella la medición está entendida como un proceso drástico, si se toma la función de onda ψ , se mide la cantidad física asociada al operador $\langle \hat{A} \rangle$ y se obtiene el resultado a_n , se está forzando al sistema a una función de estado ϕ_n .

Dado que matemáticamente las funciones de onda satisfacen las condiciones de definición de vectores abstractos y los operadores actúan sobre ellos como transformaciones lineales, el lenguaje de la mecánica cuántica es el algebra lineal o, más precisamente, la teoría de grupos.

El algebra utilizado en el marco del nuevo formalismo matemático introducido en 1925 por Heisenberg establece que las relaciones de conmutación dadas en la ecuación matricial $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$ pueden tener dos resultados, según las cantidades \hat{A} y \hat{B} sean compatibles (y las mediciones efectuadas sobre una no afecten a las efectuadas sobre la otra) o no. Así en la física clásica donde las magnitudes son compatibles resulta que $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} = 0$

Para magnitudes complementarias (que no conmutan) en el marco de la mecánica cuántica el resultado es:

$$\Delta\hat{A}\Delta\hat{B} \geq 1/2 \left| \langle i[\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right|$$

2. El momento angular L

Clásicamente el momento angular de una partícula con respecto al origen de coordenadas viene dado por la fórmula:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}, \text{ es decir: } L_x = yp_z - zp_y, \quad L_y = zp_x - xp_z, \quad L_z = xp_y - yp_x$$

El correspondiente operador cuántico se obtiene de la manera tradicional:

$\hbar\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p} = -i\hbar\hat{r} \times \nabla$ y sus componentes: $p_x \rightarrow -i\hbar\partial/\partial x$ $p_y \rightarrow -i\hbar\partial/\partial y$ $p_z \rightarrow -i\hbar\partial/\partial z$ y tienen autofunciones dadas por $e^{im_l\phi}$ y autovalores $m_l\hbar$ donde m_l es el número cuántico magnético.

Los operadores L_x y L_y no conmutan por lo que $[L_x, L_y] = i\hbar L_z$. Y lo mismo sucede con las demás componentes: $[L_y, L_z] = i\hbar L_x$ y $[L_z, L_x] = i\hbar L_y$, por lo que L_x , L_y y L_z son observables incompatibles y de acuerdo con el principio de incertidumbre: $\sigma_{L_x} \sigma_{L_y} \geq \hbar/2 |\langle L_z \rangle|$. De esta manera no tiene sentido buscar estados que sean simultáneamente autofunciones de L_x y L_y . Pero, por otra parte, el cuadrado del momento angular total $L^2 = L_x^2 + L_y^2 + L_z^2$ sí conmuta, y por tanto es compatible con cada componente de \vec{L} (L_x , L_y y L_z). Es decir: $[L^2, L_x] = 0$ y $[L^2, L_y] = 0$ y $[L^2, L_z] = 0$ y tendrá sentido esperar encontrar autoestados que lo sean simultáneamente de L^2 , por ejemplo, L_x .

El operador \hat{L}^2 tiene autofunciones $|l, m_l\rangle = Y_{lm_l}(\theta, \phi) \alpha P_l^{m_l}(\cos\theta) e^{im_l\phi}$ conocidas como esféricos armónicos con autovalores $l(l+1)\hbar^2$ donde l es el número cuántico momento angular y $P_l^{m_l}(\cos\theta)$ el polinomio de Legendre asociado. Entonces:

$\hat{L}^2 |l, m_l\rangle = l(l+1)\hbar^2 |l, m_l\rangle$ y $\hat{L}_z |l, m_l\rangle = m_l\hbar |l, m_l\rangle$. Los operadores \hat{L}_\pm son definidos por $\hat{L}_\pm = \hat{L}_x \pm i\hat{L}_y$, por lo que puede mostrarse que: $\hat{L}_\pm |l, m_l\rangle = \sqrt{l(l+1) - m_l(m_l \pm 1)}\hbar |l, m_l \pm 1\rangle$

La teoría algebraica para el momento angular intrínseco es similar.

3. El espín S

Las relaciones de conmutación para las componentes del espín son entonces:

$[S_x, S_y] = i \hbar S_z$, $[S_y, S_z] = i \hbar S_x$, $[S_z, S_x] = i \hbar S_y$, por lo que los autovalores S^2 y S_z satisfacen: $S^2 |s m\rangle = \hbar^2 s(s+1) |s m\rangle$; $S_z |s m\rangle = \hbar m |s m\rangle$ y $S_{\pm} |s m\rangle = \hbar [s(s+1) - m(m \pm 1)]^{1/2} |s(m \pm 1)\rangle$, donde $S_{\pm} \equiv S_x \pm i S_y$. Aquí los autovectores no son armónicos esféricos por lo que no hay razón para excluir, al menos a priori, los valores semienteros. Así S puede tomar los siguientes valores:

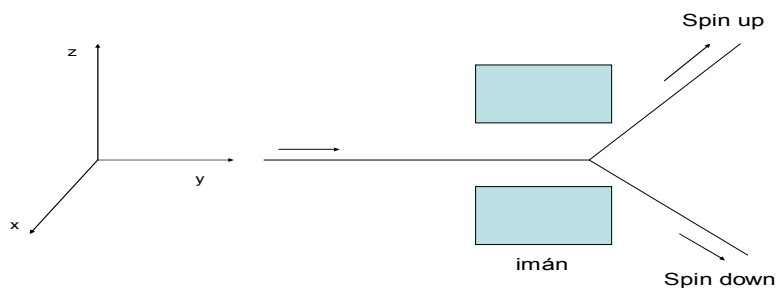
$$S = 0, 1/2, 1, 3/2, \dots; \quad m = -s, -s+1, \dots, s-1, s.$$

4. El experimento de Stern-Gerlach

En el seno de un campo magnético inhomogéneo, sobre un dipolo magnético actúa no sólo un torque, sino también una fuerza que puede ser utilizada para separar partículas que posean una orientación determinada de espín y puede ser expresada como sigue:

$$\vec{F} = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B}).$$

Supongamos un haz de átomos neutros relativamente pesados que viaja en la dirección y atraviesa un campo magnético inhomogéneo como se ve en la figura:



La expresión matemática correspondiente al campo magnético inhomogéneo es $\vec{B}(x, y, z) = -\alpha x \hat{i} + (B_0 + \alpha z) \hat{k}$, donde B_0 es un campo uniforme fuerte y la constante α describe las pequeñas variaciones respecto de la homogeneidad. La fuerza entonces sobre los átomos es: $\vec{F} = \gamma \alpha (-S_x \hat{i} + S_z \hat{k})$. Pero a causa de la precesión de Larmor sobre B_0 (el giro del momento magnético asociado a su momento cinético alrededor del campo en el que se encuentra sumergido un corpúsculo o partícula), S_x oscila rápidamente tendiendo a cero, por lo que la fuerza neta en la dirección z puede expresarse como: $F_z = \gamma \alpha S_z$ y el haz de átomos es reflectado hacia arriba o abajo proporcionalmente a la componente z del momento angular de espín.

Clásicamente era de esperar una sola marca dado que la componente z del espín no se consideraba cuantizada, pero la separación del haz en $2s + 1$ líneas separadas muestra claramente la cuantización del momento angular. El argumento anterior es puramente clásico, ya que la magnitud fuerza no es propia de los cálculos cuánticos. Este mismo proceso puede ser examinado desde otra perspectiva; desde un marco de referencia que se mueve con el haz. El Hamiltoniano comienza con un valor 0, adquiere un cierto valor al pasar las partículas del haz por el imán y termina en 0 otra vez:

$$H(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ -\gamma(B_0 + \alpha z)S_x & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

Se supondrá ahora que los átomos tienen espín $1/2$ y comienzan en el estado

$$\chi(t) = a \chi_+ + b \chi_- \quad \text{para } t \leq 0$$

Mientras el Hamiltoniano actúa, $\chi(t)$ se desarrolla en la forma usual:

$\chi(t) = a \chi_+ e^{-iE_+t/\hbar} + b \chi_- e^{-iE_-t/\hbar}$, donde $E_{\pm} = \pm \gamma (B_0 + \alpha z) \hbar/2$ y, por lo tanto, emerge en el estado: $\chi(t) = (a e^{i\gamma T B_0/2} \chi_+) e^{i(\alpha\gamma T/2)z} + (b e^{-i\gamma T B_0/2} \chi_-) e^{-i(\alpha\gamma T/2)z}$, para $t \geq T$. Los dos términos tienen ahora momento en la dirección z . El componente del espín up tiene momento: $P_z = \alpha\gamma T\hbar/2$ y se mueve en la dirección $+z$; la componente del espín down tiene el momento opuesto y se mueve por tanto en la dirección $-z$, por lo que el haz se separa en dos consistentemente con el resultado anterior en el cual $S_z = \hbar/2$ y $p_z = F_z T$.

El experimento de Stern-Gerlach puede pensarse tanto como un prototipo de preparación de un estado cuántico como para representar un cierto tipo de medidas cuánticas y esto le vale la importancia que tiene en la literatura acerca de filosofía de la mecánica cuántica. Este experimento permite entender, al menos conceptualmente y aunque no sea siempre la manera más práctica, cómo es posible conocer de antemano el estado inicial de un sistema. Si se quiere, por ejemplo, obtener un haz de electrones con una determinada configuración de espín, basta con hacer pasar el haz no polarizado por un imán de Stern-Gerlach y seleccionar la salida que se desea obturando la otra. También, si se quiere medir una determinada componente del espín de un átomo (por ejemplo la componente x), se lo hace pasar por el aparato de Stern-Gerlach y se observa y registra en qué compartimento cae.

CAPÍTULO 2: LA SEMÁNTICA DE LOS TÉRMINOS DE MAGNITUDES FÍSICAS

Existen distintas perspectivas relevantes para el estudio de la semántica y, en especial, de la *referencia* de los términos de los términos de magnitudes físicas. La primera de ellas es la del debate entre las distintas teorías de la referencia y la segunda perspectiva, aunque conectada con la anterior, es la del cambio teórico en ciencia, que será abordada en el capítulo 3. Analizaremos a la luz de estas perspectivas la referencia de los términos de magnitudes físicas.

En el presente capítulo presentaremos y examinaremos algunas versiones de los principales tipos de teorías de la referencia, a saber, la teoría descriptiva y la teoría causal, si bien atenderemos también a teorías híbridas. Algunos de los promotores de la teoría descriptiva y de la teoría causal han formulado propuestas acerca de los términos de magnitudes físicas; esto ocurre en especial en el caso de la teoría descriptiva de Carnap y de las teorías causales de Kripke y de Putnam, ya que estos dos autores han formulado teorías que pretenden dar cuenta de la referencia de (todos) los términos de género natural, que incluyen los términos de magnitudes físicas. No obstante, es también digno de mención el examen de la posible extensión a los términos de magnitudes físicas de teorías no formuladas directamente acerca de ellos, como la teoría de los términos conceptuales de Frege y la teoría de los términos de universales de Russell.

Nuestro objetivo principal en este capítulo es dilucidar la aplicabilidad de los tipos de teorías de la referencia mencionadas a los términos de magnitudes físicas. Dado que el cometido principal de las teorías de la referencia es proponer explicaciones de

cómo se *determina* o *fija* la referencia de un término y de cómo se *transmite* dicha referencia, nos centraremos en las propuestas relevantes de tales teorías acerca de los términos de magnitudes físicas. Asimismo, y de una manera más específica, examinaremos las dificultades con que se enfrentan dichas teorías para explicar la referencia de algunos ejemplos de este tipo de términos.

1. La teoría descriptiva de la referencia

De acuerdo con Devitt y Sterelny en (1999), los seguidores de la teoría descriptiva de la referencia sostienen que una descripción – en el caso de las versiones clásicas – o un conjunto de descripciones – en el caso de las versiones contemporáneas – asociadas con un término, expresan el *sentido* (o significado) del término y éste determina la *referencia* del mismo. Pero la tesis básica de este tipo de teorías puede formularse apelando exclusivamente a la noción de referencia, a saber, según dichas teorías la referencia de un término viene determinada por una descripción o por un conjunto de descripciones que los hablantes asocian con el término. Así no toda versión de la teoría descriptiva tiene que comprometerse, al menos en principio, con tesis descriptivas acerca del sentido o significado de los términos.

1.1. Versiones clásicas

La tesis característica de la teoría descriptiva en su versión clásica, aplicada a los nombres propios, radica en que la referencia de un nombre propio viene determinada por *una* descripción definida asociada con el nombre; ahora bien, puesto que los promotores de la teoría descriptiva clásica, Frege y Russell, conceden que esa

descripción definida puede ser distinta en el caso de distintos hablantes y en el caso del mismo hablante en momentos diferentes, la teoría descriptiva clásica contiene el germen de la teoría descriptiva contemporánea. En cualquier caso, la cuestión que se suscita es si esa tesis es extensible a ese tipo de términos generales que son los términos de género natural y, más precisamente, a los términos de magnitudes físicas.

1.1.1. Frege

En (1892) Frege distingue entre el *sentido* y la *referencia* de los términos y sostiene que en un signo o término, además de lo designado por él – a lo que Frege denomina “referencia”¹ hay que distinguir el sentido, al que caracteriza como conteniendo el modo de darse lo designado por el signo o término, si bien cabe *identificar* el sentido de un término simplemente con el modo de darse su referencia o, como se suele decir, con el modo como el término nos presenta su referencia.

Frege formula dicha distinción en (1892) con respecto a los *nombres propios* (en el sentido usual del término) – véase la nota 3 *infra* –, y da a entender, de acuerdo con la nota 2 de dicho artículo, que el sentido de un nombre propio vendría expresado mediante *una* descripción definida, si bien ésta puede ser diferente en el caso de hablantes diferentes. Frege sostuvo claramente una tesis similar con respecto a algunos términos generales – aquellos que fuesen definibles –, de tal manera que *una definición* de un término general, que constaría de la conjunción de varios términos generales,

¹ La referencia es, en sentido estricto, una relación, a saber, la relación entre un término y lo designado por él. La entidad designada es el referente del término. No obstante, la expresión “referencia” se emplea generalmente de manera ambigua, a saber, para aludir a la relación mencionada o a la entidad designada. Como la mayoría de los autores, dejaremos al contexto la tarea de desambiguar la interpretación de dicha expresión.

expresaría el sentido del término y éste determinaría su referencia.² Entender o comprender el término general en cuestión es conocer su sentido y, por tanto, el sentido de los términos que figuran en su definición, la cual, a su vez, determinaría su referencia.

Frege distingue dos tipos de expresiones. Por una parte, los *nombres propios*³ o expresiones saturadas, que designan entidades saturadas o completas en sí mismas, es decir, *objetos*;⁴ el otro tipo de expresiones, las expresiones no-saturadas o signos de función, se refieren a entidades no-saturadas o *funciones*. Dentro de las funciones Frege presta especial atención a los *conceptos*, entendiendo por concepto una función de un único argumento cuyo valor es un valor veritativo (1891, p. 158). A su vez, los conceptos son designados por un tipo de expresiones que Frege denominó, por ejemplo en (1892-1895), “términos conceptuales”.

Dado que en la clasificación fregeana de los términos no se menciona a los términos de género natural, ni a ese subtipo de ellos que son los términos de magnitudes físicas, cualquier análisis que de este tipo de términos se pretenda hacer desde la teoría de Frege implica forzar alguna similitud entre esos términos y alguno de los tipos de términos generales tematizados por Frege, especialmente los términos conceptuales. Ahora bien, hay inicialmente un aspecto en el que la similitud en cuestión es claramente forzada. Los términos conceptuales son los términos que designan conceptos, que, como hemos indicado, son funciones de un único argumento cuyo valor es un valor veritativo. Pero, obviamente, hay un inconveniente para que las magnitudes físicas puedan ser

² Aunque esa conjunción de términos no es una descripción definida, con ellos cabe formar fácilmente una descripción definida (compleja) que contuviese dicha conjunción.

³ Frege entiende en estos contextos por “nombre propio” cualquier expresión saturada, la cual comprendería los nombres propios en el sentido usual del término, las descripciones definidas y las oraciones.

⁴ Frege considera que es imposible una definición académica de lo que él denomina “objeto”, pues dada la simplicidad de esta noción, no admite descomposición lógica. Así Frege afirma que “objeto es todo lo que no es función, la expresión de lo cual, por tanto, no lleva consigo ningún lugar vacío” (Frege 1891, p. 160).

entendidas como conceptos en el sentido de Frege. Un concepto es una función que a cada objeto le asigna un valor de verdad (lo verdadero o lo falso), pero los valores de las magnitudes físicas no son valores de verdad. Aún así, dado que puede concebirse a las magnitudes físicas como un tipo de funciones, nos ocuparemos a continuación del tipo de funciones al que Frege prestó más atención, es decir, a los conceptos, y a sus expresiones correspondientes – si bien dejando de lado en la medida de lo posible ese aspecto de la teoría de Frege según el cual el valor de los conceptos es un valor veritativo –. Llegados a este punto conviene adentrarnos en algunos de los aspectos fundamentales de la ontosemántica de Frege.

Frege concibe las funciones como entidades incompletas, necesitadas de complemento o no-saturadas. Los lugares vacíos de una función pueden ser completados con objetos, que en la medida en que son empleados para complementar una función, son denominados “argumentos” de la función, y el resultado de la complementación de una función por ciertos argumentos es el valor de la función para dichos argumentos, y este valor es un objeto. Ahora bien, la relación fundamental existente entre objetos y conceptos es la de *caer bajo un concepto*: un objeto cae bajo un concepto cuando el valor del concepto para ese objeto es lo verdadero – lo verdadero y lo falso son para Frege objetos –. Un concepto $F(x)$ reúne en una clase a todos los objetos x que caen bajo ese concepto o que poseen dicha propiedad – un concepto es *propiedad* de los objetos que caen bajo él –. Esa clase es la *extensión* del concepto; la extensión de un concepto está constituida por todos los objetos que caen bajo el concepto, es decir, que poseen dicha propiedad, y si un objeto cae bajo un concepto, cae bajo todos los conceptos con la misma extensión.

Ahora bien, las extensiones de conceptos son *objetos* y no conceptos. Un concepto es, como se ha dicho, un tipo de función, mientras que según Frege la relación

de identidad sólo es concebible entre objetos y no entre conceptos. En el caso de los conceptos se da, no obstante, una relación similar, la de identidad de extensión, que, a diferencia de la relación de identidad – entre objetos –, no es de primer orden, sino de segundo orden.

Las funciones y, por tanto, los conceptos, son los referentes de los términos generales – entendidos en un sentido amplio – y de entre éstos Frege prestó especial atención a los términos conceptuales. Éstos tienen las dimensiones semánticas de sentido y referencia, y siempre que interese la pregunta por la verdad, que según Frege es lo que ocurre en el caso de la ciencia, se deberá asociar una referencia a los términos conceptuales. De este modo, según Frege, en el ámbito de la ciencia los términos conceptuales no *deben* tener sólo sentido, sino también referencia, y esta última será un concepto.

Dos términos conceptuales se refieren al mismo concepto, según Frege, si, sin perjuicio de la verdad, en todo enunciado cada término conceptual es reemplazable por el otro, es decir, si ambos tienen la misma extensión. En palabras de Frege: “aquello a lo que se refieren dos términos conceptuales es lo mismo si y sólo si las extensiones de concepto correspondientes coinciden” (Frege 1892-1895, p. 203). Así dos términos conceptuales T_1 y T_2 podrían tener distinto sentido pero el mismo referente, ya que, tal como indica Frege, “la diferencia de designación no basta por sí sola para fundamentar una diferencia de designados” (1891, p. 149). Al llevar a cabo entonces la sustitución en un enunciado de un término conceptual por otro con distinto sentido, pero que designe un concepto con la misma extensión, cambiará el sentido del enunciado pero no su referencia.⁵

⁵ La referencia de un enunciado es, según Frege, su valor veritativo y para él existen sólo dos valores de verdad, a saber, lo verdadero y lo falso. Un enunciado contiene un pensamiento y este pensamiento es su sentido, no su referencia. Un enunciado puede contener un término que no tiene referencia y, aún así,

En la obra de Frege hay que distinguir entre las nociones de *propiedad* y *característica*. Como hemos indicado, un concepto es propiedad de los objetos que caen bajo el concepto, pero una relación importante entre conceptos es la relación de *subordinación*.⁶ Un concepto está subordinado a otro concepto si todo objeto que cae bajo el primer concepto cae también bajo el segundo concepto, y de este último se dice que es una *característica* del primero.⁷ Cuando un término conceptual es definible mediante una conjunción de términos conceptuales, cada uno de los conceptos designados por estos términos son características del concepto designado por el primero y los objetos que caigan bajo este concepto caen también bajo los conceptos que constituyen características de éste; estos conceptos son, por tanto, como el concepto definido, igualmente propiedades de dichos objetos.

Nuestras anteriores consideraciones entroncan con problemas derivados de asociar una descripción o *descripciones*⁸ con los términos de magnitudes físicas, que constituirían su sentido y determinarían su referencia. La cuestión es la siguiente. Cuando ciertos conceptos o ciertas propiedades (por ejemplo, las de poseer una cierta cantidad de materia, resistirse a un cambio en su estado de movimiento, etc.) sean características de un concepto, por ejemplo, del concepto de masa clásica, ningún objeto que no posea dichas propiedades (por ejemplo, un objeto o partícula que no posea ninguna cantidad de materia cuando está en reposo) pertenecerá a la extensión del

tener sentido, es decir, expresar un pensamiento. Sólo al querer atribuir un valor de verdad al enunciado será necesario adjudicar una referencia a cada uno de los términos componentes del enunciado.

⁶ La relación de subordinación tiene lugar entre conceptos de primer orden, es decir, entre conceptos bajo los cuales caen o pueden caer objetos, pero Frege distingue conceptos de primer orden y de segundo orden, y la relación entre aquéllos y éstos es la relación de *caer en*. Es decir, los conceptos de primer orden caen o pueden caer en conceptos de segundo orden. No obstante, esta relación carece de importancia para lo siguiente.

⁷ Cabe señalar que sólo en el contexto de esta sección se utilizará el término “característica” en el sentido en el que lo utiliza Frege.

⁸ Puesto que nos estamos ocupando de la teoría descriptiva clásica, habría que hablar de *una* descripción, pero en aras de una mayor generalidad hablaremos en plural de “descripciones”. No obstante, como ya indicamos, los promotores de la versión clásica de la teoría descriptiva consideran que distintos hablantes pueden asociar con un término una descripción distinta; por tanto, en una comunidad lingüística habrá distintas descripciones asociadas con un término.

concepto en cuestión, en este caso, del concepto designado por el término de magnitud física “masa (clásica)”. Por tanto, se suscita el problema de cómo dilucidar, de entre las descripciones⁹ asociadas con un término de magnitud, cuál o cuáles son las que expresan su sentido y determinan su referencia.

Cabe señalar que es probable que con respecto a la mayoría de los términos de magnitudes físicas, en un determinado contexto teórico y en el seno de una determinada comunidad científica, exista bastante consenso respecto de la descripción o las descripciones que expresan el sentido de cada término y determinan su referencia. Es en un contexto de *cambio de teoría* en el que se suscitará con mayor gravedad el problema acerca del sentido y la referencia de los términos de magnitudes.

Podemos formular el problema mencionado tomando un punto de partida diferente. Cabría afirmar que para determinar si el término conceptual “masa” se refiere al concepto de masa clásica y al concepto de masa relativista, o más precisamente si estos conceptos son “idénticos”, habrían de tomarse en consideración las extensiones de estos conceptos; tales extensiones serán iguales si los objetos que caen bajo el concepto de masa clásica son exactamente los mismos objetos que caen bajo el concepto de masa relativista. Pero entonces para determinar si esos dos conceptos son el mismo concepto, habrían de compararse las extensiones de esos conceptos, o sea, las clases de los objetos que caen bajo los conceptos, para finalmente decidir si ambos conceptos constituyen o no la referencia de un único término conceptual. Ahora bien, como la igualdad de extensión tendría que establecerse atendiendo a objetos, si el número de tales objetos es muy elevado o incluso infinito no podremos nunca establecer mediante este procedimiento si dos conceptos son o no idénticos, por lo que el único procedimiento viable para argüir a favor de la identidad o diferencia entre conceptos parece ser el de

⁹ Toda descripción puede considerarse como formada a partir de un término conceptual. Véase la nota 21 *infra*.

apelar a la descripción o a las descripciones asociadas con los términos conceptuales respectivos. Y aquí nos encontramos de nuevo con el problema señalado, a saber, el de dilucidar de entre la descripción o las descripciones asociadas con un término cuál o cuáles son las que expresan su sentido y determinan su referencia.¹⁰

Pero no todas las magnitudes físicas pueden ser concebidas como funciones de un único argumento – dejando de lado que el valor de tales funciones no sea un valor veritativo –. La consideración de los términos de magnitudes como términos conceptuales, tal como Frege entiende estos últimos, y de las magnitudes como los conceptos designados por ellos, serviría, en todo caso, sólo para un tipo particular de términos de magnitudes, a saber, aquellos que designan magnitudes que están definidas en función de un único argumento, como la masa de un objeto. Pero muchas magnitudes físicas son “relacionales”, es decir, están definidas como relaciones entre dos o más objetos y, por tanto, son funciones de dos o más argumentos. No resulta posible, entonces, incluir dentro de los conceptos, tal como Frege los entiende, magnitudes como distancia o fuerza eléctrica, ya que no pueden ser consideradas como funciones de un único argumento. La distancia es una magnitud que necesariamente vincula dos posiciones, es decir, debe ser representada mediante una función que necesita de dos argumentos;¹¹ la fuerza eléctrica también se define como una relación entre al menos dos cargas eléctricas. Todas aquellas magnitudes físicas que están definidas como una relación entre dos o más objetos, cuerpos o entidades quedan, por tanto, fuera de aquello que Frege entiende por “concepto”.

¹⁰ Como ya hemos indicado, la asignación de una referencia a los términos conceptuales ha de llevarse a cabo siempre que interese la pregunta por la verdad. Según Frege, en la ciencia debemos preguntarnos por las referencias de los términos conceptuales y desechar aquellos términos conceptuales que no la tengan. En el caso de todo objeto debe poder determinarse si cae o no bajo un concepto; un término conceptual que no satisfaga este requisito, es decir, un término conceptual que sea vago, carece de referencia, pero de aquí no se sigue que carezca necesariamente de sentido.

¹¹ Acerca de la representación matemática de la distancia en distintos contextos teóricos véase la sección 2.1 del capítulo 1.

Ahora bien, en el caso de ese tipo de magnitudes “relacionales”, que están definidas respecto de varias variables y necesitan de al menos dos objetos – dos argumentos – para ser medidas, cabría traer a colación un tipo de funciones distintas de los conceptos, que Frege no tematizó tan detalladamente como los conceptos, a saber, las *relaciones*, a las que Frege definió como funciones de dos argumentos cuyo valor es un valor veritativo (1891, p. 168). No obstante, aparte de que, como hemos indicado, los valores de las magnitudes no son valores veritativos, a las relaciones y a los términos que designan este tipo de funciones les serían aplicables consideraciones semejantes a las que anteriormente hicimos con respecto a los conceptos y a los términos conceptuales y, por tanto, nos veríamos involucrados en el problema de dilucidar de entre la descripción o las descripciones que los hablantes asocian con distintos términos de relación, cuál o cuáles son las que expresan su sentido y determinan su referencia.

1.1.2. Russell

Llegados a este punto conviene traer a colación, aunque más brevemente, al otro gran representante de la versión clásica de la teoría descriptiva, B. Russell. La teoría de Russell acerca de los nombres propios (en el sentido usual del término) es que éstos son descripciones definidas abreviadas o encubiertas – véase, por ejemplo, Russell (1905) y (1919) –, con lo cual la denotación de un nombre propio será el de *la* descripción que abrevia. No obstante, como indicaremos a continuación, parece ser plausible suponer que la teoría de Russell acerca de los términos de magnitudes físicas sería, en lo fundamental, igualmente una teoría descriptiva.

Russell distingue entre el conocimiento de *cosas* y el conocimiento de *verdades*; este último es el conocimiento que se opone al error y en virtud del cual es *verdad* lo

que se conoce. Distingue también dos tipos de conocimiento de *cosas*; el conocimiento directo o *conocimiento por familiaridad* y el conocimiento por *descripción* (Russell 1912, pp. 35 y ss.). Conocemos por familiaridad dos tipos de entidades, a saber, los *particulares*, que Russell identifica por regla general con los datos sensoriales, y ciertos *universales*. Todos los demás tipos de entidades los conocemos por descripción, a saber, como las entidades que satisfacen una determinada descripción, si bien el conocimiento por descripción se basa en el conocimiento por familiaridad. Así cualquier objeto físico se conoce como aquel que causa tales y cuales datos sensoriales; de este modo se *describe* un objeto físico por medio de ciertos datos sensoriales. Un objeto es conocido por descripción cuando se sabe que hay un objeto, y sólo uno, que tiene una determinada propiedad que ninguno más posee, y la propiedad en cuestión vendría expresada mediante *una* descripción definida – si bien Russell admite que en el caso de hablantes diferentes esta descripción podrá ser diferente –.

Desde nuestro punto de vista son especialmente relevantes los *universales* y la forma en la que éstos pueden ser conocidos. Russell sostiene que el conocimiento de los universales puede ser directo o por descripción, y afirma (en 1912, pp. 101 s.) que los universales que pueden ser conocidos directamente son las cualidades sensibles, las relaciones de espacio y tiempo, la relación de semejanza¹² y ciertos universales lógicos abstractos. Aunque Russell (en 1912, p. 40) distingue entre nombres propios y nombres comunes y sostiene que ambos son generalmente descripciones, conviene hacer dos puntualizaciones al respecto. En primer lugar, cuando Russell hace esta afirmación, por “nombre propio” está entendiendo los nombres propios en el sentido usual del término, ya que él considera que hay un tipo distinto de nombres propios, los auténticos nombres

¹² Las relaciones de tiempo, de espacio y de semejanza, que constituyen un tipo de universales, necesitan para ser aprehendidas de un proceso de abstracción, que consiste en observar varios datos sensoriales y percibir lo que éstos tienen en común, a saber, una relación. Por tanto, hay universales que pueden ser conocidos directamente, aunque presupongan un proceso de abstracción.

proprios o *nombres lógicamente propios* – los pronombres demostrativos “esto” y “eso” – que no son descripciones definidas y que designan directamente particulares. Por otra parte, ya hemos indicado que hay algunos universales que son conocidos directamente, y los nombres comunes que los designen no serán descripciones.

Aunque Russell no se manifiesta a este respecto, cabe preguntarse con qué tipo de entidades habría que identificar las magnitudes físicas y cómo pueden ser conocidas. La opción más plausible es identificarlos con *universales*, es decir, con aquellas entidades que pueden ser compartidas por varias entidades. Un universal no es idéntico a cada una de las entidades que de él participan; así la *masa* no es idéntica a cada cuerpo con masa, como tampoco lo son la blancura y las cosas blancas. En las entidades que caen bajo un universal hay una naturaleza común de la que todos participan y esa naturaleza común es el universal. En este sentido *masa* es aquello que tienen en común todos los cuerpos en virtud de lo cual son másicos o graves.¹³ Por otra parte, puesto que entre los universales que son conocidos directamente Russell no menciona las magnitudes físicas – salvo las relaciones de espacio y tiempo – cabe suponer que la *mayoría* de las magnitudes físicas no son conocidas directamente o por familiaridad, sino por descripción, y esto será así por cuanto habrá *una* descripción que expresa una propiedad que especifica el universal en cuestión. Por tanto, la mayoría de los nombres comunes o términos generales que designan magnitudes físicas son descripciones abreviadas o encubiertas, como lo son los nombres propios en el sentido usual del término.

¹³ De acuerdo con esta teoría, dependiendo de cómo se defina a la masa, si como cantidad de materia que posee un cuerpo o como el cociente entre la fuerza que se le aplica a un cuerpo y la aceleración que ella produce en dicho cuerpo, diremos que el universal bajo el que caen es masa inercial o masa gravitatoria.

1.2. La teoría descriptiva contemporánea

Las versiones contemporáneas de la teoría descriptiva de los nombres propios se formularon a partir de los problemas que suscitan las versiones clásicas, entre los cuales se encuentra la implausibilidad de que la referencia de un nombre propio viniese determinada – para cada hablante – mediante *una* descripción definida. Estas versiones contemporáneas, como las de Strawson y Searle, permanecen fieles a las cuestiones planteadas por las versiones clásicas, especialmente por la teoría de Frege, salvo que reemplazan la apelación a una única descripción por el recurso a un conjunto o cúmulo de descripciones o propiedades,¹⁴ de las cuales sólo un subconjunto indefinido de ellas tiene que satisfacerse en cada caso particular. Ahora bien, una teoría de este tipo cabe extenderse de manera natural a los *términos de magnitudes físicas*.

Las versiones de la teoría descriptiva contemporánea sostienen, al igual que las clásicas, que la función referencial de los términos depende de su función descriptiva, pero establecen una relación más compleja entre dichas funciones. Searle presenta en (1967) y (1969) una propuesta acerca de las condiciones necesarias y suficientes para la referencia de un nombre propio, extensible a otros tipos de términos, como los términos de magnitudes físicas, por lo que hablaremos simplemente de términos, que es representativa de este tipo de versiones de la teoría descriptiva. De acuerdo con esta propuesta, con un término asociamos un conjunto o cúmulo de descripciones o propiedades (identificadoras), de tal manera que un subconjunto indefinido de ellas, o un número suficiente pero no especificado de las mismas proporciona el *sentido* del

¹⁴ Puesto que las descripciones expresan propiedades, los seguidores actuales de la teoría descriptiva suelen hablar indistintamente de *descripciones* o *propiedades* como determinantes de la referencia de los términos, si bien algunos prefieren hablar de propiedades (vid., por ejemplo, Jackson 1998). En lo siguiente habrá de entenderse que al ocuparnos de la teoría descriptiva apelaremos de manera indistinta a descripciones o las propiedades correspondientes.

término y éste determina su *referencia*. De entre las descripciones pertenecientes a dicho conjunto se asume que algunas podrán tener más peso que otras, aunque es una cuestión compleja la de especificar un criterio de ponderación al respecto – pero véase nota 43 *infra* –.

De acuerdo con este tipo de teorías de la referencia, aplicadas a los términos de magnitudes físicas, habría de sostenerse que los hablantes – preferentemente, aquellos pertenecientes a una comunidad científica – asocian con cada término de magnitud física un conjunto de descripciones o propiedades, y un número suficiente, pero no especificado, de las descripciones o de las propiedades correspondientes pertenecientes a dicho conjunto expresaría el sentido del término de magnitud física y éste determinaría su referencia.

Una versión de la teoría descriptiva de la referencia, que no concuerda adecuadamente con la teoría descriptiva contemporánea es la formulada por Carnap (1947), con su famosa distinción entre la *intensión* y la *extensión* de los términos, pues de acuerdo con ella la extensión de un término viene determinada por su intención, donde se presupone que un término tiene una *única* intención. No obstante, la teoría de la referencia de los términos de magnitudes físicas presente en (1966), donde no se recurre a dicha distinción, es distinta de ella y se adecua bastante más aceptablemente a la versión contemporánea de la teoría descriptiva que hemos presentado más arriba.

1.2.1. Carnap

De acuerdo con la clasificación de los conceptos propuesta por Carnap,¹⁵ los términos de magnitudes físicas expresan un tipo de conceptos que son los conceptos cuantitativos

¹⁵ Según Carnap hay tres tipos de conceptos científicos: clasificatorios, comparativos y cuantitativos (o métricos). Esta clasificación ha sido presentada en la sección 1. del capítulo 1.

(o métricos); dichos términos pertenecen a un lenguaje cuantitativo¹⁶ que introduce funtores o símbolos de funciones, de tal manera que los valores de éstos o, mejor dicho, de sus funciones correspondientes – las magnitudes físicas – son valores numéricos. Las magnitudes físicas son según Carnap conceptos cuantitativos definidos operacionalmente. Para describir y explicar los fenómenos de la naturaleza mediante magnitudes y sus términos correspondientes es necesario servirse de una serie de procedimientos que permitan asignarles valores numéricos; éstos son procedimientos de *medición*. El *significado* de las magnitudes físicas – y, por tanto, de los términos correspondientes¹⁷ – está vinculado con los procedimientos de medición a través de las reglas para efectuarlas; así Carnap afirma que “no podemos decir realmente cuál es el significado de una magnitud [...] [física] hasta que formulamos reglas para medirla” (1966, p. 98). Dependiendo del tipo de magnitud física que se desee medir, se pueden aplicar distintos procedimientos para su medición.

Las *magnitudes extensivas*¹⁸ son medibles a través de procedimientos sencillos que constan sólo de tres reglas:

Regla I: Especifica el procedimiento por el cual definimos la igualdad de magnitud.

Regla II: Aditividad. Cuando un objeto se forma a partir de dos componentes, el valor de la magnitud para este objeto es la suma aritmética de los valores de la magnitud de los componentes: $L(a \text{ o } b) = L(a) + L(b)$, donde “o” indica un procedimiento concreto para unir *a* y *b*.

¹⁶ Según Carnap, la diferencia entre lo cualitativo y lo cuantitativo no es una diferencia en la naturaleza, sino una diferencia en nuestro sistema conceptual, una diferencia entre lenguajes.

¹⁷ Aunque Carnap habla a menudo del *significado* de una magnitud física, nos permitimos extrapolar dichas afirmaciones a los términos correspondientes, lo que parece más natural, hablando así del significado del *término* que designa la magnitud en cuestión.

¹⁸ Aunque los criterios para decidir si una magnitud es extensiva no son exactos, Carnap considera que una magnitud es extensiva “si se puede concebir una operación que sea una operación natural de unión y para la cual pueda construirse una escala” (Carnap 1966, p. 106). Casi todas las magnitudes extensivas son aditivas, pero hay algunas excepciones, como la velocidad relativa en la teoría de la relatividad especial.

Regla III: Unidad. Especifica el valor de la magnitud, eligiendo un objeto o fenómeno natural, fácilmente reproducible, para definir la unidad de valor en términos de dicho fenómeno u objeto.

Cuando las magnitudes físicas son tales que no poseen una operación de unión que suministre una base para el principio de aditividad, el procedimiento anterior no es aplicable y se debe utilizar uno menos simple.

Las reglas para medir y, por tanto, para definir operacionalmente un término de magnitud *M no-extensiva* son las siguientes:

Regla I: regla para la magnitud *M* especificada en una relación empírica *I*. Si se cumple la relación I_M entre los objetos *a* y *b*, ambos objetos tendrán valores iguales para la magnitud *M*: si $I_M(a,b)$ entonces $M(a) = M(b)$.

Regla II: Si se cumple la relación empírica L_M entre *a* y *b*, el valor de *M* será menor para *a* que para *b*: si $L_M(a,b)$, entonces $M(a) < M(b)$.

Regla III: Esta regla especificará el modo de asignar un valor particular (para un estado específico, fácilmente reconocible y reproducible) a la magnitud *M* que se intenta medir.

Regla IV: Nos permitirá asignar un segundo valor a la magnitud *M*, especificando otro estado fácilmente reconocible y reproducible. Los valores provenientes de las reglas III y IV permitirán disponer de una base para definir unidades de medición.

Regla V: Especifica las condiciones empíricas ID_M en las cuales se dirá que dos diferencias *D* en los valores de *M* son iguales: si $ID_M(a,b,c,d)$, entonces $M(a) - M(b) = M(c) - M(d)$.

Carnap sostiene que el *significado* de una magnitud física y, por tanto, del término de magnitud correspondiente, está vinculado a las condiciones de

mensurabilidad de la magnitud y lo mismo ocurre con la *referencia* del término, ya que el significado del término *determina* su referencia. De este modo el significado y la referencia de un término de magnitud dependerán de los procedimientos y de las reglas correspondientes para medir la magnitud en cuestión.

En cualquier caso, el significado *completo* de un término de magnitud física no puede venir dado mediante un determinado procedimiento de medición; esto se debe a varias razones. En primer lugar, muchas veces una misma magnitud física puede y debe ser medida a través de procedimientos muy diversos, dependiendo, por ejemplo, del orden de magnitud de la misma; así la masa de muchos objetos puede ser medida a través de una balanza, mientras que la masa de una macromolécula se “mide” indirectamente a través de un espectrómetro. En segundo lugar, hay muchas maneras de medir una magnitud física en las que no es posible utilizar directamente el procedimiento a través del cual fue introducida dicha magnitud; así no todas las longitudes pueden ser medidas directamente a través de una barra rígida, ni las longitudes muy pequeñas ni las astronómicas pueden ser medidas de esta forma. Por último, a veces se deberán medir otras magnitudes y posteriormente, mediante leyes que vinculan esas magnitudes con la magnitud a medir, se llegará a la estimación indirecta de ésta última.

Aunque no en su totalidad, el *significado* de un término de magnitud física depende de los procedimientos que permiten medir la magnitud en cuestión – así como de las reglas correspondientes –, pero puesto que hay a veces muchos procedimientos posibles para medir una cierta magnitud, Carnap se pregunta si sería correcto hablar de conceptos diferentes de una magnitud y no de un *único* concepto. A este respecto Carnap alega que, aunque las definiciones operacionales, esto es, las definiciones de una magnitud a través de un procedimiento de medición, no pueden definir *totalmente* una

magnitud y, por tanto, el término correspondiente, este tipo de definiciones vinculan nuestras observaciones con el lenguaje teórico de la física y dichas definiciones más todos los postulados de la física teórica sirven para dar interpretaciones *parciales* de los términos de magnitudes. Estas interpretaciones parciales no son definiciones finales y completas, ya que la física las refuerza constantemente con nuevas leyes y nuevas definiciones operacionales. De modo que, según Carnap, es preferible pensar que hay una *única* magnitud y que ésta se encuentra *parcialmente* definida por todo el *sistema de la física*, incluyendo todos los procedimientos utilizados en su medición. De este modo, los procedimientos de medición no definen magnitudes físicas en un sentido definitivo, sino que son solamente “reglas de correspondencia” para conectar los términos del lenguaje de observación con los términos del lenguaje teórico. Es en este sentido en el que el autor concibe los términos de magnitudes físicas como términos *teóricos* y no como términos observacionales definidos explícitamente a través de ciertos procedimientos de medición.

Una cuestión problemática suscitada por los procedimientos de medición de las magnitudes implicados en la definición operacional de una magnitud, se deriva de la intervención de una o varias magnitudes en la definición de otra. Dadas dos magnitudes, M_1 y M_2 , puede ocurrir que sus definiciones operacionales intervengan una en la de la otra sin que esto implique un círculo vicioso. Este aparente círculo vicioso puede eludirse aplicando el método de aproximaciones sucesivas. Primero se introduce la magnitud M_1 sin considerar el factor de corrección que aportaría M_2 a su definición; posteriormente, se define M_2 utilizando para ello el concepto M_1 ; a continuación, pueden introducirse en la definición de M_1 las correcciones provenientes del concepto M_2 , obteniendo así un concepto M_1 más refinado y preciso. En algunos casos será

necesario ir de un concepto a otro muchas veces introduciendo correcciones hasta lograr unas mediciones suficientemente precisas según cuáles sean nuestros propósitos.

