

ALGUNOS ASPECTOS DE LA TEORIA NEWTONIANA
SOBRE EL ESPACIO Y EL TIEMPO

JUDITH SCHOENBERG



T E S I S
PARA EL GRADO DE
LICENCIADO EN FILOSOFIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

1965



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

Pág.

NOTA PRELIMINAR

I. INTRODUCCION: EL PROBLEMA DE LA INTERPRETACION DE LA TEORIA NEWTONIANA DE ESPACIO Y TIEMPO.....	1
--	---

PARTE A. EL CONCEPTO NEWTONIANO

DE ESPACIO

II. ESPACIO ABSOLUTO	8
a. El postulado de la existencia del espacio absoluto	9
b. El espacio absoluto en su carácter de medio...	12
c. La homogeneidad del espacio absoluto	
1. Los antecedentes de la homogeneidad métrica del espacio absoluto.....	14
2. El carácter físicamente no-perturbante del espacio absoluto	15
3. El espacio homogéneo y la fuerza.....	20
d. La inmovilidad del espacio absoluto	23
III. ESPACIO RELATIVO	
a. Los conceptos de espacio y lugar relativos y de posición	34
b. Movimiento absoluto y movimiento relativo.....	39
IV. EL PROBLEMA DEL CARACTER FILOSOFICO DEL CONCEPTO DE ESPACIO ABSOLUTO	43

PARTE B. EL CONCEPTO NEWTONIANO DE TIEMPO, Y EL
ENLACE TEORICO DE LOS MEDIOS ABSOLUTOS.

NOTA PRELIMINAR	49
V. LA TEORIA NEWTONIANA DE ESPACIO Y TIEMPO, Y LA NOCION DE POSICION EN LA FISICA MODERNA	51
VI. TIEMPO ABSOLUTO Y TIEMPO RELATIVO: EL PROBLEMA DE LA MEDICION DE TIEMPO	56
VII. TIEMPO ABSOLUTO	
a. El tiempo absoluto en su carácter de medio....	62
b. Consideraciones adicionales respecto a los me- dios newtonianos	63
c. El tiempo físico newtoniano	
1. Los antecedentes aristotélicos	64
2. La uniformidad del fluir temporal	66
3. La continuidad del tiempo y el espacio abs- lutos	69
VIII. TIEMPO RELATIVO	
a. La temporalidad y la materia newtoniana	85
b. El tiempo y el movimiento	87
PARTE C. <u>LA OBSERVACION ESPACIO-TEMPORAL</u>	
IX. LAS 'MEDIDAS SENSIBLES' DEL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LA FISICA NEWTONIANA	
a. Los dos aspectos de la medición del movimiento: medidas exactas y movimientos verdaderos.....	96
b. La medición espacial	99
c. La medición temporal	102

X. ALGUNAS CONSIDERACIONES RESPECTO A LA OBSERVACION EN LA DINAMICA	115
a. El marco temporal para la medición espacial en la física clásica	115
b. El problema de la medición espacial del movi- miento	117
c. El desarrollo del significado físico de los datos espacio-temporales en la física moderna.	119
EPÍLOGO	126

APÉNDICE: SELECCIONES DE LAS OBRAS DE ISAAC NEWTON,
TRADUCIDAS AL ESPAÑOL.

Nota de explicación	132
---------------------------	-----

Textos de los Principia:

Reglas del razonamiento en la filosofía.....	134
Las Definiciones (selecciones)	137
<u>Scholium</u> de las Definiciones	142
Axiomas, o Leyes del Movimiento	149
Corolarios (selecciones).....	151
<u>Scholium</u> de Libro Uno, Sección I. El método de primeras y últimas proporciones entre cantidades	155
<u>El sistema del mundo</u> , Sección 1. La materia. de los cielos es flúida	158

Textos de la Óptica:

Selecciones de las 'Preguntas'	160
--------------------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	165
--------------------	-----

Nota Preliminar

Este trabajo se concibió como un estudio a la vez analítico e histórico. Es decir, el motivo para hacer el análisis de los conceptos newtonianos de espacio y tiempo fue el deseo de entender el papel que estos conceptos desempeñaron en el desarrollo histórico de la física moderna; y el propósito central ha sido el de averiguar cómo dichos conceptos respondieron a las exigencias de la física newtoniana, y cómo las dificultades teóricas relacionadas con ellos fueron resueltas por Newton de manera consecuente con su teoría del movimiento. A este respecto, el trabajo se presenta como una exposición sistemática. Pero además, se ha tenido presente la cuestión de saber en qué sentido los problemas de la teoría de espacio y tiempo de Newton pueden considerarse como antecedentes de los problemas espacio-temporales de la física de nuestro siglo, especialmente de la física cuántica. En este segundo aspecto, el trabajo no tiene carácter sistemático. Simplemente se ha intentado sugerir, a lo largo de la exposición, el interés actual que tienen la problemática y las soluciones newtonianas, y a veces se han intercalado capítulos o secciones para elaborar la importancia actual de un tema cuando esto parecía justificado.

Aparte del problema filosófico fundamental en relación con la existencia física del espacio y el tiempo absolutos postulada por Newton, el tema que ha ido cobrando cada vez mayor interés en el curso del desarrollo de este trabajo es el de los fundamentos teóricos respectivos de las determinaciones espaciales y temporales de los cuerpos en movimiento -problema resuelto por Newton en términos de la dependencia unilateral de la medición temporal en la medición espacial. En este caso, se trata de un problema reconocido como tal desde la antigüedad y cuya solución propiamente newtoniana sigue siendo aceptada en sus rasgos esenciales hasta nuestros días. En el capítulo final, mi intención es sugerir la actualidad del problema de buscar una nueva solución.

Otro problema al que he dedicado una discusión especial es el del carácter de la continuidad newtoniana. En este caso hago una interpretación que difiere de la interpretación usual en la que se infiere una especie de continuidad absoluta. Sugiero que la cinemática newtoniana implica, aunque en germen, algunos aspectos de la imprecisión y la discontinuidad que han surgido en la física cuántica.

Con esto quiero indicar que intento mantener una actitud abierta hacia la teoría newtoniana para tener advertencia no sólo del sentido en que su validez se limita a la física clásica, sino también del sentido en que constituye una etapa en el desarrollo progresivo de la concepción moderna de espacio y tiempo. Quisiera poner en claro que mi intención no ha sido criticar la teoría newtoniana de espacio y tiempo. Este trabajo se presenta como una exposición analítica, y ha sido motivado por mi convicción de que hace falta este tipo de análisis. Mucho se ha escrito acerca de esta teoría con espíritu crítico, y muy poco con espíritu analítico. Pero el análisis detallado de la teoría tiene gran

interés actual. El problema de concebir el espacio y el tiempo ha surgido de nuevo en la física contemporánea; y, puesto que los conceptos newtonianos constituyen el punto de partida para la concepción de espacio y tiempo en la física moderna, el estudio de la teoría newtoniana puede servir para averiguar los antecedentes de algunos aspectos del problema actual.

Por otra parte, de la orientación histórica de este trabajo, resultan referencias a varios temas implicados en la historia de la teoría de la física, aunque no pretendo tratar dichos temas de manera estricta. Es evidente que no hubiera sido posible hacer los estudios necesarios para desarrollar con precisión todos los nexos del presente trabajo con los problemas fundamentales de la filosofía de la ciencia. Esta consideración se aplica especialmente a las referencias a las nociones de continuidad y a la relación entre la estática y la dinámica. De suerte que tales referencias sirven únicamente para apuntar hacia otros temas de posible investigación.

Capítulo I

Introducción: El problema de la interpretación de la teoría newtoniana de espacio y tiempo.

La primera sección de la obra newtoniana, Principios matemáticos de la filosofía natural, (1) es la de las Definiciones. (2) Se definen allí 'cantidad de materia' o masa; 'cantidad de movimiento' o momentum; 'vis insita' o la fuerza de inercia; y además, las magnitudes pertenecientes a las fuerzas impuestas. Después de las propias Definiciones viene el famoso Scholium (3) en el cual se tratan los conceptos de tiempo, espacio, lugar y movimiento. En él se exponen los conceptos de espacio y tiempo absolutos y relativos, y se da sentido preciso a las nociones de posición y movimiento. Este Scholium es el texto principal en el cual se encuentra formulada la teoría newtoniana de espacio y tiempo.

Se nota en primer lugar que la forma de la exposición en esta primera parte de los Principia es tal, que se hace una diferenciación entre las magnitudes propiamente dinámicas, que se tratan en las Definiciones mismas, y las magnitudes de la cinemática que se exponen en el Scholium. Y, en realidad, estamos aquí en presencia de la primera indicación teórica de este doble aspecto de la física moderna. Es decir que la distinción entre las magnitudes de las Definiciones mismas y las del Scholium se relaciona con la propia estructura de la mecánica newtoniana. Sin embargo, sería un error exagerar la importancia teórica de esta forma de la exposición, ya que al mismo tiempo todas estas magnitudes se relacionan entre sí dentro de la unidad de la física de Newton. Por lo tanto, la teoría de espacio y tiempo no puede caracterizarse exclusivamente por su papel en la cinemática, sino que también tiene que considerarse desde el punto de vista de la dinámica.

Las nociones espacio-temporales que se encuentran desarrolladas en el Scholium se fundamentan en los conceptos de espacio y tiempo absolutos, concebidos como existentes en sí mismos. La crítica filosófica de estas 'cosas' existentes postuladas por Newton ha tenido una larga historia, desde los cartesianos y Kant hasta la crítica que surgió en el seno de la ciencia física a fines del siglo pasado, con el análisis hecho por Ernst Mach. (4) Mach caracterizó los conceptos de espacio y tiempo absolutos como 'especulaciones metafísicas', y sostuvo que no era teóricamente necesario que Newton postulara tales existencias. En nuestros días, es el problema de la interpretación de la teoría newtoniana lo que se plantea de nuevo. Frente a todas las críticas ya hechas, hay que preguntar por la relación entre los conceptos de espacio y tiempo absolutos y otras concepciones de la física newtoniana, por ejemplo, las de los procesos mecánicos y la medición. Por otra parte, subsiste el problema de entender cómo Newton hubiera podido justificar el postulado de la realidad física de dichas 'cosas' absolutas, dada su postura conscientemente empírica.

Este último problema es de importancia medular para la inter

pretación de la teoría. El empirismo de Newton tiene que entenderse en el marco del pensamiento científico de su época. Para él, como para la mayoría de los científicos del siglo XVII, la ciencia natural fue considerada como 'filosofía experimental'. Es decir, el pensamiento conceptual respecto a la naturaleza no fue rechazado, sino sometido a la disciplina de la observación y la experimentación. El carácter filosófico de la física, entendida como conocimiento verdadero de la naturaleza, no se puso en duda, sólo que sus concepciones se ajustaron a la experiencia; y es el carácter de este ajuste lo que se pone en cuestión cuando se trata de la justificación newtoniana de los postulados de la existencia del espacio y el tiempo absolutos. Así, la física de Newton implica una conceptualización de la naturaleza. Las magnitudes tanto de las Definiciones como del Scholium se presentan como los términos conceptuales para el conocimiento verdadero, empírico y matemático, de la realidad física. Al mismo tiempo, la forma en que estos términos se presentan acentúa la fundamentación de las magnitudes de la cinemática. Pero es importante reconocer también que la estructuración de la dinámica exigió una nueva teoría de espacio y tiempo, ya que la herencia filosófica a este respecto, desde Platón y Aristóteles hasta el propio Descartes, parecía inconsecuente con los conocimientos nuevos. Así, el hacer hincapié en las concepciones espacio-temporales del Scholium puso de relieve que, hasta entonces, la nueva ciencia mecánica no había precisado los conceptos de algunas de sus magnitudes fundamentales.

Desde este punto de vista, no resulta tan extraña la manera en que el propio Newton caracteriza la distinción entre los términos de las Definiciones y los del Scholium, refiriéndose a aquéllos como a los 'menos bien conocidos' y a éstos, como a los 'bien conocidos por todos'. Parece claro que se refiere a que el propio problema de la conceptualización de las magnitudes claves de la dinámica era problema relativamente nuevo, mientras que en el caso de las concepciones espacio-temporales, se trataba de magnitudes respecto a las cuales había una tradición filosófica. Y, desde luego, fue cuestión de enfrentarse a dicha tradición.

En el primer párrafo del Scholium Newton dice:

"Hasta ahora he asentado las definiciones de tales palabras que son menos bien conocidas, y he explicado el sentido en que yo quisiera que se las entiendan en el discurso a continuación. No defino tiempo, espacio, lugar, y movimiento, que son bien conocidos por todos. Sólo que tengo que hacer notar que la gente común no concibe dichas cantidades bajo ningunas otras nociones que las de las relaciones que ellas guardan con los objetos sensibles. Y de aquí provienen ciertos prejuicios, para cuya eliminación será conveniente distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y comunes." (5)

La terminología de este párrafo da lugar a problemas de interpretación, y puesto que esta terminología se encontrará implicada en todos los aspectos de la teoría, será conveniente indicar desde los principios algunas consideraciones generales acerca de dicha terminología.

Newton propone aquí cuatro 'cantidades' para el análisis: tiempo, espacio, lugar y movimiento. Luego establece, en el caso de cada una de éstas, las distinciones entre la magnitud absoluta y la relativa, la verdadera y la aparente, la matemática y la común. Este esquema es el marco conceptual dentro del cual se elaboran los conceptos espacio-temporales, y es importante reconocer que las distinciones indicadas encierran significado específico en el contexto de la física newtoniana, y no implican de ninguna manera distinción idealista entre lo esencial y la apariencia sensible. Al contrario, este esquema en su integridad se utiliza para la concepción de los aspectos espacio-temporales de los procesos sensibles del universo físico. Así, cuando Newton dice que espacio, tiempo, lugar y movimiento no pueden entenderse únicamente por su relación con los objetos sensibles, esto no quiere decir que Newton recurra aquí a concepciones idealistas o simplemente teístas para caracterizar dichas magnitudes. El problema más bien es que la concepción newtoniana de espacio y tiempo como 'cantidades verdaderas' en realidad no se ajusta a ninguna tradición filosófica anterior. Se trata de una teoría ajustada a la nueva ciencia física.

Para Newton, el espacio y el tiempo absolutos son 'cosas mismas',⁽⁶⁾ objetivamente existentes como tales, independientemente de los objetos materiales y sensibles. Por su propia naturaleza -es decir, por sus cualidades inherentes, propiamente espaciales y temporales-, constituyen componentes integrantes del universo físico. Se trata del espacio y tiempo físicos, y de la coexistencia del espacio y el tiempo con los objetos materiales en un mismo plano de la realidad objetiva de la naturaleza. El espacio y el tiempo absolutos no son reductibles a su aspecto métrico de extensión y duración respectivamente, sino que se conciben como 'cosas', físicamente presentes y dotadas de naturaleza propia, no obstante no ser sensibles, es decir, observables. De esta manera, el conjunto de las magnitudes físicas de Newton abarca la masa, las magnitudes espacio-temporales, y también magnitudes compuestas de la masa y componentes espacio-temporales, como en el caso de la cantidad de movimiento.

La concepción newtoniana del espacio y el tiempo físicos es el tema principal de las dos primeras partes del presente trabajo, y mi intención es la de sugerir las dificultades teóricas implicadas en dicha concepción. Como consideración general, es importante tener presente que Newton no hace distinción de modalidad entre las naturalezas esenciales del espacio y el tiempo, y sus naturalezas físicas. Al contrario, es por sus propiedades inherentes y esenciales que el espacio y el tiempo desempeñan papel físico en los procesos naturales. Esto ocurre de la misma manera en que las propiedades físicas de la materia son sus propiedades inherentes, constituyendo su modo de ser, en sentido ontológico.⁽⁷⁾

Es claro que en este sentido fundamental, la postura filosófica de Newton no es idealista. Por otra parte, como es sabido, él tenía la creencia de que el espacio absoluto constituye el 'sensorium de Dios' -la manifestación de la presencia de Dios en la naturaleza. Esta consideración se aduce con frecuencia para

señalar el carácter teísta de la conceptualización del espacio y el tiempo absolutos. Por ejemplo, el eminente físico teórico, Philipp Frank, sostiene que, cuando los físicos del siglo XVIII prescindieron de este aspecto teísta de la teoría newtoniana, su posición se quedó sin fundamentación.(8) Pero hay que señalar que, en los escritos del propio Newton, el concepto del 'senso-rium de Dios' se aplica sola y explícitamente al espacio absoluto. Es evidente, entonces, que Newton no intentaba lograr la integración de este concepto en su teoría física, puesto que no se preocupaba por extenderlo al tiempo. Y, sobre todo, es necesario distinguir entre el papel de Dios en el universo newtoniano y la fundamentación inductiva de los conceptos precisos, tanto de los cuerpos materiales (9) como de la existencia y las propiedades del espacio y el tiempo. Para Newton, Dios es también Creador de la materia y el mecanismo del universo. Sin embargo, dichas creencias no le sirvieron como punto de partida para una deducción ni de las magnitudes físicas ni de las leyes de dicho mecanismo. La postura de Newton es inductiva, y tiene su punto de partida en la experiencia. Así, en la Regla III de las 'Reglas para el razonamiento en la filosofía', (10) hace bien explícito el método inductivo para la conceptualización de las propiedades de los objetos materiales. De la misma manera, la teoría de espacio y tiempo no pretende tener una fundamentación en verdades 'superiores'. Al contrario, los conceptos de espacio y tiempo se formularon en relación con los otros conceptos centrales de la física: -la masa y la fuerza-; su marco de referencia conceptual es la teoría de la mecánica, más bien que cualquier esquema más amplio de la filosofía sistemática.

Así, volviendo al primer párrafo del Scholium de las Definiciones, puede advertirse que las distinciones entre tiempo, espacio, lugar y movimiento absolutos y relativos, verdaderos y aparentes, matemáticos y comunes, no implican la concepción de dos modalidades mutuamente exclusivas de la existencia. Es decir, estos términos no se conjugan para formar dos agrupaciones distintas y fijas, o sea, un grupo de espacio, tiempo, lugar y movimiento absolutos, verdaderos y matemáticos; y otro grupo de espacio, tiempo...relativos, aparentes y comunes. Al contrario, lo que pasa es que los términos se relacionan entre sí de maneras distintas, según la situación física en cuestión.(11) En particular, no resulta ninguna incongruencia en el tratamiento matemático del espacio y el movimiento relativos. De hecho, esta suposición teórica constituye uno de los fundamentos claves de la mecánica newtoniana.

Para concluir estas consideraciones introductorias, quisiera hacer mención del orden seguido en este trabajo respecto al espacio y el tiempo. Newton define los conceptos de tiempo, espacio, lugar y movimiento en ese orden. Quizás sea aventurado especular acerca de por qué puso el tiempo primero. Sin embargo, parece razonable suponer que este orden responde, al menos en parte, a la gran influencia de la contribución de Galileo al entendimiento del tiempo como magnitud física. Tenemos que recordar que, como consecuencia de la noción galileana de la aceleración, resulta que en las ecuaciones del movimiento, la distancia o posición espacial es una función del tiempo. Así, el orden newtoniano hace

hincapié en la importancia del papel físico del tiempo. Sin embargo, en este trabajo he cambiado el orden para poder considerar el espacio primero, y es necesario justificar este procedimiento. La razón principal del orden seguido aquí es que es una preocupación central del presente trabajo mostrar que el tiempo newtoniano, en cuanto empírico, depende del espacio en aspectos importantes; y, para advertir esto, es imprescindible considerar el espacio primero.

Notas. Capítulo 1.

¹ Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World, redactado y anotado por Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, California, 1960. (4ª edición)

La versión original se escribió en latín y se publicó por la Sociedad Real (Societatis Regiae) con el título, Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, Imprimatur S. Pepys, London, 1687. La versión inglesa de Andrew Motte apareció en 1729, y fue basada en la tercera edición en latín, de 1726. (Newton murió en 1727.) La aceptada versión modernizada de Cajori es una revisión de la traducción de Motte. El Dr. Cajori, catedrático de la historia de las matemáticas en la Universidad de California, murió en 1930, dejando esta obra lista para la prensa. La primera edición salió en 1934, bajo el cuidado de R.T. Crawford, y las ediciones posteriores fueron de la misma versión.

² Principia, pág. 2. -Todas las referencias a los Principia se refieren a la versión de Cajori.

³ Véase el texto completo de este Scholium en el Apéndice.

⁴ Ernst Mach (1838-1916) fue uno de los teóricos más influyentes en el desarrollo de la tendencia empirista en la ciencia física del siglo XX. Hizo su crítica de Newton, todavía desde el punto de vista de la física clásica, en la que las leyes del movimiento de Newton se consideraron universalmente válidas.

⁵ Principia, pág. 6.

"Hitherto I have laid down the definitions of such words as are less well known, and explained the sense in which I would have them to be understood in the following discourse. I do not define time, space, place and motion, as being well known to all. Only I must observe that the common people conceive these quantities under no other notions but from the relations they bear to sensible objects. And thence arise certain prejudices, for the removing of which it will be convenient to distinguish them into absolute and relative, true and apparent, mathematical and common." (5)

⁶ En la versión de Cajori, 'things themselves'.

⁷ A este respecto, es importante notar que Newton hizo hincapié en la distinción entre la fuerza de inercia, considerada como 'la fuerza innata a la materia' (Definición III), y la fuerza de la gravitación, cuyo origen considera como desconocido. Esta distinción pone de relieve un problema central de la física newtoniana, que repercute en la concepción de espacio. El criterio filosófico

fico, que hace que el problema del carácter de la fuerza de la gravitación surja para la 'filosofía experimental' del siglo XVII, se revela claramente en la famosa carta de Newton a Richard Bentley, escrita en 1692/3, en donde Newton dice:

"It is inconceivable that inanimate brute matter should, without the mediation of something else which is not material, operate upon and affect other matter without mutual contact, as it must be if gravitation, in the sense of Epicurus, be essential and inherent in it. And this is one reason why I desired you would not ascribe innate gravity to me. That gravity should be innate, inherent, and essential to matter, so that one body may act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of anything else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity that I believe no man who has in philosophical matters a competent faculty of thinking can ever fall into it."

(Citado de Newton's Philosophy of Nature - Selections from His Writings, Hafner, N.Y., 1953, pág. 54.)

Así, el problema de la 'acción a distancia' se enfoca aquí desde el punto de vista de que la propiedad de la gravitación no puede atribuirse a la materia. El aspecto espacial de este problema se trata en el Capítulo II, Sec. c, #2.

⁸ Philipp Frank, Philosophy of Science, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1957, Cap. IV, Sec. 8, págs. 116 ff.

⁹ Newton emplea el término 'cuerpo' explícitamente en el sentido de la magnitud masa o cantidad de materia; y el término se usa en ese mismo sentido en el presente trabajo.

¹⁰ Principia, Libro III, "System of the World", págs. 398-400. Véase el texto completo de las 'Reglas' en el Apéndice.

¹¹ Esta consideración general tendrá que modificarse en el caso de tiempo. Véase Capítulo VIII, Sec. b y, en particular, Nota 14.

Parte A. EL CONCEPTO NEWTONIANO DE ESPACIO

Capítulo II. Espacio Absoluto.

Después del primer párrafo ya citado del Scholium de las Definiciones, Newton presenta una serie de formulaciones respecto al tiempo, espacio, lugar y movimiento. Todas estas magnitudes se conciben aquí bajo la noción de la distinción entre lo absoluto y lo relativo y, en el caso de cada una de ellas, se sugiere el carácter de la relación entre la magnitud absoluta y su aspecto relativo. En el caso de espacio, esta relación se define de manera clara e inequívoca. Dice Newton:

"El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin relación a ninguna cosa externa, permanece siempre el mismo e inmóvil. El espacio relativo es alguna dimensión o alguna medida, móvil, de los espacios absolutos; la cual nuestros sentidos determinan por la posición de ella en relación con los cuerpos; y la que comúnmente se toma como el espacio inmóvil; tal es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo, o celeste, determinado por su posición con respecto a la tierra. El espacio absoluto y el espacio relativo son iguales de figura y magnitud: pero no permanecen siempre iguales numéricamente. Pues, si la tierra, por ejemplo, se mueve, entonces un espacio de nuestro aire, el que relativamente y con respecto a la tierra permanece siempre el mismo, será en un tiempo una parte del espacio absoluto en el cual el aire entra; en otro tiempo será otra parte de él, y así, entendido absolutamente, será continuamente cambiado." (1)

En cuanto al carácter general de esta formulación de la noción de espacio, sería difícil exagerar la importancia de que tenemos aquí, desde los principios, la advertencia explícita de que el espacio relativo se concibe en función del espacio absoluto, y no simplemente en relación a los cuerpos sensibles. El espacio relativo tiene carácter preciso en el sentido de que comparte algunas propiedades del espacio absoluto, al mismo tiempo que se lo concibe en relación con los cuerpos en movimiento. Así, el estudio del concepto de espacio tiene que partir de la noción de espacio absoluto, para poder ver después cuáles de las propiedades de éste se conservan en el espacio relativo.

a. El postulado de la existencia del espacio absoluto.

Para Newton, el espacio absoluto existe en sí mismo, independientemente de los cuerpos sensibles, y tiene su 'propia naturaleza'. De esta manera, se plantea la noción de espacio como tal, dotado de extensión propia, frente a la concepción cartesiana del plenum de la realidad material extensa.(2)

Es notable que Newton ni siquiera aborda el problema de la fundamentación teórica del postulado de la existencia en sí del espacio; lo afirma, simplemente, y el carácter lógico de la justificación de esta afirmación no es explícito. Sin embargo, esto no nos permite concluir que Newton haya abandonado su postura empírica en este caso. Es decir, cuando se trata de un Newton, no es permisible suponer, sin más, que se trata de una escandalosa inconsecuencia metodológica. El problema para la interpretación es más bien el de ver por qué, en el enfoque newtoniano, los postulados de la existencia del espacio y el tiempo absolutos no implicaban ninguna inconsecuencia.

Es claro, desde luego, que las definiciones del espacio y el tiempo se presentan como conceptos de la filosofía natural. En las primeras líneas del Libro III de los Principia, Newton dice:

"En los libros anteriores, he asentado los principios de la filosofía; principios no filosóficos sino matemáticos: tales que sobre ellos, podemos construir nuestros razonamientos en las investigaciones filosóficas. Estos principios son las leyes y las condiciones de ciertos movimientos, y poderes o fuerzas, que principalmente conciernen a la filosofía; pero, por miedo de que (estos principios) en sí mismos pudieran haber aparecido secos y áridos, los he ilustrado, aquí y allá, con algunos escolios filosóficos, que dan una explicación de tales cosas que son de naturaleza más general, y sobre las cuales la filosofía parece ser principalmente fundada; tales como la densidad y resistencia de los cuerpos, los espacios enteramente desprovistos de cuerpos, y el movimiento de la luz y de los sonidos....." (3)

Así, las nociones espacio-temporales del Scholium de las Definiciones se presentan como pertenecientes a las concepciones generales de la 'filosofía', es decir, de la conceptualización científica de la naturaleza. Y, para esta clase de concepciones, Newton siempre exige una fundamentación inductiva. Dice, por ejemplo:

"No conocemos la extensión de los cuerpos de otro modo que por nuestros sentidos, y éstos no la alcanzan en todos los cuerpos; pero, puesto que percibimos la extensión en todos los cuerpos que son sensibles, entonces la atribuimos universalmente a todos los demás también..... Que todos los cuerpos son móviles y dotados de ciertos poderes (que llamamos la inercia) de persistir en su movimiento o en su reposo, lo inferimos únicamente de las propiedades semejantes observadas en los cuerpos que hemos visto." (4)

Pero el párrafo de las 'Reglas' del que se toma esta cita, no puede considerarse como una descripción completa del método

inductivo de Newton. Es una característica general de la obra newtoniana que mucho queda implícito. Así, en la definición ya citada de espacio relativo, no nos dice nada de los espacios de los procesos y, sin embargo, un espacio relativo es antes que nada el espacio de un proceso. Empleando el método inductivo, Newton infiere toda una serie de conceptos fundamentales y proposiciones que no se explican simplemente como hechos generales, si no sólo como inferencias inductivas de carácter teórico, que se encuentran consecuentes con los datos de la experiencia. Se trata aquí de los propios conceptos de las magnitudes de la física newtoniana -la masa, la cantidad de movimiento, la fuerza, espacio y tiempo; y, además, de las propias leyes del movimiento. Es decir, con los conceptos de espacio y tiempo estamos en un plano teórico. Se trata de una teoría que se comprueba por la posibilidad de deducir de ella hechos observables. Se postula la existencia del espacio y el tiempo absolutos, dotados de ciertas propiedades, como concepción teórica, de manera análoga a como se asienta cierta definición de la cantidad de movimiento, proponiendo así una resolución a la cuestión de la medida del movimiento. Asimismo, la masa se define teóricamente.

Desde este punto de vista, se puede hacer una distinción entre el método inductivo de postular existencias, y el carácter de las existencias postuladas. Porque el problema que surge es el de saber, si el método se usa de modo estricto, ¿entonces, se justifican tales postulados de existencias absolutas? (5) Para Newton, la respuesta es que sí. Y este tipo de postulado, como su teoría física en su integridad, quedan incluidos en su concepción de conocimiento inductivo cuando dice,

"En la filosofía experimental, debemos considerar las proposiciones inferidas por inducción general de los fenómenos, como exactamente o casi verdaderas, a pesar de cualesquiera hipótesis contrarias que se imaginen, hasta cuando ocurran otros fenómenos, por los cuales aquellas (proposiciones) pueden hacerse o más exactas o sujetas a excepciones. Debemos seguir esta regla, para que el argumento de la inducción no sea eludido por hipótesis." (6)

En este marco conceptual, las afirmaciones respecto a la existencia y los conjuntos de las propiedades del espacio y el tiempo, respectivamente, pueden entenderse como postulados inductivos cuya validez consiste en que se integran en una teoría física que había sido comprobada por la experiencia. Al mismo tiempo, son componentes teóricos de la física newtoniana en su integridad.

Por una parte, se trata de postulados de carácter ontológico, puesto que en ellos se propone la conceptualización de la verdadera naturaleza de espacio y tiempo. Pero, por otra parte, el carácter inductivo del método tiene la consecuencia importante de que no se pretende llegar a conocimientos completos. Por ejemplo, Newton nunca aceptó la acción de la fuerza gravitacional a través de los espacios vacíos, y consideró la hipótesis de un éter raro. No vio la posibilidad de fundamentar la acción a distancia en la naturaleza cualitativa de espacio; sin embargo, tenía que excluir la consideración del éter de su teoría de la gravitación, para poder considerar la distancia como tal, en los 'espacios libres'.

Veremos este aspecto del problema de la conceptualización de espacio en detalle más adelante. Se trata del caso ejemplar de cómo el postulado de la existencia de espacio absoluto responde a la exigencia de fundamentar la magnitud distancia, que figura en la ley de la gravitación; mientras que, al mismo tiempo, no se pretende resolver el problema de la causa de dicha fuerza y de su propagación. En general, las nociones de espacio y tiempo absolutos se limitan por ser concepciones de la 'filosofía experimental'; y esta limitación se impone dentro del marco conceptual de la época. Es decir, es importante tener presente que, para Newton, concebir algo parecido a un campo sería una empresa especulativa; mientras que la tradición respecto al vacío estaba a la mano, por así decir. Esto de que lo especulativo y las inferencias consideradas legítimas sean diferenciados dentro del marco conceptual de una época, es decisivo para explicar cómo Newton hubiera postulado la existencia de espacio y tiempo absolutos sin abandonar su postura inductiva.

Como se ha advertido, Newton tenía la creencia de que el espacio absoluto constituye el 'sensorium de Dios'. Pero en el propio Scholium de las Definiciones, no señala esta creencia.(7) Mientras que él mismo califica este Scholium como 'filosófico', no introduce aquí el problema de los orígenes de espacio y tiempo, sino que se limita a postular su existencia y las de sus propiedades que parecen implicadas por los fenómenos del movimiento. A la vez, las propiedades que sí se especifican, se consideran como pertenecientes a las propias naturalezas del espacio y el tiempo. Así, se trata de una concepción ontológica cuyo contenido es limitado por el enfoque de la ciencia inductiva.

Las propiedades del espacio absoluto.

Las propiedades del espacio absoluto pueden considerarse bajo las nociones de medio, homogeneidad e inmovilidad. El complejo concepto newtoniano de lugar se integra en la concepción de todas estas propiedades y, por lo tanto, dicho concepto no se trata separadamente aquí. Por otra parte, la continuidad tanto del espacio como del tiempo se da por entendida en la exposición newtoniana. No se encuentra en el Scholium de las Definiciones ninguna preocupación por precisar el significado de este concepto. El lector podría sacar la impresión de que lo continuo es simplemente lo infinitamente divisible. Sin embargo, el propio Newton, siguiendo los lineamientos propuestos por Galileo, hizo contribuciones importantes al concepto de la continuidad del movimiento en el espacio y el tiempo. Por lo tanto, es necesario considerar esta propiedad explícitamente; sólo que, en el presente trabajo, se ha optado por abordar este tema en conexión con el tiempo.(8) De manera que, en la exposición de las propiedades de espacio que sigue, la continuidad se da por entendida sin que se plantee aquí la cuestión de su significado físico para Newton.

b. El espacio absoluto en su carácter de medio.

Como hemos visto, en la Introducción al Libro III de los Principia -citada en la sección anterior- Newton se refiere al Scholium de las Definiciones como el lugar en el cual se tratan los espacios vacíos. Sin embargo, la caracterización de espacio que se encuentra en dicho Scholium no hace referencia alguna a la noción de vacuidad. Hay aquí la apariencia de una discrepancia, y es de interés partir de este problema para la consideración del espacio absoluto como medio. Porque, lo que se pondrá de manifiesto es que el vacío subsiste como problema para Newton, y no constituye su punto de partida para el planteamiento de las propiedades de espacio.

Tiene que tomarse en cuenta que las nociones de espacio vacío y espacio como tal en el enfoque newtoniano no son equivalentes, salvo en el sentido de que, si se habla del espacio vacío, evidentemente se está hablando del espacio como tal. Pero esta consideración no puede invertirse. Al contrario, la naturaleza del espacio es justamente la de permitir la ocupación, es decir que sus propiedades espaciales le pertenecen independientemente de que sea o no ocupado. Para Newton, el espacio absoluto existe como el medio de toda otra realidad extensa, inclusive el discutido éter, si éste existe.(9) Además, cuando Newton habla de los grandes espacios vacíos del sistema solar, se refiere explícitamente a los espacios desprovistos de cuerpos, o sea, espacios no ocupados por cuerpos de cierta masa, cuya masa tendría que tomarse en cuenta como una de las magnitudes determinantes del movimiento en dichos espacios. Así, está hablando del espacio como tal en el sentido de que éste figura como espacio en las situaciones físicas. Pero un éter sumamente raro, cuya masa se considera despreciable por definición, podría o no existir en dichos espacios. Así, Newton contrapone a la masa el espacio como tal, dejando abierto el problema del éter vs. el vacío. Esta consideración explica el carácter de la definición newtoniana de la masa:

"La cantidad de materia es la medida de ésta, proveniendo de su densidad y volumen conjuntamente. ...En este lugar no tomo en cuenta un medio, si es que existe tal cosa, que se difunde libremente por los intersticios entre las partes de los cuerpos....."(10)

De esta manera, en las primeras líneas de los Principia, Newton señala que las magnitudes de su física se conciben independientemente de la controversia de la época acerca del vacío vs. el éter. La masa, considerada como magnitud determinante del movimiento, existe, distinta del espacio como tal. Y, en los grandes espacios del universo, el contenido desconocido -si lo hay- no se comporta como masa en relación con los cuerpos que se mueven en dichos espacios. Para expresar esta noción, Newton empleó el término, 'espacios libres', (11) cuya importancia teórica quizás no ha sido reconocida suficientemente. El espacio libre de Newton tiene todas las propiedades del espacio como tal; conserva el carácter propiamente espacial a la vez que admite, en principio, la posibilidad de un contenido que no se comporta

como masa apreciable, o aun de un contenido de otra índole desconocida. Así el 'espacio libre' es un concepto que hace posible la consideración empírica de un medio propiamente espacial.

La noción newtoniana de espacio como tal parte del concepto de lugar. El espacio absoluto se concibe como constituido por los 'lugares primarios' (primary places) que son 'los lugares de sí mismos y de todo lo demás'. El espacio se concibe como lugares como tales, y este carácter de ser lugares pertenece a la propia naturaleza del espacio. Así, hablando tanto del tiempo como del espacio, Newton dice:

"Ya que los tiempos y los espacios son, por así decir, los lugares tanto de sí mismos como de todas las demás cosas... Es por su esencia o naturaleza que son lugares....."(12)

Dentro de la notoria economía de expresión que caracteriza la obra de Newton, se establece así la noción de que el espacio y el tiempo absolutos tienen la naturaleza inherente de medios (13), existentes independientemente de lo que los ocupe. La ocupación de un lugar del espacio absoluto simplemente pone de manifiesto esta naturaleza inherente del espacio. La ocupación no constituye de ninguna manera una negación de la espacialidad del lugar ocupado, ni cambia las propiedades de éste. El espacio ocupado sigue existiendo lo mismo, sin haber cambiado; y esto trae aparejado que nunca se rompa la continuidad del espacio, si no que el medio espacial continuo subyace a toda existencia física. Tenemos aquí, entonces, el significado fundamental de que el espacio absoluto "permanece siempre el mismo" ("remains always similar").

Es claro, por lo tanto, que Newton no recogió la tradición de los atomistas griegos sin modificarla. Como Aristóteles lo expone, (14) el vacío de Leucipo y Demócrito nos impresiona por su naturaleza de vacuidad. Es decir, ontológicamente se concibe como lo contrario a 'el lleno', como la negación de la corporeidad, y, en este sentido, como el 'no-ser'. Donde existe 'el lleno' no existe 'el vacío'. Y, siguiendo esta tradición, la controversia del siglo XVII acerca de la existencia del vacío se refiere únicamente a los espacios no ocupados por cuerpos. (15) En cambio, la concepción newtoniana de espacio no implica la negación de lo material. Al contrario, el espacio absoluto es el continuo de los lugares de los cuerpos y de su movimiento. Esto es un concepto de la coexistencia de los cuerpos y el espacio, y suministra la base para considerar que los procesos físicos no sólo se desarrollan en el espacio, sino además en relación con el espacio.

Por otra parte, es importante advertir que, desde el punto de vista de la filosofía sistemática, esta concepción newtoniana de medio constituye el rechazo de la noción tradicional de que la coexistencia del espacio y un cuerpo que lo ocupe sería contradictoria a la razón. Como dice Platón a este respecto en el Timeo:

"Pero la razón verdadera y exacta, vindicando la naturaleza del verdadero ser, sostiene que, mientras dos cosas sean distintas, no pueden existir la una de ellas en la otra, y así ser uno y también dos al mismo tiempo."(16)

En efecto, el concepto de medio plantea el problema de concebir cómo los lugares primarios del espacio continuo sean los lugares de sí mismos y de todas las demás cosas.

c. La homogeneidad del espacio absoluto.

La homogeneidad del medio espacial newtoniano puede considerarse como la del orden métrico de lugares que constituyen el espacio físico. Esta concepción compleja se expone aquí en torno a tres temas: primero, la tradición conceptual respecto a la homogeneidad métrica de la realidad extendida; segundo, la noción newtoniana del espacio físicamente homogéneo en el sentido de ser el espacio no perturbante de los procesos físicos; y, tercero, el papel físico del espacio homogéneo en relación con la fuerza.

1. Los antecedentes de la homogeneidad métrica del espacio absoluto.

Tenemos que tener presente que en el siglo XVII la posibilidad de la existencia de distintas métricas espaciales y, por lo tanto, la posibilidad de variaciones métricas en las distintas regiones o en los diferentes niveles del universo todavía no se había concebido. Se dió por entendido que la geometría euclídea na fuera válida para cualquier caso de la extensión, y en cualquier lugar del universo. Sin embargo, no existió el mismo tipo de acuerdo universal respecto al propio concepto de espacio. La noción de la uniformidad métrica del mundo físico había persistido desde la antigüedad, mientras que el espacio se había concebido de maneras distintas. Además, el desacuerdo a este respecto fue muy hondo, ya que hubo una tradición persistente, desde Platón y Aristóteles hasta Descartes, en la que la existencia misma del espacio, a diferencia de la de la materia, fue explícitamente rechazada.

A este respecto, es importante advertir que la geometría euclídeana no se refiere, por sus propias Definiciones, Postulados y Nociones Comunes, al espacio, sino a los términos para la conceptualización de la extensión y de las figuras.(17) A. d'Abro hace notar que la geometría euclídeana puede considerarse la de los cuerpos rígidos.(18) Así, la noción de la métrica de la extensión podía considerarse independiente de la noción de espacio, y la homogeneidad de la extensión podía concebirse conjuntamente con otras propiedades espaciales variables, y, también, con la inexistencia del espacio como tal, extensa.

Por ejemplo, en la teoría de los atomistas griegos, es claro que la misma métrica se atribuye al vacío y a los átomos, mientras que la existencia de éstos es mutuamente exclusiva.(19) Es decir, el vacío por definición excluye el lleno, y vice versa. Así, la uniformidad métrica no se refiere a un continuo homogéneo en cuanto a su corporeidad o espacialidad, sino al conjunto, en su cambiante configuración, de estos dos componentes opuestos de la existencia.

En el caso de la teoría aristotélica, la uniformidad métrica caracteriza el continuo corpóreo del universo, éste siendo compuesto de tres regiones principales: la tierra, el cielo y la región entre ellos. En este esquema, las regiones respectivas tienen propiedades peculiares tales que una región constituye el 'lugar natural' para ciertos objetos físicos correspondientes, cuyo 'movimiento natural' se dirige hacia ella.(20) Dichos lugares aristotélicos se conciben como constitutivos de un continuo corpóreo. Aun las órbitas de los cuerpos celestes se conciben como corpóreas(21) y la existencia de espacios vacíos se rechaza explícitamente. Para Aristóteles, no existe la vacuidad. Al mismo tiempo, las propiedades de los lugares varían de un lugar a otro, de suerte que el movimiento de un cuerpo es influido de maneras distintas según el lugar en el cual se encuentra. Sin embargo, la homogeneidad métrica de este universo aristotélico no entra en duda.

Tomando en cuenta esta distinción histórica entre la noción de la extensión métrica de la existencia, y la noción de espacio como tal, extenso, es claro que, cuando Newton propuso la noción de espacio absoluto en el sentido de un medio continuo, existente en sí mismo, la uniformidad métrica de este espacio se dió por entendida. Por lo tanto, a este respecto, el espacio absoluto no implica nada nuevo. De hecho, el carácter métrico de espacio no hace surgir problema alguno para Newton, porque se acepta, como una verdad evidente, el principio de la homogeneidad métrica de la realidad extensa.

#2. El carácter físicamente no perturbante del espacio absoluto.