A este respecto pueden plantearse varios problemas. En primer lugar, si una misma magnitud puede ser medida a través de procedimientos muy diversos, vinculándola con otras magnitudes en cada caso a través de diversas leyes físicas, cuál es el límite de la *diferencia* que puede haber entre los procedimientos experimentales que se utilizan para medirla con objeto de saber que se está siempre midiendo la *misma* magnitud, aunque en órdenes de magnitud muy diversos. En segundo lugar y de forma más general, si no se dispone de definiciones completas y si los procedimientos de medición para una misma magnitud pueden ser muy diversos, en virtud de qué propiedad característica es posible *identificar* dicha magnitud. Por último, y en el caso de existir tal propiedad, cabe preguntarse si debe ser una única o un conjunto de tales propiedades las que nos permitan identificar la magnitud en cuestión. En Carnap (1966) se puede rastrear una respuesta a las últimas dos cuestiones, al menos para algunos tipos de magnitudes y es la siguiente. Algunas veces es posible introducir un término de magnitud (y definirlo al menos temporalmente y hasta que se lo refine) con la intención de designar una magnitud cuya propiedad característica es la conjunción de las descripciones utilizadas para describir el estado de un objeto respecto de un determinado estado de cosas (o de un fenómeno), que el término sintetiza. Es posible entonces, al menos en el caso de las magnitudes *inobservables*¹⁹ designadas por términos que han sido introducidos como hemos señalado, identificar una magnitud a través de su propiedad característica, que es el conjunto de las mencionadas

¹⁹ Carnap entiende por “observables” aquellas propiedades o magnitudes cuantitativas que pueden ser medidas de manera relativamente simple y directa; por el contrario, cuando esto resulta imposible, estamos frente a un “inobservable”. Ahora bien, puesto que ésta es una distinción de grado, es imposible definir de forma precisa dichas nociones. En el marco de la mecánica cuántica, por ejemplo, se denominan “observables cuánticos” a propiedades, aún cuando queda claro que en el marco de esta teoría no se asigna valores definidos a los observables como *posición* o *momento*, sino que se hacen predicciones sobre sus distribuciones de probabilidad.

descripciones. Esto no permite obtener un método de identificación exacto de una magnitud pero muestra, al menos, cuál podría ser un camino a seguir. El término “energía” puede servir de ejemplo en el siguiente sentido: la energía no es una magnitud que pueda observarse directamente, si bien es posible observar los fenómenos y efectos que ella causa y mediante tal magnitud es posible explicar dichos fenómenos y efectos. Es decir, observados ciertos fenómenos, para evitar la acumulación de descripciones, se introduce un término que designa una magnitud que supuestamente es la causante de los mismos.

Al mencionar una cuestión problemática suscitada por las reglas que determinan los procedimientos de medición de las magnitudes, señalamos que al definir una magnitud son involucradas, muchas veces, una o varias magnitudes distintas. Todas las magnitudes físicas involucradas en la definición de alguna magnitud están relacionadas entre sí y, por tanto, lo están los términos que las designan. Pero, si bien los términos de magnitudes físicas están relacionados entre sí de manera tal que es posible expresar esta vinculación entre ellos mediante funciones matemáticas, no son estas magnitudes entidades matemáticas exactamente iguales a las de la matemática pura, por lo que no es posible definir completamente un término de magnitud mediante la matemática pura. En palabras de Carnap: “[l]os términos físicos sólo pueden ser introducidos con ayuda de constantes no-lógicas, basadas en observaciones del mundo real” (1966, p. 315). Éste es un rasgo importante del sistema axiomático de la física; sus términos teóricos deben ser interpretados a través de reglas de correspondencia que los vinculen con fenómenos observables, pero, puesto que esta interpretación es siempre incompleta y nunca definitiva, el sistema permanece abierto a la incorporación de nuevas reglas de correspondencia. A este respecto Carnap admite que los físicos podrían elaborar reglas de correspondencia que fuesen incompatibles entre sí o con las leyes teóricas, pero no

propone ningún procedimiento para determinar cuál de estas reglas sería la correcta. Es decir, dadas dos definiciones (incompletas y no definitivas) de una magnitud, no se dispone, en el marco de la teoría de Carnap, de una forma de determinar cuál de estas definiciones es más acertada que la otra, aunque Carnap señala que esta incompatibilidad marca el límite para la libertad de elección y formulación de reglas de correspondencia; en tanto no se incurra en incompatibilidad con las leyes teóricas, los físicos son libres de agregar nuevas reglas de correspondencia (Carnap 1966, p. 317).

Así como el gran valor de una ley teórica está en su poder para sugerir nuevas leyes que puedan ser corroboradas empíricamente, el valor de introducir un *término de magnitud* está en sintetizar en una magnitud información proveniente de muchos conceptos clasificatorios y comparativos. Algunas magnitudes, a saber, aquellas cuya medición sea fácil y directa, podrían tener una definición explícita mediante procedimientos empíricos y dejar de ser conceptos teóricos, pero es conveniente conservar otros términos de magnitudes, aquellos que designan magnitudes alejadas de la posibilidad de una medición simple y directa, como términos que designan conceptos teóricos sujetos a modificaciones basadas en nuevas observaciones. En palabras de Carnap: “[q]uizás el mundo sea limitado en su estructura y en sus leyes” (ibíd.) y en algún momento las nuevas observaciones no hagan necesario seguir modificando los conceptos con los que nos manejamos. Si las reglas de correspondencia permitieran interpretar un concepto teórico de modo que ya no fuera posible una interpretación posterior diferente, el concepto en cuestión dejaría de ser teórico y formaría parte del lenguaje observacional; no obstante, como Carnap afirma, “no hay ninguna manera de saber si éste es un proceso (el de reforzar la interpretación de un término mediante reglas de correspondencia) infinito o si eventualmente tendrá fin” (ibíd.).

Llegados a este punto resumiremos la teoría de la referencia que atribuimos a Carnap de la siguiente manera. De acuerdo con lo expuesto por Carnap en (1966) el significado de un término de magnitud física viene determinado *en parte* por las descripciones que contienen la información necesaria para definir operacionalmente la magnitud que designa. Esta información podría ser la que está incluida en lo que hemos denominado – en el capítulo 1 – aspectos experimental (el tipo de interacción objeto a medir/montaje experimental) y el aspecto formal o matemático, si es que la magnitud es definida operacionalmente a través de otras magnitudes relacionadas por una ecuación. Dado que no es una, sino un conjunto de descripciones (aquellas que contengan la información experimental y formal necesaria para definir una magnitud) las que determinan en parte el significado de un término de magnitud, y éste determina su referencia, la teoría de Carnap presente en (1966) puede ser considerada una versión contemporánea de las teorías descriptivas.

Por último, cabría señalar que la teoría de la referencia de Carnap permitiría explicar los cambios de referencia. Si un conjunto de descripciones asociadas con un término expresan su significado y éste determina su referencia, la referencia de un término variará – por regla general, y exceptuando posibles casos de correferencia – si lo hace el significado y éste variará, de acuerdo con la teoría de Carnap, si lo hacen las descripciones contenidas en la definición de la magnitud que el término designa. Pero, si bien Carnap sostiene que el significado de un término de magnitud está vinculado con los procedimientos para medirla, nada nos dice acerca de posibles vinculaciones del significado con descripciones acerca de otros de los aspectos de la definición de una magnitud. Carnap sólo tiene en cuenta el aspecto operacional de la definición de una magnitud, aunque asume que este aspecto no puede definirla completamente. Atender a

la definición operacional de una magnitud no incluye (al menos no necesariamente) tener en cuenta los aspectos ontológico y contextual a los que aludimos en el capítulo 1.

1.3. Evaluación de la teoría descriptiva

En esta sección indicaremos algunos de los problemas que se plantean con respecto a las versiones clásica y contemporánea de la teoría descriptiva de la referencia, especialmente en tanto que aplicadas a los términos de magnitudes físicas.

Uno de los problemas más importantes que se suscitan con respecto a la versión clásica de la teoría descriptiva, según la cual la referencia de un término viene determinada mediante una *única* descripción o propiedad, es la dificultad de abarcar todos los aspectos implicados en la definición de una magnitud física en una sola descripción. Por otra parte, si se admite, como parece razonable, que la referencia de los términos de magnitudes físicas puede estar sujeta a cambio, incluso si una única descripción asociada con un término pudiera contener los aspectos ontológicos, experimentales, formales y contextuales de la definición de una magnitud – lo cual, ha de reconocerse, es poco plausible –, habría que estipular qué parte de la descripción es la que debería mantenerse intacta para justificar la constancia de la referencia del término o qué parte debería verse modificada para establecer que ha tenido lugar un cambio de referencia.

Parecería que la dificultad para incluir todos los aspectos implicados en la definición de una magnitud física en una única descripción podría resolverse si suponemos que la referencia de un término viene determinada por un conjunto de descripciones, de modo que para que una entidad pertenezca a la extensión de un término de magnitud debe satisfacer un número suficiente pero no especificado de las

descripciones o propiedades asociadas con el término. Esta es la tesis sostenida por algunas versiones de la teoría descriptiva de la referencia, como la de John Searle, pero extendida a los términos de magnitudes físicas. Sin embargo, cabe señalar que una teoría de este tipo acerca de la referencia de los términos de magnitudes no especifica el tipo de información que deben contener las descripciones que, asociadas con un término de magnitud física, determinarán la referencia del término. Según nuestra tesis, esa información habría de corresponder justamente a la que hemos mencionado en nuestra propuesta acerca de los distintos aspectos de la definición de un término de magnitud física, pero entonces la pregunta que se suscita es por qué la referencia de un término de magnitud física habría de venir determinado sólo por un número suficiente, pero no especificado de descripciones que expresen esos aspectos. Pues parece plausible que las descripciones que determinasen la referencia de un término de magnitud física serían *todas* aquellas que recojan los aspectos involucrados en la definición de la magnitud en cuestión. No obstante, incluso si se acepta esta propuesta para complementar esa teoría, este tipo de teoría, por sí sola, no proporciona un criterio para determinar cuáles o qué número de las descripciones que se asocian con un término de magnitud física deben permanecer constantes para que no se vea alterada la referencia de dicho término.

La propuesta de Carnap en (1966), centrada en el aspecto experimental de una magnitud, deja de lado los demás aspectos que a nuestro entender son fundamentales para definir una magnitud y por tanto, para determinar la referencia del término de magnitud correspondiente.

Una objeción adicional contra la teoría descriptiva de la referencia es que de los dos cometidos a ser llevados a cabo por una teoría de la referencia, a saber, explicar la *determinación* de la referencia y la *transmisión* de la referencia, la teoría descriptiva

contiene propuestas acerca del primer cometido, pero ninguna, al menos de manera explícita, acerca del segundo.

Llegados a este punto puede ser relevante atender a algunos de los problemas de la teoría descriptiva de los *términos de género natural* usualmente mencionados en la bibliografía, si bien a nosotros nos interesarán especialmente en tanto que aplicados a ese tipo de términos de género natural que son los *términos de magnitudes físicas*.

En primer lugar, debido a que diferentes hablantes de una lenguaje pueden asociar descripciones distintas con un mismo término, dependiendo del conocimiento que posean acerca de su referente, la teoría descriptiva debería poder explicar si esto implica un cambio en la referencia del término de persona a persona, o en qué circunstancias implicaría tal cambio de referencia, pues aunque la asociación de descripciones distintas implique un cambio en el sentido del término, no todo cambio en su sentido conlleva necesariamente un cambio de referencia.

En segundo lugar, esta teoría se encuentra con el problema de explicar cómo es que, por ignorancia de conocimientos específicos sobre un determinado género natural, un hablante puede asociar con un término una descripción falsa o parcialmente falsa de dicho género y, aún así, poder referirse al género en cuestión. Un ejemplo famoso de este tipo de problemas, que dan lugar a los argumentos en torno a “la ignorancia y el error” contra la teoría descriptiva, es el del uso que los hablantes no-expertos de una comunidad lingüística hacen del término “ballena”. Muchos hablantes asocian, o asociaron, con el término “ballena” una descripción que contenía el término general “pez”. La descripción en cuestión es falsa de las ballenas, pero esto no parece ser óbice para que mediante el término “ballena” se estuvieran refiriendo a dicho tipo de animales. Otro ejemplo que a menudo se ha mencionado es el de un tigre que sólo tuviese tres patas (véase Kripke 1980, p. 119), suponiendo que entre las descripciones o

propiedades asociadas con el término “tigre” ocuparía un rasgo central la propiedad de ser un animal cuadrúpedo.

Conviene atender a lo que sucede con el primer tipo de problema recién mencionado con respecto a los términos de magnitudes físicas, especialmente si los hablantes tomados en consideración son miembros de comunidades científicas distintas,²⁰ con objeto de dejar apuntada una cuestión de la que nos ocuparemos más detenidamente en capítulos siguientes. La comunidad científica que introduce un término de magnitud ha observado una regularidad, es decir, que uno o varios objetos poseen unas determinadas propiedades o que un determinado fenómeno puede explicarse mediante una o varias propiedades. Como ya indicamos, en el caso de Frege las propiedades de un objeto – y algo similar se aplicaría a las propiedades de un fenómeno – son los conceptos bajo los cuales cae el objeto. Cada concepto es designado mediante un término conceptual o, en sentido laxo, mediante una descripción,²¹ y de acuerdo con la teoría descriptiva para determinar si uno o varios objetos, o uno o varios fenómenos, caen bajo un concepto y, por tanto, poseen la propiedad en cuestión habrá de determinarse si satisfacen la descripción o las descripciones asociadas con el término conceptual que designa el concepto, es decir, si poseen la propiedad o las propiedades expresadas por tales descripciones. Pero llegados a este punto cabe preguntarse si existe

²⁰ Si se tomaran en consideración todos los hablantes de una comunidad lingüística, resultaría necesario establecer diferencias entre los que poseen conocimientos específicos sobre un género natural o una magnitud en particular y los hablantes legos, ya que probablemente serán muy distintas las descripciones que asocien con los términos respectivos. A este respecto es relevante importar desde la teoría causal de Putnam la noción de *hablante experto* (véase la sección 2.2.1. de este capítulo). Utilizando esta noción, podemos atender sólo a la descripción o a las descripciones asociadas con un término por parte de los hablantes expertos, que, por regla general, serán miembros de una comunidad científica.

²¹ Al aludir en el marco de la teoría de Frege a que un concepto o una propiedad son designados – o, de manera más general, expresados – mediante una descripción, nos estamos expresando en un sentido laxo. La relación entre conceptos (o propiedades) y descripciones consiste en que cada descripción puede considerarse como formada a partir de un término conceptual – esto ya se indicó en la nota 9 – y este término conceptual designa el concepto (o propiedad) en cuestión.

otra manera de determinar la posesión de una propiedad por parte de un objeto o de un fenómeno que no implique decidir si satisface las descripciones en cuestión.²²

Particularmente con respecto a los términos de magnitudes físicas, tanto en el caso de las comunidades científicas que los introducen como en el de aquellas que los heredan, cuando introducen modificaciones en las descripciones asociadas con un término lo hacen de modo que, a la luz de los conocimientos que cada una de estas comunidades posee sobre la magnitud, no quepa que el referente del término que la designa no concuerde con el que cada comunidad cree que debería asignársele. Del mismo modo, al explicar un fenómeno en función de una determinada magnitud o propiedad, se está construyendo una explicación basada en las descripciones que se asocian con el término que designa dicha magnitud y si la asociación fuese incorrecta, lo sería también la interpretación del fenómeno. Con estas consideraciones queda apuntada la cuestión acerca de bajo qué condiciones dos miembros de dos comunidades científicas distintas que asocian descripciones distintas con un mismo término de magnitud se están refiriendo o no a la misma magnitud. Esta cuestión será tratada en los capítulos 3 y 4.

Llegados a este punto podemos retomar el segundo de los problemas que con respecto a las teorías descriptivas hemos mencionado,²³ y preguntarnos si en el caso de

²² El término “campo eléctrico”, que designa una magnitud, es introducido para dar cuenta de la perturbación que genera cualquier partícula cargada en su entorno. Dicho término puede ser definido mediante varias descripciones: la perturbación en el espacio generada por una carga eléctrica, la magnitud directamente proporcional a la carga que la genera, etc. Los fenómenos de atracción o repulsión, por ejemplo, de una carga eléctrica en una zona determinada del espacio pueden explicarse en función de la magnitud campo eléctrico. Pero para explicar un fenómeno en función del campo eléctrico hay que establecer que se trata de una perturbación en el espacio, que dicha perturbación está generada por una carga eléctrica, etc., es decir, hay que establecer que el fenómeno en cuestión satisface las descripciones que se asocian con el término, si bien estas descripciones expresan propiedades dentro de unos márgenes de error o incerteza que se estipularán en cada caso. El problema que se plantea es el de establecer cuál o cuáles de esas descripciones son condiciones necesarias y suficientes para identificar la posesión o no de la propiedad de campo eléctrico.

²³ Este problema es suscitado al encontrar alguna entidad de la que consideramos que pertenece a un determinado género natural, pero no posee (todas) las propiedades expresadas por la descripción o las descripciones que asociamos con el término de género natural respectivo, cuya satisfacción consideramos

un término de magnitud física podría considerarse que una entidad posee una propiedad si no son aplicables a dicha entidad la serie de descripciones (regularidades observadas) que se asociaron con dicho término. Ahora bien, las descripciones que se asocian con cada uno de los términos de magnitudes físicas son generalmente portadoras de ciertas condiciones experimentales del mismo; es decir, la descripción que se asocia con un término de magnitud es, las más de las veces, una forma de estipular aquello que se deberá observar y medir; por este motivo Carnap afirma (en 1966, pp. 97 y ss.) que las *condiciones experimentales* de aplicación de un término son parte del *significado* del término.²⁴ Pero si con un término de magnitud física se asocian una serie de descripciones y, dependiendo de lo que se pretenda observar y de las posibilidades de experimentación, se utiliza una u otra descripción, se suscita entonces la pregunta acerca de si es una de estas descripciones la portadora del significado (sentido) del término y otra u otras, dependiendo del caso, son las portadoras de sus condiciones experimentales, o si, como afirma Carnap, las condiciones experimentales *son* parte del significado (sentido) del término.

que proporciona condiciones necesarias y suficientes para la pertenencia al género natural en cuestión y, por tanto, para la referencia de dicho término.

²⁴ El siguiente ejemplo – al que denominaremos (1) – puede aclarar en qué sentido la descripción que se asocia con un término de magnitud es muchas veces una forma de estipular aquello que se deberá observar y medir. Se dice que una muestra, perteneciente a un determinado material o sistema, es *homogénea* si presenta en cada uno de sus puntos las mismas propiedades intensivas, que son aquellas propiedades que no dependen de la cantidad de materia analizada, sino solamente del material analizado. Esto equivale a decir que una muestra es homogénea si presenta una única fase. Por este motivo, cuando se pretende determinar si una muestra dada posee o no la propiedad de ser homogénea, la forma de hacerlo es, justamente, verificando si presenta una o más fases, es decir, verificando si una de las descripciones asociadas con el término en cuestión es satisfecha por un objeto (muestra) en particular. Cuando se pretende determinar si una muestra es o no homogénea no se observan todas las propiedades intensivas en cada uno de los puntos de la muestra ni se observan al microscopio todos y cada uno de sus puntos para saber si la muestra presenta una o más fases. En realidad, sólo se observan con detalle aquellos puntos que a simple vista parecen corresponder a una fase distinta de la que se quiere observar. Cabe señalar que otra cuestión no menos importante en relación con las condiciones experimentales es la de los márgenes de error o *incerteza*, a los que antes aludimos en la nota 22. El montaje experimental con el que se haga una medición determinará y estará determinado por los márgenes de incerteza que se acepten, de modo tal que una muestra que podría ser homogénea a simple vista seguramente no lo será observada en el microscopio. Retomaremos este ejemplo en la sección 2.2.1 del presente capítulo.

No obstante, antes de hacer una propuesta al respecto, conviene mencionar un problema adicional con el que se encuentra la teoría descriptiva, a saber, no proporciona un criterio inequívoco para la identidad entre magnitudes y, por tanto, un criterio de la identidad de la referencia de términos de magnitudes. Resultaría obviamente imposible seleccionar una única y exclusiva descripción definitoria tal como proponen las versiones clásicas, pero la solución que propone Carnap en el marco de la distinción entre intensión y extensión – analizar la equivalencia de dos términos de magnitudes físicas en relación con la identidad de sus extensiones e intensiones – es del mismo tenor e igualmente poco plausible. Aunque se reemplace la única descripción definitoria de un término de magnitud por un conjunto de descripciones de diversos tipos, tal como propone Carnap, una definición de una magnitud conformada de esta manera no será nunca una definición completa del término. Y si no se dispone de definiciones de una magnitud que sean completas, y si no es posible identificar una propiedad sólo por los procedimientos experimentales que implica su medición, ni sólo por su definición matemática, el problema de la identidad entre magnitudes queda sin resolver.

Sin embargo, la sustitución de una única descripción definitoria de una magnitud física por un conjunto de descripciones de diversos tipos, permite pensar en una solución para el problema anteriormente mencionado, suscitado por los ejemplos en los que el referente que intuitivamente debían tener los términos no concuerda con el que debería seguirse de acuerdo con la versión clásica de este tipo de teorías. En el caso de que sea un conjunto de descripciones asociadas con un término de magnitud el que determina su referencia, el *error* aislado de una de estas descripciones – en el sentido de que la descripción en cuestión no designe en algún contexto el referente adecuado, de acuerdo con una teoría –, no implica necesariamente un *error* del conjunto o cúmulo de

descripciones en la determinación del referente del término.²⁵ Además, de acuerdo con nuestra forma de entender la referencia de un término de magnitud física, es posible admitir que, en un contexto de cambio teórico, si cambia algún subconjunto significativo incluido en el conjunto de descripciones ontológicas, experimentales, matemáticas o formales, o contextuales, variará también la referencia del término en cuestión. Asimismo es posible explicar desde esta perspectiva el hecho de que, aunque una expresión o definición matemática de una magnitud, bajo ciertas aproximaciones, pueda reducirse a la expresión de otra magnitud, esto no implica que las dos magnitudes sean necesariamente idénticas y, por tanto, que los términos que designan cada una de estas magnitudes tengan la misma referencia. Lo mismo puede decirse de cada uno de los otros tipos de descripciones. Ninguna variación aislada de algún tipo de descripción ni tampoco el hecho de que alguno de estos tipos permanezca constante permite asegurar si cambia o permanece estable la referencia del término que estemos analizando. Si bien esta forma de entender la referencia de un término de magnitud física implica un análisis de la totalidad de los aspectos relevantes involucrados en la definición de una magnitud física, presenta también una ventaja respecto de las versiones clásicas de la teoría descriptiva, ya que permite explicar el comportamiento de aquellos términos que no cambian su referencia en un contexto de cambio teórico, aunque cambie alguna de las descripciones asociadas con el término.

2. La teoría causal de la referencia

La tesis central de la teoría causal de la referencia puede enunciarse de la siguiente manera: el referente de un término es una entidad con la que el término o, dicho más precisamente, el uso del término por parte de un hablante y, por tanto, el hablante

²⁵ No obstante, cabría pensar si el problema mencionado no se aplicaría también a la teoría descriptiva contemporánea. Véase sin embargo la sección 2.1. de este capítulo.

mismo está vinculado *causalmente*. Frente a la teoría descriptiva, los seguidores de las teorías causales niegan que la referencia de un término esté determinada por las descripciones que los hablantes asocian con el término y, por tanto, por las creencias de los hablantes acerca del referente. En lo siguiente se examinarán los dos tipos de teorías causales más importantes con respecto a (todos) los términos de género natural que, por tanto, son aplicables a ese peculiar tipo de términos de género natural que son los términos de magnitudes físicas.

2.1. Kripke

Kripke alega en (1980) que el comportamiento de los términos de género natural es similar al de los nombres propios y que su referencia viene fijada por las entidades del mundo y no por condiciones descriptivas asociadas con ellos.

En la conferencia tercera de (1980) Kripke sostiene que un término de género natural se usa para designar (miembros de) un cierto género de entidades; algunos hablantes, en el pasado, descubrieron entidades de ese género y nosotros hemos oído hablar de ellas, de tal manera que hay una conexión *causal* (o histórico-causal) entre nosotros, en tanto que miembros de una comunidad lingüística, y el género natural en cuestión. Usualmente asociamos con un término de género natural ciertas propiedades, a saber, las propiedades por las que originalmente se identificaron los miembros del género,²⁶ y aunque puede ocurrir que algunas de estas propiedades no sean verdaderas (de los miembros) del género, la referencia del término de género no se ve modificada por el hecho de que constatemos que habíamos estado equivocados acerca de algunas de dichas propiedades.

²⁶ Kripke habla con cierta indistinción de las propiedades usualmente asociadas con un término de género natural y de las propiedades por las que originalmente se identificaron los miembros del género. En lo siguiente nos expresaremos también con tal indistinción.

Más aún, Kripke considera que sería posible que estuviésemos equivocados no sólo acerca de *algunas* de las propiedades que asociamos con un término de género natural, sino con respecto a *todas* ellas (1980, p. 121). De la misma manera que una entidad puede tener *todas* las propiedades por las que originalmente identificamos los miembros del género X, designados por el término de género natural T_X , y, sin embargo, no ser un miembro del género X, también podríamos descubrir miembros del género X que no tuviesen *ninguna* de dichas propiedades.²⁷ Por este motivo, el término “ T_X ” no expresa un “concepto cúmulo” en el que la mayoría de las propiedades (aunque tal vez no todas) empleadas inicialmente o usualmente para identificar un género tienen que ser poseídas por los miembros del género. Por el contrario, la posesión de la mayoría de estas propiedades no tiene por qué ser una condición necesaria para la pertenencia al género, ni tampoco una condición suficiente.

Con respecto a las magnitudes físicas cabría preguntarse si es posible que una magnitud física M_2 tenga *todas* las propiedades por las que originalmente fue identificada una magnitud M_1 y no ser esa *misma* magnitud M_1 . En relación con esta cuestión es conveniente señalar que si bien cabe suponer que todos los conceptos son de alguna manera teóricos, un término de magnitud, como el término “masa”,²⁸ parece más fuertemente *teórico* que un término de género natural como el término “vaca”. Se observa a las vacas y señalando a una vaca cabe estipular que “se denominará ‘vaca’ a todo aquello que sea bastante parecido, aunque no necesariamente idéntico, a este objeto que se señala ahora” y, de esta manera, dispondremos de un criterio – si bien impreciso – para identificar (los miembros de) un determinado género de animal. Se ha llevado a cabo así una primera abstracción al pasar de nombrar “vaca” a un objeto en particular a nombrar de esa manera a todos los miembros de la extensión del término “vaca” y, por

²⁷ Kripke (1980, p. 121) enuncia dicha tesis con respecto al término “oro” y posteriormente la extiende al resto de los términos de género natural.

²⁸ En este contexto utilizo el término “masa” para referirme a la masa clásica.

tanto, del género en cuestión. Pero en el caso de la masa la situación es distinta; no se ven *masas*, lo que se observa son cuerpos a los que se les atribuye la *propiedad* de poseer masa. Es decir, el criterio involucrado en el uso de un término de magnitud como “masa” requiere una doble abstracción. En el caso del término “vaca” tenemos un objeto individual y ciertas propiedades de dicho objeto, y se lleva a cabo una primera abstracción al nombrar con el mismo término no sólo a ese objeto, sino al género (o a todos los miembros del género). Pero se requiere una segunda abstracción si al observar a las vacas y a otros objetos se atribuye a todos ellos la propiedad de tener masa. La diferencia radica en que ciertas propiedades (por ejemplo, las involucradas en identificar a una vaca) son más fácilmente detectables que otras (las requeridas para saber que un objeto tiene masa). De esta manera, si se discierne en un cuerpo una propiedad que es la cantidad de materia que posee el cuerpo, que es proporcional a su peso y a la capacidad de resistirse a la variación del estado de movimiento de dicho cuerpo, que es una cantidad escalar, etc. parecería que no es posible estar ante una propiedad que no sea la masa de dicho cuerpo, ya que ninguna otra es poseedora de estas propiedades. Al menos no es posible, si tomamos como definición inicial de masa la que presenta Newton en sus *Principia*; son éstas las propiedades por las que – suponemos²⁹ – originalmente se identificó la magnitud masa.

Con respecto a la cuestión anteriormente mencionada, a saber, si una magnitud física M_2 puede no poseer *ninguna* de las propiedades por las que originalmente identificamos a una magnitud M_1 y ser esa *misma* magnitud M_1 , conviene señalar que no parece ser lo mismo un tigre con tres patas o una porción de oro verde,³⁰ que un objeto cuya masa no sea proporcional a la capacidad que éste tiene de resistirse a una

²⁹ Al menos, lo suponemos en aras de la argumentación.

³⁰ Aquí se supone que una de las propiedades por las que originalmente se identificó a los tigres es la de ser cuadrúpedos y que una de las propiedades por las que originalmente se identificó al oro es la de poseer un color amarillo.

variación en su estado de movimiento. Quizás en esto se diferencian los términos de magnitudes de otros términos de género natural (términos de especies biológicas o de sustancias químicas, por ejemplo). La diferencia es aquella a la que se ha aludido, a saber, los términos de especies biológicas o de sustancias químicas identifican el conjunto de objetos físicos que pertenecen a su extensión en base a propiedades que poseen los miembros del género, mientras que los términos de magnitudes identifican propiedades que poseen *todos* los objetos (y fenómenos) físicos. Si se constatare, por ejemplo, que la masa de un cuerpo no es la cantidad de materia que posee el cuerpo, ni es proporcional a su peso, ni es tampoco una propiedad escalar, etc., se estaría ante una propiedad distinta de la masa. Si se quisiera sostener una tesis según la cual, aún sin poseer *ninguna* de las propiedades por las que inicialmente fue identificada la magnitud masa, la propiedad observada en un cuerpo *es* efectivamente la masa, cabría preguntar cuáles son las razones que permitirían sostener dicha tesis. Pero aún reformulando la tesis de Kripke de manera tal que sólo fuesen *algunas* de las propiedades por las que inicialmente se identificó un género natural las que posteriormente pueden constatar que no son poseídas por dicho género, cabría preguntarse si dicha tesis es aplicable a las magnitudes físicas.

Ahora bien, en el marco de una misma teoría no parece posible que una misma magnitud pueda tener propiedades distintas. Para poder asegurar que una magnitud observada en un objeto es la misma que la observada en otro objeto, esa magnitud debe tener, entre otras cosas y en ambos casos, las mismas propiedades matemáticas o formales. Si estas magnitudes tuviesen propiedades matemáticas distintas, seguramente no podrían formar parte de las mismas ecuaciones correspondientes a las leyes físicas que se utilizan para dar cuenta del fenómeno que se está observando. Como a las magnitudes físicas se les intenta asociar un concepto matemático que posea una

estructura análoga, de modo que al utilizar el concepto matemático se pierda la menor cantidad posible de información, magnitudes que tengan asociados conceptos matemáticos distintos serán magnitudes distintas. Si la masa de un cuerpo X_1 pudiese tener propiedades distintas de las que posee la masa de un cuerpo X_2 , por ejemplo, ser la primera una cantidad escalar y la segunda no, no se comportarían ambas de igual manera frente a las mismas leyes físicas, y habría enunciados verdaderos sobre la masa analizada en función del cuerpo X_1 que podrían no serlo para la masa del cuerpo X_2 . Esto nos llevaría a considerar que las magnitudes observadas en cada caso serían distintas, ya que no cabe definir una magnitud que en distintos casos presente propiedades distintas.

No obstante, dos teorías diferentes podrían atribuir propiedades distintas para lo que, en principio, podría ser una misma magnitud. Como cada teoría tendrá su estructura formal, no sería necesariamente un problema que la magnitud posea un concepto matemático asociado distinto en cada caso. Tampoco lo sería el que formaran parte de leyes físicas empírica y formalmente distintas. Pero entonces sería necesario analizar en virtud de qué factores se podrá decir o no que se trata de la *misma* magnitud. Una posible solución radicaría en apelar a las propiedades que, en el contexto de la teoría causal de la referencia, se denominan *propiedades esenciales*.

Kripke suele establecer una distinción entre las propiedades por las que originalmente se identificó un género natural y sus *propiedades esenciales* – los ejemplos de Kripke son generalmente acerca de sustancias químicas o de especies biológicas –; las primeras son propiedades cualitativas referentes al aspecto externo de las entidades que pertenecen al género en cuestión y las propiedades esenciales son propiedades estructurales o internas que permitirían explicar tales rasgos externos. Pero en el caso particular de los términos de magnitudes físicas, muchas de las propiedades

por las que originalmente se identifican las magnitudes en el marco de una teoría física parecen ser – si bien *relativas* a dicha teoría – *propiedades esenciales*. Dado que las magnitudes físicas son, las más de las veces, propiedades de la estructura de los objetos o fenómenos físicos, o propiedades estrechamente vinculadas con ella, la justificación de la distinción mencionada *no* parece ser aplicable a las magnitudes físicas.³¹

Respecto de la pertenencia de una entidad a la extensión de un término de género natural Kripke se pregunta si, dado que una entidad designada por un término de género natural posee ciertas propiedades esenciales, puede otra entidad que no posea tales propiedades caer bajo la extensión de dicho término. Su respuesta es negativa, y esto es así aunque el resto de las propiedades no-esenciales que posee esta segunda entidad sean compartidas por la primera entidad. En su análisis sobre el término de género natural “oro” Kripke hace algunas afirmaciones adicionales respecto de las propiedades esenciales, que generaliza a todos los términos de género natural (1980, pp. 122 y ss.). Él alega que los enunciados que representan descubrimientos científicos con respecto a qué es esa sustancia (género natural) no son verdades contingentes, sino *verdades necesarias* en el sentido más estricto posible, y afirma que si la teoría científica de hoy en día es tal que parte de la naturaleza de un objeto designado por un término de género natural tal como lo empleamos es poseer una cierta *propiedad esencial*, será necesario y no contingente que el objeto posea esa propiedad.

Como ya indicamos, según Kripke un objeto puede tener todas o muchas de las propiedades por las que originalmente se identificó a los objetos del género X y no ser un miembro del género X, o puede no tener algunas o ninguna de dichas propiedades y

³¹ En adelante, dado que cuestionamos la distinción entre propiedades esenciales y accidentales para el caso particular de las magnitudes físicas, cuando con respecto a este tipo de entidades mencionemos la noción de propiedad esencial, que Kripke y Putnam emplean en su teoría acerca de los términos de género natural, a menudo entrecorillaremos el término “esencial” o lo pondremos en cursiva. Denominaremos “estructurales” a las propiedades que los científicos que defienden alguna teoría creen imprescindibles para definir una magnitud.

serlo, pero hay que hacer una salvedad a esa tesis, a saber, esto ocurre así siempre que dichas propiedades no sean propiedades “esenciales” (de los miembros) del género X. Pues es necesario que un objeto o entidad del género X posea – en todos los mundos en los que exista – las propiedades “esenciales” del género X. No obstante, a este respecto nos encontramos con el problema de determinar *cuáles* de las propiedades con las que originalmente se identificó un conjunto de objetos pertenecientes a un género natural podrían no ser verdaderas del género y cuáles habrían de serlo, es decir cuáles de las propiedades serían contingentes y cuáles “esenciales”, si bien, según Kripke, las propiedades “esenciales” – internas o estructurales – no son, por regla general, aquellas con las que originalmente se identificó un conjunto de objetos, sino que son descubiertas posteriormente por la investigación científica. Ahora bien, aunque Kripke considera que la ciencia puede descubrir empíricamente que ciertas propiedades son *esenciales* de una entidad, *no* proporciona ningún criterio para determinar si, una vez descubierta una propiedad, es o no una propiedad esencial. En el marco de la teoría de Kripke no se dispone de un método de discriminación entre propiedades “esenciales” y propiedades contingentes, salvo la apelación a nuestras *intuiciones*.

Una vez hecha esta observación, conviene atender a otros aspectos de la teoría de Kripke. Él considera que, al fijar la referencia³² de un término de género natural (para el mundo real), se fija igualmente para todos los mundos posibles,³³ y la fijación de la referencia tiene lugar identificando a los miembros del género mediante una serie de propiedades. Este acto de introducir un término, que puede proceder por ostensión o por descripción, se denomina *bautismo inicial*, y puede representarse mediante un

³² En el caso de los nombres propios, Kripke explica la fijación de la referencia mediante un bautismo inicial por ostensión o descripción, y la transmisión de la misma mediante de una cadena causal; de igual manera explica la fijación y la transmisión de la referencia de los términos de género natural. Kripke afirma que “ciertos términos generales, los de géneros naturales, tienen un parentesco más estrecho con los nombres propios que el que generalmente admitimos” (Kripke 1980, p. 130).

³³ Kripke entiende por mundo posible “maneras totales como podría haber sido el mundo” (1980, p. 23) o simplemente situaciones contrafácticas.

enunciado de identidad en el que el signo de identidad viene flanqueado, por una parte, por el término cuya referencia se fija y, por otra, por los términos que expresan las propiedades mediante las cuales se ha fijado su referencia – incluso la introducción de un término por ostensión requiere el complemento de la ostensión con algún término general descriptivo, en sentido estricto, por un término *sortal* –. Según Kripke, el enunciado de identidad en cuestión es verdadero *a priori*, pero, por regla general, no es necesariamente verdadero. A este respecto conviene señalar que Kripke se limita a estipular que los enunciados mediante los cuales se fija la referencia de un término son verdaderos *a priori*, pero, salvo excepciones, las propiedades a las que se alude en dichos enunciados no son propiedades “esenciales”, por lo que el enunciado de identidad en cuestión, aunque verdadero *a priori*, no es necesariamente verdadero. Ahora bien, cuando se llevan a cabo descubrimientos científicos sobre el género nos encontramos ante propiedades “esenciales” del género en cuestión, esto es, propiedades que (un miembro de) el género ha de tener en todos los mundos posibles en los que exista,³⁴ de modo que el enunciado de identidad en el que el signo de identidad vincula el término de género natural y el término que expresa la propiedad esencial en cuestión es necesariamente verdadero, si bien verdadero *a posteriori*.

Análogamente a lo que ocurre en el caso de los nombres propios – véase nota 32 –, la referencia de un término de género natural se trasmite, a partir de los introductores iniciales del término, a través de una *cadena causal*, pasando el término de eslabón en eslabón, siendo cada uno de esos eslabones los miembros de una comunidad lingüística – dicho de manera más precisa, los usos del término por parte de los miembros de dicha comunidad –, si bien para que un hablante pase a ser un eslabón de una cadena causal se

³⁴ Kripke afirma que “[c]uando pensamos que una propiedad es esencial de un objeto, lo que generalmente queremos decir es que es verdadera del objeto en cualquier caso en que el objeto hubiera existido.” (Kripke 1980, p. 48).

requiere que al aprender el nombre tenga la intención de usarlo con la misma referencia con la que lo usaba el hablante del que lo aprendió.

Aplicando algunas de las consideraciones de Kripke sobre los términos de género natural a un término de magnitud física, como el término “masa”, podría decirse que inicialmente se fijó su referencia identificándola mediante una serie de propiedades (cantidad de materia que posee el cuerpo, proporcional a su peso y a la capacidad de resistirse a la variación del estado de movimiento de dicho cuerpo), que la referencia del término se transmitió a través de una cadena causal y que, en algún momento, la ciencia ha descubierto otras propiedades que también debe poseer cualquier magnitud que sea denominada con el término “masa” – por ejemplo la proporcionalidad entre la masa y la energía –. Así, la referencia del término “masa” habría permanecido constante desde que se introdujo el término hasta ahora.³⁵

Llegados a este punto conviene complementar las observaciones hechas en relación a cómo procede la fijación de la referencia en la teoría de Kripke con su famosa noción de *designador rígido*. Kripke sostiene que tanto los nombres propios como los términos de género natural son designadores rígidos; a decir verdad, sostiene que los nombres propios lo son y al señalar las similitudes entre los nombres propios y los términos de género natural, afirma que una de estas similitudes radica en que ambos tipos de términos son designadores rígidos. No obstante, las caracterizaciones de la noción de designador rígido presentes en la primera edición de (1980) – publicada en 1972 – y en (1971) no son inequívocas y dan lugar a dos posibilidades. La primera de estas posibilidades es que un designador rígido designe el mismo objeto con respecto a todos los mundos posibles. La segunda es que un designador rígido designe el mismo

³⁵ No obstante, en la sección 4.1 del presente capítulo y en la sección 4.2.1 del capítulo 3 alegaré que esta conclusión es incorrecta, ya que en el marco de la física clásica y de la relatividad especial se consideran como “esenciales” propiedades distintas y ambas teorías son necesarias para explicar distinto tipo de fenómenos físicos.

objeto sólo con respecto a los mundos posibles en los que el objeto exista, careciendo de referencia con respecto a los demás mundos posibles.³⁶

La definición de designador rígido que Kripke aplica a los nombres propios se corresponde con la primera de las caracterizaciones mencionadas, pues en el Prefacio a (1980), Kripke afirma que considera a los nombres propios como designadores rígidos *de jure* (1980, p. 21, n. 21). Un designador es rígido *de jure* si al introducirlo se estipula que, independientemente de que estemos hablando acerca del mundo actual o de un mundo posible distinto del actual, el referente del designador es siempre el mismo objeto.³⁷ Kripke considera a los nombres propios como rígidos *de jure* y, por tanto, afirma que un nombre propio designa rigidamente su referente incluso con respecto a mundos posibles en los que el referente no exista. Ahora bien, dada la similitud que Kripke sostiene entre los nombres propios y los términos de género natural, es de suponer que estos últimos no son considerados por él sólo designadores rígidos, sino también designadores rígidos *de jure*. De aquí se sigue que los enunciados de identidad verdaderos en los que figuren dos términos de género natural – Kripke denomina a estos enunciados *identidades teóricas* –, son “identidades que contienen dos designadores rígidos y son ejemplos de lo necesario *a posteriori*” (1980, p. 140).³⁸ Algunos de los enunciados que Kripke pone como ejemplos son “Oro es el elemento con número atómico 79” y “Agua es H₂O”.

Para dar cuenta de cómo se llega a la creencia errónea de que la identidad entre dos designadores rígidos de la misma entidad puede ser contingente, Kripke indica que

³⁶ De acuerdo con la terminología introducida por Salmon en (1981), los designadores rígidos que satisfacen la primera caracterización son designadores obstinados, mientras que los que satisfacen la segunda son designadores persistentes.

³⁷ No todos los designadores rígidos son rígidos *de jure*, pues Kripke reconoce que hay designadores rígidos *de facto*. Así, aunque las descripciones definidas son generalmente *designadores no-rígidos*, Kripke reconoce que hay algunas que son designadores rígidos, pero rígidos *de facto* (1980, p. 21, n. 21). En el caso de un designador rígido *de facto* no se estipula que hay un único objeto que constituye su referente con respecto a todo mundo posible, pero el predicado contenido en la descripción se aplica al mismo objeto con respecto a todos los mundos posibles, o al menos con respecto a todos los mundos posibles en los que el objeto exista; un ejemplo de designador rígido *de facto* lo sería la descripción “el cuadrado del número 2”.

³⁸ Acerca de la aplicabilidad de la noción de designador rígido a los términos de género natural y la cuestión de si las identidades teóricas son enunciados necesarios puede consultarse Soames (2002).

la referencia de dos designadores rígidos que flanquean el signo de la identidad puede venir fijada mediante designadores no-rígidos, más precisamente mediante descripciones definidas, la mayoría de las cuales, como se ha indicado, son designadores no-rígidos. De este modo, aunque el enunciado de identidad que involucra dos designadores rígidos fuese necesario (si es verdadero), la identidad entre lo designado mediante las descripciones definidas empleadas para fijar la referencia de los dos designadores rígidos podría ser un hecho contingente.

Tomemos en consideración el enunciado “La masa clásica es igual a la masa relativista”,³⁹ simbolizado “ $R_1 = R_2$ ”. Si los designadores “masa clásica” y “masa relativista” son rígidos, dicho enunciado sería, en caso de ser verdadero, necesario. A la tesis de que “ $R_1 = R_2$ ” sería una identidad necesaria (en caso de ser verdadera) le subyacería no sólo el hecho de que sus términos componentes son designadores rígidos, sino también que la ciencia habría establecido que ambas masas poseen las mismas propiedades “esenciales” o, al menos, comparten muchas de ellas. A este respecto conviene señalar, por una parte, que habría de tomarse en consideración la opinión de los físicos; así, por ejemplo, de acuerdo con lo que algunos físicos sostienen la dependencia de la masa respecto de la velocidad no sería o no podría considerarse como una propiedad “esencial” de la masa, aunque sí lo serían las que la determinan como inercia y gravedad.⁴⁰ Por otra, como hemos mencionado, muchas de las propiedades por las que originalmente se identifican las magnitudes en el marco de una teoría física parecen ser – si bien relativas a dicha teoría – propiedades “esenciales”.

No obstante, incluso si se considerase que dicho enunciado es necesario, podríamos intentar dar cuenta de su aparente contingencia alegando que la referencia de

³⁹ Enunciado que sostendrían quienes suponen que el término “masa” ha mantenido constante su referencia a través del cambio de la teoría clásica a la teoría de la relatividad especial.

⁴⁰ Acerca de las posturas que distintos físicos defienden sobre la relación entre la masa y la velocidad puede verse el capítulo 2 de Jammer (2000).

cada uno de los dos términos para masa podría haberse fijado mediante descripciones como las siguientes. Por “masa clásica”, vamos a entender D_1 , es decir, la magnitud que posee un cuerpo y que es proporcional a la capacidad de resistencia a la variación del estado de movimiento de dicho cuerpo y, por “masa relativista”, D_2 , es decir, la magnitud proporcional a la energía.⁴¹ Entonces, el enunciado “ $D_1 = D_2$ ” podría ser contingentemente verdadero, pero de aquí no se seguiría que tenga este carácter el enunciado de identidad “ $R_1 = R_2$ ”. Puesto que hay algunas propiedades que la masa clásica y la masa relativista comparten, así como otras que son distintas y hasta incompatibles, se suscita la cuestión de cuál o cuáles de estas propiedades serían “esenciales” de cada una de las masas, y ésta es una cuestión a la que no cabe encontrar respuesta en la teoría de Kripke.

Otra manera de formular las preguntas que, tras examinar la teoría de Kripke, quedan pendientes es la siguiente. Un designador, por ejemplo, el término “masa”, es rígido si designa la misma entidad con respecto a todo mundo posible; cabría decir en este caso – modificando para nuestros intereses la noción de mundo posible de Kripke – , si designa la misma entidad con respecto al “mundo clásico” y al “mundo de la relatividad especial”, y dos entidades son idénticas en todo mundo posible si comparten las mismas propiedades “esenciales”. Pero si no se establece cuáles de las propiedades de la magnitud masa son “esenciales”, no se podrá establecer si los términos “masa clásica” y “masa relativista” designan o no la misma magnitud. Ahora bien, nos encontramos con un problema aún mayor en caso de que se elijan como designadores no-rígidos empleados para fijar la referencia de los términos “masa clásica” y “masa relativista” dos propiedades distintas e incompatibles que se atribuyen a cada una de las

⁴¹ Hemos considerado que estas descripciones son designadores no-rígidos por entender que podría haber sucedido en alguna situación contrafáctica, es decir, en algún mundo posible – distinto del actual – que la masa clásica no resultara proporcional a la inercia, ni la masa relativista a la energía. Kripke no parece restringir los mundos posibles a los mundos físicamente posibles.

masas. Así, por ejemplo, sea D_1 “la magnitud que es independiente del estado de movimiento de un cuerpo” y D_2 “la magnitud que depende de la velocidad con la que se mueve un objeto”. En este caso la identidad $D_1 = D_2$ no sólo no es una verdad contingente, sino que es falsa, pero es un caso en el que se está asumiendo que la propiedad que expresa la relación entre la masa de un objeto y su estado de movimiento en los contextos clásicos y de la relatividad especial no es “esencial” de la magnitud masa. Este problema nos lleva a la formulación de al menos dos cuestiones de las que no nos ocuparemos en el marco de esta sección, sino en la sección 1 del capítulo 4, al presentar una tesis propia acerca de la referencia de los términos de magnitudes físicas. La primera de ellas es si el problema planteado respecto de la identidad “ $D_1 = D_2$ ” implica que, para sostener que el término “masa” designa la misma magnitud en ambos contextos, debemos renunciar a las supuestas propiedades “no-esenciales” que vienen expresadas mediante esas descripciones. La segunda cuestión es si en el marco de la versión de Kripke de la teoría causal se debería renunciar a las dos propiedades en cuestión o sólo a alguna de las dos y si, en algún caso, sería posible no renunciar a ninguna. Del análisis de las cuestiones anteriores resulta plausible que, para los términos de magnitudes físicas, es necesario elaborar una teoría de la referencia que contenga algunas características específicas de estos términos que no son comunes a todos los términos de género natural.

2.2. Putnam

2.2.1. Putnam: la teoría de la referencia

Antes de formular su teoría de la referencia de los términos de género natural, Putnam toma en consideración un tipo de teoría descriptiva, a la que denomina “teoría

tradicional del significado”, según la cual el significado de un término de género natural vendría dado por términos que expresan las propiedades necesarias y suficientes para pertenecer a la extensión de dicho término, de tal manera que los términos que expresan dichas propiedades estarían *analíticamente* vinculados con el término en cuestión. Putnam alega, en un sentido similar al de Kripke, que dicha teoría es incorrecta, debido a que un miembro de un determinado género natural podría no poseer *alguna* de las propiedades respectivas.

Frente a la teoría tradicional del significado Putnam propone su propia teoría según la cual el significado de un término de género natural tendría la forma de un vector o tuplo, cuyos componentes serían al menos los siguientes: los marcadores sintácticos del término, los marcadores semánticos del término, el estereotipo asociado con el término, y la referencia o extensión del término. De estas nociones merecen un breve comentario la segunda y la tercera de ellas. El *estereotipo* asociado con un término incluye las propiedades que de acuerdo con nuestras creencias de sentido común caracterizan los miembros paradigmáticos del género; de entre éstas las más centrales o difícilmente revisables constituyen los *marcadores semánticos* del término. Así la propiedad de ser un líquido estaría entre los marcadores semánticos del término “agua”, mientras que el estereotipo de dicho término incluiría las propiedades de ser incoloro, transparente, insípido, etc. No obstante, la distinción entre el estereotipo y los marcadores semánticos de un término de género natural no es tajante, y en casos extremos el estereotipo puede coincidir con los marcadores semánticos.⁴² En cualquier caso, ni los marcadores ni el estereotipo proporcionan condiciones necesarias y suficientes para pertenecer a la extensión de un término de género natural.

⁴² En opinión de Putnam para tener competencia lingüística en relación con un término de género natural el hablante ha de conocer tres de los componentes del vector de significado, a saber, los marcadores sintácticos, los marcadores semánticos y el estereotipo.

En la teoría de Putnam acerca de cómo se fija la referencia de un término de género natural cabe distinguir dos versiones, a saber, la bautismal y la no-bautismal. Según la *versión bautismal*, la referencia de un término se fija mediante el acto en el cual se introduce *inicialmente* dicho término; esta introducción tiene lugar mediante una descripción, que puede ser de dos tipos, a los que Putnam alude como *definición ostensiva* y *definición operacional* (véase 1975c, pp. 229 y 232). El primer tipo de definición adopta la forma de una descripción demostrativa que contiene, al menos implícitamente, un término sortal de mayor generalidad que el término de género natural – así, por ejemplo, el término “líquido”, en el caso del término “agua” – y que es proferida en presencia de un miembro paradigmático del género natural en cuestión – digamos, de la porción de agua contenida en un vaso –. El segundo tipo de definición es una descripción que contiene, por regla general, los marcadores semánticos y el estereotipo del término, que son utilizados simplemente para describir algunos de los casos paradigmáticos de la extensión del término de género natural en nuestro mundo. De acuerdo con la *versión no-bautismal*, la referencia de un término viene fijada por los usos que los hablantes expertos hacen del término, generalmente con posterioridad a la introducción inicial del mismo.

Conviene señalar que Putnam conjetura que en toda comunidad lingüística existe una *división del trabajo lingüístico* (vid. 1975c, pp. 227 y ss.) de acuerdo con la cual algún subconjunto de los miembros de nuestra comunidad lingüística – los expertos – disponen de métodos o criterios identificadores mejores que los del hablante medio para determinar si una entidad pertenece o no a la extensión de un término de género natural, y el resto de los miembros de la comunidad lingüística están dispuestos a deferir en ellos sus juicios acerca de dicha pertenencia, de tal manera que el uso de los términos de género natural por parte del resto de los hablantes dependerá de una

cooperación con los hablantes expertos.⁴³ A este respecto es digno de mención que Putnam propone un principio denominado en (1975d) *Principio del Beneficio de la Duda*, según el cual se le atribuye al experto, si la persona que está en el otro extremo de la cadena causal o de la cadena de transmisiones o relaciones de cooperación no es el (primer) introductor del término, el beneficio de la duda, de modo que se aceptan como razonables modificaciones de la descripción *D* mediante la que un término de género natural, *T*, fue introducido. De este modo, en el marco de la teoría de Putnam cada hablante es un eslabón de una cadena causal que comienza con la introducción de un término por descripción, permitiéndose modificaciones en la descripción en cuestión, si bien Putnam no indica cómo determinar cuándo una modificación de tal descripción ha de considerarse *razonable*.

Por lo que respecta a los términos de magnitudes físicas, puesto que éstos se refieren a entidades teóricas, Putnam sostiene que las descripciones mediante las que se introducen dichos términos son *descripciones causales*, es decir, descripciones que caracterizan el referente de estos términos como la entidad que produce causalmente ciertos efectos observables. En cualquier caso, en la teoría de la referencia de Putnam la referencia de un término de género natural – incluidos los términos de magnitudes físicas – está determinada por la identidad de las entidades que pertenecen a su extensión y la identidad viene constituida por las “propiedades *esenciales*”, o propiedades concernientes a la estructura interna, de dichas entidades. Y ésta referencia es por regla general inmutable ya que ha quedado fijada por la *introducción* del término, ya sea por aquellos que usaron por primera vez el término – en la versión bautismal de

⁴³ Algunos defensores de la teoría descriptiva de la referencia, como Jackson (1998) y Zemach (1976), aceptan la existencia de la *división del trabajo lingüístico*, pero alegan que la teoría *descriptiva* puede incorporar igualmente dicha tesis, de tal manera que las descripciones o propiedades a las que habría de otorgarse más peso en la determinación de la referencia de un término de género natural serían las asociadas por los expertos.

la teoría de Putnam – ya sea por los usos del término por los expertos – en la versión no-bautismal–.

No obstante, Putnam ha concedido, en especial con respecto a los términos de magnitudes físicas, que su referencia puede *cambiar* a consecuencia de los descubrimientos de la ciencia – aunque sin entrar en pormenores al respecto –, pero que términos pertenecientes a diferentes teorías pueden referir a la misma entidad a pesar de los mencionados cambios. A este respecto se suscitan, al menos, dos cuestiones. Una de ellas es cuáles son las propiedades que deben permanecer constantes para asegurar la invariancia de la referencia de tal tipo de términos. Otra concierne a cuál es el criterio de identidad de tales magnitudes. De la primera cuestión nos ocuparemos en el capítulo tercero, mientras que la segunda será abordada en la siguiente sección.

Putnam analiza en (1988) el caso del término físico “momentum”. Aunque en el marco de la teoría newtoniana se considera el *momentum* como una cantidad que se conserva en las colisiones elásticas y que puede definirse como el producto de la masa por la velocidad ($p = m.v$), posteriormente, en el marco de la teoría de la relatividad especial, se revisa dicho concepto y se constata que, si bien esta cantidad se conserva, no es exactamente el producto de la masa por la velocidad. Se podría decir que si la “definición” de *momentum* era inicialmente “magnitud que es el producto de la masa de un cuerpo y la velocidad a la que éste se mueve”, ésta varía en la teoría de la relatividad especial. Pero para Putnam la mayoría de los términos no pueden ser definidos, si por definición se entiende algo que se fija de una vez y para siempre. En el caso del término “momentum” como en el de tantos otros términos, Putnam sostiene que su significado tiene *continuidad* a través del tiempo y de los marcos de las teorías clásica y de la relatividad especial y se *refiere* a la misma cantidad en ambas teorías, dado que “existen prácticas que nos ayudan a decidir que hay suficiente continuidad en el cambio para

justificar esto” (Putnam 1988, p. 35). No obstante, Putnam no entra en detalles acerca de cuáles son esas prácticas que nos permiten sostener que la referencia de un término se ha mantenido invariante aún cuando las propiedades que se asociaban con él resultan ahora no ser correctas o son, en el marco de una teoría, incompatibles con las asociadas en el marco de la otra.

Putnam señala los inconvenientes de sostener que un término tiene distintos significados en distintas teorías; si esto es así, lo mismo ocurriría con el significado de términos o conceptos como “verdad” y “referencia” y, por tanto, éstos no serían términos trans-teóricos. Ahora bien, la noción de *verdad* que de esto se desprendería, según Putnam, no es la noción en la que está basada la práctica científica. La discusión sobre del término “verdad” tiene especial sentido si se presta atención a que cada medición física tiene asociado un *error* que, en general, proviene del montaje experimental, aunque no necesariamente.⁴⁴ Dependiendo de cuál sea el motivo por el que se está llevando a cabo la medición o de lo que se pretenda hacer con el resultado, se aceptará por válido uno u otro margen de error. Es decir, dado un enunciado que exprese el resultado de la medición, éste será verdadero *dependiendo* del intervalo de incerteza o incertidumbre – véase nota 24 de este capítulo – que se acepte. Como una medición es la asignación de un número a un objeto de modo tal que este número exprese una propiedad del objeto, el hecho de que un objeto posea o no una propiedad dependerá del intervalo de *incerteza* que se haya establecido. En este sentido se puede decir que, al establecer el intervalo de incerteza permitido, se está estableciendo también

⁴⁴ En el marco de la física clásica la interacción entre objeto e instrumento se establece mediante magnitudes continuas. No existe en dicho contexto una barrera teórica para el perfeccionamiento de los instrumentos y los procedimientos experimentales de modo que, en principio, sería posible, efectuar las mediciones con una incerteza arbitrariamente pequeña. Por el contrario, en el contexto de la mecánica cuántica, dado el carácter discontinuo atribuido por la teoría a los procesos atómicos, resulta empíricamente imposible medir en forma simultánea magnitudes complementarias (por ejemplo, la posición y la velocidad de una partícula) con precisión infinita (o, al menos, arbitrariamente pequeña). Dicho en otras palabras, existe una incerteza asociada a la determinación de los valores de algunas magnitudes (aquellas que son complementarias) que es introducida como resultado de efectuar una medición.

la noción de verdad relevante, no ya en el marco de cada teoría sino dentro de una misma teoría, en el marco de cada medición. La característica que preserva la “verdad” en los distintos casos es la correspondencia con lo observado, aunque esa correspondencia dependa de la *estipulación* de los márgenes de error o incerteza permitidos. Pero entonces, la “verdad” parecería no estar solamente “en” la naturaleza, sino que también vendría determinada por las posibilidades que desde el marco de una teoría se permitan.

A este respecto conviene retomar el ejemplo sobre las mediciones de la homogeneidad de los materiales – véase la nota 24 de este capítulo –. Una muestra de leche es homogénea a simple vista y resulta no-homogénea al ultramicroscopio que tiene una resolución de una micra. Esto podría no representar un problema, ya que la definición de muestra homogénea que hoy se utiliza dice que una muestra es homogénea si al ultramicroscopio presenta una única fase. Es decir, se podrá redefinir la propiedad cada vez de acuerdo al mayor poder de resolución de los instrumentos de medición de los que se disponga. Pero aún así, dependiendo del grado de precisión que se necesite, se dirá que una muestra es o no es homogénea. Se puede afirmar que un determinado material resulta o puede considerarse homogéneo, al menos observado con una determinada resolución y de acuerdo con una determinada utilización, aunque no lo sea de acuerdo con una definición más precisa correspondiente a otro poder de resolución del instrumento de medición. Es decir, dependiendo de lo que se necesite observar, se definen los *márgenes* de la homogeneidad de una muestra de modo que lo que resulta verdadero bajo unos márgenes puede resultar falso bajo otros. De este modo, aún entendiendo la *verdad* como correspondencia, parece que esta correspondencia *depende* del margen de incerteza permitido en el marco de cada teoría, que, a su vez, estará determinado por la precisión de los instrumentos de medición disponibles y del

tipo de interacción que se suponga entre lo observado y el instrumento. A este respecto no podemos evitar traer a colación una afirmación de Feyerabend: “la verdad de un enunciado de observación sólo se puede afirmar dentro de cierto margen de error” (1981, p. 73).

2.2.2. Consideraciones sobre la teoría de las propiedades físicas de Putnam

Hemos presentado hasta aquí la teoría de Putnam acerca de la referencia de los términos de género natural por lo que, llegados a este punto, conviene examinar y precisar una noción central para nuestro escrito: la noción de *propiedad* y, especialmente, de propiedad o magnitud física en dicho autor. Las nociones de *propiedad* que Putnam distingue en (1970) y que ya han sido introducidas en el capítulo 1, son, por una parte, la noción de propiedad como “predicado” y, por otra, la que él denomina “propiedad física”, “magnitud física” o “relación física”. Estas dos nociones implican principios de individuación distintos. En el caso de los predicados, una propiedad *P* es idéntica a la propiedad *Q* sólo si “*x* es *P*” es sinónimo de “*x* es *Q*”, pero, en el caso de dos propiedades físicas es necesario establecer restricciones metodológicas para la *reducción* de una de las propiedades a la otra o de ambas a una tercera, de modo que la propiedad *P* pueda ser sintéticamente idéntica a la propiedad *Q*. La posibilidad de reducir una propiedad a otra o ambas a una tercera involucra un criterio que no es extensional.⁴⁵

Como ya se indicó en el capítulo 1, dentro de las magnitudes físicas suele hacerse una distinción entre las magnitudes fundamentales y las magnitudes derivadas,

⁴⁵ Putnam propone, siguiendo a Feigl, una distinción entre las propiedades físicas en general, es decir, aquellas que tienen que ver con la causalidad, el espacio y el tiempo, y aquellas cuyos términos son parte de los enunciados de la física. En lo siguiente atenderemos a las propiedades físicas entendidas en el segundo de estos sentidos.

de acuerdo a si no pueden o pueden definirse a partir de otras magnitudes. Según Putman, no puede darse ninguna condición necesaria y suficiente para que una magnitud sea *fundamental*, ya que las magnitudes consideradas como fundamentales han ido variando a lo largo del desarrollo de la ciencia y, en todo caso, las condiciones impuestas a una magnitud para ser fundamental fueron empíricas y no analíticas. De esta manera, un término *T* que designa una propiedad física, introducido, no por definición sino por un procedimiento de prueba-y-error para hallar una condición (precisa y empíricamente correcta) necesaria y suficiente para la “T-idad”, debe cumplir las siguientes condiciones: ser proyectable en el sentido de Goodman,⁴⁶ caracterizar a todas las entidades que pretende designar, uno de los términos debe ser “distancia” u otro mediante el cual se lo pueda definir⁴⁷ y las leyes deben adoptar una forma especialmente simple. Como las leyes de la física no están dadas de antemano, se han de buscar simultáneamente leyes que sean expresables de manera simple y términos “proyectables” que permitan formular estas leyes. Ahora bien, un problema que Putnam no parece tomar en consideración es que si la *proyectabilidad* de un predicado o de un término en el sentido de Goodman depende de su uso en el marco de un lenguaje, la validez de las mencionadas leyes físicas dependerán no sólo de su forma lógica y su concordancia con la evidencia, sino también de la concordancia con el *lenguaje* en el que se formularon y de la forma en la que hayamos dividido o *clasificado* lo que existe en el mundo.⁴⁸

⁴⁶ Los términos y los predicados “proyectables” son, según Goodman (1954), aquellos que están mejor *atrincherados*, es decir, que se han utilizado con mayor frecuencia en predicciones o descripciones pasadas. La proyectabilidad de los predicados depende de su historial de uso en el seno de un lenguaje, es decir, de la frecuencia con la que han sido proyectados en el pasado. De acuerdo con el punto de vista de Goodman, así como esperamos que las regularidades observadas en el pasado se mantengan en el futuro, proyectamos hacia el futuro los predicados que hemos utilizado con éxito en el pasado.

⁴⁷ Cualquier propiedad física lo es de un objeto que está en un contenedor espacio-tiempo, por lo que cualquier término que designe una propiedad física debe ser introducido en relación con el término que designa la relación espacial entre posiciones de los objetos.

⁴⁸ En la sección siguiente volveremos sobre la cuestión de la relación entre la referencia de los términos y el lenguaje de las teorías que los utilizan.

Retomando la división entre magnitudes fundamentales y derivadas, y asumiendo que la lista de magnitudes fundamentales actualmente aceptada es completa, cada término del vocabulario de la física corresponde a una propiedad física y dos términos corresponden a la misma propiedad sólo si pertenecen a la misma clase de equivalencia. Esta relación de equivalencia podría ser la *coextensividad nomológica* o la *equivalencia lógica*. Putnam escoge la equivalencia lógica, porque no cree necesario considerar a dos términos como correspondientes a la misma propiedad física cuando ya han sido expresados en términos de magnitudes fundamentales y no son lógicamente equivalentes. De acuerdo con la equivalencia lógica tal como la entiende Putnam, dos propiedades, P_1 y P_2 , corresponden a la misma propiedad física sólo si se han construido exclusivamente a partir de magnitudes fundamentales, con vocabulario lógico y matemático, y $(x)(P_1(x) \equiv P_2(x))$ es una verdad de la lógica o la matemática pura. Este criterio de identidad adopta implícitamente – según Putnam – que ninguna relación entre magnitudes fundamentales deberá considerarse “analítica”,⁴⁹ ya que, como enfatiza Putnam (en 1970, p. 15) con *equivalencia lógica* se refiere a la equivalencia con cualquier cosa que sean, de hecho, las verdades lógicas, por lo que si cambiara nuestra lógica el *criterio* de identidad no habrá cambiado sino nuestra opinión acerca de qué propiedades físicas son idénticas.

Como hemos indicado, Putnam ha sostenido que dos propiedades son *idénticas* cuando una se reduce a la otra, o ambas a una tercera, y que para ello se requiere establecer algunas restricciones metodológicas, que mencionaremos a continuación. Por una parte, para reducir una teoría a otra habrá de establecerse una correspondencia entre los términos de propiedades físicas utilizados por cada una de las teorías. Por otra parte, para llevar a cabo esta reducción es requisito fundamental que todos los fenómenos

⁴⁹ Putnam (1970, pp. 14-15) entiende “analítico” como “verdadero en virtud de una convención lingüística y de la lógica o las matemáticas”.

observables explicados por medio de una teoría reducida puedan explicarse en términos de la teoría reductora, y la reducción en cuestión se efectuará por medio de bicondicionales. Una reducción se clasifica como *reducción por medio de bicondicionales* cuando, una vez explicados los fenómenos de la teoría reducida en términos de la teoría reductora, se busca aquellos nuevos términos que se correspondan con los antiguos términos teóricos primitivos, interpretando la antigua teoría en términos de la nueva más unas “leyes puente” que conecten los términos físicos con términos observacionales. Ahora bien, puede ocurrir que algún término básico de la vieja teoría no se corresponda con ninguna propiedad según la nueva manera de explicar el fenómeno; en este caso la reducción se hará por reemplazo, es decir, se abandona la vieja teoría y se explica el fenómeno por medio de teorías de “más bajo nivel”.⁵⁰ Putnam añade que, después de efectuada la reducción, los términos que se conservan se reducen por medio de bicondicionales (o de enunciados de identidad), ya que los términos reducidos por reemplazo se desechan. De todas formas, según Putnam, actualmente no se dispone de un criterio extensional para la identidad de propiedades físicas en un sentido amplio, pero sí se dispone de uno (la reducción de una propiedad P_1 a otra P_2 o de ambas a una tercera P_3) para las propiedades físicas en sentido estrecho tal como son concebidas en el presente escrito.

Resulta conveniente aplicar las anteriores consideraciones al término “masa”. Se suele sostener que la masa relativista es la misma magnitud que la masa clásica. Siguiendo el criterio propuesto por Putnam, si estas magnitudes son la misma, una debería ser *reducible* a la otra, esto es, la masa relativista debería contener (debería reducirse a) la masa clásica. Una simple observación de la ecuación $m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, donde “m” es la masa relativista, “c” la velocidad de la luz en el vacío y “v” la

⁵⁰ Con una teoría de “más bajo nivel” Putnam entiende una teoría que no posee un término nuevo correspondiente a la propiedad antigua involucrada en la explicación de un fenómeno, por lo que se explicará el fenómeno sin apelar a esa propiedad en particular y en base a leyes físicas fundamentales.

velocidad a la que se mueve el objeto de la masa en reposo m_0 , muestra que si la velocidad v es muy pequeña en relación con la velocidad de la luz, tal como sucede con los movimientos de los objetos en el mundo macroscópico, la masa relativista es igual a la masa clásica y, por tanto, las leyes en las cuales la magnitud masa relativista interviene se transforman en las leyes de Newton válidas en la mecánica clásica. Ésta es la explicación que suele darse de la conservación de la referencia del término “masa”, como consecuencia de la reducción de la teoría clásica a la teoría de la relatividad restringida.

Podría decirse entonces que, según esta explicación, la masa clásica se reduce a la relativista al menos formalmente. Pero, tomando en consideración la ecuación anterior, constatamos que la masa relativista es una magnitud dependiente de la velocidad, lo que no ocurre en el caso de la masa clásica. Si se toman en consideración propiedades como la mencionada que posee la masa clásica, es obvio que no corresponden a las nuevas propiedades que se atribuyen a la masa relativista. Pero puesto que dichas propiedades son necesarias para dar cuenta de distintos fenómenos en contextos distintos, cabe preguntar si es posible renunciar a ellas. De forma más general; si dos magnitudes, P_1 y P_2 , se reducen matemáticamente una a la otra (es decir, bajo determinadas condiciones la ecuación de una de ellas queda contenida en la ecuación de la otra), pero cada una de ellas posee propiedades *incompatibles*, cabe preguntarse si la magnitud P_1 puede conceptualmente quedar contenida en la magnitud P_2 o ambas en una magnitud P_3 , si puede un único concepto subsumir las dos magnitudes y si, en tal caso, no contendría dicho concepto una contradicción. Probablemente haya que establecer algunos parámetros formales, conceptuales y experimentales, según la conservación o no de los cuales se podrá sostener que dos magnitudes pueden o no reducirse una a la otra o ambas, a una tercera, pero Putnam no

ha entrado en tales detalles a este respecto, por lo que el criterio de Putnam para la identidad de las magnitudes físicas, tal como está formulado en (1970), no parece ser suficiente para establecer si dos magnitudes son idénticas.

Otra cuestión a mencionar es que, al ocuparse de la cuestión de la identidad de dos magnitudes en función de la posibilidad de reducir una a otra o ambas a una tercera, Putnam sostiene que, así como una propiedad física en sentido amplio es reducible a una propiedad física en sentido estrecho, otras propiedades provenientes de distintas disciplinas pueden reducirse en primer lugar a propiedades físicas en sentido amplio y, por lo tanto, en última instancia a propiedades físicas en sentido estrecho.⁵¹ Pero Putnam no indica cuáles son las *condiciones* que deben darse para que sea lícito llevar a cabo tal reducción, ni cuáles serían las barreras que no deberían traspasarse para no caer en una *simplificación* inaceptable; quizás esto sea debido a que se supone que existe una explicación última de todo fenómeno y que esta explicación está formulada en lenguaje físico.

Por último, resulta relevante tomar en consideración la diferencia que Putnam establece entre la descripción causal y la descripción canónica de una propiedad.⁵² La descripción causal de una propiedad es la que tiene la forma “la propiedad P que, en determinadas condiciones es causa de determinados fenómenos”, mientras que la descripción canónica es la que posee la forma “la propiedad de ser P”. Hay propiedades de las cuales se conoce su descripción causal pero no su descripción canónica, de modo

⁵¹ No obstante, Putnam matiza esta afirmación apelando a la noción de propiedades físicas de primer y segundo orden. Sostiene entonces que, por ejemplo, las propiedades psicológicas podrían reducirse a *estados funcionales* entendidos como la propiedad de tener propiedades, es decir, una propiedad de segundo orden, ya que su definición involucra la cuantificación de propiedades de primer orden o propiedades físicas.

⁵² Puede retomarse en este punto un ejemplo mencionado en la sección 1.2.1. del presente capítulo. La energía es una magnitud cuya definición es básicamente causal y pueden obtenerse distintas definiciones canónicas dependiendo del tipo de energía que sea necesario cuantificar. Así, la expresión formal o matemática para la energía potencial gravitatoria es distinta de la energía potencial eléctrica o de la energía cinética y también lo son los procesos a través de los cuales estos tipos de energía pueden medirse.

que cuando se quiere hablar de este tipo de propiedades resulta necesario el uso de un cuantificador existencial sobre todas las propiedades. Así, afirmar que hay una magnitud fundamental todavía no descubierta equivale a afirmar que hay fenómenos que son causados por una propiedad P y que esa propiedad P no es definible en términos de las propiedades clasificadas como fundamentales, y afirmar que dos entidades poseen en común una propiedad observable no especificada se reduce a hablar de aquellas propiedades que producen ciertos efectos y, por tanto, de ciertas descripciones causales. De esta manera Putnam asume que la noción de propiedad es necesaria, así como también la *cuantificación* sobre propiedades, ya que, por una parte, hay locuciones que se formalizan de manera más natural como cuantificaciones sobre propiedades y para las cuales no hay actualmente una formalización obvia en el lenguaje extensional – fundamentalmente respecto de las propiedades de las que se conoce su descripción causal, pero no su descripción canónica – y también, porque aunque el concepto de propiedad está conectado con las nociones nomológico, explicación, causa, etc., de modo que es casi definible en estos términos, si se admiten estas nociones como indispensables para la ciencia, la noción de propiedad también lo es ya que, aunque utilizando diferentes *palabras* habría que expresar *esa* noción. (véase Putnam 1970, pp. 30 y 31). Ahora bien, de acuerdo con la distinción entre descripción causal y la descripción canónica de una propiedad que establece Putnam, parece que resulta imposible decir que dos propiedades son la misma a menos que se conozcan sus descripciones canónicas, ya que podría producirse dos veces un mismo fenómeno pero en cada caso causado por dos propiedades distintas, así como la misma propiedad puede ser la causante de fenómenos distintos. Es decir, la cuestión a la que hemos denominado el problema de la identidad entre magnitudes – en la sección 4 del capítulo primero –,

persiste ya que aun no se dispone de un criterio de *identidad* entre propiedades aplicable a todos los casos.

2.3. Evaluación de la teoría causal

Como hemos indicado, la teoría de Kripke acerca de la referencia de los términos de género natural resulta, básicamente, de extender a estos términos su teoría de los nombres propios, por lo que a continuación supondremos que las observaciones que hagamos acerca de la referencia de los nombres propios se aplicarían igualmente a los términos de género natural y, por tanto, a ese tipo de términos de género natural que son los términos de magnitudes físicas. Con el fin de evaluar en qué medida la teoría causal podría ser superadora de la teoría descriptiva, presentaremos muy brevemente los argumentos denominados “de ignorancia y error”, que Kripke y otros promotores de la teoría causal de la referencia han formulado contra la teoría descriptiva – considerada esta última sólo como una teoría de la referencia y no del sentido o significado – de los nombres propios. Los argumentos presentados por Kripke adoptan una de las *cuatro* formas siguientes: el hablante no asocia con un nombre una propiedad identificadora, la propiedad que asocia un hablante con un nombre no es en realidad poseída por el referente del nombre, el hablante asocia con un nombre una propiedad que en situaciones contrafácticas identificaría a un individuo diferente del referente del nombre y la mayoría de las propiedades que asocia un hablante con un nombre no son poseídas por el referente del nombre ni por ningún individuo. Estos problemas podrían resolverse sosteniendo que los hablantes – o algunos de ellos – asocian con los nombres tipos de propiedades que no presentan estos *inconvenientes*.⁵³

⁵³ Un análisis de estos argumentos así como de las réplicas posibles puede encontrarse en Fernández Moreno (2004).

No obstante, la teoría causal de la referencia tanto para los nombres propios como para los términos de género natural presenta a su vez algunos problemas. Por una parte, un problema que se ha mencionado en ocasiones es el de explicar los *cambios* de referencia. Si bien a esta cuestión atenderemos más detalladamente en la sección segunda del capítulo 3, mencionaremos ahora muy brevemente la postura de Fernández Moreno (2006), quien evalúa separadamente las teorías de Kripke y Putnam y sostiene que ambas versiones de la teoría causal podrían admitir cambios de referencia. En relación con la teoría de Kripke, cabe alegar que no sólo es compatible con los cambios de referencia de los términos sino que también puede dar cuenta de ellos, ya que, por una parte, Kripke concede que no cabe sostener que la referencia de los nombres propios y, especialmente, de los términos de género natural se fije siempre en un bautismo inicial identificable y, por otra, no hay garantía de que la referencia permanezca inmutable. Pues un hablante que aprende un término, aunque pueda tener la intención de usarlo con la misma referencia con la que lo usaba el hablante del que lo aprendió – condición que ha de cumplir según Kripke para pertenecer a la misma cadena causal que el primer hablante –, podría tener además la intención de usar el término para referirse a una entidad determinada, de la que cree – equivocadamente – que se trata de la misma entidad a la que se refería el hablante del que lo aprendió. Cuando esta segunda intención predomina con respecto a aquélla puede tener lugar un cambio de referencia.⁵⁴ En el caso de la teoría de Putnam, la posibilidad de un cambio en la referencia de un término de magnitud física puede venir determinada por la decisión que los expertos actuales adopten respecto de la aplicabilidad del Principio del

⁵⁴ Con una estrategia de este tipo Kripke pretende dar cuenta del cambio de referencia del nombre "Madagascar" presentado por Evans en (1973); en ese ejemplo el hablante al que se atribuye el cambio de referencia de dicho nombre es Marco Polo. No obstante, Kripke no ha tomado en consideración explícitamente los cambios de referencia que podrían experimentar los términos de género natural.

Beneficio de la Duda a descripciones que expertos anteriores formularon al introducir el término y que a la luz de las teorías actuales resulten poco “razonables”.

Una objeción que cabe hacer a la versión de Kripke de la teoría causal radica en que cabe atribuirle la tesis de que los hablantes que utilizan un nombre – especialmente los hablantes situados lejos del inicio de la cadena causal que subyace al uso de un nombre – no necesitan tener ninguna creencia *verdadera* acerca del portador del nombre, lo que se aplicaría igualmente a los términos de género natural. A este respecto, y por lo que concierne a los nombres propios, Devitt (1981) ha alegado que en el proceso de fijación de la referencia de un nombre resulta necesario un elemento descriptivo, ya que el hablante debe al menos tener conocimiento acerca del *tipo* de objeto que está siendo nombrado; el hablante debe asociar con el objeto cierto predicado – el objeto que nombro “es un x” –, por lo que al fijarse la referencia de un término debe *conceptualizarse* su referente como una entidad que satisface cierta descripción y si el hablante que introduce un nombre estuviese completamente equivocado al respecto, cabría sostener que el término que se pretendía haber introducido carece de referencia.⁵⁵ Conviene señalar que un problema similar se suscita con respecto a los términos de género natural y Devitt y Sterelny han formulado en (1999) una propuesta similar de solución al respecto, pero como indicaremos en la sección 3 de este capítulo, estos autores alegan que hay un componente adicional de carácter descriptivo requerido para la fijación de la referencia de los términos de género natural.

Según la teoría causal un término de género natural es un término que se utiliza para hacer referencia a una determinada clase de entidades que, aunque son concebidas como si tuviesen determinadas propiedades (identificadoras) – algunas de las

⁵⁵ También Evans (1973) rechaza la versión de Kripke de la teoría causal y sostiene que el uso de muchos nombres propios se explica mejor a través de una teoría no puramente causal sino con un componente descriptivo, más precisamente, una teoría de acuerdo con la cual el referente de un nombre propio es la fuente causal dominante del conjunto de la información descriptiva que se asocia con el nombre propio.

propiedades involucradas en la introducción inicial del término –, puede ocurrir que algunas de esas propiedades *no* sean verdaderas de todas las entidades designadas por el término en cuestión. Como hemos indicado, esto es difícilmente sostenible en el caso de los términos de magnitudes físicas ya que con respecto a las magnitudes físicas hay poco lugar para trazar una distinción entre propiedades identificadoras, posiblemente contingentes, y propiedades estructurales o “esenciales”. Cada uno de los hablantes de una comunidad lingüística está vinculado a la referencia de este tipo de términos mediante una cadena causal en la que alguno de sus eslabones – el primero, el ocupado por los introductores del término, en el caso de la versión de Kripke –, son constituidos por hablantes expertos – los científicos, de acuerdo con Putnam –, que introducen los términos asociándoles unas propiedades identificadoras; son, en cualquier caso, los hablantes expertos en el sentido de Putnam los que establecerían cuáles son las propiedades “esenciales” que determinan la magnitud en cuestión, de tal manera que el uso de los términos de magnitudes físicas por parte del resto de los hablantes de la comunidad lingüística dependerá de una cooperación con los hablantes expertos, que estará regida por lo que Putnam denomina la “división del trabajo lingüístico”.

Es posible sostener, de acuerdo con la teoría causal – especialmente en el caso de la teoría de Putnam – que la referencia de un término de magnitud física permanecerá – por regla general – *constante* a través de los sucesivos eslabones de la cadena de transmisión y de los cambios teóricos, apelando al Principio del Beneficio de la Duda y alegando que existen prácticas que nos ayudan a decidir que hay suficiente continuidad en el cambio, si bien, como indicamos, Putnam no ha entrado en demasiados detalles al respecto.

No obstante, el inconveniente más serio que encontramos en la teoría causal concierne a la tesis de que cuando un término de género natural, como son los términos

de magnitudes físicas, es introducido, su referencia queda *fijada* por las entidades del género involucradas en la introducción del término y por la relación de identidad de género, es decir, por la posesión por parte de estas entidades de ciertas propiedades consideradas “esenciales”. Como ya hemos indicado, en el caso de los términos de magnitudes físicas es difícil sostener, tal como lo haría la teoría causal, que una magnitud M_I puede tener muchas de las propiedades por las que originalmente fue identificada la magnitud M y, sin embargo, no ser esa magnitud M , así como también que se pudiese descubrir que la magnitud M no tuviese algunas de las propiedades por las que originalmente fue identificada. Como ya se ha señalado, una magnitud física es una o una serie de propiedades cuantificables, propiedad de la estructura de los objetos o fenómenos físicos o propiedad estrechamente vinculada con ella, por lo que si se observa en un objeto o en un fenómeno la serie de propiedades que asociamos con una magnitud M , parecería que necesariamente se está ante esa magnitud y no ante otra.

El inconveniente anterior desemboca en otro que parece ser el más importante. Si la invariancia de la referencia de un término de género natural y, en concreto, de un término de magnitud física viene dada por la identidad de las propiedades “esenciales” de las entidades involucradas en la introducción del término, dado que en el caso de los términos de magnitudes físicas las propiedades con las que se identifica a sus referentes son generalmente propiedades internas – es decir, “esenciales” –, cabría sostener que toda diferencia en las propiedades – “esenciales” al menos en el marco de cada teoría – que atribuyan dos teorías a una magnitud, implica un *cambio* en la referencia del término que la designa. Sin embargo, sostendremos en el capítulo 3 que esto no ocurre necesariamente así.

3. Teorías híbridas de la referencia

Los diversos problemas que presentan las teorías descriptiva y causal de la referencia, tanto en el caso los nombres propios, como en el caso de los términos de género natural, han generado el desarrollo de teorías híbridas. De esta manera se intenta combinar las virtudes de cada una de las teorías puras mencionadas y al mismo tiempo superar sus posibles deficiencias.

El cometido principal de las teorías de la referencia es el de explicar dos procesos, a saber, el de la fijación o determinación de la referencia y el de la transmisión o el préstamo de la referencia. Es decir, el proceso de introducción de un término en una comunidad lingüística y la forma en la que en esa comunidad lingüística el término se va transmitiendo, tomando a este respecto en consideración que existe entre sus miembros distintos grados de competencia lingüística al respecto. De este modo, una teoría puede ser híbrida al menos de tres formas diferentes. Por una parte, puede tratarse de una teoría que combine elementos descriptivos y causales para explicar la fijación y transmisión de la referencia y no ser simplemente “descriptiva” o “causal” en ese sentido. Pero puede ser una teoría híbrida sólo por lo que se refiere a la explicación de la fijación de la referencia o sólo por lo que concierne a la transmisión de la referencia.

Muchas son entonces las combinaciones posibles para obtener una teoría total⁵⁶ híbrida de la referencia, pero no todas ellas resultan igualmente interesantes, al menos en su aplicación al estudio de la referencia de los términos de género natural y, en concreto, de los términos de magnitudes físicas. Las combinaciones posibles – y relevantes⁵⁷ – son las siguientes:

⁵⁶ Una teoría total de la referencia será una teoría que explique tanto el proceso de fijación o determinación de la referencia como el de su transmisión o préstamo.

⁵⁷ Dejamos de lado una teoría puramente causal de la determinación de la referencia porque asumimos que la determinación o fijación de la referencia ha de contener componentes descriptivos; por otra parte,

Teoría de la determinación de la referencia	Teoría de la transmisión de la referencia
Descriptivo-causal	causal
Descriptivo-causal	descriptivo-causal
descriptiva	descriptivo-causal

Cada una de estas teorías híbridas es el resultado de distintas combinaciones:

A) De acuerdo con la teoría que presentan Devitt y Sterelny en (1999) para los términos de género natural, si bien el proceso de transmisión de la referencia puede ser explicado desde una teoría puramente causal, resulta necesario apelar a algún contenido descriptivo en la explicación del proceso de determinación de la misma.⁵⁸ Estos autores pretenden evitar lo que ellos denominan el problema *qua*, es decir, el problema provocado por el hecho de que una misma entidad puede ser miembro de distintos géneros naturales. Puesto que la referencia de un término de género natural viene determinada por los ejemplares paradigmáticos del género, pero éstos ejemplifican distintos géneros, quien determina la referencia de un término debe conceptualizar esos ejemplares como miembros de un género natural *específico*, y esa conceptualización requiere el empleo – implícito o explícito – de alguna descripción. Esta teoría descriptivo-causal de la referencia para los términos de género natural, como la presentan Devitt y Sterelny, es un ejemplo del primer caso de hibridación que se ha mencionado.

como ya hemos mencionado en la sección 1.3. del presente capítulo, por regla general, las teorías descriptivas de la referencia no se ocupan, al menos de manera explícita, de explicar la transmisión de la referencia, por lo que parece tener poco sentido proponer una teoría puramente descriptiva de la transmisión de la referencia.