Newton postula la existencia del espacio como tal que, "en su propia naturaleza....permanece siempre el mismo." Esto es un concepto de espacio homogéneo e inmutable, y el problema para la interpretación es el de saber cómo la homogeneidad física de este espacio se integra en la física newtoniana. A este respecto, el punto de vista sostenido aquí es que la homogeneidad física del espacio absoluto sirve para fundamentar la magnitud distancia, no sólo en la cinemática sino también en la dinámica.

En el enfoque newtoniano, los procesos no acontecen en el espacio en el sentido de que éste sea un mero trasfondo que no guarde ninguna relación con aquéllos. Al contrario, las magnitudes espaciales -fundamentalmente la distancia- se integran en

las leyes naturales. Es importante reconocer que la síntesis newtoniana no sólo incorpora la concepción del papel físico del tiempo que se debe a Galileo, sino que además plantea el problema del papel físico del espacio desde el punto de vista de la dinámica.

A este respecto la teoría newtoniana responde primariamente al fenómeno de la gravitación. En la consideración de las órbitas planetarias -una preocupación central de la física del siglo XVII- resultó necesario concebir que la distancia como tal desempeñara el papel de magnitud determinante en la ley de la gravitación universal. Así, surgió el famoso problema de la 'acción a distancia', que se suele interpretar en el sentido de que la fuerza gravitacional se transmita en ausencia de medio material. Desde este punto de vista, el problema es el del papel del espacio vacío. Pero teóricamente, la 'acción a distancia' pudo enfocarse en términos del problema delimitado de la fundamentación de la distancia. Para Newton, sea cual fuere el desconocido mecanismo de la transmisión de la fuerza gravitacional, esta fuerza se había encontrado siempre en proporción inversa a la distancia como tal.

Por otra parte, Newton rechazó la hipótesis de que un éter que llenara el espacio transmitiera la fuerza gravitacional. Consideró imposible que los espacios del sistema solar estuviesen llenos de un éter sutil porque, por sutil que fuera, siendo material y llenando el espacio completamente, semejante éter sería denso y de masa enorme y ofrecería resistencia apreciable a los movimientos de los planetas, de manera que éstos perderían velocidad sensible y continuamente. Pero en la realidad no hubo ningún indicio de semejante resistencia. Así, un éter compatible con los movimientos observados tendría que ser sumamente raro(22) y, por lo tanto, no resultó posible para Newton evitar la consideración del espacio vacío entre las partículas, por así decir, del éter.

En esta situación, puesto que la noción del éter fué una especulación sin fundamento empírico,(23) mientras que todos los datos apovaron el papel de la distancia, la solución newtoniana consistió en fundamentar la distancia en el espacio físico. Se supone que existe el espacio como tal, cuyo carácter físico homogéneo y cuya métrica fundamentan la distancia, cualesquiera que sea la explicación desconocida del papel de la distancia en el proceso de la gravitación. Es decir, dicha homogeneidad física del espacio como tal deja abierta la cuestión de alguna causa desconocida que opere en proporción a la distancia. Y esto se encuentra congruente con la consideración de que, en los grandes espacios aparentemente vacíos del sistema solar, no habría ningún contenido que pudiera perturbar los movimientos de los planetas que ocurren de acuerdo con la ley de la gravitación. Desde este enfoque, para poder considerar que las medidas de esas extensiones tengan significado físico, es evidente que se las considera como medidas del espacio como tal. Sólo que, como veremos, Newton no consideró necesario que dichos espacios se tomaran como absolutamente vacíos, sino simplemente 'libres'.

Para establecer su noción de espacio físico, Newton tenía que enfrentarse no sólo a la tradición aristotélica sino, de modo más inmediato, a la mecánica de Descartes, que contaba con aceptación general en su época. En la teoría cartesiana, el universo físico se considera como un continuo material cuyos espacios aparentemente vacíos en realidad se constituyen de un éter sutil, y el éter desempeña papel dinámico en el mecanismo de la naturaleza. En esta teoría de los 'vórtices', (24) el propio éter se mueve y se configura, entrando en los procesos físicos como causa de las órbitas de los planetas. Así, el éter, introducido en la conceptualización de la naturaleza para llenar los espacios aparentemente no ocupados por objetos sensibles, al mismo tiempo se integra en el mecanismo del universo cartesiano como componente material y móvil; y, de esta manera, el plenum aristotélico se transforma en un mecanismo universal. Lo atractivo de esta teoría desde el punto de vista de la filosofía sistemática es evidente; y, a pesar de que Descartes no logró darle expresión cuantitativa, la teoría de los vórtices mantuvo su posición dominante en Francia durante casi medio siglo después de la primera publicación de los Principia, hasta Voltaire se interesó en difundir las ideas de la física newtoniana.

Frente a la tradición del plenum y su forma cartesiana, Newton afirma la existencia de los 'espacios libres' y explica este término, que se utiliza a lo largo de los Principia, en varios textos que tienen el carácter de discusión cualitativa. Es de interés citar en primer lugar la primera sección del tratado, El sistema del mundo, (25) que es una exposición del mecanismo del sistema solar. Aquí Newton presenta su concepto de espacio no-perturbante en relación con la tradición histórica respecto a este problema. Después de hacer notar que hubo desacuerdo entre los teóricos de Egipto y Grecia acerca de la cuestión de saber si los planetas giran alrededor del sol o de la tierra, Newton dice:

"...hubo acuerdo común, entre ambos partidos, de que los movimientos de los cuerpos celestes se realizaban en espacios enteramente libres y desprovistos de resistencia. El capricho de orbes sólidos, introducido por Eudoxio, Calipo, y Aristóteles, pertenecía a una fecha posterior, cuando la filosofía antigua empezó a deteriorarse y a ceder lugar a las nuevas ficciones predominantes de los griegos.

"Pero sobre todo, los fenómenos de los cometas de ninguna manera pueden tolerar la idea de órbitas sólidas.... Y, tal como la consecuencia ineludible de la hipótesis de órbitas sólidas, mientras ésta prevalecía, era la de que los cometas eran metidos en los espacios por debajo de la luna; así, cuando las observaciones posteriores de los astrónomos restituyeron los cometas en sus lugares antiguos en los cielos más elevados, necesariamente se les quitó de dichos espacios celestes el estorbo de las órbitas sólidas." (26)

Así, partiendo de consideraciones empíricas respecto a las trayectorias de los cometas, Newton advierte que es necesario postular "espacios enteramente libres y desprovistos de resistencia".

Los textos más sugestivos con respecto a este problema, y en los cuales se vislumbra el hilo del razonamiento newtoniano, son los de las famosas Preguntas de la última parte de la Óptica. Aquí, por un lado, se rechaza el éter cartesiano; mientras que, por otro lado, se plantea el papel de la distancia. En la Pregunta 28, Newton dice:

"...en contra de llenar los Cielos con Medios flúidos, a me nos que éstos sean extremadamente raros, una gran Objeción proviene de los Movimientos regulares y muy perdurables de los Planetas y Cometas en toda clase de Trayectos por los Cielos. Pues, de aquí es manifiesto que los Cielos son desprovistos de toda Resistencia sensible y, como consecuencia, de toda Materia sensible."(27)

Y, un poco más adelante, añade:

"Un Flúido denso no sirve para explicar los Fenómenos de la Naturaleza, pues los Movimientos de los Planetas y Cometas se explican mejor sin él. Éste sirve únicamente para perturbar y retardar los Movimientos de dichos grandes Cuerpos, y lograr que la Estructura de la Naturaleza languidezca..... Y como no es de utilidad alguna, e impide las operaciones de la Naturaleza, y la hace languidecer, asimismo no hay evidencia alguna de su Existencia, y por lo tanto debería ser rechazado."(28)

Luego, Newton plantea la distinción entre la ley y la causa de la gravitación. Parte de la consideración de que la causa no tiene que buscarse necesariamente en la 'materia densa'; y, a este respecto, recurre a la tradición de los atomistas griegos,

"...quienes pusieron un Vacuo y Átomos, y la Gravedad de Átomos como los primeros Principios de su Filosofía, y tácitamente atribuyeron la Gravedad a alguna otra Causa que la Materia densa."(29)

La causa de la gravitación, señala Newton, tiene que distinguirse de la ley de dicho proceso. La ley describe el mecanismo del proceso que se manifiesta en los fenómenos observados y tiene validez no obstante que la causa permanezca desconocida. Son justamente dichos fenómenos que apuntan hacia una causa desconocida. Así, descubrir dicha causa sería descubrir por qué la distancia sea magnitud determinante de la gravitación.

En cuanto a la causa de la gravitación, Newton pregunta por el contenido de los espacios:

"¿Qué está allí en lugares casi vacíos en cuanto a Materia? y, ¿de dónde proviene el que el Sol y los Planetas gravitan el uno hacia el otro, sin Materia densa entre ellos?"(30)

Estas preguntas lo llevan a considerar que la explicación general debe buscarse en la naturaleza de la fuerza. Es decir, partiendo de la consideración de que la ley de la gravitación encierra el indicio de la naturaleza de la causa, en el sentido de apuntar hacia la noción de que la fuerza gravitacional sea

caracterizada por la acción a distancia, Newton propone la noción general de que existen principios activos del movimiento, tales como la gravitación, el magnetismo y la electricidad, cuya naturaleza es actuar a distancia. Esta noción se formula en el primer párrafo de la Pregunta 31:

"¿No es que las Partículas pequeñas de los Cuerpos poseen ciertos Poderes, Virtudes, o Fuerzas, por los cuales actúan a distancia, no sólo sobre los Rayos de Luz para reflejarlos, refractarlos e inflexionarlos, sino también la una sobre la otra, para producir una gran Parte de los Fenómenos de la Naturaleza? ...Cómo se realizan estas Atracciones, no lo considero aquí... Porque tenemos que aprender de los Fenómenos de la Naturaleza cuáles cuerpos se atraen entre sí, y cuáles son las Leyes y Propiedades de la Atracción, antes de que preguntemos por la Causa por la cual la Atracción se realiza. Las Atracciones de Gravedad, Magnetismo y Electricidad, alcanzan a distancias bien sensibles, y así han sido observadas por Ojos vulgares, y puede que existan otras que alcanzan a distancias tan pequeñas como para haber escapado la Observación hasta ahora....."(31)

Newton estaba pensando así que las fuerzas causantes del movimiento manifiestan sus efectos a distancia, de suerte que esto explicaría que la distancia en el espacio homogéneo figurase en las leyes de los procesos como magnitud determinante. El espacio implicado aquí es físico, pero no es material. Suministra el medio para la operación de las fuerzas a distancia, por así decir. No es necesariamente vacío en absoluto, pero no tiene contenido perturbante. Y cuando este carácter no perturbante del espacio físico se conjuga con su homogeneidad métrica, tenemos que la noción de espacio absoluto fundamenta el concepto de la distancia en el sentido de que dos distancias iguales siempre tienen un mismo significado físico.

El concepto de la distancia que se encuentra implícito en el pensamiento de Newton me parece ser el de que la distancia significa una medida del espacio, y no es el concepto de una pura extensión. Porque este concepto, en su empleo newtoniano, requiere de un substrato físico, homogéneo. Si no fuera así, la distancia no podría entrar en la ley de la gravitación como magnitud independiente. Es decir, la única magnitud continua que se expresa en el concepto de la distancia es el espacio como tal. De manera que una distancia especificada es una medida del espacio. Para Newton, esto no impide que exista alguna causa desconocida de la gravitación. Lo importante aquí es que el espacio es físicamente tan real como la masa.

Por otra parte, la mismidad del espacio absoluto sirve de fundamentación a que cualquier parte de los espacios absolutos puede ser el medio espacial de cualquier proceso, y puede admitir la ocupación por cualquier cuerpo que se encuentra en movimiento. De esta manera, se fundamenta el aspecto espacial de la invariancia. Al mismo tiempo, desde el punto de vista empírico, el espacio aparentemente vacío se enfoca como el 'espacio libre' -es decir, el espacio considerado como tal, cualesquiera que sea su contenido desconocido que no se comporte como masa apreciable.

#3. El espacio homogéneo y la fuerza.

Newton postula que el espacio y el tiempo son órdenes inmutables de lugares -los lugares de sí mismos y de todo lo demás. Dichos órdenes son matemáticos en el sentido de que, por su propia naturaleza, son uniformemente métricos. Este carácter métrico del espacio y el tiempo hace posible considerar que cierta cantidad de movimiento espacio-temporal, con dirección y sentido, sea causada por cierta cantidad de fuerza, ésta concebida como vector. De manera que se presenta el problema de entender el papel físico del espacio métrico en esta relación. En nuestro siglo, por ejemplo, se ha hecho la pregunta, refiriéndose a la física newtoniana, ¿cómo 'sabe' la masa dónde encontrar el camino recto de su movimiento inercial, o, en general, su trayectoria espacial consecuente con las fuerzas impuestas a ella? A. d'Abro, por ejemplo, considera que la métrica del espacio newtoniano constituye en cierto sentido una propiedad dinámica. Es decir, se forma un 'campo métrico' cuyos caminos se imponen a las masas.(32) Pero si nos quedamos dentro del enfoque newtoniano, el problema se plantea más bien en términos de que las fuerzas causan los movimientos espaciales correspondientes. El espacio métrico permite los movimientos apropiados, y el espacio libre no los perturba. Es decir, el espacio de por sí admite cualquier movimiento, mientras que la determinación de la trayectoria depende de la fuerza. Se trata de que es la naturaleza de la fuerza a causar movimiento.

Esta concepción fundamental de la física newtoniana se encuentra expuesta en textos distintos. Podemos citar primero la sección de El sistema del mundo titulada, "El principio del movimiento circular en los espacios libres". Aquí Newton da por entendida la experiencia universal de que el movimiento de un cuerpo dejado a sí mismo, sigue en línea recta. Supone, además, que esta experiencia se remonta hasta la antigüedad. Luego, sobre esta base, considera la historia de la concepción de los movimientos de los planetas, y dice:

"No sabemos de qué manera los antiguos explicaron la cuestión de cómo los planetas llegaron a ser retenidos dentro de ciertos límites en estos espacios libres, y de ser desviados de los trayectos rectilíneos que, dejados a sí mismos, hubieran seguido, (para seguir) órbitas curvilíneas en revoluciones regulares. Probablemente, fue para dar alguna suerte de satisfacción a esta dificultad, que las órbitas sólidas fueron inventadas.

"Los filósofos posteriores pretenden explicar esto o por la acción de ciertos vórtices, como Kepler y Descartes; o por algún otro principio de impulso o atracción, como Borelli, Hooke, y otros de nuestra nación; pues, por las leyes del movimiento se tiene la mayor certeza de que estos efectos han de provenir de la acción de alguna u otra fuerza."(33)

Se postula así que las desviaciones del movimiento inercial se producen por la acción de fuerzas impuestas a las masas. Por otra parte, es importante tener presente que, para Newton, la

inercia es también una fuerza, inherente a la masa. De esta manera, emerge la concepción general de que el movimiento se debe a la fuerza.

Para Newton, existen en la naturaleza 'principios activos' que continuamente causan el movimiento de las partículas de la materia. Considera que, si no fuera así, el movimiento llegaría a desaparecer. Así dice:

"...el Movimiento es mucho más apto para ser perdido que para ser conseguido, y está siempre en Decaimiento. Porque los Cuerpos que son absolutamente duros, o tan suaves como para ser desprovistos de Elasticidad, no rebotarán el uno del otro..... Si tienen cuanta Elasticidad que basta para que reboten con un cuarto, o la mitad, o tres cuartos de la Fuerza con la cual se encontraron, perderán tres cuartos, o la mitad, o un cuarto de su Movimiento....Así, visto que el tipo de Movimiento que encontramos en el Mundo está siempre disminuyéndose, hay una necesidad de conservarlo y reclutarlo mediante Principios activos, tales como son la causa de la Gravedad, por la cual los Planetas y Cometas conservan sus Movimientos en sus Orbes, y los Cuerpos adquieren gran Movimiento al caer."(34)

Dichos principios, sostiene Newton, conservan el movimiento y el calor, y son el fundamento de los procesos físicos y biológicos. Dice explícitamente:

"...nos encontramos con muy poco Movimiento en el Mundo, aparte del que se debe a estos Principios activos. Y si no fuera por estos Principios, los Cuerpos de la Tierra, los Planetas, los Cometas, el Sol, y todas las cosas dentro de ellos, se enfriarían y se congelarían, y llegarían a ser Masas inactivas; y toda Putrefacción, Generación, Vegetación y Vida terminarían, y los Planetas y Cometas no permanecerían en sus Orbes."(35)

La relación entre estos principios activos y la masa subsiste como problema para Newton. Se formula únicamente la noción limitada de que las partículas materiales son tales que se mueven por dichos principios. A este respecto, dice:

"A mí me parece que estas Partículas no sólo tienen una Vis inertiae, acompañada por tales Leyes pasivas del Movimiento que resultan naturalmente de dicha Fuerza, sino también que se mueven por ciertos Principios activos como lo es el de Gravedad, y el que causa Fermentación, y Cohesión de los Cuerpos... Estas son Cualidades manifiestas, y sólo sus Causas son ocultas.... Decirnos que cada Especie de las Cosas es dotada de una específica Cualidad oculta, por la cual actúa y produce Efectos manifiestos, es no decirnos nada: Pero, derivar de los Fenómenos dos o tres Principios generales del Movimiento, y luego decirnos cómo las Propiedades y Acciones de todas las Cosas corpóreas se siguen de estos Principios manifiestos, sería un paso muy grande en la Filosofía, aunque las Causas de dichos Principios no fuesen descubiertos todavía: Y, por consiguiente, no tengo escrúpulos para proponer los Principios del Movimiento mencionados antes, siendo éstos de Extensión muy general, y dejo sus Causas para averiguarse."(36)

Se ha entrado con cierto detalle en este problema que puede parecer un poco ajeno al tema del presente trabajo, para poder señalar que la naturaleza esencial de la fuerza newtoniana es la de producir el movimiento espacio-temporal. Esto quiere decir, entonces, que la fuerza guarda cierta relación con el espacio y el tiempo y, además, puede tener tal carácter que actúe de manera continua en el tiempo a la vez que como vector en el espacio. La actuación de la fuerza sobre los cuerpos implica que existe una proporción entre cierta cantidad de fuerza y la correspondiente cantidad de movimiento causado, y esta proporción tiene que considerarse como inherente al mecanismo del universo creado por Dios.

En este esquema, el papel del espacio es que su homogeneidad métrica y sus otras propiedades son tales que las consecuencias espaciales de las fuerzas impuestas a los cuerpos ocurran efectivamente. El espacio subsiste idéntico frente a las fuerzas distintas, de manera que es la naturaleza de los principios activos en relación con las partículas materiales, lo que determina las trayectorias de los cuerpos. En una observación especulativa de gran interés, Newton expresa esta noción fundamental del conjunto de relaciones que constituye el mecanismo natural:

"Y puesto que el Espacio es divisible in infinitum, y la Materia no es necesariamente en todos los lugares, también puede concederse que Dios es capaz de crear Partículas de Materia de varios Tamaños y Figuras, y en varias Proporciones al Espacio, y quizás de diferentes Densidades y Fuerzas, y así variar las Leyes de la Naturaleza, y hacer Mundos de varios tipos en varias Partes del Universo. Por lo menos, no veo nada de contradicción en todo esto."(37)

Lo que permanece inmutable en este esquema es el espacio. Por otra parte, son las naturalezas de las fuerzas y de la materia, en relación con el espacio, las que determinan las leyes naturales.

El problema aquí es el del carácter de dicha relación, y me parece que el intento de entenderla en torno a la noción de que el espacio constituya un 'campo métrico' sería un anacronismo: la extrapolación de una preocupación relativista a la física newtoniana. Si queremos entender lo propiamente newtoniano aquí, tenemos que reconocer que el problema de saber cómo la masa encuentra su trayectoria apropiada simplemente no surge para Newton. Además de esto, el carácter métrico del espacio permanece implícito, al grado de que ni siquiera se hace explícito en la definición de espacio en el Scholium de las Definiciones. Es que, con Newton, estamos en una época anterior al descubrimiento de la geometría no-euclídeana, y no se le ha ocurrido a nadie poner a nivel de problema el papel dinámico de la métrica espacial. Cuando Newton se permite especular acerca de la posibilidad de otro mecanismo natural, considera que sus leyes provendrían de las naturalezas diferentes de las fuerzas y de las partículas materiales. Esto es lo que debe servirnos de indicio para comprender su concepción del papel del espacio métrico en el conjunto de las magnitudes de su propia física.

Para Newton, la homogeneidad métrica de toda realidad exten-
sa todavía subsiste como una verdad evidente que puede darse por
entendida en todo aspecto de la física. Se supone, además, que
toda fuerza impuesta es vector que impone su dirección y sentido
a la masa. Estas suposiciones en su conjunto garantizan que la
trayectoria de una masa sea geoméricamente consecuente con las
fuerzas impuestas a ella. Y, en la ausencia de fuerzas impues-
tas, que actúan sobre la masa en un momento dado, la masa -por
virtud de la fuerza de inercia- conserva su estado de movimien-
to resultante de las últimas fuerzas impuestas a ella, inclusive
la dirección y el sentido de dicho movimiento. De esta manera,
el que la fuerza de inercia opere en la materia, establece que
la fuerza vectorial también es la causa del movimiento inercial.

La noción teórica que fundamenta la concepción del movimien-
to en una trayectoria espacial determinada por la fuerza, es la
de la fuerza como vector. Es decir, la fuerza tiene esta propie-
dad espacial. Es la naturaleza de la fuerza actuar en el espa-
cio métrico. Esta es una de las ideas primitivas, por así decir,
de la física newtoniana. La única explicación de ella que se
puede inferir de los textos newtonianos sería la noción de cier-
ta concordancia, inherente a la Creación, entre las naturalezas
de las fuerzas, la masa y el espacio. Y, en esta relación, el
espacio subsiste pasivo e idéntico frente a las fuerzas diferen-
tes.

Por otra parte, el problema propiamente newtoniano en lo
que se refiere a la integración del espacio en la mecánica uni-
versal es de otra índole. El propio Newton tropezó con el pro-
blema primordial de la nueva física, de concebir el espacio como
el espacio de los procesos. En realidad, es éste el problema
que viene a determinar cómo el espacio métrico se integra en la
concepción del movimiento de los cuerpos. En el siguiente capí-
tulo veremos de manera preliminar cómo el concepto ingenioso de
espacio relativo hace posible que el espacio absoluto se conside-
re presente como el espacio de los procesos.

d) La inmovilidad del espacio absoluto.

El concepto de la inmovilidad del espacio absoluto se pre-
senta en el Scholium de las Definiciones en relación con el con-
cepto de movimiento absoluto. A este respecto, Newton dice:

"Tal como el orden de las partes del tiempo es inmutable,
así también es el orden de las partes del espacio. Si se supone
que las partes sean trasladadas fuera de sus lugares, serán tras-
ladadas (si es que se permita la expresión) fuera de sí mismas.
Ya que los tiempos y los espacios son, por así decir, los luga-
res tanto de sí mismos como de todas las demás cosas. Todas las
cosas son colocadas en el tiempo en cuanto al orden de sucesión;
y en el espacio en cuanto al orden de situación. Es por su esen-
cia o naturaleza que son lugares; y, el que los lugares prima-
rios de las cosas sean móviles, es absurdo. Por consiguiente,
éstos son los lugares absolutos; y las traslaciones desde estos
lugares son los únicos movimientos absolutos."(38)

Es importante tener presente aquí que la concepción del movimiento ha sido, históricamente, problema clave de la física; y que la concepción newtoniana constituye una de las grandes respuestas a este problema. Esta respuesta entraña la noción de la inmovilidad del espacio absoluto.

Newton plantea la noción de los movimientos 'enteros y absolutos'. Esto no quiere decir lo que comunmente podría entenderse como un movimiento completo -por ejemplo, entre dos posiciones especificadas, o una revolución orbital entera-, terminado en el curso de cierta duración temporal. La referencia es más bien al movimiento instantáneo. Quiere decir que un cuerpo en movimiento en cualquier instante dado, tiene una velocidad objetiva, físicamente real, con cierta dirección y sentido. Esto significa que, además de los movimientos aparentes y relativos de los cuerpos entre sí, todo cuerpo en todo instante tiene una velocidad verdadera; y esta es su movimiento con respecto al espacio y el tiempo absolutos. Los objetos materiales se mueven relativamente entre sí, y a la vez, en todo instante, todo objeto está en movimiento desde un lugar inmóvil del espacio absoluto, con cierta velocidad absoluta, por así decir. Este movimiento absoluto se concibe como la resultante de todos los movimientos distintos compartidos por el objeto en el instante en cuestión.

La inmovilidad del espacio absoluto entra en esta concepción en el sentido de que el movimiento absoluto consiste en la traslación desde un lugar absoluto, inmóvil, y con respecto al orden inmutable del espacio absoluto. Así, Newton dice:

"...Todos los movimientos, desde lugares en movimiento, no son sino las partes de movimientos enteros y absolutos; y todo movimiento entero se compone del movimiento del cuerpo fuera de su primer lugar, y el movimiento de este lugar fuera de su lugar; y así sucesivamente hasta que lleguemos a algún lugar inmóvil, como en el ejemplo del marinero, mencionado antes. Por lo cual, los movimientos enteros y absolutos no pueden determinarse de otro modo sino por lugares inmóviles.... Ahora bien, ningunos otros lugares son inmóviles salvo aquéllos que, de infinidad a infinidad, mantienen todos ellos la misma posición dada entre sí; y por esto, deben permanecer siempre sin moverse; y, de ese modo, constituyen el espacio inmóvil."(39)

El concepto newtoniano, al que se refiere esta cita, de un lugar relativo que está en movimiento, se trata en detalle en el siguiente capítulo. Aquí lo que interesa es la noción fundamental del movimiento con respecto al espacio absoluto. En el ejemplo dado por Newton, se considera a un marinero que se mueve en un barco, mientras que el barco se mueve con respecto a la superficie de la tierra y ésta, a su vez, se mueve con respecto al espacio absoluto. La concepción implicada en este caso es que todos los componentes del movimiento absoluto del marinero, en un instante dado, pueden considerarse con respecto al lugar absoluto, dentro del orden inmutable de los lugares absolutos, en el cual el marinero se encuentra en dicho instante. Podemos imaginar que se establezca un sistema de coordenadas cartesianas en

estado de reposo con respecto al espacio absoluto, y cuyo origen coincide con el lugar absoluto ocupado por el marinero en el instante en cuestión. Luego, todas las velocidades que constituyen los componentes de su movimiento en ese instante, siendo vectores, podrían representarse con respecto al origen de dichas coordenadas, y podrían sumarse de acuerdo con las reglas matemáticas apropiadas. De suerte que resultaría una velocidad, también vector, que representaría el movimiento del marinero con respecto al espacio absoluto enfocado por las coordenadas. En esta concepción, se considera que el espacio absoluto, subyacente a todos estos movimientos instantáneos que parten simultáneamente del mismo lugar absoluto, permanece inmóvil y suministra dicho lugar de referencia para la consideración de un movimiento compuesto. Claro que semejante imagen de la medición del movimiento con respecto al espacio absoluto no es realizable en la práctica. Sirve únicamente como una imagen de cómo se plantea que la 'adición de velocidades' de la cinemática tenga lugar de referencia en el espacio como tal, inmóvil. Veremos en el siguiente capítulo cómo el concepto de espacio relativo hace posible recurrir a esta fundamentación en la práctica.

Es interesante notar que en este planteamiento de la concepción del movimiento absoluto, Newton no considera el espacio absoluto en el sentido de un marco de referencia suministrado por la naturaleza misma. La adición de velocidades se concibe en principio para el caso de un cuerpo y desde un lugar inmóvil, cualesquiera que sea su posición con respecto a un marco de referencia elegido por la ciencia empírica. Es decir, el movimiento absoluto se concibe con respecto al espacio absoluto, mientras que el espacio absoluto, como tal, en su independencia de los objetos materiales, no posee la estructura de un marco. El papel del espacio absoluto es más bien el del fondo espacial, homogéneo e inmóvil, que hace posible el empleo de marcos de referencia.

En resumen, el espacio absoluto de Newton existe en sí mismo, es métrica y físicamente homogéneo, y es inmutable. Subsiste siempre igual cualitativamente, y es inmóvil. Posee su propia extensión y métrica, pero no es material ni sensible. Es un medio continuo, infinitamente divisible. Constituye parte integrante de la naturaleza, y las magnitudes pertenecientes a él desempeñan papel físico.

Notas. Capítulo II.

¹ Principia, pág. 6.

"Absolute space, in its own nature, without relation to anything external, remains always similar and immovable. Relative space is some movable dimension or measure of the absolute spaces; which our senses determine by its position to bodies; and which is commonly taken for immovable space; such is the dimension of a subterraneous, an aerial, or celestial space, determined by its position in respect of the earth. Absolute and relative space are the same in figure and magnitude: but they do not remain always numerically the same. For if the earth, for instance, moves, a space of our air, which relatively and in respect of the earth remains always the same, will at one time be one part of the absolute space into which the air passes; at another time it will be another part of the same, and so, absolutely understood, it will be continually changed."

² René Descartes, Principios de filosofía, Parte II, #1-16.³ Principia, pág. 397.

"In the preceding books I have laid down the principles of philosophy; principles not philosophical but mathematical: such, namely, as we may build our reasonings upon in philosophical inquiries. These principles are the laws and conditions of certain motions, and powers or forces, which chiefly have respect to philosophy; but lest they should have appeared of themselves dry and barren, I have illustrated them here and there with some philosophical scholiums, giving an account of such things as are of more general nature, and which philosophy seems chiefly to be founded on; such as the density and resistance of bodies, spaces void of all bodies, and the motion of light and sounds..."

⁴ Ibid, Book III, "Rules of Reasoning in Philosophy," Rule III, pág. 399. Véase el texto completo, en español, en el Apéndice.

"We no other way know the extension of bodies than by our senses, nor do these reach it in all bodies; but because we perceive extension in all that are sensible, therefore we ascribe it universally to all others also.... That all bodies are movable, and endowed with certain powers (which we call the inertia) of persevering in their motion, or in their rest, we only infer from the like properties observed in the bodies which we have seen."

⁵ A este respecto, Véase Cap. IV.

⁶ Ibid, Regla IV, pág. 400. Véase también en el Apéndice la última selección de la Óptica, Pregunta 31.

"In experimental philosophy we are to look upon propositions inferred by general induction from phenomena as accurately or very nearly true; notwithstanding any contrary hypotheses that may be imagined, till such time as other phenomena occur, by which they may either be made more accurate, or liable to exceptions.

"This rule we must follow that the argument of induction may not be evaded by hypothesis."

⁷ Es cierto que Newton expone su concepción del 'sensorium de Dios' en el Scholium General que aparece al fin de los Principia, (pág. 543). Pero este Scholium no apareció en la primera edición (1687). Se escribió veintiseis años más tarde, y Newton todavía estaba revisándolo cuando la segunda edición estaba en prensa (1713). El Scholium General responde -en lo que se refiere a esta noción- a la crítica del concepto newtoniano de espacio hecha por el Obispo Berkeley, quien consideró que Newton había atribuido al espacio físico cualidades propiamente divinas. Berkeley consideró necesario concebir el espacio como relativo a los cuerpos, porque así, "...we are freed from that dangerous dilemma...of thinking either Real Space is God, or else that there is something besides God which is eternal, uncreated, infinite, indivisible, unmutable. Both which may justly be thought pernicious and absurd notions." (Principles of Human Knowledge (1710), Part I, #111, 117). Lo que es importante ver aquí es que, en el Scholium de las Definiciones, Newton estaba exponiendo el concepto de espacio que respondió a las exigencias de su mecánica, y, a la vez, él creía personalmente que la naturaleza del espacio, empíricamente comprobada, ponía de manifiesto la presencia de Dios en el mundo físico. (Véase Nota 52 de Cajori, págs. 668-670).

Newton también expone su idea del 'sensorium de Dios' en la Óptica, Parte II, Pregunta 28 (último párrafo) y Pregunta 31.

Sir Isaac Newton, Opticks, Dover, N.Y., 1952. La Óptica se escribió en inglés, y se publicó por primera vez en 1704. El texto de la edición de Dover es la de G. Bell, basada en la 4ª edición, publicada en 1730.

⁸ Véase Cap. VII, Sec. c, #3.

⁹ Véase, por ejemplo, "Robert Boyle's Experiments in Pneumatics", en Harvard Case Histories in Experimental Science, redactado por James Bryant Conant, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 1957, Tomo I, págs. 1-63. Este artículo trata la controversia acerca del 'vacío vs. el plenum' en el contexto de la exposición de los experimentos de Robert Boyle, con los cuales Boyle estaba intentando demostrar la existencia del éter.

-Newton y Boyle se conocieron e intercambiaron sus opiniones respecto a este problema. En su carta a Boyle del 28 de febrero de 1678 o 1679, tal como treinta años más tarde en la Óptica, Newton consideró la hipótesis de un éter raro -es decir, no denso- para explicar los fenómenos de la luz.

10 Principia, pág. 1. En cuanto al empleo aquí de la palabra, 'medio', Véase la Nota 13 a continuación.

"The quantity of matter is the measure of the same, arising from its density and bulk conjointly..."

....I have no regard in this place to a medium, if any such there is, that freely pervades the interstices between the parts of bodies..."

11 El concepto de 'espacio libre' se expone en detalle en la siguiente sección.

12 Principia, pág. 8

"For times and spaces are, as it were, the places as well of themselves as of all other things...It is from their essence or nature that they are places..."

13 El empleo de la palabra 'medio' para caracterizar el espacio de Newton, es un procedimiento post-newtoniano. Newton usó este término para designar un medio material, y así habló de un 'medio etéreo'. La noción contemporánea de medio, en el sentido del espacio que contiene, equivale a la 'lugardad' continua -por así decir- concebida por Newton. Empleo el término 'lugardad' en este sentido, pero este procedimiento es mío.

14 Metafísica, A, 985^b5. Véase también Lucrecio, Libro I.

15 Es decir, el problema se planteaba como el de saber si existía el éter donde no existían cuerpos observables.

16 Timeo, #52. Aquí se encuentra la teoría platónica de espacio en la que el espacio se considera como la materia informe. Véase también el comentario de Aristóteles acerca de la noción platónica en la Física, 209^a10.

"But true and exact reason, vindicating the nature of true being, maintains that while two things are different they cannot exist one of them in the other and so be one and also two at the same time."

17 Euclides, Elementos de geometría, UNAM, 1944. Tomo I, págs. 5-13. Trad. de Juan David García Bacca.

18 A. d'Abro, The Evolution of Scientific Thought from Newton to Einstein, Dover, N.Y., 1950. Capítulo II, "The Birth of Metrical Geometry", págs. 34-35.

19 Véase, por ejemplo, Aristóteles, De Cielo, 308^b30 - 309^a20.

20 La teoría aristotélica del movimiento se encuentra expuesta en varios textos, entre ellos, De Cielo, Libro I, especialmente Cap. 8. La noción del vacío se trata en la Física, Libro IV, Capítulos 6-9, inclusive. Véase especialmente, 213^a31. Es de interés notar que Aristóteles formuló el concepto de espacio continuo, a diferencia de la teoría de Demócrito (213^b1), pero únicamente para rechazarlo.

21 Véase, por ejemplo, De Cielo, Capítulo 2, y 278^b.

22 A este respecto, Newton consideró la posibilidad especulativa de la distribución del éter en los alrededores de las masas, siendo la densidad del éter una función de la magnitud de la masa y de la distancia desde ésta.

23 Es de interés recordar que los experimentos de Boyle, realizados aproximadamente veinte años antes de la publicación de los Principia, y cuyo propósito era el de comprobar la existencia del éter, habían fracasado a este respecto.

24 Véase el prólogo de Cotes a la segunda edición de los Principia, en la edición de Cajori, xxvii ff.

25 El sistema del mundo es una obra independiente. Se distingue del Libro III de los Principia, que tiene el mismo título, por su carácter más discursivo. Puede inferirse de una observación de Newton (Principia, pág. 397) que los dos Sistemas se escribieron originalmente como una sola obra, pero no se publicó en esa forma. El sistema del mundo se encuentra incluido en la edición de Cajori, págs. 549-626.

26 Ibid, págs. 549-550.

"...it was agreed on both sides that the motions of the celestial bodies were performed in spaces altogether free and void of resistance. The whim of solid orbs was of a later date, introduced by Eudoxus, Calippus and Aristotle; when the ancient philosophy began to decline, and to give place to the new prevailing fictions of the Greeks.

"But above all things, the phenomena of comets can by no means tolerate the idea of solid orbits... And as it was the unavoidable consequence of the hypothesis of solid orbits, while it prevailed, that the comets should be thrust into spaces

below the moon; so, when later observations of the astronomers restored the comets to their ancient places in the higher heavens, these celestial spaces were necessarily cleared of the incumbrance of solid orbits."

La referencia aquí a las 'órbitas sólidas' de Aristóteles hace surgir problema de interpretación. De todas maneras, puede advertirse que para Aristóteles, la perfección del movimiento es proporcional a su distancia de la tierra. Y, puesto que el movimiento natural de las esferas es circular, y el movimiento circular es el más perfecto, entonces no es posible colocar el movimiento no-circular de los cometas en esa región. Además, no existen cuerpos más allá de ésta. Véase De cielo, Cap. 2 y 278^b.

27 Opticks, pág. 365. Mi énfasis.

"...against filling the Heavens with fluid Mediums, unless they be exceeding rare, a great Objection arises from the regular and very lasting Motions of the Planets and Comets in all manner of Courses through the Heavens. For thence it is manifest that the Heavens are void of all sensible Resistance, and by consequence of all sensible Matter."

28 Ibid, pág. 368.

"A dense Fluid can be of no use for explaining the Phaenomena of Nature, the Motions of the Planets and Comets being better explain'd without it. It serves only to disturb and retard the Motions of these great Bodies, and make the Frame of Nature languish....And as it is of no use, and hinders the operations of Nature, and makes her languish, so there is no evidence for its Existence, and therefore it ought to be rejected."

29 Ibid, pág. 369.

"...who made a Vacuum and Atoms, and the Gravity of Atoms, the first principles of their Philosophy; tacitly attributing Gravity to some other Cause than dense Matter."

30 Ibid, pág. 369.

"What is there in places almost empty of Matter, and whence is it that the Sun and Planets gravitate towards one another, without dense Matter between them?"

31 Ibid, págs. 375-376.

"Have not the small Particles of Bodies certain Powers, Virtues or Forces, by which they act at a distance, not only upon the Rays of Light for reflecting, refracting and inflecting them, but also upon one another for producing a great Part of the Phaenomena of Nature?.....How these Attractions may

be performed, I do not here consider....For we must learn from the Phaenomena of Nature what Bodies attract one another, and what are the Laws and Properties of the Attraction, before we enquire the Cause by which the Attraction is performed. The Attractions of Gravity, Magnetism, and Electricity, reach to very sensible distances, and so have been observed by vulgar Eyes, and there may be others which reach to so small distances as hitherto escape Observation..."

³² Véase A. d'Abro, op. cit., Cap. IV, "The Problem of Physical Space", pág. 56.

³³ El sistema del mundo, pág. 550. Por lo que se refiere al motivo para la concepción de 'orbitas sólidas', Véase Aristóteles, De cielo, 269^b.

"We do not know in what manner the ancients explained the question, how the planets came to be retained within certain bounds in these free spaces, and to be drawn off the rectilinear courses, which, left to themselves, they should have pursued, into regular revolutions in curvilinear orbits. Probably it was to give some sort of satisfaction to this difficulty that solid orbs were invented.

"The later philosophers pretend to account for it either by the action of certain vortices, as Kepler and Descartes; or by some other principle of impulse or attraction, as Borelli, Hooke, and others of our nation; for, from the laws of motion, it is most certain that these effects must proceed from the action of some force or other."

³⁴ Opticks, Pregunta 31, págs. 398-99.

"...Motion is much more apt to be lost than got, and is always upon the Decay. For Bodies which are absolutely hard, or so soft as to be void of Elasticity, will not rebound from one another...If they have so much Elasticity as suffices to make them rebound with a quarter, or half, or three-quarters of the Force with which they came together, they will lose three quarters, or half, or a quarter of their Motion... Seeing therefore the variety of Motion which we find in the World is always decreasing, there is a necessity of conserving and recruiting it by active Principles, such as are the cause of Gravity, by which Planets and Comets keep their Motions in their Orbs, and Bodies acquire great Motion in falling."

³⁵ *Ibid*, 399-400.

"...we meet with very little Motion in the World, besides what is owing to these active Principles. And if it were not for these Principles, the Bodies of the Earth, Planets, Comets, Sun, and all things in them, would grow cold and freeze, and become inactive Masses; and all Putrefaction, Generation,

Vegetation, and Life would cease, and the Planets and Comets would not remain in their Orbs."(35)

36 Ibid, págs. 401-402.

"It seems to me, that these Particles have not only a Vis inertiae, accompanied with such passive Laws of Motion as naturally result from that Force, but also that they are moved by certain active Principles, such as is that of Gravity, and that which causes Fermentation, and the Cohesion of Bodies.... These are manifest Qualities, and their Causes only are occult.. To tell us that every Species of Things is endow'd with an occult specifick Quality by which it acts and produces manifest Effects, is to tell us nothing: But to derive two or three general Principles of Motion from Phaenomena, and afterwards to tell us how the Properties and Actions of all corporeal Things follow from these manifest Principles, would be a very great step in Philosophy, though the Causes of these Principles were not yet discover'd: And therefore I scruple not to propose the Principles of Motion above-mention'd, they being of very general extent, and leave their Causes to be found out."

37 Ibid, págs. 403-404.

"And since Space is divisible in infinitum, and Matter is not necessarily in all places, it may be also allowed that God is able to create Particles of Matter of several Sizes and Figures, and in several Proportions to Space, and perhaps of different Densities and Forces, and thereby to vary the Laws of Nature, and make Worlds of several sorts in several Parts of the Universe. At least, I see nothing of contradiction in all this."

38 Principia, pág. 8.

"As the order of the parts of time is immutable, so also is the order of the parts of space. Suppose the parts to be moved out of their places, and they will be moved (if the expression may be allowed) out of themselves. For times and spaces are, as it were, the places as well of themselves as of all other things. All things are placed in time as to order of succession; and in space as to order of situation. It is from their essence or nature that they are places; and that the primary places of things should be movable, is absurd. These are therefore the absolute places; and translations out of these places are the only absolute motions."

39 Ibid, pág. 9.

"All motions, from places in motion, are no other than parts of entire and absolute motions; and every entire motion is composed of the motion of the body out of its first place, and the motion of this place out of its place; and so on, until we come to some immovable place, as in the beforementioned example

of the sailor. Wherefore, entire and absolute motions can be no otherwise determined than by immovable places.... Now no other places are immovable but those that, from infinity to infinity, do all retain the same given position one to another; and upon this account must ever remain unmoved; and do thereby constitute immovable space."

Capítulo III. Espacio Relativo.

El espacio relativo se concibe, por una parte, en relación con el espacio absoluto y, por otra parte, en relación con los cuerpos en movimiento. El enlace entre estos dos aspectos implica las concepciones de lugar relativo y posición. En el caso de espacio relativo, se trata del concepto quizás el más complejo de la teoría newtoniana de espacio y tiempo y, a la vez, de un concepto clave cuya importancia va aumentando a medida que se penetra en la teoría. En este capítulo, me propongo hacer una exposición detallada de este concepto para establecer una noción preliminar del sentido en que los espacios relativos son los espacios de los procesos en la física newtoniana.

a. Los conceptos de espacio y lugar relativos, y de posición.

Para tenerla presente, repetimos aquí la definición newtoniana del espacio relativo:

"El espacio relativo es alguna dimensión o medida, móvil, de los espacios absolutos; la cual nuestros sentidos determinan por la posición de ella en relación con los cuerpos; y la que comunmente se toma como el espacio inmóvil; tal es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo, o celeste, determinado por su posición con respecto a la tierra. El espacio absoluto y el espacio relativo son iguales de figura y magnitud; pero no permanecen siempre iguales numéricamente. Pues, si la tierra, por ejemplo, se mueve, entonces un espacio de nuestro aire, que relativamente y con respecto a la tierra permanece siempre el mismo, será en un tiempo una parte del espacio absoluto en el cual el aire entre; en otro tiempo será otra parte de él, y así, entendido absolutamente, será continuamente cambiado."(1)

Se nota, en primer lugar, que el espacio relativo no se concibe en el sentido de una 'cosa misma', existente en sí misma, sino como "alguna dimensión o medida, móvil, de los espacios absolutos." Es decir, se concibe que una determinada configuración del espacio absoluto se mueve. Semejante configuración de espacio en movimiento siempre consiste en la misma cantidad del espacio absoluto, no obstante que los lugares absolutos que la constituyen sean diferentes de un instante al otro. Así, no se trata de dos espacios -el absoluto y el relativo- existentes físicamente en yuxtaposición como dos estratos espaciales. Un espacio relativo es una 'medida' del espacio absoluto en el sentido de que en un instante es una cierta parte de éste, de cierta magnitud, y en otro instante, es una parte diferente del espacio absoluto, pero de magnitud igual. Así, debido a la homogeneidad del espacio absoluto, un espacio relativo tiene significado físico unívoco, puesto que mientras perdure, se constituye de la misma cantidad del espacio absoluto. Por lo tanto, el concepto de espacio relativo no se reduce a su significado geométrico, sino que es una cantidad de espacio físico. Esta consideración pone

de relieve una consecuencia de la homogeneidad del espacio absoluto: se trata de una realidad física cuyas partes son todas idénticas y sustituibles, las unas por las otras, en los sistemas y procesos físicos.

Por otra parte, un espacio relativo queda determinado en relación con los cuerpos en movimiento. El ejemplo aducido por Newton en la definición, 'un espacio de nuestro aire', ejemplifica esta noción en su sentido puramente espacial. Pero en la dinámica newtoniana, el espacio relativo desempeña el papel del espacio determinado por un sistema físico que se mueve en su integridad. Así puede considerarse, por ejemplo, que la tierra y su campo gravitacional siempre están ocupando una cierta medida del espacio absoluto. La tierra y, con ella, su campo gravitacional, se mueven en su órbita solar y están continuamente ocupando lugares diferentes del espacio absoluto. Y, por esta misma razón, la medida del espacio absoluto que se encuentra determinada por dicho sistema, es en todo instante una parte del espacio absoluto. Es evidente, entonces, que el espacio relativo no se concibe como una apariencia en el sentido de un fenómeno perteneciente al enfoque humano. Al contrario, en el enfoque newtoniano, el espacio relativo siempre posee todas las propiedades del espacio absoluto, menos la inmovilidad. Porque en cada instante, un espacio relativo es cierta parte del espacio absoluto. Y, dada la homogeneidad universal del espacio absoluto, un espacio relativo en todo instante comparte la métrica del espacio absoluto y, además, su carácter físico no perturbante.

Para Newton, un cuerpo siempre está en movimiento (salvo en el caso hipotético de su reposo absoluto) desde un lugar absoluto. Es decir, cualquier objeto material que existe espacialmente extendido en el espacio físico, siempre ocupa un lugar absoluto y está en movimiento desde ese lugar. Al mismo tiempo, el cuerpo se encuentra implicado en un proceso físico que determina un espacio relativo, en el sentido de que los movimientos de dicho cuerpo con respecto a dicho espacio relativo se explican por la ley del proceso. De suerte que el proceso se desarrolla en el espacio relativo como si éste fuera inmóvil. Desde luego, se está suponiendo aquí el principio de la relatividad newtoniana (o galileana), por el cual, aun si la configuración espacial del proceso se mueve íntegramente, esto no afecta los movimientos entre sí de los cuerpos implicados en el proceso.(2)

Para la consideración de los movimientos pertenecientes a un proceso en un espacio relativo, Newton plantea la noción de lugar relativo. Así, tal como se considera que un cuerpo en movimiento en el espacio absoluto se mueve desde un lugar absoluto, de igual manera se concibe que un cuerpo en movimiento en un espacio relativo se mueve desde un lugar relativo. Entonces, ¿qué es un lugar relativo? ¿Cómo puede concebirse un lugar relativo perteneciente a un espacio relativo, que es, en todo instante, una configuración de lugares absolutos? Es claro que no puede tratarse de un concepto de lugar que sea análogo al concepto de lugar absoluto. Como hemos visto, los lugares absolutos constituyen el espacio absoluto en un orden inmutable. Newton dice:

"...ningunos otros lugares son inmóviles salvo aquéllos que, de infinidad a infinidad, mantienen todos ellos la misma posición dada entre sí; y, por esto, deben permanecer siempre sin moverse; y, de ese modo, constituyen el espacio inmóvil."(3)

Se trata de un orden de lugares que son los lugares de sí mismos. Su magnitud no entra en esta concepción. Suponiendo que el espacio se considera infinitamente divisible, la noción aquí parece ser la de que, en principio, sean cuales sean los lugares en cuestión, y sea la que sea su magnitud, estos siempre conservan sus respectivos lugares en el orden del espacio absoluto. Se postula así un orden inmutable como substrato de los espacios relativos.

En cambio, la posibilidad de considerar la magnitud de un lugar depende de la presencia de un cuerpo sensible, o sea, de que el lugar esté ocupado. Para entender esto, podemos partir de la definición newtoniana de lugar, considerado como una 'cantidad':

"Lugar es una parte del espacio que un cuerpo ocupa y, según el espacio, es absoluto o relativo."(4)

Ahora bien, todo lugar ocupado es simultáneamente lugar absoluto y lugar relativo. En todo instante el cuerpo ocupa un lugar en el espacio físico, absoluto. Al mismo tiempo, ocupa un lugar en una configuración espacial que se mueve en su conjunto con respecto al espacio absoluto. En el ejemplo dado por Newton, al que nos referimos en el capítulo anterior, el barco podría considerarse como determinante de un espacio relativo que se mueve íntegramente, mientras que las partes del barco ocupan lugares relativos. Si consideramos el barco como cuerpo rígido, absolutamente denso, entonces el espacio relativo ocupado por él podría considerarse como un orden continuo de lugares relativos, ocupados. Lo esencial de esta concepción es que el lugar relativo no se mueve dentro del espacio relativo. Se mueve únicamente en el sentido de que comparte el movimiento del espacio relativo en su integridad. Entonces, si consideramos un espacio relativo determinado por un proceso, por ejemplo la tierra y su campo gravitacional, la luna está en todo instante, en movimiento desde un lugar relativo que tiene posición unívoca dentro de dicho espacio relativo. El lugar relativo se determina como tal sólo en el momento en que está ocupado, y mientras esté ocupado, su posición queda determinable en sentido unívoco. Quizás podría decirse que el espacio relativo se concibe como una configuración espacial que contiene un orden de posiciones posibles, en tanto que el lugar relativo es un lugar ocupado y, por lo tanto, observable dentro de este orden.

El lugar relativo, móvil, es un lugar ocupado dentro de un espacio relativo. Se mueve, en el sentido de constituir una parte de un espacio relativo. Tiene posición unívoca dentro de la configuración espacial en cuestión. Por lo tanto, si se conoce el movimiento de dicho espacio con respecto al espacio absoluto, se conoce también el movimiento de todos sus lugares relativos. Y, si puede determinarse además el movimiento de un objeto dentro

del sistema y con respecto al espacio relativo determinado por él, entonces, estos dos movimientos pueden sumarse para encontrar el movimiento del objeto con respecto al espacio absoluto. Así Newton dice:

"....si un lugar se mueve, todo lo que se encuentra colocado en él se mueve junto con él; y por lo tanto, un cuerpo que se mueve desde un lugar en movimiento, comparte también el movimiento de su lugar."(5)

Para poder concebir que un espacio relativo sea una configuración de posiciones posibles, es evidente que semejante espacio tiene que contar con un lugar relativo de referencia que, en principio, es observable de manera continua, con respecto a un marco de referencia espacial. Por ejemplo, si el proceso que de termina un espacio relativo se desarrolla espacialmente en los alrededores de un cuerpo que permanece en estado de reposo con respecto al espacio del proceso, entonces, en este caso más simple, las posiciones en este espacio pueden ser consideradas en relación con dicho cuerpo. Además, en el caso de que un marco de referencia pudiera considerarse como si estuviera enmarcando el espacio absoluto,(6) resultaría que el movimiento, con respecto al marco, del cuerpo que sirve como punto de referencia en un espacio relativo, sería equivalente al movimiento de dicho espacio relativo con respecto al espacio absoluto.

Este esquema aporta la fundamentación para la 'adición de velocidades' en la física newtoniana, y es importante insistir en ciertos aspectos de ella.

En primer lugar, se nota que Newton hace explícito el que un lugar relativo no debe confundirse con una posición. Dice textualmente:

"Posiciones, propiamente dicha, no tienen magnitud, ni son tanto los lugares mismos, sino las propiedades de lugares."(7)

En otras palabras, una posición no tiene magnitud. La localización de un punto material con respecto a un sistema de coordenadas cartesianas se determina en un punto matemático sin dimensión. En cambio, la selección newtoniana del término 'lugar' no puede significar otra cosa que una cantidad de espacio extenso, por pequeña que sea. La frase que acabamos de citar claramente implica esta distinción. La posición, propiamente dicha, no tiene cantidad, mientras que el lugar es, por definición, una de las cuatro magnitudes, o 'cantidades', a discusión en la teoría de espacio y tiempo. "Place", dice Newton, "is a part of space which a body takes up....". No cabe duda de que tiene magnitud. Así, hay que distinguir entre la ocupación de un lugar y la determinación de una posición en un punto que puede considerarse perteneciente a un lugar. El interés teórico actual de esta distinción se advierte más adelante en conexión con la concepción newtoniana de la continuidad.(8) Pero es evidente de

inmediato que semejante concepto de posición no se sigue necesariamente de la noción de lugar relativo, sino que depende de que se introduzca la consideración de espacio como un continuo puntual. Así, por un lado, el espacio y el tiempo se conciben fundamentalmente en torno al concepto de lugar, dotado de magnitud, y de aquí tenemos la noción de los medios que permiten la ocupación por los cuerpos. Por otro lado, se considera necesario recurrir implícitamente a la noción de continuo puntual para considerar la posición sin magnitud. Desde el punto de vista del propio Newton, esto no implica ninguna discrepancia. Además, es claro que no hubo ninguna evidencia de la experiencia hasta entonces, que pudiera haber puesto en duda dicho ajuste teórico para reconciliar la posición cartesiana con los medios newtonianos.

Por otra parte, es indudable que la noción de espacio relativo fue una solución genial al problema de utilizar el concepto de espacio absoluto -ya concebido vagamente por los filósofos- en la física newtoniana. Con el espacio relativo, se establece una relación general entre los sistemas físicos y el espacio. La idea fundamental aquí es que un sistema físico tiene aspecto espacial en el sentido de determinar una configuración que se mueve en su integridad. De esta manera, los movimientos de los cuerpos implicados en un proceso pueden considerarse con respecto al espacio relativo observable, puesto que el espacio relativo posee las propiedades de homogeneidad métrica y física del espacio absoluto. Además de esto, la concepción newtoniana aquí es tal que se conserva la separación radical entre los cuerpos en movimiento y el espacio. El lugar relativo no se mueve con el objeto. Los lugares relativos son móviles sólo en el sentido de moverse como partes del espacio relativo que se mueve en su integridad. Lo que cambia su posición es el objeto, trasladándose desde un lugar relativo a otro. Por lo tanto, tal como el movimiento con respecto al espacio absoluto se concibe como una traslación desde un lugar absoluto, de la misma manera, dentro de la configuración espacial de un sistema físico, el movimiento se concibe como una traslación desde un lugar relativo. En cuanto al cuerpo que determina el lugar de referencia de un sistema, éste está en estado de reposo en un lugar relativo, y se mueve en todo instante desde un lugar absoluto. De esta manera, si se concibiera un espacio relativo, por ejemplo, el espacio de las 'estrellas fijas', como si fuera el espacio absoluto, no implicaría en ningún caso que un lugar se moviera. Es decir, no hay ningún obstáculo teórico para considerar un espacio relativo como si fuera el espacio absoluto. Por lo tanto, tomando en cuenta el principio de la relatividad clásica, cualquier espacio relativo en movimiento uniforme puede servir de substrato espacial en relación con otro espacio relativo que se mueve con respecto a él. Pero esto no quiere decir que se puede prescindir del postulado de la existencia del espacio absoluto. Al contrario, para Newton, el espacio absoluto es el único espacio físico, y constituye el fundamento imprescindible de toda esta conceptualización.

Por otra parte, la concepción de espacio y lugar relativos no resuelve el problema de un marco de referencia para la

observación, con respecto a cual sería posible establecer las posiciones de los objetos en un espacio relativo. Es decir, un espacio relativo no es, de por sí, equivalente a un marco de referencia espacial. Para establecer un marco, es necesario buscar al menos dos cuerpos, o, mejor dicho, dos lugares ocupados continuamente, que pueden considerarse en estado de reposo entre sí. Semejantes marcos se encuentran suministrados por las 'estrellas fijas' o la propia superficie de la tierra. Luego, para observar un proceso especificado, subsiste el problema de enfocarlo en el espacio de tal manera que el punto de referencia espacial del proceso se encuentre en estado de reposo con respecto al marco de referencia.

Lo importante aquí es que ni el espacio absoluto ni el espacio relativo tienen de por sí la estructura de un marco de referencia espacial. Los conceptos newtonianos de espacio como tal, sea éste absoluto o relativo, no suministran más que las bases teóricas para el empleo de marcos de referencia en la ciencia empírica.

b. Movimiento absoluto y movimiento relativo.

"El movimiento absoluto es la traslación de un cuerpo desde un lugar absoluto al otro; y el movimiento relativo es la traslación desde un lugar relativo al otro."(9)

Al mismo tiempo, el movimiento relativo puede ser movimiento verdadero, en el sentido de que sea el movimiento de un cuerpo implicado en un proceso en un espacio relativo. Y todos los movimientos verdaderos de un objeto en un instante dado son los componentes de su movimiento 'entero y absoluto' en dicho instante. Entonces, el problema de la teoría newtoniana a este respecto es el de encontrar la manera de descubrir y calcular los componentes verdaderos de los movimientos de los cuerpos. Así, Newton dice en la frase final del Scholium de las Definiciones:

"Pero cómo podemos obtener los movimientos verdaderos a partir de sus causas, efectos, diferencias aparentes, y a la inversa, se explicará más ampliamente en el tratado a continuación. Pues fue a este fin que lo redacté."(10)

Es decir, surge para Newton el problema de distinguir entre los componentes verdaderos, y los componentes puramente aparentes de los movimientos observados. Porque, no es suficiente observar que dos cuerpos se mueven relativamente entre sí. Esto no nos da ningún indicio del movimiento verdadero de cada uno de los cuerpos con respecto al espacio en cuestión. El movimiento verdadero no se manifiesta necesariamente en los cambios de posición de los cuerpos entre sí. La teoría del movimiento requiere un criterio independiente, para poder relacionar los componentes verdaderos de la velocidad de un cuerpo con sus causas físicas.

"El movimiento verdadero ni se engendra ni se altera, sino por alguna fuerza impuesta al cuerpo movido."(11)

Tropezamos aquí con la relación entre las concepciones simplemente espacio-temporales y las de la dinámica de los procesos que determinan espacios relativos. El movimiento verdadero se explica como el movimiento consecuente con las fuerzas operantes en un proceso especificado. La discusión de este tema se encuentra en la Parte C., en relación con el aspecto espacial de la medición.(12)

Notas. Capítulo III.

¹ Principia, pág. 6.

"Relative space is some movable dimension or measure of the absolute spaces; which our senses determine by its position to bodies; and which is commonly taken for immovable space; such is the dimension of a subterraneous, an aerial, or celestial space, determined by its position in respect of the earth. Absolute and relative space are the same in figure and magnitude; but they do not remain always numerically the same. For if the earth, for instance, moves, a space of our air, which relatively and in respect of the earth remains always the same, will at one time be one part of the absolute spaces into which the air passes; at another time, it will be another part of the same; and so, absolutely understood, it will be continually changed."

² Véase Capítulo IX, Sec. b.

³ Principia, pág. 9.

"...no other places are immutable but those that, from infinity to infinity, do all retain the same given position one to another; and upon this account must ever remain unmoved; and do thereby constitute immovable space."

⁴ Ibid, pág. 6.

"Place is a part of space which a body takes up and is according to the space, either absolute or relative."

⁵ Ibid, pág. 9.

"...if a place is moved, whatever is placed therein moves along with it; and therefore a body, which is moved from a place in motion, partakes also of the motion of its place."

⁶ Para Newton, las 'estrellas fijas' constituyen semejante marco.

⁷ Principia, pág. 7.

"Positions properly have no quantity, nor are they so much the places themselves, as the properties of places."

⁸ Véase Capítulo VII, Sec. c, #3.

⁹ Principia, pág. 7.

"Absolute motion -Newton dice- is the translation of a body from one absolute place into another; and relative motion, the translation from one relative place into another."

¹⁰ Ibid, pág. 12.

"But how we are to obtain the true motions from their causes, effects, and apparent differences, and the converse, shall be explained more at large in the following treatise. For to this end it was that I composed it."

¹¹ Ibid, pág. 10.

"True motion," dice Newton, "is neither generated nor altered, but by some force impressed upon the body moved."

¹² Véase Capítulo IX, Sec. a.

Capítulo IV

El problema del carácter filosófico del concepto de espacio absoluto.

Es evidente que no es suficiente caracterizar la noción de espacio absoluto simplemente como un concepto inductivo. Porque, por mucho que el propio Newton contaba con su método inductivo y consideró que su concepción de espacio había sido confirmada por la experiencia, sin embargo, surge el problema filosófico de que, con esta noción de espacio físico, se había introducido en la concepción de la naturaleza la noción de una existencia no-material, inmutable y dondequiera idéntica. Además, se presenta el problema de la naturaleza de los propios criterios empíricos, en conformidad con los cuales hubiese sido posible considerar que la existencia física del espacio absoluto -éste siendo en principio no observable- se había demostrado de acuerdo con las normas científicas de la comprobación.

Desde un punto de vista histórico, la consideración del problema del carácter filosófico del concepto de espacio absoluto tiene que tomar en cuenta que dicho concepto constituye la definición newtoniana de espacio como tal. Es decir, el espacio como tal, existente físicamente, entró en la física moderna en su forma newtoniana de medio, dotado de propiedades tradicionalmente asociadas con el ser intemporal. No fue hasta nuestro siglo que el desarrollo de la propia ciencia física ha planteado la necesidad de considerar la noción de espacio absoluto como una noción superable. Y resulta que, en la actualidad, el concepto de espacio físico no puede considerarse equivalente al concepto de espacio absoluto.(1)

En cambio, para los partidarios de Newton a fines del siglo XVII, la noción de espacio físicamente existente se identificaba con la noción de espacio absoluto, y este conjunto de ideas se consideraba implicada por la física newtoniana. De manera que, si un científico o filósofo considerara repugnante la noción de espacio absoluto, tendría que rechazar también la física newtoniana. Entonces, tendría la alternativa de seguir aceptando la teoría de los vórtices de Descartes, la que a su vez se concibió en términos del plenum de la realidad material, extensa. Así, la persistente oposición en Francia contra la física newtoniana tuvo su fundamento en el problema filosófico planteado por el concepto de espacio absoluto.

Voltaire, comentando su viaje a Inglaterra en 1727, el año de la muerte de Newton y cuarenta años después de la primera publicación de los Principia, escribió:

"Un francés que llega a Londres, se encuentra con una gran alteración en la filosofía, como en otras cosas. Dejó el mundo lleno, lo encuentra vacío. En París, el universo se ve compuesto de vórtices de materia sutil; en Londres, no vemos nada de ese estilo."(2)

En esta observación de Voltaire, se encuentra implícita la conexión íntima entre las ideas filosóficas y las científicas, en el pensamiento de los cartesianos. La teoría física de Descartes era consecuente con su ontología de materia y espíritu, la cual implicaba que la 'substancia' de la naturaleza física se considerase comprendida por la materia. Así, Descartes rechaza la noción de la existencia de un espacio no-material, vacío, y recurre a la noción del éter para considerar que los espacios aparentemente vacíos sean en realidad llenos. Como ya se ha advertido, en la teoría de los vórtices, las órbitas planetarias se explican en función de los movimientos del éter. De esta manera, la mecánica de Descartes no recurre a la concepción de 'cosas' extensas pero no-materiales. Al contrario, lo extenso y lo material son una y la misma cosa, mientras que la substancia no-material tiene otra modalidad que la natural-mecánica de ser-o sea, la de ser pensante.

En cambio, para Newton, la existencia material se desarrolla en el espacio físico no-material. Por lo tanto, dentro del marco de la propia naturaleza física, los objetos sensibles se distinguen de su medio espacial, inmutable. Al mismo tiempo, dicho medio se integra en el mundo físico-mecánico en el sentido de una 'cosa misma', y las magnitudes pertenecientes a ello se integran en las ecuaciones en las cuales se formula el dinamismo de los procesos físicos. De esta manera, el concepto newtoniano de espacio constituye un aspecto del que Newton manejaba un nuevo conjunto de términos para la conceptualización de la naturaleza. Y, además de no ser aceptable a los cartesianos, dicho conjunto de términos planteaba un problema difícil para la filosofía sistemática posterior. Porque, dado el innegable y duradero éxito científico de la física newtoniana, la filosofía tenía que ajustarse a ella, de una manera u otra.

Por otra parte, la noción de la existencia física del espacio absoluto ha planteado el problema especial de los criterios científicos para la comprobación de dicha existencia. Es decir, justamente por el carácter no-sensible del espacio absoluto -lo que da lugar al problema ontológico de cómo se integre este espacio en la naturaleza-, la confirmación empírica de su existencia no puede apelar a la evidencia de la observación directa. Así Newton dice:

"En realidad es cosa de mayor dificultad descubrir y distinguir efectivamente los movimientos verdaderos de los cuerpos particulares de los movimientos aparentes; porque las partes de ese espacio inmóvil, en el cual se realizan aquellos movimientos de ninguna manera admiten la observación por nuestros sentidos."(3)

Por lo tanto, desde el punto de vista empírico, a pesar de que el espacio absoluto hubiera sido una inferencia inductiva, ha subsistido la duda de que la existencia de dicho espacio pudiera considerarse inferencia científica. Este tipo de crítica se desarrolló por excelencia por Ernst Mach a fines del siglo pasado.(4) Mach aduce que, en principio, el espacio no puede observarse en su independencia de los objetos sensibles o el propio observador; al mismo tiempo, Mach parte de la interconexión de toda la existencia física para rechazar la concepción de espacio (o de tiempo) como una 'cosa misma', dotada de naturaleza fija, inherente e independiente de sus relaciones con lo demás del universo. Mach considera imposible comprobar la existencia del movimiento absoluto con respecto al espacio absoluto. Considera que estas nociones carecen de sentido físico y que son meras especulaciones acerca de entidades metafísicas. Dice, por ejemplo:

"...pareciera como si Newton se encontrara aún bajo la influencia de la filosofía medieval y que no fuera leal a su idea de atenerse a los hechos."(5)

Pero es innegable que la noción de espacio absoluto sirvió, en la física clásica, como punto de partida para la deducción de consecuencias observables, y que éstas fueron comprobadas por la experiencia durante dos siglos. Entonces, puesto que ninguna teoría de la ciencia moderna se considera como una verdad insuperable, hay quienes sostienen en la actualidad que la noción de espacio absoluto fuera una inferencia justificada empíricamente en la época de la física clásica. Este tipo de justificación del concepto de espacio absoluto se caracteriza con frecuencia por el intento de limitar el significado de este concepto a un contenido 'puramente físico'. Se suele insistir en que la palabra 'absoluto', en su empleo newtoniano, no implica nada de lo 'filosófico' o 'metafísico', sino que se refiere simplemente a la existencia del espacio físico, dotado de ciertas propiedades confirmadas por la experiencia en la época de la física clásica.

Sin embargo, lo que no se advierte en esta interpretación es que el problema filosófico consiste precisamente en la justificación para considerar que exista físicamente un espacio con semejantes propiedades. Porque se trata de una existencia no-observable en principio y, por lo tanto, la confirmación lograda en la propia época de la física clásica tenía que ser ajustada a la necesidad de conceder que la existencia del espacio absoluto fuera, en sentido lógico, un postulado.(6) Esto fue muy claro para Newton y, en general, el propio Newton nunca intentó suprimir el problema del carácter del espacio absoluto, sino que buscaba una explicación teísta de ello. En cambio, en la actualidad, existe una tendencia de suprimir el problema filosófico y de aceptar la posible existencia física de semejante espacio como algo perfectamente aceptable desde el punto de vista empírico. Por ejemplo, D'Abro dice:

"La ciencia clásica, por espacio absoluto, quiso decir un espacio con respecto al cual el movimiento, o por lo menos el movimiento acelerado o la rotación, parecían manifestarse dinámicamente; y la experimentación comprobó definitivamente que tal espacio existía."(7)

De esta manera, D'Abro parece dar por entendida una concepción de la comprobación de una existencia física, que es en realidad muy discutible.

Tomando en cuenta estos dos tipos de consideraciones que influyen en la crítica del concepto de espacio absoluto, es claro que se trata aquí de problemas filosóficos que son implicados en el problema científico de concebir el espacio como una magnitud física. Es decir, se trata de uno de los problemas fundamentales de la física moderna, cuya solución sigue desarrollándose. Lo que tenemos en la física newtoniana es el planteamiento del problema en la forma específica en que el problema aparece junto con la física moderna misma, como aspecto inseparable de ella, por así decir.

La mecánica newtoniana maneja cuatro magnitudes 'últimas': masa, fuerza, espacio, tiempo; y es importante reconocer que este conjunto de magnitudes caracteriza dicha mecánica en el sentido de que son las magnitudes que se toman como determinantes de los movimientos de los cuerpos. No es simplemente la cuestión de que, con Galileo y Newton, se había rechazado la causalidad aristotélica de las 'formas substanciales' para asentar la causalidad física exclusivamente en la fuerza o la masa. El espacio y el tiempo no se conciben como puros trasfondos neutrales que no toman parte en la causalidad natural. Al contrario, el espacio y el tiempo físicamente homogéneos influyen en el movimiento de los cuerpos en proporción a su magnitud. Es decir, la determinación de los procesos no se limita a lo que podrían llamarse 'causas eficientes', sino que implica la conjugación dinámica de las cuatro magnitudes. Además, éstas se consideran independientes entre sí. Esto no es enteramente inequívoco, quizás, en el caso de la relación entre la masa y la fuerza, pero sí lo es en el caso del espacio y el tiempo, entre sí y a diferencia de la masa y la fuerza. Se trata así de los componentes integrantes del mecanismo físico, no obstante que cada componente se integra en el mecanismo a su modo.

Si tomamos en cuenta este carácter implícito de la física newtoniana, resulta claro que los conceptos de espacio y tiempo responden, al menos en parte, al problema más general de concebir las magnitudes de la mecánica. Así, el mismo carácter absoluto se atribuye a la masa. Sin embargo, la crítica de los conceptos de espacio y tiempo absolutos ha respondido, en la mayor parte, al problema de concebir estas naturalezas específicas. Ha sido hasta tiempos recientes que la experiencia científica no sólo ha venido a apoyar las persistentes dudas filosóficas acerca del espacio y el tiempo absolutos, sino también ha comprobado la necesidad de modificar el concepto newtoniano de la masa.

De suerte que el problema de la crítica de los conceptos de espacio y tiempo absolutos ya puede enfocarse dentro del marco más amplio de la concepción de las magnitudes que, en su conjunto, constituyen los procesos mecánicos.

Notas. Capítulo IV.

¹ Por ejemplo, en la física relativista se considera que el espacio físico existe objetivamente como espacio, pero que no es una existencia en sí misma en el sentido newtoniano. El espacio relativista existe como componente del continuo espacio-tiempo, y este continuo existe en relación con las masas en movimiento, de manera que la métrica tanto de espacio como de tiempo se determinan en el marco de dichas relaciones.

² Citado por Cajori, Nota 5, Principia, pág. 632, de Voltaire, Eléments de la philosophie de Newton.

"A Frenchman who arrives in London finds a great alteration in philosophy, as in other things. He left the world full, he finds it empty. At Paris you see the universe composed of vortices of subtle matter, in London we see nothing of the kind!"

³ Principia, pág. 12.

"It is indeed a matter of great difficulty to discover, and effectually to distinguish, the true motions of particular bodies from the apparent; because the parts of that immovable space, in which these motions are performed, do by no means come under the observations of our senses."

⁴ Ernst Mach, Desarrollo histórico-crítico de la mecánica, (versión española de la séptima edición alemana de 1912), Espasa-Calpe Argentina, Buenos Aires, 1949. Capítulo II, Sec. 6, "Las ideas de Newton sobre tiempo, espacio y movimiento", págs. 188-206.

⁵ *Ibid*, pág. 189.

⁶ Los experimentos descritos en el Scholium de las Definiciones- el famoso 'bucket experiment' y el experimento imaginario de las dos esferas conectadas por una cuerda-, tenían el propósito de demostrar el movimiento absoluto y, por inferencia, el espacio absoluto.

⁷ A. d'Abro, *op. cit.*, Cap. 10, pág. 110. Mi énfasis.

"Classical science, by absolute space, meant one with respect to which motion, or at any rate accelerated motion or rotation, appeared to manifest themselves dynamically; and experiment proved conclusively that such a space existed."

Parte B. El concepto newtoniano de tiempo, y el
enlace teórico de los medios absolutos.

Nota Preliminar

Cuando se propone hacer una exposición del concepto newtoniano de tiempo, es necesario tomar en cuenta que, para Newton, la concepción tradicional de la dependencia de la medición temporal en la espacial se convierte en problema medular para la observación de los procesos físicos en un marco espacio-temporal. Es decir, se plantea el problema, en su forma moderna, de las determinaciones temporales de los cuerpos en movimiento. Y, en realidad, la solución encontrada por Newton al problema de la medición del aspecto temporal del movimiento es muy complejo. Depende del carácter de las ecuaciones del movimiento, que aportan un fundamento para la dependencia de las determinaciones temporales en las espaciales, y de las propiedades tanto del espacio como del tiempo. Así, este problema del tiempo empírico implica de manera muy especial toda la teoría de espacio y tiempo, considerada como componente de la teoría newtoniana de movimiento.

Por otra parte, los problemas implicados por la medición del tiempo son de interés especial para la filosofía de la ciencia, porque se trata aquí del punto clave de la fundamentación newtoniana de los datos empíricos concernientes a los cambios de posición de los cuerpos en movimiento. En efecto, el problema de las determinaciones temporales pone de relieve la interdependencia de todos los aspectos de la física de Newton; y resulta claro también que la dependencia de la medición temporal de la espacial no implica que las determinaciones espaciales de los movimientos tengan significado físico independientemente de la consideración de los procesos a los cuales los movimientos pertenecen.

Así, el concepto de tiempo ofrece un punto de partida para considerar el enlace teórico entre el espacio y el tiempo, y para considerar cómo los conceptos de espacio y tiempo de Newton se integran en su física.

En la exposición que sigue, se sugiere primero el interés, desde un punto de vista histórico, del tema de la posición espacio-temporal; y, luego, se trata el concepto de tiempo sistemáticamente.

Capítulo V

La teoría newtoniana de espacio y tiempo, y la noción de posición en la física moderna.

Desde un punto de vista histórico, la teoría newtoniana de espacio y tiempo aparece como la forma en que, por primera vez, los conceptos de espacio y tiempo físicos fueron definidos y enlazados entre sí de un modo que permitió que las magnitudes pertenecientes a ellos se integraran en la física dinámica. A la vez, la comprobación empírica de la física newtoniana descansaba en que la teoría de espacio y tiempo aportó una fundamentación para el empleo de marcos de referencia espacio-temporales.

Las concepciones espacio-temporales de Newton se vinculan estrechamente con antecedentes inmediatos. En la filosofía, la noción de los medios absolutos de la existencia material -medios dotados de carácter divino- ya había sido propuesto por Henry More y por Isaac Barrow, el maestro de matemáticas de Newton.(1) En la ciencia, el siglo XVII había visto una serie de aportaciones fundamentales a los aspectos espacio-temporales de la dinámica. En cuanto al método, Descartes había desarrollado la teoría de las coordenadas. Pero el descubrimiento más importante de esta época fue el del papel físico del tiempo. Esto fue la gran importancia de la teoría galileana de la aceleración, que hizo posible la dinámica.(2) Es decir, desde los primeros pasos de la física estática en la antigüedad, la longitud espacial había sido comprendida como magnitud física determinante(3) -por ejemplo, en la teoría de la palanca de Arquímedes. Y es evidente que, en la estática, los problemas del equilibrio podían enfocarse en el espacio con la ayuda de nociones geométricas. En cambio, no fue hasta Galileo que se descubrió el papel físico del tiempo en el sentido de una magnitud determinante; y esto constituyó, efectivamente, el punto de partida para el desarrollo de la dinámica. Por otra parte, varios investigadores, notablemente Stevin y el propio Galileo, estudiaron los efectos espaciales cuando las fuerzas compuestas actúan en un cuerpo.(4) Luego, en medio siglo, hubo una gran cantidad de trabajos que trataron problemas particulares de la mecánica, y el manejo de las magnitudes espacio-temporales experimentó un rápido desarrollo.(5)

El paso newtoniano consistió en la elaboración de la teoría de espacio y tiempo, para fundamentar las magnitudes pertenecientes a ellos y la posición en ellos. Esto hizo posible en principio que las leyes de los procesos podían ser comprobadas por la observación de los cambios de posición de los cuerpos en el espacio y el tiempo. Y, recíprocamente, los datos de posición podían servir de base para inferencias concernientes a los procesos dinámicos. La unidad integral de este sistema se establece por las leyes del movimiento, en las cuales las magnitudes espacio-temporales se integran en las relaciones más generales de la

física newtoniana entre la fuerza, la masa y los estados de movimiento.(6) Así, la posibilidad de elaborar el papel empírico de la posición espacio-temporal se debe, en última instancia, a la unidad del sistema entero.

El desarrollo post-newtoniano de la física se ha caracterizado por el creciente énfasis en los cambios de posición. Quizás podría decirse que el método de la comprobación y de las inferencias a través de los datos posicionales -método cuya posibilidad se debe a la unidad de la teoría de la mecánica- se convirtió en una teoría de la primacía de los aspectos de posición de los procesos físicos. Por ejemplo, una actitud muy difundida ha sido expresada por Alfred North Whitehead.

"...el empeño por dar una explicación dinámica de los fenómenos, es la tentativa de explicarlos por afirmaciones en la forma general, de que tal o cual substancia o cuerpo estuvo en este lugar, y ahora está en aquel lugar. Así llegamos a la gran idea básica de la ciencia moderna, de que todas nuestras sensaciones son el resultado de comparaciones entre las cambiadas configuraciones de las cosas en el espacio, en tiempos diferentes. Se sigue, por lo tanto, que las leyes del movimiento, es decir, las leyes de los cambios en las configuraciones de las cosas, son las leyes últimas de la ciencia física."(7)

Aquí las propias leyes del movimiento se conciben en principio como "las leyes de los cambios en las configuraciones de las cosas". Se trata explícitamente de "la reducción de los fenómenos físicos a meros cambios de posición" ("...the reduction of physical phenomena to mere changes in position").(8)

Esta actitud ha resultado compatible con tendencias filosóficas muy diversas. Por una parte, es compatible con el materialismo mecanicista, con su tradición atomista. Por otra parte, en las varias tendencias empiristas, idealistas o positivistas, ha resultado conveniente considerar que los datos de posición nos ofrecen los conocimientos empíricos que corresponden a los fenómenos sensibles, espacio-temporales. Desde el punto de vista atomista, puede tratarse de partículas materiales, existentes objetivamente y localizables en un punto de espacio en un instante de tiempo. Para el empirista, los datos de posición pueden considerarse en abstracción de la naturaleza ontológica de los fenómenos observados.

En la ciencia física misma, es manifiesto que la vigencia de posición espacio-temporal no se ha limitado al dominio de la física clásica, en cuyo seno se desarrolló, sino que se ha extendido a los dominios de la física relativista y de la física atómica, y ha adquirido cierta independencia teórica. Es decir, ya se atribuye a la posición espacio-temporal un papel que tiene cierta independencia ante cualquier teoría específica de la mecánica, en el sentido de que la posibilidad en principio de predecir la posición de los objetos implicados en un proceso es el criterio del carácter causal de las leyes del proceso en cuestión.

Pero la experiencia de la física en nuestro siglo sugiere que, aun si se acepta el criterio de posición de la causalidad, éste no puede aplicarse arbitrariamente. Porque una teoría, cuya propia estructura interna hace posible la predicción de la posición, implica concepciones adecuadas de los aspectos espacio-temporales de los procesos que ocurren en el dominio de la teoría. Por lo tanto, es natural considerar que, cuando se logre una teoría nueva de gran alcance que traiga aparejada la modificación de los conceptos de las magnitudes de la dinámica, la modificación afectará a las magnitudes espacio-temporales de igual manera que a las otras.(9) Para establecer la primera teoría de gran alcance de la física moderna, Newton desarrolló una concepción de los aspectos espacio-temporales de la mecánica que le permitió integrarlos en su física; y, por lo tanto, resultó posible predecir la posición. Luego, en la física relativista, la causalidad según el criterio de posición fue conservada a través de otra concepción nueva de los aspectos espacio-temporales de la mecánica; y esta concepción no sólo se integra en la dinámica relativista sino que también implica un concepto nuevo de posición espacio-temporal y un concepto nuevo de cambios de posición. Y esto es lo que hace posible que la predicción de la posición derive de modo consecuente de la teoría.

En cambio, en la teoría de la física cuántica no se ha logrado este tipo de síntesis nueva, que tendría que ser caracterizada por una teoría de espacio y tiempo propia a la física cuántica y que implicaría un concepto apropiado de posición. Aquí, el criterio de posición de la causalidad sigue siendo aceptado. Pero la noción de posición es implícitamente la newtoniana.(10) Y puesto que no es posible predecir la posición newtoniana de una partícula subatómica, se considera que no es posible que las leyes cuánticas sean causales.

Así aparece el problema del sentido en que una teoría de espacio y tiempo y, con ella, un concepto de posición se integren lógicamente en una teoría general de la mecánica. Una vez que este problema sea admitido, el concepto de posición queda incluido en el conjunto de concepciones físicas que son susceptibles de cambio; y esto tiene el resultado de que el criterio de posición de la causalidad tendría que definirse en el marco conceptual de una teoría especificada.

Desde este punto de vista el interés recae sobre el desarrollo histórico de los conceptos de espacio, tiempo y posición. El motivo fundamental del presente trabajo es estudiar la teoría newtoniana de espacio y tiempo, considerándola como el punto de partida para el desarrollo de estos conceptos en la física moderna.

Notas. Capítulo V.

- ¹ Isaac Barrow (1630-1677). Maestro y amigo de Newton, y su predecesor como catedrático 'Lucas' de matemáticas en la Universidad de Cambridge. -Henry More, también de Cambridge y contemporáneo con Barrow y Newton. -Véase Edwin Arthur Burtt, The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science, Doubleday (Anchor), N.Y., 1954; Cap. V, Sec. c, "More's Notion of Extension as a Category of Spirit"; Sec. e, "Space as the Divine Presence"; Sec. f, "Barrow's Philosophy of Method, Space and Time".
- ² Galileo Galilei (1564-1642) desarrolló métodos para la medición del tiempo que le permitieron confirmar sus razonamientos acerca de la aceleración uniforme en el tiempo, en el caso de la caída de los cuerpos. Véase su Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuoue Scienze. La sección, "El movimiento naturalmente acelerado", en el tercer diálogo (Tercer Día) empieza con el texto famoso donde Galileo rechaza el papel determinante de la distancia en el caso de la aceleración uniforme. (La versión consultada para este trabajo es la traducción inglesa de Henry Crew y Alfonso de Salvio, en la edición de Dover (N.Y., S99): Galileo Galilei, Dialogues Concerning Two New Sciences.)
- ³ He tomado el término, 'determinante', de Ernst Mach. Para una discusión de las magnitudes determinantes en la teoría de la palanca, Véase Mach, op. cit., pág. 21.
- ⁴ Galileo, op. cit., "Fourth Day", pág. 244 ff. "The Motion of Projectiles". Aquí Galileo demuestra que la trayectoria de un proyectil es una parábola. -S. Stevinus (1548-1620) llegó a utilizar el principio del paralelogramo de las fuerzas. Mach, en la obra citada, tiene una discusión de Stevin (págs. 32-40) y de Galileo (págs. 107-133).
- ⁵ Por ejemplo, las obras principales de Huyghens pertenecen a este período.
- ⁶ Véase el texto de las Leyes del Movimiento en el Apéndice.
- ⁷ Alfred North Whitehead, An Introduction to Mathematics, Oxford University Press (Galaxy), N.Y., 1958, págs. 31-32. Mi énfasis.

"...the endeavor to give a dynamical explanation of phenomena -Whitehead dice- is the attempt to explain them by statements of the general form, that such and such a substance or body was in this place, and is now in that place. Thus we arrive at the great basal idea of modern science, that all our sensations are the result of comparisons of the changed configurations of things in space at various times. It follows therefore, that the laws of motion, that is, the laws of the changes of the configurations of things, are the ultimate laws of physical science."

⁸ Ibid, pág. 36.

⁹ Para una discusión del desarrollo de los conceptos fundamentales de una ciencia, Véase Eli de Gortari, La categoría de espacio en la física atómica, en Diánoia, UNAM, 1957, págs. 96-97.

¹⁰ Véase, por ejemplo, el artículo de Louis de Broglie, "La Reinterpretación de la mecánica ondulatoria", en Examen de la Mecánica Cuántica, Suplemento del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, 2ª serie, Núm. 29, UNAM, 1961, págs. 200-204.

Capítulo VI

Tiempo absoluto y tiempo relativo:

el problema de la medición del tiempo.