⁵⁸ Otros autores, como Stanford y Kitcher (2000) o LaPorte (2004), suponen también que el acto de bautismo o introducción de un término debe implicar algo “extra”, es decir, en el bautismo ha de asociarse con el término a introducir un cierto contenido descriptivo que permita al introductor del término aplicar dicho término al ejemplar paradigmático en tanto que miembro de un determinado género natural.

B) Una teoría de acuerdo con la cual la referencia de un término de género natural queda fijada tal como fue explicado en el caso A, es decir, una teoría descriptivo-causal respecto de la fijación de la referencia, puede ser combinada con una teoría igualmente descriptivo-causal acerca de cómo se transmite la referencia de este tipo de términos. De acuerdo con esta teoría de la transmisión de la referencia, ésta tiene lugar a través de cadenas causales de comunicación pero con algún contenido descriptivo, sosteniendo que todos los hablantes – en su uso de términos de género natural, ya sean expertos o no – deben tener alguna creencia verdadera acerca del referente; así obtenemos un ejemplo del segundo tipo de hibridación consignado en la tabla 2.1.

C) Por último, una teoría de acuerdo con la cual la referencia de un término sólo viene determinada por las descripciones que los hablantes asocian con término y esta referencia se transmite a través de cadenas causales, pero requiriendo que los hablantes que constituyen los eslabones de las cadenas tengan alguna creencia verdadera acerca del referente del término de género natural, constituye un ejemplo del tercer tipo de hibridación indicado.

Es claro que los inconvenientes y ventajas de cada una de estas posibles teorías híbridas son la combinación de los inconvenientes y ventajas que han sido expuestos para las distintas versiones de las teorías descriptiva y causal de la referencia.

No, obstante, la incorporación de un cierto componente propio de la teoría descriptiva de la referencia a la explicación de los procesos de determinación y transmisión de la referencia de un término de género natural puede resultar útil en dos sentidos. Por una parte puede resolver el denominado problema *qua*, suponiendo que el introductor o los introductores del término asocian alguna descripción con el término que les permite conceptualizar un ejemplar paradigmático de un género como un

ejemplar de un determinado género natural. Por otra parte, suponer que en el proceso de determinación o de transmisión de la referencia de un término hay cierto contenido descriptivo asociado al término en cuestión permitiría explicar de manera natural un posible cambio en su referencia. Aún así, hay al menos una cuestión que queda sin resolver. Cualquiera de las posibles teorías híbridas mencionadas debería especificar cuál es el contenido descriptivo que quien introduce el término – en los tres casos – o quien lo aprende de otros hablantes – en el segundo y tercer caso – debe asociar con dicho término. También es pertinente señalar que la propuesta de Devitt y Sterelny es muy general y no especifica que el contenido descriptivo antes mencionado dependerá del tipo de término de género natural que se esté analizando y por tanto, será necesario establecerlo para cada caso en particular y en función de las características específicas que poseen los distintos tipos de términos de género natural.

4. Los términos de magnitudes físicas y las teorías de la referencia

En relación con los términos de magnitudes físicas es relevante plantear la siguiente cuestión: si en la teoría T_1 se introdujo el término T asociándolo con una serie de descripciones D_i y posteriormente otra teoría sucesiva T_2 pudo heredar el término T y asociarlo con una versión modificada de las descripciones D_i , digamos D_i' , podemos preguntarnos si es lícito utilizar el mismo término si se ha constatado que alguna de las descripciones de D_i no es verdadera, o son ignoradas en D_i algunas de las propiedades expresadas por las descripciones D_i' que, a la luz de T_2 , parecen ser fundamentales. En el marco de la teoría descriptiva parecería no haber inconveniente en conservar el término T en el cambio de T_1 por T_2 , – y no sería necesario renunciar a la tesis de la invariancia de la referencia –, si se sostiene que la referencia del término T viene

determinada por un número suficiente pero no especificado de las descripciones asociadas con el término y que en la modificación del conjunto D_i llevada a cabo por la sustitución de T_1 por T_2 sólo se han perdido aquellas descripciones que no formaban parte de este “número suficiente pero no especificado”. De igual manera, de acuerdo con la teoría causal de la referencia, tanto si se supone que la referencia del término T quedó fijada en el bautismo inicial como si se supone que las propiedades “esenciales” permanecen inalteradas y que sólo han variado las contingentes, se puede sostener la invariancia de la referencia de dicho término. Pero en el caso particular de los términos de magnitudes físicas hemos alegado que todas las propiedades son generalmente propiedades “esenciales”, o pueden considerarse como tales, por lo que se deberá analizar en el caso de cada magnitud si todas las propiedades mediante las que se identifica una magnitud permanecen inalteradas.

4.1. El término “masa”⁵⁹

Jammer en (1961) señala dos grandes dificultades ligadas al concepto de masa. La primera es que se trata de un concepto abstracto en el siguiente sentido: si bien en el contexto clásico es posible pensarlo como ligado a la observación directa, esto ya no resulta posible en el contexto moderno; así, según Jammer (2000), el concepto de masa es simultáneamente un concepto teórico y observacional. La segunda dificultad radica en la multiplicidad de formas que adquiere el concepto, ya que el concepto de masa puede aparecer en el rol de carga gravitatoria, inercia o energía; esto suscita la cuestión de cuál es la referencia del término “masa” o del concepto correspondiente.

⁵⁹ En el capítulo 1 se han presentado las características atribuidas a la masa por diversas teorías físicas, por lo que en el presente capítulo se las supondrá conocidas.

Si, tal como sostiene la teoría descriptiva de la referencia de los términos de género natural, la referencia de un término de género natural está determinada por una serie de descripciones o propiedades que los hablantes asocian con el término, debería ser posible indicar un conjunto de descripciones que expresen el sentido del término “masa” y que este sentido determine su referencia, aunque, tal como alega Carnap, esto no se logre de forma acabada y definitiva. No obstante, supondremos que estas descripciones son las que se han consignado en la sección 2.2.4 del capítulo primero.

Cabe constatar que algunas de las descripciones asociadas con el término “masa” en el contexto de la física clásica difieren de las que se asocian con ese término en el contexto de la física relativista. El conjunto de descripciones que se asocian con el término “masa” varía no sólo en el marco de cada teoría sino que, como se constató, dentro del marco de la mecánica clásica se pueden encontrar distintas “definiciones” de esa magnitud.

Para analizar la referencia del término “masa” de acuerdo con la teoría causal se debería analizar el evento introductorio, los usos del término por parte de los hablantes expertos⁶⁰ y las propiedades “esenciales” concernientes a la masa que poseen cada una de las entidades que caen bajo la extensión de dicho término. Como resulta complicado encontrar un evento introductorio o bautismo inicial para el término “masa” y dado que algunas versiones de la teoría causal no sostienen este tipo de eventos como único elemento fijador de la referencia, se han indicado los usos del término en distintas teorías en el capítulo 1 y se analizará en lo que sigue la cuestión de las propiedades “esenciales”.

⁶⁰ De acuerdo con la teoría de Kripke, los hablantes expertos con respecto a (la referencia de) un término son los primeros introductores del término. A este respecto la teoría de Kripke difiere de la de Putnam. En el caso de los términos de magnitudes físicas tanto los hablantes de la comunidad científica que introduce un término como aquellos de la comunidad científica que lo heredan pueden considerarse “expertos”, ya que conocen las propiedades “esenciales” atribuidas a las entidades que forman parte de la extensión del término en cuestión. Por este motivo, en las secciones dedicadas a los términos de magnitudes físicas, se tomará en consideración exclusivamente la teoría de Putnam.

Hay diversas posibilidades respecto de las propiedades “esenciales” de la masa, es decir, de las propiedades concernientes a la masa que, se supone, determinan las entidades que forman parte de la extensión del término “masa”. Así puede ocurrir que estas propiedades coincidan totalmente con aquellas propiedades que una comunidad científica atribuye a la masa, que coincidan casi todas pero que algunas de las propiedades que pudiesen considerarse “esenciales” no sean aún conocidas por dicha comunidad, o que algunas de las propiedades consideradas como “esenciales” de la masa puedan resultar finalmente incorrectas a la luz de experiencias o descubrimientos que aún no han sido hechos. Obviamente, también puede ocurrir que en el marco de distintas teorías se supongan distintos conjuntos de propiedades “esenciales” para la masa, que es lo que hemos alegado anteriormente. Pero analizaremos qué sucede si aplicamos la teoría causal de la referencia de los términos de género natural a los términos de magnitudes físicas, sin atender a las particularidades de estos últimos, que nos llevaron a sostener que en relación con los términos de magnitudes físicas no cabe sostener la distinción entre propiedades “esenciales” y “accidentales” o “contingentes”.

Si las propiedades esenciales concernientes a la masa, que una entidad habría de poseer para pertenecer a la extensión del término “masa”, coincidieran con aquellas expresadas por el conjunto de descripciones que la comunidad científica asocia con el término, la respuesta a la cuestión de si el término “masa” refiere a la misma magnitud en una teoría y en otra distinta dependerá de la selección que se haga de las propiedades que se supone que deben permanecer invariantes en un contexto de cambio de teoría. Tanto si se está sosteniendo para la referencia de este término una posición acorde con la teoría descriptiva de la referencia como si se sostiene una postura conforme con la teoría causal, el problema parece reducirse a la constatación de si bajo la extensión del

término “masa” caen sólo objetos que poseen las propiedades que se hayan considerado como “esenciales”.

Por ejemplo, para quienes sostengan que la invariancia 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 obvio 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, pues nada asegura que no pueda hacerse un nuevo descubrimiento que muestre que una propiedad, hasta ahora considerada 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” de una magnitud son o no las mismas que aquellas que una comunidad científica asocia con el término que designa la magnitud en cuestión.

Pero podría suceder que alguna de las propiedades “esenciales” concernientes a una magnitud que debe poseer una entidad para pertenecer a la extensión del término de magnitud correspondiente fuese desconocida en un determinado momento por una determinada comunidad científica, o que alguna de las propiedades cuya posesión se exige de la entidad en cuestión no sea en realidad una propiedad esencial. Si dichas propiedades “esenciales” no son las mismas que las propiedades que se atribuyen al término, ya sea porque alguna de éstas no ha sido “descubierta” o porque alguna de las consideradas como tales en la actualidad es incorrecta, el comportamiento de la

referencia de un término de magnitud, como el término “masa”, debe ser analizado de manera distinta si se sigue una teoría causal o una teoría descriptiva.

Así como en el caso de que se conciba la referencia del término “masa” desde una perspectiva descriptiva debemos dilucidar si varía o no un número significativo de las descripciones o propiedades que se asocian con el término “masa” en un contexto de cambio de teoría, desde la perspectiva de la teoría causal que postula la distinción entre hablantes expertos y no expertos, habría que constatar si los expertos en cada contexto teórico consideran “esenciales” de una magnitud las mismas propiedades. Ahora bien, si no se conocen todas esas propiedades “esenciales” nos vemos involucrados en el problema de que no podemos saber a ciencia cierta si el término “masa” se refiere en el marco de dos teorías distintas a la misma magnitud.

Podría resultar irrelevante el hecho de que las descripciones que expresan las propiedades asociadas en cada contexto teórico con una magnitud puedan seguir asociándose o no con el término en cuestión en una teoría posterior, 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 a este respecto se suscita la cuestión de qué sucedería si una propiedad que en el marco de una teoría suponemos que es esencial es incompatible con otra que en el marco de una teoría anterior suponíamos que era igualmente esencial. Esto es lo que sucede con el término de magnitud “masa”. En un contexto clásico puede considerarse como propiedad esencial de la masa de cualquier objeto el ser 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”,⁶¹ sino

⁶¹ Según Mosterín, “(s)e 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” (1984, p. 57).

que entra en contradicción con una nueva propiedad considerada esencial: la dependencia de la masa con la velocidad. En ninguna de las dos teorías es posible renunciar a dicha propiedad de las entidades u objetos que poseen la magnitud masa. La única salida que queda para poder sostener que el término “masa” se refiere a la misma magnitud en una y otra teoría, es alegar que la independencia o dependencia de la masa con la velocidad no es una propiedad esencial de las entidades que posean dicha magnitud.

Ahora bien, la cuestión que se suscita es la de 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 pertenecientes a la extensión de una de ellas lo posee y un objeto que cae bajo la extensión de la otra no. Puesto que, de acuerdo con Kripke, la introducción de un término de magnitud tiene lugar apelando a propiedades contingentes de una entidad y la referencia de dicho término de magnitud se fija por propiedades “esenciales” de la magnitud en cuestión, nuevos descubrimientos científicos sobre la esencia de esa magnitud no implican un cambio en la referencia del término. Así, la identidad entre las magnitudes parecería también estar asegurada aún 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 subsumidas bajo 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 (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 criterio eficaz para distinguir entre propiedades *esenciales* y contingentes. Pero si, como

hemos alegado, tanto las propiedades atribuidas a la magnitud masa por la física newtoniana como las atribuidas por las teorías posteriores son “esenciales” con respecto a las teorías en cuestión, no cabe más que aceptar el cambio en la referencia del término.

4.2. Los términos “espín” e “ímpetu”

El término “espín” es un término propio de la mecánica cuántica; es un observable cuántico que carece de contrapartida clásica. No obstante, en algunos textos de física⁶² se utiliza el mismo término y, con fines didácticos, se compara el movimiento de rotación diaria de la Tierra sobre su propio eje norte-sur con el momento angular del electrón en el átomo de hidrógeno; en el caso de la mecánica clásica se trata de un momento angular asociado con el movimiento alrededor del centro de masa⁶³ y en el caso de la mecánica cuántica, de un momento angular de valor fijo que es una propiedad intrínseca de los electrones y de las partículas elementales. Pero el espín, en tanto propiedad intrínseca de algunas partículas, no tiene analogía con ninguna magnitud en el contexto de la mecánica clásica. El primer problema para establecer una analogía es que las teorías clásicas no contemplan la posibilidad de una magnitud cuantizada y el espín lo es. Además, el espín de una partícula no admite una representación basada en los formalismos matemáticos clásicos, sino que se representa como un operador sobre un espacio de Hilbert. La referencia del término “espín” se determinará, por tanto, a través de la información proveniente de la mecánica cuántica. Es decir, todas las descripciones que puedan asociarse con el término, así como las propiedades que se suponga poseen las entidades que forman parte de la extensión del término, han sido

⁶² Véase la nota 22 del capítulo 1.

⁶³ El momento angular de un sistema respecto de un punto cualquiera puede descomponerse en el momento respecto al centro de masas (momento angular propio o de espín) más el debido al movimiento del sistema de partículas como conjunto (momento angular orbital).

atribuidas por hablantes expertos en el marco de la física contemporánea. De este modo, no tiene sentido en este caso una comparación entre el uso del término “espín” en una y otra teoría, ya que claramente no se está designando con él una misma magnitud. No hay una sola descripción que se asocie con el término “espín” ni una sola propiedad que posean en común las entidades que forman parte de la extensión del término en ambas teorías. Por tanto, en este caso particular, la conclusión de cualquiera de las teorías de la referencia que han sido analizadas debería ser que el término “espín” no tiene la misma referencia en el contexto clásico que en el de la mecánica cuántica.

Otro ejemplo de término de magnitud física que sólo figura en el contexto de una teoría determinada es el término “ímpetu”. Este término es un claro ejemplo de un término de magnitud que ya no forma parte del conjunto de términos de magnitudes utilizados por ninguna teoría física actualmente en vigor. Si bien suele ser concebido como un término que expresa una magnitud similar a la energía cinética o un antecedente de la inercia, la formulación que se introduce como respuesta a la teoría aristotélica del movimiento es bien distinta en el caso de estos dos conceptos. En el sistema aristotélico-ptolemaico el movimiento se explicaba de acuerdo con el principio de la imposibilidad de una acción a distancia y por la acción de causas formales y finales. Es decir, el motor debía estar en contacto con el móvil y era la propia naturaleza de los cuerpos la que los dirigía hacia su lugar natural. Las dificultades de esta concepción del movimiento aparecieron principalmente en la explicación del movimiento de los proyectiles. Éste era difícil de explicar de acuerdo con el principio de la imposibilidad de la acción a distancia que exige que el motor esté en contacto permanente con el móvil, ya que, por ejemplo, una piedra continúa moviéndose una vez lanzada. Aristóteles supuso que la causa motriz en estos casos es el aire movido por la causa proyectora que va empujando a la piedra a lo largo de su trayectoria. Esta

explicación del movimiento de los proyectiles fue ya criticada, entre otros, por algunos nominalistas del siglo XIV como Filopón, Buridán u Ockham, quienes propusieron la teoría del ímpetu. Según la teoría del ímpetu, el movimiento del proyectil continúa porque la causa motriz imprime al móvil un impulso o ímpetu. Esta teoría afirma que el motor imprime en el móvil, en el momento de dar origen al movimiento, una fuerza duradera que va disminuyendo por la resistencia del medio o por una tendencia contraria. El movimiento continuo de un cuerpo pesado se debía entonces a un poder interno, implantado en él, por el propulsor que inició su movimiento. En ese contexto, el ímpetu era concebido entonces como una suerte de cualidad, análoga, por ejemplo, al calor.

En el marco de la mecánica clásica newtoniana se denomina “momento”, “cantidad de movimiento” o, en ocasiones, “ímpetu” a una magnitud vectorial, proporcional simultáneamente a la masa y a la velocidad de un cuerpo, que viene dada por la expresión matemática $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$. Puede definirse dicha magnitud para un medio

continuo a través de $\vec{p} = \int_m \vec{v} dm$ y también en el marco de otras teorías: en la mecánica

lagrangiana y hamiltoniana a través de la expresión $p_p = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$, en el marco de la

mecánica relativista el cuadrimomento $P = \left(\frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z \right)$ es un cuadvector que

reemplaza al momento clásico⁶⁴ y en la mecánica cuántica se construye un operador asociado a la cantidad de movimiento cuya componente cartesiana x se define como

$\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$. Pero esta magnitud, suponiendo que en todos los anteriores contextos se

⁶⁴ $\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ Es la expresión relativista de la cantidad de movimiento de una partícula medida por un observador inercial.

trata de una misma magnitud, es sustancialmente distinta de la magnitud “ímpetu” propia de la teoría atribuida a Juan Buridán. En esta última teoría se toma a la *cantidad de materia* y a la *rapidez (o velocidad)* como medios para determinar la medida del ímpetu y si bien éstas son las mismas cantidades que definen el momento en la mecánica newtoniana, en ésta el momento se considera como cantidad de movimiento o medida del efecto del movimiento del cuerpo, mientras que el ímpetu medieval era causa del movimiento.

Dada esta diferencia radical en la concepción de dichas magnitudes carece de sentido analizar las descripciones que se asocian con el término “ímpetu” en las distintas teorías o las propiedades atribuidas a las entidades que pertenecerían a la extensión del término. En este caso particular las teorías de la referencia que han sido presentadas en este capítulo poco pueden aportar al análisis del comportamiento de la referencia del término “ímpetu”, ya que el propio término deja de ser usado, y las causas del movimiento de los cuerpos se explican, en el marco de las distintas teorías físicas, a través de distintas series de magnitudes que no incluyen la magnitud expresada por dicho término. En el cambio de contexto teórico no se le atribuye a esta magnitud nuevas propiedades, sino que no se le atribuye ninguna propiedad, ya que dicha magnitud deja de ser necesaria en la explicación de fenómenos.

El análisis de la referencia – y el comportamiento de la misma en un contexto de cambio teórico – de términos como “espín” e “ímpetu” necesita entonces de una teoría de la referencia que evalúe cuestiones distintas de aquellas evaluadas por las versiones de la teoría descriptiva y causal de la referencia que hemos presentado. Es decir, en el caso de estos términos, para evaluar si sus referencias vienen determinadas de la misma manera en todas las teorías que los utilizan, no tiene sentido comparar las descripciones asociadas con ellos en cada teoría o las propiedades que cada contexto atribuye a las

magnitudes respectivas, ya que tales descripciones o propiedades son claramente distintas. Resulta necesario analizar la función que cumplen en cada teoría las magnitudes designadas por estos términos, observando para ello las relaciones que establecen, en cada contexto, con las restantes magnitudes.

4.3. El término “velocidad”

Tal como se ha explicado en el capítulo 1, suele definirse la velocidad de un objeto como la variación en la posición de un objeto en función de la variación temporal.

Formalmente: velocidad media $v = \Delta x / \Delta t$ y velocidad instantánea $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta x / \Delta t$.

Cuando en el marco de la mecánica clásica se asume el carácter continuo de un desplazamiento, no aparece ningún problema asociado a la definición de magnitudes como posición y velocidad, dado que es perfectamente entendible adjudicar al centro de gravedad de una masa m una posición y una velocidad.

En el gráfico correspondiente al movimiento de una partícula en una dimensión observamos la posición del centro de gravedad de la misma en cada instante. Dado el carácter continuo de las magnitudes en juego, al representar gráficamente la posición de la partícula en función del tiempo resulta una trayectoria continua:

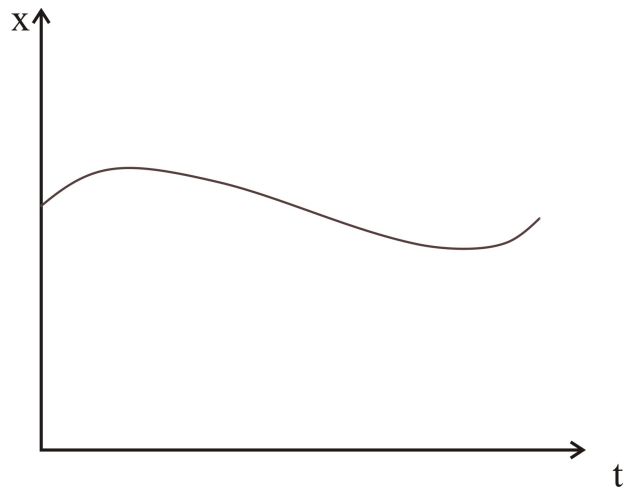


Figura 2.1

La velocidad media entre dos puntos viene dada por la pendiente de la recta secante a la curva entre dichos puntos.

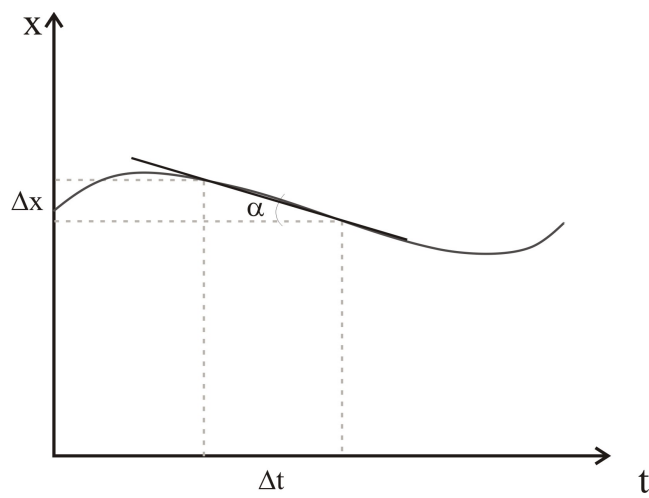


Figura 2.2

La velocidad instantánea viene dada por la tangente a la curva en cada punto.

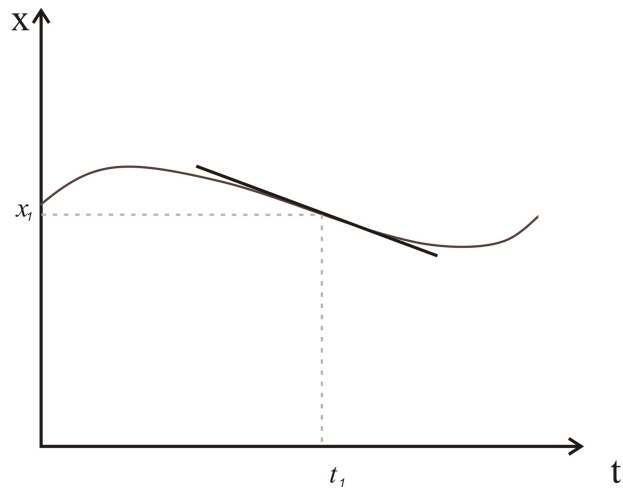


Figura 2.3

La situación es distinta cuando se asume una teoría basada en la discontinuidad, tal como ocurre en la mecánica cuántica, lo que conlleva que estos conceptos – posición y velocidad en este caso, pero también otros conceptos clásicos⁶⁵ – deben ser revisados. En el gráfico que representa el movimiento de la partícula tenemos ahora una serie de puntos que representan la posición de la partícula en determinados instantes.

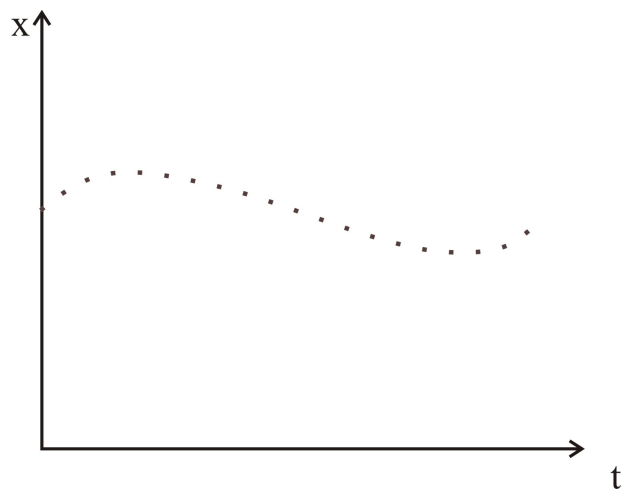


Figura 2.4

⁶⁵ Otros de los conceptos que debieron ser revisados con la introducción del cuanto de Planck son trayectoria, onda, corpúsculo, cantidad de movimiento, energía, espacio y tiempo. Es decir, la discontinuidad característica de la teoría cuántica llevó a físicos como Bohr y Heisenberg, entre otros, a preguntarse si había que introducir nuevos conceptos específicamente cuánticos o si era lícito seguir utilizando los conceptos clásicos y, en tal caso, bajo qué nuevas condiciones.

Como la velocidad sólo puede ser definida entre dos posiciones (como el límite, cuando la variación temporal (Δt) tiende a cero, del cociente entre la variación espacial (Δx) y la temporal: $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$), a cada posición le corresponderían dos valores de velocidad, dependiendo de si se analiza la velocidad en (x, t) eligiendo la posición anterior (x_1, t_1) o la posterior (x_2, t_2) .⁶⁶

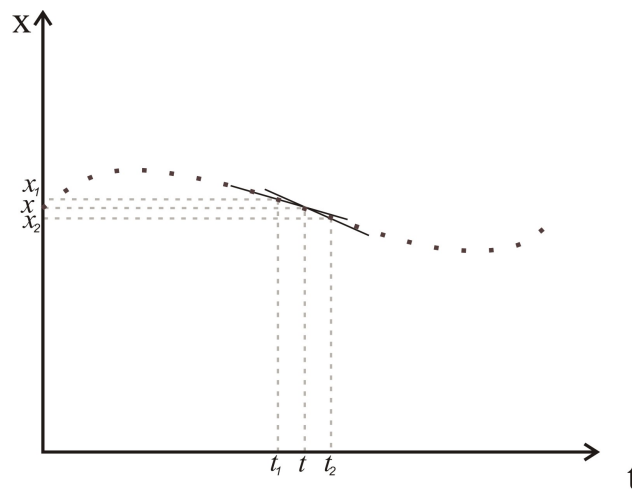


Figura 2.5

Si bien, asumida la discontinuidad en la trayectoria propia de la formulación de la mecánica cuántica, la velocidad en un punto puede tomar dos valores, se puede decir que se trata siempre de una relación específica entre el espacio y el tiempo independientemente de si cambia o no la estructura que ellos forman y por tanto la métrica de dicha estructura. Cabe recordar que, como hemos señalado en la sección 2.1.2 del capítulo primero, la métrica de la estructura espacio-tiempo en mecánica cuántica no varía respecto de la métrica clásica.

⁶⁶ Cabe señalar que en el contexto de la mecánica cuántica no-relativista la velocidad de propagación media de una partícula se representa mediante la expresión presentada en la sección 2.4 del capítulo 1, por lo que el límite utilizado en este capítulo sólo pone de manifiesto las consecuencias que trae la discontinuidad ahora supuesta en la trayectoria para el concepto de velocidad.

En cuanto al tipo de interacción experimental que se supone entre la magnitud a medir y el observador sí hay cambios significativos. En un contexto clásico se supone posible obtener un valor tan preciso como se quiera de la magnitud (dentro de los límites que presuponen el instrumento o los instrumentos con los que se la mida, directa o indirectamente, a través de las magnitudes que la definen o a través de cuyas relaciones puede efectuarse la medición). Por el contrario, en el contexto de la mecánica cuántica, dada la introducción por parte de Planck de una cantidad mínima de acción y, en consecuencia, asumido el carácter discontinuo de los procesos atómicos, resulta prácticamente imposible medir en forma simultánea magnitudes complementarias (por ejemplo, la posición y la velocidad de una partícula) con precisión infinita (o, al menos, arbitrariamente pequeña). En otras palabras, existe una incerteza asociada a la determinación de los valores de algunas magnitudes (aquellas que son complementarias), que es introducida como resultado de efectuar una medición.

Este carácter discontinuo, en la interacción entre el objeto o fenómeno a medir y el instrumento con el que se efectúa la medición, trae aparejada una imposibilidad de diferenciar entre dichos elementos. Es necesario entonces pensar el objeto a medir y el instrumento como un conjunto experimental, en algún sentido, sin partes diferenciables.

De esta manera, y de acuerdo con una perspectiva descriptivista acerca de la referencia de los términos de magnitudes físicas, algunas de las descripciones que se podían asociar con el término “velocidad” en el contexto de la mecánica clásica siguen siendo aplicables en el contexto de la mecánica cuántica, mientras que otras no lo son. Como ejemplo de descripción que se conserva en el cambio de teoría puede servir “la velocidad de un cuerpo es la variación de su posición en función del tiempo”, aunque en cada contexto esto implique, por ejemplo, una interacción distinta entre el objeto cuya velocidad se mide y el aparato experimental con el que dicha medición se lleva a cabo.

En este caso parecería que la descripción que corresponde al aspecto ontológico de la definición de la magnitud se conserva y, en este sentido, si, de acuerdo con una teoría causal de la referencia para los términos de género natural, tomamos como propiedad esencial la relación entre el espacio y el tiempo que define la magnitud velocidad y como contingentes el resto de las propiedades que sí varían, podría decirse que la referencia del término “velocidad” permanece constante cuando se inserta el término clásico en un contexto cuántico. También la estructura que conforman el espacio y el tiempo es relativamente similar en un contexto y otro. Así podría afirmarse la invariancia de la referencia del término “velocidad” si las relaciones que establece la magnitud velocidad con estas dos magnitudes es pensada como una propiedad esencial de la misma, o si la descripción que contiene dicha información forma parte del núcleo de aquellas descripciones que no deben verse alteradas si quiere pensarse que la referencia del término no ha variado. Pero si, como hemos alegado anteriormente, en el caso de los términos de magnitudes físicas no cabe distinguir entre propiedades *esenciales* y contingentes, debemos analizar todos los aspectos de la definición de la magnitud para conocer el comportamiento de la magnitud en cuestión.

CAPÍTULO 3: LA REFERENCIA DE LOS TÉRMINOS DE MAGNITUDES FÍSICAS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO TEÓRICO

Hemos presentado hasta aquí lo que se entiende por *magnitud física* y los distintos aspectos que la *definición* de una magnitud física abarca (en el capítulo 1), así como distintas versiones de las teorías de la *referencia* más importantes aplicadas a los términos de magnitudes físicas (en el capítulo 2).

En el presente capítulo nos ocuparemos de las tesis más relevantes acerca del comportamiento de la referencia de los términos de género natural y, en concreto, de los términos de magnitudes físicas, en un contexto de *cambio teórico*, a saber, la tesis de la *incommensurabilidad referencial* y la tesis de la *inmutabilidad de la referencia* – atendimos brevemente a esta última en el capítulo anterior –. En la parte final de este capítulo se expondrán algunos ejemplos del comportamiento de distintos términos de magnitudes físicas, con el objetivo de hacer plausibles las siguientes tesis:

- 1) Resulta necesario analizar caso por caso la referencia de los términos de magnitudes físicas, en especial, su variación o su invariancia.
- 2) Las teorías de la referencia que se han presentado en el capítulo 2 no pueden explicar la totalidad de los comportamientos concernientes a la referencia de los términos de magnitudes físicas, por lo que se torna necesario formular una teoría diferente.
- 3) La referencia de un término de magnitud física cambia cuando se modifica *radicalmente* el mapa de relaciones que forma con el resto de las magnitudes involucradas en su definición inicial.

1. Variación de la referencia: Kuhn y Feyerabend

1.1. Kuhn

Brevemente enunciada, la teoría de Kuhn (1962) acerca del desarrollo científico es la siguiente. Durante los períodos de ciencia normal, aquellos períodos en los cuales la comunidad científica lleva a cabo sus investigaciones en el marco de un determinado *paradigma* o *matriz disciplinar*,¹ no se producen grandes novedades fácticas o teóricas. El surgimiento de un nuevo paradigma, que reemplazará al anterior, comienza con la percepción de anomalías en este paradigma y sigue con una exploración de las zonas de anomalía. Este proceso, que desencadenará una revolución, se desarrolla en un marco de sensación generalizada de crisis en el seno de la comunidad científica, originado por el fracaso persistente en la resolución de problemas; sólo cuando está disponible un paradigma de repuesto – *rival* con respecto al primero – que explique o resuelva aquellos fenómenos o problemas que el anterior paradigma no puede resolver satisfactoriamente, se produce la revolución científica. Dicha revolución consiste en la sustitución de un paradigma por otro.²

Algunas de las diferencias importantes entre paradigmas rivales son las siguientes. En primer lugar, dos paradigmas rivales involucran problemas que inicialmente podrían ser los mismos – por ejemplo, determinar simultáneamente la velocidad y la posición de un cuerpo o partícula –, pero que son concebidos de distinta manera; un ejemplo de cómo puede concebirse de manera distinta el problema

¹ En (1969) Kuhn propone sustituir el término “paradigma” por el de “matriz disciplinar”, dado que el primero, definido como la estructura que determina un período de ciencia normal, no era lo suficientemente acotado. La matriz disciplinar está compuesta por cuatro elementos: generalizaciones simbólicas, que incluyen las leyes fundamentales y contienen los conceptos fundamentales de la matriz, modelos que clarificarán la naturaleza de los referentes admisibles en las generalizaciones simbólicas, valores o criterios de evaluación y ejemplos paradigmáticos o problemas prototípicos a los que se aplican las generalizaciones simbólicas.

² Análisis completos – y con distintos propósitos – de la obra de Kuhn pueden encontrarse en Hoyningen-Huene (1993) y Pérez Ransanz (1999).

mencionado lo aporta la microfísica moderna, que supone en las mediciones simultáneas de la velocidad y la posición de una partícula una indeterminación inadmisibles en el marco del programa newtoniano. En segundo lugar, dos paradigmas rivales implican diferencias conceptuales ligadas al diferente lenguaje teórico y a la distinta interpretación ontológica de los datos analizados; cada paradigma considerará que el mundo está constituido por distintos tipos de entidades. Por último, los seguidores de paradigmas rivales tienen diferentes visiones del mundo; así, los defensores de distintos paradigmas no perciben lo mismo, ya que, según considera Kuhn, el paradigma en el que trabaja un científico guía el modo en el que ve un determinado aspecto del mundo.³

De acuerdo con Kuhn, tras producirse una *revolución científica*, en el que un paradigma es sustituido por otro, el paradigma que pasa a ser vigente es muy diferente del anterior e incluso incompatible con él y, dado que los defensores de paradigmas rivales suscriben distintos conjuntos de técnicas y reglas de experimentación,⁴ ven el mundo de distinta manera y lo describen en distinto lenguaje; estos paradigmas rivales son *inconmensurables*, es decir, no existe una base neutral sobre la cual llevar a cabo una comparación entre ellos. Esta noción de inconmensurabilidad es la primera que presenta Kuhn en (1962), pero Kuhn fue caracterizando la noción de inconmensurabilidad de manera más específica en escritos posteriores y, a partir de

³ Torretti defiende en (1990) que, a diferencia de las cosmovisiones, las teorías físicas – a partir del siglo XVII – se refieren a dominios bien delimitados de objetos que se recortan de un entorno más amplio: la “realidad”. Él alega que la tesis de Kuhn – según la cual los seguidores de paradigmas rivales tienen diferentes visiones del mundo – es verdadera, pero trivial, si por “mundo” se entiende el dominio de la teoría.

⁴ Así, por ejemplo, la interacción entre el objeto o fenómeno a medir y el instrumento de medición posee un carácter continuo en el contexto de la física clásica, mientras que posee un carácter discontinuo en el contexto de la mecánica cuántica. Véase sección 3.2. del capítulo 1.

(1969), él caracteriza la inconmensurabilidad entre teorías en base a la *intraducibilidad* de los lenguajes de ambas teorías entre sí (o de sendos lenguajes a uno neutral).⁵

Puesto que la cuestión más relevante en el contexto de este escrito es la de las implicaciones de la tesis kuhniana de la inconmensurabilidad con respecto a la *referencia* de los términos de magnitudes físicas, conviene que perfilemos algo mejor dicha tesis.

Kuhn alega que en el marco de paradigmas rivales los términos teóricos se usan de modo diferente; aunque en ambos paradigmas se utilicen los mismos términos, estos términos poseen significados diferentes en sendos paradigmas, ya que el significado de un término – como veremos a continuación – viene determinado contextualmente, y cada uno de esos dos paradigmas constituye un contexto diferente. No obstante, Kuhn afirma en (1983) y en (1993) que la intraducibilidad que constituye la inconmensurabilidad no concierne a todos los tipos de términos de (los lenguajes de) dos paradigmas o – como diremos a partir de ahora – de dos teorías, sino sólo a un tipo de términos, a saber, a los *términos de género* y, más aún, no a todos los términos de género, sino a subconjuntos de los términos de género de dichas teorías. Como Kuhn indica en (1990), aunque T_1 y T_2 compartan términos de género, en el marco de cada una de las teorías algunos de dichos términos de género tienen significados distintos de modo tal que los significados de algunos de los términos de género de T_1 no pueden formularse mediante expresiones de T_2 , ni viceversa.

Para explicar el hecho de que algunos de los términos de género natural⁶ correspondientes a dos teorías distintas sean mutuamente intraducibles, es conveniente

⁵ A este respecto estamos de acuerdo con Sankey (1993, pp. 760 ss.), que sostiene que existen dos etapas en el desarrollo de la noción kuhniana de inconmensurabilidad, a saber, la inicial de (1962) y la tardía, presente en escritos posteriores como (1983), separadas por una etapa de transición que comienza con (1969).

⁶ Aunque Kuhn habla de “términos de género” sin mayor especificación, es de suponer que por ellos ha de entenderse preferentemente, como haremos a partir de ahora, términos de género natural.

introducir algunas consideraciones acerca de cómo según Kuhn se aprende este tipo de términos. Aprender y entender un término de género natural involucra conocer las *generalizaciones* que sus referentes satisfacen. Algunas de estas generalizaciones admiten excepciones y otras, que son concebidas como *leyes* de la naturaleza, están desprovistas de ellas; estas diferencias entre los tipos de generalizaciones están asociadas con distintas formas en las que se aprenden las generalizaciones en cuestión, así como los términos de género natural que figuran en ellas.⁷ Los términos de género natural que son aprendidos identificando sus referentes como miembros de algún conjunto complementario respecto de otro corresponden al primer tipo de generalizaciones. Los otros términos de género natural, que incluyen los términos de magnitudes físicas, se aprenden simultáneamente con otros y a través de situaciones en las que conjuntamente ejemplifican alguna ley de la naturaleza. Para Kuhn (véase 1990) es imposible aprender el término “fuerza” si no es en relación con términos como “masa” o “peso” y recurriendo, por ejemplo, a las leyes de Newton sobre el movimiento.⁸ De esta manera, el significado de los términos de magnitudes físicas de una teoría, que pertenecen al segundo tipo de términos de género natural, viene determinado por las *leyes* de dicha teoría, las cuales son aprendidas – y por tanto, también lo son los términos de género natural contenidas en ellas – mediante su aplicación a *ejemplos paradigmáticos*.

⁷ Kuhn (1993, pp. 316-317) utiliza como ejemplo del primer tipo de generalizaciones la de que los líquidos se expanden con el calor – aquí nos encontramos con la excepción del comportamiento anómalo del agua entre los 0 y los 4 grados centígrados –, y como ejemplo del segundo tipo las leyes de Boyle para los gases o las de Kepler para el movimiento de los planetas.

⁸ Contrariamente a Kuhn, Achinstein (1964) considera que muchos de los factores necesarios para comprender el modo en el que un término es utilizado en una teoría científica pueden ser comprendidos independientemente de la teoría en cuestión. Así, generalmente cuando una teoría es modificada o reemplazada por otra, muchos de los mencionados factores permanecen constantes, por lo que el significado del término permanece inalterado.

De este modo, la intraducibilidad de (algunos⁹ de) los términos de género natural pertenecientes a teorías rivales se explica en Kuhn por el hecho de que dichas teorías incorporan leyes distintas y, por tanto, disponen de un vocabulario conceptual diferente. Para cualquier tipo de términos, exceptuando los términos de género natural, estas diferencias pueden resolverse importando los términos de una de las teorías al vocabulario de la otra; pero esta importación resulta imposible, según Kuhn, en el caso de los términos de género natural. Ahora bien, como los términos de género natural comunes a teorías rivales figuran en leyes distintas – y en algunos casos incompatibles – y son aprendidos a través de ellas, poseen según Kuhn distinto significado y, más aún, – salvo previsiblemente casos aislados de correferencia – distinta *referencia*.