El concepto newtoniano de tiempo, tal como el de espacio, es el de una 'cosa misma', no-sensible, dotada de naturaleza propia e inmutable. Para Newton, la magnitud física, tiempo, corresponde al fluir temporal que existe en sí mismo, independientemente del resto de la naturaleza física y, sin embargo, como componente fundamental de ésta. Así tenemos la conocida formulación:

"El tiempo absoluto, verdadero, y matemático, de por sí y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación a ninguna cosa externa, y por otro nombre se llama duración: el tiempo relativo aparente y común es alguna medida sensible y externa (sea ésta exacta o irregular) de la duración, por medio del movimiento, la cual se usa comunmente en lugar del tiempo verdadero; tal como una hora, un día, un mes, un año."(1)

Tal como el espacio absoluto queda desligado de los cuerpos extensos, el tiempo absoluto se concibe en su separación radical del movimiento de los cuerpos. Sin embargo, esta analogía no puede servir como punto de partida para la exposición del concepto de tiempo de Newton, porque la separación entre el tiempo y los cuerpos no se conserva en el caso del tiempo relativo. Esto se debe a que la relación entre el tiempo y el movimiento de los cuerpos no es análoga a la relación entre el espacio y la extensión de los cuerpos. Es decir, en el enfoque newtoniano, el movimiento no nos da una medida del tiempo en el mismo sentido en que la extensión de los cuerpos nos da una medida exacta de una cantidad del espacio absoluto.(2) Esta diferencia fundamental trae aparejado que el aspecto temporal de la teoría no es enteramente análogo a su aspecto espacial. En efecto, la analogía es restringida al espacio y el tiempo absolutos, mientras que la diferencia se expresa en los conceptos de espacio y tiempo relativos. En fin, el problema newtoniano de la medición del tiempo no permite que el tiempo relativo se conciba análogamente al espacio relativo.

Desde la antigüedad, se había considerado que la medición del tiempo implicara un problema peculiar, mientras que no se consideró que la medición espacial ofreciera problema teórico semejante. Y es importante tener presente que ni al propio Newton se le ocurrió dudar de la validez de esa tradición.

En el caso de la extensión espacial, hubo acuerdo universal respecto al principio de la homogeneidad métrica de la realidad extensa. En tiempos recientes se ha advertido que la aceptación

de dicho principio se remonta a la experiencia primitiva de la uniformidad en el comportamiento espacial de los objetos cotidianos.(3) Sin embargo, ésta no sería una explicación suficiente de que, aun en la ciencia, dicho principio fuera aceptado como una verdad evidente. Pareciera que este principio, en el plano teórico, descansara en la posibilidad de comprobar la experiencia cotidiana por la medición directa. Es decir, la verdadera extensión métrica del universo se consideraba manifiesta sensiblemente en la realidad a la vista. Así, una figura geométrica que se construyó con toda precisión posible pudo tomarse de por sí como un caso de la extensión métrica, para el estudio de las relaciones inherentes a las configuraciones espaciales. Por otra parte, el carácter manifiesto de la extensión hizo posible medir la distancia espacial con unidades claramente espaciales.

En cambio, en el caso del tiempo, no fue posible considerar que la duración temporal sea a la vista en sí misma. La duración temporal sólo podía medirse a través de los movimientos espaciales. Ya Aristóteles advirtió que la única manera de medir el tiempo es tomar como unidad un movimiento espacial uniforme que se repite, de preferencia un movimiento circular.

"El tiempo es una medida del movimiento y del ser movido, y mide el movimiento por medio de determinar un movimiento que medirá el movimiento entero exactamente, como el cúbito mide la longitud por medio de determinar una cantidad que medirá la longitud entera."(4)

Y añade:

"...más que cualquier otro, el movimiento circular regular es la medida, porque el número de éste es el mejor conocido. Ahora bien, ni la alteración ni el aumento ni el venir a ser pueden ser regulares, pero la traslación puede serlo. También por esto, se piensa que el tiempo es el movimiento de la esfera, es decir, porque los otros movimientos se miden por este movimiento, y el tiempo (se mide) por este movimiento."(5)

Así, para los griegos, el 'movimiento perfecto' de la esfera -el cielo- suministró una medida del tiempo, haciendo presente la métrica temporal, no obstante que indirectamente a través de un movimiento. Para el propio Aristóteles, esta medida tiene carácter intrínsecamente temporal, puesto que el tiempo aristotélico es inherente al movimiento, o sea, es 'el número del movimiento'.(6)

De esta manera, la noción de la dependencia de la medición del tiempo de la medición del movimiento espacial apareció históricamente en el marco de una solución fundada en el concepto de 'movimiento perfecto'. Este papel del movimiento de la esfera de ser la medida del tiempo fue comunmente aceptado en Grecia. Y así resultó posible para Aristóteles considerar que, tal como

la métrica de la extensión se manifiesta en el plenum corpóreo, la métrica temporal se manifiesta en el movimiento circular perfectamente uniforme.

Pero semejante analogía ya no fue posible para Newton. En el siglo XVII, el movimiento perfecto del cielo ya había sido rechazado. Así Newton dice:

"Puede que no exista tal cosa como un movimiento uniforme, por medio del cual el tiempo pueda medirse exactamente. Todos los movimientos pueden ser acelerados y retardados, pero el fluir del tiempo absoluto no es susceptible de ningún cambio."(7)

Aquí queda rechazada en principio la noción del movimiento perfecto como concepto de la física. En cambio, se plantea que ningún movimiento sea exento de variación de acuerdo con las leyes universales del movimiento. Por lo tanto, para Newton, el problema de la medición temporal ya encierra la dificultad de que no existan movimientos cíclicos cuya duración pueda considerarse uniforme en principio. Resulta, entonces, que la única manera de fundamentar la métrica absolutamente uniforme del tiempo es de referirla al propio fluir temporal. Mientras que la noción de espacio absoluto responde a la necesidad de concebir el espacio inmóvil en el cual las velocidades pueden sumarse, la noción del tiempo absoluto responde a la necesidad primordial de establecer la propia métrica temporal. Y esto ocurre justamente por una exigencia de la mecánica universal.

Para Newton, entonces, existen dos consideraciones: por una parte, la mecánica universal se considera incompatible con suponer que algún movimiento natural se repita con uniformidad absoluta; y esto implica la necesidad de recurrir al tiempo absoluto para la propia métrica temporal. Por otra parte, persiste la consideración independiente de que la única manera de medir el tiempo es a través del movimiento espacial. Pero los movimientos espaciales cíclicos que se toman como unidades temporales en principio no son medidas temporales exactas. Es posible que sean exactas, pero no es legítimo suponer que sea así efectivamente. La medición del tiempo se practica en algo externo al tiempo mismo. Es decir, no se mide la duración temporal directamente, sino a través del movimiento; y el movimiento, que nos da las unidades temporales, no pone de manifiesto en principio la métrica del tiempo absoluto.

Desde el punto de vista actual, es de interés notar que la problemática de la dependencia de las mediciones temporales de las espaciales, heredada de la antigüedad, encierra una relación estrictamente unilateral entre la medición temporal y la espacial. Además, en la actualidad, la noción de que toda medición del tiempo es reductible a una medición espacial parece implicar la misma unilateralidad. Se trata así de una concepción que persiste hasta nuestros días.

En la teoría newtoniana, la medición espacial es fundada por el concepto de los espacios relativos. Estos, que se miden en relación con los cuerpos, ponen de manifiesto la métrica del espacio absoluto. En cambio, la métrica temporal nunca se pone de manifiesto directamente. Lo único observable es que un movimiento de traslación, o un proceso físico, parece repetirse espacialmente con una uniformidad tal que resulta factible atribuir la misma duración temporal a cada repetición. Pero esta mismidad de duración nunca es más que un atribuir, sea o no que es la misma. Es decir, no hay manera de comprobarla por la observación.

La diferencia entre la medición espacial y temporal se encuentra expresada claramente en los textos newtonianos. Por una parte, Newton dice:

"El espacio relativo es alguna dimensión o medida, móvil, de los espacios absolutos....El espacio absoluto y el espacio relativo son iguales de figura y magnitud...."(8)

En cambio, dice del tiempo relativo:

"...el tiempo relativo, aparente y común es alguna medida sensible y externa (sea ésta exacta o irregular) de la duración, por medio del movimiento...."(9)

El tiempo relativo no puede ser una medida verdadera del tiempo absoluto en el mismo sentido en que un espacio relativo es una medida del espacio absoluto. El espacio relativo es una medida del espacio absoluto. El tiempo relativo es una medida externa de la duración, a través del movimiento; y éste no es absolutamente uniforme en principio. Es evidente, entonces, que el tiempo absoluto no puede servir para fundamentar el tiempo relativo de modo análogo a cómo el espacio absoluto fundamenta el espacio relativo.

En sus grandes rasgos, la conjugación newtoniana del espacio y el tiempo tiene dos aspectos. Por una parte, se postulan los medios absolutos y análogos. Pero, por otra parte, la conceptualización del tiempo tiene que ser ajustada al problema de la medición del tiempo. Como veremos, Newton responde a este problema con el concepto del tiempo relativo corregido, o 'el tiempo absoluto en la astronomía'.

Notas. Capítulo VI.

¹ Principia, pág. 6.

"Absolute, true and mathematical time, of itself and from its own nature, flows equably without relation to anything external, and by another name is called duration: relative, apparent and common time, is some sensible and external (whether accurate or unequable) measure of duration by the means of motion, which is commonly used instead of true time; such as an hour, a day, a month, a year."

² En el presente capítulo la discusión se limita a la manifestación de este problema en la medición. El origen de este problema en la concepción newtoniana de la materia se trata en el Cap. VIII, Sec. a.

³ Para una discusión sumamente interesante del origen de la noción de la homogeneidad métrica del espacio físico, Véase A. d'Abro, op. cit., Cap. IV, "The Problem of Physical Space".

⁴ Física, 221^al.

"Time -Aristóteles dice- is a measure of motion and of being moved, and it measures the motion by determining a motion which will measure exactly the whole motion, as the cubit does the length by determining an amount which will measure out the whole."

⁵ Ibid, 223^b.

"....regular circular motion is above all else the measure, because the number of this is the best known. Now neither alteration nor increase nor coming into being can be regular, but locomotion can be. This also is why time is thought to be the movement of the sphere, viz. because the other movements are measured by this, and time by this movement."

⁶ Ibid, 219^b.

⁷ Principia, pág. 8.

"It may be that there is no such thing as an equable motion, whereby time may be accurately measured. All motions

may be accelerated and retarded, but the flowing of absolute time is not liable to any change."

⁸ Ibid, pág. 6. Mi énfasis.

"Relative space is some movable dimension or measure of the absolute spaces...Absolute and relative space are the same in figure and magnitude..."

⁹ Ibid. Mi énfasis.

"...relative, apparent and common time is some sensible and external (whether accurate or unequable) measure of duration by the means of motion..."

Capítulo VII

Tiempo Absoluto

a. El tiempo absoluto en su carácter de medio.

El tiempo absoluto, por su propia naturaleza, es un orden de lugares primordiales. Es decir, el fluir temporal tiene el mismo punto de partida conceptual como el espacio absoluto, en la noción de la 'lugardad'.

"...los tiempos y los espacios son, por así decir, los lugares tanto de sí mismos como de todas las demás cosas. Todas las cosas son colocadas en el tiempo en cuanto al orden de sucesión; y en el espacio en cuanto al orden de situación."(1)

Así, la existencia de los objetos materiales en el espacio y el tiempo se entiende primariamente en el sentido de que ocupan lugares en el orden de lugares de espacio y de tiempo, respectivamente.

El fluir temporal absoluto es un orden inmutable.(2) Es implícitamente homogéneo en el sentido de que dos duraciones iguales tienen sentido físico unívoco, de la misma manera como dos distancias espaciales iguales. El tiempo es uni-dimensional y posee un sólo sentido; y es universalmente presente. De estas propiedades siguen las concepciones de la simultaneidad universal y la posición temporal unívoca. El carácter peculiar del tiempo es que es un fluir.

El tiempo absoluto, en su propia naturaleza e independiente mente de los cuerpos en movimiento, es el medio temporal. La consideración propiamente newtoniana aquí es de la existencia física de un orden de lugares temporales, mientras que la suposición de la uniformidad métrica del fluir temporal se toma de la tradición universalmente aceptada, como en el caso de la homogeneidad métrica de la extensión. En los dos casos, la concepción de la existencia de los medios absolutos aporta un substrato físico, homogéneo y continuo, para la métrica de la extensión y la duración, respectivamente.

Como hemos visto, hubo motivo especial para semejante fundamentación de la métrica temporal. Es decir, si el tiempo se mide mediatamente a través del movimiento, entonces, una vez que el concepto del movimiento perfecto fue rechazado, ya no era posible considerar que la uniformidad del fluir temporal tuviera manifestación sensible. En esta situación, la fundamentación de la métrica, tanto espacial como temporal, en medios existentes en sí mismos y en principio no-observables, equivale a postular

la uniformidad métrica del espacio y el tiempo independientemente de la posibilidad de observarla directamente. Desde este punto de vista, la teoría de los medios constituye una solución al problema de la comprobación de la uniformidad del fluir temporal. Se postula el tiempo absoluto, que fluye con uniformidad absoluta; y la comprobación empírica consistiría en que las consecuencias observables, deducibles de este postulado, se comprueben por la experiencia. Esta consideración pone de relieve el carácter teórico e inductivo de los conceptos de los medios absolutos.

Por otra parte, la teoría newtoniana es tal que la relación de dependencia del tiempo del espacio desaparece en el plano ontológico. La dependencia queda calificada como un resultado del desarrollo real de los procesos, que no necesariamente ponen de manifiesto la verdadera métrica temporal. Dicha dependencia es concepción nuestra, un problema de la observación, en un universo en donde no hay principio temporal análogo al principio espacial de la homogeneidad métrica de la realidad extensa ante los ojos.(3) La métrica temporal no está presente sensiblemente. Sin embargo, el fluir temporal uniforme es físicamente real. El espacio y el tiempo absolutos existen independientemente entre sí, cada uno de ellos existente en sí mismo y dotado de su propia naturaleza.

b. Consideraciones adicionales respecto a los medios newtonianos.

Desde el punto de vista de la filosofía sistemática, es claro que Newton recurre a la tradición de la substancia para fundamentar las propiedades espaciales y temporales en los substratos respectivos. Pero dichos substratos tienen carácter peculiarmente newtoniano. No son materiales ni sensibles. Sin embargo, no se conciben en el sentido de una realidad 'ideal' o 'esencial', detrás de o immanente a lo sensible, en el espíritu de la metafísica tradicional. Al contrario, se conciben como 'cosas mismas' del universo físico; y mientras posean naturaleza propia, distinta de la de los cuerpos, esto no les impide integrarse en los procesos físicos. Así se establecen dos tipos de existencia -lo material y sensible, y lo no-material y no-sensible- que coexisten en la naturaleza. Así, se trata de una teoría de modos distintos de ser, en el mismo plano de la realidad física.(4)

Esto es el aspecto de la teoría que no fue aceptable ni a los cartesianos en la época del propio Newton, ni a Kant un siglo más tarde.(5) Sin embargo, en la corriente materialista del siglo XVIII se consideró posible aceptar la concepción de espacio y tiempo como existencias cuyo modo físico de ser es sui generis, por así decir. Y, desde entonces, la noción del propio modo de ser del espacio y el tiempo físicos ha llegado a cobrar la fuerza de una verdad evidente de la ciencia moderna, volviéndose implícita.

Por lo tanto, es importante reconocer que la actitud en la que se acepta sin más la noción de la existencia física del espacio y el tiempo no-materiales es el resultado de un desarrollo en el pensamiento científico y filosófico, a partir de Newton. Pero en la época de Newton y, al menos, hasta Kant, subsistieron dudas filosóficas. Es decir, hablar del 'espacio físico' no hace desaparecer el problema fundamental de un dualismo de lo sensible y lo no-sensible dentro de la naturaleza. Además, el abandono en el siglo XVIII de la explicación teísta del espacio absoluto como el 'sensorium de Dios', no constituyó una solución de dicho dualismo, sino que, al contrario, puso de manifiesto su carácter filosófico.

Por otra parte, la conjugación newtoniana de lo absoluto y lo físico tiene aspecto notable en el caso del tiempo. El tiempo es un fluir, que en cierto sentido implica movimiento. Sin embargo, este fluir no implica de ninguna manera una naturaleza cambiante. Se trata ciertamente de que el fluir temporal acontece, pero este acontecimiento no encierra nada de variación o contingencia. No tiene ninguna causa física fuera de sí mismo, como ocurre con el movimiento de los cuerpos. Así podría decirse que el carácter absoluto del tiempo newtoniano nos remite al concepto de un acontecimiento físico absoluto.

c. El tiempo físico newtoniano.

#1. Los antecedentes aristotélicos.

En realidad, hasta Newton, la única teoría de tiempo que había sido desarrollada plenamente fue la de Aristóteles. La teoría aristotélica había establecido una problemática fundamental. Además, desde el punto de vista moderno, dicha teoría es muy depurada de consideraciones extrañas, por así decir. Todavía encierra interés intrínseco por su planteamiento de las propiedades del tiempo, y por su análisis del tiempo como una magnitud. De hecho, si consideramos la concepción newtoniana como superación de la teoría aristotélica, lo que emerge claramente es que, partiendo del tiempo esencialmente cuantitativo de Aristóteles, Newton dió el paso al tiempo físico, considerado como existencia substancial. Por lo tanto, este paso no puede interpretarse como la superación de una teoría que fuera incompatible con el carácter matemático de la física moderna. Puede ser comprendido más bien en torno a la concepción newtoniana de la existencia del espacio y el tiempo como los substratos de las magnitudes pertenecientes a ellos. Así tenemos la distinción entre las 'cosas mismas' de Newton y la noción aristotélica de la inmanencia, en que la espacialidad es inherente al plenum corpóreo y la temporalidad es inmanente al movimiento.

En cuanto a las concepciones espaciales de Aristóteles, la distinción cualitativa entre los cuerpos terrestres y los celestes y entre sus respectivas regiones trajo aparejada la noción

de que las distintas regiones del universo ejercen influencias diferentes en el movimiento de los cuerpos.(6) Frente a esta idea, Newton propuso el espacio homogéneo físicamente. Pero en el caso del tiempo, es todo lo contrario. La teoría aristotélica reduce la noción de tiempo al 'número del movimiento', mientras que el tiempo newtoniano tiene el carácter de un fluir físico.

Es de mucho interés tener presente los rasgos principales de la noción aristotélica, para poder ver en que consistió el paso newtoniano. Para Aristóteles, la temporalidad es inherente al movimiento.(7) El tiempo es la cuantificación propia del movimiento, sea éste de traslación o de los cambios en el devenir de las cosas.(8) El tiempo es el atributo del movimiento de tener una medida inherente a su duración. Esta medida es inmanente en todo movimiento particular y, a la vez, es independiente de la rapidez de éste, puesto que el tiempo es universal. Es decir, el tiempo, que es inherente al movimiento, suministra la medida de éste, de manera que la 'cantidad de movimiento' aristotélica es su duración temporal. Así tenemos una concepción típicamente aristotélica de la inmanencia de una naturaleza que es a la vez universal.

En cuanto al carácter del tiempo de ser la medida del movimiento, Aristóteles dice:

"...cuando percibimos un 'antes' y un 'después', entonces decimos que hay tiempo. Pues el tiempo es justamente esto -el número del movimiento con respecto a 'antes' y 'después'.

"Por lo tanto, el tiempo no es movimiento, sino sólo el movimiento en tanto que éste admite enumeración. Una prueba de esto: distinguimos entre lo más y lo menos por número, pero entre más o menos movimiento por tiempo. El tiempo, entonces, es un tipo de número."(9)

Luego Aristóteles define el término, 'número':

"Número, debemos hacer notar, se usa en dos sentidos, tanto del que es contado o lo contable, y también de aquél con el cual contamos. Obviamente, el tiempo es el que es contado, no aquéllo con el cual contamos: éstas son diferentes clases de cosas."(10)

Se trata, entonces, de que el tiempo es lo contable del movimiento. Lo que parece ser implícito aquí es que, es su aspecto temporal lo que hace que el movimiento sea una magnitud. Es decir, la noción de una magnitud la es de algo que tenga un principio inherente de cuantificación. Así Aristóteles dice:

"Ser en número' quiere decir que hay un número de la cosa, y que su ser se mide por el número en el cual es. Por lo tanto, si una cosa es 'en el tiempo', se medirá por el tiempo. Pero el tiempo medirá lo que se mueve y lo que está en reposo, el uno qua movido, y el otro qua en reposo; pues medirá su movimiento y su reposo respectivamente.

"Por lo tanto, lo que se mueve no será medible por el tiempo simplemente en cuanto que tenga cantidad, sino en cuanto su movimiento tenga cantidad. Así, ningunas de las cosas que ni se mueven ni están en reposo, son en el tiempo: ya que 'ser en el tiempo' es 'medirse por el tiempo', mientras que el tiempo es la medida del movimiento y el reposo."(11)

Así, ser en el tiempo es ser en una especie de número, o sea, ser una magnitud. Y lo que es en el tiempo es lo que existe en movimiento o reposo. Es en el tiempo por virtud de su movimiento o reposo, por ser su movimiento o reposo lo que se mide por el tiempo en el sentido de tener duración.

La inmanencia de este tiempo aristotélico se explica de la siguiente manera:

"Es claro también que, ser en el tiempo no quiere decir coexistir con el tiempo, de igual manera que ser en movimiento o en lugar no quiere decir coexistir con movimiento o lugar. Porque, si 'ser en algo' quiere decir esto, entonces todas las cosas serán en cualquier cosa, y el cielo será en un grano; ya que, cuando el grano es, entonces también es el cielo. Pero ésta es una conyunción meramente incidental.... lo que es en el tiempo implica necesariamente que hay tiempo cuando ello es, y lo que es en movimiento implica necesariamente que hay movimiento cuando ello es...."(12)

Pero si el tiempo no es una existencia substancial e independiente, y si su existencia depende del movimiento, entonces, Aristóteles pregunta, "Will time then fail?" Y contesta simplemente, "Surely not, if motion always exists."(13) Se considera así la conjugación necesaria del movimiento y el tiempo, en los términos aristotélicos de la inmanencia. Y es claro que este concepto de tiempo como 'el número del movimiento' no implica la calidad de lugar ni la homogeneidad física de una magnitud determinante de los procesos mecánicos. Estas nociones aparecen en la época moderna. Para Aristóteles el tiempo es la medida del movimiento, y nada más.

#2. La uniformidad del fluir temporal.

El concepto de la uniformidad del fluir temporal pone de relieve el significado de la existencia en sí del tiempo absoluto.

Newton dice:

"Todos los movimientos pueden ser acelerados o retardados, pero el fluir del tiempo absoluto no es susceptible de ningún cambio. La duración, o la persistencia de la existencia de las cosas, permanece la misma, sean los movimientos rápidos o lentos, o nulos: y, por consiguiente, esta duración debe distinguirse de las duraciones que no son sino medidas sensibles de aquélla; y de las cuales deducimos aquélla....."(14)

Se plantea así la noción de la razón del fluir del tiempo en un sentido distinto de la concepción de la rapidez del movimiento. Esta última es una relación entre una distancia y un intervalo de tiempo.(15) En cambio, en el caso del propio fluir temporal, estamos en el plano ontológico donde el espacio y el tiempo son independientes entre sí. Aquí se trata del transcurrir absoluto del tiempo, independientemente de los cuerpos que se mueven a la vez en él y en el espacio; y, por lo tanto, independientemente de nuestra percepción de la duración. El tiempo absoluto fluye uniformemente de acuerdo con su métrica inherente, propiamente temporal, "y, por lo tanto, esta duración debe distinguirse de cuales son únicamente medidas sensibles de ella." Este fluir temporal físico y objetivo encierra en sí mismo el principio del transcurrir del tiempo, por el cual es posible considerar que dos intervalos de tiempo son iguales, o congruentes. Además, es implícito que el tiempo es homogéneo físicamente.

A este respecto, el tiempo absoluto es enteramente análogo al espacio absoluto. Pero es de interés notar que cuando Newton propuso este concepto, no tenía que enfrentarse a una tradición de la heterogeneidad física, como tenía que hacer en el caso del espacio absoluto. La aportación propiamente newtoniana al concepto de tiempo es de su existencia como un fluir uniforme. En su exposición del concepto de espacio, Newton da por entendida la extensión métrica uniforme. Luego expone la noción de la 'lugardad' tanto del tiempo como del espacio. Pero en el caso del tiempo hace explícito qué es el tiempo, es decir, un fluir, y además, un fluir tal que encierra cierta razón de fluir uniforme. Se trata así del transcurrir temporal como tal, una concepción muy lejana a las del sentido común, y que no puede ser comprendida en términos de imágenes apoyadas en la experiencia sensible.

En la teoría aristotélica, por ejemplo, el tiempo se consideraba como uniforme, pero no como algo que fluyera con cierta razón. Al contrario, Aristóteles rechazó esta idea explícitamente y sostuvo que semejante concepción no se aplica al tiempo.

Así dijo:

"....como continuo, (el tiempo) es largo o corto, y como un número -i.e. de unidades- mucho o poco, pero no es ni rápido ni lento -tal como ningún número, con el cual numeramos, es rápido o lento-."(16)

Aristóteles acepta la omnipresencia del tiempo, y la congruencia de intervalos iguales durante los cuales ocurren movimientos de rapidez diferente; sin embargo, no considera que el tiempo exista en sí mismo como un fluir. En cambio, para Newton, el tiempo es en sí mismo el transcurrir que es la duración física. Independientemente de toda relación con el espacio o el movimiento, el tiempo existe como el medio que suministra la métrica para la duración de todo proceso sensible.

En el marco de esta concepción, si hubiera un movimiento absolutamente uniforme, en el cual distancias iguales se trasladaran durante intervalos temporales iguales, esto nos daría una meda sensible de tiempos iguales. Pero, como hemos visto, Newton prescindió de semejante suposición de la existencia del movimiento perfecto. Y, de modo más general, prescindió de suponer que existiera movimiento alguno que ocurriera exactamente de acuerdo con la ecuación que se considere como una descripción matemática de él. Esto es lo que plantea el problema newtoniano del tiempo empírico. Es decir, en el enfoque newtoniano, no es posible considerar que el movimiento inercial desempeñe papel privilegiado como expresión de la uniformidad del fluir temporal, porque cualquier movimiento cuya ecuación fuera conocida con precision absoluta sería semejante medida del tiempo. En efecto, toda ecuación de movimiento se refiere al fluir temporal absoluto, cuya uniformidad de flujo es la base de los valores de la magnitud tiempo. Además, todo movimiento puede enfocarse en términos de los espacios recorridos durante intervalos temporales iguales. Por lo tanto, el movimiento inercial es únicamente el caso más simple para la consideración de tiempos iguales, pero no fundamenta esta consideración en principio. La fundamentación es más bien la suposición general de que las leyes del movimiento -entre ellas la ley de inercia- se cumplen en el espacio y el tiempo absolutos.

Esta cuestión adquiere interés actual porque en nuestro siglo existe la tendencia a interpretar el espacio y el tiempo absolutos como el espacio y el tiempo que están implicados en un sistema inercial considerado como si fuera universal. A este respecto, A. d'Abro dice:

"Newton hace referencia al tiempo absoluto como 'fluyendo uniformemente'. Pero, por supuesto, esta referencia al tiempo no nos lleva muy lejos, puesto que una razón de flujo sólo puede reconocerse como uniforme cuando sea medida en comparación con alguna otra razón de flujo, tomada como norma. Obviamente, alguna definición adicional tendrá que encontrarse. Ahora bien, tanto Galileo como Newton reconocieron, como resultado de mediciones con relojes, que los cuerpos aproximadamente libres, moviéndose en un marco aproximadamente galileano, describían líneas aproximadamente rectas, con rapidez aproximadamente constante. Luego, Newton eleva este descubrimiento empírico, aproximado, al rango de un principio riguroso, el principio de inercia, y afirma que los cuerpos absolutamente libres se moverán con rapidez absolutamente constante, siguiendo líneas perfectamente rectas, y por lo tanto recorrerán distancias iguales en tiempos iguales.

Quando se lo expresa así como principio riguroso, el espacio y el tiempo a los cuales se refiere, son el espacio y el tiempo absolutos de la ciencia newtoniana."(17)

Este análisis se caracteriza por no hacer una distinción entre el tiempo absoluto y la medición del tiempo a través del movimiento, de modo que la interpretación sale del marco del pensamiento del propio Newton. Se sugiere que el movimiento inercial nos da la medida del tiempo, en el sentido de que los tiempos correspondientes a los espacios iguales son intervalos iguales del tiempo absoluto. Pero lo que no se advierte aquí es que, como acabamos de advertir, toda ecuación del movimiento se refiere al tiempo absoluto. Además, para Newton, la inercia es una fuerza entre otras, y éstas en su conjunto causan los movimientos que se enfocan en el espacio y el tiempo. Así, el problema del tiempo empírico, a diferencia del postulado tiempo absoluto, es conocer cabalmente las causas del movimiento en cuestión, para poder formular su ecuación con exactitud.

Lo importante aquí es que, para Newton, el movimiento inercial -tal como todo movimiento- no nos da más que una medida sensible, externa, del tiempo. En cambio, el tiempo absoluto es una 'cosa misma', no-sensible, cuyo propio fluir establece la condición temporal del movimiento uniforme. En la interpretación de D'Abro, queda suprimido el carácter filosófico de la concepción newtoniana en la cual el verdadero tiempo físico no tiene manifestación sensible exacta en principio. La existencia de dicho tiempo es un postulado -como lo es también el propio principio de inercia-, y el nivel ontológico de dichos postulados no debe confundirse con el tiempo observable. Lo que caracteriza la concepción newtoniana de tiempo es justamente la irreductibilidad de la distinción entre el tiempo verdadero y el tiempo aparentemente observable. En el caso del espacio, el espacio relativo, que es observable en relación con los cuerpos, es una configuración que cuenta con la métrica uniforme del espacio absoluto. En cambio, en el caso del tiempo, Newton no intenta dar el paso desde el tiempo absoluto al tiempo relativo en el sentido de que éste sea una medida exacta de aquél. La medición del tiempo siempre se practica a través del movimiento, y no es posible suponer en principio que éste sea uniforme o que concuerde exactamente con su ecuación. De modo que se plantea el problema de la corrección del tiempo relativo, como veremos en el siguiente capítulo.

#3. La continuidad del tiempo y el espacio absolutos.

Para poder comprender el carácter de la continuidad del espacio y el tiempo absolutos me parece que es necesario tener presente que siempre ha habido cierto doble sentido contenido en el concepto del continuo. Por una parte, se ha concebido que una infinitud de puntos se encuentra en una distancia lineal o intervalo temporal, finitos. Por otra parte, se ha considerado que

una distancia o intervalo sea infinitamente divisible en partes.

Los problemas teóricos que provienen de este doble sentido de la continuidad se ponen de manifiesto de varias maneras. Por ejemplo, se considera universalmente que el punto es indivisible. Pero desde la antigüedad ha persistido cierto desacuerdo acerca de si tiene magnitud en algún sentido o si no tiene magnitud alguna. En el primer caso, el punto puede considerarse como una parte del continuo, pero en el segundo caso esto se torna muy discutible. Así, para Aristóteles, el tiempo es un continuo matemático; y su 'ahora' ni tiene magnitud alguna ni pertenece a dicho continuo como una parte de él.(18) En cambio, si el punto euclideo se entiende como 'aquéllo que ya no tiene partes', parece posible considerar que constituye una parte de la línea.(19) Otro aspecto del problema es que aceptar a la vez la divisibilidad infinita y la infinitud de puntos indivisibles da lugar al dilema de que, por definición, la divisibilidad infinita no puede llegar nunca al punto, sea o no que éste tenga magnitud en algún sentido.

Hasta aquí se trata de una problemática heredada de la antigüedad. Luego, en la naciente física moderna, el problema se complicó aun más, porque el físico-matemático consideró necesario encontrar la manera de enfocar un continuo físico de un modo tal que pudiera contar con las partes infinitesimales del continuo y, a la vez, localizar en el continuo puntos matemáticos sin magnitud.(20)

Teniendo en cuenta este problema moderno de la conceptualización de un continuo físico, es de interés considerar la continuidad newtoniana en su contexto histórico, partiendo de algunos aspectos del pensamiento de Galileo, porque éste constituyó antecedente importante.

En sus Diálogos,(21) Galileo dedica una discusión extensa al continuo. Empieza por enfocar el continuo de partes finitas y divisibles para proponer la noción del número ilimitado, más bien que infinito, de semejantes partes. Por su gran interés histórico, citamos un fragmento de este texto. Salvatio, quien representa a Galileo, y Simplicio, a un aristotélico, toman parte en la conversación:

"SALVATIO: ...en cuanto a la cuestión de saber si las partes finitas de un continuo limitado (continuo terminado) son finitas o infinitas de número, voy a contestar que, al contrario de la opinión de Simplicio, no son ni finitas ni infinitas.

SIMPLICIO: Esta respuesta jamás me hubiera ocurrido, puesto que yo no consideraba que existía algún paso intermedio entre lo finito y lo infinito, de suerte que la clasificación o la distinción que presupone que una cosa debe ser o finita o infinita, es imperfecta y defectuosa.

SALVATIO: Así me parece. Y si consideramos las cantidades discretas, pienso que hay, entre cantidades finitas e infinitas,

un tercer término intermediario que corresponde a todo número designado; de modo que, si se pregunta, como en el presente caso, si las partes finitas de un continuo son finitas o infinitas de número, la mejor respuesta es que no son ni finitas ni infinitas, sino corresponden a todo número designado. Para que esto sea posible, es necesario que dichas partes no sean incluidas dentro de un número limitado, porque en ese caso no corresponderían a un número que es mayor; tampoco pueden ser infinitas de número, puesto que ningún número designado es infinito; y así, al gusto de quien pregunta, podemos asignar a cualquier línea dada, cien partes finitas, un mil, o, en realidad, cualquier número que queramos, a menos que no sea infinito. Por lo tanto, concedo a los filósofos que el continuo contiene tantas partes finitas como ellos quieran, y concedo además que las contiene, o actualmente o potencialmente, como ellos quieran...."(22)

A diferencia de la noción actual de la posibilidad de encontrar un punto correspondiente a cualquier número, la noción galileana aquí es claramente del número ilimitado de las partes finitas de una cantidad continua. La noción galileana siempre trata de cierta parte finita de la cantidad entera, por pequeña que sea la parte. Es decir, esta idea de Galileo depende de la consideración de la divisibilidad, y no es una modificación del concepto de una infinitud de puntos indivisibles en el sentido de sustituir lo infinito por lo ilimitado. Al contrario, a la vez que considera las partes ilimitadas del continuo, Galileo también acepta la infinitud de puntos. Así añade:

"...pero tengo que agregar que, tal como una línea de diez canne de longitud contiene diez líneas, cada una de un canne, y cuarenta líneas cada una de un cúbito, y ochenta líneas cada una de medio cúbito, etc., así también contiene un número infinito de puntos, llámeselos actuales o potenciales como usted quiera..".(23)

Pero lo que caracteriza el pensamiento galileano acerca del punto es el empeño de concebirlo en el caso del continuo físico. Así, propone la noción de los elementos últimos e indivisibles de la cantidad entera, infinitamente pequeños, de magnitud implícitamente indeterminada. Para explicar la fuerza de cohesión de los sólidos, Galileo había sugerido la idea especulativa de una infinitud de vacíos, infinitamente pequeños. Ahora vuelve a este tema de la infinitud para sugerir que los elementos últimos del agua, por ejemplo, sean infinitos. Luego, considera la posibilidad de dar el paso desde las partes finitas y divisibles de las sustancias materiales a las partes infinitas e indivisibles. A este respecto dice:

"En vista de que el agua tiene menos consistencia que los polvos más finos, en efecto, no tiene consistencia alguna, me parece que podemos concluir con mucha razón que las partículas más pequeñas en las cuales puede resolverse, son bien distintas de

partículas finitas y divisibles; en realidad, la única diferencia que puedo descubrir es la de que aquéllas son indivisibles."
(24)

Y un poco después añade:

"El oro y la plata....no se convierten en líquidos hasta que las partículas más finas del fuego o de los rayos del sol los disuelven, como yo pienso, en sus componentes últimos, indivisibles, e infinitamente pequeños."(25)

A lo largo de esta discusión del continuo, la preocupación galileana es por la manera de dar el paso desde las partes finitas a las infinitamente pequeñas. Y, de esta manera, estas dos clases de componentes de un continuo físico constituyen un nuevo conjunto de términos para la conceptualización de la continuidad física, cuyo carácter se expresa en que el paso desde lo finito a lo infinito llegue al elemento indivisible pero no al punto sin magnitud alguna.

Es claro que con estas concepciones especulativas, Galileo no pretende resolver el problema de la continuidad, sino que lo plantea en sentido nuevo para la física de su época. La consideración medular de este planteamiento es la naturaleza de los elementos de un continuo real. Luego, con Newton, el concepto de los elementos de los continuos del espacio y el tiempo adquiere forma matemática en los infinitesimales. Pero, mientras que para Galileo los elementos infinitesimales son indivisibles y se conciben por analogía con el punto, para Newton son divisibles y se conciben en torno a la divisibilidad infinita. Así, Newton llega al concepto de las partes infinitamente pequeñas, de magnitud indeterminable, y, sin embargo, divisibles. Por otra parte, parece que subsiste tanto para Galileo como para Newton el punto geométrico, al que nunca se llega por el camino de la divisibilidad. Además, Newton recurre al punto matemático para designar la localización: del centro de fuerza(26) y de la posición en general. Así hemos visto que dice explícitamente que una posición propiamente dicha no tiene magnitud. Y, a partir de Newton, se ha dado por supuesto en toda la física moderna que la posición de un punto material en un instante dado se localiza en un punto espacial, al que corresponden ciertas coordenadas numéricas en el contexto de un marco de referencia especificado -es decir, coordenadas cartesianas.

Utilizar a la vez estos dos aspectos de la continuidad no hizo surgir problema alguno para Newton. Sin embargo, es de interés advertir cómo Newton incorporó los dos aspectos a su física. Parece que concibió el movimiento en términos de incrementos infinitesimales del espacio y el tiempo y la posición en torno a la continuidad puntual. Entonces, desde un punto de vista actual, se presenta la posibilidad de que Newton concibió la posición de este modo cartesiano porque no resultó necesario modificar esta concepción en el dominio de los fenómenos que él estudiaba.

Como ya se ha advertido, Newton distinguió entre los conceptos de posición sin magnitud y lugar. Dió por entendido que el espacio y el tiempo son tanto continuos de lugares como continuos de puntos. Y claro que hay argumentos que justifican esta suposición. Por ejemplo, podría sostenerse que el continuo de lugares implica los linderos, sin dimensión, entre ellos; y, si los medios se conciben como divisibles dondequiera, esto implica la continuidad puntual. El problema aquí no es criticar la tradición especulativa acerca de la continuidad del espacio y el tiempo, sino considerar si fue necesario para Newton recurrir a la noción de posición puntual. Este problema surge de su física, donde se presenta la correspondencia entre la posición en un punto y el estado de movimiento de un punto material. Es decir, la noción de semejante correspondencia entraña una dificultad conceptual ineludible. ¿Cómo puede concebirse la correspondencia entre una posición puntual y una velocidad instantánea? Dado este problema, si se considera que es el concepto de posición aquí el que da lugar al problema, se sugiere la posibilidad de preguntar si la física de Newton implica necesariamente la concepción de posición puntual, o si acaso hubiese resultado consecuente considerar tanto la trayectoria como la posición en ésta mediante un concepto unívoco de continuidad -es decir, mediante los infinitesimales.

Me parece evidente que este problema puede plantearse como problema de la física newtoniana sin que implique la cuestión enteramente especulativa de si el espacio y el tiempo físicos en realidad tienen la estructura de continuos puntuales. Desde luego, el problema es difícil y complejo, y mi intento aquí es simplemente sugerirlo de modo parcial y preliminar.

Pareciera implícito en la teoría newtoniana que el tiempo (como el espacio también) puede dividirse dondequiera. No hay ninguna restricción que pudiera impedir, en principio, considerar una duración de magnitud cualquiera, dondequiera en el fluir temporal. Así se da por entendido que el tiempo de origen de un movimiento o el instante correspondiente al estado de movimiento de un cuerpo pueden ocurrir dondequiera en el fluir temporal.

Sin embargo, esto no implica de manera inequívoca que el instante newtoniano tenga posición temporal sin magnitud. Al contrario, si por 'instante' entendemos un instante de un movimiento, éste no se concibe simplemente como un punto en el orden temporal continuo sino más bien como un intervalo infinitesimal. Esta consideración es importante porque, si el instante newtoniano no de un movimiento tiene duración, esto a su vez podría influir en la concepción de la posición temporal. Ya hemos visto que toda medición del tiempo se practica a través del movimiento. Resulta, entonces, que en principio la determinación de un instante de un movimiento es el caso general de la determinación del tiempo. Y si dicho instante tiene duración, es difícil ver cómo su posición en el orden temporal sea sin magnitud. Por lo tanto, se presenta el problema de la interpretación del instante de un movimiento y la relación de éste con la posición en la

teoría newtoniana.

Para considerar los cuerpos en movimiento uniformemente acelerado, Newton desarrolló la teoría de los infinitesimales. Parte de la consideración de que la aceleración de semejante movimiento, que es una proporción entre una cantidad de distancia y una cantidad de tiempo, determina que en cada instante el cuerpo en movimiento tenga cierta velocidad instantánea. Esto quiere decir que en un intervalo infinitesimal -asociado en algún sentido con un instante- el cuerpo recorre una distancia infinitesimal, y que existe una proporción -la de la velocidad- entre dichas cantidades infinitesimales.(27) Así, dada la relación,

$$\text{velocidad instantánea} = \text{aceleración} \times \text{tiempo},$$

es posible calcular la velocidad del cuerpo para cualquier instante del movimiento que se quiera especificar.

Por ejemplo, en el caso de la aceleración gravitacional, que es 32 ft/sec^2 , podemos calcular la velocidad de un cuerpo que cae libremente para cualquier instante de dicho movimiento. Así, a 0.01 segundos después de que el cuerpo empieza a caer, su velocidad será $32 \text{ ft/sec}^2 \times .01 \text{ sec}$, o $.32 \text{ ft/sec}$. Es decir, para $t = .01 \text{ sec}$, se concibe que el cuerpo tiene la velocidad, $.32 \text{ ft/sec}$, durante un intervalo infinitesimal.

Se nota, entonces, que el instante del movimiento es especificado por un número, $.01 \text{ sec}$, que parece implicar una posición temporal sin duración. Sin embargo, la velocidad en ese instante implica un intervalo, por pequeño que sea, durante el cual el cuerpo se mueve con dicha velocidad. Tenemos aquí el problema de la correspondencia entre una posición puntual y una duración asociada con un instante del movimiento. Así parece claro que, si la posición se especifica en un punto del fluir temporal, éste no corresponde a la posición del instante del movimiento, que tiene magnitud. Al contrario, es únicamente una indicación de un punto perteneciente al instante del movimiento.

De este modo resulta evidente que aun en la física newtoniana, la noción de posición en un punto temporal da lugar a un problema conceptual. Una manera de resolver éste quizás sería considerar que el valor del tiempo aquí adquiriera una especie de dimensionalidad en su alrededor. Desde este punto de vista, la expresión, .01 sec o cualquier valor del tiempo, tendría el significado de designación de un intervalo infinitesimal. Esto equivaldría a considerar que no se trata de un número perteneciente a un continuo de puntos sino a un continuo divisible sin límite en partes. Alguna solución de este tipo podría recurrir al planteamiento galileano del concepto de un continuo físico. De todas maneras, lo que interesa aquí es que, una vez que la noción de la posición temporal con duración sea admitida, la correspondencia entre la posición y la velocidad instantánea no parece ofrecer dificultad conceptual insuperable.

Para Newton, la distinción entre la posición temporal y la duración de la velocidad instantánea se conserva. Esto tiene su explicación teórica en la noción de que la posición sin magnitud es una propiedad del lugar, de modo que una posición puede en algún sentido indicar el intervalo infinitesimal al que pertenece. Esta noción de por sí no ofrece dificultad. Pero lo que no se resuelve en este enfoque newtoniano es el problema de la determinación de un instante sin dimensión. Es decir, si el tiempo no puede ser determinado sino a través del movimiento, y si el instante de un movimiento tiene duración, ¿cómo puede concebirse la determinación, en principio, de un instante sin dimensión? En otras palabras, medir el tiempo a través del movimiento no puede significar otra cosa que determinar un tiempo mediante un instante del movimiento. Así, hablar de la determinación de un punto en el fluir temporal implicaría que la determinación fuere más precisa que la que el método permita. Por lo tanto, si para Newton el instante temporal de un movimiento tiene duración, en realidad no tiene sentido hablar de la determinación de un punto en el orden temporal. Y esto no es un problema de la técnica de la medición sino de la propia teoría de la medición.

La concepción newtoniana del instante de un movimiento se encuentra expresada en los Principia. Hablando de la noción de una proporción definida existente entre las cantidades infinitesimales del espacio y el tiempo, Newton define éstas como 'cantidades divisibles, evanescentes', y luego dice:

"Quizás se objetará que no hay proporción última entre cantidades evanescentes; porque la proporción, antes de que las cantidades han desvanecido, no es la última, y cuando ya están desvanecidas, es nula. Pero, por el mismo argumento, puede alegarse que un cuerpo, llegando a cierto lugar y allí deteniéndose, no posee una velocidad última; porque la velocidad, antes de que el cuerpo llega a dicho lugar, no es su última velocidad; cuando ya ha llegado, no la hay. Pero la respuesta es fácil; pues, por la velocidad última quiere decirse esa velocidad con la cual el cuerpo se mueve, ni antes de que llega a su último lugar y el movimiento cesa, ni después, sino en el instante mismo cuando llega; es decir, la velocidad con la cual el cuerpo llega a su último lugar, y con la cual el movimiento cesa. Y asimismo, por la proporción última de cantidades evanescentes, debe entenderse la proporción de las cantidades, no antes de que desvanecen, ni después, sino con la cual desvanecen. De igual manera, la primera proporción de cantidades nacientes es la proporción con la cual empiezan a ser."(28)

Se trata así de una proporción que caracteriza el movimiento 'en el instante mismo' en que nace o termina. Esta proporción implica un intervalo del tiempo, infinitesimal, al que corresponde un espacio trasladado, éste también infinitesimal. Además, con esta concepción, se trata no sólo del estado de movimiento en dicho 'instante mismo', sino también de la posición temporal; porque esta proporción caracteriza el instante en que el movimiento nace o termina. Es decir, corresponde con la

determinación temporal del origen del movimiento, o el instante en que el cuerpo en cuestión llega a su último lugar. Además de esto, en este caso se trata de una proporción última, y ésta no puede enfocarse como una velocidad mediana. Tendría que concebirse como referente al instante límite en que exista el movimiento y, por lo tanto, velocidad.(29) Lo que interesa aquí es que este concepto newtoniano de que un movimiento empieza o termina con una velocidad implica necesariamente un intervalo correspondiente al componente temporal de la proporción en cuestión. Si no fuera así, sería imposible hablar de la velocidad 'con la cual' el movimiento nace o deja de ser.

Quizás se objetará que se trata aquí de una abstracción de la física-matemática que pierde su significado preciso cuando se intenta expresarla en lenguaje ordinario. Pero me parece que el propio Newton recurrió al análisis conceptual para justificar el método matemático. Parece que es inherente a dicho método que el instante tenga duración. En cambio, es la concepción del estado de movimiento en un instante sin dimensión la que es una abstracción ambigua. Claro que el propio Newton no extiende esta consideración al concepto de posición. Habla aquí únicamente del instante del movimiento, como tal. Pero desde un punto de vista actual, lo que parece vislumbrarse es que el concepto de velocidad no tendría significado físico para determinaciones del tiempo sin magnitud alguna.(30) Y, de igual manera, el mismo argumento podría aducirse con respecto a la determinación del tiempo correspondiente a la velocidad instantánea de un cuerpo en cualquier parte de su trayectoria; porque en cualquier instante, un componente temporal, infinitesimal, constituye la duración de la velocidad instantánea. Y esta consideración es independiente de que dicha duración sea indeterminable y, además, divisible.

Desde este punto de vista, la física newtoniana implica el problema de concebir el espacio y el tiempo como continuos infinitamente divisibles, cuyas partes siempre tengan magnitud, por pequeña que ésta sea. En su último juicio sobre los infinitesimales, Newton decidió que éstos tienen que considerarse como divisibles.(31) Y, desde luego, la teoría de la velocidad instantánea afecta la posición espacial también. Porque, dado que el instante del movimiento se caracteriza por una velocidad que dure un intervalo infinitesimal, resulta que en semejante instante, la posición espacial del punto material que representa el cuerpo tendría que concebirse como dotada de magnitud. Sin embargo, Newton consideró posible utilizar la noción de la localización de un punto material en un punto del espacio y en un punto del tiempo. De esta manera, se presenta aun en la física newtoniana, la distinción entre la pura localización espacio-temporal de un punto material y la posición de semejante punto durante la duración de un estado de movimiento. Es decir, el aspecto dinámico de la posición aquí puede formularse como la determinación simultánea del estado de movimiento y la posición espacio-temporal. De modo que hay aquí, en germen, una situación análoga a la que da lugar al problema de la imprecisión de la posición en los procesos cuánticos. Desde un punto de vista lógico, el problema tiene la misma estructura de que, cuando se trata de la correspondencia entre una localización y un estado

dinámico, la posición se torna imprecisa. Claro que el problema de la física cuántica es mucho más complejo. Lo que interesa aquí es advertir que el problema de la precisión de la posición es inherente a la física dinámica, sólo que lo que podría llamar se la discontinuidad infinitesimal en la física clásica no exige el planteamiento del problema. A este respecto, es de mucho interés que Luis de Broglie haya señalado que, "si h fuera infinitamente pequeño, la Física clásica sería rigurosamente exacta," como una teoría de los procesos cuánticos.(32)

Notas. Capítulo VII.

¹ Principia, pág. 8.

"....times and spaces are, as it were, the places as well of themselves as of all other things. All things are placed in time as to order of succession; and in space as to order of situation."

² El espacio y el tiempo absolutos son órdenes inmutables de lugares, físicamente existentes. En el caso del espacio, Newton deduce la inmovilidad del espacio del orden inmutable. De modo que no surge el problema de si el espacio absoluto de la física clásica podría moverse en su integridad mientras que exista toda vía otro espacio subyacente en reposo relativo, y así sucesivamente. Para Newton, el espacio absoluto es el único espacio físico. Su inmovilidad es la consecuencia de ser el orden inmutable de lugares primordiales. De suerte que cualquier espacio móvil que se considere sería una configuración que se mueve en este único espacio físico. Así, el movimiento del espacio relativo no implica nunca que el espacio como tal, físico, esté en movimiento.

³ Véase Capítulo VIII, a.

⁴ A este respecto, Florian Cajori expresa una actitud empírica muy interesante. Dice:

"...The existence of absolute rectilinear motion and of absolute time are postulates made in Newtonian mechanics; they are not based on experimental evidence and may therefore be said to be metaphysical. There appears to be no a priori argument against acceptance as a foundation in mechanics of concepts, some of which are observable and others unobservable or metaphysical. The two types of concepts might form a perfectly solid and coherent structure which yields results in accord with observational data, to a degree of accuracy lying within the probability of experimental error. Newton's assumptions satisfied this test in the scientific developments extending over a period of 200 years." (Principia, Nota 13, pág. 640)

⁵ En la Crítica de la Razón Pura, Kant dice:

"Pues si consideramos el espacio y el tiempo como cualidades que, según su posibilidad, tienen que hallarse en las cosas en sí, y reflexionamos en los absurdos en que nos vemos entonces complicados -puesto que dos cosas infinitas, que no son

substancias ni algo realmente inherente a las substancias, y que, sin embargo, existen y hasta han de ser la condición necesaria de la existencia de todas las cosas.....-, entonces no podemos censurar al bueno de Berkeley por haber rebajado los cuerpos a meras apariencias; es más, nuestra propia existencia (que, de ese modo, resultaría depender de la realidad de un imposible como el tiempo) debería tornarse en mera apariencia, absurdo que nadie hasta ahora ha querido cargarse en cuenta." ("Estética Trascendental", #8, III. Trad. de Morente.)

⁶ Véase arriba, Capítulo II, Sec. b.

⁷ Física, 221^a, 221^b.

⁸ Ibid, 223^a, 220^b5, 219^b13, 218^b8-20.

⁹ Ibid, 219^b.

"...when we do perceive a 'before' an an 'after', then we say that there is time. For time is just this -number of motion in respect of 'before' and 'after'.

"Hence time is not movement, but only movement in so far as it admits of enumeration. A proof of this: we discriminate the more or the less by number, but more or less movement by time. Time then is a kind of number."

¹⁰ Ibid.

"Number, we must note, is used in two senses- both of what is counted or the countable, and also of that with which we count. Time obviously is what is counted, not that with which we count: these are different kinds of things."

¹¹ Ibid, 221^b.

"'To be in number' means that there is a number of the thing, and that its being is measured by the number in which it is. Hence if a thing is 'in time' it will be measured by time. But time will measure what is moved and what is at rest, the one qua moved, and the other qua at rest; for it will measure their motion and rest respectively.

"Hence what is moved will not be measurable by the time simply in so far as it has quantity, but in so far as its motion has quantity. Thus none of the things which are neither moved nor at rest are in time: for 'to be in time' is 'to be measured by time', while time is the measure of motion and rest."

¹² Ibid, 221^a13.

"Plainly, too, to be in time does not mean to coexist with time, any more than to be in motion or place, means to coexist with motion or place. For if 'to be in something' is to mean this, then all things will be in anything, and the heaven will be in a grain; for when the grain is, then also is the heaven. But this is a merely incidental conjunction....that which is in time necessarily involves that there is time when it is, and that which is in motion that there is motion when it is..."

¹³ Ibid, 222^a29.

¹⁴ Principia, págs. 7-8.

"All motions may be accelerated or retarded, but the flowing of absolute time is not liable to any change. The duration or persistence of the existence of things remains the same, whether the motions are swift or slow, or none at all: and therefore this duration ought to be distinguished from what are only sensible measures thereof; and from which we deduce it..."

¹⁵ Así, en la física, la velocidad se concibe como el espacio recorrido durante una unidad de tiempo.

¹⁶ Física, 220^b1 y 218^b15.

"...as continuous it (es decir, el tiempo) is long or short, and as a number (i.e. of units) many or few, but it is not fast or slow- any more than any number with which we number is fast or slow."

¹⁷ A. d'Abro, op. cit., Capítulo VI, "Time", pág. 75.

"...Newton refers to absolute time as 'flowing uniformly'. But of course this allusion to time does not lead us very far, for a rate of flow can be recognized as uniform only when measured against some other rate of flow taken as standard. Obviously, some further definition will have to be forthcoming. Now both Galileo and Newton recognized as a result of clock measurements that approximately free bodies moving in an approximately Galilean frame described approximately straight lines with approximately constant speeds. Newton then elevates this approximate empirical discovery to the position of a rigorous principle, the principle of inertia, and states that absolutely free bodies will move with absolutely constant speeds along perfectly straight lines, hence will cover equal distances in equal times. When expressed in this way as a rigorous

principle, the space and time referred to are the absolute space and time of Newtonian science."

18 Física, 218^a1.

19 Euclides, edición citada, Definición 1, pág. 5 de los "Elementos de geometría". Véase también la Nota 1 de Juan David García Bacca, pág. 167.

20 En el tratamiento matemático del movimiento, Newton recurrió a considerar la trayectoria de un cuerpo como si fuera la trayectoria de una partícula, o punto. Así, por ejemplo, la trayectoria de la tierra en su órbita alrededor del sol puede considerarse como la del punto central de la tierra. De esta manera, la trayectoria de un cuerpo tiene el carácter espacial de un locus geométrico, trazado por un punto en movimiento. Por una parte, el significado físico que justifica este procedimiento matemático es que semejante punto representa el centro de fuerza -en este caso, el centro de la gravedad terrestre; y, por lo tanto, constituye el punto de referencia espacial de un sistema físico que determina un espacio relativo. Por otra parte, el pensamiento de Newton tiene el rasgo característico de considerar los cuerpos en movimiento como agregados rígidos de partículas rígidas, de suerte que el movimiento de semejante cuerpo puede tratarse como el de una de sus partículas. Sin embargo, el propio Newton hace muy explícito que se trata de puntos matemáticos. En cuanto al empleo del término 'punto material' o 'mass point', esto es un procedimiento post-newtoniano. -Véase también la Nota 26 de este capítulo.

21 El texto galileano referente al continuo es una parte de la famosa discusión de la infinitud en los Diálogos, op. cit., págs. 18 ff.

22 Ibid, págs. 35-36.

"SALVATIO:as to the query whether the finite parts of a limited continuum (continuo terminato) are finite or infinite in number, I will, contrary to the opinion of Simplicio, answer that they are neither finite nor infinite.

SIMPLICIO: This answer would never have occurred to me since I did not think that there existed any intermediate step between the finite and the infinite, so that the classification or distinction which assumes that a thing must be either finite or infinite is faulty and defective.

SALVATIO: So it seems to me. And if we consider discrete quantities, I think there is, between finite and infinite quantities, a third intermediate term which corresponds to every assigned number; so that if asked, as in the present case, whether the finite parts of a continuum are finite or infinite in number, the best reply is that they are neither finite nor infinite but correspond to every assigned number. In order that this may be possible, it is necessary that those parts should not be included within a limited number, for in that case they would not correspond to a number which is greater; nor can they be infinite in number since no assigned number is infinite; and thus, at the pleasure of the questioner we may, to any given line, assign a hundred finite parts, a thousand, or indeed any number we may please so long as it be not infinite. I grant, therefore, to the philosophers, that the continuum contains as many finite parts as they please and I concede also that it contains them, either actually or potentially, as they may like....."

23 Ibid, pág. 36.

"...but I must add that just as a line ten fathoms (canne) in length contains ten lines each of one fathom and forty lines each of one cubit (braccia) and eighty lines each of half a cubit, etc., so it contains an infinite number of points, call them actual or potential as you like...."

24 Ibid, pág. 40.

"Seeing that water has less firmness (consistenza) than the finest of powders, in fact, has no consistence whatever, we may, it seems to me, very reasonably conclude that the smallest particles into which it can be resolved are quite different from finite and divisible particles; indeed the only difference I am able to discover is that the former are indivisible."

25 Ibid, pág. 41.

"Gold and silver...do not become fluids until the finest particles...of fire or of the rays of the sun dissolve them, as I think, into their ultimate, indivisible, and infinitely small components."

26 Newton termina las definiciones de las fuerzas de la siguiente manera:

"I...use the words attraction, impulse, or propensity of any sort towards a center, promiscuously, and indifferently, one for another; considering these forces not physically, but mathematically; wherefore the reader is not to imagine that by those

words I anywhere take upon me to define the kind, or the manner of any action, the causes or the physical reasons thereof, or that I attribute forces, in a true and physical sense, to certain centers (which are only mathematical points); when at any time I happen to speak of centers as attracting, or as endued with attractive powers." (Principia, Def. VIII, págs. 5-6. Véase la versión en español en el Apéndice.)

²⁷ En la notación de Leibniz, que ha sido universalmente aceptada, la velocidad instantánea se escribe, $\frac{ds}{dt}$, siendo d el símbolo de un elemento infinitesimal, s la distancia, y t el tiempo. Para una discusión de los infinitesimales newtonianos, Véase Notas 30, 31, y 33, de Cajori, Principia, págs. 653-656. Se encuentra aquí una bibliografía especializada acerca de este concepto.

²⁸ Principia, Libro I, Sec. 1, págs. 38-39.

"Perhaps it may be objected that there is no ultimate proportion of evanescent quantities; because the proportion, before the quantities have vanished, is not the ultimate, and when they are vanished, is none. But by the same argument it may be alleged that a body arriving at a certain place, and there stopping, has no ultimate velocity; because the velocity, before the body comes to the place, is not its ultimate velocity; when it has arrived, there is none. But the answer is easy; for by the ultimate velocity is meant that with which the body is moved, neither before it arrives at its last place and the motion ceases, nor after, but at the very instant it arrives; that is, the velocity with which the body arrives at its last place, and with which the motion ceases. And in like manner, by the ultimate ratio of evanescent quantities is to be understood the ratio of the quantities not before they vanish, nor afterwards, but with which they vanish. In like manner, the first ratio of nascent quantities is that with which they begin to be."

²⁹ Parece claro que Newton rechazó la noción galileana de que un cuerpo en movimiento, "diminishing in speed, must before coming to rest pass through every possible degree of slowness". (Galileo, op. cit., pág. 164) para Newton, en el caso de cada movimiento específico, existe una proporción última -la aceleración- que condiciona las velocidades posibles. Es decir, por mucho que los incrementos infinitesimales del tiempo sean divisibles, esto no implica que puede tratarse de cualquier velocidad acercándose a cero; porque la proporción en cuestión siempre figura como un factor en el cálculo. En cambio, mientras que todo movimiento específico se caracteriza en este sentido por velocidades permitidas, no existe para Newton ninguna restricción en principio, o de carácter universal, que pudiera impedir la

consideración de cualquier ecuación de movimiento y la correspondiente proporción derivada.

³⁰ La noción general de la relación entre el tiempo y el concepto de un acontecimiento u objeto físico ha sido sugerido por David Bohm en su libro, Causalidad y azar en la física moderna, Colección "Problemas Científicos y Filosóficos", UNAM, México, 1959, págs. 227-228.

³¹ Véase las notas de Cajori, Principia, págs. 653-656.

³² De Broglie llega a esta consideración a partir de la situación en el nivel subatómico, de modo que, desde su punto de vista, no se presenta el interés explícito por una reinterpretación de la física clásica a este respecto. De Broglie dice:

"Quisiera insistir sobre un punto interesante. Si la constante \hbar tuviera un valor infinitamente pequeño, los cuanta de luz de valor $h\nu$ serían infinitamente pequeños, y su número, en una radiación de energía dada, sería infinitamente grande: todo pasaría entonces como si las radiaciones tuvieran una estructura continua y puramente ondulatoria, que les atribuirían Fresnel y sus continuadores. Por el contrario, los corpúsculos materiales obedecerían entonces exactamente (puede demostrarse esto con facilidad) a las leyes clásicas de la Dinámica del punto material, y no habría necesidad ninguna de introducir ondas en la teoría de la materia. Por tanto, si el valor de \hbar fuera infinitamente pequeño, la Física clásica sería rigurosamente exacta."

(Materia y luz, versión en español de Espasa-Calpe, Part I, págs. 55-56.)

Capítulo VIII

Tiempo Relativo

a. La temporalidad y la materia newtoniana.

Como ya se ha advertido, el tiempo absoluto no fundamenta el tiempo relativo en el mismo sentido en que el espacio absoluto fundamenta el espacio relativo. Y, como consecuencia de esto, las relaciones, espacio absoluto-espacio relativo y tiempo absoluto-tiempo relativo, son distintas. Esta diferencia ha sido explicada arriba en relación con el problema de la medición del tiempo,(1) pero se explica más a fondo en el marco del concepto newtoniano de la materia.

En el caso del espacio, se supone que la métrica de la extensión se pone de manifiesto en los cuerpos materiales y, en general, en la configuración de la realidad visible. Se supone además que esta métrica se manifiesta independientemente de los aspectos temporales de la existencia física. A este respecto, Newton simplemente aceptaba las nociones más tradicionales. En el lenguaje filosófico de nuestros días, la métrica de la extensión siempre se había considerado como algo 'ante los ojos' y observable por excelencia en los cuerpos rígidos. Esta es la métrica -euclídeana- que Newton atribuyó al espacio absoluto, con el resultado de que los dos tipos de existencia física -la materia y el espacio-, existentes independientemente entre sí, correspondiesen entre sí en cuanto a su extensión. De esta manera, fue posible considerar que un cuerpo determinara un espacio relativo que fuera una medida del espacio absoluto.

Newton recurrió así a la tradición de la homogeneidad de la extensión, sea ésta de los cuerpos o de los espacios vacíos; y esta tradición resultó adecuada para fundamentar el aspecto métrico del espacio relativo. Pero lo que no se explica de modo tan evidente es que Newton ni siquiera se preocupaba por la manera de considerar una correspondencia análoga entre las naturalezas observables de los cuerpos y el tiempo. De hecho, rechazó la única tradición a este respecto -la de la existencia del movimiento absolutamente uniforme- y no intentó reemplazarla por otra concepción. Así, la falta de correspondencia métrica entre los movimientos observables y el tiempo verdadero tiene la consecuencia de que la verdadera duración temporal no es medible a través de los cuerpos.

Tradicionalmente, se habían tomado las revoluciones de los cuerpos celestes como uniformes y, por lo tanto, como medidas del tiempo. Pero en la física del siglo XVII, dichos movimientos ya se concibieron como acelerados, causados por fuerzas y, en principio, susceptibles de sufrir irregularidades. Por otra parte, el movimiento inercial se concibe como uniforme, pero

éste no puede observarse aisladamente, ya que existe como componente de los movimientos reales complejos. Así, Newton encuentra imposible considerar que los tiempos observados a través de los cuerpos en movimiento cíclico sean manifestaciones de la duración absoluta.

Por consiguiente, se establece una distinción teórica entre las posibilidades de la experiencia espacial y temporal. La mecánica universal pone en duda la manifestación de la duración verdadera. Al mismo tiempo, subsiste la posibilidad de considerar manifiesta la verdadera extensión espacial métrica.

En el enfoque newtoniano, esta discrepancia entre las posibilidades de la experiencia espacial y temporal no da lugar a inquietud. Se da por entendido que la explicación se encuentra en la estructura de la naturaleza misma, en la peculiar inaccesibilidad de la duración temporal, de modo que no se plantea el problema de resolver la discrepancia. Al contrario, ésta tiene que mantenerse, porque el carácter accesible de la métrica de la extensión es lo que fundamenta toda la medición, tanto espacial como temporal. Veremos esta consecuencia de la teoría newtoniana en más detalle en los siguientes capítulos. Por otra parte, desde el punto de vista de la filosofía, el que la extensión métrica sea inherente a la materia y manifiesta en ella, aparece en la física newtoniana como una reflexión no sólo de la tradición en general sino, de modo más inmediato, de la metafísica cartesiana en la que la naturaleza esencial de la materia es la extensión. A este respecto, es importante advertir la influencia implícita del pensamiento cartesiano en la física moderna naciente. Quizás podría decirse que esta concepción de Descartes ha tenido el resultado de retardar la consideración del problema del carácter temporal de la materia, ya que la física moderna se desarrolló bajo la influencia de la idea de la res extensa. Es decir, a pesar de que Newton no aceptaba la idea cartesiana de que la materia sea omnipresente, es claro que concibió la partícula material en términos primariamente espaciales. Por ejemplo, dice en la Óptica:

"...me parece probable que Dios, a los principios, formó la Materia en Partículas sólidas, macizas (massy), duras, impenetrables y móviles, de tales Tamaños y Figuras, y con tales otras propiedades, y en tal Proporción al Espacio, como más condujo al Fin para el cual las formó."(2)

Es notable que el aspecto temporal de la materia no entra explícitamente en esta formulación.

Es cierto que el pensamiento de Newton acerca de la materia no es limitado por la perspectiva cartesiana, ya que su concepción de la masa implica el tiempo. Newton considera que la partícula material, una vez creada, persiste en el tiempo de por sí,(3) dotada de propiedades por las cuales la masa se relaciona con las magnitudes temporales en los procesos físicos. Así, el movimiento inercial, que se explica por la fuerza

inherente a la masa de conservar su estado de movimiento o reposo, figura como componente de la velocidad de los cuerpos en movimiento. Además, la propia noción de la partícula como móvil tiene el significado científico de ser móvil según las leyes del movimiento. Así, la masa entra en relación con la aceleración y con la velocidad -magnitudes espacio-temporales- en las concepciones de la fuerza(4) y la cantidad de movimiento(5), respectivamente. Por otra parte, en el contexto de la ley de la gravitación, la masa es una magnitud determinante de la aceleración gravitacional, la que tiene componente temporal.(6)

De esta manera, la materia de Newton tiene su propio modo de existir en el espacio y el tiempo. Tiene naturaleza temporal en el sentido de que su modo de existir es de conservarse en el tiempo -a diferencia de la materia de Descartes, cuya existencia requiere el apoyo continuo de Dios-;(7) además encierra en sí misma la fuerza de inercia que conserva el movimiento uniforme en el tiempo; y, en general, entra en relación con las magnitudes temporales en los procesos físicos. Sin embargo, la materia newtoniana no tiene propiedad temporal observable, equivalente a su espacialidad por su extensión métrica. Podría considerarse que este sería el papel del movimiento inercial, si éste fuera observable. Pero no lo es. Por otra parte, la partícula de Newton, sólida, inerte e impenetrable, no encierra en sí misma ningún proceso con métrica temporal propia. (8) La partícula newtoniana perdura en el tiempo, sin que su propio modo interno de existir mida el tiempo. Y así podría decirse, desde un punto de vista posterior, que la concepción newtoniana de la materia puede considerarse como una superación de la noción cartesiana sin que la temporalidad de la materia sea concebida de manera explícita o plena; y esto se expresa en que Newton acepta la discrepancia entre la experiencia espacial y temporal posible, que a su vez se debe a la discrepancia entre la temporalidad inherente a la materia y la temporalidad observable. Es claro además que, en el dominio de los procesos mecánicos estudiados por Newton, la actitud newtoniana resultaba adecuada.

b. El tiempo y el movimiento.

De las cuatro magnitudes que Newton define en el Scholium de las Definiciones, sólo en el caso de tiempo se forman dos agrupaciones, mutuamente excluyentes, de los caracteres que distinguen la magnitud absoluta de la relativa correspondiente. Es decir, se trata del tiempo absoluto, verdadero y matemático a diferencia del tiempo relativo, aparente y común. El tiempo absoluto es el tiempo matemático, y vice versa. Así, el tiempo que figura como magnitud determinante en una ecuación que describe la trayectoria de un cuerpo, conforme a las leyes del proceso en cuestión, es el tiempo absoluto dotado de su propia métrica de la duración.

En cambio, el tiempo relativo es la duración observada de un movimiento cíclico que realmente ocurre, tal como la revolución de la tierra en su eje, que determina un día. El tiempo relativo es la duración de algunos movimientos reales, repetidos, que se consideran como si fueran intervalos iguales del tiempo. Por lo tanto, no puede tratarse de cualquier movimiento sino de uno seleccionado por su repetición uniforme, o de un reloj hecho por el hombre. Luego, el número de movimientos repetidos nos da el número de unidades del tiempo relativo, o sea, la duración medida a través del movimiento. Pero no es posible postular en principio que las unidades de esta duración sean perfectamente iguales, porque siempre existe la probabilidad de que la uniformidad del movimiento real utilizado como reloj sea perturbada por causas desconocidas.

La dificultad inherente a esta situación es que la ciencia física, en cuanto empírica, tiene que trabajar con el tiempo relativo, mientras que las leyes del movimiento y todas las ecuaciones específicas se refieren al fluir temporal absolutamente uniforme. Este tiempo matemático es implícito en cualquier formulación teórica acerca del movimiento uniforme o el movimiento uniformemente acelerado. Por ejemplo, Galileo dice:

"...podemos formar una imagen mental de un movimiento como uniforme y continuamente acelerado cuando, durante cualesquier intervalos iguales de tiempo, se le dan incrementos iguales de rapidez."(9)

Por otra parte, las ecuaciones de movimiento de la física newtoniana se conciben como funciones del tiempo. Esto quiere decir que, para cualquier instante especificado de un movimiento, la distancia recorrida hasta ese instante y la velocidad en ese instante dependen del tiempo transcurrido desde el instante de origen del movimiento.(10) Es evidente, entonces, que las ecuaciones de la cinemática implican el tiempo exacto; y, en el pensamiento newtoniano, éste no puede ser otro que el tiempo absoluto.

Por otra parte, no cabe duda que, para Newton, el movimiento exacto que se describe por una ecuación tiene significado físico. Es cierto que no se puede esperar que el movimiento real corresponda enteramente a su ecuación. Pero esto se debe a las causas numerosas, que influyen en todo movimiento real, y que permanecen desconocidas, de modo que no se toman en cuenta en la ecuación. Sin embargo, el movimiento real es la resultante de los efectos producidos por las fuerzas operantes; y es indudable que, para Newton, cada componente de un movimiento se produce por la fuerza en cuestión, de modo exacto, según la ley de ésta. Entonces, la correspondencia entre una ecuación y el movimiento real descrito por ella, dependerá del grado en que las fuerzas determinantes del movimiento real se tomen en cuenta en la ecuación. Esto es el punto de partida del mecanismo laplaciano, que postula la posibilidad en principio de semejante correspondencia absoluta. Pero sería difícil sostener que el

propio Newton hubiera visto esta extrapolación con simpatía, puesto que su actitud empírica se orientó por las posibilidades reales de la observación humana. En efecto, el empirismo de Newton parece tener el carácter de postular la existencia del mecanismo de la naturaleza a la vez que acepta en principio las limitaciones de la observación. Para Newton, ésta es limitada no sólo cuantitativamente por el alcance del científico humano, sino también cualitativamente por la inaccesibilidad de la métrica verdadera del tiempo. Así el propio problema de la medición del tiempo haría imposible saber con certeza si una ecuación corresponde exactamente a un movimiento real, porque no existe criterio temporal, sensible y en principio exacto, para que se verifique una predicción.(11) Newton sostiene que sus leyes del movimiento y su teoría de la gravitación son válidas, pero no hace la extrapolación de considerar la posibilidad de la predicción completa respecto a la posición de los cuerpos en todos los instantes futuros. Su pensamiento tiene otra orientación. El tiempo verdadero correspondiente a una posición espacial de un cuerpo se descubre o se determina mediante las inferencias sacadas de las leyes físicas y las observaciones espaciales, en su conjunto. En este enfoque, la mirada no va más allá de los procesos observables en la práctica.

El problema newtoniano era el de relacionar el tiempo relativo al tiempo absoluto de manera tal que la determinación del aspecto temporal de un movimiento fuera lo más exacto posible, y la solución a este problema se concibió en torno a la posibilidad de corregir el tiempo relativo, utilizando todos los recursos de la física y la astronomía. Aceptando que el tiempo absoluto no se da sensiblemente en la naturaleza, Newton considera posible aproximarse a él. Esta posibilidad se debe a que, dada la exactitud métrica del espacio observable, y dada también la validez casi exacta de la descripción matemática de un movimiento -es decir, tratándose de un movimiento que no difiere en grado apreciable de su ecuación-, el tiempo verdadero puede inferirse como correspondiente a las posiciones previstas para instantes especificados. Esta noción presupone el juego entre la observación y las formulaciones matemáticas cada vez más precisas. Además, es claro que este método descansa en la suposición de la presencia manifiesta de la métrica espacial. Si fuera necesario considerar que la medición espacial depende de alguna manera del tiempo -es decir, si fuera una cuestión de una relación recíproca de dependencia mutua entre las mediciones espaciales y temporales-, entonces, la solución newtoniana perdería su punto de apoyo. A este respecto, la noción contemporánea de la reductibilidad de las mediciones temporales a las espaciales tiende a conservar la solución newtoniana.

Para Newton, existen movimientos en el sistema solar que suceden en un grado de aislamiento tal que la observación de ellos ha comprobado definitivamente la validez de las leyes del movimiento y de la ley de la gravitación.(12) En estos casos, la predicción de la posición correspondiente a un tiempo especificado tiene grado de exactitud muy alto. Además, es posible tomar en cuenta los varios factores que producen irregularidades

en las órbitas planetarias, y así inferir las variaciones en los tiempos de sus revoluciones. De la misma manera, resultó posible corregir las determinaciones de los tiempos de las revoluciones de la tierra en su eje. Así, Newton recurre en principio al concepto de la corrección del tiempo relativo, y lo explica de la siguiente manera:

"El tiempo absoluto, en la astronomía, se distingue del relativo por la igualación o la corrección del tiempo aparente. Pues los días naturales son verdaderamente desiguales, aunque comunmente se los consideran como iguales, y se los usan como medida del tiempo; los astrónomos corrigen esta desigualdad para que puedan medir los movimientos celestes por un tiempo más exacto. Puede que no exista tal cosa como un movimiento uniforme por medio del cual el tiempo pueda medirse exactamente. Todos los movimientos pueden ser acelerados y retardados, pero el fluir del tiempo absoluto no es susceptible de ningún cambio. La duración o persistencia de la existencia de las cosas permanece la misma, sean los movimientos rápidos o lentos, o nulos; y, por lo tanto, esta duración debe distinguirse de las duraciones que no son sino medidas sensibles de ella; y de las cuales la deducimos por medio de la igualación astronómica. La necesidad de esta igualación, para determinar los tiempos de un fenómeno, se manifiesta tanto por los experimentos con el reloj de péndulo, como por los eclipses de los satélites de Júpiter."(13)

Se pone de relieve así que no fue posible para Newton resolver el problema de la relación entre el tiempo relativo y el tiempo absoluto sin recurrir a los conocimientos de los movimientos reales. La corrección del tiempo relativo depende de la suposición de la validez de las leyes de los procesos observados. No obstante, se considera que se logra tal grado de precisión en la determinación del tiempo, que este puede tomarse como si fuera el tiempo absoluto. Newton habla del 'tiempo absoluto, en la astronomía' como un tiempo más exacto que el tiempo relativo, no corregido. Este último es simplemente el tiempo observado, correspondiente al número de las repeticiones de los movimientos utilizados como relojes. Para corregir este tiempo aparente, se recurre a métodos matemáticos, tomando en cuenta la concatenación de los movimientos en el sistema solar. Resulta entonces que el 'tiempo absoluto, en la astronomía' es un tiempo empírico, calculado, que se considera como si fuera el tiempo absoluto.(14)

Este carácter de como si fuera no es peculiar al tiempo absoluto en la teoría newtoniana. En el caso del espacio, este carácter aparece en la consideración del espacio de las estrellas fijas como si fuera el espacio inmóvil. Además, se recurre al principio clásico de la relatividad para poder considerar los espacios relativos, determinados por procesos que se mueven en su integridad, como si fueran espacios inmóviles. Además de esto, los grandes espacios celestes se consideran como 'libres', o sea, como si estuvieran desprovistos de un contenido que pudiera concebirse como masa. En todos estos casos,

las condiciones de la experiencia determinan la manera en que los medios absolutos, no observables en principio, se tomen en cuenta por la ciencia empírica.

Es claro que, para Newton, estas aproximaciones a los medios absolutos tienen que incorporarse en las bases teóricas de la práctica justamente porque hacen posible contar con los medios absolutos. Es decir, las nociones de espacio y tiempo relativos no podrían servir para fundamentar las métricas del espacio y el tiempo, ni la simultaneidad, ni la consideración del movimiento como la resultante de sus componentes. Estas suposiciones pertenecen a los conceptos de los medios absolutos. Esto es así porque, en el enfoque newtoniano, el espacio y el tiempo absolutos son las realidades físicas, y nunca se pierden de vista en la consideración del movimiento.

Hay otro aspecto interesante de la teoría que hasta ahora no se ha advertido. En el espacio tri-dimensional, los espacios relativos pueden concebirse en movimiento con respecto al espacio absoluto inmóvil y también entre sí. Y, puesto que comparten la métrica del espacio absoluto, una vez que se logre en focar el espacio relativo determinado por un proceso, resulta que los movimientos pertenecientes al proceso pueden ser observados con exactitud con respecto a dicho espacio. Luego, si se considera que las estrellas fijas constituyen un marco de referencia inmóvil, entonces los movimientos de los espacios relativos pueden ser determinados con respecto al espacio de las estrellas fijas. De esta manera, la física newtoniana cuenta con un marco de referencia espacial considerado como si estuviera en estado de reposo con respecto al espacio absoluto. Y así, en la práctica, puede introducirse la consideración de los espacios determinados por los procesos observables como medidas móviles del único espacio físico, universal y homogéneo.

En cambio, en el caso del tiempo uni-dimensional y con un sólo sentido y que fluye con uniformidad absoluta, no existe la posibilidad análoga de considerar que los procesos determinen tiempos relativos que se mueven entre sí y con respecto al tiempo absoluto. Un tiempo relativo, análogo al espacio relativo, no puede concebirse en el marco del pensamiento newtoniano. Porque, si ocurriese que un movimiento o proceso se repitiera con uniformidad temporal exacta, estableciendo así un tiempo relativo que compartiera la métrica del tiempo absoluto, esto no determinaría un tiempo que fuera distinguible del tiempo absoluto por su dimensión o sentido de flujo. No determinaría más que un intervalo especificado del único fluir temporal. En efecto, todos los procesos y movimientos tienen que concebirse en el mismo orden temporal, uni-dimensional. El mismo orden temporal es omnipresente, y esto se expresa en la noción clásica de la simultaneidad, según la cual, en cualquier instante omnipresente, todos los cuerpos en movimiento tienen posiciones espaciales que son simultáneas.

De esta manera, en la cinemática newtoniana, el tiempo vincula, de un modo peculiar, todos los movimientos y procesos dentro de un orden que tiene significado físico unívoco. El

problema del tiempo relativo es simplemente corregir el tiempo aparente para aproximarlo a determinaciones exactas dentro de ese orden universal y simultáneo. Por lo tanto, por mucho que el tiempo parezca menos accesible que el espacio, el orden temporal absoluto parece tener una vigencia especial en el universo newtoniano.

Pero dicho carácter privilegiado del tiempo no es garantizado por su uni-dimensionalidad. Es decir, si la razón de flujo temporal pudiera variar, entonces podría concebirse la relatividad de los tiempos determinados por los procesos. Como es sabido, este paso se da en la teoría de la relatividad. En cambio, en la época de Newton, la posibilidad de la variación métrica de los medios absolutos ni siquiera se había concebido.

Notas. Capítulo VIII.

¹ Véase Capítulo VI.

² Sir Isaac Newton, Opticks, Dover Publications, New York, 1952; Libro III, Parte I, Pregunta 31, pág. 400.

"...it seems probable to me that God in the beginning form'd Matter in solid, massy, hard, impenetrable, movable Particles, of such Sizes and Figures, and with such other properties, and in such Proportion to Space, as most conduced to the End for which he form'd them."

³ Ibid. -Newton añade:

"...and that these primitive Particles being Solids, are incomparably harder than any porous Bodies compounded of them; even so very hard, as never to wear or break in pieces; no ordinary Power being able to divide what God himself made one in the first Creation. While the Particles continue entire, they may compose Bodies of one and the same Nature and Texture in all Ages: But should they wear away, or break in pieces, the Nature of Things depending on them, would be changed...And therefore, that Nature may be lasting, the Changes of corporeal Things are to be placed only in the various Separations and new Associations and motions of these permanent Particles; compound Bodies being apt to break, not in the midst of solid Particles, but where these Particles are laid together, and only touch in a few points."

⁴ La segunda ley del movimiento equivale a la formulación:

fuerza = masa \times aceleración.

⁵ Definición II define la cantidad de movimiento como masa por velocidad.

⁶ Hay que tener presente la distinción newtoniana entre la fuerza 'pasiva' de inercia, inherente a la masa, y la relación -no resuelta por Newton- entre la masa y los 'principios activos', tal como la fuerza de la gravedad. Véase Capítulo II, Sec. c, #3.

⁷ En los Axiomas y Nociones Comunes en el Apéndice de las Meditaciones, Descartes dice:

"The present time is not dependent on that which immediately preceded it; for this reason, there is not need of a less cause for conserving a thing than for at first producing it."

8 A diferencia de las partículas inertes, puramente especulativas de Newton, las partículas subatómicas conocidas en la actualidad pueden considerarse como procesos dotados de métricas espacio-temporales. Y así la temporalidad parece ser constitutiva de la materia en este caso.

9 Galileo, op. cit., "Third Day", pág. 161.

"...we may picture to our minds a motion as uniformly and continuously accelerated when, during any equal intervals of time whatever, equal increments of speed are given to it."

10 La forma general de las ecuaciones newtonianas del movimiento lineal es: $x = x_0 + v_0t + 1/2at^2$, siendo x la distancia con respecto al origen del marco de referencia, v la velocidad instantánea, a la aceleración, y t el tiempo desde el instante del origen del movimiento. La ecuación puede interpretarse de la siguiente manera: Para un valor especificado del tiempo, la posición espacial correspondiente es igual a la posición inicial, más la distancia recorrida debido a la velocidad inicial, más la distancia recorrida debido a la aceleración. La velocidad y la aceleración son vectores.

11 En última instancia, esta consideración se aplicaría también a las predicciones del ser supra-humano de Laplace. Porque no es una cuestión aquí del error experimental o del alcance humano limitado, sino de la carencia -inherente a las condiciones naturales de la observación- de un criterio para la medición del tiempo. Este ser de Laplace quizás podría lograr la corrección completa del tiempo relativo en el sentido explicado a continuación en este capítulo. Sin embargo, no tendría criterio para comprobar, mediante la observación, que sus resultados no aparecieran correctas debido a una compensación de errores. Este punto es tan interesante porque pone de relieve que el mecanicismo laplaciano fue una extrapolación de la física newtoniana, tanto en sentido teórico como en sentido práctico, puesto que en él no se toma en cuenta el problema de la observación del tiempo.

12 El Libro III de los Principia, "El sistema del mundo (en tratamiento matemático)", empieza con una sección titulada "Fenómenos". Aquí Newton presenta unas conclusiones respecto a las órbitas planetarias, basadas en los datos observacionales. En estos 'fenómenos', Newton especifica el papel de las estrellas fijas consideradas como si fueran en estado de reposo.

También aparece aquí la noción del alto grado de aproximación de un movimiento real a su expresión matemática. (Principia, págs. 401-405)

¹³ Principia, págs. 7-8.

"Absolute time, in astronomy, is distinguished from relative, by the equation or correction of the apparent time. For the natural days are truly unequal, though they are commonly considered as equal, and used for a measure of time; astronomers correct this inequality that they may measure the celestial motions by a more accurate time. It may be that there is no such thing as an equable motion whereby time may be accurately measured. All motions may be accelerated and retarded, but the flowing of absolute time is not liable to any change. The duration or the perseverance of the existence of things remains the same, whether the motions are swift or slow, or none at all; and therefore this duration ought to be distinguished from what are only sensible measures thereof; and from which we deduce it by means of the astronomical equation."