A lo dicho por Kuhn, cabría añadir – aunque quizás esto está implícito en sus consideraciones – que, aunque las relaciones que se establecen entre los términos de género natural en los marcos de distintas teorías dependen fundamentalmente de las leyes de dichas teorías, también son relevantes para dichas relaciones la estructura matemática y experimental mediante las cuales son representadas las entidades denotadas por dichos términos. Tales relaciones conforman la estructura del lenguaje de cada teoría, la cual determina el significado y la referencia de los términos (de género natural) de las teorías científicas. Como afirma Moulines (en 1991, p. 149) “al pasar de la mecánica newtoniana a la relativista, las relaciones entre ‘masa’, ‘posición’, ‘instante’ y ‘fuerza’ cambian tan sustancialmente y, sobre todo, tan claramente, que no sólo no tenemos ninguna garantía para pensar que la referencia de ‘masa’ es la misma, sino que tenemos buenas razones para pensar que esa referencia ha cambiado sustancialmente, sea cual sea ella en un caso y otro”. El modo en el que viene determinada la referencia de los términos de género natural pertenecientes a teorías científicas, a saber,

⁹ Aunque, como Kuhn señala en (1983), la inconmensurabilidad sólo posee un carácter local, es decir, sólo afecta a algunos términos de género natural de teorías rivales, usualmente interrelacionados, a veces nos expresaremos de manera más general, presuponiendo esta puntualización.

fundamentalmente por las leyes en las que figuran dichos términos en cada teoría, conlleva que los términos de género natural comunes a dos teorías sucesivas o rivales poseen – al menos, por regla general – distinta referencia, por lo que Kuhn sostiene que el cambio de una teoría por otra implica un cambio no sólo en el significado sino también en la *referencia* de los términos de género natural.¹⁰

A este respecto conviene señalar que Kuhn (en 1990) se opone a la teoría causal de la referencia. Dos son las críticas más relevantes para el presente trabajo. La primera concierne a la relación de *identidad de género* que, de acuerdo con la teoría causal, viene dada por las propiedades “esenciales” de las entidades que pertenecen al género en cuestión; Kuhn sostiene que, a diferencia de lo que dan a entender los seguidores de la teoría causal, esa relación de identidad de género no permanece constante en un contexto de cambio de teoría, dado que la comunidad científica que defiende una teoría atribuye a las entidades del género unas propiedades “esenciales” distintas de las atribuidas o presupuestas por aquella comunidad que defiende la teoría rival.¹¹ La segunda crítica, a la que aludimos en el capítulo 2, es que este tipo de teorías se ven envueltas en el tipo de problemas que pretenden resolver – determinar cuáles de las propiedades asociadas con un término de género natural determinan su referencia – ya que, según Kuhn (1990, p. 312), no ofrecen un criterio para establecer la distinción entre propiedades “esenciales” y “accidentales”; qué propiedades son las constitutivas de un género natural y cuáles son sólo contingentes.¹²

¹⁰ De este modo Kuhn se opone a la tesis de Nagel (1961) según la cuál el significado y, por tanto, la referencia de los términos que utiliza la ciencia están fijados por los hábitos de uso o las reglas de la “ciencia primaria”. Nagel supone que es posible la reducción entre teorías y denomina “ciencia secundaria” al conjunto de teorías o leyes experimentales que son reducibles a otra teoría y “ciencia primaria” a la teoría a la cual se lleva a cabo la reducción en cuestión.

¹¹ En realidad Kuhn hace la crítica suponiendo que existe una única propiedad esencial que fija la referencia de un término de género natural, pero, tal como señala Fernández Moreno (2001), no toda versión de la teoría causal de la referencia debe comprometerse con esta tesis.

¹² Si bien en esta presentación de las objeciones de Kuhn a la teoría de causal de la referencia aludimos a la distinción entre propiedades *esenciales* y *contingentes*, cabe recordar que hemos cuestionado tal distinción en el caso particular de los términos de magnitudes físicas. Véase la sección 2.1. del capítulo 2.

Llegados a este punto, y aunque la interpretación de la obra de Kuhn es todavía objeto de discusión,¹³ cabe mencionar dos cuestiones relevantes en relación a la teoría de Kuhn. La primera de ellas respecto a las diferencias existentes entre paradigmas rivales y la segunda sobre la idea de *intraducibilidad*.

Acerca de la primera cuestión es pertinente señalar que autores como Falkenburg (en 1997) distinguen al menos tres diferencias significativas entre paradigmas rivales: cambios en los problemas que los científicos intentan resolver, cambios en el significado de los conceptos teóricos fundamentales y cambios del mundo en el que los seguidores de cada paradigma desarrollan sus prácticas científicas. No obstante, las conclusiones de Falkenburg son diferentes de las de Kuhn, ya que ella alega que la mayoría de los físicos estarían dispuestos a admitir en algún sentido la inconmensurabilidad entre teorías rivales, pero no la inconmensurabilidad entre los conceptos de dichas teorías.¹⁴ Así el concepto no-relativista y el relativista de masa han sido utilizados al mismo tiempo sin que eso implicara confusión o ambigüedad. Cuando los físicos construyen escalas para las mediciones de masa que cubren todos los valores que se le pueden asignar en los distintos ámbitos (macro-meso o microscópico), están suponiendo que esta escala representa un tipo de propiedad física que poseen los objetos materiales y sus partes y, por tanto, que los números asignados representan magnitudes conmensurables. Falkenburg está de acuerdo con Kuhn por lo que respecta a la tesis de la inconmensurabilidad de teorías, pero le objeta una subestimación respecto del poder unificador y del valor referencial del lenguaje teórico en el que están expresados los

¹³ Suárez (2003) alega que el carácter ambiguo y analíticamente poco riguroso de la obra de Kuhn en general y específicamente de (1962) da lugar a interpretaciones muy dispares.

¹⁴ Lewis sostiene en (1970) que cuando una nueva teoría científica introduce nuevos términos, éstos pueden ser definidos a partir de los términos antiguos entendidos como aquellos términos que eran ya entendidos o comprendidos con anterioridad a la introducción de la nueva teoría. En dicho artículo presenta un método general para definir los términos teóricos que introduce una nueva teoría.

resultados de las mediciones.¹⁵ La supuesta inconmensurabilidad entre los conceptos teóricos fundamentales queda neutralizada, según Falkenburg (2002), por la existencia de ciertos “principios puente” entre los términos fundamentales de dos teorías que habrían sido considerados como inconmensurables.

Respecto a la segunda cuestión cabe señalar que frente a Kuhn, Putnam (1981) ha criticado la idea de intraducibilidad y argumentado que para poder afirmar que un término perteneciente a una teoría antigua – o una teoría ya en desuso – no es traducible a nueva teoría, los científicos defensores de la nueva teoría han de poder entender dicho término, lo que significa que lo han traducido al lenguaje de esta teoría. No obstante, Kuhn (en 1983) – en el mismo sentido, Feyerabend (en 1987) – ha respondido alegando que es posible *entender* términos que sean *intraducibles*.¹⁶

A modo de cierre de la presente sección enunciaremos muy brevemente los resultados más relevantes de la misma acerca de la noción de referencia. De acuerdo con la concepción kuhniana, la referencia de un término de género natural viene determinada fundamentalmente mediante las leyes que contienen dichos términos. En la medida en que, según Kuhn, un cambio de teoría traerá consigo cambios en las leyes de la teoría, un cambio de teoría conllevará cambios en la manera cómo se determina la referencia de los términos de género natural y, por tanto, – por regla general – un cambio en la *referencia* de los términos de género natural, entre los que se encuentran

¹⁵ Collier (1984) sostiene que una forma más débil de la tesis de inconmensurabilidad, que permitiera una eventual comparación entre teorías inconmensurables, sería consistente con el modelo científico de Kuhn. De acuerdo con su definición de inconmensurabilidad débil, “T y T’ son débilmente inconmensurables para S en un tiempo t si y sólo si S no tiene, en el tiempo t, una técnica para comparar semánticamente a T y T’” (Collier 1984, p. 146). Este autor está suponiendo que aunque en algún determinado momento no estén disponibles los recursos necesarios para la comparación entre dos teorías, podría crearse un lenguaje técnico, neutro, basado en conceptos observacionales y experimentales, en el que cabría formular ambas teorías para su comparación.

¹⁶ En Fernández Moreno (1998b) se encuentra un análisis más detallado de algunas de las objeciones a la tesis de la intraducibilidad de lenguajes de Kuhn, así como de la respuesta de este autor a dichas objeciones.

los términos de magnitudes;¹⁷ de este modo la tesis de la de inconmensurabilidad, aplicada a la noción de referencia, a la que cabría denominar “tesis de la inconmensurabilidad referencial”, conlleva la relatividad de la referencia de los términos de género natural con respecto a la teoría en la que figuran.¹⁸ Esta tesis de la inconmensurabilidad referencial parece encontrar su sustento en una teoría de tipo *descriptivo* respecto de la referencia de los términos de género natural, donde las descripciones en cuestión corresponderían a las leyes de la teoría en la que figuran dichos términos.

1.2. Feyerabend

La posición de Feyerabend comparte elementos con la de Kuhn, pero puede considerarse que la completa, y ambas, en su conjunto, proporcionan el fundamento de la tesis de la *inconmensurabilidad referencial* criticada, entre otros, por Putnam. Al igual que Kuhn, Feyerabend (1975) rechaza la concepción acumulativa y lineal de la práctica científica – característica del positivismo –; a este respecto Feyerabend critica algunos de los principios de lo que él denomina la “aproximación ortodoxa”, de los que sólo atenderemos al principio de *invariancia* del significado.¹⁹

Según Feyerabend, el principio de invariancia del significado es consecuencia de asumir dos supuestos. En primer lugar, el supuesto de que los términos de los lenguajes naturales son tan amplios, indefinidos y vagos que resultan compatibles con cualquier

¹⁷ Nola (1980b) ha denominado “idealismo relativista” a la posición que defiende Kuhn, de acuerdo con la cual, algunos términos como “masa” tienen referentes distintos en el marco de teorías distintas.

¹⁸ Fernández Moreno ha alegado en (1998a) que, si bien la tesis de inconmensurabilidad kuhniana posterior a la de (1962) es sólo, o fundamentalmente, una tesis semántica, ambas nociones de inconmensurabilidad involucran la relatividad tanto de la referencia como de la verdad.

¹⁹ Feyerabend critica en (1981) otros dos supuestos. Por una parte, la tesis de la *derivabilidad*, según la cual tanto la reducción de una teoría a otra como el proceso de explicación científica se logran, en ambos casos, por medio de procedimientos estrictamente deductivos, y por otra, la condición de *consistencia*, que establece que las nuevas teorías deben ser compatibles con las que se encuentran ya establecidas.

teoría científica, de modo que la ciencia sólo inserta en ellos detalles técnicos propios de cada disciplina y, en segundo lugar, el supuesto de que los términos fundamentales de una teoría científica se refieren a entidades invariables y, por tanto, no experimentan cambios en cualquier explicación que los incluya. De este último supuesto se sigue que, introduciendo algún tipo de hipótesis que postule relaciones adecuadas entre los términos correspondientes de dos teorías T y T', es posible la reducción de la teoría T a T'. Pero Feyerabend sostiene que lo que en realidad ocurre cuando se pasa de una teoría T a una teoría T' más amplia, es algo mucho más radical que la incorporación al contexto de T' de la teoría T inalterada. Según él, lo que tiene lugar es, más bien, una *sustitución* de la *ontología* de T, y el correspondiente *cambio* de los *significados* de los elementos descriptivos del formalismo de T'. Dicha sustitución afecta no sólo a los términos teóricos de T', sino también, por lo menos, a algunos de los términos observacionales que aparecen en sus enunciados contrastantes. En sus palabras: “(i)ntroducir una nueva teoría implica cambios de perspectiva tanto respecto a los rasgos observables como a los rasgos no-observables del mundo, y cambios correspondientes en el significado de los términos incluso más *fundamentales* del lenguaje empleado” (1981, p. 39). Cabe señalar que, como sostienen Hoyningen-Huene y Oberheim (1997), y contrariamente a Sankey (1997) y (1994), si bien el concepto de inconmensurabilidad es introducido por Feyerabend para rechazar el principio de invariancia del significado, este concepto no está limitado a cuestiones semánticas. La tesis de la inconmensurabilidad tal como es presentada por Feyerabend en (1981) es el resultado de una investigación histórica de la práctica científica en la que el autor critica no sólo tesis de carácter semántico, sino también de carácter metodológico – véase nota 19 – de lo que denomina “aproximación ortodoxa”.

El argumento fundamental de Feyerabend (1981) contra la tesis de la invariancia del significado puede resumirse así: dado que usualmente algunos de los principios implicados en la determinación de los significados de los términos de teorías ya no vigentes son inconsistentes con los correspondientes a teorías más recientes, es natural resolver esta contradicción eliminando los viejos principios y sustituyéndolos por los principios de la nueva teoría, de modo que este procedimiento conduce a la eliminación de los antiguos significados.

Feyerabend adopta una teoría *contextual* del significado, de acuerdo con la cual el significado de un término no es una propiedad intrínseca suya, sino que depende del modo en el que el término haya sido incorporado a una teoría, y el contenido total de la teoría, incluyendo el significado de sus términos descriptivos, estará dado por el modo en el que ésta incorpora el conjunto de sus consecuencias empíricas a la totalidad de las alternativas que en ese contexto particular se están discutiendo.

Una vez que hemos presentado brevemente la crítica de Feyerabend al principio de invariancia del significado así como la teoría del significado que el autor adopta, nos interesa ahora mencionar sus implicaciones respecto de la *referencia* de los términos utilizados en distintas teorías. Según la concepción de Feyerabend, los lenguajes de sistemas teóricos expresan alguna teoría o algún punto de vista, motivo por el cual contienen una ontología bien desarrollada y, en ocasiones, muy abstracta. De esta manera, “(s)i una teoría es sustituida por otra con una ontología diferente, entonces tendremos que revisar hasta la interpretación de todas nuestras medidas, por muy autoevidente que tal interpretación particular pueda haber llegado a ser con el tiempo” (Feyerabend 1981, p. 51). Feyerabend sostiene que los términos de magnitudes físicas se *refieren*, en el marco de dos teorías con diferentes ontologías, a distintas entidades y los *significados* de dichos términos son también distintos. Una manera de justificar

dicha tesis consiste en alegar que las mediciones que se hacen de una magnitud así como los resultados arrojados por los instrumentos de medición en el marco de dos teorías distintas, muchas veces dan lugar a interpretaciones completamente distintas. Los significados de los enunciados de observación, tal y como se obtienen con ayuda de instrumentos de medida no pueden, entonces, permanecer invariables respecto del cambio y progreso del conocimiento científico. Y los cambios de significado de los términos en distintas teorías traerán aparejados, por regla general, cambios de referencia.

Mencionaremos, por último, algo más explícitamente algunas características de la noción de *inconmensurabilidad* en Feyerabend. Este autor alega en (1981) que, aunque algunos pares de teorías pueden ser empíricamente adecuadas en un dominio y estar de acuerdo cuantitativamente, puede que una de las teorías no pueda ser reducida o explicada en términos de la otra, ya que puede existir *inconmensurabilidad* entre los aparatos conceptuales de ambas.²⁰ Según Feyerabend, esto es lo que sucede, por ejemplo, con la teoría del ímpetu y la teoría de Newton, con la termodinámica fenomenológica y la teoría cinética o con la física clásica pre-relativista y la relatividad. Es decir, lo que sucede en estos casos es que existen dos teorías, T y T', que se solapan en un dominio D y que son experimentalmente indistinguibles aunque resulten *incompatibles* en ese dominio. Aunque T' pueda ser confirmada fuera de D y sea más coherente y general que T, si los aparatos conceptuales de T y T' son tales que resulta imposible definir los términos descriptivos de T sobre la base de los términos descriptivos de T', así como establecer relaciones empíricas correctas que incluyan tales

²⁰ A este respecto Moulines alega que si el dominio D, en el que supuestamente las teorías inconmensurables T y T' resultan empíricamente adecuadas, viene descrito por la teoría T, y si las dos teorías son realmente inconmensurables, entonces no puede existir garantía alguna de que las expresiones de T' se refieran al mismo dominio D. En sus palabras "(s)i a (T y a T') se aplica la divergencia semántica radical, entonces no se puede hablar de ningún D que sea dominio de aplicación o referencia común de ambas teorías" (1991, p. 143).

términos, es imposible la explicación de T en función de T' o la reducción de T a T', si debe cumplirse, entre otras cosas, que los significados de los términos permanezcan *invariables* respecto de tal explicación o reducción. Es más, el uso de T' necesita la eliminación del aparato conceptual y de las leyes de T. De acuerdo con lo arriba expuesto, según la concepción de Feyerabend, dos teorías son *inconmensurables* cuando los términos fundamentales de una de ellas no pueden ser definidos mediante los términos de la otra teoría ni relacionados con éstos mediante enunciados empíricos que resulten correctos en los marcos de ambas teorías. Dado que para que existan pares de teorías mutuamente inconmensurables es suficiente con que el uso de estos términos (no definibles en función de los términos de una teoría T) impliquen cambios en el uso de los principales términos de una teoría T', la ampliación del conocimiento científico – digamos, por ejemplo, un conocimiento más detallado de un fenómeno –, en tanto implique una modificación (del significado) de los principales términos descriptivos usados en una teoría previa, conllevará que las teorías en cuestión son inconmensurables.

Uno de los ejemplos que Feyerabend utiliza para ilustrar las implicaciones del cambio de significado de algunos términos de dos teorías distintas, es el del comportamiento de los conceptos clásicos una vez introducida la teoría de la relatividad. Él alega que es imposible definir los conceptos clásicos en términos relativistas o relacionarlos con la ayuda de una generalización empírica, ya que cualquier procedimiento semejante implicaría la afirmación de que la velocidad de la luz es infinitamente grande. En ese caso la nueva teoría T' está formulada en un lenguaje cuyas reglas de uso implícitas son inconsistentes con la teoría T y con alguna de las consecuencias de T en el dominio en el que T' tiene éxito. Este tipo de ejemplos

muestran, según el autor, que la tesis de invariancia del significado es incompatible con la práctica científica real.

2. Invariancia de la referencia

2.1. Putnam

De acuerdo con la versión de la teoría causal de la referencia que defiende Putnam, la referencia o extensión de un término de género natural está determinada por el mundo o, como él dice, por el *entorno*, así como por la comunidad de *expertos*.²¹

Según Putnam, los términos de género natural, como “agua”, poseen un componente indéxico oculto; así, por ejemplo, una porción de líquido pertenece a la extensión del término “agua” si está en la relación de “mismo líquido” – mismo_L – con el agua que *nosotros* conocemos, es decir, con el agua de *nuestro* planeta, la Tierra, y esto será así sólo si posee sus mismas propiedades estructurales o “esenciales” – véase la nota 11 de este capítulo y la referencia allí indicada –. De este modo, Putnam, como Kripke, afirma que los términos de género natural son *designadores rígidos*, es decir, designan el mismo género natural (especie, sustancia, etc.) – que designan en nuestro mundo – con respecto a todos los mundos posibles. La referencia de un término de género natural queda fijada una vez introducido el término y no parecería que pudiese variar por el hecho de que se *modifiquen* las teorías que contienen dicho término.

Cuando se introduce un término, por regla general dicha introducción se hace con ayuda de descripciones. Esto no implica de ninguna manera según Putnam (1975a) que la introducción del término engendre una relación de sinonimia entre el término y la descripción o las descripciones en cuestión; el término T no es un sinónimo de la

²¹ Cabe aclarar que, contrariamente a lo que alegaremos, hay autores como Brown (1998) que sostienen que la referencia de un término de género natural en una comunidad lingüística queda fijada por las capacidades R de los miembros de dicha comunidad, aunque estos sean “científicamente ignorantes”.

descripción D con ayuda de la cual se introdujo. Ahora bien, como ya indicamos en el capítulo anterior, existe, según Putnam, una división del trabajo lingüístico, de modo que son los expertos quienes determinan la referencia de los términos que utilizan el resto de los miembros de una comunidad lingüística, ya que son aquéllos los que descubren las propiedades estructurales que comparten los miembros de la extensión de dichos términos. La referencia de los términos de género natural, que ha quedado fijada por la identidad de las propiedades estructurales de las entidades que pertenecen al género involucradas en la introducción del término, se trasmite a través de una cadena causal de comunicación, de manera tal que aunque un hablante no involucrado en la introducción del término asocie con un término de género natural una descripción que no se aplique a (los miembros de) su extensión, esto no obstará a que mediante dicho término siga refiriéndose a su extensión, que ha quedado *fijada* en la introducción del término, y según la versión no-bautismal de la teoría de Putnam a la que aludimos en el capítulo anterior, esta introducción habrá tenido lugar mediante *expertos*. Más aún, de acuerdo con la división del trabajo lingüístico, los hablantes no-expertos – es decir, la mayoría de los hablantes – difieren la referencia de los términos de género natural que usan en la referencia de los términos tal como son empleados por los expertos. Putnam explica la *invariancia* de la referencia de los términos de género natural apelando a la manera en la que se fija la referencia de los términos de género natural – incluyendo la división del trabajo lingüístico – y tomando en consideración, como ya indicamos en el capítulo anterior, el Principio del Beneficio de la Duda.

Con ayuda de estos factores, cabe sostener que la referencia de un término de género natural determinada por hablantes expertos permanece *inalterada* en el uso que el resto de los hablantes de la comunidad hace del término. Pero por lo que respecta a la invariancia de la referencia del término en su uso por los hablantes de distintas

comunidades científicas es el *Principio del Beneficio de la Duda* el que desempeña el papel principal. El ejemplo que utiliza Putnam (1975d) es el del término “electrón”. Según Putnam, aunque no hay ninguna partícula que hoy cumpla exactamente con la descripción de Bohr, existen partículas que aproximadamente la cumplen, de modo que el Principio del Beneficio de la Duda dicta que tanto Bohr como los restantes expertos que utilizaron y utilizan el término se han referido y se refieren a tales partículas. Putnam estaría obligado entonces a sostener que la propiedad de girar en órbitas estables y determinadas alrededor del núcleo no era en tiempos de Bohr una propiedad esencial de los electrones.

El Principio del Beneficio de la Duda presupone una noción de referencia según la cual la extensión de la relación “referirse a” es un conjunto de pares ordenados de términos y entidades como, por ejemplo, (“electrón”, ϵ), de modo que cualquier hablante que utiliza el término “electrón” y no conoce exactamente su referencia, toma prestada la referencia de expertos y, en última instancia, de Bohr – por ser él el introductor del término – y, de acuerdo con el Principio del Beneficio de la Duda, “electrón” se referiría a la entidad ϵ , sea la que sea, a la que Bohr se refería cuando utilizaba el término. De acuerdo con esta forma de entender la referencia de un término de magnitud física, el término “masa” (y cualquier otro término) se referirá en cualquier contexto e independientemente de quien lo use y de las creencias que quien lo use tenga sobre dicha magnitud, a una magnitud que posee ciertas propiedades “esenciales”, sean o no todas ellas actualmente conocidas, que serán aquellas determinadas por la introducción de dicho término (por hablantes expertos).

Putnam analiza en (1975b) las consecuencias que tendría suponer, como hacen Kuhn y Feyerabend, que (algunos de) los términos utilizados en las teorías científicas no mantienen su referencia constante en un contexto de cambio de teoría. Para ello

recurre nuevamente al ejemplo del electrón, y el problema que se suscita a ese respecto es que si el término “electrón” en la teoría de Bohr no se refiere a la misma partícula a la que actualmente denominamos “electrón”, no se refiere a nada. Obviamente, el mismo tipo de problema se plantearía en relación a la referencia de los términos presentes en teorías actuales con respecto a teorías futuras.

Como ya hemos indicado, según las teorías de Kuhn y de Feyerabend la referencia de los términos científicos es relativa, a saber, relativa a las teorías en las que figuran. La teoría de la referencia de Putnam se opone al relativismo, ya que si la extensión de los términos de género natural está fijada por el mundo, no puede verse afectada por modificaciones en nuestras teorías o, en general, por nuestras creencias; en este sentido no puede haber inconmensurabilidad (referencial) entre teorías diferentes. Ahora bien, por una parte, si la referencia de los términos de género natural está determinada por una comunidad de expertos, distintas comunidades de expertos, con creencias distintas, podrían determinar la extensión de un término de género natural de forma diferente y aquí se abre la puerta para que la referencia que ha sido así determinada sea también diferente.

Por otra parte, si la referencia de un término de género natural viene dada por la relación de identidad entre las entidades que pertenecen a la extensión de dicho término y esta relación de identidad depende de las propiedades estructurales de dichas entidades, para establecer cuáles son estas propiedades es necesario contar con una muestra o un ejemplar paradigmático. Ahora bien, como se alega en Goodman (1978), una muestra ejemplifica (para cada comunidad) sólo algunas de las propiedades que posee aquella *entidad* de la que es una muestra, aunque ésta posea muchas propiedades más – por ejemplo, una muestra de una población nunca tiene el mismo *tamaño* que dicha población –, y distintas comunidades podrán sostener que ejemplifica propiedades

diferentes. Una muestra no ejemplifica *todas* sus propiedades intrínsecas, ya que las características que se ejemplifican varían con las circunstancias y las prácticas adoptadas. De esta forma, dependiendo de las teorías desde las cuales se analice la muestra, es decir, de los problemas que se pretendan resolver en el marco de cada teoría, de los formalismos y aparatos experimentales con que cuenten cada una, se considerarán fundamentales propiedades distintas.

Llegados a este punto, es pertinente traer a colación algunas de las objeciones presentadas contra la teoría de la referencia de Putnam, en concreto, las de autores como Zemach, García Suárez y Ávila Cañamares. Para ello presentaremos algunos aspectos del experimento mental de la Tierra Gemela propuesto por Putnam en (1975c), que para nuestros intereses puede interpretarse como dirigido a refutar la tesis de que las creencias de los usuarios acerca de la referencia de un término – o las descripciones que asocian con un término – determinan su referencia.

Putnam nos pide que imaginemos que en alguna parte del universo hay un planeta distinto de la Tierra al que denomina “Tierra Gemela”, en el que cada habitante de la Tierra tiene un duplicado. Este planeta difiere poco de la Tierra, si bien la diferencia relevante para el experimento mental radica en que en ese planeta el líquido al que sus habitantes denominan “agua”, si bien es macroscópicamente idéntico al líquido que en la Tierra denominamos así, tiene una composición química muy diferente; su composición química no es H_2O , sino que viene dada mediante una fórmula muy complicada que podemos abreviar como “XYZ”. Si un habitante de la Tierra viajara a la Tierra Gemela supondrá inicialmente, dado que macroscópicamente los dos líquidos son indistinguibles, que el término “agua” tiene el mismo significado (y *referencia*) que en la Tierra, pero rechazará dicha suposición en cuanto sepa que la composición química del líquido denominado “agua” en la Tierra Gemela no es H_2O ,

sino XYZ. Putnam extrae de esta primera parte del experimento la siguiente conclusión: la *referencia* del término “agua” no es la misma en la Tierra que en la Tierra Gemela. Su conclusión se basa en el supuesto de que las propiedades “esenciales” de una sustancia vienen dadas por su composición química. Por último, en la segunda parte del experimento Putnam nos propone situarnos en una fecha anterior al año 1750, cuando los habitantes de la Tierra y de la Tierra Gemela no conocían la estructura química de los líquidos a los que denominaban “agua” y, por tanto no sabían que ésta era respectivamente H₂O y XYZ. No obstante, si tomamos en consideración un habitante típico de la Tierra, Óscar₁, y su duplicado en la Tierra Gemela, Óscar₂, aunque estos hablantes asocian con el líquido que denominan “agua” las mismas propiedades – sus propiedades macroscópicas –, mediante el término “agua” se están refiriendo a sustancias distintas. Putnam afirma que la referencia del término “agua” en la Tierra es la misma en 1750 que en la actualidad, aunque entretanto se han modificado nuestras creencias acerca del líquido denominado “agua” – ahora sabemos que su composición química es H₂O – y algo similar ocurre con respecto a la Tierra Gemela.

Conviene comenzar con las objeciones presentadas contra la teoría de la referencia de Putnam en Zemach (1976). En primer lugar, Zemach alega que si la referencia de un término como “agua” queda fijada por la naturaleza de las entidades a las que los hablantes denotan con el término, la tesis de Putnam de que este término tiene distinta extensión en la Tierra y en la Tierra Gemela se torna problemática. Zemach indica que algunos hablantes seguirán denominando correctamente “agua” al líquido de la Tierra Gemela aun después de saber que no posee la misma microestructura que el líquido de la Tierra y que, si bien Putnam podría salvar el problema alegando que el término “agua” así utilizado deja de ser un término de género natural, esta solución transformaría la tesis de Putnam en una *estipulación* acerca de qué

es un término de género natural. En segundo lugar, Zemach critica la posibilidad de que la referencia de los términos de sustancia como “agua” quede determinada por un acto ostensivo inicial²² y que el término “agua” se refiera a aquello, sea lo que fuere, que tenga la misma naturaleza que el ejemplar involucrado en su introducción. Pues aunque la apelación a este proceder solucionaría el problema anterior, queda abierta la posibilidad de que nadie hoy en día tenga conocimiento acerca del ejemplar utilizado en la introducción del término – esto es lo que presumiblemente ocurrirá con muchos de los términos de género natural – y, en tal caso, podría ocurrir que utilizásemos el término “agua” para designar a algo que no lo es en absoluto, por no poseer la misma naturaleza que el líquido con respecto al que se introdujo inicialmente dicho término. Por último, Zemach señala que aceptar la hipótesis de la división del trabajo lingüístico no implica defender la teoría de la referencia de Putnam (véase la sección 2.2.1 del capítulo 2 y la nota 43 de dicho capítulo), ya que tal tesis puede ser aceptada por quienes sostengan que la referencia de un término de género natural viene determinada por las descripciones asociadas por algunos hablantes (los hablantes expertos) con el término o por los usos que hacen de ellos.²³

Por su parte, García Suárez (1997) alega que con su experimento mental de la Tierra Gemela, Putnam se enfrenta al siguiente dilema: o bien el supuesto de que la intensión determina la extensión no es válido o, si se mantiene este supuesto, la teoría de Putnam se convierte en una variante de la teoría semántica tradicional, en concreto, de la semántica fregeana. En el primer caso, si la referencia de términos como “agua” no viene determinada por los conceptos o por las descripciones de los hablantes, ni

²² Dada la indeterminación de cualquier acto de ostensión, éste habrá de venir complementado, explícita o implícitamente, mediante un término general, por lo que dicha introducción del término tendría lugar mediante una descripción demostrativa.

²³ En un sentido similar al que se mencionó anteriormente, Torretti (1990) señala que quien sostenga la hipótesis de la división del trabajo lingüístico de Putnam puede defender la existencia de cambios de referencia; éstos vendrían determinados por las creencias distintas que tengan hablantes expertos pertenecientes a diferentes comunidades científicas.

siquiera por los de los miembros de una comunidad científica, sino que son los géneros naturales mismos los que juegan un papel en tal determinación parece que la intensión no determina la extensión, pero Putnam sólo puede salvar este supuesto porque acepta que el significado de un término de género natural adopta la forma de una secuencia uno de cuyos componentes es la *extensión* – véase la sección 2.2.1. del capítulo 2–, con lo que el supuesto de que la intensión determina la extensión se torna trivialmente verdadero. A este respecto García Suárez afirma que de esta manera Putnam “...(s)ólo ha decretado que la entidad teórico-conjuntista uno de cuyos elementos es la extensión determina la extensión” (1997, p. 129). En el segundo caso, para mantener el supuesto mencionado se podría sostener que la intensión de un término como “agua” viene dada por una cláusula como la siguiente: *Agua es cualquier cosa que sea idéntica en naturaleza a ESTA sustancia (demostrada indéxicamente), sea cual fuere su naturaleza.* Pero la teoría de Putnam admitiría entonces contenidos conceptuales indéxicos y habría de considerarse en este sentido una variante de la semántica fregeana, a no ser que se presentasen argumentos – que Putnam no proporciona – de que tal teoría no puede incorporar dicho tipo de contenidos.

Por último, conviene atender a las consideraciones de Ávila Cañamares, quien alega que la teoría de Putnam tal como está presentada en Putnam (1975c) posee un componente *fregeano* oculto es decir, una apelación tácita al sistema de creencias (o descripciones) del hablante para fijar la extensión de los términos de género natural. Al indicar uno de los supuestos de su experimento mental de la Tierra Gemela, Putnam afirma que en el acto mismo de fijar la extensión del término “agua” existe una relación muestra/género natural: se señala la muestra (un vaso de agua, por ejemplo) y se dice que un líquido es agua si y sólo si está en la relación mismo líquido (mismo_L) con el líquido contenido en ese vaso, a condición de que éste se halle en dicha relación con

aquello a lo que habitualmente se denomina “agua”. Pero entonces la creencia de que el agua es un *liquido* – involucrada en la relación mismo_L – es fundamental para la determinación de la extensión de “agua”. De esta manera las creencias de los hablantes desempeñan un papel importante en la fijación de la extensión del término, por lo que Ávila Cañamares afirma que “si el paso implícito por el sistema de creencias es inevitable para fijar la extensión de un término de clase natural mediante la definición ostensiva, entonces habremos de aceptar la idea fregeana de que la intensión de un término determina su extensión” (2002, p. 74) o, mejor dicho, de que el sentido de un término determina su referencia.

Volviendo a nuestro tema principal en esta sección, conviene señalar que, dependiendo de la versión de la teoría causal que se defienda, se podrán adoptar distintas posiciones respecto del comportamiento de la referencia de un término de género natural y, por tanto, de un término de magnitud física en un contexto de cambio teórico. En este sentido es pertinente indicar que quien sostenga que la referencia de los términos de género natural es introducida en un bautismo inicial y que desde entonces queda fijada y permanece constante – no permitiéndose modificaciones en su referencia a través de su transmisión mediante cadenas causales –, la referencia de los términos de género natural no se verá modificada. Pero como señala Fernández Moreno en (1998) y en (2006), no toda versión de la teoría causal de la referencia necesita comprometerse con la inmutabilidad de la referencia. Defender, por ejemplo, una versión no-bautismal de la teoría causal, según la cual la referencia de un término de género natural no queda fijada sólo por el bautismo o evento introductorio inicial, sino también por posteriores usos que hablantes expertos hacen del término, no excluye que el término pueda estar sujeto a cambios de referencia. Putnam sostiene que la extensión de los términos de género natural está fijada por el mundo y no puede verse afectada por modificaciones en

nuestras creencias; ahora bien, las entidades a las que se recurre para determinar la referencia de un término de género natural por parte de expertos pertenecientes a distintos paradigmas pueden ser diferentes y asimismo las concepciones (metacientíficas) acerca de la noción de identidad de género sostenidas por los expertos pertenecientes a distintos paradigmas pueden ser diferentes. De esta manera, distintos hablantes expertos podrán utilizar distintas entidades para introducir un término y considerar como propiedades fundamentales – es decir, como aquellas que determinan la relación de identidad de género – distintas propiedades. Así, resulta posible que un cambio de paradigma traiga consigo cambios de referencia.

3. Esquemas

De acuerdo con la aplicación de las teorías de la referencia a distintos términos de magnitudes físicas en la sección 4 del capítulo 2, dependiendo de los mecanismos que se supongan para la determinación y transmisión de la referencia, tendríamos que analizar distintas cuestiones relacionadas con esos mecanismos para poder sostener que la referencia de dichos términos ha variado o permanecido constante.

No obstante, antes de continuar conviene introducir dos clarificaciones metodológicas relevantes para lo siguiente. En primer lugar, de aquí en adelante cuando se aluda a “la teoría descriptiva de la referencia” se estará tomando en consideración una teoría de acuerdo con la cual la referencia de un término de magnitud física viene determinada por una serie de descripciones o propiedades que los hablantes expertos asocian con dicho término. Es decir, una versión de la teoría descriptiva que incluya el concepto de “hablante experto” (véase nota 43 del capítulo segundo), presentado inicialmente en el marco de la teoría causal de Putnam. Esto permite dejar de lado los

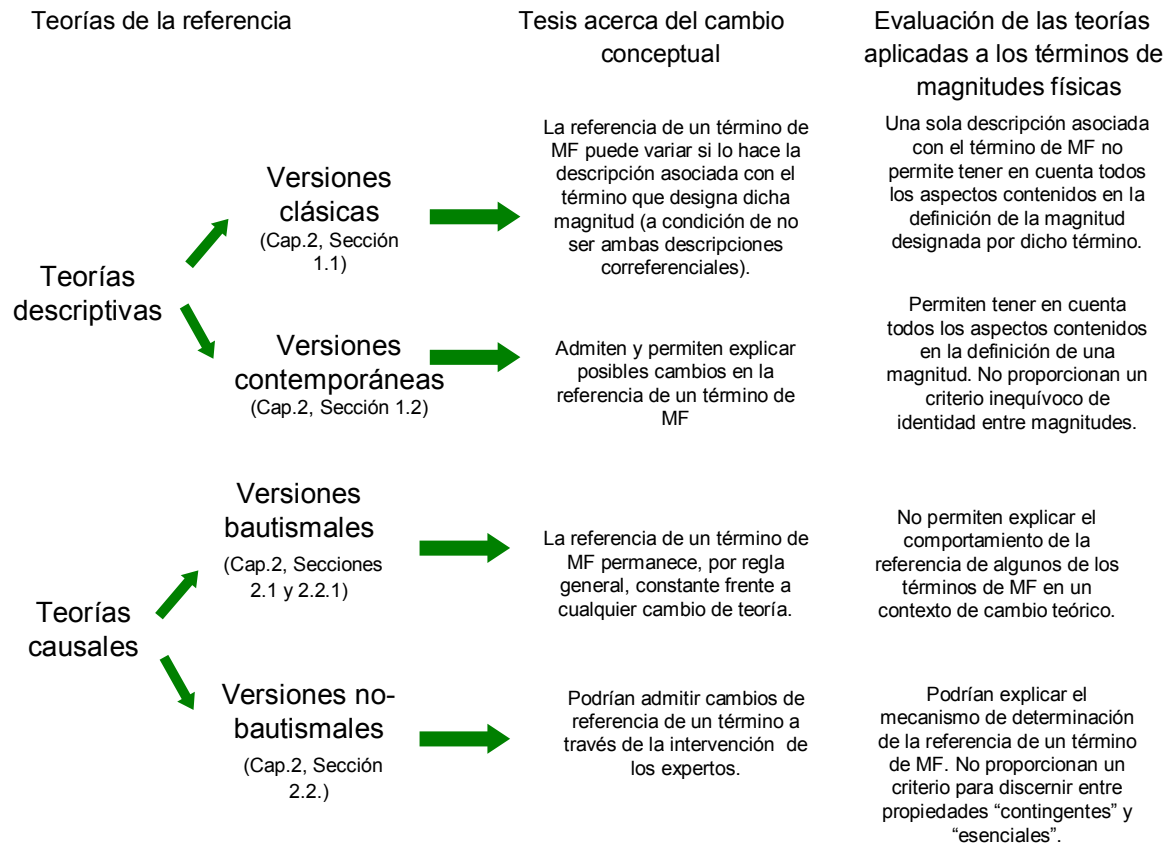
errores que pueda cometer un hablante no-experto al emplear términos tan específicos como lo son los términos de magnitudes físicas.

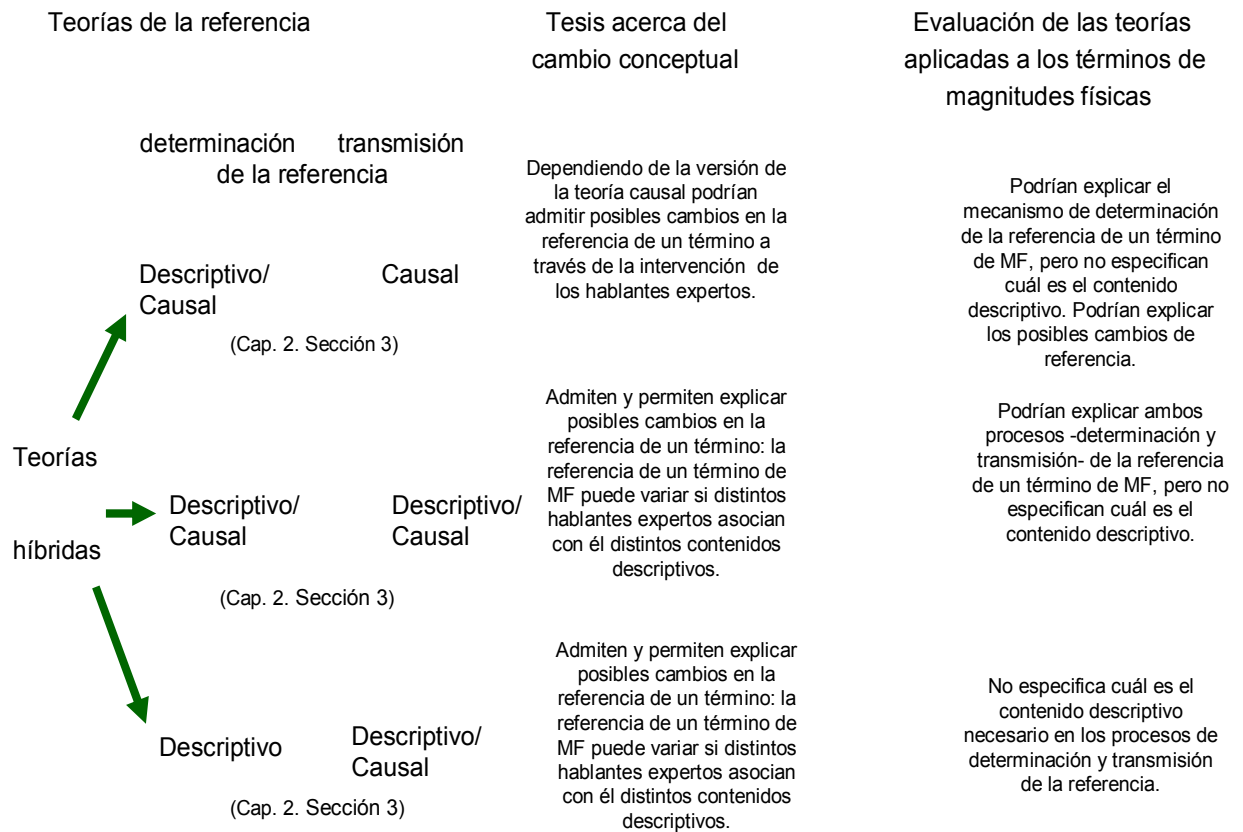
En segundo lugar, por “teoría causal de la referencia” se entenderá aquella versión que, dejando de lado la idea de bautismo inicial,²⁴ supone que la referencia de un término de magnitud física (y, en general, de un término de género natural) viene determinada por las entidades del género involucradas en la introducción del término por los miembros de una comunidad científica – dicha introducción no necesita coincidir con su “bautismo inicial” – y por la relación de identidad de dicho género, es decir, por la posesión por parte de estas entidades de ciertas propiedades consideradas como “esenciales” en el marco de cada teoría física. Ahora bien, puesto que vamos a considerar que la teoría causal asume la noción de experto, como ya indicamos anteriormente esto nos permite suponer que esta versión de la teoría causal admite la posibilidad de que, a través de cambios en la elección por parte de los expertos de los ejemplares paradigmáticos involucrados en la introducción de un término de género natural y/o de cambios en sus concepciones acerca de la noción de identidad de género, tengan lugar cambios de referencia.

Tras estas aclaraciones, y retomando el análisis del comportamiento de la referencia de los términos magnitudes físicas, cabe señalar que, independientemente de que asumamos una teoría descriptiva o una teoría causal de la referencia, habremos de determinar cuáles son los aspectos de una magnitud acerca de los que han de versar las descripciones o propiedades que determinan la referencia de un término de magnitud y que permiten dar cuenta de la invariancia o del cambio de referencia del término en un

²⁴ Aunque esta idea sea fundamental en la versión de la teoría causal de Kripke, suponer que la referencia de cualquiera de los términos de magnitud física queda fijada en un bautismo inicial dificulta la explicación de los cambios en la referencia de algunos términos de magnitudes físicas, a pesar de que, como hemos mencionado en la sección 2.3 del capítulo segundo, Kripke esboza una posible explicación de ciertos cambios de referencia.

contexto de cambio teórico. Tal determinación proporcionaría al mismo tiempo un criterio de identidad entre magnitudes.





4. El comportamiento de la referencia de los términos “masa”, “espín”, “ímpetu” y “velocidad” en un contexto de cambio teórico

En lo siguiente vamos a sostener las siguientes tesis:

- a) De acuerdo con lo ya indicado en este trabajo, la referencia del término “masa” no se mantiene constante en el cambio de contexto de la mecánica clásica al contexto de la relatividad especial y de la relatividad general.
- b) El término “ímpetu” sólo tiene referencia en el contexto de la física medieval. El término “espín” sólo tiene referencia en el contexto de la física moderna.
- c) La referencia del término “velocidad” permanece constante en el cambio de un contexto clásico a un contexto cuántico.