¹⁴ Es decir, en la astronomía, se trata del tiempo en relación con los cuerpos en movimiento, y no del tiempo absoluto en sí mismo. Pero en la medida en que se suponga que la astronomía maneja el tiempo verdadero, se está suponiendo que el tiempo corregido hace presente la duración verdadera en los procesos observables. El 'tiempo absoluto en la astronomía' en realidad es un concepto a la vez matemático y empírico, que se coloca entre el tiempo relativo de la observación y el tiempo absoluto. Podría decirse, entonces, que debido a la distinción tajante entre el tiempo absoluto, verdadero y matemático y el tiempo relativo, aparente y común, Newton tenía que introducir otro concepto intermediario para poder considerar el tiempo matemático en la práctica.

Parte C. La observación espacio-temporal.

Capítulo IX

Las 'medidas sensibles' del espacio
y el tiempo en la física newtoniana.

a. Los dos aspectos de la medición del movimiento:
medidas exactas y movimientos verdaderos.

En el Scholium de las Definiciones, Newton hace hincapié en la distinción entre el tiempo, el espacio, los lugares y el movimiento absolutos, considerados como 'cosas mismas' y, por otra parte, las 'medidas sensibles'. Por una parte, el espacio y el tiempo absolutos no son sensibles, y existen independientemente los cuerpos. Por otra parte, la medición espacio-temporal puede practicarse únicamente en relación con los cuerpos sensibles. Por lo tanto, el problema de la medición es establecer los criterios según los cuales las medidas sensibles sean medidas verdaderas, que correspondan en algún sentido a las cantidades absolutas. Por ejemplo, en la medición espacial, puede tratarse de medidas verdaderas con respecto a un marco de referencia que no enfoca el espacio absoluto. Así, en un espacio relativo, que consta en todo instante de lugares absolutos diferentes, una distancia puede ser medida exactamente. En el caso del tiempo, la medición exacta depende del tiempo relativo corregido, un tiempo calculado que es una aproximación al tiempo verdadero. De esta manera, la medición se apoya en las propiedades métricas del espacio y el tiempo absolutos, sin que las medidas sean datos de la observación directa de los medios absolutos. A este respecto, Newton dice:

"..las cantidades relativas no son las cantidades mismas, cuyos nombres se les dan, sino (son) aquellas medidas sensibles (o exactas o inexactas) de éstas, que se usan comunmente en vez de las cantidades mismas, medidas. Y si el significado de las palabras debe determinarse por su uso, entonces por los nombres tiempo, espacio, lugar y movimiento, deben entenderse apropiadamente sus medidas sensibles; y la expresión será desacomodada, y puramente matemática, si significa las cantidades mismas medidas. Por lo cual, quienes interpretan dichas palabras como por las cantidades medidas, perjudican la exactitud del lenguaje, que debe conservarse preciso. Y ellos no menos corrompen la pureza de las verdades matemáticas y filosóficas, quienes confunden las cantidades reales con sus relaciones y medidas sensibles."(1)

Este párrafo puede interpretarse en el sentido de que, para Newton, las 'cantidades reales' -o sea, las cantidades del espacio y el tiempo absolutos- se designan únicamente en las formulaciones matemáticas, mientras que los datos empíricos no se refieren a los medios en sí mismos, puesto que la medición se practica en relación con los cuerpos. Sin embargo, la estructuración de la teoría de espacio y tiempo, y la integración de ésta en la teoría del movimiento, hacen factible que las medidas sensibles sean consideradas como exactas.(2) Lo más importante aquí es que la exactitud no es el criterio de la distinción entre las cantidades absolutas y relativas. Newton advierte en la primera frase del párrafo que acabamos de citar que las medidas sensibles pueden ser exactas; y conserva así la distinción entre las cosas mismas y sus medidas sensibles sin renunciar a la medición exacta. Parece que para Newton, la existencia de los medios absolutos como cosas mismas fundamenta el significado físico de las magnitudes variables espacio-temporales, que se integran en las relaciones matemáticas tanto de la cinemática como de la dinámica.

Es claro, desde luego, que el espacio y el tiempo absolutos no son simplemente los medios que contienen la existencia material. Al contrario, su carácter métrico y físico coadyuva al mecanismo de la naturaleza en el sentido de que las magnitudes pertenecientes a ellos entran en relación cuantitativa con la fuerza y la masa. Por ejemplo, la segunda ley del movimiento se expresa en la formulación, fuerza = masa x aceleración. (3) La aceleración significa el cambio en el estado de movimiento de la masa en cuestión. Esta ley establece una relación necesaria entre las cantidades del espacio y el tiempo y las otras magnitudes de la dinámica. Significa que las fuerzas impuestas a las masas causan ciertos cambios en el movimiento espacio-temporal de éstas, y dichos cambios pueden predecirse cuando la ley general adquiere contenido específico en el caso de un proceso dado. Así, esta relación, junto con las otras relaciones fundamentales de la física newtoniana, fundamenta el significado físico de los datos de la observación concernientes a los cambios de posición de los cuerpos. Entonces, si las leyes del movimiento se consideran universalmente válidas, esto requiere que la magnitud de los movimientos que ocurren en

cualquier proceso sea consecuente con las relaciones establecidas en dichas leyes. Por consiguiente, es la posibilidad de la medición exacta de los movimientos -es decir, las trayectorias espaciales recorridas por las masas en ciertos intervalos de tiempo- lo que hace posible la investigación y la comprobación empírica de las leyes de la mecánica. En otras palabras, el significado físico de los datos espacio-temporales depende de que los cambios de posición de los cuerpos ocurran de acuerdo con las relaciones de las leyes mecánicas. Esto es así porque las magnitudes espacio-temporales son magnitudes físicas como cualesquiera otras.

Pero surge el problema de que el significado físico de cualquier movimiento, observado desde cualquier marco de referencia, no se da de por sí. Al contrario, es necesario lograr un enfoque apropiado del proceso en cuestión para hacer manifiestos los movimientos pertenecientes a él. Esto es el problema newtoniano de la distinción entre el movimiento aparente y el movimiento verdadero.⁽⁴⁾ La medición sólo es posible a través de los cuerpos, mientras que los cuerpos se mueven relativamente entre sí. Por lo tanto, el movimiento que se observa como correspondiente a los cuerpos respectivos dependerá de cuáles cuerpos estén en estado de reposo relativo al marco de referencia, y esto dependerá del marco escogido. En esta situación, un marco de referencia apropiado para enfocar un proceso pondría de manifiesto los movimientos producidos por las fuerzas que actúan en el proceso en cuestión -es decir, los movimientos que realmente ocurren y que se explican por la ley de dicho proceso.

Newton plantea la distinción entre el movimiento verdadero y el movimiento relativo de la siguiente manera:

"Las causas por las cuales los movimientos verdaderos y relativos se distinguen entre sí, son las fuerzas impuestas a los cuerpos para engendrar el movimiento. El movimiento verdadero ni se engendra ni se altera sino por alguna fuerza impuesta al cuerpo movido; pero el movimiento relativo puede engendrarse o alterarse sin que fuerza alguna sea impuesta al cuerpo. Pues es suficiente solamente imponer alguna fuerza en otros cuerpos con los cuales el primero se compara, de modo que, con ceder lugar aquéllos, puede cambiarse esa relación en la cual consistió el reposo relativo o movimiento relativo de éste. Por otra parte, el movimiento verdadero siempre sufre algún cambio por una fuerza cualquiera impuesta al cuerpo en movimiento; pero el movimiento relativo no experimenta necesariamente cambio alguno por tales fuerzas. Porque, si las mismas fuerzas también son impuestas de igual manera a los otros cuerpos con los cuales se hace la comparación, de modo que se conserve la posición relativa, entonces se conservará la condición en la cual el movimiento relativo consiste. Y, por lo tanto, cualquier movimiento relativo puede ser cambiado mientras que el movimiento verdadero permanezca sin alteración, y el relativo puede conservarse mientras que el verdadero sufra algún cambio. Así, el movimiento verdadero de ninguna manera consiste en tales relaciones."⁽⁵⁾

El énfasis aquí se pone en el concepto teórico del movimiento verdadero, causado por una fuerza impuesta, mientras que el concepto de los marcos de referencia permanece simplemente implícito. Pero si se intenta considerar cómo el movimiento verdadero se observa, el problema de los marcos de referencia se hace explícito de inmediato. Y, puesto que la medición exacta de los movimientos verdaderos es lo que fundamenta el aspecto empírico de la mecánica, esto es un problema central de la física newtoniana. Por otra parte, es necesario tener presente que la teoría de espacio y tiempo, de por sí, no aporta la solución sino que únicamente contribuye a ella.

b. La medición espacial.

El movimiento verdadero de Newton puede concebirse o en el espacio absoluto o en un espacio relativo, pero en todo caso se explica en el contexto de un proceso. Por ejemplo, las trayectorias de los planetas en el sistema solar se enfocan con respecto a las estrellas fijas, inclusive el sol que constituye el cuerpo de referencia del sistema; y éstas se consideran como si estuvieran en estado de reposo en el espacio absoluto. La validez de este marco se confirma por el hecho de que, en él, los movimientos observados son consecuentes con las leyes del movimiento y la gravitación.

Por otra parte, un ejemplo del movimiento verdadero en un espacio relativo sería el de un proyectil con respecto a la superficie de la tierra. En este caso, la trayectoria del proyectil se explica por las fuerzas de propulsión, inercia y gravitación terrestre. Al mismo tiempo, este movimiento es un componente verdadero del movimiento absoluto del proyectil con respecto al espacio absoluto, que podría calcularse sumando todos los componentes de dicho movimiento -es decir, el movimiento del proyectil con respecto a la superficie de la tierra; el movimiento rotacional de este lugar alrededor del eje terrestre; y el movimiento de la tierra en su órbita alrededor del sol. Pero, para poder saber todos estos componentes verdaderos del movimiento absoluto, es necesario considerar a cada uno de ellos con respecto a un marco apropiado en el cual se pone de manifiesto el movimiento debido a las fuerzas operantes en el proceso específico. Claro que en la práctica, esto no es siempre posible, de modo que se recurre a calcular algunos componentes. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, la concepción newtoniana de movimiento absoluto nos remite a los procesos en cuyo contexto pueden descubrirse los componentes verdaderos del movimiento absoluto.

Por lo tanto, el problema newtoniano de la medición espacial es, en primer lugar, la determinación del espacio en el cual el proceso en cuestión se desarrolla, sea este espacio el de las estrellas fijas, u otro espacio relativo determinado por el proceso que se mueve en su integridad con respecto a aquél. En todo caso, este problema tiene dos aspectos. Por una parte,

se necesita enfocar el espacio del proceso como si este espacio estuviera en estado de reposo, de manera que los movimientos observados fueran movimientos verdaderos con respecto a dicho espacio. Esto requiere que se determine el cuerpo o el lugar de referencia del proceso que no se mueve dentro de dicho espacio. Por otra parte, lo que suministra la base para confirmar semejante enfoque espacial del proceso es el conocimiento de la ley de la dinámica de éste. Si la ley es verdadera, y si el lugar de referencia del proceso ha sido escogido correctamente, el movimiento observado será consecuente con la ley. De esta manera, los movimientos de los cuerpos individuales que son observados, corresponderán a las fuerzas impuestas.

Se pone de relieve así que el problema newtoniano de la medición espacial en la dinámica no es simplemente medir distancias, sino medir los movimientos verdaderos de los cuerpos individuales. Esto implica el juego entre descubrir el punto de referencia espacial del proceso observado, para poder enfocarlo en el espacio, y descubrir la ley dinámica del proceso, para poder confirmar que los movimientos así enfocados se explican por causas físicas.

El fundamento de esta noción newtoniana de un espacio relativo, determinado por un proceso que se mueve en su integridad y en el cual el proceso ocurre como si este espacio estuviera inmóvil, es la concepción de la relatividad clásica (galileana y newtoniana), formulada por Newton en el famoso Corolario V de las Leyes del Movimiento. Aquí Newton dice:

"Los movimientos de los cuerpos incluidos en un espacio dado, son los mismos entre sí, ya sea que dicho espacio esté en reposo o que se mueva uniformemente hacia adelante en línea recta sin ningún movimiento circular."(6)

Y en el Corolario VI añade:

"Si (algunos) cuerpos, movidos de cualquier modo entre sí, son impulsados en el sentido de líneas paralelas por fuerzas aceleradoras iguales, continuarán todos ellos a moverse entre sí del mismo modo como si no hubiesen sido impulsados por dichas fuerzas."(7)

Por lo tanto, si un proceso se enfoca desde un marco que comparte el movimiento del proceso en su integridad, este movimiento no afectará la observación del movimiento perteneciente al proceso. Dicho de otra manera, el movimiento de semejante marco 'galileano',(8) que se mueve en su integridad, no puede descubrirse dentro de dicho marco. Así, explicando el Corolario V mediante un ejemplo, Newton dice:

"Tenemos una prueba claro de esto por el experimento de un barco; en donde todos los movimientos ocurren del mismo modo, ya sea que el barco esté en reposo o que sea llevado uniformemente hacia adelante en línea recta."(9)

En cuanto al propio concepto de los movimientos verdaderos causados por fuerzas impuestas a las masas, esto es el problema de la teoría del movimiento que ocupa los dos primeros libros de los Principia, bajo el título general de "El movimiento de los cuerpos". El problema es saber las consecuencias para las trayectorias de los cuerpos, de las fuerzas impuestas a ellos. Dicha geometría del movimiento, en su desarrollo newtoniano, presupone la noción primitiva de la naciente física moderna, de que el movimiento se produce por la fuerza. Además, presupone un conjunto de suposiciones que ya habían sido establecidas como válidas. Entre ellas están la naturaleza métrica euclideana de la realidad extensa, el principio del paralelogramo de las fuerzas, la noción galileana de la aceleración, el principio de la conservación de la cantidad de movimiento, y la noción del centro de gravedad de un sistema o proceso físico.(10) Esta última concepción es de interés especial aquí porque aporta el contenido físico de la noción de que un espacio relativo tenga un punto de referencia interno en estado de reposo en dicho espacio. Así, el Corolario IV de las Leyes del Movimiento afirma:

"El centro común de gravedad de dos o más cuerpos no altera su estado de movimiento o reposo por las acciones de los cuerpos entre sí; y, por consiguiente, el centro común de gravedad de todos los cuerpos que actúan el uno sobre el otro (excluyendo acciones e impedimentos externos) o está en reposo o se mueve uniformemente en línea recta."(11)

Y, para concluir este Corolario, Newton dice:

"...el movimiento progresivo, ya sea de un solo cuerpo o de un sistema entero de cuerpos, siempre debe calcularse a partir del movimiento del centro de gravedad."(12)

De esta manera, un espacio relativo determinado por un cuerpo o sistema físico, comparte el movimiento de su centro de gravedad; y este centro, que está en estado de reposo con respecto a dicho espacio, sirve como el lugar de referencia espacial para la determinación de los cambios de posición de los cuerpos que se mueven entre sí en dicho espacio.

Es evidente, entonces, que el problema newtoniano de la medición espacial no se resuelve simplemente por el carácter manifiesto de la métrica de la extensión. Por una parte, hay que recurrir a la relatividad clásica para fundamentar que un espacio relativo sea el espacio estable de un proceso. Por otra

parte, la selección de su lugar de referencia tiene que concordar con una consideración dinámica, o sea, con el centro de gravedad. Y la confirmación de un marco de referencia tiene que demostrar que los movimientos observados en dicho espacio resultan consecuentes con la ley del proceso. Sólo es necesario recordar el desarrollo de la física moderna desde el enfoque espacial copernicano del sistema solar hasta la teoría newtoniana de la gravitación, para poner de relieve la conexión íntima entre los problemas del marco de referencia espacial y el descubrimiento de las leyes dinámicas de los procesos.(13)

c. La medición temporal.

En el caso del tiempo newtoniano, el problema de la medición es de otra índole. Como ya se ha advertido, en la medición espacial es cuestión de descubrir el marco de referencia con respecto al cual los movimientos verdaderos ocurren, pero no surge en principio el problema de la medición exacta, puesto que el carácter matemático del espacio absoluto se considera presente en la existencia sensible, extensa. En cambio, en el caso del tiempo, la situación se invierte. Es decir, el problema en principio aquí es el de la medición exacta de los intervalos temporales correspondientes a los movimientos espaciales, pero no surge el problema de descubrir el marco de referencia temporal en el cual se desarrolla un proceso dado. Todos los procesos, dondequiera en el universo, se desarrollan en el mismo fluir temporal. Los procesos utilizados como relojes para la medición son medidas sensibles, más o menos exactas, del tiempo único y universal, y no constituyen tiempos relativos análogos a los espacios relativos. La diferencia se pone de manifiesto si tomamos en cuenta que las traslaciones verdaderas en un espacio relativo no son necesariamente, a la vez y en principio, traslaciones iguales con respecto al espacio absoluto; pero, en el caso del tiempo, la duración verdadera de un movimiento real constituye en principio dicha duración del tiempo absoluto, y lo único que entra en duda es la exactitud de la medición mediante un tiempo relativo utilizado como reloj. El papel de un reloj es análogo al papel de una vara rígida en la medición espacial, sólo que, en principio y no simplemente como problema práctico, la exactitud del reloj se constituye en problema. Otra manera de expresar esta situación es que, para Newton, no es cuestión de establecer el marco temporal correspondiente a un proceso, sino de corregir la métrica de la repetición de un proceso real dado, para poder medir el tiempo de los procesos con respecto al único fluir temporal absoluto. En otras palabras, el marco temporal constituido por un reloj enfoca el único fluir temporal, pero de modo inexacto.

A primera vista, la diferencia entre los problemas espaciales y temporales de la medición podría dar la impresión de una condición ineludible para la observación de la naturaleza independientemente de la teoría física en cuestión- debido a la diferencia de naturaleza dimensional del espacio y el tiempo.

Desde este punto de vista, el tiempo, a pesar de su inaccesibilidad peculiar, parece ofrecer un problema más sencillo que el espacio -un problema de cálculo matemático más bien que de descubrimiento teórico. Es decir, el espacio tri-dimensional consta de un número ilimitado de direcciones, cada una de éstas con dos sentidos, de modo que los espacios relativos se mueven entre sí y se presenta el problema del enfoque espacial apropiado para la observación de los movimientos pertenecientes a un proceso especificado. Pero, dada la unidimensionalidad del tiempo en un solo sentido, no parece tener significado físico hablar de tiempos relativos análogos a los espacios relativos;(14) y resulta que, para Newton, el único problema de la medición temporal parece ser la exactitud.

En el enfoque newtoniano, no hay motivo para llevar el análisis más lejos. Pero en la actualidad, es de mucho interés hacerlo.

Como consideración preliminar, puede advertirse que sería difícil sostener que la unidimensionalidad en un sólo sentido de un medio newtoniano de por sí excluya la consideración del movimiento relativo con respecto a dicho medio. En efecto, el movimiento relativo de los puntos materiales de Newton puede considerarse en una sola dimensión espacial y en un solo sentido. En este caso, sería cuestión de espacios lineales relativos que se mueven con velocidades distintas. Entonces, se presenta la pregunta, ¿por qué no es posible extender esta consideración al tiempo?

El tiempo newtoniano es un fluir. Su modo de existir es el de ser el movimiento del tiempo, un movimiento sui generis. Este movimiento del tiempo es universal y uniforme. Su uniformidad absoluta se postulaba sobre la base de que todos los objetos sensibles del universo parecían comportarse consecuentemente con respecto a un mismo fluir temporal. Pero parece imposible considerar que los tiempos de los procesos se muevan entre sí sino en el sentido de que se tratara de semejantes movimientos sui generis del tiempo que fluyeran con rapidez distinta.

Si consideramos el espacio, vemos que la métrica espacial no es influida por el movimiento de los espacios relativos. ¿Por qué? Porque el carácter relativo del movimiento de éstos es cuestión o del sentido espacial o de la rapidez temporal, o de los dos aspectos a la vez. Se trata de velocidades relativas que son vectores.

El movimiento de los espacios relativos, en cuanto movimiento espacial, no es más que cambio de lugar en el espacio absoluto, sea este cambio en una, dos o tres dimensiones. Pero además, es siempre movimiento de cierta rapidez, según la cantidad de espacio recorrido en cierto intervalo de tiempo. Es decir, el movimiento de los espacios relativos es espacio-temporal. Se concibe por analogía con el movimiento de los objetos sensibles, a los cuales está vinculado. Sucede con respecto al tiempo. Su rapidez no afecta la métrica espacial. Al contrario, la uniformidad de la métrica espacial fundamenta la

consideración de la rapidez de los movimientos de los espacios relativos en el tiempo.

En el caso del tiempo, la situación no es análoga. Un proceso no determina un tiempo, vinculado a él, en el mismo sentido que determina un espacio. Hay un solo fluir temporal para todos los procesos, y este movimiento sui generis del tiempo no depende de ninguna relación con los movimientos de los cuerpos en el espacio. Es puramente temporal. El tiempo no fluye 'con respecto a' ningún criterio de rapidez espacio-temporal. Es la duración física y rige para el movimiento de los cuerpos; de modo que esta vigencia establece una relación unilateral, como en el caso del movimiento uniformemente acelerado, que depende del fluir temporal, absoluto. Podría decirse entonces que, justamente por ser un movimiento absoluto en sí mismo, el tiempo es la magnitud realmente absoluta de la física newtoniana.

Este carácter privilegiado del tiempo newtoniano ha sido reconocido generalmente. Lo que interesa aquí es que toda esta concepción descansa en la noción de que el tiempo en-sí es un movimiento uniforme. Es el único movimiento, en principio uniforme, del sistema newtoniano. Y es la uniformidad universal de dicho movimiento, más bien que su unidimensionalidad, la que hace imposible concebir que un proceso determine un tiempo relativo, vinculado a él. El tiempo permanece independiente de los procesos en un sentido peculiar.

Si se concibiera que los tiempos relativos, vinculados a los procesos, se moviesen entre sí, esto implicaría que los tiempos relativos fluyeran con métricas distintas, de manera que la duración de un mismo movimiento espacial resultaría variable, según la métrica del marco temporal del observador. Y, por lo tanto, la propia noción de tiempo absoluto perdería su significado newtoniano. Pero en el enfoque newtoniano esta posibilidad se excluye de antemano por su incompatibilidad con el principio de la homogeneidad métrica tanto del espacio como del tiempo físicos. Resulta entonces que, en la física newtoniana, la noción del marco temporal tiene significado limitado a lo que se refiere a su exactitud como medida de tiempo absoluto.

En efecto, considerando las relaciones más generales de la teoría, parece que para Newton el movimiento de los objetos sensibles es espacio-temporal; además, el movimiento de los espacios relativos se concibe como espacio-temporal; pero el único fluir temporal es puramente temporal. El intento de precisar estas distinciones pone de relieve por qué la concepción del movimiento relativo tiene carácter tan limitado en la física clásica. Este movimiento relativo consiste en los movimientos simultáneos de dos o más cuerpos o sistemas que se mueven entre sí; y las velocidades observadas de esos cuerpos o sistemas pueden variar con el movimiento del marco de referencia espacial del observador. Pero la duración no varía. Sólo el espacio varía. Se trata de un mismo tiempo, y el problema para Newton es la medición exacta de este mismo tiempo -es decir, la duración verdadera de este intervalo.

A este respecto, es de interés notar que, hasta cierto grado, la física moderna se caracteriza por una orientación teórica en la que este problema se evita. Por una parte, en la cinemática se trata de velocidades instantáneas. Pero lo que es más interesante es que, en los principios del desarrollo de la dinámica moderna, resultó muy natural, partiendo de consideraciones estáticas, considerar las situaciones fundamentales de la física, al grado posible, en términos de un mismo tiempo. De modo que no se plantean las situaciones en términos de duraciones temporales diferentes que entran en relación cuantitativa entre sí. Así, por ejemplo, se desarrollaba la noción del paralelogramo de las fuerzas,⁽¹⁵⁾ hasta que Newton la formuló expresamente en el Corolario I de las Leyes del Movimiento de la siguiente manera:

"Un cuerpo, sobre el cual dos fuerzas actúan simultáneamente, describirá el diagonal de un paralelogramo en el mismo tiempo en que describiría los lados por dichas fuerzas separadamente."⁽¹⁶⁾

Sin embargo, por mucho que esta orientación encierre cierto interés teórico, subsiste el problema de la medición exacta del tiempo; y la solución newtoniana consiste en dar el paso desde el tiempo relativo, aparente y común al 'tiempo absoluto, en la astronomía', es decir, el tiempo corregido. Por lo tanto, es importante considerar por qué el tiempo relativo puede servir como el punto de partida para llegar al 'tiempo absoluto en la astronomía'.

En realidad, el carácter peculiar del concepto de tiempo relativo no consiste en que el tiempo aquí sea relativo a los cuerpos en movimiento. El espacio relativo también es relativo a los cuerpos en movimiento, en el sentido de que el cuerpo o lugar de referencia de un espacio relativo se concibe en movimiento. Pero en el caso del tiempo relativo, se trata además de una relación con el movimiento espacial repetido de un cuerpo implicado en un proceso cíclico. El tiempo en que este movimiento se repite depende directamente de los procesos reales, puesto que la duración que se toma como una unidad del tiempo es la duración de un movimiento de traslación; y éste es un movimiento diferente cada vez que se repite. Así la repetición del movimiento (o del proceso) que determina una unidad del tiempo difiere de la determinación sucesiva de una unidad de espacio por la misma vara rígida.

Es importante también tener presente que la idea general de las unidades del tiempo que corresponden a los movimientos repetidos en los procesos cíclicos es una de las concepciones más fundamentales de la física y ha experimentado un desarrollo histórico. Esta idea implica, en primer lugar, la noción elemental de la repetición regular en el tiempo y, por otra parte, vincula esta noción con la repetición del movimiento espacial. Estos dos componentes de la idea tradicional de las unidades del tiempo tienen que distinguirse porque, en realidad, la

repetición del aspecto espacial de los movimientos no nos dice nada, de por sí, respecto a la uniformidad temporal de dichos movimientos. En otras palabras, la concepción de la regularidad temporal tiene su propio origen en la experiencia de la temporalidad de los procesos repetidos, y no como una mera inferencia de los acontecimientos en el espacio. Por ejemplo, yo puedo cerrar los ojos y contar mentalmente con ritmo regular desde uno a cinco, repetidamente, y dando un signo con la mano cada vez que empiezo de nuevo con uno. Para mí, esto es una experiencia primordial de la temporalidad, mientras que, para la persona que me observa, se trata de un reloj que manifiesta las unidades del tiempo por un movimiento de la mano en el espacio pero cuyo proceso interno es escondido. Pero esa otra persona infiere que se trata de un reloj justamente por su capacidad de experimentar la temporalidad. Dicha capacidad pertenece al ser humano, sea por su estructura mental o su estructura fisiológica, o estos dos aspectos de su existencia en su conjunto. Cualquiera que sea la explicación, se trata de una posibilidad de la experiencia humana.

Luego, en la física moderna, es precisamente el carácter independiente del concepto de la temporalidad el que adquiere expresión teórica. Es decir, con Galileo y Newton, aparece la concepción física y matemática de que el espacio recorrido por un cuerpo implicado en un proceso mecánico es una función apropiada del tiempo transcurrido. Esta vinculación del espacio y el tiempo tiene el resultado de que la posibilidad de las inferencias temporales exactas no se limita a movimientos uniformes, sino que se generaliza en principio para todo movimiento cuya ecuación se conoce. Es decir, una inferencia temporal extraída de un movimiento se fundamenta en que el tiempo sea determinante del espacio recorrido. Cuando esta noción moderna se aplica a los movimientos cíclicos, se establece la correspondencia cuantitativa entre una órbita espacial, o una parte especificada de ésta, y los tiempos correspondientes; de modo que, para las revoluciones sucesivas, la duración temporal de una revolución entera, o de una cierta parte de ella, será la misma para cada revolución. Pero esto no implica que el tiempo dependa del espacio recorrido. Al contrario, en la cinemática moderna, a partir de Galileo, el tiempo es una magnitud independiente; y es la relación entre el tiempo y el espacio lo que fundamenta las determinaciones temporales.

Con esto, es posible advertir la relación entre el tiempo absoluto, verdadero y matemático, y el tiempo relativo, aparente y común en la física newtoniana. El tiempo verdadero será equivalente al tiempo inferido del número de los movimientos repetidos únicamente en el caso de que todos los movimientos sucesivos en cuestión ocurran sin perturbaciones que no se toman en cuenta en su ecuación. Si semejantes perturbaciones ocurren, la ecuación no describe el movimiento real exactamente; y el tiempo inferido del número de los movimientos no corresponderá exactamente al tiempo realmente transcurrido. Por ejemplo, tratándose de un cuerpo que sigue una órbita circular, la inferencia de tiempos iguales para cada revolución encubrirá las verdaderas variaciones temporales. En efecto, el tiempo verdadero

de las revoluciones sucesivas varía, pero el tiempo relativo, inferido del número de éstas, se toma como uniforme. Así, al grado de que un movimiento cíclico realmente ocurra de acuerdo con su ecuación, el tiempo verdadero no varía y, por lo tanto, el tiempo aparente se aproxima al tiempo verdadero.

Hay dos consideraciones aquí. En primer lugar, si la ecuación no es una descripción más o menos adecuada del movimiento en cuestión, entonces la duración inferida, expresada en unidades mundialmente aceptadas, no concordará con el tiempo mundial. En segundo lugar, dada una ecuación más o menos adecuada, el problema de la medición temporal exacta es penetrar detrás de la uniformidad aparente del tiempo de las revoluciones o ciclos, para que se descubran las variaciones reales de la duración verdadera. El tiempo verdadero es la duración de los movimientos reales con respecto al tiempo absoluto universal, pero una ecuación del movimiento, por adecuada que sea, no nos da más que la trayectoria idealizada de una partícula material en la cual actúan las fuerzas tomadas en cuenta en la formulación de la ecuación. Es cuando ésta se utiliza para determinar los tiempos de los movimientos reales, que el carácter del tiempo relativo se advierte.

Es decir, parece implícito en el tratamiento newtoniano de la corrección del tiempo relativo que éste debe derivarse de una descripción matemática del movimiento en cuestión en torno a sus causas principales y constantes. Y, por lo tanto, semejante descripción puede servir de base para la corrección de las determinaciones temporales de dicho movimiento en un contexto más amplio. Desde este punto de vista, el conocimiento de los movimientos reales fundamenta el propio tiempo relativo. Por otra parte, esta interpretación hace posible considerar que tanto el tiempo relativo como el tiempo corregido se incorporan a la conceptualización matemática del movimiento. En efecto, sería muy difícil considerar que Newton hubiera incluido en su teoría de espacio y tiempo una noción enteramente ingenua de tiempo relativo. Es cierto que lo califica como 'común' a diferencia de 'matemático', pero esto parece referirse a la discrepancia entre la magnitud de la duración relativa y la verdadera. Esto no excluye que el tiempo relativo sea una inferencia de una descripción matemática del movimiento.(17) Al contrario, semejante descripción de un movimiento particular es el primer paso para determinar los tiempos con exactitud en un contexto más amplio, y, a la vez, sirve para comprobar la concatenación de los movimientos en dicho contexto.

El fluir temporal absoluto, dotado de métrica uniforme, siempre permanece no-sensible. No se da mediante la observación de un movimiento sensible; y el tiempo corregido es una inferencia mediata. En cambio, los espacios relativos ponen de manifiesto para la medición la métrica homogénea del espacio absoluto. Por lo tanto, en este esquema espacio-temporal, la única medición posible con respecto a las métricas absolutas es la medición espacial. Y el mismo principio que fundamenta la consideración del espacio relativo como dotado de la métrica

absoluta, a la vez fundamenta la validez de la medición espacial. Este principio es el de la homogeneidad métrica de la realidad extensa, sea esta realidad el espacio o la existencia corpórea. Por otra parte, la vinculación entre el espacio y el tiempo en la concepción matemática del movimiento constituye el fundamento newtoniano (y galileano) para la posibilidad de la dependencia de la medición temporal de la espacial. En la antigüedad, la noción del movimiento perfectamente uniforme del cielo había suministrado la única base teórica para las inferencias de tiempos iguales correspondientes a traslaciones iguales. Pero en la física clásica, en la que se prescindía del movimiento perfectamente uniforme, la concepción de las ecuaciones de movimiento aporta una fundamentación generalizada de las determinaciones temporales. Sin embargo, subsiste en principio la necesidad de corregir las determinaciones temporales de los movimientos pertenecientes a un proceso especificado, a la luz de la concatenación de los acontecimientos en un contexto más amplio, o sea, a la luz del principio clásico de la simultaneidad.

Lo que puede advertirse ahora es la distinción entre el papel de una concepción del movimiento de traslación de servir como fundamento de las determinaciones temporales, y, por otra parte, la noción previa de que la medición temporal sea una inferencia de la medición espacial. Se trata aquí de la suposición tradicional de que la extensión de la naturaleza sea observable porque existe ante los ojos, mientras que la duración temporal no es sensible como tal, sino únicamente a través de los acontecimientos espaciales. Es cuestión de una noción tradicional de la distinción radical entre las naturalezas sensibles de lo espacial y lo temporal. Se considera que, en cuanto medible, lo temporal se manifiesta espacialmente, mientras que lo extenso espacialmente se manifiesta como tal. El tiempo siempre se ha concebido en algún sentido oculto en comparación con el espacio.

Con Newton, esta tradición experimentó un desarrollo muy importante. El paso extremo dado por Newton fue el de separar el espacio y el tiempo como tales de los cuerpos y movimientos sensibles, con el resultado de que los medios absolutos sean igualmente no-sensibles e inasequibles. Y resulta, como ya se ha advertido, que la dependencia de la medición temporal de la espacial, no depende de las propias naturalezas del espacio y el tiempo. Es más bien un resultado de la naturaleza de la materia. La medición de la extensión y de la duración se practica en relación con los cuerpos, y la posibilidad de la medición exacta se apoya en la concepción de la existencia espacio-temporal de éstos. Esta posibilidad se realiza en el caso de la medición espacial debido a la naturaleza extensa de la materia, cuyas partículas se conciben como rígidas y creadas 'en cierta proporción al espacio'. De esta manera, se establece la correspondencia métrica entre el espacio y los cuerpos. Pero en el caso del tiempo, el juego de fuerzas en el universo causa variaciones temporales en los procesos y en los movimientos pertenecientes a éstos. Así, la distinción entre la medición espacial

y la temporal se explica en el marco de la naturaleza sensible, en torno a la constitución de la materia y los movimientos causados por fuerzas. Los medios absolutos permanecen independientes, existentes en sí-mismos, y fundamentan las magnitudes que figuran en las leyes generales del movimiento y las leyes de los procesos. El espacio relativo conserva el carácter de un medio matemático, mientras que el tiempo relativo pierde este carácter, debido a que la uniformidad de su métrica es una apariencia que pueda o no corresponder a la métrica temporal verdadera. Sin embargo, el tiempo absoluto de Newton es el tiempo físico, no obstante que en principio no tenga manifestación sensible y exacta. El tiempo existe físicamente de su propia manera y desempeña papel dinámico, determinante del movimiento.

Es evidente que esta teoría newtoniana, en la que el espacio y el tiempo absolutos se vuelven igualmente no-sensibles, no resuelve la discrepancia en cuanto a la validez de las mediciones espaciales y temporales. Además, subsiste el problema tradicional de que la duración temporal tiene que medirse en el espacio, mientras que la extensión espacial puede medirse directamente. La teoría newtoniana de espacio y tiempo se caracteriza por las naturalezas análogas del espacio y el tiempo en el nivel ontológico; pero las discrepancias en lo que se refiere a la medición expresan que dichas naturalezas no se manifiestan análogamente en relación con los cuerpos. Sin embargo, las concepciones del espacio relativo y del vínculo entre el espacio y el tiempo en las ecuaciones del movimiento hacen posible que en la práctica el problema de la medición temporal puede darse por resuelto. Y, en cuanto a la propia teoría de espacio y tiempo, esta solución destaca el papel clave del concepto de espacio relativo. Por otra parte, los problemas de la medición newtoniana ponen de relieve que, para Newton, el universo físico todavía cuenta con la homogeneidad métrica de la extensión sensible, pero carece de un principio temporal análogo.

Se sugieren así algunos de los problemas que son implicados en la noción newtoniana de las 'medidas sensibles' del espacio y el tiempo. Es claro, sobre todo, que el problema de la medición nos remite a la concepción física y matemática de los movimientos pertenecientes a los procesos. Tomando en cuenta el desarrollo posterior de la física, este aspecto de la teoría puede considerarse como un primer paso hacia el enfoque en el cual el espacio y el tiempo se relacionan de modo más fundamental entre sí y con las otras magnitudes dinámicas. Por una parte, este paso newtoniano tiene carácter limitado y peculiar. Es decir, el espacio y el tiempo se conciben como dotados de naturalezas inmutables y, a la vez, entran en relación con la masa, ésta también considerada de naturaleza inmutable. Se trata, entonces, de naturalezas idénticas con sí mismas que se vinculan en el mecanismo natural sin que se afecten mutuamente. (16)

Sin embargo, el paso newtoniano establece un vínculo fundamental entre el espacio y el tiempo y los procesos. Esto se expresa en que, en realidad, la teoría de espacio y tiempo de Newton no aporta una base teórica para el conocimiento de los

aspectos cinemáticos de los procesos independientemente de los aspectos dinámicos de éstos. Es decir, el enlace entre el espacio y el tiempo no constituye relación aparte, cognoscible como tal. Aun si se considera posible reducir al conocimiento empírico a los datos espacio-temporales, el significado físico de éstos tiene que referirse forzosamente a consideraciones dinámicas. Es decir, la propia observación espacio-temporal tiene que acudir a la dinámica para los criterios del movimiento verdadero y el tiempo exacto. Desde este punto de vista, la noción muy difundida de que la física moderna, desde Galileo y Newton, se reduce a los cambios de posición en el espacio y el tiempo es una simplificación que no tiene nada en común con el pensamiento de Newton.(19) Es cierto que, dentro de la física newtoniana, se desarrollaba la cinemática con sus ecuaciones de movimiento cuyos términos son espacio-temporales. Sin embargo, en cualquier ecuación dada, los valores de los coeficientes de las magnitudes espaciales y temporales se determinan por las relaciones dinámicas que son expresadas en dicho movimiento. Así, la noción de la cinemática no implica que sea posible considerar el movimiento espacio-temporal independientemente de los procesos a los cuales los movimientos pertenecen.

Notas. Capítulo IX.

¹ Principia, pág. 11.

"...relative quantities are not the quantities themselves, whose names they bear, but those sensible measures of them (either accurate or inaccurate), which are commonly used instead of the measured quantities themselves. And if the meaning of words is to be determined by their use, then by the names time, space, place and motion, their sensible measures are properly to be understood; and the expression will be unusual, and purely mathematical, if the measured quantities themselves are meant. On this account, those violate the accuracy of language, which ought to be kept precise, who interpret the words for the measured quantities. Nor do those less defile the purity of mathematical and philosophical truths, who confound real quantities with their relations and sensible measures."

² Es decir, el concepto de espacio fundamenta la métrica del espacio relativo, y la concepción de las ecuaciones del movimiento fundamenta las determinaciones temporales. -Véase a este respecto Sec. c de este capítulo, "La medición temporal".

³ La aceleración es el cambio en la velocidad durante la unidad de tiempo, y puede ser positiva o negativa.

⁴ Véase arriba, Capítulo III, Sec. b.

⁵ Principia, pág. 10.

"The causes by which true and relative motions are distinguished, one from another, are the forces impressed upon bodies to generate motion. True motion is neither generated nor altered, but by some force impressed upon the body moved; but relative motion may be generated or altered without any force impressed upon the body. For it is sufficient only to impress some force on other bodies with which the former is compared, that by their giving way, that relation may be changed, in which the relative rest or motion of this other body did consist. Again, true motion suffers always some change from any force impressed upon the moving body; but relative motion does not necessarily undergo any change by such forces. For if the same forces are likewise impressed on those other bodies, with which the comparison is made, that the relative position may be preserved, then that condition will be preserved in which the relative motion consists. And therefore any relative

motion may be changed when the true motion remains unaltered, and the relative may be preserved when the true suffers some change. Thus true motion by no means consists in such relations."

⁶ Ibid, pág. 20.

"The motions of bodies included in a given space are the same among themselves, whether that space is at rest, or moves uniformly forwards in a right line without any circular motion."

⁷ Ibid, pág. 21.

"If bodies, moved in any manner among themselves, are urged in the direction of parallel lines by equal accelerative forces, they will all continue to move among themselves, after the same manner as if they had not been urged by those forces."

⁸ Para una discusión de los marcos de referencia en la física clásica, Véase A. d'Abro, op. cit., Capítulo X, "Classical Mechanics and the Newtonian Principle of Relativity", págs. 106-115. Para una discusión matemática de la relatividad newtoniana, Véase Philipp Frank, op. cit., Capítulo 5, Sec. 2., "Relativity in Newtonian Mechanics", págs. 124-126.

⁹ Principia, pág. 9

"A clear proof of this we have from the experiment of a ship; where all motions happen after the same manner, whether the ship is at rest, or is carried uniformly forwards in a right line."

¹⁰ Newton expone algunas de estas nociones en los Corolarios a las Leyes del Movimiento, pero la naturaleza euclídeana de la extensión y el concepto galileano de la aceleración se dan por entendidos.

¹¹ Principia, pág. 19.

"The common center of gravity of two or more bodies does not alter its state of motion or rest by the actions of the bodies among themselves; and therefore the common centre of gravity of all bodies acting upon each other (excluding external actions and impediments) is either at rest, or moves uniformly in a right line."

¹² Ibid, pág. 20.

"...the progressive motion, whether of one single body, or of a whole system of bodies, is always to be estimated from the motion of the centre of gravity."

¹³ Copérnico determinó el lugar de referencia espacial del sistema, y esto hizo posible una representación espacial mas simple que la tolemaica. Pero Copérnico no disponía de los datos empíricos suficientes para lograr la representación espacio-temporal correcta de las órbitas planetarias. Luego, Kepler aprovechó las observaciones de Tycho Brahe y logró la representación de las órbitas elípticas, de acuerdo con leyes espacio-temporales. Así pudo prescindir completamente de la concepción tolemaica y perfeccionó el enfoque copernicano del sistema. Sin embargo, no fue hasta que Newton logró deducir las leyes de Kepler de su teoría de la gravitación que la teoría copernicana adquirió contenido físico, en el sentido de que las órbitas de Kepler se explicaron como pertenecientes a un proceso mecánico. Desde este punto de vista, es fácil comprender por qué la teoría copernicana tardó tanto para ser aceptada generalmente.

¹⁴ Es decir, los tiempos de los respectivos movimientos relativos no transcurren relativamente entre sí en el sentido de que su suma equivaldría a la duración resultante de los movimientos. Al contrario, los movimientos relativos de la física newtoniana son simultáneos, de modo que tienen la misma duración.

¹⁵ A este respecto, Véase la exposición del desarrollo del principio de la composición de fuerzas en la estática, en Mach, op. cit., I, 3, págs. 39 ff.