Llegados a este punto y antes de analizar los mapas de relaciones entre distintas magnitudes en diferentes contextos teóricos, es necesario hacer una observación

preliminar, a saber, no es nuestra intención establecer una *ontología* en el sentido de determinar qué es aquello que en la realidad o en el mundo físico existe (partículas elementales e interacciones entre ellas), sino tomar como dada la ontología que a cada teoría física le subyace. No vamos a entrar a debatir qué se entiende por “existir”, aunque asumiremos una postura similar al “idealismo relativista” de Kuhn (véase nota 17 del presente capítulo), al menos en el siguiente sentido: sostendremos que siempre que una teoría física necesite una magnitud para describir o explicar un fenómeno o proceso, esa magnitud física “existe” al menos localmente, en el marco de esa teoría, y aunque teorías posteriores no la utilicen.²⁵ Pero si bien Kuhn afirma que el mundo en el que *vive* un científico depende del paradigma que dicho científico acepta, nosotros sostendremos que lo que depende del paradigma es el esquema conceptual que el científico utiliza para describir el mundo físico. Es decir, no vamos a discutir la cuestión de si hay o no un mundo “real” independientemente de cómo podamos llegar a conocerlo. En lo que sigue la referencia de un término seguirá considerándose como la relación que vincula a éste con el *mundo* y por “mundo” se entenderá aquella estructura de interpretación de cada teoría, es decir, el conjunto de objetos/entidades, fenómenos y propiedades físicas que cada teoría física postula, independientemente de que se suponga a estas entidades como presentes en el mundo material o como meros constructos teóricos necesarios para la explicación de determinados fenómenos. Muchas veces, en el marco de una teoría física, cuando no cierra un balance de energía o de masa, se propone la existencia de una partícula que permite explicar esa diferencia. Es decir, siempre podrá ser tema de discusión si se ha descubierto cómo es el mundo o si se ha creado o construido una explicación que luego se transforma en la construcción de una *realidad*.

²⁵ Ampliaremos nuestra posición a este respecto en la sección 5.1 del presente capítulo.

4.2. Análisis de los mapas de relaciones de magnitudes en diferentes contextos teóricos

La red de relaciones que cada magnitud conforma con las restantes en un determinado contexto teórico y, por tanto, la red de relaciones entre los términos que designan dichas magnitudes, proporciona una herramienta para analizar el comportamiento de la referencia de un término de magnitud física que consideramos más adecuada que la basada en las descripciones o propiedades (identificadoras) a las que se alude en la teoría descriptiva o en las propiedades *esenciales*, a las que se alude en la teoría causal.

Se presentará en lo que sigue una serie de esquemas que intentarán servir de punto de partida para la introducción de nuestra tesis acerca de lo que sucede con la referencia de los términos de magnitudes físicas en un contexto de cambio teórico. En cada uno de los esquemas presentados más abajo, correspondientes cada uno de ellos a una determinada teoría física, se intenta representar la relación existente entre los aspectos ontológico, experimental, formal o matemático y contextual a través de los cuales es posible definir cada magnitud. Obviamente, cada esquema contiene sólo algunas de las magnitudes definidas en cada teoría – las que se han supuesto más relevantes –, por lo que el análisis no es completo. El recuadro mayor representa la estructura o contenedor que es constituido por las magnitudes espacio y tiempo, y también indica el tipo de métrica que tal estructura implica en el contexto de cada teoría física. La flecha que conecta al exterior con la mencionada estructura muestra el tipo de interacción que cada contexto supone entre objeto/fenómeno a observar/medir y el aparato experimental. El rectángulo dentro del cual se encuentra la magnitud a analizar encierra lo que podía denominarse “definición ontológica” – en sentido estricto, el aspecto ontológico de la definición de una magnitud, de acuerdo con la sección 3.1. del capítulo 1, –; las más de las veces esta definición involucra otras magnitudes e implica

un tipo específico de relación matemática entre ellas. Mediante círculos se representan otras de las magnitudes definidas en cada teoría especificándose, cuando es posible, la relación existente con la magnitud a analizar y la expresión matemática de dicha relación. Por último, con línea de puntos se muestran aquellas magnitudes que no están definidas en el contexto que se está presentando.

A través de estos esquemas o, más específicamente, de las relaciones entre magnitudes consignadas en ellos, podrá analizarse si las teorías que heredan un término de magnitud sólo han añadido conocimiento coherente con la teoría que introdujo el término o si, por el contrario, introducen relaciones que resultan ser incompatibles con las atribuidas inicialmente.

4.2.1. El término “masa”

Se relacionará a la magnitud masa sólo con las magnitudes espacio, tiempo, velocidad, aceleración, fuerza, energía, cantidad de movimiento y masa en reposo, suponiendo, por cuestiones prácticas, que, con excepción de la magnitud a analizar, las restantes están definidas en los contextos de la mecánica clásica y de la relatividad especial aproximadamente de la misma forma. Pero cabe señalar que esta suposición no puede sostenerse cuando se trata del contexto de la relatividad general, ya que si bien muchas de las magnitudes utilizadas por esta teoría conservan el nombre, están definidas de forma distinta a la que figura en la mecánica newtoniana y, por tanto, las relaciones que establecen con la estructura espacio-tiempo, así como las que se establecen entre ellas, son completamente distintas. A partir de la observación de la red de relaciones que se establece entre la magnitud masa y las restantes, es posible señalar lo siguiente.

Relación entre la masa y el espacio-tiempo: si bien la estructura de espacio y tiempo absolutos es reemplazada, en el paso de la teoría clásica a la de la relatividad especial, por otra formada por un espacio-tiempo relativo, la relación que establece la masa con dicha estructura varía sólo en cuanto a la métrica que ésta implica, pero la masa de un objeto sigue en ambos casos sin alterar esa relación. No obstante, dicha relación sí se modifica en el paso a la teoría de la relatividad general, de acuerdo con la cual la masa de un objeto deforma el espacio-tiempo. La modificación que supone la presencia de un cuerpo con masa en la estructura espacio-tiempo de la relatividad general implica a su vez una importante alteración²⁶ en la relación objeto a ser medido-montaje experimental de medición, ya que la masa del montaje experimental altera dicha estructura. Como puede verse en el esquema correspondiente, la masa forma parte ahora de una estructura que, como se ha mencionado en el capítulo 1, suele denominarse “estructura de la realidad”, junto con el espacio y el tiempo, y, por tanto, las relaciones más relevantes que establece con otras magnitudes se dan a través de las ecuaciones de Einstein.

Relación de la masa con la velocidad: tal como ya se ha señalado a lo largo de este escrito, la relación entre las magnitudes masa y velocidad varía notablemente en el paso de la mecánica clásica a la relatividad especial. La independencia que se supone entre la masa de un objeto y su estado de movimiento en el contexto de la mecánica clásica deja de ser válida en el marco de la relatividad especial. La masa deja de ser una magnitud absoluta y dependiendo de la velocidad relativa del observador se pueden obtener distintos resultados al medirla. De esta forma esta variación escapa al aspecto

²⁶ Esta alteración puede pensarse como simplemente teórica, ya que a efectos experimentales hay que tener en cuenta que, en general, la deformación del espacio es despreciable para objetos con poca masa (mucho menores que, por ejemplo, los planetas) y entonces la masa se determina por otros métodos (equivalencia masa-energía). De todas maneras existe un cambio experimental significativo, ya que en un contexto se mide una cierta cantidad de materia y en el otro una cierta cantidad de energía.

meramente matemático y trae aparejada una variación experimental importante y también una variación en el aspecto ontológico de la definición de la magnitud.

En el contexto de la relatividad general encontramos una modificación aún mayor. Esta teoría asigna a todo cuerpo en el seno de un campo gravitatorio una determinada energía cinética,²⁷ lo que equivale a asignarle una determinada velocidad. Pero puesto que toda velocidad produce una disminución del ritmo en que transcurre el tiempo,²⁸ en el seno de un campo gravitatorio también se frenará el tiempo. Es decir, las magnitudes masa, velocidad y espacio-tiempo están unidas de modo tal que la variación de una de ellas implica modificaciones en las otras.

Relaciones de la masa con la aceleración y la fuerza: las relaciones que se establecen entre la masa, la aceleración y la fuerza en la mecánica clásica y en la relatividad especial son similares, más allá de que la métrica en cada teoría implique la necesidad de herramientas matemáticas distintas para su descripción.²⁹ Pero cabe señalar que la relatividad general supone unas relaciones notablemente distintas. De acuerdo con esta teoría, la interacción gravitatoria es solamente una deformación de la geometría del espacio-tiempo producida por la masa de los cuerpos. Así, lo que en mecánica clásica se denominaba “fuerza gravitatoria” es para la relatividad general sólo un efecto asociado a que un observador en reposo respecto de la fuente del campo no es un observador inercial y, por tanto, mide fuerzas ficticias al tratar de aplicar el equivalente relativista de las leyes de Newton.

Respecto de la relación masa/masa en reposo cabe señalar que la magnitud “masa en reposo” no está definida en la mecánica clásica, ya que no tiene ningún

²⁷ Esta energía cinética atribuida es igual a la energía potencial que tendría a causa del campo gravitatorio. De esta forma la velocidad asignada es la de escape de un campo gravitatorio, con la que un cuerpo en órbita perdería su órbita elíptica para pasar a una órbita parabólica.

²⁸ Esta disminución viene dada por la relación entre el tiempo y la velocidad $t' = t\sqrt{1 - v^2/c^2}$

²⁹ Véanse las secciones 2.2.1. y 2.2.3. del capítulo 1. La fuerza y la aceleración están representadas en el primer caso como vectores y en el segundo como tensores.

sentido diferenciarla de la masa en movimiento, pues en este contexto no se supone a la masa de un cuerpo dependiente del estado de movimiento del mismo.

Relación entre la masa y la energía: la equivalencia entre las magnitudes masa y energía propia de la formulación de la relatividad especial y la relatividad general hacen que el aspecto ontológico de la definición de la magnitud masa varíe con el paso de la mecánica clásica a las teorías de la relatividad. Lo que en el contexto clásico eran dos magnitudes diferenciadas se transforma en una única magnitud. Esta transformación, además de cambiar la definición ontológica de la magnitud masa, implica notables cambios en el aspecto experimental de la definición de dicha magnitud.

Relación entre la masa y la cantidad de movimiento: si bien la relación de la masa con la cantidad de movimiento puede expresarse siempre de acuerdo con la ecuación de la página 38 del capítulo 1, en el contexto de la relatividad especial hay dos cuestiones a tener en cuenta. Por una parte, la cantidad de movimiento resulta ser, en el contexto de la física moderna, una propiedad de cualquier entidad física, con o sin masa, necesaria para describir las interacciones. Así las teorías modernas consideran que no sólo los cuerpos masivos poseen cantidad de movimiento, sino que ésta también resulta ser un atributo de, por ejemplo, los campos y los fotones. La segunda cuestión a tener en cuenta es que, por ser la masa en el contexto de la relatividad especial una magnitud equivalente a la energía, la cantidad de movimiento puede expresarse, por ejemplo, en el caso de un fotón, como $p = E/c$ o, lo que es equivalente en el caso de la MQ, $p = h\nu/c$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia del fotón. Es decir, las relaciones que unen a la cantidad de movimiento en la mecánica clásica y en la relatividad especial están mediadas por magnitudes distintas y en el contexto de la mecánica cuántica la relación matemática puede incluir la constante de Planck, constante que carece de sentido en el contexto de la mecánica cuántica y en la relatividad especial.

Puede observarse entonces que en los contextos de la mecánica clásica, la relatividad especial y la relatividad general las relaciones entre la magnitud masa y algunas de las restantes magnitudes definidas en cada uno de las mencionadas teorías varían radicalmente.

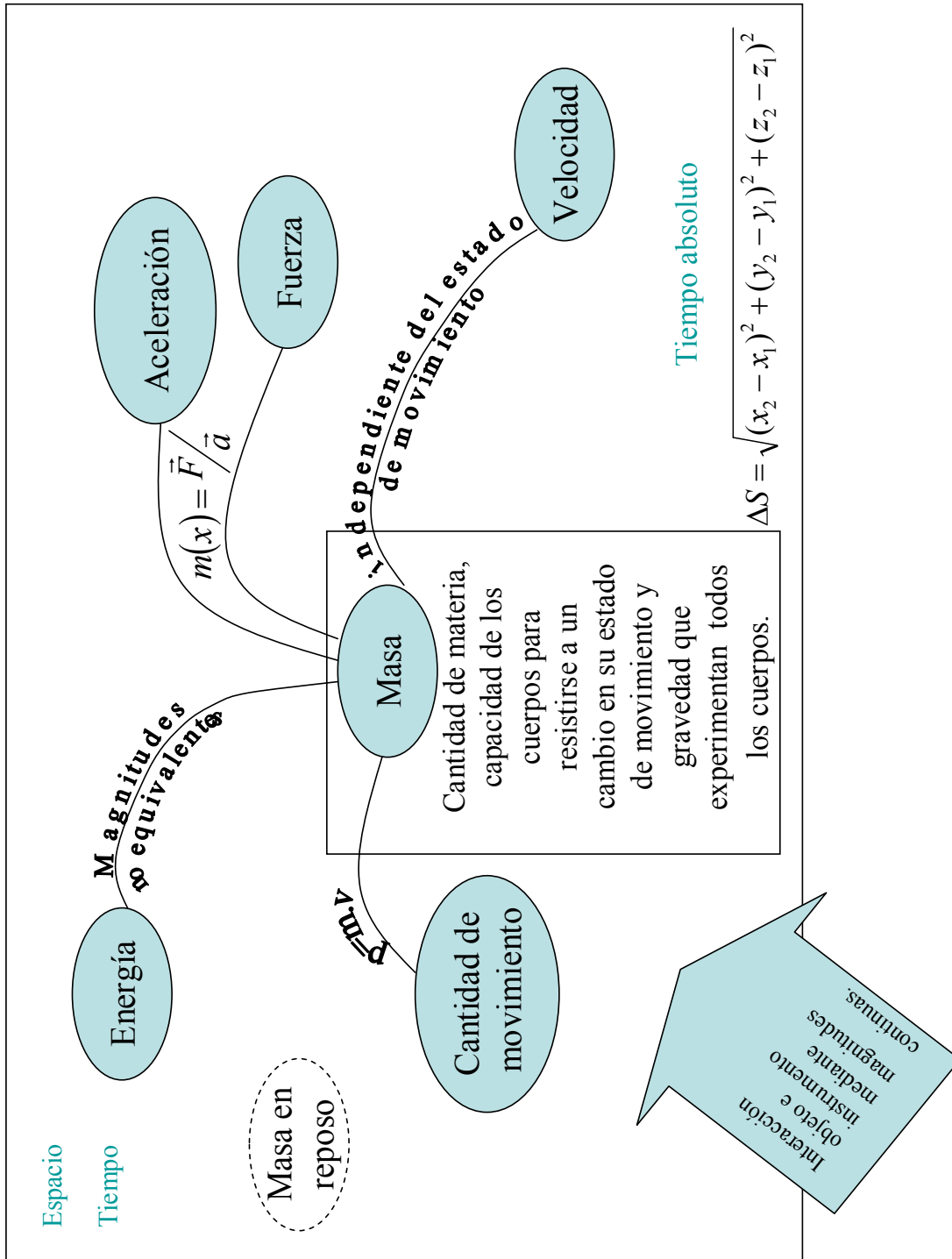


Figura 3.6: Mecánica clásica

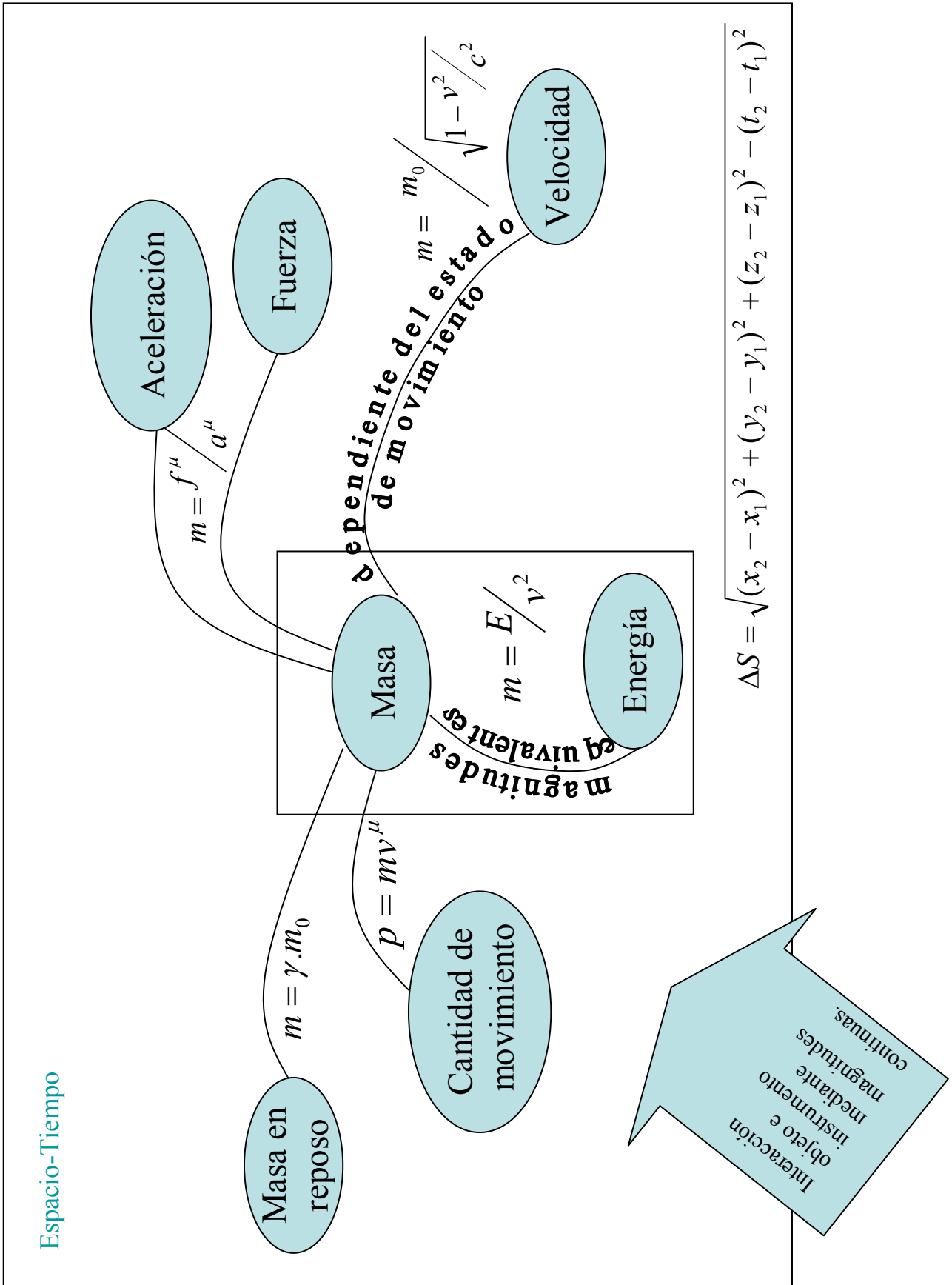


Figura 3.7: Relatividad especial

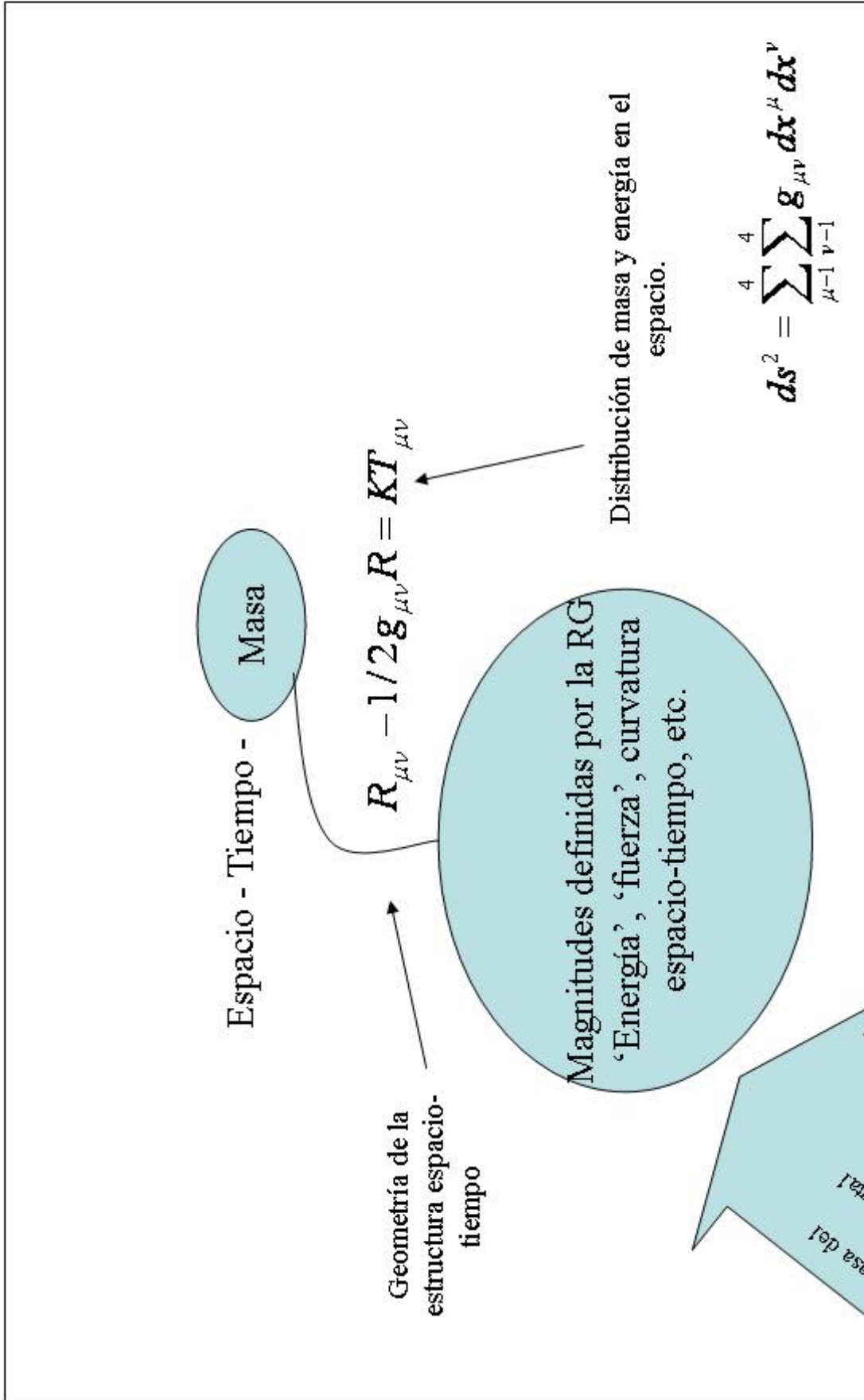


Figura 3.8: Relatividad general

4.2.2 El término “espín”

El término de magnitud “espín” no formaba parte del discurso de las teorías anteriores a la mecánica cuántica y, como se ha señalado, sólo algunos libros de texto de física – véase notas 22 y 23 del capítulo 1 – utilizan el término fuera de ese contexto. Es posible alegar entonces que la referencia del término debe determinarse solamente a partir del conocimiento que de la magnitud espín aporta dicha teoría. Esta magnitud, tal como es concebida en la mecánica cuántica, no tiene ninguna relación con otras magnitudes en el marco de las teorías anteriores. Pero si dado el uso de este término en algunos libros de texto aplicado a un contexto clásico surgiera la duda de si se trata de la misma magnitud, basta con observar que todos y cada uno de los aspectos relevantes en la definición de una magnitud se ven alterados si se comparan los contextos clásico y cuántico. El espín clásico sería la suma total del momento angular orbital; se trata de una magnitud continua, cuyo valor puede variar en función de la velocidad de rotación del cuerpo alrededor de un eje, puede ser descrita a través del formalismo matemático clásico y ser medida de forma tal que el proceso de medición no la afecta. Por el contrario, el espín cuántico es una propiedad intrínseca de las partículas elementales, es decir, su valor es independiente de la dirección, es único para cada tipo de partícula elemental, está cuantizado y es un múltiplo entero de $\frac{\hbar}{2}$. Al realizarse una medición del espín en diferentes direcciones, sólo existen dos posibles valores iguales y de signo contrario, que son sus posibles proyecciones sobre una dirección predeterminada. El espín es una magnitud discreta cuya descripción requiere un formalismo matemático basado en funciones de ondas y operadores y de un contexto experimental regido por las relaciones de incerteza de Heisenberg.

Las consideraciones anteriores pueden reflejarse en los siguientes cuadros:

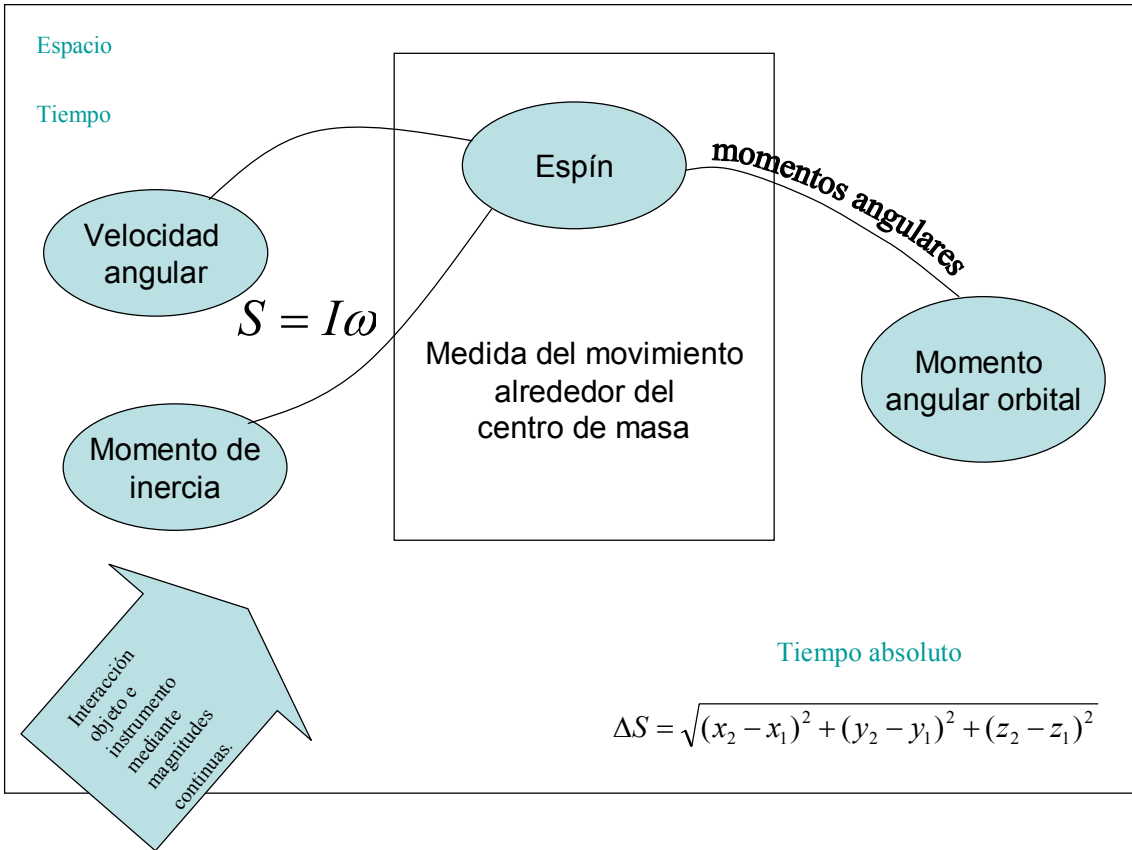


Figura 3.9: Mecánica clásica

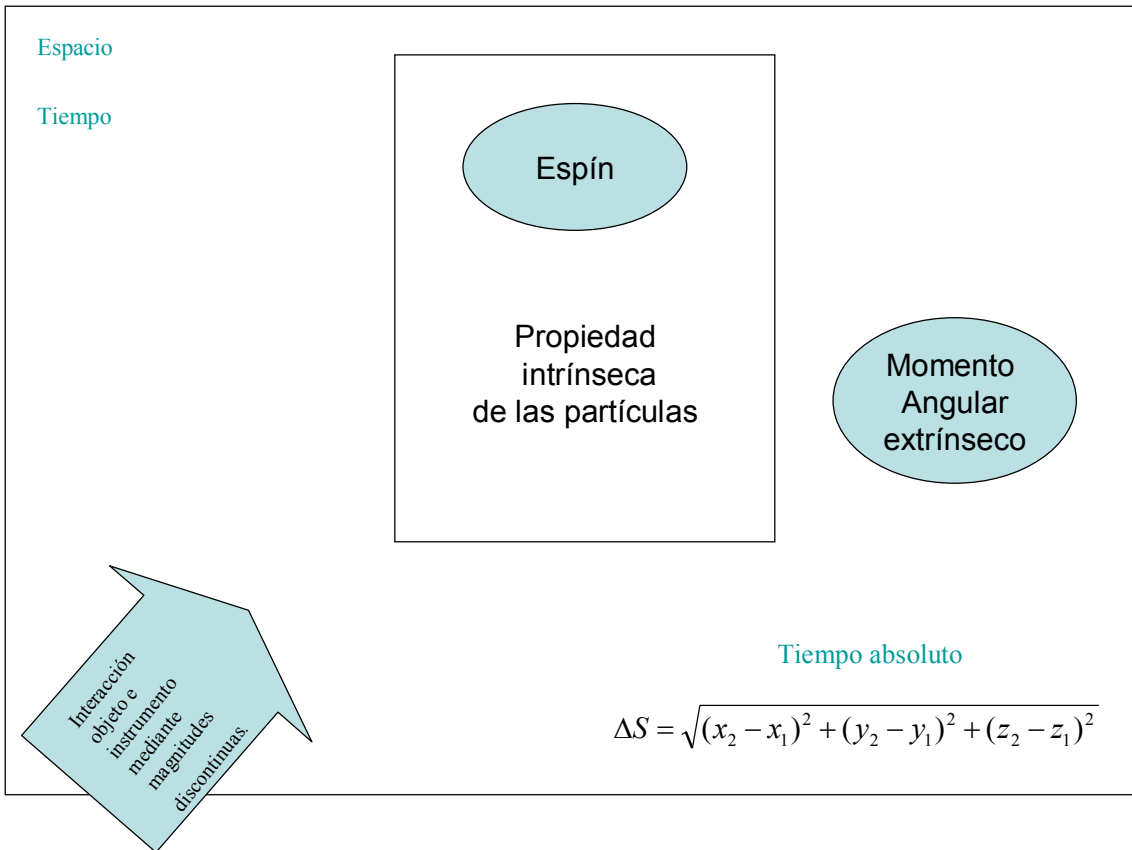


Figura 3.10: Mecánica cuántica

Cabe mencionar una última característica muy relevante y llamativa del espín en el marco del formalismo cuántico, presentado en el apéndice al capítulo 1 de este trabajo, que muestra la imposibilidad de similitud con alguna magnitud clásica. Si bien de acuerdo con la mecánica clásica las propiedades y magnitudes de los objetos están bien definidas antes de que las observemos, este resultado de nuestra experiencia con objetos macroscópicos puede no ser universalmente válido. De acuerdo con la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, el valor de una componente de espín se conoce sólo si se mide, sin que pueda discernirse si dicho valor estaba predefinido o no.³⁰

De acuerdo con todo lo señalado sobre esta magnitud, cabe considerar que el uso del término “espín” fuera del contexto de la mecánica cuántica es un simple abuso de lenguaje que proviene de la utilidad de la analogía entre dos movimientos (véase nota 22 del capítulo 1). En este caso los cuadros deberían ser similares a los que se presentan a continuación para el término “ímpetu”, ya que la magnitud espín debería aparecer con línea punteada en el contexto de la mecánica clásica y, en su lugar, debería aparecer la magnitud momento angular total.

4.2.3. El término “ímpetu”

Fuera del contexto de la teoría medieval del ímpetu, esta magnitud física ya no es utilizada por ninguna otra teoría, es decir, el término “ímpetu” actualmente no pertenece al lenguaje de ninguna teoría física en vigor. A este respecto cabe alegar que, a la luz de las teorías físicas actuales, el término “ímpetu” carece de referencia – véase sección 4.2.

³⁰ En el marco de las teorías de Variables Ocultas se supone la existencia de una realidad externa, independiente de los procesos de observación, por lo que se sostiene que el proceso de medición descubre valores preexistentes.

–, es decir, dicho término no designa ninguna magnitud que actualmente esté siendo utilizada por teoría alguna. Pero si se quiere saber qué era aquella *magnitud* a la que se nombraba con el término “ímpetu” en las teorías medievales, habría que analizar las relaciones entre la magnitud en cuestión y las restantes magnitudes utilizadas por dichas teorías. Ahora bien, puesto que dicha magnitud no forma parte de la ontología de ninguna teoría física actual, no hay ninguna teoría actualmente vigente en el marco de la cual la magnitud expresada por el término “ímpetu” posea alguna relación con otras magnitudes, y con respecto a tal supuesta entidad ni puede definirse ningún tipo de interacción experimental, ni relación matemática, para observarla, medirla o relacionarla con otras magnitudes.

Los análisis de los mapas de relaciones que las magnitudes espín e ímpetu tienen con otras en distintos contextos teóricos son similares, por cuando dichas magnitudes aparecen en uno de los contextos y no en el otro. De esta manera en relación con el comportamiento de los términos “ímpetu” y “espín” en un contexto de cambio de teoría, resulta innecesario comparar completamente los distintos aspectos de las definiciones y es suficiente señalar que en alguno de los contextos no se utiliza el término. Pero cabe entonces la pregunta acerca de cómo podrá determinarse la referencia de términos que presentan este comportamiento. Esta cuestión será examinada en el capítulo 4.

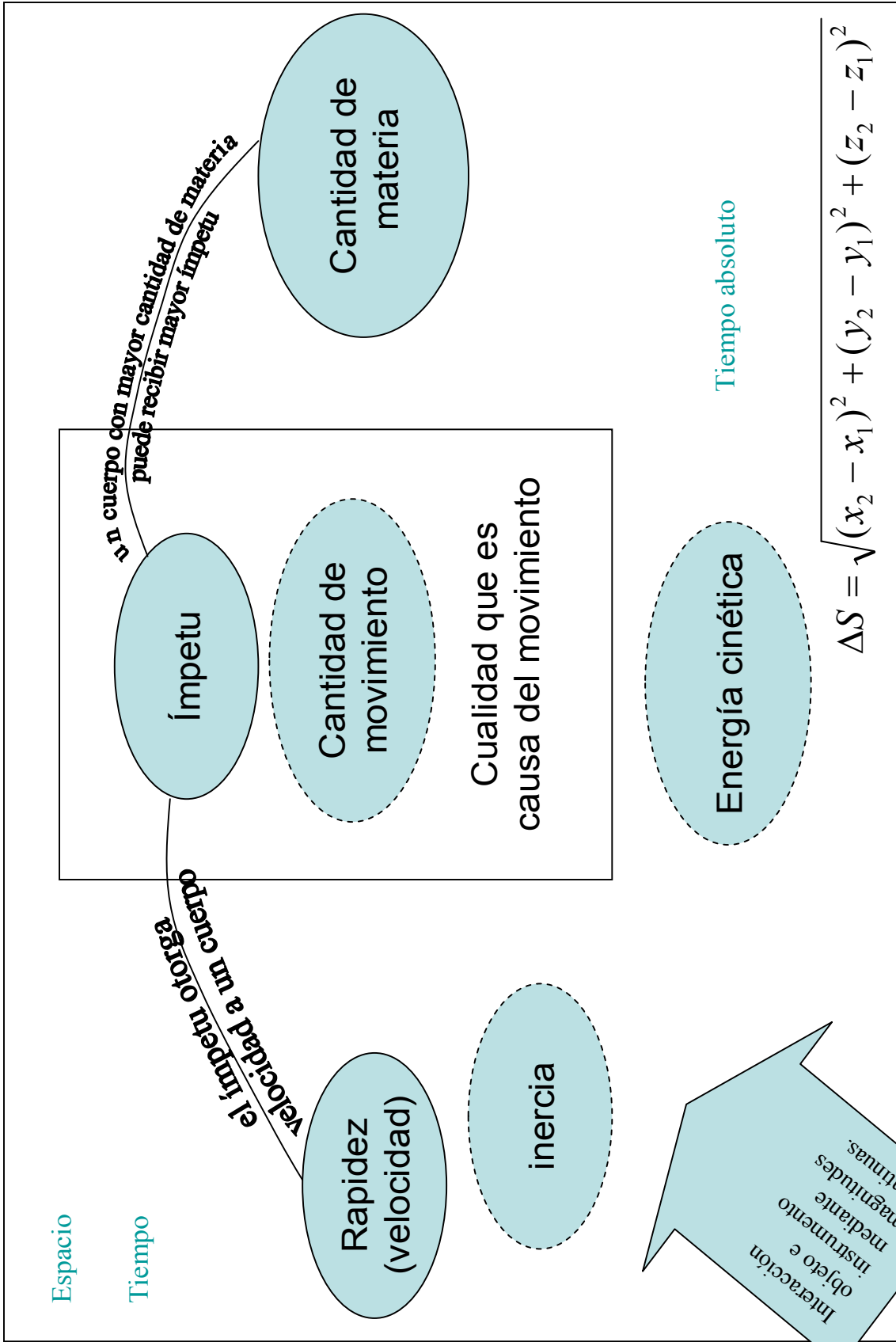


Figura 3.11: Teoría medieval del ímpetu

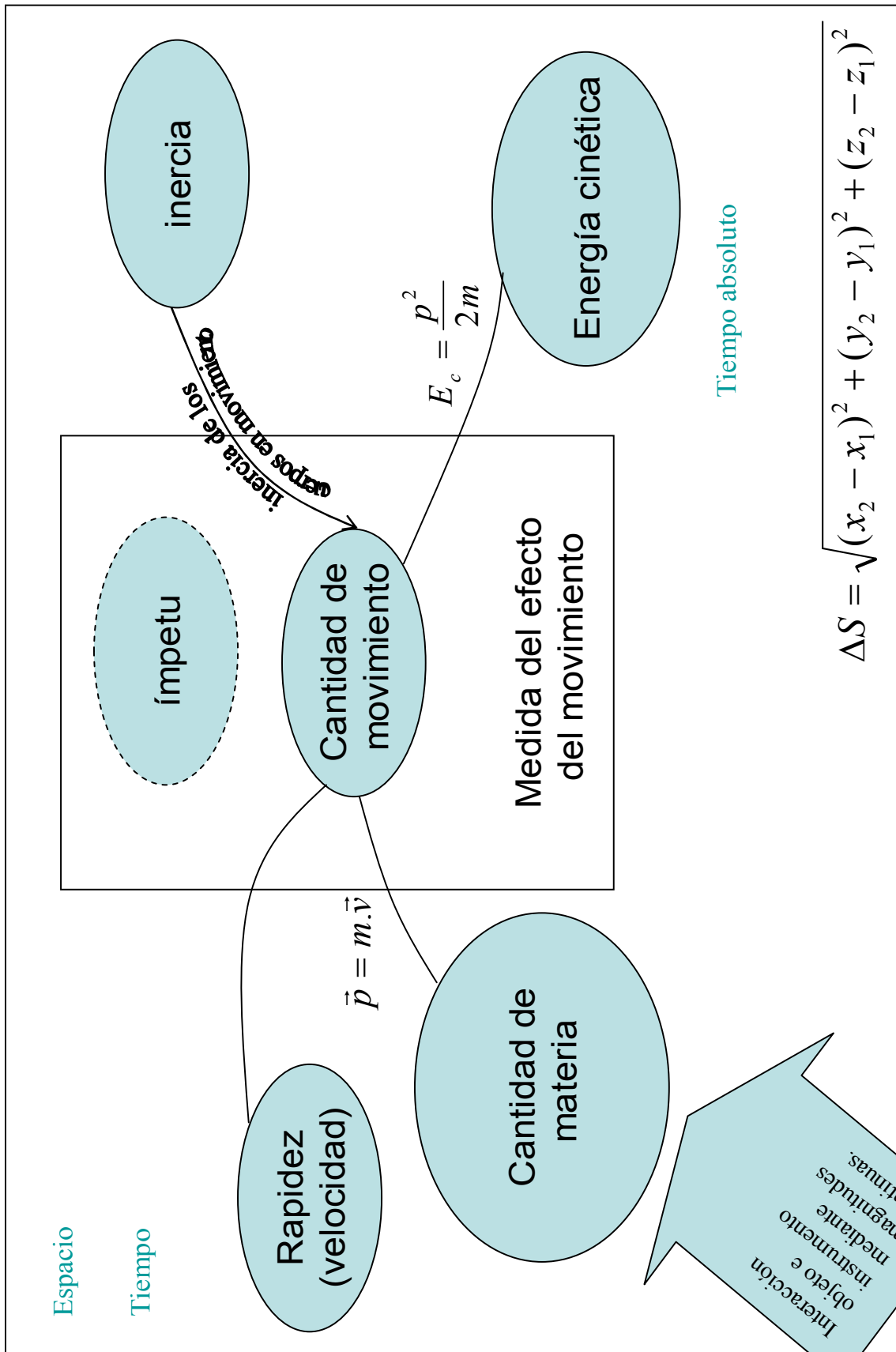


Figura 3.12: Mecánica clásica

4.2.4. El término “velocidad”

A continuación atenderemos a las relaciones de la velocidad en los contextos de la mecánica clásica y la mecánica cuántica (no-relativista) con las magnitudes espacio, tiempo, aceleración, cantidad de movimiento, energía y masa.

Relación entre la velocidad, el espacio y tiempo: la magnitud velocidad en ambos contextos puede ser definida como una cierta relación entre las magnitudes espacio y tiempo. Es decir, aunque la discontinuidad que supone la mecánica cuántica implique observar y medir la velocidad con la que se mueve un objeto asumiendo que no puede ser medida (ni siquiera teóricamente) con precisión absoluta, aquella propiedad del objeto que va a medirse es, al igual que en el contexto de la mecánica clásica, una relación entre el espacio y el tiempo. No estamos aquí frente a una situación similar a aquella en la que se observa y se mide la masa de un objeto en un contexto clásico y uno relativista. La gran diferencia entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica en la observación y medida de la velocidad de un cuerpo o partícula está asociada a los distintos márgenes de incerteza que cada teoría atribuye al proceso de medición; en el primer contexto, dado por el aparato experimental y en el segundo, limitado por las relaciones de Heisenberg. Pero al medir la masa en mecánica clásica y en mecánica cuántica se está en un caso midiendo la cantidad de materia que tiene un cuerpo, la resistencia de un objeto a variar su estado de movimiento o la capacidad de atraer a otros cuerpos y, en el otro, una cierta energía; es decir, hay una diferencia en la definición de la magnitud que se está midiendo que excede el aspecto puramente experimental.

Como se ha explicado en el capítulo 1, si bien las magnitudes espacio y tiempo tienen un tratamiento un tanto distinto en mecánica clásica y en mecánica cuántica, la

estructura que ellas forman y las métricas que implican son las mismas. La geometría en ambos contextos es euclidiana.