¹⁶ Principia, pág. 14

"A body, acted on by two forces simultaneously, will describe the diagonal of a parallelogram in the same time as it would describe the sides by those forces separately."

Otro ejemplo muy claro de esta orientación se encuentra en la formulación galileana de los axiomas del movimiento uniforme. Axiomas I y II consideran la relación entre las distancias recorridas y los tiempos en el caso del mismo movimiento, de rapidez uniforme. Pero Axiomas III y IV consideran la relación entre la rapidez y la distancia durante el mismo intervalo del tiempo. Se nota que no queda incluido el caso de la relación entre la rapidez y el tiempo, cuando se trata de la misma distancia. Este caso se trata más tarde en las proposiciones, pero los propios axiomas reflejan la preferencia para considerar un mismo tiempo más bien que un mismo espacio. Es decir, hay una inclinación a inferir las variaciones temporales de las

espaciales. (Véase Galileo, op. cit., "Third Day", pág. 154.

17 Podría decirse que el tiempo relativo se determina a través del movimiento, éste entendido matemáticamente.

18 Esta interpretación de las magnitudes fundamentales de la física newtoniana fue advertida por Hegel. Véase G.W.F. Hegel, Fenomenología del espíritu, Parte A, "Conciencia", Capítulos II y III.

19 A este respecto, los empiristas de nuestros días suelen insistir en que las magnitudes de la dinámica, tales como 'fuerza' y 'energía', son meras construcciones conceptuales, sin significado físico en el sentido ontológico de expresar lo existente tal como es. Lo que no se advierte en esta interpretación es la necesidad de recurrir a concepciones cualitativas de las magnitudes físicas para poder enfocar los procesos en un marco espacio-temporal. Además, esta consideración se aplica al espacio y el tiempo mismos. Es evidente, por ejemplo, que los conceptos newtonianos de espacio y tiempo constituyen un conjunto de suposiciones respecto a las naturalezas de estos medios y su manera de relacionarse con los procesos. Así, es ilusorio considerar que, en el enfoque espacio-temporal de la naturaleza, sea posible prescindir de la conceptualización de la naturaleza de la existencia física. Que los conceptos sean únicamente aproximaciones, o aun equivocadas, es otra cuestión que se relaciona con el grado de validez de las teorías en que semejantes conceptos figuran.

Capítulo X

Algunas consideraciones respecto a la observación en la dinámica.

Ha sido una preocupación central del presente trabajo advertir la problemática newtoniana de la dependencia unilateral de la medición temporal en la espacial. El interés en este problema deriva de la posibilidad, que aparece con la física de nuestro siglo, de que sea necesario considerar que la medición espacial dependa recíprocamente de la temporal. Esta posibilidad se sugiere en torno a varias consideraciones. Por ejemplo, ha sido un descubrimiento fundamental de la física relativista que existen relaciones recíprocas entre los aspectos espaciales y temporales de los movimientos. Además, en la física cuántica, las propiedades ondulatorias de las partículas subatómicas hacen imposible considerar el aspecto espacial del movimiento independientemente del aspecto temporal. Por otra parte, en la práctica, el carácter temporal de las mediciones espaciales viene manifestándose cada vez más. Parece que la práctica de la medición espacio-temporal se encuentra en una etapa de transición, y parece probable que el desarrollo de la teoría no tardará mucho. Claro que semejante desarrollo tendría que surgir de la experiencia en los dominios de la física relativista y de la cuántica, de modo que, si resulta superada la unilateralidad de la teoría newtoniana, el carácter de esta superación no será algo que podría haber sido previsto desde el punto de vista newtoniano. Sin embargo, es de esperar que el análisis de la teoría newtoniana puede contribuir a aclarar el problema. Y, en este capítulo, mi intento es advertir algunas consideraciones que se presentan cuando la teoría newtoniana se considera desde un punto de vista actual.

a) El marco temporal para la medición espacial en la física clásica.

En la física clásica, el problema del marco temporal de la medición espacial es simplemente hacer presente, en forma sensible, el fluir temporal aproximadamente exacto, para poder medir la distancia recorrida por un cuerpo durante un intervalo especificado, pero la medición de la distancia espacial en cuestión se realiza en principio mediante medidas puramente espaciales. De hecho, el desarrollo de los relojes precisos durante los siglos del predominio de la física newtoniana hizo posible lograr en la práctica semejante marco temporal. Es decir, resultó posible especificar la duración de un movimiento como condición previa para medir la distancia correspondiente. Además, el

reloj preciso hizo posible repetir o variar los tiempos de los experimentos con exactitud aproximada.

Es importante reconocer que así se dió un auténtico paso adelante. Galileo, por ejemplo, no contaba con un marco temporal en este sentido. Sus primitivos relojes de agua para la medición de tiempos de corta duración no le aportaron más que la duración relativa de intervalos distintos. En sus experimentos concernientes a la caída de los cuerpos, se trataba de los tiempos correspondientes a algunos movimientos espaciales, y no de los movimientos espaciales correspondientes a cierto número de unidades del tiempo cuyo significado temporal fuera bien establecido para todos.⁽¹⁾ Fue posteriormente, con el desarrollo de los relojes mecánicos, que la medición temporal adquirió el carácter de un proceso de la medición con marco de referencia propio.

Es claro que podría advertirse que el reloj mismo, utilizado como marco temporal, manifiesta el tiempo espacialmente; pero esto no equivale a que el tiempo así manifestado sea simplemente una inferencia del aspecto espacial del reloj. Al contrario, el principio del reloj es que el espacio recorrido por las manecillas sea consecuente con el tiempo transcurrido. Es decir, los movimientos cíclicos del mecanismo interno del reloj controlan el movimiento espacial de las manecillas y determinan que éste tenga significado temporal. En los relojes precisos, la uniformidad temporal de los procesos internos del reloj se realiza con tal grado de exactitud que los movimientos de las manecillas vienen a ser medidas sensibles, muy exactas, del tiempo. El hecho de que estas medidas sensibles se manifiestan espacialmente es otro aspecto de la situación. Lo importante es que el significado temporal de las manifestaciones del reloj sean éstas lo que sean depende del proceso mecánico del reloj. Por lo tanto, señalar el carácter temporal inherente a los relojes no implica que sea menester mostrar que el tiempo se manifieste independientemente del espacio. Al contrario, el tiempo se manifiesta en el movimiento espacial de las manecillas justamente porque la uniformidad temporal del proceso del reloj fundamenta su significado temporal. Desde este punto de vista, los relojes precisos indudablemente constituyen un marco propiamente temporal que aporta las condiciones previas para hacer responder la medición del aspecto espacial de un movimiento a cierta duración especificada de éste. Y es sólo por esto que la física moderna cuenta con la posibilidad de la medición de la velocidad.

Se pone de relieve así que, en el plano teórico, la medición temporal no es reductible a la medición espacial. Siempre subsiste el carácter temporal irreductible del proceso mecánico que fundamenta el significado temporal de las manecillas que señalan el tiempo. Y, en el marco conceptual newtoniano, el problema de esta fundamentación sería lograr que el fluir temporal del reloj concordara con el tiempo corregido de la astronomía, en cuyo flujo se considera la concatenación de todos los procesos del universo. Así, una unidad temporal, tal como el segundo, el minuto, etc., debe tener la misma duración siempre y

dondequiera que se mida el tiempo. En la medida que cumplen con este requisito, los relojes precisos vienen a ser una aproximación a la métrica del tiempo verdadero newtoniano. A este respecto, el reloj preciso contiene un mecanismo para la corrección de la rapidez del transcurrir temporal manifestado, de modo que éste se ajuste a la duración, universalmente la misma, de las unidades del tiempo. Así, no es simplemente la cuestión de la uniformidad del fluir de este tiempo sensible, sino también de su razón de flujo. La duración de las unidades temporales no es indiferente. Las unidades serían 'arbitrarias' si se tratara de un solo reloj; pero una vez que el significado físico de dichas unidades de duración se define por su correspondencia a ciertos movimientos que ocurren en el dominio astronómico, y esta definición se acepta mundialmente, las unidades adquieren el carácter de medidas del tiempo universal, comunmente entendidas.(2)

El reloj que pone de manifiesto semejantes unidades tiene naturaleza propiamente temporal. Su temporalidad sensible proviene de su carácter de ser proceso mecánico, mientras que su exactitud depende de la corrección de su mecanismo a la luz de los conocimientos de la concatenación de los movimientos en el nivel astronómico. Así, en el enfoque newtoniano, este tiempo sensible de un reloj es un tiempo relativo, corregido.

Desde un punto de vista actual, el desarrollo de los relojes precisos ha tenido el resultado de que la medición temporal tenga un grado de exactitud comparable a la espacial. De modo que la explicación del margen del error en los casos respectivos no es tan obviamente una cuestión de una discrepancia entre las posibilidades de la experiencia espacial y temporal. La ciencia ya cuenta con el tiempo presente sensiblemente. Y, además, ha logrado definir las unidades espaciales y temporales de manera análoga, por la longitud de onda y por la frecuencia de las radiaciones atómicas.(3) Lo que es radicalmente nuevo aquí es la definición de una unidad espacial en función de un movimiento. Este paso también tuvo como antecedente el uso del año luz como unidad espacial. Ahora, la ciencia ha llegado a considerar tanto las unidades espaciales como las temporales pertenecientes a movimientos de carácter cíclico, cuyos aspectos espaciales y temporales son inseparables.

b. El problema de la medición espacial del movimiento.

Si consideramos un reloj corriente, no muy exacto, se puede ver fácilmente que su validez meramente aproximada se debe a que el proceso interno del reloj, que determina la manifestación espacial del tiempo, no puede suponerse ni enteramente uniforme ni bien ajustado al fluir temporal universal. El problema aquí no es la parte espacial de la manifestación del tiempo. Al contrario, la espacialidad constituye su aspecto exacto. Para Newton, el espacio sí es medible exactamente porque su métrica verdadera está presente en la extensión sensible. Si fuera

cuestión únicamente de que el tiempo se manifiesta espacialmente, no surgiría ninguna dificultad. Lo que pasa en el enfoque newtoniano es que la necesidad de referir el tiempo al espacio es justamente lo que hace factible medir el tiempo con la exactitud correspondiente a la exactitud del mecanismo del reloj. Es decir, en el aspecto espacial de esta medición, se establece un marco de referencia espacial en estado de reposo con respecto al espacio en cuestión, de modo que se establecen condiciones espaciales estáticas para practicar la medición espacial haciendo abstracción del tiempo. Esto es lo que caracteriza la medición espacial, considerada como independiente del tiempo.

En general, la medición espacial, con medidas puramente espaciales, presupone condiciones estáticas para la medición de distancias; y es evidente que la cosa no puede ser de otra manera si la medición espacial es independiente del tiempo, que se manifiesta dinámicamente en el movimiento. Por otra parte, es justamente la suposición de que la medición espacial se practique con abstracción del tiempo lo que constituye el fundamento de la dependencia unilateral de la medición temporal de la espacial. Es decir, si la medición espacial dependiese a su vez de consideraciones temporales, la dependencia sería recíproca. De esta manera, cuando hacemos explícito que la exclusión de consideraciones temporales necesariamente implica condiciones estáticas, resulta que la dependencia unilateral de la medición temporal en la espacial necesariamente implica que la medición espacial sea practicada bajo condiciones estáticas.

Pareciera que la noción de la posibilidad de observar los aspectos espaciales de los procesos físicos en su independencia del tiempo es una de esas ideas tradicionales que se encuentran incorporadas en la física newtoniana y que resultaron útiles en dicha física, pero cuyo carácter conceptual proviene de la herencia de la física estática. De hecho, es fácil advertir el carácter meramente práctico de esta idea. Por ejemplo, consideremos el caso de la medición de una distancia espacial, sin que se trate de un movimiento. Podría tratarse de una distancia de limitada en la superficie de la tierra y enfocada con respecto a un marco de referencia conectado rígidamente con la tierra. Esto sería un caso de condiciones estáticas. Sin embargo, es muy discutible que la medición de dicha longitud se explique teóricamente sin tomar en cuenta el tiempo. Porque siempre se necesita dar por entendida, o la instantaneidad de la medición y la presencia simultánea de toda la extensión en sus dimensiones exactas, o bien, la perduración temporal de la extensión en cuestión durante el proceso de la medición. Así, por mucho que hacer abstracción del tiempo puede ser un método factible y útil, este método siempre presupone que el transcurso del tiempo no trae aparejado cambio alguno en las condiciones para la medición espacial. Teóricamente, lo más que se puede decir es que se trata de un caso particular de la observación espaciotemporal en el cual el tiempo no afecta la observación. Pero, debido a que la medición misma es un proceso, los aspectos temporales de la situación física están presentes, no obstante que no sean perturbantes. Y, en principio, es posible que sean perturbantes, puesto que la medición no es nunca instantánea. Se

trata, entonces, de un método que hace abstracción del tiempo.

Cuando este método se extiende a la medición de la distancia de un movimiento, se presenta la siguiente consideración: el aspecto temporal del movimiento no influirá en la situación de la medición espacial únicamente en el caso en que los cambios de posición espacial del cuerpo en movimiento tiendan a ser nulos durante el proceso de la medición. Bajo esta condición, lo único que se puede hacer es determinar la localización espacial del cuerpo en movimiento en varias posiciones a lo largo de su trayectoria, de modo que la propia medición de las distancias entre dichas posiciones puede practicarse en la situación estática del espacio del marco de referencia. Entonces, lo que se mide aquí no es el movimiento espacial, sino una distancia perteneciente al propio marco de referencia. Volveremos a este tema en la sección siguiente.

Es del mayor interés notar aquí que las relaciones implicadas en este caso de la medición puramente espacial no pueden invertirse sin salir del marco conceptual de la física newtoniana. Es decir, si intentamos concebir el caso recíproco en que el aspecto espacial no influiría en la medición temporal, podemos hacer la formulación análoga que los cambios de posición temporal de una partícula, a través de una distancia espacial, tienden a ser nulos. Esto no tiene sentido en el marco conceptual clásico. Sin embargo, tiene sentido en el marco de las nociones relativistas. En efecto, nos hallamos en presencia de la concepción relativista de la relación espacio-tiempo, en el caso límite de la velocidad de la luz. Se consigue así inesperadamente una indicación de que las condiciones recíprocas a las de la medición puramente espacial nos conducen a la relación clave de las transformaciones relativistas. Sería imposible para mí intentar interpretar este resultado; pero me parece muy interesante porque sugiere que 'el dibujo estático' de la física relativista tiene cierto parentesco con la estática tradicional.

c. El desarrollo del significado físico de los datos espaciotemporales en la física moderna.

Pareciera que el uso de los marcos de referencia espaciotemporales implicara condiciones que se aproximarían a ser estáticas. La medición del movimiento consiste, primero, en determinar posiciones espaciales en instantes correspondientes, y luego, en medir las distancias e intervalos entre las posiciones así determinadas. Por lo tanto, la medición del movimiento se caracteriza por registrar, o por recibir la proyección, de un acontecimiento dinámico en un marco aproximadamente estático en cuanto a su aspecto espacial. En esta situación, se presentan dos problemas diferentes. Por una parte, tenemos el problema de la relación entre la medición espacial y temporal de las distancias y los intervalos pertenecientes al propio marco.

Por otra parte, surge el problema del significado físico de los datos conseguidos; y parece evidente que éste depende de modo fundamental de la relación entre el marco y el movimiento observado. Es decir, el marco es espacio-temporal. Se caracteriza por cierta métrica espacial y cierta razón de flujo temporal, y, además, por otras propiedades, como la continuidad, que son implícitas en la propia relación entre el proceso mecánico y el espacio del reloj. Desde este punto de vista, un marco espacio-temporal -y, de modo peculiar, un reloj- manifiesta las relaciones entre los aspectos espaciales y temporales de cierto tipo de proceso. Entonces, se presenta la cuestión de si las propiedades y relaciones espaciales y temporales del movimiento observado son equivalentes a las del marco de referencia. Si no lo son, surge el problema de inferir el carácter del movimiento observado a partir de los datos registrados en el marco. Este problema se entiende en la física actual bajo la noción de 'transformaciones'.

El desarrollo de la física moderna, de la clásica a la relativista, manifiesta el primer desarrollo de la concepción de semejante inferencia. La teoría de la relatividad puso a descubierto que las magnitudes relativas de las distancias e intervalos proyectados por un movimiento en un marco depende de la velocidad relativa del marco. Desde este enfoque el interés se concentra en los datos diferentes que se consiguen mediante la observación del mismo movimiento desde marcos diferentes, y el problema de la transformación es demostrar cómo los datos diferentes constituyen descripciones equivalentes de un mismo movimiento observado.

También hay otra manera posible de considerar el problema de inferir el significado físico de los datos. Puede considerarse que el proceso, al que el movimiento observado pertenece, no manifiesta la continuidad de su existencia espacio-temporal de la misma manera como los cuerpos macroscópicos, cuyo movimiento de traslación es continuo y, además, puede representarse por una trayectoria lineal continua. Si el proceso observado tiene otro carácter espacio-temporal, es concebible, por ejemplo, que manifieste la espacialidad y temporalidad continuas mediante otros cambios que cambios de posición, de modo que éstas no podrían interpretarse como pertenecientes a movimientos continuos de traslación.

Esta posibilidad especulativa se advierte como un ejemplo de que sea posible concebir que, aun tratándose de un movimiento observado desde un sólo marco, la interpretación de los datos puede variar, según la concepción del movimiento observado. Se trataría así de la variación en la manera cómo procesos diferentes se proyectarían en nuestros marcos de referencia. Además, no parece que esta posibilidad especulativa debería ser rechazada de antemano, porque la situación en la física cuántica sugiere fuertemente la necesidad de formular transformaciones más radicales que las relativistas, para poder interpretar las proyecciones de los procesos cuánticos en nuestros marcos. Por lo tanto, es de interés volver a considerar la teoría newtoniana, interpretándola como la teoría que aportó el punto de

partida para la concepción del significado de los datos espacio-temporales respecto a los cambios de posición.

Para Newton, el espacio y el tiempo constituyen dos continuos, existentes independientemente de los cuerpos materiales y también entre sí. Además, un cuerpo en movimiento se concibe en existencia continua, dotado de un estado dinámico que cambia de manera continua.(4) Así, la trayectoria lineal de una partícula se concibe como continua en el sentido de que, en todo instante, la partícula tiene una posición espacial perteneciente a una serie continua de posiciones, y, en todo instante correspondiente a toda posición, posee un estado dinámico perteneciente a una serie continua de estados dinámicos.(5) Resulta entonces que, si las condiciones iniciales en un instante dado se conocen, y si se conocen también las leyes del proceso al que el movimiento de la partícula pertenece, los estados dinámicos y las posiciones espaciales correspondientes pueden predecirse para instantes futuros especificados. Esto es el principio clásico de la causalidad según el criterio posicional, que constituye el marco conceptual para la observación en la física newtoniana.

Es claro que se trata aquí de una pluralidad de continuos coexistentes -paralelos, por así decir. Tenemos la trayectoria espacio-temporal y el cambiante estado dinámico de la partícula, ambos enfocables continuamente. Dentro de la pluralidad de los tres continuos, se forma una dualidad: la trayectoria espacio-temporal y los estados dinámicos de la materia. Entonces, esto constituye la expresión del dualismo newtoniano de la materia sensible y los medios no-materiales. Tenemos aquí los dos aspectos distintos pero correspondientes de la existencia de una partícula: por una parte, como la materia extensa y perdurable, que ocupa lugares en el espacio y el tiempo; y, por otra parte, como masa en movimiento, dotada de estado dinámico. Por lo tanto, la posición espacio-temporal viene a ser propiedad continua de una masa en movimiento, de igual manera como el estado dinámico. Son propiedades distintas y continuamente coexistentes. En este esquema, se trata de una relación entre la trayectoria y el estado dinámico de un cuerpo en movimiento que hace posible inferir un aspecto del otro en cualquier momento dado, puesto que cada uno de los dos aspectos existe continuamente y ambos se conjugan entre sí por las leyes del movimiento. Dada esta concepción, la comprobación empírica de las predicciones de las posiciones comprueba la continuidad de la trayectoria.

Este es el esquema newtoniano que ha venido a determinar la concepción de la existencia física en el 'sentido común' en la época moderna. Y, en realidad, es únicamente la experiencia de los procesos atómicos y las partículas subatómicas la que la pone en duda de manera radical. Porque, por mucho que la física relativista ofrezca gran novedad conceptual, no implica un cambio fundamental en la relación que está en cuestión aquí. Lo que pasa en dicha teoría es que, por una parte, el espacio y el tiempo se conjugan como los componentes variables y complementarios del continuo tetra-dimensional, espacio-tiempo. Por

otra parte, las propiedades dinámicas se conjugan entre sí en lo que se refiere a sus inter-relaciones y transformaciones mutuas. Además, la física relativista demuestra que las magnitudes dinámicas determinan la estructura interna del continuo espacio-tiempo, de modo que las propiedades de los continuos no son independientes. Sin embargo, la coexistencia de los dos aspectos -el espacio-temporal y el dinámico-, cada uno de ellos concebido como continuo, no entra en duda. (6) Y esto es lo que explica que la observación sigue fundamentándose en la posibilidad de la comprobación empírica de la continuidad de la trayectoria, en el marco conceptual de la causalidad según el criterio de posición. Es en este sentido que la física relativista no rompe con la tradición newtoniana. Y así se conserva también la metodología de la inferencia recíproca entre los datos de posición y de los estados dinámicos.

En cambio, en el caso de los procesos cuánticos, es justamente la correspondencia precisa entre los dos aspectos lo que no se ha podido confirmar empíricamente. Al contrario, parece que existe un límite de la precisión de la correspondencia entre ellos. Y, en esta situación, se plantea el problema del significado físico de los datos espacio-temporales. Porque, si se insiste en extrapolar a este nivel la misma concepción del significado de los datos de posición que sirve a la física clásica y, con modificaciones, a la relativista, entonces parece posible considerar que se trata de una discrepancia fundamental entre la naturaleza de dichos procesos y el carácter del marco conceptual en el cual se los interpretan.

Para que este planteamiento del problema sea comprensible, es necesario recordar que, ya para Newton, el espacio y el tiempo no son un mero trasfondo del universo físico, sino una parte integrante de él. Guardan relaciones cuantitativas con la materia en movimiento. Esto es el carácter más radical de la dinámica moderna. Es lo que fundamenta la posibilidad de predicciones comprobables por la observación espacio-temporal. Y, una vez admitida la noción de que el espacio y el tiempo constituyen un aspecto de los procesos físicos, no puede haber en principio ninguna objeción -por 'intuitiva' que sea- para considerar que existan procesos en los que las propiedades de posición sean más íntimamente relacionadas con las dinámicas que lo son en la física newtoniana. Al contrario, es de esperar que, a medida que la física progresa, el conocimiento de las relaciones entre la materia, el espacio y el tiempo se profundizará. Y, en efecto, la física relativista ya apunta hacia cierto tipo de desarrollo conceptual para enfocar semejante desarrollo teórico.

A primera vista, pareciera que, por su confirmación del determinismo clásico, la teoría de la relatividad ha servido para reforzar los cimientos de la dualidad newtoniana del espacio y el tiempo no-materiales, y los cuerpos materiales. (7) Pero esto sería una caracterización muy incompleta. Porque, en realidad, la física relativista ha ido en la dirección de disminuir la independencia entre sí de los continuos de propiedades manejadas por la física clásica. Y, al mismo tiempo, este paso

relativista llevó la física a un nivel de mayor generalidad. Entonces, como consideración especulativa, si esta tendencia va a seguir desarrollándose, la dualidad que todavía subsiste en la física relativista también podría modificarse o quizás aun desaparecer en el próximo paso teórico.(8) Y esto podría traer aparejado que, en vez de la correspondencia precisa y continua entre ciertas propiedades, se tratara de transformaciones mutuas entre ellas. En efecto, no hay ninguna razón a priori para considerar que la correspondencia continua entre la posición espacio-temporal y el estado dinámico sea un principio imprescindible de las leyes mecánicas. Lo que es imprescindible como principio metodológico es saber interpretar los cambios de posición que se proyectan en nuestros marcos de referencia. Y, en último término, el significado físico de semejantes datos deriva del modo de la integración de los aspectos espacio-temporales de los procesos tal como ésta se expresa cuantitativamente en las relaciones establecidas por una teoría física.

Desde este punto de vista, el intento en este trabajo ha sido analizar la estructura de la teoría newtoniana que fundamenta el significado newtoniano de los datos espacio-temporales. Las especulaciones contenidas en este último capítulo bien pueden ser equivocadas. Pero al menos pueden servir para indicar que no existe fundamento adecuado para concluir que, con el descubrimiento del nivel cuántico, la física ha llegado al límite de los conocimientos espacio-temporales precisos de la naturaleza.

Notas. Capítulo X.

- ¹ En realidad, la exactitud de las medidas espaciales también tenía carácter limitado en los tiempos de Galileo. Sin embargo, la medición espacial ha contado desde la antigüedad con unidades aceptadas, tal como el cúbito, y además con métodos geométricos para determinar distancias relativas. En la medición temporal, también desde la antigüedad, el año, el mes, etc., han sido determinados mediante la observación astronómica. Pero el problema práctico en el caso del tiempo siempre ha sido hacer presentes unidades temporales pequeñas y reproducibles, en una forma utilizable por la ciencia experimental.
- ² Claro que las unidades se establecen por el acuerdo entre los científicos y, en este sentido, son convencionales, como cualquier medida.
- ³ Por una decisión de la Undécima Conferencia General sobre Pesas y Medidas, celebrada a fines de 1960 en París, el metro se define como un múltiplo de la longitud de onda de la luz emitida por el átomo Krypton 86. Luego, en octubre de 1964, la misma organización aceptó una definición provisional del segundo en términos de una frecuencia asociada con el átomo de cesio.
- ⁴ Por el estado dinámico en la física del propio Newton, se entiende primariamente la cantidad de movimiento. Las magnitudes que determinan esta propiedad son la masa -concebida como inmutable en un caso dado- y la velocidad.
- ⁵ Como fundamento de su física, Newton logró demostrar que toda la masa de un cuerpo esférico -por ejemplo, de la tierra- puede ser atribuida a su punto central, por lo cual dicho punto puede considerarse como el centro de fuerza gravitacional; y resulta que la trayectoria lineal del mismo punto central puede considerarse como correspondiente al continuo de los estados dinámicos del cuerpo en cuestión.
- ⁶ Esta suposición se encuentra implícita en la concepción del continuo, espacio-tiempo. Una exposición de este concepto, que es de interés especial aquí, se encuentra en la cita a continuación, tomada de The Evolution of Physics, de Albert Einstein y Leopold Infeld:
- "...the classical physicist splits the four-dimensional continua into the three-dimensional spaces and the one-dimensional time-continuum. The old physicist bothers only

about space transformation, as time is absolute for him. He finds the splitting of the four-dimensional world-continuum into space and time natural and convenient. But from the point of view of the relativity theory, time as well as space is changed by passing from one Coordinate System to another, and the Lorentz transformation considers the transformation properties of the four-dimensional time-space continuum of our four dimensional world of events.

"The world of events can be described dynamically by a picture changing in time and thrown onto the background of the three-dimensional space. But it can also be described by a static picture thrown onto the background of a four-dimensional time-space continuum. From the point of view of classical physics the two pictures, the dynamic and the static, are equivalent. But from the point of view of the relativity theory the static picture is the more convenient and the more objective."

(Cambridge Univ. Press, 1961, pág. 208)

⁷ El problema de la dualidad de lo material y lo no-material en la física moderna es una preocupación central de la obra citada en la nota anterior, The Evolution of Physics de Einstein e Infeld.

⁸ Esta posibilidad se sugiere en el análisis de la física cuántica hecho por Eli de Gortari, quien propone que se considere que los procesos cuánticos pueden entenderse en términos de un solo continuo. Se concibe que dicho continuo se caracteriza por la conservación de una magnitud compleja: espacio-tiempo-cantidad de movimiento- energía; y esta magnitud se concibe como continua. -Véase Eli de Gortari, Dialéctica de la física, Colección "Problemas Científicos y Filosóficos", UNAM, 1964. Este libro reúne cinco artículos que se publicaron en Diánoia (UNAM) entre 1957 y 1962.

EPÍLOGO

Una vez emprendido el presente trabajo, empezó a seguir camino propio, por así decir. Mi intención original había sido tratar el desarrollo de la conceptualización de espacio y tiempo de Newton a Kant, pero no resultó así. Pues el interés intrínseco cada vez mayor, de la problemática newtoniana, me condujo a hacer un trabajo que responde al problema científico de la conceptualización de espacio y tiempo en la física dinámica.

He intentado analizar la respuesta newtoniana al problema, inherente a la física moderna, de concebir cómo el espacio y el tiempo constituyen componentes integrantes de los procesos físicos. Además, ha resultado posible señalar, en el caso de la física newtoniana, la relación íntima entre este problema y el del significado físico atribuido a los datos de la observación espacio-temporal. De esta manera, el análisis de la teoría newtoniana de espacio y tiempo nos conduce a considerar la estructura lógica, implícita en la física newtoniana, de la explicación física de los datos espacio-temporales. Y me parece que dicha estructura lógica de la explicación newtoniana tiene validez general, independientemente del contenido de sus conceptos de espacio y tiempo. Es decir, me parece que dicha estructura newtoniana de la explicación puede ser usada como modelo de criterio para la interpretación física de los datos espacio-temporales en el marco de una teoría de la dinámica.

A la luz de la teoría newtoniana, el propio problema del significado físico de los datos espacio-temporales se aclara. Podemos suponer que, debido a la existencia de las propiedades espacio-temporales de los objetos que se relacionan entre sí en los procesos físicos, resulta factible para el observador humano enfocar los procesos desde los marcos de referencia espacio-temporales. Pero el significado físico que el científico atribuye a los datos espacio-temporales así conseguidos no se le da en la observación misma. Dicho significado es una inferencia hecha dentro del marco de una teoría que ha de tener cierta estructura. Es decir, lo que se puede inferir, de tales datos, respecto a los procesos existentes se fundamenta por una teoría que establece un conjunto de relaciones entre las propiedades espacio-temporales y las demás propiedades determinantes de los procesos en el dominio de la teoría, de modo que las manifestaciones espacio-temporales de dichos procesos se explican como consecuencias de dichas relaciones.

Esta estructura, que se ha advertido en el caso de la teoría newtoniana, tiene la apariencia de ser tan simple y evidente que sería absurdo insistir en ella. Pero me parece que la tendencia a ignorar la importancia fundamental de esta estructura de la explicación física ha contribuido a impedir el desarrollo conceptual de la física cuántica.

En la actualidad, la física cuántica tiene el problema medular de explicar las manifestaciones espacio-temporales, de apariencia contradictorias, de las partículas subatómicas. Desde el punto de vista sostenido aquí, la dificultad teórica consiste en comprender cómo las manifestaciones de los procesos cuánticos derivan del modo de existir espacial y temporal de dichas partículas. Para lograr una teoría cuántica que tuviere la estructura que se ha advertido en el caso de la mecánica newtoniana, el problema sería descubrir el modo de la integración en los procesos cuánticos de las propiedades espacio-temporales de las partículas, porque esto es lo que determina las manifestaciones observadas desde nuestros marcos de referencia. Entonces, sería el descubrimiento de cómo las magnitudes espacio-temporales, que figuran en dichos procesos, se relacionan con las demás magnitudes determinantes de estos procesos lo que suministraría el marco teórico dentro del cual los datos se explicarían como consecuentes entre sí y adquirirían significado físico. Pero hasta ahora, es evidente que no se ha logrado tal teoría, en el marco del cual los datos adquieren un significado físico, aceptado por todos.

En realidad, el problema de la física cuántica puede calificarse como problema típico de la física. Se trata de descubrir las relaciones que rigen entre las magnitudes determinantes de algunos procesos, antes desconocidos, para poder explicar sus manifestaciones espacio-temporales. En este caso, dichas manifestaciones tienen rasgos peculiares que plantean problema difícil, pero la dificultad del problema no puede fundamentar la inferencia de que es problema único e insoluble. Como conclusión sacada del estudio de la teoría newtoniana, puede advertirse que no es legítimo considerar que, en el caso de los procesos estudiados por la física clásica, el comportamiento espacio-temporal de estos procesos medianos se nos dió en la simple observación como algo 'inteligible', pero que esto no ocurre en el caso de los procesos subatómicos. Al contrario, el análisis realizado aquí ha demostrado que la explicación del comportamiento espacio-temporal de los procesos en el dominio de la física newtoniana tiene fundamento teórico complicadísimo. La verdad es que la explicación newtoniana de los procesos medianos fue la culminación del esfuerzo intelectual de siglos.

Por otra parte, es muy importante tener presente que, hasta ahora, ninguna explicación del comportamiento espacio-temporal de los procesos físicos ha sido del todo satisfactoria. La física newtoniana no pudo resolver el problema radical de la acción a distancia, y cuando la física relativista aportó cierta resolución de aquel problema, la física cuántica ya estaba en desarrollo, planteando problemas nuevos. Considerar a la época de la física clásica como a 'the good old days', cuando la naturaleza se comportó de modo 'inteligible' en el espacio y el tiempo, sería poner la historia de la ciencia física en una perspectiva muy falsa. El hecho es que la duda filosófica respecto al espacio y el tiempo newtonianos subsistió a lo largo de la época de la física clásica, de modo que no es posible considerar que la conceptualización mecanicista de la naturaleza, que derivó de la física de Newton, fuera 'inteligible', por excelencia.

Desde el punto de vista actual, puede considerarse que los conceptos newtonianos de espacio y tiempo responden al comportamiento espacio-temporal de los objetos en el dominio de la teoría newtoniana. Pero ahora, con el descubrimiento de un nivel más elemental de la existencia física, y en el cual el comportamiento espacio-temporal de los procesos parece ser radicalmente distinto del de los procesos medianos, es posible considerar que en este nivel el modo de existir espacial y temporal de las partículas subatómicas pone de manifiesto el espacio y el tiempo físicos de modo más elemental. Entonces, surge la posibilidad de que, una teoría de espacio y tiempo que respondiere al comportamiento de las partículas subatómicas podría resultar más fundamental y acertada que las teorías formuladas hasta ahora. Tal teoría tendría que responder al modo de la integración de las magnitudes espacio-temporales en el conjunto de las relaciones determinantes de los procesos cuánticos. Es decir, el espacio y el tiempo físicos tendrían que concebirse de tal manera que dichos conceptos sirvieran de fundamento, o ground, de las magnitudes espacio-temporales que entran en dicho conjunto de relaciones. Y así, el significado físico de los datos espacio-temporales, proyectados en nuestros marcos de referencia, podría inferirse en el marco de esas relaciones, como algo que sucede efectivamente en aquel espacio y aquel tiempo. (Y, desde luego, sería necesario demostrar que tal explicación del nivel cuántico resulta compatible con las explicaciones de los otros niveles de la existencia física.)

Mi intención no es especular acerca del conjunto de relaciones que determinan los procesos cuánticos. Lo que interesa aquí es la suposición metodológica de que las manifestaciones del nivel cuántico son explicables (tarde o temprano) en el marco de un sistema de relaciones que expresan el modo de existir espacial y temporal de las partículas subatómicas. Entonces, si aceptamos la concepción implicada aquí, de la estructura de la explicación -estructura implícita en la física newtoniana-, esto nos obliga a someter a la crítica el contenido de la teoría newtoniana de espacio y tiempo que tiende a persistir en la actualidad. Porque este contenido respondió al comportamiento de los objetos en el nivel mediano de la existencia física, y, además, conservaba elementos de una herencia antigua que no tenían que modificarse en la física clásica. En este tipo de crítica, el interés recae sobre ciertas nociones persistentes, tratadas con algo de detalle en este trabajo, que evidentemente no pueden servir para expresar el modo de existir de las partículas subatómicas. Y puesto que dichas nociones tienen carácter especulativo, su persistencia se apoya o en creencias tradicionales o en su utilidad dentro del sistema newtoniano. Pero si consideramos que, para justificar la extrapolación de tales nociones al nivel cuántico, debe demostrarse al menos su compatibilidad con las relaciones que caracterizan dicho nivel, resulta patente que, en algunos casos, semejante extrapolación no puede justificarse. De esta manera, me parece posible señalar algunas concepciones estorbantes, que impiden el desarrollo de conceptos nuevos que respondieren a las exigencias de la física cuántica. Me limito aquí a indicar dos casos importantes.

Me refiero a algunas suposiciones de la teoría newtoniana que no han sido criticadas desde el punto de vista relativista. Sobre todo, resulta patente que dicha teoría encierra una discrepancia fundamental entre las propiedades espaciales y temporales de la materia. Para Newton, la materia, por su propio modo de existir, pone de manifiesto la métrica espacial, pero no pone de manifiesto así la verdadera métrica temporal. Empero, en el caso de las partículas subatómicas, es justamente su comportamiento dinámico espacial y temporal análogo lo que las distingue de las partículas inertes (y puramente especulativas) de Newton. Para Newton, la materia no tiene naturaleza temporal en el sentido de configurarse temporalmente. En cambio, la partícula subatómica, cuya existencia ha sido confirmada empíricamente, sí se configura en el tiempo. Además, en su aspecto ondulatorio, se configura a la vez espacial y temporalmente en el movimiento, de modo tal que estos dos aspectos de la configuración dinámica de la partícula son inseparables entre sí. Por lo tanto, resulta posible considerar que, en el nivel cuántico, el espacio y el tiempo métricos se manifiestan conjuntamente por el propio modo de existir de la partícula. Así, en este nivel, surge la posibilidad de romper tanto con la tradición respecto a la inaccesibilidad peculiar del tiempo como con la necesidad de considerar una relación unilateral entre la medición espacial y la medición temporal. Como ya se ha advertido, la práctica de la medición ya va en dirección de aprovechar estas oportunidades. Desde un punto de vista teórico, quizás podría decirse que, por primera vez en la historia de la física, se ofrece la posibilidad de resolver el problema de la discrepancia entre la espacialidad y la temporalidad de la materia, que caracteriza tan radicalmente a la teoría newtoniana.

Por otra parte, el concepto newtoniano de posición sin magnitud resulta problemático aun en el marco de la física clásica. Entonces, si la correspondencia, con precisión ilimitada, entre la posición espacio-temporal de una partícula y el estado dinámico de ésta es problemática aun en el caso del corpusculo newtoniano, resulta problemático en general que tal correspondencia tenga que considerarse como característica imprescindible de toda ley causal de la mecánica. Al contrario, pareciera que la pura localización idealizada de una partícula en un punto debe distinguirse de la posición dentro de la relación entre la posición y el estado dinámico de la partícula, de modo que la definición de posición dentro de dicha relación adquiera su contenido en función de la naturaleza espacio-temporal de los procesos en cuestión.

Se sugiere así un aspecto específico de la consideración general de que la explicación de las manifestaciones espacio-temporales de los procesos es un componente de la explicación de los procesos mismos. En este caso, para tener un concepto de posición, aplicable a un proceso dado, es menester que dicho concepto sea expresivo del modo de la posición de relacionarse con el estado dinámico en dicho proceso. Así, del mismo modo que la distancia relativista adquiere contenido propio, es evidente que el concepto cuántico de posición debe adquirirlo también.

En resumen, la utilidad actual del estudio analítico de la teoría newtoniana de espacio y tiempo es que tal estudio puede precisar el carácter de la herencia conceptual que ya se ha constituido en estorbo para la conceptualización del modo de existir espacial y temporal de las partículas subatómicas. Al mismo tiempo, se pone de manifiesto que la teoría newtoniana, debido a su admirable coherencia lógica y conceptual, sirve de modelo de la estructura de la explicación física de los datos espacio-temporales en el marco de una teoría de la dinámica. Es más. La teoría newtoniana es la teoría que estableció dicha estructura lógica, que fundamenta la posibilidad de comprobar una teoría física mediante la observación espacio-temporal. Pero esta estructura no puede caracterizarse exclusivamente en términos lógicos. Porque implica que los aspectos espacio-temporales de los procesos son tan reales como los demás aspectos. En los movimientos observables, se manifiesta esa parte del proceso dinámico mismo que es medible. Es únicamente por ser partes -es decir, componentes integrantes- de los procesos mismos, que las manifestaciones medidas pueden servir para confirmar las teorías que establecen los sistemas de relaciones determinantes de los procesos.

APÉNDICE

Selecciones de las obras de

ISAAC NEWTON

Apéndice

Nota de explicación

Los textos newtonianos incluidos en este Apéndice fueron seleccionados por su importancia en relación con los temas centrales del presente trabajo. Mi criterio para la selección era reunir un grupo de textos que se complementan entre sí, para hacer asequible al lector, con la mayor brevedad posible, las ideas fundamentales de Newton con respecto a dichos temas. Resulta, entonces, que no se incluyen aquí todos los textos newtonianos que se refieren a los temas en cuestión. Por ejemplo, el lector que conoce las obras de Newton quizás se extrañará por la omisión del 'Scholium general' de los Principia. En efecto, he dejado fuera este texto tan conocido y, en vez de él, he incluido algunas selecciones de la Óptica en las que se consideran varios de los mismos problemas que se tratan también en el 'Scholium general'.

Las selecciones de la Óptica tienen un interés muy especial. En ellas se encuentra la reflexión madura de Newton sobre algunos problemas que le habían preocupado durante toda su vida de científico. Así, la Óptica termina con una serie de 'Preguntas'. Lejos de considerar que sus teorías hayan resuelto todos los problemas centrales de la física, Newton plantea, en estas 'preguntas', problemas importantes que no ha podido resolver. Reconoce la necesidad de reconciliar ciertas de sus nociones acerca de la luz, que suponen la existencia de un éter, con su propia mecánica, en el cual el éter queda excluido de consideración. A lo largo de su vida, Newton buscaba la manera de incorporar el éter, como componente físico, al proceso de la gravitación. Aceptó como hipótesis de trabajo la existencia posible de un éter raro, de masa inapreciable, en los espacios no absolutamente vacíos, sino 'libres'. (Cap. II, Sec. c, #2.) Y puesto que la noción empírica de los 'espacios libres' de

Newton generalmente tiende a perderse de vista, he considerado importante incluir aquí los textos suficientes para aclarar el problema al que dicha noción respondió.

Los textos de la Óptica se tradujeron directamente de la versión original en inglés. En cambio, las traducciones de los textos de los Principia no son directas del original en latín. He utilizado la aceptada versión inglesa de Florian Cajori que, a su vez, es una versión modernizada de la traducción de Andrew Motte (1729). Pero hay que señalar que la versión de Cajori conserva el lenguaje y el estilo característicos del siglo XVII, y esto influye en que las traducciones literales, que se ofrecen aquí, a menudo tengan un carácter extraño para el lector de nuestros días. En todo caso, las traducciones son estrictamente literales. Sólo en unas pocas ocasiones, he introducido entre paréntesis, una palabra que no aparece en el texto original, para facilitar la comprensión del texto.

Finalmente, quisiera advertir que, cuando Newton escribió en inglés, siguió la costumbre de la época de poner las substantivas importantes con mayúscula, y he conservado esta característica del texto original de la Óptica.