Relación entre la velocidad y la aceleración: nuevamente en el caso de estas dos magnitudes la relación sigue siendo en ambos contextos similar. Es decir, en ambos contextos la aceleración está definida como una y la misma relación entre la velocidad y el tiempo independientemente de los distintos tratamientos experimentales que puedan ser necesarios para medirla, así como del tipo de coordenadas que se utilicen para representarla.

Relación de la velocidad con la energía y la cantidad de movimiento: la velocidad con la que se mueve un cuerpo o una partícula determina en parte el valor de la energía cinética que la misma posee. Tanto en el marco de la mecánica clásica como en el de la mecánica cuántica todo cuerpo en movimiento, es decir, con una determinada velocidad, posee también una determinada energía cinética, más allá de que las expresiones matemáticas que relacionan a la velocidad con la energía en el marco de cada teoría varían. La energía cinética de un objeto puede calcularse de acuerdo con diferentes sistemas o ecuaciones y la elección de la teoría más conveniente para desarrollar el cálculo viene determinada por la velocidad del objeto y de su tamaño. Así si el objeto se mueve a una velocidad despreciable respecto de la velocidad de la luz, la mecánica clásica será la teoría adecuada para los cálculos; si la velocidad es cercana a la velocidad de la luz, la teoría de la relatividad empieza a mostrar diferencias significativas en el resultado, y si el tamaño del objeto es de nivel subatómico, la mecánica cuántica es más apropiada. Pero, como se ha dicho, en cualquier caso sigue siendo válido que cualquier cuerpo o partícula que se mueve con cierta velocidad posee una energía cinética independientemente de que posea o no masa. De manera análoga, todo cuerpo o partícula que está en movimiento posee una cierta cantidad de

movimiento independientemente de cómo se represente la relación existente entre esta magnitud y la velocidad en las distintas teorías.

Relación entre la velocidad y la masa: la magnitud masa en el contexto de la mecánica cuántica conserva la definición ontológica clásica en tanto cantidad de materia, capacidad de los cuerpos para resistirse a un cambio en su estado de movimiento o propiedad de los cuerpos en virtud de la cual se atraen. A diferencia de lo que sucede con esta relación en el cambio entre un contexto clásico y uno relativista, la mecánica cuántica concibe la masa de un objeto como independiente del estado de movimiento del mismo, por lo que la relación clásica entre las magnitudes velocidad y masa no se ve alterada.

En el caso de la velocidad, si bien puede observarse que con el cambio de teoría aparece una importante variación respecto del tipo de interacción supuesta entre el objeto a medir y del aparato experimental, el aspecto que hemos denominado “ontológico” de la definición de la magnitud permanece inalterado, así como las relaciones con otras de las magnitudes definidas en el contexto de las dos teorías analizadas. Cabe aclarar que si bien las relaciones entre las magnitudes analizadas no se ven alteradas, si están representadas en cada contexto a través de herramientas matemáticas distintas.

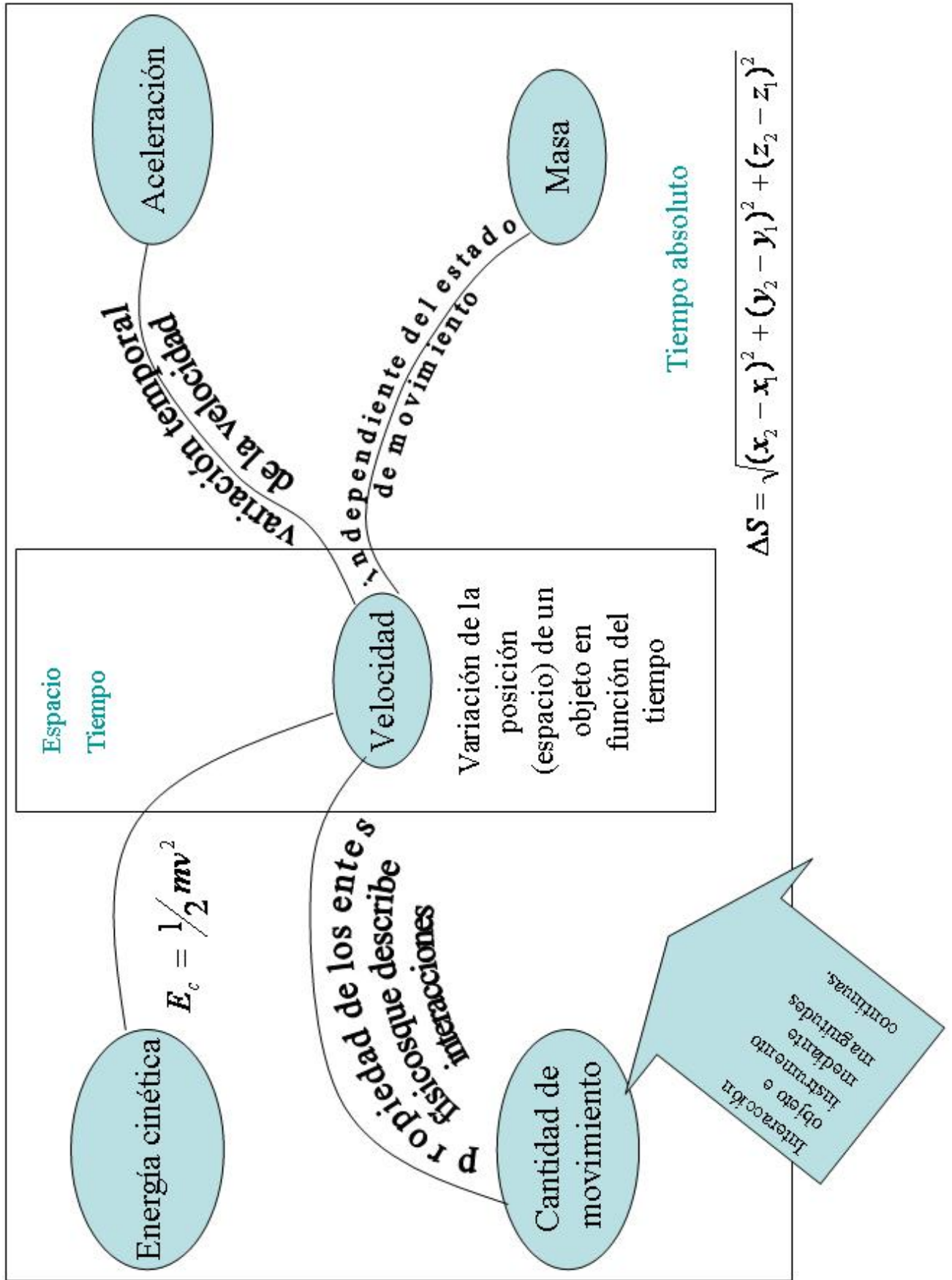


Figura 3.13: Mecánica clásica

5. Relación entre las estructuras (mapas) que forman las distintas magnitudes en los marcos de distintas teorías físicas y el comportamiento de la referencia de los términos que las designan en un contexto de cambio teórico

Al iniciar el capítulo se indicó que íbamos a sostener la tesis de que la referencia de un término de magnitud física cambia cuando cambia *radicalmente* el mapa de relaciones que la magnitud designada forma con el resto de las magnitudes que estaban involucradas directa o indirectamente en su definición inicial.³¹ Tras analizar el entretejido formado por algunas magnitudes, la relación experimental sujeto que observa/objeto o fenómeno observado y el tipo de estructura matemática en el marco de distintas teorías, es posible entender más adecuadamente el significado de la afirmación anterior.

El análisis propuesto no puede proporcionar una explicación *en general* del comportamiento de la referencia de todo término de magnitud física en un contexto de cambio teórico. Por el contrario, sólo brinda un método que implica la revisión de *cada* magnitud en particular, ya que presupone comportamientos desiguales en la referencia de los distintos términos de magnitudes. De todas formas, esto no representa una desventaja frente a otras de las propuestas examinadas, ya que ninguna de ellas permite explicar el comportamiento global de *todos* y cada uno de los términos de magnitudes físicas.

Kuhn y Putnam – a través de sus teorías acerca del cambio teórico presentadas en este capítulo – sostienen respectivamente el cambio o – por regla general – la inmutabilidad en la referencia de los términos de género natural y, por tanto, de los términos de magnitudes físicas. Como se ha indicado, sus propuestas están sustentadas

³¹ Por “definición inicial” se entenderá la que ha sido utilizada por la primera teoría científica que introdujo la magnitud y, por tanto, el término que la designa. Si se analiza el comportamiento de la referencia de un término en el cambio de contexto entre una teoría T_1 y otra T_2 y si ninguna de las dos ha sido la introductora inicial del término, asumiremos la teoría más antigua como punto de partida y, por tanto, la definición que ella utiliza de la magnitud designada por dicho término como la definición inicial.

por distintas teorías de la referencia: de tipo *descriptivo*, en el caso de Kuhn y de tipo *causal*, en el caso de Putnam. Pero las versiones presentadas en este capítulo de la teoría causal y la teoría descriptiva de la referencia³² podrían admitir el cambio o la inmutabilidad en la referencia de los términos de magnitudes físicas, dependiendo del cambio o no, fundamentalmente³³ en la relación de identidad de género (la posesión por parte de las entidades que pertenecen al género de ciertas propiedades que se consideran “esenciales”) o en las descripciones o propiedades asociadas con cada término por los hablantes expertos. De esta manera, al igual que lo que ocurre en el análisis de las relaciones establecidas por una magnitud con las restantes definidas por una teoría, resulta necesario un tratamiento *individual* de cada magnitud.

5.1. Necesidad y “existencia”

Existe en el caso de cada magnitud un contexto que introduce la necesidad de *esa* determinada magnitud que explica o describe un determinado fenómeno o regularidad. A diferencia de lo que podría decirse acerca de lo que sucede con las partículas – aunque no en todos los casos³⁴ – la *existencia* de las magnitudes suele *postularse* más que *descubrirse*. Las teorías físicas necesitan – para ser un potente aparato de explicación del mundo – magnitudes y, en tanto hay un contexto/teoría en el que la magnitud cumple un papel, es decir, explica o forma parte de la red de entidades que permiten la explicación de un fenómeno, dicha magnitud existe. Pero esa *existencia* en un determinado contexto no necesariamente implica la existencia también fuera del

³² No se alude en este caso a las versiones de estas teorías tal como las presentan los autores expuestos en el capítulo 2, sino a las versiones modificadas expuestas en el presente capítulo.

³³ Dejamos aquí de lado la relevancia para el cambio de referencia de las entidades (paradigmáticas) involucradas en la introducción de un término por los miembros de una comunidad científica

³⁴ Un ejemplo de partícula que ha sido inicialmente postulada y no descubierta es el caso del neutrino. Esta partícula fue propuesta por Pauli en el año 1930 como modo de reestablecer el balance de energía y momento lineal en la desintegración β de los neutrones. Si una partícula con las propiedades atribuidas al neutrino participaba de la desintegración, tanto la masa como la energía serían conservadas.

mismo o, mejor dicho, no asegura que en todo otro contexto en el que se utilice el término que designa dicha magnitud, se esté con él designando la misma magnitud, ya que ésta puede estar, en este nuevo contexto, definida de otra forma.

Es necesario en este punto hacer dos aclaraciones. Por una parte, el hecho de que en una determinada teoría una magnitud sea necesaria y, por tanto esté definida, sólo otorga a la magnitud una existencia *local*: distintas teorías necesitan, a veces, distintas magnitudes para explicar cómo funciona el “mundo” que describen. Así de acuerdo con esta forma de entender las magnitudes, éstas no *están* en las entidades físicas, sino que son sólo formas posibles de explicar fenómenos. Es decir, los cuerpos no *poseen* masa, sino que a través del concepto “masa” resulta posible explicar por ejemplo la resistencia al movimiento de los cuerpos. Sin embargo, dos teorías distintas pueden necesitar una magnitud similar en algunos aspectos, pero diferente en otros. Así la mecánica clásica necesita una magnitud “masa” escalar e independiente del estado de movimiento, y la relatividad especial una “masa” que también sea una propiedad escalar, pero, en este caso, dependiente de la velocidad.

Autores como Field (1973) – Devitt/Sterelny (1999) comparten la opinión de Field –, han sostenido que muchos términos científicos, entre ellos “masa”, tienen una referencia *indeterminada*. Field afirma que la mecánica newtoniana fue reemplazada por la teoría de la relatividad especial y esta última teoría nos reveló que el término “masa”, tal como había sido usado hasta entonces, no tenía una referencia determinada. Pero la mecánica newtoniana es necesaria en la actualidad para describir y explicar fenómenos del mundo macroscópico y de bajas velocidades, por lo que las magnitudes que utiliza en tales descripciones y explicaciones se refieren a alguna entidad cuya existencia es postulada por la teoría. En todo caso podrá alegarse, como hemos hecho, que la magnitud denotada por el término “masa” en el contexto de la mecánica

newtoniana no es la misma que la denotada por el mismo término en el contexto de la relatividad restringida, pero no sostendremos que alguna de las dos *no* existe. Es decir, teorías distintas – ambas utilizadas actualmente – dependiendo de aquella parte del mundo que va a ser analizada, necesitan muchas veces que las magnitudes mediante las cuales van a llevar a cabo dicho análisis tengan distintas propiedades. Los científicos que trabajan en uno u otro marco asocian así distintas descripciones o propiedades con los términos que las designan o consideran como fundamentales distintas propiedades para las entidades que forman parte de la extensión de dichos términos. Llegados a este punto cabe preguntarse si pueden estar equivocados los científicos que trabajan con una u otra teoría, es decir, si son algunas de las mencionadas descripciones/propiedades verdaderas y otras falsas. Pero lo cierto es que las más de las veces un mismo científico trabaja con aquella teoría que, dependiendo el contexto, le resulte más útil. Desde esta perspectiva es posible sostener entonces que es la *necesidad* – en el marco de cada teoría – de una magnitud/concepto métrico con determinadas características lo que otorga existencia a esa magnitud que se define.

Por otra parte, pero ligado a lo anterior, una magnitud es una construcción teórica, más allá de que se haya llegado experimentalmente a la necesidad de postularla, y toda construcción teórica está obviamente sujeta a las reglas de la teoría desde la cuál fue construida/definida, de modo que la definición de una magnitud en el marco de cada una de dos o más teorías distintas puede no conservar todos sus aspectos³⁵ inalterados. De esta manera será necesario analizar en el caso de cada magnitud física qué *aspectos* de la definición se han conservado y si aquellos que se han conservado son lo suficientemente importantes como para permitir sostener que se trata en ambos contextos de la *misma* magnitud.

³⁵ Cabe recordar que por “aspectos” de la definición de una magnitud física se están entendiendo los mencionados en el capítulo 1: ontológico, experimental, formal o matemático y contextual.

5.2. Definición y referencia

Tal como se ha indicado en el capítulo 1, una magnitud física es una propiedad o atributo susceptible de medición. Es decir, una magnitud es una propiedad a la que se le atribuye un número real que expresa y cuantifica esa propiedad, y al atribuir un número a tal propiedad se está presuponiendo una teoría que *necesita* de esa magnitud. Dicha teoría tendrá sus propias reglas para construir nuevas magnitudes o aceptar como heredadas magnitudes utilizadas por otras teorías, ya que cada teoría implica, a su vez, una teoría de la medida, un tipo de interacción experimental y una herramienta de cálculo que permita la atribución de números a las propiedades. Los distintos aspectos en la definición de una magnitud están relacionados y, tal como se ha dicho, ninguno es más relevante que otro, por lo que cualquier análisis de la referencia de los términos que designan magnitudes físicas debe abarcarlos.

En el cambio de una teoría por otra, una modificación en el aspecto experimental muchas veces implica la necesidad de un nuevo formalismo matemático para llevar a cabo la cuantificación de las propiedades, un cambio en las relaciones entre magnitudes y, a la postre, un cambio en el aspecto o componente ontológico de la definición de alguna de las magnitudes. De igual manera, un cambio en la manera de concebir la estructura espacio-tiempo puede implicar una variación en el formalismo matemático adecuado para la atribución de números a las magnitudes, un cambio en la forma de entender la relación experimental entre la propiedad a medir y el instrumento de medición y tal vez, nuevamente, en el aspecto ontológico de alguna magnitud.

En general, pero claramente hay excepciones,³⁶ cuando tras un determinado experimento una teoría introduce una magnitud, el contexto experimental en el que la

³⁶ Los inicios de la mecánica cuántica – expuestos y analizados tanto física como filosóficamente en Jammer (1966) – pueden proporcionar varios ejemplos.

magnitud es *descubierta* es coherente con el marco de la teoría desde la cual se la *descubre* o *postula*. Es decir, en general, la teoría que subyace a los instrumentos de medición suele ser la misma que utiliza luego esos mismos instrumentos para efectuar mediciones y construir conceptos que expliquen lo que se observa,³⁷ por lo que ese marco de la teoría de partida determina en gran parte la *referencia* del término con el que se designa dicha magnitud.³⁸ Distintos contextos que utilicen el mismo término respetan en diversa medida la serie de propiedades que se le atribuyeron inicialmente a la magnitud. En tanto las propiedades son distintas porque se ha logrado un desarrollo “superior” en cuanto a cuestiones tecnológico-experimentales o una herramienta matemática o de cálculo que permite explicar o manejar mejor diversas cuestiones de dicha magnitud, la referencia puede no cambiar. Pero si las cuestiones tecnológico-experimentales no han introducido sólo mejoras, sino formas distintas de entender la interacción objeto de observación/montaje experimental/observador y las estructuras matemáticas nuevas constituyen una manera radicalmente distinta de entender el “contenedor” espacio-tiempo, afectando así al mapa de relaciones entre las distintas magnitudes definidas por una teoría, la referencia de los términos de las magnitudes involucradas en uno y otro contexto habrán variado, aunque los términos utilizados sean los mismos.

Otra cuestión a tener en cuenta es que el aspecto ontológico de la definición incluye, salvo en el caso de las magnitudes fundamentales, relaciones con otras magnitudes. Esto permite suponer que cuando el aspecto ontológico de una magnitud varía, esta modificación implica cambios también en algunos de los otros aspectos. Pero

³⁷ Se asume además, de acuerdo con la tesis de la carga teórica de la observación propuesta por autores como Hanson, Kuhn y Feyerabend, que no existen términos puramente observacionales ni un lenguaje científico neutro desde un punto de vista teórico.

³⁸ Acerca de cómo se determina la referencia de este tipo de términos véase el capítulo 4.

por el contrario, la variación en alguno de los otros aspectos no necesariamente implica un cambio en el aspecto ontológico de la definición de la magnitud.

5.3. Herramienta de análisis. Mapa de relaciones y referencia

He propuesto como herramienta para analizar la referencia de los términos de magnitudes físicas *mapas de relaciones* entre magnitudes en el contexto de cada teoría. La razón de apelar a mapas de relaciones es que cada magnitud es introducida en una *determinada* teoría, en un *determinado* contexto en el que puede ser observada y medida a través de ciertas relaciones matemáticas con otras magnitudes. En realidad, la pregunta que cabe entonces formular es exactamente la inversa, esto es, si tiene sentido pensar en una magnitud fuera de un contexto que permita medirla, es decir, si tiene sentido pensar en una magnitud que no es medida y a la que no se le atribuye ningún valor. La respuesta es *negativa*, al menos de acuerdo con la definición de la noción de magnitud que en este escrito se ha presentado. Para atribuir un determinado valor a una magnitud hace falta un contexto que proporcione la forma de hacerlo, esto es, una teoría que facilite todas las reglas – experimentales, matemáticas/formales y relacionales – de construcción de un concepto métrico. Así como toda magnitud queda definida por una red de relaciones con las restantes magnitudes de una teoría, analizar el comportamiento de la *referencia* de los términos que designan magnitudes en un contexto de cambio teórico implica analizar las diferencias y similitudes en las redes de cada magnitud en cada una de las teorías involucradas.

Esta manera de analizar el comportamiento de la referencia de los términos de magnitudes físicas es incompatible – al menos algún sentido – con la tesis de la inconmensurabilidad entre teorías. Al analizar mapas de relaciones entre magnitudes en

teorías distintas se está haciendo una comparación entre dichos contextos y suponiendo, por tanto, bases comunes que permiten dicha comparación entre teorías y entre los términos que ellas utilizan.³⁹ Como sostiene Katz (1979, p. 361) el cambio conceptual es el caso especial de cambio científico en el que, para construir nuevos postulados, es necesario introducir nuevos conceptos; así el cambio científico puede o no implicar un cambio conceptual. Es decir, aunque se aceptara que los científicos que trabajan en el marco de teorías distintas intentan resolver problemas distintos y construyen para ello algunas magnitudes distintas en función de la forma que tienen de entender y conceptualizar el mundo⁴⁰ y en función también de aquellos conceptos que resultan necesarios en cada teoría, esto no implica que todas las construcciones teóricas sean distintas en cada contexto. Algunas de las definiciones de magnitudes – entendidas como construcciones teóricas – compartidas por dos teorías no varían lo suficiente como para cambiar todas sus relaciones con las restantes magnitudes definidas por cada teoría y, por tanto, los términos que las designan conservan *inalterada* su referencia. Como se ha visto en el caso de la velocidad, es posible que la magnitud forme parte de leyes y generalizaciones empíricas distintas sin dejar de tratarse de una determinada relación entre el espacio y el tiempo. A pesar de formar parte de teorías que proponen concepciones tan contrapuestas como la de un mundo continuo y otro discreto, la misma relación sirve en ambos contextos para dar cuenta de fenómenos distintos y no todas las relaciones establecidas por esta magnitud con las restantes se ven alteradas.

³⁹ Esta comparación entre teorías o mejor dicho, entre las estructuras conceptuales de distintas teorías, de ninguna manera intenta decidir si una teoría es o no superadora de otra o si alguna de las teorías contiene a la otra en determinados límites. En este caso se sostendrá, sin entrar en detalles, que dos teorías físicas pueden ser comparadas respecto de distintos aspectos (por ejemplo respecto de los términos de magnitudes físicas que utilizan), sin que eso implique suponer que una teoría es superadora de la otra. Si como ocurre en nuestros ejemplos, cada teoría es aplicable a un determinado recorte del mundo no cabe, al menos en estos casos, una comparación en relación al poder explicativo.

⁴⁰ Las diferencias conceptuales ligadas al diferente lenguaje teórico y a la distinta interpretación ontológica de los datos analizados vienen dadas por el hecho de que cada teoría considerará que el mundo está constituido por distintos tipos de entidades.

Cabe señalar que aceptar que la referencia de los términos – en este caso de los términos de magnitudes físicas – pueda variar no implica aceptar la inconmensurabilidad entre las teorías que los utilizan. Autores como Torretti – en (1990) y (1999) – sostienen simultáneamente que hay cambios conceptuales en ciencia,⁴¹ que en estos cambios conceptuales se da una combinación entre ruptura y continuidad y que, por tanto, no es acertado hablar de inconmensurabilidad entre los marcos teóricos en los que se dan dichos cambios conceptuales. Aún más, aunque la observación y la experimentación se dan dentro de ciertos marcos – tesis de la carga teórica de la observación –, el cambio de dichos marcos no implica necesariamente la afirmación de inconmensurabilidad. La superación del dualismo entre teoría y observación no implica la inconmensurabilidad entre paradigmas.

⁴¹ Este autor sostiene que “(n)o hay fundamentos conocidos para la creencia de que algunos conceptos relevantes para la ciencia sean inmunes al cambio científico” (Torretti 1990, p. 79).

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE UNA TEORÍA DE LA REFERENCIA DE LOS TÉRMINOS DE MAGNITUDES FÍSICAS

En este último capítulo se pretende esbozar una *teoría de la referencia* que permita explicar los distintos comportamientos que puede presentar la referencia de los *términos de magnitudes físicas* en un contexto de *cambio teórico*. Una vez presentada esta teoría analizaremos en qué sentido es superadora de las teorías de la referencia presentadas en el capítulo 2. Por último se aplicará la teoría presentada a los términos “masa”, “espín”, “ímpetu” y “velocidad”, analizados en el capítulo 3.

1 ¿Qué tipo de teoría de la referencia permitiría explicar los comportamientos estudiados en el capítulo 3?

Llegados a este punto cabría preguntarse si es posible una teoría de la referencia que describa el comportamiento de *todos* los términos de género natural. Ahora bien, de acuerdo con nuestras consideraciones anteriores, dado que los términos de magnitudes físicas tienen ciertas particularidades que los diferencian del resto de los términos de género natural, una teoría de la referencia del primer tipo de términos puede no ser adecuada para el conjunto de los términos de género natural.

Los tipos de términos de género natural más importantes son los términos de especies biológicas, los términos de sustancias químicas y – aunque menos tratados en la bibliografía sobre teorías de la referencia – los términos de magnitudes físicas. Como hemos señalado en el capítulo 2, los términos de especies biológicas y de sustancias químicas identifican el conjunto de objetos físicos que pertenecen a su extensión en base a propiedades que poseen los miembros del género, mientras que los términos de magnitudes identifican propiedades que poseen *todos* los objetos físicos y fenómenos

físicos por lo que es previsible que el modo en el que se determine la referencia de unos y otros términos será distinto. Una diferencia significativa es que si bien en relación con los términos de especies biológicas y de sustancias químicas puede estar justificado distinguir entre las propiedades accidentales o contingentes y las propiedades “esenciales” de las entidades que designan, en el caso de los términos de magnitudes físicas tal distinción es menos justificable. Obtenemos así una respuesta a las preguntas que nos formuláramos en la sección 2.1 del capítulo tercero acerca de si para sostener que el término “masa” designa la misma magnitud en los contextos clásico y relativista, debemos renunciar a sus supuestas propiedades “no-esenciales” y, en tal caso si se debería renunciar a las todas propiedades incompatibles en cuestión o sólo a las atribuidas a la masa en alguno de los dos contextos. Nuestra respuesta es que no tiene sentido, en el caso de los términos de magnitudes físicas, plantear una distinción entre propiedades “esenciales” y “no esenciales” ya que todas las propiedades supuestas en uno u otro contexto a una magnitud se refieren a la *estructura* de dicha magnitud. Por este motivo, sostendremos que en el estudio de la semántica de los términos de magnitudes físicas son relevantes particularidades de las magnitudes físicas que no son necesariamente compartidas por el resto de los términos de género natural y que una teoría de la referencia de dichos términos debe tomar en consideración.

Enç (1976) propone para los términos de género natural – “oro”, “gato”, pero también “entropía”, “electrón” o “flogisto” – una clasificación distinta a la desarrollada en el capítulo 1. Para evitar las discusiones acerca de la separación tradicional entre términos *teóricos* y *observacionales*, el autor introduce la noción de *términos-o* y *términos no-o*. Estos términos designan respectivamente objetos ostensibles – objetos que pueden ser señalados a la vez que se dice “esto es un x” – y objetos no ostensibles.¹

¹ De acuerdo con esta definición, debido a avances científicos o tecnológicos un objeto no ostensible puede transformarse en ostensible y, por tanto, un término no-o, en un término o.

Así es posible decir “esto es un gato” pero no “esto es un electrón”, si bien es posible decir “éstos son los efectos de un electrón”. De acuerdo con esta clasificación, no es posible una explicación única para la determinación de la referencia de ambos tipos de términos de género natural, aunque podría serlo para todos los que designan uno de esos dos tipos de objetos. Enç afirma que, si bien la teoría causal de la referencia es adecuada para los términos-o, este tipo de teoría no capta todos los aspectos relevantes de la referencia de los términos no-o. Para entender el significado de los términos no-o y a qué se refieren, es necesario tener cierta familiaridad con las teorías que los usan.

En la clasificación de Enç los términos de magnitudes físicas corresponden al segundo tipo de términos de género natural, por lo que la necesidad de conocimientos acerca de las teorías que los utilizan desemboca en otra cuestión importante. La información necesaria para caracterizar una propiedad o magnitud física no es la misma que, por ejemplo, para una especie biológica, por lo que cabe cuestionar que el mismo tipo de teoría de la referencia sea adecuada para ambos tipos de términos, términos de especies biológicas y de magnitudes. Como se indicó en el capítulo 2, los dos tipos de teorías *puras* nos involucran en dificultades para dar cuenta de la referencia de los términos de magnitudes físicas: tanto en el caso de la teoría descriptiva como en el de la teoría causal, se suscita la cuestión de cómo dar cuenta del comportamiento de la referencia de un término de magnitud física en función de las descripciones o propiedades asociadas con el término o de las propiedades “esenciales” – propiedades estructurales – que deben poseer las entidades que pertenecen a la extensión del término. Ambas teorías suscitan las mismas preguntas: ¿cuáles son? y ¿cómo se determinan?, es decir, ¿qué información acerca de las magnitudes físicas deben tener en cuenta los hablantes expertos – los científicos – de una comunidad?

De esta manera, aunque se aceptara para la explicación de la referencia de los términos de género natural una teoría puramente descriptiva o una puramente causal, las descripciones o propiedades asociadas con el término o las propiedades “esenciales” – intrínsecas o estructurales – que las entidades que pertenecen a la extensión del término deben poseer, no pueden ser del mismo carácter en el caso de todos los tipos de términos de género natural. La información necesaria – el conocimiento necesario – para determinar cuáles son esas descripciones/propiedades asociadas con el término o cuáles son las propiedades “esenciales” de sus referentes es distinta para distintos tipos de término de género natural. Por ejemplo, los aspectos relevantes en la definición de una magnitud física no lo son necesariamente en la definición de una especie biológica. Estas últimas suelen no estar definidas matemáticamente. Las particularidades de cada tipo de términos deben ser tomadas en consideración.

Una teoría de la referencia debe especificar también, cuál es el *contenido descriptivo* que debe estar presente en la introducción del término, es decir, en el proceso de determinación de su referencia, o en el proceso de transmisión. Este contenido no puede ser el mismo para términos como “perro” y “oro” por mucho que ambos sean términos de género natural. Algo similar sucede con los términos de magnitudes físicas. Como en el caso anterior, hay un contenido descriptivo mínimo para determinar sus referentes que no es similar al necesario para determinar la referencia de otros tipos de términos de género natural. Esto se debe, por una parte, a que se trata de términos que designan magnitudes físicas, y éstas tienen propiedades particulares; como ya se indicó, en el caso de su identificación tiene poca relevancia el contraste entre propiedades accidentales y propiedades estructurales, pues todas las propiedades involucradas en su identificación son estructurales o, en la terminología usualmente empleada por los promotores de la teoría causal, “esenciales”; además, por otra parte, éstas son propiedades a las que es posible asignarles un número que las cuantifique a

través de un determinado proceso de medición, lo que hace que distintas cuestiones asociadas a este proceso deban quedar reflejadas en el mencionado contenido descriptivo.

2. Hacia una teoría de la referencia de los términos de magnitudes físicas

2.1. ¿Cuál es la referencia de un término de magnitud física?

Los términos de magnitudes físicas designan, obviamente, magnitudes (físicas). Estas magnitudes son entidades que pueden concebirse como un tipo particular de propiedades – véase sección 1 del capítulo 1 –, y para ser definidas deben tenerse en cuenta cuatro aspectos relevantes: ontológico, experimental, formal o matemático y contextual. En el contexto de distintas teorías físicas es posible encontrar definiciones distintas y, algunas veces, contradictorias de una magnitud supuestamente idéntica. En algunos casos se trata de una variación aislada en alguno de los aspectos de una definición, que no implica una contradicción entre las definiciones de la magnitud; un ejemplo de esto es el caso de la variación que presenta el aspecto experimental de la definición de la velocidad en los marcos de la mecánica clásica y la cuántica no relativista – véase la sección 4.2.4. del capítulo 3 –, pero en otros casos, dos teorías distintas presentan definiciones incompatibles de una magnitud; así, por ejemplo, la masa y la energía en el contexto de la física clásica son definidas como dos magnitudes distintas, pero en el contexto de la física relativista se las define como magnitudes equivalentes –véase sección 4.2.1. del capítulo 3 –.

Tal como puede desprenderse de los ejemplos presentados en la sección 4.2 del capítulo 3, la referencia de un término de magnitud física tiene dos componentes: uno *interno* – hay al menos uno de los componentes de la referencia que depende del

contexto teórico que introduce el término – y otro *externo*, que viene dado por las contribuciones de otras teorías. Es decir, la *referencia total* estará formada por la combinación de estos dos componentes. Esto es: $R_{\text{total}} = R_{\text{externa}} + R_{\text{interna}}$

Se denominará *referencia interna* de un término de magnitud física a aquella magnitud que queda determinada a través de la definición que establece la teoría que introduce el término en cuestión. La definición establecerá aquellas relaciones que la magnitud establezca con otras, siempre en el marco de la misma teoría.

La *referencia externa* de un término de magnitud física será aquella parte de la definición de una magnitud que es aportada por teorías diferentes de la que introdujo el término. Una teoría distinta de la que introdujo un término puede no aportar ninguna variación en la definición inicial de la magnitud que designa, puede aportar información que resulte complementaria de la información contenida en la definición inicial – producto de una mejora experimental, por ejemplo – o puede aportar una variación que contradiga la definición inicial. Así, y dado que cada término fue introducido en el marco de una teoría en la cual dicho término era necesario para designar la magnitud que permitía explicar el resultado de un experimento o describir un fenómeno, para poder determinar la referencia total de un término y sostener que la referencia de dicho término no varía en el cambio de un contexto teórico a otro, el componente externo de la referencia de un término debe necesariamente ser coherente con el componente interno. Así por ejemplo, la referencia del término de magnitud física *x*, introducido por la teoría T_1 y utilizado por las teorías T_2 y T_3 , puede esquematizarse de la siguiente forma: $R_{T'x} = R_{'x' T_1} + R_{'x' T_2} + R_{'x' T_3}$

Así, la referencia total del término '*x*' es igual a la referencia interna ($R_{'x' T_1}$) más la referencia externa ($R_{'x' T_2} + R_{'x' T_3}$), donde, como se verá en el apartado siguiente, cada $R_{'x' T_i}$ viene determinada por un vector cuyos componentes son descripciones o

propiedades que los hablantes expertos asocian con el término que designa la magnitud física x y que contienen información sobre cada uno de los aspectos relevantes de la definición de dicha magnitud.

Cuando una teoría “toma prestado” un término de magnitud física de otra sólo añade a la referencia del término un componente externo producto de las modificaciones relativas al nuevo contexto. La referencia de un término así definida será más invariante frente al cambio de contexto teórico cuanto mayor sea la similitud entre los distintos mapas que dicha magnitud forma en el marco de las distintas teorías que utilizan el término que la designa.

Al presentarse las teorías de la referencia en el capítulo 2, se ha dicho que existen dos procesos que deber ser explicados por cualquier teoría de la referencia: el proceso de determinación o fijación y el proceso de transmisión o préstamo de la referencia. A continuación analizaremos estos dos procesos por separado.

2.2. ¿Cómo viene determinada la referencia de un término de magnitud física en el marco de una teoría?

La referencia de un término de magnitud física, tal como ha sido definida, no puede quedar fijada por una única teoría. La referencia total dependerá de todas las teorías que utilicen el término, exceptuando el caso en que dichas teorías sean incompatibles. Dicha referencia no viene determinada por descripciones o propiedades que *todos* los hablantes de una comunidad asocian con el término ni la determinan los expertos mediante el descubrimiento de propiedades estructurales que comparten los referentes de dichos términos. Es decir, ni una teoría descriptiva que no acepte la tesis de la división del trabajo lingüístico ni otra puramente causal puede explicar los comportamientos que hemos ejemplificado en la secciones 4.2.1 a 4.2.4 del capítulo

tercero. Dada la especificidad de los términos de magnitudes físicas, resulta necesaria una teoría que incluya la noción de hablante experto y que especifique los elementos propios de las magnitudes físicas que deben tenerse en cuenta para determinar la referencia de los términos que las designan. Conviene atender ahora a cuáles son estos elementos.

Cada teoría o, mejor dicho, cada comunidad de científicos que defiende o sostiene una determinada teoría, elige un conjunto de magnitudes a través de las cuales explica y estudia algunos objetos y fenómenos del mundo. Es decir, independientemente de que estos científicos crean que el mundo *es o se manifiesta y puede ser explicado*² de una determinada manera, con sus investigaciones intentan, al menos en ese sentido, encontrar algo que *está* en ese mundo. Es decir, no *definen* cualquier magnitud. Definen una magnitud a la que consideran responsable de distintas propiedades observadas en el mundo y con distintos rasgos que quedarían recogidos en dicha definición. Si bien es posible sostener que hay algún tipo de convencionalismo en la elección de una magnitud, éste no es total. La magnitud así definida debe poder poner de manifiesto alguna cualidad de un objeto o explicar algún fenómeno que se estuviera estudiando.

En este sentido cuando se introduce un término de magnitud física hay alguna parte de la referencia del término en cuestión que está determinada por “los objetos del mundo”, al menos del “mundo” en el sentido aludido en el capítulo 3. No puede ocurrir que alguna propiedad básica de la magnitud que se está definiendo pueda ser desconocida o resulte a la luz de posteriores desarrollos errónea; en todo caso, se tratará de una magnitud distinta. Si alguna de las propiedades de una magnitud considerada básica en el contexto de una teoría es considerada errónea en el contexto de otra teoría, la magnitud inicial no es adecuada para esta segunda teoría y resultaría necesario definir

² Esto es, independientemente de si sostienen una postura realista o no con respecto a las entidades que forman el recorte del mundo que investigan.

una magnitud nueva. De esta forma, en la elección de cada magnitud existe claramente un contenido descriptivo que los científicos – hablantes expertos de una comunidad lingüística – asocian con el término que la designa. Cabría preguntarse en qué consiste ese contenido descriptivo.

A este respecto la respuesta más plausible es que dicho contenido descriptivo viene dado por la definición de la magnitud, compuesta por las relaciones fundamentales que ella tiene con el resto de las magnitudes importantes de la teoría en cuestión. Puede decirse que la referencia de un término de magnitud física viene determinada por el conjunto de *relaciones* que cada magnitud establece con las restantes así como con la estructura espacio-tiempo y el tipo de interacción experimental que define la teoría. Estas relaciones, o propiedades en un sentido amplio, quedan recogidas en *descripciones* y son asociadas por una comunidad de expertos tras una investigación. El término de magnitud forma una red conjuntamente con otros términos: aquellos que están implicados en los distintos aspectos de las definiciones que pueden hacerse (y resultan relevantes) de la magnitud en cuestión. Estas relaciones conforman la estructura del lenguaje de cada teoría y ofrecen un criterio para determinar la referencia interna de estos términos.

2.3. ¿Cómo se transmite la referencia de un término de magnitud física?

A continuación voy a sostener que, a diferencia de lo que puede pasar con términos de género natural que designan objetos observables, quién utiliza un cierto término de magnitud física debe asociar con dicho término alguna propiedad que implica una conceptualización compleja que supera a la implicada en el conocimiento por ostensión. Es decir, si el señalar un objeto y decir “perro” puede dar lugar a una confusión, ya que

un perro puede ejemplificar el género “perro”, pero también otros géneros como “cánido”, “cuadrúpedo”, “mamífero”, “animal”, etc., – recuérdese el problema *qua* mencionado en la sección 3 del capítulo 2 –, la situación es más complicada al señalar cualquier objeto e intentar definir o conocer por ostensión la magnitud ‘masa’.

A este respecto conviene distinguir entre distintos tipos de hablantes dentro de una comunidad lingüística. Los hablantes *no-expertos* de una comunidad lingüística pueden asociar con un término de magnitud física alguna propiedad que no es correcta – en el sentido de no serle atribuida por una comunidad científica – o no conocer toda la información necesaria para definir exactamente la magnitud, sin que ello, de acuerdo con la hipótesis de la división del trabajo lingüístico – véase la sección 2.2.1. del capítulo 2 –, implique un cambio en la referencia del término que designa la magnitud. El término de magnitud física “trabajo” es un claro ejemplo de término de magnitud física al que los hablantes no-expertos suelen asociar un componente descriptivo incorrecto, pero al señalarse dicha incorrección estarían dispuestos a deferir en los expertos la referencia del término en cuestión.

El trabajo es una magnitud física equivalente a la energía en el siguiente sentido: el trabajo efectuado sobre un objeto o – por o sobre – un sistema provoca una variación de energía – en dicho objeto o sistema – y la energía puede ser definida como la capacidad de realizar un trabajo. Se lo puede definir en general como

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Dado que el producto escalar entre dos vectores – por ejemplo entre el vector fuerza \vec{F} y el diferencial de desplazamiento $d\vec{r}$ – se define como $\vec{F} \cdot d\vec{r} = |\vec{F}| |d\vec{r}| \cos \alpha$ y α es el ángulo entre los vectores, cuando una fuerza es ejercida sobre un objeto de modo tal que el desplazamiento que produce es en la misma dirección y sentido que dicha fuerza y por tanto $\alpha = 0$, el trabajo es también nulo.

Un hablante no-experto que utiliza el término “trabajo” puede querer usarlo con el sentido de “trabajo” tal como es definido en el ámbito de otra ciencia o de la magnitud física “trabajo”. Así, se suele decir que levantar un objeto implica mucho trabajo, cuando esto no es necesariamente correcto. Si el objeto es levantado ejerciendo para ello una fuerza ejercida en la misma dirección de la trayectoria que describe al desplazarse, se está haciendo un trabajo nulo, por definición de la magnitud de trabajo. Quién utiliza este término en este caso está refiriéndose en realidad a la magnitud fuerza. Pero no ocurre lo mismo en el caso de que los hablantes en cuestión sean *hablantes expertos* – los científicos –, quienes asocian con el término “trabajo” un componente descriptivo distinto. La variación o no de la referencia del término en cuestión dependerá en cada caso del nuevo componente descriptivo asociado por la comunidad de expertos, es decir, por la comunidad científica respectiva.

La referencia de un término de magnitud física t se transmite y conserva inalterada cuando una teoría posterior a la que introdujo el término toma dicho término t prestado y, o bien no introduce modificaciones en la definición de la magnitud designada por él, o bien introduce sólo modificaciones que provienen de una nueva herramienta matemática, una nueva estructura espacio-temporal, un nuevo diseño experimental o una mejora tecnológica para los instrumentos de medición con la que puede ser observada y medida. Es decir, la referencia del término t permanece *constante* si los hablantes expertos de una comunidad científica, quienes asocian algún tipo de componente descriptivo con el término que están tomando prestado, no introducen modificaciones radicales en la definición de la magnitud designada por dicho término; es decir, si, el nuevo contenido descriptivo asociado con el término por los hablantes expertos no varía significativamente. Puede definirse en tal caso la referencia total del término t como la referencia interna – propia de la teoría que introdujo el término – más

la referencia externa (los avances tecnológicos, matemáticos, etc.), ya que la contribución a la referencia del término hechos por la teoría posterior son coherentes con la referencia interna.

Contrariamente, la referencia de un término de magnitud física varía en un contexto de cambio de teoría cuando las modificaciones que se introducen en la definición inicial hacen variar radicalmente el mapa que componía dicha magnitud en la teoría de inicio y, por tanto, el contenido descriptivo que los hablantes expertos asociaban con el término que la designa. En este caso, al no existir coherencia entre la referencia interna y los nuevos componentes que deberían formar la referencia externa, no es posible definir una referencia total para el término que contenga todo el contenido descriptivo que aportan las distintas teorías en cuestión. El término tendrá una referencia *distinta* en el marco de cada teoría.

Como se ha indicado en los ejemplos presentados en el capítulo 3, un término de magnitud física puede tener una referencia distinta – como hemos alegado en el caso del término “masa” – o dejar de tener referencia – como hemos alegado en el caso del término “ímpetu” – en el marco de una teoría distinta de aquella que lo introdujo. En este último caso se dirá que la referencia del término no se ha transmitido, ya que la nueva teoría no posee ninguna definición de la magnitud designada por dicho término y, por tanto, los hablantes expertos no asocian con el término ningún contenido descriptivo. En tal caso la referencia total sigue siendo la referencia propia de la teoría en la que el término ha sido introducido y utilizado – referencia interna –. A este respecto consideramos que siempre que una teoría denote un fenómeno o proceso con un determinado término, no cabe decir que porque científicos que defienden una nueva teoría constatan que en el nuevo marco el término carece de referencia, dicho término *nunca* tuvo referencia. El término no tiene referencia en el marco de la nueva teoría, lo

que no implica que en teorías anteriores carezca de ella. Como hemos alegado en las secciones 4 y 5.1 del capítulo 3, siempre que una teoría necesite definir una magnitud para explicar un determinado fenómeno o proceso, el término que la designa tiene referencia al menos en el *contexto* de dicha teoría.

Cabe señalar, una vez más, que no resulta adecuado generalizar el comportamiento de la referencia de los términos de magnitudes físicas, ya que todos ellos no se comportan de la misma manera frente a un cambio de teoría. Resulta necesario evaluar el contenido descriptivo que los hablantes expertos – los científicos que trabajan en el marco de una teoría y de otra distinta – asocian con cada término en particular.

2.4. Descripción de la nueva herramienta de análisis (mapas)

El análisis de la referencia de un término de magnitud física utilizado en dos teorías distintas implica una revisión de todos los aspectos relevantes de la definición de la magnitud designada por el término. A este respecto la cuestión a analizar es cuándo es posible y cuándo no construir una referencia total para el término de modo tal que abarque a las dos o más teorías en cuestión sin entrar en contradicciones.

La referencia de un término t que designa una magnitud física M permanece constante si la red de relaciones que la magnitud M establece con las restantes magnitudes M_i definidas en cada contexto teórico no varía significativamente. Más específicamente: si es posible, tras el cambio de teoría, definir una referencia total para el término, es decir, si el contenido descriptivo con el que los seguidores de la nueva teoría pretenden determinar la referencia externa del término t no es incompatible o incoherente con el incluido en la referencia interna del mismo término. Si todos los aspectos de la definición de una magnitud permanecen inalterados en el cambio de una

teoría por otra, obviamente no habrá variación en la referencia del término que la designa. Si, por el contrario, todos los aspectos varían, la referencia del término habrá variado. Pero el análisis debe ser más detallado si algunos de estos aspectos varían y otros no.

Dadas dos teorías, T_1 y T_2 , y una magnitud M cabe comparar en primer lugar las definiciones contextuales $D_{\text{cont}}M(T_i)$ de la magnitud M en cada una de las teorías, es decir, analizar las leyes que la magnitud cumple y, a través de dichas leyes, el tipo de relación existente entre dicha magnitud y el resto de las magnitudes que intervienen en cada ley. El análisis del *aspecto contextual* de una magnitud implica un análisis tanto de la matemática utilizada en la representación de las leyes como del tipo de definición experimental que permite medirla en cada contexto. Una magnitud puede cumplir leyes distintas en el marco de dos teorías, ser representada a través de herramientas matemáticas distintas, ser medida a través de montajes experimentales muy diversos o establecer relaciones distintas con determinadas magnitudes, pero sólo se sostendrá que hay un *cambio* en la referencia del término que la designa si alguna de las relaciones establecidas con otras magnitudes no sólo es distinta de las presentes en la teoría inicial, sino incompatibles con ellas; es decir, si es imposible sostener simultáneamente los dos tipos de relaciones sin caer en una contradicción.

De esta forma $D_{\text{mat}}M(T_1) \neq D_{\text{mat}}M(T_2)$ o $D_{\text{exp}}M(T_1) \neq D_{\text{exp}}M(T_2)$ no implican necesariamente un cambio en la referencia del término t , pero en ese caso habrá de analizarse si esas variaciones hacen o no que $D_{\text{cont}}M(T_1) \neq D_{\text{cont}}M(T_2)$. Si estas tres definiciones han variado, la referencia del término t ha variado independientemente de lo que suceda con $D_{\text{ont}}M(T_i)$. Aunque en ambas teorías el aspecto ontológico de la definición de una magnitud sea el mismo, si esa magnitud entra en relaciones distintas e incompatibles con algunas magnitudes y éstas son representadas por herramientas

matemáticas distintas y cuantificadas a través de relaciones experimentales también distintas, la referencia del término t no puede ser la misma en ambos contextos. Si las variaciones en $D_{\text{mat}}M(T_1)$ y en $D_{\text{exp}}M(T_1)$ no alteran la igualdad $D_{\text{cont}}M(T_1) = D_{\text{cont}}M(T_2)$, la referencia de t permanece constante salvo que $D_{\text{ont}}M(T_1) \neq D_{\text{ont}}M(T_2)$.

Si $D_{\text{ont}}M(T_1) \neq D_{\text{ont}}M(T_2)$, la referencia del término que designa a M ha variado y dicha variación es independiente de que no haya – aparentemente – variación alguna en los aspectos experimental y matemático de las definiciones de M . De todas formas es difícil pensar en una variación en el aspecto ontológico de la definición que no implique otros cambios, ya que, como se ha dicho, este aspecto de una definición incluye, salvo en el caso de las magnitudes fundamentales, relaciones con otras magnitudes. Si $D_{\text{ont}}M(T_1) = D_{\text{ont}}M(T_2)$, nuevamente debe analizarse el contexto compuesto por el resto de los componentes de la definición de la magnitud en cuestión.

2.5. ¿Qué tipo de teoría de la referencia es la propuesta?

El tipo de teoría de la referencia propuesta para los términos de magnitudes físicas es una teoría básicamente *descriptiva* aunque combina elementos propios de las teorías descriptivas – la importancia de las descripciones o propiedades asociadas con un término para la referencia del término – y otros elementos que, aunque pueden ser aceptados por algunas versiones de la teoría descriptiva, suelen pensarse como característicos de la teoría causal de la referencia o, al menos, de la teoría de la referencia de Putnam, a saber, la hipótesis de la división del trabajo lingüístico. Es también una teoría que ofrece una explicación tanto del proceso de determinación de la referencia como del proceso de transmisión o préstamo y que asume que la referencia de

un término de magnitud física puede no transmitirse en algunos casos particulares de cambios teóricos.

Esta nueva propuesta de teoría de la referencia – exclusiva para los términos de magnitudes físicas – es superadora de las teorías descriptivas usuales por dos motivos. En primer lugar, incorpora la noción de hablante experto introducida por Putnam en su versión de la teoría causal – que puede ser asumida por una teoría descriptiva – y la tesis de que la información contenida en las descripciones relevantes para la determinación de la referencia de un término es la correspondiente a las descripciones que los científicos – hablantes expertos – asocian con el término. De ahí que cambios en las descripciones que las distintas comunidades de científicos asocian con los términos de magnitudes físicas y cambios en las ontologías asumidas en las distintas teorías – en el sentido de maneras de categorizar el mundo con el que se experimenta – pueden dar lugar a cambios en la referencia de un término de magnitud física. En segundo lugar, a diferencia de las teorías descriptivas usuales, permite determinar cuáles son los tipos de descripciones que deben asociarse con el término para determinar su referencia – descripciones que contengan información sobre los aspectos ontológico, experimental, matemático y contextual de la definición de una magnitud – y cómo deben determinarse tales descripciones – los científicos deben describir las propiedades estructurales de la magnitud que definen para explicar un fenómeno –. Nuestra teoría constituye, en este sentido, una teoría descriptiva *refinada*. Cabe añadir que esta teoría supera también a la versión de la teoría descriptiva que subyace en la propuesta de Kuhn, pues permite explicar algo que se observa en algunos términos de magnitudes físicas: no *todo* cambio teórico implica cambios en la referencia de estos términos.

Tal teoría resulta también superadora de las teorías causales. Por una parte, porque proporciona una explicación clara y general del cambio en la referencia de los

términos de magnitudes físicas. Por otra parte, resuelve el problema que tanto en el caso de las teorías descriptivas como en el de las teorías causales queda sin resolver: cuál es la información correspondiente a las descripciones o propiedades asociadas con un término de magnitud física – o a las propiedades “esenciales” en el caso de las teorías causales – que determinan la referencia. Cabe aclarar que en el caso de la teoría que proponemos, esas propiedades “esenciales” deben ser definidas de otra forma. Si se pretende conservar la idea de que estas propiedades *están* en todas las entidades que forman la extensión del término – como sostienen Putnam³ y Kripke –, es necesario aclarar que por “mundo” se está entendiendo aquella ontología que cada teoría presupone y no otra independiente de cualquier marco teórico. En este sentido, estas propiedades “esenciales” sí están determinadas por condiciones descriptivas asociadas por los científicos en el marco de cada teoría.

3. La referencia total de los términos “masa”, “ímpetu”, “espín” y “velocidad”

Se analizará a continuación en qué medida es posible determinar, para cada uno de los términos de magnitudes físicas que han sido estudiados en el capítulo 3, una referencia total R_T . Un análisis completo de la referencia de estos términos implicaría analizar las propiedades que todas y cada una de las teorías físicas que utilizan cada término

³ Al menos hasta 1975 Putnam defiende una postura que suele denominarse “realismo científico”, pero en trabajos posteriores – como en (1981) y (1988) – el autor presenta y sostiene su teoría del “realismo interno” como superación de sus propias concepciones anteriores del realismo. En los términos de Putnam: “[L]a perspectiva que voy a defender carece de nombre que no sea ambiguo... La denominaré perspectiva *internalista*, ya que lo característico de tal concepción es sostener que sólo tiene sentido formular la pregunta *¿de qué objetos consta el mundo?* desde *dentro* de una teoría o descripción [...] Desde la perspectiva internalista, la ‘verdad’ es una especie de aceptabilidad racional (idealizada) – una especie de coherencia ideal de nuestras creencias entre sí y con nuestras experiencias, *considerándolas como experiencias representadas en nuestro sistema de creencias* – y no una correspondencia con ‘estados de cosas’ independientes de la mente o del discurso. No existe un punto de vista como el del Ojo Divino que podamos conocer o imaginar exitosamente. Sólo existen diversos puntos de vista de personas reales, que reflejan aquellos propósitos e intereses a los que se subordinan sus descripciones y teorías.” (1981, pp. 49-50). De acuerdo con esta nueva postura, el autor alega que, en tanto la verdad no consiste en la correspondencia de nuestras teorías con *hechos objetivos*, sino en una idealización de la aceptabilidad racional de las teorías, una teoría *ideal* en este sentido no puede ser falsa.

atribuyen a la magnitud que designan, si bien en lo siguiente sólo tomaremos en consideración las teorías ya presentadas y examinaremos la posibilidad de una referencia total R_T de dichos términos en el contexto de tales teorías. Más concretamente, nos centraremos en el análisis de si las teorías anteriormente presentadas, al heredar un determinado término, han introducido modificaciones en las descripciones o propiedades que asocian con el mismo, atribuyendo a las magnitudes propiedades que complementan a las atribuidas por la teoría de partida o si, por el contrario, las nuevas propiedades contradicen alguna de las propiedades antiguas.

Especificaremos para el caso de cada término de magnitud la teoría de partida T_1 y la teoría T_2 o las teorías T_i que heredan y utilizan el término. Analizaremos brevemente la referencia total de cada uno de los términos mencionados en función de las propiedades – presentadas en los capítulos 1 y 3 – que las distintas teorías atribuyen a las magnitudes, aplicando para ello la siguiente expresión: $R_{\text{total}} = R_{\text{externa}} + R_{\text{interna}}$

3.1. La referencia del término “masa”

Por T_1 vamos a entender la mecánica newtoniana, es decir, la teoría que introdujo el término “masa” o que definió la magnitud masa por primera vez con rigor. Las teorías herederas del término son la relatividad especial, T_2 , y la relatividad general, T_3 .

La referencia total del término “masa” debería poder determinarse, en caso de no existir contradicciones, identificando aquella magnitud que posee las propiedades atribuidas por los hablantes expertos de la teoría T_1 y las propiedades complementarias atribuidas por las teorías T_2 y T_3 . Así obtendríamos:

$$R_{\text{total}} \text{ “masa”} = R_{\text{MN}} \text{ “masa”} + R_{\text{RE}} \text{ “masa”} + R_{\text{RG}} \text{ “masa”}$$

Dentro del contexto de cada una de las mencionadas teorías, la referencia del término “masa” viene determinada por un vector que contiene las descripciones con información sobre las relaciones que tiene la magnitud masa con las otras magnitudes definidas en cada teoría, agrupadas en los aspectos propios de la definición de toda magnitud física. Así la referencia del término “masa” en el contexto de la mecánica newtoniana – MN – viene determinada por la expresión:

$$R_{MN \text{ “masa”}} = (D_{ont M(MN)}, D_{exp M(MN)}, D_{mat M(MN)}, D_{cont M(MN)})$$

De forma similar podrían construirse los vectores que determinan la referencia del término – denominémoslos *vectores referencia* – en los contextos de la relatividad especial y general.

Pero, de acuerdo con lo que se ha sostenido a lo largo de este trabajo, las propiedades que atribuyen a la magnitud masa los expertos desde los marcos de la relatividad especial y la relatividad general son contradictorias respecto de las atribuidas por la mecánica newtoniana, por lo que no resulta posible atribuir simultáneamente todas las propiedades contenidas en los vectores referencia de cada teoría física. La referencia total del término, construida como se ha señalado, resultaría incoherente, ya que no es posible que la masa de un cuerpo o partícula sea y no sea equivalente a la energía, o sea y no sea independiente del estado de movimiento de dicho cuerpo o dicha partícula. Por tanto, la referencia del término “masa” debe venir determinada mediante las propiedades de la teoría que lo introdujo. Aquella magnitud que comparte algunas propiedades con la masa clásica, pero que posee otras propiedades incompatibles con la misma, puede ser designada con el término “masa relativista”.

De este modo, la referencia del término “masa” no permanece constante en el cambio de un contexto clásico a uno relativista y la teoría presentada puede explicar dicho cambio de referencia.

3.2. La referencia del término “ímpetu”

Se denominará “física medieval” a la teoría de partida T_1 para el caso del término “ímpetu”. No hay en este caso ninguna teoría que herede el término, pero la mecánica clásica será la teoría T_2 , ya que es la teoría a través de la cuál se explican la mayoría de los fenómenos asociados con los movimientos de proyectiles, que son los que previamente habían dado lugar a la introducción del término de magnitud “ímpetu”.

Como se ha señalado en la sección 4.2.3. del capítulo 3, las propiedades atribuidas a la magnitud ímpetu en el contexto de la física medieval son muy distintas a las atribuidas por la mecánica clásica al momento \vec{p} : de acuerdo con T_1 el ímpetu es la causa del movimiento de un cuerpo, mientras que de acuerdo con T_2 el momento sólo puede ser considerado como una medida del efecto del movimiento de un cuerpo. No es posible entonces construir un vector referencia para el término “ímpetu” en el contexto de la mecánica clásica. Las teorías actuales no necesitan de esa magnitud para explicar ningún fenómeno ni proceso.

Pero si se quiere conocer y analizar aquella *magnitud* a la que se nombraba con el término “ímpetu” en el contexto de la física medieval, la referencia del término debe determinarse sólo a través de las descripciones o propiedades que asociaban los hablantes expertos con el término en dicho contexto:

$$R_T \text{ “ímpetu”} = R_{FM} \text{ “ímpetu”}$$

La teoría de la referencia presentada permite explicar entonces que el término “ímpetu” carece de referencia de acuerdo con las teorías físicas actuales, ya que no hay ninguna entidad que satisfaga las descripciones o propiedades atribuidas por la teoría

medieval a dicho término, y permite analizar también aquello que se denotaba con el término “ímpetu” en el contexto de la física medieval.

3.3. La referencia del término “espín”

El término “espín” presenta un comportamiento similar al del término “ímpetu” pero, en este caso, es la mecánica clásica, digamos T_2 , la teoría que toma el término “espín” perteneciente al lenguaje de la mecánica cuántica, T_1 , y lo utiliza, por cuestiones didácticas, aplicándolo a una magnitud que poco tiene que ver con aquella designada por el término en su contexto de introducción. A modo de ejemplo y como puede verse en la sección 2.3. del capítulo 1, en el contexto de la mecánica clásica se utiliza el término “espín” para designar una magnitud continua, mientras que el espín cuántico es una magnitud discreta y de valor fijo para cada partícula. Estas dos propiedades son incompatibles. La magnitud espín, tal como está definida en el contexto de la mecánica cuántica, no forma parte de las magnitudes que resultan necesarias en el contexto de la mecánica clásica. El término “espín” no pertenece al lenguaje clásico y, por tanto, no es posible construir un vector referencia en dicho contexto. De esta manera, la referencia total R_T del término debe determinarse a partir de las propiedades atribuidas a la magnitud espín por los hablantes expertos en el contexto de la mecánica cuántica:

$$R_T^{\text{“espín”}} = R_{MQ}^{\text{“espín”}}.$$

3.4. La referencia del término “velocidad”

La física clásica es la teoría de partida, T_1 , y consideraremos como la teoría que hereda el término “velocidad” la mecánica cuántica, T_2 . Se ha señalado en las secciones 2.4 del

capítulo 1 y 4.2.4 del capítulo 3 que las propiedades atribuidas por la mecánica cuántica a la magnitud velocidad no son contradictorias con aquellas atribuidas a la magnitud por la mecánica clásica. En ambos contextos se utiliza el término “velocidad” para designar aquella magnitud derivada que expresa un tipo particular de relación entre el espacio y el tiempo, independientemente de que se utilicen para observarla y medirla formalismos matemáticos y montajes experimentales distintos.

Dado que las descripciones o propiedades asociadas con el término “velocidad” en los contextos clásico y cuántico no son contradictorias entre sí, la referencia total del término R_T puede determinarse sumando los componentes que hemos denominado “referencia interna” – en este caso proveniente del contexto clásico – y “referencia externa” – determinada por el contexto cuántico –. Así:

$$R_{\text{total}} \text{ “velocidad”} = R_{\text{MC}} \text{ “velocidad”} + R_{\text{MQ}} \text{ “velocidad”}.$$

La referencia interna será el vector referencia que aporta el contexto clásico (MC) – $R_{\text{MC}} \text{ “velocidad”} = (D_{\text{ont}} V(\text{MC}), D_{\text{exp}} V(\text{MC}), D_{\text{mat}} V(\text{MC}), D_{\text{cont}} V(\text{MC}))$ – y la referencia externa el vector que aporta el contexto cuántico (MQ) – $R_{\text{MQ}} \text{ “velocidad”} = (D_{\text{ont}} V(\text{MQ}), D_{\text{exp}} V(\text{MQ}), D_{\text{mat}} V(\text{MQ}), D_{\text{cont}} V(\text{MQ}))$ –.

CONCLUSIONES

Hemos constatado que hay distintas concepciones de las magnitudes físicas y distintos aspectos involucrados en la definición de las mismas, o de los términos correspondientes. Es asimismo digno de mención que aunque los términos de magnitudes físicas pueden ser considerados como términos de género natural, en tanto que designan clases de entidades que resultan importantes para la explicación de la naturaleza y la investigación científica, los términos de magnitudes físicas *difieren* de otros términos de género natural, como los términos de sustancias químicas y de especies biológicas. Una de las diferencias radica en que mientras que los términos de especies biológicas o de sustancias químicas identifican el conjunto de objetos físicos que pertenecen a su extensión en base a propiedades que sólo poseen los miembros del género, los términos de magnitudes físicas identifican propiedades que poseen *todos* los objetos físicos – y fenómenos físicos –. Las diferencias entre los términos de magnitudes físicas con respecto a otros tipos de términos de género natural justifican el que la semántica de aquéllos haya de ser diferente de la de éstos. Por este motivo, la aspiración a formular una teoría semántica general de (todos) los términos de género natural que incluya los términos de magnitudes físicas está – sostenemos – abocada al fracaso.

Hemos constatado que los tipos principales de teorías de la referencia no resultan adecuadas en su aplicación a los términos de magnitudes físicas. Las *teorías descriptivas* más importantes porque no especifican el tipo de información que deben contener las descripciones que, asociadas con un término de magnitud física, determinarían la referencia del término, ni proporcionan una pauta para especificar de

entre las descripciones o propiedades que se asocian con un término de magnitud física cuáles son las relevantes para dilucidar si la referencia del término se ve o no modificada. A esta deficiencia está vinculada la ausencia de un criterio inequívoco para la *identidad* entre magnitudes y, por tanto, para los referentes de los términos de magnitud física.

Dada nuestra concepción de una magnitud física como una o una serie de propiedades cuantificables, que caracterizan (la estructura de) los objetos o fenómenos físicos, si se observa que un objeto/fenómeno satisface la serie de descripciones o propiedades que asociamos con una magnitud M , necesariamente se está observando *esa* magnitud y no otra. De este modo, por lo que concierne a la referencia de los términos de magnitudes físicas no cabe sostener, tal como hacen las teorías causales, manifiestamente con respecto a otros tipos de géneros naturales, que una magnitud M_I puede tener muchas de las propiedades por las que originalmente fue identificada la magnitud M y, sin embargo, no ser esa magnitud M , ni cabe descubrir que la magnitud M no tuviese algunas de las propiedades por las que originalmente fue identificada. Por otra parte, las *teorías causales* – al menos en sus versiones originales – resultan inadecuadas, porque no proporcionan una explicación clara y general del cambio de referencia que los términos de magnitudes físicas pueden experimentar en los contextos de cambio teórico.

Las *teorías híbridas* han surgido con objeto de conjugar las virtudes de la teoría descriptiva y de la teoría causal, de modo que pudiesen explicar de manera más adecuada que estos dos tipos de teorías los mecanismos de determinación y transmisión de la referencia. No obstante, las teorías híbridas formuladas hasta el presente, principalmente para los nombres propios y de manera general para todos los términos de

género natural, no han tomado en consideración la especificidad de los términos de magnitudes físicas, por lo que con respecto a éstos resultan también inadecuadas.

En esta tesis hemos examinado el distinto comportamiento de la referencia de términos de magnitudes físicas en un contexto de *cambio teórico*. Algunos términos conservan su referencia inalterada (la referencia del término “velocidad” en el paso de la teoría clásica a la cuántica no relativista) mientras que la referencia de otros varía (la referencia del término “masa” en el cambio de la teoría clásica a la relatividad especial y a la relatividad general). Debido a la disparidad de comportamientos de la referencia de los términos de magnitudes físicas en un contexto de cambio de teoría, hemos alegado que ni una tesis como la que sostiene Kuhn, de acuerdo con la cual un cambio de teoría trae siempre consigo cambios de referencia ni la tesis opuesta, de la inmutabilidad – por regla general – de la referencia, son aceptables con respecto a la referencia de los términos de magnitudes físicas. El comportamiento desigual de la referencia de estos términos implica que ha de llevarse a cabo un examen particular, más que general, de los mismos.

Nos hemos preguntado entonces qué tipo de teoría de la referencia permitiría explicar ese peculiar comportamiento de la referencia de los términos de magnitudes físicas; una teoría que, a su vez, explique el mecanismo de determinación o fijación y transmisión o préstamo de la referencia de este tipo de términos. La respuesta a esta pregunta depende de nuestra concepción de los términos de magnitudes y de lo designado por ellas.

Los términos de magnitudes físicas designan magnitudes, es decir, entidades que pueden concebirse como un tipo particular de propiedades y que deben ser definidas teniendo en cuenta cuatro aspectos relevantes: ontológico, experimental, formal o matemático y contextual. Estos aspectos están vinculados con el conjunto de relaciones

que cada magnitud establece con las restantes así como con la estructura espacio-tiempo y el tipo de interacción experimental que define la teoría. Estas relaciones, o en general, propiedades quedan recogidas en descripciones y estas descripciones o propiedades son asociadas con el término por una comunidad científica o, como también decimos, sirviéndonos de una terminología introducida por Putnam, por una comunidad de expertos. La definición de cada magnitud en el marco de una teoría viene dada por un vector que contiene descripciones acerca de los aspectos relevantes de la misma y que determinan su referencia. La *referencia* de un término t en el contexto de una teoría T viene determinada de la siguiente manera: $R_T \text{ “}t\text{”} = (D_{\text{ont } t(T)}, D_{\text{exp } t(T)}, D_{\text{mat } t(T)}, D_{\text{cont } t(T)})$. Una teoría de la referencia para los términos de magnitudes físicas debe tener en cuenta entonces este *contenido descriptivo*, que los hablantes *expertos* asocian con cada término de magnitud, para determinar su referencia.

Por otra parte, la referencia de un término de magnitud física tiene dos componentes: uno *interno* y otro *externo*, de modo que la referencia *total* de un término de magnitud física estará formada por la combinación de estos dos componentes. La *referencia interna* de un término de magnitud es la magnitud que queda determinada mediante la definición que establece la teoría que introduce el término en cuestión, y la *referencia externa* es la aportada por teorías diferentes de la que introdujo el término. La referencia de un término de magnitud física se conserva *inalterada* cuando una teoría posterior a la que lo introdujo toma prestado dicho término y, o bien no introduce modificaciones en la definición de la magnitud designada por él, o bien introduce sólo modificaciones que provienen de una nueva herramienta matemática, una nueva estructura espacio-temporal, un nuevo diseño experimental o una mejora tecnológica para los instrumentos de medición con la que puede ser observada y medida. Es decir, los hablantes expertos de una comunidad científica, quienes asocian el tipo de

componente descriptivo mencionado con el término de magnitud que están tomando prestado, no introducen modificaciones radicales en la definición inicial de la magnitud designada por dicho término. Contrariamente, la referencia de un término de magnitud física varía en un contexto de cambio de teoría cuando las modificaciones que se introducen en la definición inicial hacen variar radicalmente el *mapa* que componía dicha magnitud en la teoría de inicio y, por tanto, el contenido descriptivo que los hablantes expertos asociaban con el término que la designa. En este caso, al no existir coherencia entre la referencia interna y los nuevos componentes que constituyen la referencia externa, no es posible definir una referencia total para el término que contenga todo el contenido descriptivo que aportan las distintas teorías en cuestión. El término tendrá una referencia *distinta* en el marco de cada teoría.

El tipo de teoría de la referencia que hemos propuesto para los términos de magnitudes físicas es una teoría básicamente *descriptiva* que combina elementos propios de las teorías descriptivas – la relevancia de las descripciones o propiedades asociadas con un término para la referencia del término – y otros elementos que suelen asociarse con las teorías causales de la referencia y especialmente con la teoría de Putnam, a saber, la hipótesis de la división del trabajo lingüístico.

Nuestra propuesta ha pretendido analizar la referencia de los términos de magnitudes físicas enriqueciendo mutuamente dos de las herramientas disponibles para tal análisis. Esto es, complementando el estudio de estos términos desde teorías propias de la filosofía del lenguaje, que escasa atención han prestado a este tipo de términos, con tesis acerca del cambio conceptual en ciencia, en las que en muchos casos no se ha atendido suficientemente a las particularidades de los términos de magnitudes físicas.

En definitiva, esta propuesta ha pretendido contribuir al debate semántico acerca de los términos de magnitudes físicas y, en este sentido, a una mejor comprensión de ese peculiar tipo de juegos de lenguaje a los que denominamos *teorías físicas*.

BIBLIOGRAFÍA¹

- Achinstein, P.** (1964): "On the Meaning of Scientific Terms". *Journal of Philosophy*, 61, pp. 497-509.
- Ávila Cañamares, I.** (2002): "El nuevo enigma de la inducción y los términos de clases naturales". *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, XXXIV/100, pp. 55-85.
- Brown, J.** (1998): "Natural Kind Terms and Recognitional Capacities". *Mind*, 107, pp. 275-303.
- Carlson, G.** (1991): "Natural Kinds and Common Nouns", en A. von Stechow y D. Wunderlich (eds.), *Semantics. An International Handbook of Contemporary Research*, Berlín, Walter de Gruyter, pp. 370-398.
- Carnap, R.** (1947): *Meaning and Necessity. A Study in Semantics and Modal Language*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Carnap, R.** (1966): *Philosophical Foundations of Physics*. Nueva York: Basic Books. (Trad. cast.: *Fundamentación lógica de la física*, Buenos Aires, Sudamericana, 1969).
- Cohen-Tannoudji, C, B. Diu y F. Laloë** (1977): *Quantum Mechanics*. 2 vols. Nueva York: Wiley.
- Collier, J.** (1984): "Pragmatic Incommensurability", en P. Asquith y P. Kitcher (eds.), *PSA 1984. Proceedings of the 1984 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, East Lansing, Philosophy of Science Association, pp. 146-153.
- Devitt, M.** (1981): *Designation*. Nueva York: Columbia University Press.
- Devitt, M. y K. Sterelny** (1999): *Language and Reality. An Introduction to the Philosophy of Language*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2ª ed., rev. y ampliada; 1ª ed., 1987.
- Díez, J. y C.U. Moulines** (1999): *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona: Ariel; 1ª ed., 1997.
- Echeverría, J.** (1999): *Introducción a la metodología de la ciencia: la Filosofía de la Ciencia en el siglo XX*. Madrid: Cátedra.
- Einstein, A.** (1905): "Zur Elektrodynamik bewegter Körper". *Annalen der Physik*, 17, pp. 891-921, (Trad. inglesa: "On the Electrodynamics of Moving Bodies", en H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski y H. Weyl, *The Principle of Relativity*:

¹ Las obras de las que se indica su traducción a un idioma distinto de aquel en el que fueron publicadas originalmente son citadas en el cuerpo del texto por dicha traducción.

a Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity, Nueva York, Dover, 1952, pp. 35-65).

- Einstein, A.** (1916): *Relativity, the Special and the General Theory*. Londres: Methuen. Obra citada por la edición de 1961 (Nueva York, Crown).
- Einstein, A.** (1936): “Physik und Realität”. *Journal of the Franklin Institute*, 221, pp. 313-347. (Trad. cast. en A. Einstein, *Mis ideas y opiniones*, Barcelona, A. Bosch, 1981, pp. 261-291).
- Ellis, B.** (1996): “Natural Kinds and Natural Kind Reasoning”, en P.J. Riggs. (ed.) *Natural Kinds, Laws of Nature and Scientific Methodology*, Dordrecht, Kluwer, pp 11-28.
- Enç, B.** (1976): “Reference of Theoretical Terms”. *Noûs*, 10, pp. 261-282.
- Evans, G.** (1973): “The Causal Theory of Names”, *Proceedings of the Aristotelian Society*, Supplementary Volume 47, pp. 187–208. Reimp. en G. Evans, *Collected Papers*, Oxford, Clarendon Press, 1985, pp. 1-24.
- Falkenburg, B.** (1997): “Incommensurability and Measurement”. *Theoria*, 12/3, pp. 467-491.
- Falkenburg, B.** (2002): “Correspondence and the Non-Reductive Unity of Physics”, en C. Mataix y A. Rivadulla (eds.), *Física cuántica y realidad*, Madrid, Universidad Complutense, pp. 215-229.
- Falkenburg, B.** (2007): *Particle Metaphysics: A Critical Account of Subatomic Reality*. Berlín: Springer.
- Feigl, H.** (1967): *The “Mental” and the “Physical”*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Fernández Moreno, L.** (1997): “¿Es la referencia del término “agua” inmutable?”. *Theoria*, 12/3, pp. 493-509.
- Fernández-Moreno, L.** (1998a): “Es la tesis de la inconmensurabilidad incoherente?”, en C. Solís (comp.), *Alta tension*, Barcelona, Paidós, pp. 279-291.
- Fernández Moreno, L.** (1998b): “Incommensurability, Reference and Truth”, en C. Martínez, et. al. (eds.), *Truth in Perspective*, Aldershot, Ashgate, pp. 399-417.
- Fernández Moreno, L.** (2000): “¿Qué es un término de género natural?”. *Teorema*, XIX/1, pp. 45-58.
- Fernández Moreno, L.** (2001): “Consideraciones sobre el cambio de referencia”, en J.M. Sagüillo, 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.** (2004): *La referencia de los nombres propios*. Madrid: Trotta.
- Fernández Moreno, L.** (2006): “Cambios de referencia: Kripke y Putnam”. *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, XXXVIII/114, pp. 45–67.
- Feyerabend, P.** (1975): *Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. Nueva York: New Left Books. (Trad. cast.: *Contra el método*, Barcelona, Ariel, 1975).
- Feyerabend, P.** (1981): *Realism, Rationalism, and Scientific Method. (Philosophical Papers, vol. 1)*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Feyerabend, P.** (1987): “Putnam on Incommensurability”. *British Journal for the Philosophy of Science*, 38, pp.75-81.
- Field, H.** (1973): “Theory Change and the Indeterminacy of Reference”. *Journal of Philosophy*, 70, pp. 462-481.
- Frege, G.** (1891): “Funktion und Begriff”, en G. Frege, *Funktion, Begriff, Bedeutung*, edición a cargo de G. Patzig, Gotinga, Vandenhoeck & Ruprecht, 1962, pp. 17-39. (Trad. cast.: “Función y concepto”, en Frege 1996, pp. 147-171).
- Frege, G.** (1892): “Über Sinn und Bedeutung”. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 100, pp. 25-50. (Trad. cast.: “Sobre sentido y referencia”, en Frege 1996, pp. 172-197).
- Frege, G.** (1892-1895): “Ausführungen über Sinn und Bedeutung”. En G. Frege, *Nachgelassene Schriften*, Hamburgo, Felix Mainer, 1969, pp. 128-136. (Trad. cast.: “Comentarios sobre sentido y referencia”, en Frege 1996, pp.198-206).
- Frege, G.** (1996): *Escritos Filosóficos*. Barcelona: Crítica.
- García Suarez, A.** (1997): *Modos de significar*. Madrid: Tecnos.
- Goldstein, H.** (2002): *Classical Mechanics*. San Francisco: Addison Wesley; 3ª ed.
- Goodman, N.** (1954): *Fact, Fiction and Forecast*. Londres: Athlone Press. Obra citada por la edición de 1973 publicada en Nueva York por la Bobbs-Merrill Company.
- Goodman, N.** (1978): *Ways of Worldmaking*. Indianapolis: Hackett. (Trad. cast.: *Maneras de hacer mundos*, Madrid, Visor, 1990).
- Griffiths, D.J.** (2005): *Introduction to Quantum Mechanics*. Upper Saddle River (New Jersey): Pearson Prentice Hall.
- Hecht, E. y A. Zajac** (2000): *Óptica*. Wilmington: Addison Wesley Iberoamericana.
- Heisenberg, W.** (1927): “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischer Kinematic und Mechanik”. *Zeitschrift für Physik*, 43, pp. 172-198. (Trad. inglesa: “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, en J.A.

Wheeler y M.Z. Zureck, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983, pp. 62-84).

Heisenberg, W. (1935): *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*. Leipzig: S. Hirzel. (Trad. cast.: *Los nuevos fundamentos de la ciencia*, Madrid, Norte y Sur, 1962).

Heisenberg W. (1958): *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*. Nueva York: Harper and Row. (Trad. cast.: *Física y Filosofía*, Buenos Aires, Ediciones La Isla, 1959).

Heisenberg, W. (1969): *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. Munich: R.Piper & Co. Verlag. (Trad. cast.: *Diálogos sobre física atómica*, Madrid, B.A.C., 1972).

Heisenberg, W. (1977): "Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty". Incluido en W. Price y W. S. Chissick, *The Uncertainty Principle and Foundations of Quantum Mechanics*, Londres/Nueva York, John Wiley and Sons, pp. 3-6.

Hempel, C.G. (1952): *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*. Chicago: University of Chicago Press. (Trad. cast.: *Fundamentos de la formación de conceptos en ciencia empírica*, Madrid, Alianza Editorial, 1988).

Hoyningen-Huene, P. (1993): *Reconstructing Scientific Revolutions: Thomas S. Kuhn's Philosophy of Science*. Chicago: University of Chicago Press.

Hoyningen-Huene, P. y E. Oberheim (1997): "Incommensurability, Realism and Meta-incommensurability". *Theoria*, 12/3, pp. 447-465.

Jackson, F. (1998): "Reference and Description Revisited", en J.E. Tomberlin (ed.), *Language, Mind, and Ontology (Philosophical Perspectives, vol. 12)*, Oxford, Blackwell, pp. 201-218.

Jammer, M. (1961): *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Massachusetts: Harvard University Press.

Jammer, M. (1966): *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Nueva York: McGraw-Hill Book Company.

Jammer, M. (2000): *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*. Princeton: Princeton University Press; 1ª ed. 1999.

Katz, J. (1979): "Semantics and Conceptual Change". *Philosophical Review*, 88, pp. 327-365.

Khalidi, M. (1998): "Natural Kinds and Crosscutting Categories". *Journal of Philosophy*, 95, pp. 33-50.

- Kripke, S.** (1971): "Identity and Necessity", en M. Munitz (ed.), *Identity and Individuation*, Nueva York, New York University Press, pp. 135-164. (Trad. cast.: "Identidad y necesidad", en Valdés Villanueva 1999, pp. 121-152).
- Kripke, S.** (1980): *Naming and Necessity*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press Reimp. revisada y con prefacio añadido de "Naming and necessity", en Davidson, Donald y Gilbert Harman (eds.), *Semantics of Natural Language*, Dordrecht, Reidel, 1972.
- Kuhn, T.** (1962): *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press; 2ª ed. 1970. (Trad. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas*, Madrid, Fondo de Cultura Económica de España, 1975).
- Kuhn, T.** (1969): "Postscript". Apéndice añadido a la segunda edición de Kuhn (1962), pp. 174-210.
- Kuhn, T.** (1983): "Commensurability, Comparability, Communicability", en P.D. Asquith and T. Nickles (eds.), *PSA 1982, Volume 2*, East Lansing, Michigan, Philosophy of Science Association, pp. 669-688.
- 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 P. Horwich (ed.), *World Changes. Thomas Kuhn and the Nature of Science*, Cambridge, MIT Press, pp. 311-341.
- Landau, L.D. & E.M. Lifshitz** (2001): *Mecánica cuántica no-relativista*. Barcelona: Reverte.
- LaPorte, J.** (2004): *Natural Kinds and Conceptual Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lewis, D.** (1970): "How to Define Theoretical Terms". *Journal of Philosophy of Science*, 67, pp. 427-446.
- Mach, E.** (1883): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: Brockhaus. (Trad. inglesa.: *The Science of Mechanics. A Critical and Historical Exposition of its Principles*, La Salle, Il., Open Court, 1960).
- Morrison, M.** (2007): "Spin: All is Not What it Seems". *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 38, pp. 529-557.
- Mosterín, J.** (1984): *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid: Alianza; 3ª edición, ampliada y revisada, 2000.
- Moulines, C.U.** (1991): *Pluralidad y recursión. Estudios epistemológicos*. Madrid: Alianza Universidad.

- Nagel, E.** (1961): *The Structure of Science*. Nueva York: Harcourt, Brace and World Inc.
- Newton, I.** (1687): *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Londres: Joseph Streater. (Trad. cast.: *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Madrid, Alianza, 2004).
- Nola, R.** (1980a): “Fixing the Reference of Theoretical Terms”. *Philosophy of Science*, 47, pp. 505-531.
- Nola, R.** (1980b): “Paradigm Lost, or the World Regained – An Excursion into Realism and Idealism in Science”. *Synthese*, 45, pp. 317-350.
- Pérez Razanz, A.R.** (1999): *Kuhn y el cambio científico*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Putnam, H.** (1970): “On Properties”, en N. Rescher et al. (eds.), *Essays in Honor of Carl G. Hempel*, Dordrecht, Reidel. (Trad. cast.: “De las propiedades”. *Cuadernos de Crítica*, Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM, México, 1983).
- Putnam, H.** (1975): *Mind, Language and Reality*. (*Philosophical Papers*, vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press.
- Putnam, H.** (1975a): “Is Semantics Possible”, en Putnam (1975), pp 139-152.
- Putnam, H.** (1975b): “Explanation and Reference”, en Putnam (1975), pp. 196-214.
- Putnam, H.** (1975c): “The Meaning of ‘Meaning’”, en Putnam (1975), pp. 215-271.
- Putnam, H.** (1975d): “Language and Reality”, en Putnam (1975), pp 272-290.
- Putnam, H.** (1981): *Reason, Truth, and History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Putnam, H.** (1988): *Representation and Reality*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. (Trad. cast.: *Representación y realidad*, Barcelona, Gedisa, 1995).
- Rioja, A.** (1995): “Los Orígenes del Principio de Indeterminación”. *Theoria*, X/22, pp. 117-143.
- Rivadulla, A.** (2003): “Inconmensurabilidad y relatividad. Una revisión de la tesis de Thomas Kuhn”. *Revista de Filosofía*, 28, pp. 237-259.
- Rivadulla, A.** (2004): *Éxito, razón y cambio en física. Un enfoque instrumental en teoría de la ciencia*. Madrid: Trotta.
- Russell, B.** (1905): “On Denoting”. *Mind*, 14, pp. 479-493. (Trad. cast.: “Sobre el denotar”, en Thomas Moro Simpson (comp.) *Semántica filosófica: Problemas y discusiones*, Buenos Aires, Siglo XXI, 1973, pp. 29-48).

- Russell, B.** (1912): *The Problems of Philosophy*. Londres: Williams Norgate. Obra citada por una versión posterior: *The Problems of Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 1959.
- Russell, B.** (1919): *Introduction to Mathematical Philosophy*. Londres: George Allen and Unwin. (Trad. cast.: *Introducción a la filosofía matemática*, Barcelona, Paidós, 1988).
- Salmon, N.U.** (1981): *Reference and Essence*. Princeton: Princeton University Press.
- Sankey, H.** (1993): "Kuhn's Changing Concept of Incommensurability". *The British Journal for the Philosophy of Science*, 44, pp. 759-774.
- Sankey, H.** (1994): *The Incommensurability Thesis*. Aldershot: Avebury.
- Sankey, H.** (1997): "Incommensurability: The current State of Play". *Theoria* 12/3, pp. 425-445.
- Sankey, H.** (1998): "Taxonomic Incommensurability". *International Studies in Philosophy of Science*, 12, pp. 7-16.
- Searle, J.R.** (1967): "Proper Names and Descriptions", en P. Edwards (ed.), *The Encyclopedia of Philosophy*, Londres, McMillan, vol. 6, pp. 487-491. (Trad. cast.: "Nombres propios y descripciones", en Valdés Villanueva 1999, pp. 106-115).
- Searle, J. R.** (1969): *Speech Acts. An Essay in the Philosophy of Language*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Soames, S.** (2002): *Beyond Rigidity: The Unfinished Semantic Agenda of Naming and Necessity*. Oxford: Oxford University Press.
- Stanford, P. K. & Kitcher, P.** (2000): "Refining the Causal Theory of Reference for Natural Kind Terms". *Philosophical Studies*, 97, pp. 99-129.
- Suárez, M.** (2003): "Hacking Kuhn". *Revista de Filosofía*, 28, pp.1-24.
- Torretti, R.** (1990): *Creative Understanding. Philosophical reflections on Physics*. Londres/Chicago: The University of Chicago Press.
- Torretti, R.** (1999): *The Philosophy of Physics*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Valdés Villanueva, L. M.** (comp.) (1999): *La búsqueda del significado. Lecturas de Filosofía del Lenguaje*. Madrid: Tecnos.
- Zemach, E.** (1976): "Putnam's Theory on the Reference of Substance Terms", en A. Pessin y S. Goldberg (eds.), *The Twin Earth Chronicles*, Nueva York, M. E. Sharpe, 1996, pp. 60-68.