J.S.

REGLAS DEL RAZONAMIENTO EN LA FILOSOFÍA¹

Regla I.

No debemos admitir más causas de las cosas naturales que tales que son tanto verdaderas como suficientes para explicar las apariencias de éstas.

A este propósito, los filósofos dicen que la Naturaleza no hace nada en vano, y más es en vano cuando menos servirá; ya que la Naturaleza se complace con la simplicidad y no pretende a la pompa de causas superfluas.

Regla II.

Por ende, a los mismos efectos naturales debemos, al grado posible, asignar las mismas causas.

En cuanto a la respiración en un hombre y en una fiera; el descenso de piedras en Europa y en América; la luz de nuestra lumbre culinaria y la del sol; la reflexión de la luz en la tierra, y en los planetas.

¹ Este famoso texto de las 'Reglas' de Newton, que se reproduce aquí en su integridad, aparece como la introducción al Libro III de Principios matemáticos de la filosofía natural. Es de interés notar que esta exposición del método inductivo aparece en el Libro III, que consiste en la exposición de la teoría de la gravitación como la teoría que explica los movimientos de los cuerpos en el sistema solar. La traducción se ha basado en la versión inglesa de Cajori (Véase la bibliografía), págs. 398-400. (Nota de T.)

Regla III.

Las cualidades de los cuerpos, que no admiten ni la intensificación ni la disminución de grado, y que se encuentran pertenecientes a todos los cuerpos dentro del alcance de nuestros experimentos, deben estimarse como las cualidades universales de todos los cuerpos, cualesquier que sean.

Porque, puesto que las cualidades de los cuerpos nos son conocidas únicamente por los experimentos, debemos considerar como universales todas las que concuerdan universalmente con los experimentos; y las que no admiten la disminución no pueden jamás ser del todo quitadas. Ciertamente, no debemos renunciar a la evidencia de los experimentos por amor a los sueños y las ficciones vanas de nuestra propia invención; ni debemos alejarnos de la analogía de la Naturaleza, que suele ser simple, y siempre consecuente con sí misma. No conocemos la extensión de los cuerpos de otro modo que por nuestros sentidos, y éstos no la alcanzan en todos los cuerpos; pero, puesto que percibimos la extensión en todos los cuerpos que son sensibles, entonces la atribuimos universalmente a todos los demás también. Que una abundancia de cuerpos son duros, lo aprendemos por la experiencia; y, puesto que la dureza del todo proviene de la dureza de las partes, entonces inferimos legítimamente la dureza de las partículas indivisas no sólo de los cuerpos que tocamos sino de todos los demás. Que todos los cuerpos son impenetrables, lo sacamos no de la razón sino de la sensación. Los cuerpos que nosotros manejamos los encontramos impenetrables, y de aquí concluimos que la impenetrabilidad es una propiedad universal de todos los cuerpos, cualesquier que sean. Que todos los cuerpos son móviles y dotados de ciertos poderes (que llamamos la inercia) de persistir en su movimiento, o en su reposo, lo inferimos únicamente de las propiedades semejantes observadas en los cuerpos que hemos visto. La extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad, y la inercia del todo, resultan de la extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad, y la inercia de las partes; y de aquí concluimos que las partículas más pequeñas de todos los cuerpos también son todas ellas extensas, y duras e impenetrables, y móviles, y dotadas con su inercia apropiada. Y esto es el fundamento de toda la filosofía. Además, que las partículas divisas pero contiguas de los cuerpos pueden ser separadas la una de la otra, es cosa de la observación; y, en las partículas que subsisten indivisas, nuestras mentes pueden distinguir a partes aun menores, como se demuestra matemáticamente. Pero, la cuestión de si las partes así distinguidas, y to devía no divididas, pueden, por los poderes de la Naturaleza, ser divididas y separadas la una de la otra efectivamente, no podemos determinar con certeza. Sin embargo, si tuviéramos la comprobación por un sólo experimento de que, con romper un cuerpo duro y sólido, alguna partícula indivisa sufriera división, podríamos, por virtud de la presente regla, concluir que tanto las partículas indivisas como las divisas pueden ser divididas y separadas efectivamente al infinito.

Finalmente, si se parece universalmente, mediante los experimentos y observaciones astronómicas, que todos los cuerpos en los alrededores de la tierra gravitan hacia la tierra, y esto en proporción a la cantidad de materia que contienen respectivamente; que asimismo la luna, según la cantidad de su materia, gravita hacia la tierra; que, por otra parte, nuestra mar gravita hacia la luna; y todos los planetas, el uno hacia el otro; y los cometas, de igual manera, hacia el sol; debemos, en consecuencia de la presente regla, conceder de modo universal que todos los cuerpos, cualesquier que sean, son dotados con un principio de la gravitación mutua. Pues el argumento desde las apariencias concluye con más fuerza para la gravitación universal de todos los cuerpos que para su impenetrabilidad; de la cual no tenemos experimentos algunos, ni modo alguno de observación, entre los cuerpos en las regiones celestes. No es que yo afirmo que la gravedad sea esencial a los cuerpos: por su vis insita no quiero decir nada más que su inercia. Esta es inmutable. Su gravedad se disminuye a medida que se alejan de la tierra.

Regla IV.

En la filosofía experimental, debemos considerar las proposiciones inferidas por inducción general de los fenómenos como exactamente o casi verdaderas, a pesar de cualesquiera hipótesis contrarias que se imaginen, hasta cuando ocurran otros fenómenos por los cuales aquéllas pueden hacerse o más exactas o sujetas a excepciones.

Debemos cumplir con esta regla, para que el argumento de la inducción no sea eludido por hipótesis.

Selecciones de las

DEFINICIONES

de Principios matemáticos de la filosofía natural

por Isaac Newton

con el texto completo del Scholium de las Definiciones. ¹

Definición I

La cantidad de materia es la medida de ésta, proveniente de su densidad y volumen conjuntamente.

Así, aire de una doble densidad, en un espacio doble, es cuádruple en cantidad....Lo mismo debe ser entendido de nieve, y de tierra finamente pulverizada o de polvos, que son condensados por la compresión o la licuefacción, y de todos los cuerpos que por causas cualesquiera son distintamente condensados. En este lugar no tcmo en cuenta un medio, si es que existe tal cosa, que se difunde libremente por los intersticios entre las partes de los cuerpos. Ésta es la cantidad a la que me refiero, de aquí en adelante y dondequiera, bajo el nombre de cuerpo o masa. Y ésta se conoce por el peso de cada cuerpo, porque es proporcional al peso, según como yo he encontrado mediante experimentos con péndulos, realizados con mucha precisión.....

¹ El Scholium de las Definiciones es el texto fundamental en que Newton expone sus conceptos de tiempo, espacio, lugar y movimiento. La traducción se basa en la versión inglesa de Cajó ri (Véase la Bibliografía), págs. 1-12, incl. (Nota de T.)

Definición II

La cantidad de movimiento es la medida de éste, proveniente de la velocidad y la cantidad de materia conjuntamente.

El movimiento del todo (the whole) es la suma de los movimientos de todas las partes; y, por lo tanto, en un cuerpo doble de cantidad, con velocidad igual, el movimiento es doble; con velocidad doble, (el movimiento) es cuádruple.

Definición III

La vis insita, o fuerza innata de la materia, es un poder de resistir, por el cual todo cuerpo, según su contenido de aquella, persiste en su estado actual, sea éste de reposo, o de mover uniformemente hacia adelante en línea recta.

Esta fuerza siempre es proporcional al cuerpo cuya fuerza la es, y no difiere en nada de la inactividad de la masa, sino en nuestra manera de concebirla. Por la naturaleza inerte de la materia, un cuerpo no se saca sin dificultad de su estado de reposo o movimiento. Por lo cual, esta vis insita puede, con un nombre muy significativo, llamarse inercia (vis inertiae) o fuerza de inactividad. Pero un cuerpo ejerce esta fuerza únicamente cuando otra fuerza, impuesta a él, intenta cambiar su condición; y el ejercicio de esta fuerza puede considerarse tanto como resistencia como impulso; es resistencia en cuanto el cuerpo, para mantener su estado actual, se oponga a la fuerza impuesta; es impulso en cuanto el cuerpo, por no ceder fácilmente a la fuerza impuesta de otro, se esfuerce (endeavors) por cambiar el estado de ese otro. La resistencia generalmente se atribuye a los cuerpos en reposo (at rest), y el impulso a los cuerpos en movimiento; pero el movimiento y el reposo, como se conciben comunmente, no se distinguen sino relativamente; ni siempre están verdaderamente en reposo esos cuerpos que comunmente son así considerados.

Definición IV

Una fuerza impuesta es una acción ejercida a un cuerpo, para cambiar su estado o de reposo o de movimiento uniforme en línea recta.

Esta fuerza consiste únicamente en la acción, y no se que da más tiempo en el cuerpo cuando la acción ha terminado. Ya que un cuerpo conserva cada estado nuevo que adquiere, solamente por su inercia. Pero las fuerzas impuestas son de orígenes diferentes, tal como la percusión, la presión, la fuerza centrípeta.

Definición V ¹

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

.....;

Definición VI

La cantidad absoluta de una fuerza centrípeta es la medida de ésta, proporcional a la eficacia de la causa que la propaga desde el centro, por los espacios en los alrededores.

Así la fuerza magnética es mayor en la una piedra imán y menos en la otra, según sus tamaños y la fortaleza de su intensidad.

¹ Se omite aquí el texto de esta larga definición en la cual se expone detalladamente cómo la fuerza de la gravitación afecta las trayectorias de los cuerpos. (Nota de T.)

Definición VII

La cantidad aceleradora de una fuerza centrípeta es la medida de ésta, proporcional a la velocidad que engendra en un tiempo especificado.(1)

Así la fuerza de la misma piedra imán es mayor a una distancia menor, y menos a una (distancia) mayor; además, la fuerza de la gravedad es mayor en los valles, y menos en las cimas de las montañas extremadamente altas; y aun menos... a distancias mayores del cuerpo de la tierra; pero a distancias iguales, es la misma en todas partes; porque (quitando, o tomando en cuenta la resistencia del aire), acelera igualmente todos los cuerpos que caen, sean éstos pesados o ligeros, grandes o pequeños.

Definición VIII

La cantidad motora de una fuerza centrípeta es la medida de ésta, proporcional al movimiento que engendra en un tiempo especificado.

Así el peso es mayor en un cuerpo mayor, menos en un cuerpo menor; y, en el mismo cuerpo, es mayor cerca a la tierra, y menos a distancias más remotas. Esta suerte de cantidad es la centripetencia (centripetency), o propensión del cuerpo entero hacia el centro, o, como puedo decir, su peso; y siempre es conocido por la cantidad de una fuerza igual y contraria, exactamente suficiente para impedir el descenso del cuerpo.

Por consideración a la brevedad, podemos llamar estas cantidades de fuerza por los nombres de fuerzas motoras, aceleradoras, y absolutas; y, por consideración a la distinción, considerarlas con respecto a los cuerpos que tienden hacia el centro, los lugares de dichos cuerpos, y el centro de fuerza hacia el cual (los cuerpos) tienden; es decir, yo refiero la fuerza motora al cuerpo como un esfuerzo y una propensión del todo (the whole) hacia un centro, proveniente de las propensiones de las sendas partes en su conjunto; la fuerza aceleradora al lugar del cuerpo, como un cierto poder, difundido desde el centro a todos los lugares circundantes, para mover los cuerpos que están en estos (lugares); y la fuerza absoluta al

(1) Es decir, durante una unidad de tiempo. (Nota de T.)

centro, como dotado de alguna causa, sin la cual dichas fuerzas motoras no serían propagadas por los espacios en los alrededores; sea aquella causa algún cuerpo central (como la es el imán en el centro de la fuerza magnética, o la tierra en el centro de la fuerza gravitacional), u otra cosa cualquiera que todavía no se manifiesta. Pues aquí yo solamente proyecto dar una noción matemática de esas fuerzas, sin considerar sus causas físicas y orígenes (seats).

.....

En el mismo sentido, también llamo aceleradores y motores las atracciones y los impulsos; y uso promiscua e indiferentemente, la una por la otra, las palabras atracción, impulso, o propensión de suerte cualquiera hacia un centro; no considero esas fuerzas físicamente, sino matemáticamente; por lo cual el lector no debe imaginar que, por aquellas palabras, yo me empeño (take upon me) por definir la clase o el modo de una acción, las causas o la razón física de ésta, o que yo atribuya fuerzas, en un sentido verdadero y físico, a ciertos centros (que no son sino puntos matemáticos); cuando ocurra en alguna ocasión que yo hablo de centros como atrayentes, o como dotados de poderes atractivos.

S C H O L I U M

Hasta ahora he asentado las definiciones de tales palabras que son menos conocidas, y he explicado el sentido en que yo quisiera que se las entiendan en el discurso a continuación. No defino tiempo, espacio, lugar, y movimiento, que son bien conocidas por todos. Sólo que tengo que hacer notar que la gente común no concibe dichas cantidades bajo ningunas otras nociones que las de las relaciones que ellas guardan con los objetos sensibles. Y de aquí provienen ciertos prejuicios, para cuya eliminación será conveniente distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y comunes.

I. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, de por sí y por su propia naturaleza, fluye uniformemente (equably) sin relación a ninguna cosa externa, y por otro nombre se llama duración: el tiempo relativo, aparente y común es alguna medida sensible y externa (sea esta exacta o irregular) de la duración por medio del movimiento, la cual se usa comunmente en lugar del tiempo verdadero; tal como una hora, un día, un mes, un año.

II. El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin relación a ninguna cosa externa, permanece siempre el mismo e inmóvil. El espacio relativo es alguna dimensión o medida, móvil, de los espacios absolutos; la cual nuestros sentidos determinan por la posición de ella en relación con los cuerpos; y la que comunmente se toma como el espacio inmóvil; tal es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo, o celeste, determinado por su posición con respecto a la tierra. El espacio absoluto y el espacio relativo son iguales de figura y magnitud; pero no permanecen siempre iguales numéricamente. Pues, si la tierra, por ejemplo, se mueve, entonces un espacio de nuestro aire, el que relativamente y con respecto a la tierra permanece siempre el mismo, será en un tiempo una parte del espacio absoluto en el cual el aire entra; en otro tiempo será otra parte de él, y así, entendido absolutamente, será continuamente cambiado.

III. Lugar es una parte del espacio que un cuerpo ocupa y, según el espacio, es absoluto o relativo. Digo, una parte del espacio; no la situación ni la superficie externa del cuerpo. Ya que los lugares de los sólidos iguales son siempre iguales; pero las superficies de éstos, por sus figuras disímiles, son a menudo desiguales. Propiamente (dicha), posiciones no tienen magnitud (quantity),⁽¹⁾ ni son tanto los lugares mismos,

(1) En inglés, "Positions properly have no quantity...." (Nota de T.)

sino las propiedades de lugares. El movimiento del todo es el mismo como la suma de los movimientos de las partes; es decir, la traslación del todo (the whole) fuera de su lugar es la misma cosa como la suma de las traslaciones de las partes fuera de sus lugares; y, por lo tanto, el lugar del todo es el mismo como la suma de los lugares de las partes, y por esa razón es interno y en el cuerpo entero.

IV. El movimiento absoluto es la traslación de un cuerpo desde un lugar absoluto al otro; y el movimiento relativo es la traslación desde un lugar relativo al otro. Así, en un barco que se hace a la vela, el lugar relativo de un cuerpo es aquella parte del barco que el cuerpo posee; o sea, aquella parte de la cavidad que el cuerpo llena, y que consiguientemente se mueve junto con el barco; y el reposo relativo es la permanencia del cuerpo en la misma parte del barco, o de su cavidad. Pero el reposo absoluto real es la permanencia del cuerpo en la misma parte de aquel espacio inmóvil en el cual se mueve el propio barco, su cavidad, y todo lo que ésta contiene. Por lo cual, si la tierra está realmente en reposo, entonces el cuerpo, que descansa relativamente en el barco, se moverá real y absolutamente con la misma velocidad que tiene el barco sobre la tierra. Pero si la tierra también se mueve, el movimiento verdadero y absoluto del cuerpo provendrá en parte del movimiento verdadero de la tierra en el espacio inmóvil, en parte del movimiento relativo del barco sobre la tierra; y si el cuerpo también se mueve relativamente en el barco, su movimiento verdadero provendrá, en parte del movimiento verdadero de la tierra en el espacio inmóvil, y en parte de los movimientos relativos tanto del barco sobre la tierra como del cuerpo en el barco; y de estos movimientos relativos provendrá el movimiento relativo del cuerpo sobre la tierra. Y si aquella parte de la tierra, donde está el barco, se moviera verdaderamente hacia el este con una velocidad de 10010 unidades (parts); mientras que el barco mismo, con un viento fresco y a toda vela, es llevado hacia el oeste con una velocidad expresada por 10 de dichas unidades; pero un marinero camina en el barco hacia el este con 1 unidad de la velocidad dicha; entonces el marinero se moverá verdaderamente en el espacio inmóvil hacia el este con una velocidad de 10001 unidades, y relativamente sobre la tierra hacia el oeste con una velocidad de 9 de aquellas unidades.

El tiempo absoluto, en la astronomía, se distingue del relativo, por la igualación (equation) o la corrección del tiempo aparente. Pues, los días naturales son verdaderamente desiguales, aunque comunmente se las consideran como iguales, y se las usan como medida del tiempo; los astrónomos corrigen esta desigualdad para que puedan medir los movimientos celestes por un tiempo más exacto. Puede que no exista tal cosa como un movimiento uniforme, por medio del cual el tiempo pueda medirse exactamente. Todos los movimientos pueden ser acelerados y retardados, pero el fluir del tiempo absoluto no es susceptible de ningún cambio. La duración o persistencia de la existencia de las cosas permanece la misma, sean los

movimientos rápidos o lentos, o nulos: y, por consiguiente, esta duración debe distinguirse de las duraciones que no son sino medidas sensibles de ella; y de las cuales deducimos aquella por medio de la igualación astronómica (astronomical equation). La necesidad de esta igualación, para determinar los tiempos de un fenómeno, se manifiesta tanto por los experimentos con el reloj de péndulo como por los eclipses de los satélites de Júpiter.

Tal como el orden de las partes del tiempo es inmutable, así también es el orden de las partes del espacio. Si se supiere que las partes sean trasladadas fuera de sus lugares, serán trasladadas (si es que se permita la expresión) fuera de sí mismas. Ya que los tiempos y los espacios son, por así decir, los lugares tanto de sí mismos como de todas las demás cosas. Todas las cosas son colocadas en el tiempo en cuanto al orden de sucesión; y en el espacio en cuanto al orden de situación. Es por su esencia o naturaleza que son lugares; y, el que los lugares primarios de las cosas sean móviles es absurdo. Por consiguiente, estos son los lugares absolutos; y las traslaciones desde estos lugares son los únicos movimientos absolutos.

Pero, puesto que las partes del espacio no pueden ser vistas ni distinguidas la una de la otra por nuestros sentidos, por consiguiente, en su vez usamos medidas sensibles de ellas. Pues, por las posiciones y las distancias de las cosas con respecto a (from) algún cuerpo considerado como inmóvil, definimos todos los lugares; y, luego, con respecto a tales lugares, calculamos (estimate) todos los movimientos, considerando los cuerpos como transferidos desde algunos de dichos lugares a otros. Y así, en vez de los lugares y movimientos absolutos, usamos los (que son) relativos; y eso sin ninguna inconveniencia en asuntos comunes; pero en las disquisiciones filosóficas, debemos abstraer de nuestros sentidos y considerar las cosas mismas, a diferencia de cuales sean únicamente medidas sensibles de ellas. Pues puede ser que no existe ningún cuerpo, (que esté) realmente en reposo, al que pueden referirse los lugares y los movimientos de otros.

Pero podemos distinguir el reposo y el movimiento absolutos y relativos, el uno del otro, por sus propiedades, causas, y efectos. Es una propiedad del reposo que los cuerpos realmente en reposo sí reposan, el uno con respecto al otro. Y así, como es posible que en las regiones remotas de las estrellas fijas, o quizás mucho más allá de ellas, puede que haya algún cuerpo en reposo absoluto; pero (puesto que es) imposible saber, por las posiciones entre sí de los cuerpos en nuestras regiones, si algunos de éstos sí se quedan en la misma posición relativa a aquel cuerpo remoto, se sigue que el reposo absoluto no puede determinarse por medio de las posiciones de los cuerpos en nuestras regiones.

Es una propiedad del movimiento que las partes, que se mantienen en posiciones dadas respecto a sus todos, sí comparten el movimiento de dichos todos. Ya que todas las partes de los cuerpos que giran se esfuerzan por alejarse del eje del

movimiento; y el ímpetu de los cuerpos que se mueven hacia adelante proviene del ímpetu en conjunto de todas las partes. Por lo tanto, si los cuerpos circunvecinos se mueven, aquéllos que están relativamente en reposo dentro de ellos compartirán el movimiento de ellos. Por lo cual, el movimiento verdadero y absoluto de un cuerpo no puede determinarse por su traslación respecto a (from) aquéllos que solamente parecen reposar; ya que los cuerpos externos deberían no sólo aparentar estar en reposo sino estar realmente en reposo. Porque, por otra parte, todos los cuerpos comprendidos, además de trasladarse alejándose de los circunvecinos, también comparten los movimientos verdaderos de éstos; y aun si no ocurriera dicha traslación, no estarían realmente en reposo, sino únicamente lo aparentarían. Porque los cuerpos circunvecinos guardan con los circundados la misma relación como la parte exterior de un todo guarda con el interior, o como la cáscara guarda con la simiente (kernel); mas si la cáscara se mueve, entonces la simiente, como es una parte del todo, se moverá también, sin ningún alejamiento de la cáscara.

Una propiedad que tiene parentesco con la anterior es ésta, que si un lugar se mueve, todo lo que se encuentra colocado en él se mueve junto con él; y, por lo tanto, un cuerpo que se mueve desde un lugar en movimiento, comparte también el movimiento de su lugar. Por lo cual, todos los movimientos desde lugares en movimiento no son sino las partes de movimientos enteros y absolutos; y todo movimiento entero se compone del movimiento del cuerpo fuera de su primer lugar, y el movimiento de este lugar fuera de su lugar; y así sucesivamente hasta que lleguemos a algún lugar inmóvil, como en el ejemplo del marinerero, mencionado anteriormente. Por lo cual, los movimientos enteros y absolutos no pueden determinarse de otro modo si no por lugares inmóviles; y por esta razón, ya antes he referido los movimientos absolutos a lugares inmóviles, pero los relativos a lugares móviles. Ahora bien, ningunos otros lugares son inmóviles salvo aquéllos que, de infinidad a infinidad, mantienen todos ellos la misma posición dada entre sí; y por esto deben permanecer siempre sin moverse; y, de ese modo, constituyen el espacio inmóvil.

Las causas por las cuales los movimientos verdaderos y relativos se distinguen entre sí, son las fuerzas impuestas a los cuerpos para engendrar el movimiento. El movimiento verdadero ni se engendra ni se altera, sino por alguna fuerza impuesta al cuerpo movido; pero el movimiento relativo puede engendrarse o alterarse sin que fuerza alguna sea impuesta al cuerpo. Pues es suficiente solamente imponer alguna fuerza en otros cuerpos con los cuales el primero se compara, de modo que, con ceder lugar aquéllos, puede cambiarse esa relación en la cual consistió el reposo relativo o movimiento relativo de éste. Por otra parte, el movimiento verdadero siempre sufre algún cambio por una fuerza cualquiera impuesta al cuerpo en movimiento; pero el movimiento relativo no experimenta necesariamente cambio alguno por tales fuerzas. Porque, si las mismas fuerzas también son impuestas de igual manera a los otros cuerpos con los cuales se hace la comparación, de modo que se

consERVE la posición relativa, entonces, se conservará la condición en la cual el movimiento relativo consiste. Y, por lo tanto, cualquier movimiento relativo puede ser cambiado mientras que el movimiento verdadero permanezca sin alteración, y el relativo puede conservarse mientras que el verdadero sufra algún cambio. Así, el movimiento verdadero de ninguna manera consiste en tales relaciones.

Los efectos que distinguen el movimiento absoluto del relativo son las fuerzas de retroceder del eje del movimiento circular. Pues no existen tales fuerzas en un movimiento circular puramente relativo; pero, en un movimiento circular verdadero y absoluto, son mayores o menores según la cantidad del movimiento. Si una cubeta (vessel), (1) tendida por una cuerda larga, se voltea tantas veces que la cuerda resulte fuertemente torcida, y luego se la llena con agua y se la mantiene en estado de reposo con todo y agua; luego, por la acción repentina de otra fuerza, se le da vuelta en sentido contrario, y mientras que la cuerda se destuerce, la cubeta persiste durante algún tiempo en este movimiento; al principio la superficie del agua estará lisa, tal como antes de que la cubeta empezó a mover; pero luego, por medio de comunicar su movimiento al agua gradualmente, la cubeta hará que el agua empiece sensiblemente a girar, y a retroceder poco a poco del centro, y a ascender los lados de la cubeta, formándose en una figura cóncava (como yo he experimentado), y lo más rápido el movimiento llegue a ser, lo más alto ascenderá el agua, hasta que al fin, realizando sus revoluciones en los mismos tiempos como la cubeta, el agua viene a ser relativamente en reposo en ella. Este ascenso del agua muestra su esfuerzo por retroceder del eje de su movimiento; y el movimiento circular verdadero y absoluto del agua, que aquí es directamente contrario al (movimiento) relativo, llega a ser conocido, y puede medirse por dicho esfuerzo. Al principio, cuando el movimiento relativo del agua en la cubeta era lo mayor, no produjo ningún esfuerzo por retroceder del eje; el agua no manifestaba ninguna tendencia a la circunferencia, ni ningún ascenso para con los lados de la cubeta, sino que su superficie permanecía lisa y, por lo tanto, su movimiento circular verdadero no había empezado todavía. Pero después, cuando el movimiento relativo de la cubeta se había disminuido, el ascenso del agua para con los lados de la cubeta comprobó su esfuerzo por retroceder del eje; y este esfuerzo mostraba el movimiento circular real del agua aumentando continuamente, hasta que había adquirido su magnitud mayor, cuando el agua descansaba relativamente en la cubeta. Y por lo tanto, este esfuerzo no depende en ninguna traslación del agua con respecto a los cuerpos circundantes, ni puede definirse el movimiento circular verdadero por tal traslación.

(1) Se traduce vessel por cubeta, puesto que este famoso experimento se llama generalmente, 'the bucket experiment', o 'el experimento de la cubeta'. (Nota de T.)

No existe sino un solo movimiento circular real de algún cuerpo individual que gira, correspondiente a un solo poder para esforzarse por retroceder del eje del movimiento, como su efecto apropiado y adecuado; pero los movimientos relativos en un mismo cuerpo son innumerables, según las relaciones diferentes que éste guarda con cuerpos externos, y, como otras relaciones, (éstas) son enteramente carecientes de algún efecto real, a excepción de que quizás compartan aquel único movimiento verdadero. Y por consiguiente, en su sistema (de) quienes suponen que nuestros cielos (heavens), girando debajo de la esfera de las estrellas fijas, llevan los planetas junto con ellos; las varias partes de dichos cielos y los planetas, que sí están relativamente en reposo en sus cielos, sin embargo se mueven realmente. Ya que cambian su posición entre sí (cosa que nunca ocurre con cuerpos que están verdaderamente en reposo) y, llevados junto con sus cielos, comparten los movimientos de éstos y, como partes de todos que giran, se esfuerzan por retroceder del eje de sus movimientos.

Por lo cual las cantidades relativas no son las cantidades mismas, cuyos nombres se les dan (whose names they bear), sino (son) aquellas medidas sensibles (o exactas o inexactas) de éstas, que se usan comunmente en vez de las cantidades mismas medidas. Y si el significado de las palabras debe determinarse por su uso, entonces por los nombres tiempo, espacio, lugar y movimiento, deben entenderse apropiadamente sus medidas sensibles; y la expresión será desacostumbrada y puramente matemática si significa las cantidades mismas medidas. Por lo cual, quienes interpretan dichas palabras como por las cantidades medidas, perjudican la exactitud del lenguaje, que debe conservarse preciso. Y ellos no menos corrompen la pureza de las verdades matemáticas y filosóficas, quienes confunden las cantidades reales con sus relaciones y medidas sensibles.

En realidad, es cosa de mayor dificultad descubrir y distinguir efectivamente los movimientos verdaderos de los cuerpos particulares de los (movimientos) aparentes; porque las partes de ese espacio inmóvil, en el cual se realizan aquellos movimientos, de ninguna manera admiten (come under) la observación por nuestros sentidos. Sin embargo, la cosa no es del todo desesperada, pues tenemos para guiarnos algunos argumentos, en parte provenientes de los movimientos aparentes, que son las diferencias entre los movimientos verdaderos; en parte provenientes de las fuerzas, que son las causas y efectos de los movimientos verdaderos. Por ejemplo, si dos globos, mantenidos a una distancia dada entre sí por medio de una cuerda que los conecta, fueren girados alrededor de su centro de gravedad común, entonces por la tensión de la cuerda pudiéramos descubrir el esfuerzo de los globos por retroceder del eje de su movimiento, y de esto pudiéramos calcular la cantidad de sus movimientos circulares. Y luego, si algunas fuerzas iguales se impusieren a la vez a las caras alternativas de los globos para aumentar o disminuir sus movimientos circulares, entonces por el aumento o la disminución en la tensión de la cuerda, pudiéramos inferir el incremento o el decrecimiento de sus movimientos; y, por esto, lo sería descubierto, a cuáles caras

deberían imponerse dichas fuerzas, para que los movimientos de los globos fueren más aumentados; es decir, pudiéremos descubrir sus caras postreras, o sea, las que siguen en el movimiento circular. Pero (ya) conocidas las caras que siguen y, por consiguiente, las opuestas que preceden, también conociéremos la determinación de sus movimientos. Y así pudiéremos averiguar tanto la cantidad como la determinación de este movimiento circular, aun en un vacuo enorme en donde no habría nada externo ni sensible con el cual los globos podrían ser comparados. Pero ahora, si en aquel espacio se colocaran algunos cuerpos remotos que siempre mantuvieron una posición dada entre sí, como lo hacen las estrellas fijas en nuestras regiones, en realidad, por la traslación relativa de los globos entre dichos cuerpos no podríamos determinar si el movimiento pertenecía a los globos o a los cuerpos. Pero si observáramos la cuerda y encontráramos que su tensión fuera justamente esa tensión requerida por los movimientos de los globos, podríamos concluir que el movimiento estaba en los globos y que los cuerpos estaban en reposo; y luego, finalmente, por la traslación de los globos entre los cuerpos, encontraríamos la determinación de sus movimientos. Pero cómo podemos obtener los movimientos verdaderos a partir de sus causas, efectos, y diferencias aparentes, y a la inversa, se explicará más ampliamente en el tratado a continuación. Pues fue a este fin que lo redacté.

AXIOMAS, o LEYES DEL MOVIMIENTO

y Selecciones de sus Corolarios ¹

de Principios matemáticos de la filosofía natural

por Isaac Newton

LEY I

Cada cuerpo continúa en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar dicho estado por fuerzas impuestas a él.

Los proyectiles continúan en sus movimientos, en cuanto no sean retardados por la resistencia del aire, o impulsados hacia abajo por la fuerza de gravedad. Un trompo, cuyas partes por su cohesión son continuamente desviadas de movimientos rectilíneos, no cesa de girar a menos que sea retardado por el aire. Los cuerpos mayores de los planetas y cometas, encontrándose con menos resistencia en espacios más libres, conservan sus movimientos, tanto progresivos como circulares, durante un tiempo mucho más largo.

¹ Las tres Leyes del Movimiento y sus Corolarios I, IV, V y VI son incluidos aquí en su integridad. Las demostraciones de los Corolarios II y III han sido omitidas. El texto utilizado por la traducción se encuentra en la versión inglesa de Cajori, edición citada, págs. 13-21. (Nota de T.)

LEY II

El cambio en el movimiento es proporcional a la fuerza motora impuesta; y se hace en el sentido (direction) ¹ de la línea recta en el cual dicha fuerza es impuesta.

Si alguna fuerza engendra un movimiento, una fuerza doble engendrará lo doble del movimiento, una fuerza triple (engendrará) lo triple del movimiento, ya sea que dicha fuerza sea impuesta toda a la vez, o gradual y sucesivamente. Y este movimiento (que siempre es dirigido lo mismo como la fuerza generadora), si el cuerpo se movía antes, se suma al o se resta del movimiento anterior, según como (los movimientos) directamente conspiran entre sí, o son directamente contrarios entre sí; o unidos oblicuamente, cuando son oblicuos, para producir un movimiento nuevo, compuesto de las determinaciones de ambos.

LEY III

A toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual: o, las acciones mútuas de dos cuerpos, el uno sobre el otro, siempre son iguales y dirigidas a partes contrarias.

Una cosa cualquiera que tira de otra cosa o la presiona, es tanto tirada o presionada por esa otra. Si usted presiona una piedra con su dedo, el dedo es también presionado por la piedra. Si un caballo tira de una piedra, amarrada por una cuerda, entonces el caballo (si es que se permita decirlo así) será igualmente tirado atrás hacia la piedra; ya que la cuerda estirada, con el mismo esfuerzo por relajarse o volverse flexible (to unbend itself), tanto tirará del caballo hacia la piedra como de la piedra hacia el caballo, y obstruirá el progreso del uno tanto como adelanta el del otro. Si un cuerpo choca contra otro, y por su fuerza cambia el movimiento de este otro, entonces aquel cuerpo también (por la igualdad de la presión mútua), en su propio movimiento sufrirá un cambio igual hacia la parte contraria. Los cambios realizados por dichas acciones son iguales, no en las velocidades sino en los movimientos de los cuerpos; es decir, si los cuerpos no son estorbados por algunos otros impedimentos. Pues, a causa de que

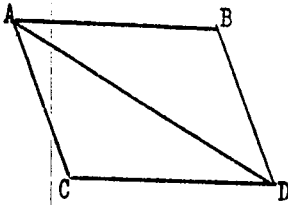
¹ En inglés, cuando la palabra direction se aplica a una línea, significa el sentido de la línea más bien que la localización de la línea como tal, con sus dos sentidos. (Nota de T.)

los movimientos son igualmente cambiados, los cambios hacia partes contrarias realizados en las velocidades son inversamente proporcionales a los cuerpos. Esta ley rige (takes place) también para las atracciones, como se comprobará en el próximo Scholium.

Corolario I

Un cuerpo, sobre el cual dos fuerzas actúan simultáneamente, describirá el diagonal de un paralelogramo en el mismo tiempo en que describiría los lados por dichas fuerzas separadamente.

Si en un tiempo dado, un cuerpo, por la fuerza M impuesta separadamente en el lugar A, sería llevado con un movimiento uniforme desde A a B, y por la fuerza N impuesta separadamente en el mismo lugar sería llevado desde A a C, (entonces) que se complete el paralelogramo ABCD, y, por ambas fuerzas actuando en conjunto, (el cuerpo) será llevado en el diagonal desde A a D en el mismo tiempo. Porque, puesto que la fuerza N actúa en el sentido de la línea AC, paralelo con BD, esta fuerza (por la segunda Ley) de ninguna manera alterará la velocidad engendrada por la otra fuerza M, por la cual el cuerpo es llevado hacia la línea BD. Por consiguiente, el cuerpo llegará a la línea BD



en el mismo tiempo, sea o no que se le imponga la fuerza N; y, por consiguiente, al fin de dicho tiempo, se le encontrará en alguna parte de la línea BD. Por el mismo argumento, al fin del mismo tiempo se le encontrará en alguna parte de la línea CD. Por consiguiente, se le encontrará en el punto D, donde ambas líneas se encuentran. Pero se moverá en línea recta desde A a D, por la Ley I.

Corolario II

Y de aquí se explica la composición de alguna (any one) fuerza directa AD, de algunas dos fuerzas oblicuas AC y CD; y, al contrario, la resolución de alguna fuerza directa AD en dos fuerzas oblicuas AC y CD: las cuales -la composición y la resolución- son confirmadas abundantemente por la mecánica.

.....

Corolario III

La cantidad de movimiento, que es obtenido por medio de tomar la suma de los movimientos dirigidos hacia las mismas partes, y la diferencia de los que se dirigen a partes contrarias, no sufre cambio alguno por la acción de los cuerpos entre sí.

.....

Corolario IV

El centro común de gravedad de dos o más cuerpos no altera su estado de movimiento o reposo por las acciones de los cuerpos entre sí; y por consiguiente, el centro común de gravedad de todos los cuerpos que actúan el uno sobre el otro (excluyendo acciones e impedimentos externos) o está en reposo, o se mueve uniformemente en línea recta.

Porque, si dos puntos proceden con movimiento uniforme en líneas rectas, y su distancia es dividida en cierta proporción, el punto divisorio o estará en reposo o procederá uniformemente en línea recta. Esto es demostrado más adelante en Lem. XXIII y (su) Corolario, cuando los puntos son movidos en el mismo plano; y por un modo semejante de argumentar, esto puede ser demostrado cuando los puntos no son movidos en el mismo plano. Por consiguiente, si cualquier número de cuerpos se mueven uniformemente en líneas rectas, el centro común de gravedad de cualquier par (any two) de ellos o está en reposo, o procede uniformemente en línea recta; porque la línea que conecta los centros de esos dos cuerpos, que se mueven así, es dividida por ese centro común en cierta proporción. De modo semejante, el centro común de estos dos y del de un tercer cuerpo o estará en reposo o moviéndose uniformemente en línea recta; porque, por ese centro la distancia entre el centro común de los dos cuerpos y el centro de este último es dividida en cierta proporción. De modo semejante, el centro común de estos tres cuerpos y de un cuarto cuerpo o está en reposo o se mueve uniformemente en línea recta; porque la distancia entre el centro común de los tres cuerpos y el centro del cuarto es también dividida allí en cierta proporción, y así in infinitum. Por lo tanto, en un sistema de cuerpos en donde no se encuentra ni acción mútua alguna entre ellos mismos ni alguna fuerza ajena (foreign) impuesta a ellos desde fuera, y que por consecuencia se mueve uniformemente en líneas rectas, el centro común de gravedad de todos ellos o está en reposo o se mueve uniformemente hacia adelante en línea recta.

Además, en un sistema de dos cuerpos que actúan el uno sobre el otro, puesto que las distancias entre sus centros y el centro común de gravedad de ambos son recíprocamente como los cuerpos, los movimientos relativos de dichos cuerpos, ya sea de acercarse a dicho centro o de retrocederse de ello, serán iguales entre sí. Por lo tanto, puesto que los cambios que ocurren en los movimientos son iguales y dirigidos a partes contrarias, el centro común de dichos cuerpos, por su acción mutua entre sí, ni es acelerado ni retardado, ni sufre cambio alguno en cuanto a su estado de movimiento o reposo. Pero en un sistema de varios cuerpos, puesto que el centro común de gravedad de algunos dos que actúan el uno sobre el otro no sufre ningún cambio de su estado por dicha acción; y mucho menos el centro común de gravedad de los otros, con los cuales dicha acción no se entremete; pero la distancia entre esos dos centros es dividida por el centro común de gravedad de todos los cuerpos en partes inversamente proporcionales a las sumas enteras de los cuerpos cuyos centros lo son; y por lo tanto, mientras aquellos dos centros conservan su estado de movimiento o reposo, el centro común de todos también conserva su estado; es manifiesto que el centro común de todos nunca sufre cambio alguno en el estado de su movimiento o reposo por las acciones de algunos dos cuerpos entre sí. Pero en tal sistema, todas las acciones de los cuerpos entre sí o ocurren entre dos cuerpos o se componen de acciones intercambiadas entre algunos dos cuerpos; y por lo tanto jamás producen alteración alguna del centro común de todos en cuanto a su estado de movimiento o reposo. Por lo cual, puesto que dicho centro, cuando los cuerpos no actúan el uno sobre el otro, o está en reposo o se mueve uniformemente hacia adelante en alguna línea recta, (entonces) siempre continuará, no obstante las acciones mutuas de los cuerpos entre sí, en su estado o de reposo o de proceder uniformemente en línea recta, a menos que sea echado por fuerza de este estado por la acción de algún poder impuesto desde fuera al sistema entero. Y por lo tanto, la misma ley rige (takes place) en un sistema constituido por muchos cuerpos como en un solo cuerpo, con respecto a su perseverar en su estado de movimiento o reposo. Ya que el movimiento progresivo, ya sea de un sólo cuerpo o de un sistema entero de cuerpos, siempre tiene que calcularse (be estimated) a partir del movimiento del centro de gravedad.

Corolario V

Los movimientos de los cuerpos incluidos en un espacio dado son los mismos entre si, ya sea que dicho espacio esté en reposo o que se mueva uniformemente hacia adelante en línea recta sin ningún movimiento circular.

Ya que las diferencias de los movimientos que tienden hacia las mismas partes y las sumas de los que tienden hacia

partes contrarias son, al principio (por suposición), las mismas en ambos casos; y es de dichas sumas y diferencias de las que provienen las colisiones y los impulsos con los cuales los cuerpos chocan el uno sobre el otro. Por lo cual (por la Ley II), los efectos de las colisiones serán iguales en ambos casos; y por lo tanto, los movimientos mútuos de los cuerpos entre sí en un caso permanecerán iguales a los movimientos de los cuerpos entre sí en el otro (caso). Tenemos una prueba clara de esto por el experimento de un barco; en donde todos los movimientos ocurren del mismo modo, ya sea que el barco esté en reposo o que sea llevado uniformemente hacia adelante en línea recta.

Corolario VI

Si (algunos) cuerpos, movidos de cualquier modo entre sí, son impulsados en el sentido de líneas paralelas por fuerzas aceleradoras iguales, continuarán todos ellos a moverse entre sí del mismo modo como si no hubiesen sido impulsados por dichas fuerzas.

Ya que dichas fuerzas, actuando igualmente (con respecto a las cantidades de los cuerpos por mover) y en la dirección de líneas paralelas, (por la Ley II) moverán todos los cuerpos igualmente (en cuanto a velocidad), y, por consiguiente, jamás producirán ningún cambio de las posiciones o los movimientos de los cuerpos entre sí.

SCHOLIUM

de Libro Uno, Sección I

de Principios matemáticos de la filosofía natural

por Isaac Newton

Libro Uno

EL MOVIMIENTO DE LOS CUERPOS

Sección I

El método de primeras y últimas proporciones (ratios)
entre cantidades, con la ayuda del cual demostramos las propo-
siciones a continuación.⁽¹⁾

.....

Scholium

.....

Estos Lemas se ponen como premisas para evitar el tedio

(1) Esta sección del Libro Uno de los Principia consta de once Lemas, en los cuales Newton demuestra el método del cálculo, para poder tratar la proporcionalidad entre cantidades infinitesimales. Luego, en el Scholium, justifica su concepción de dicha proporcionalidad. El Scholium se reproduce aquí en su integridad, menos el primer párrafo que tiene carácter técnico, referente a los Lemas. El texto inglés, utilizado para la traducción, se encuentra en la edición de Cajori, págs. 38-39. (Nota de T.)

de deducir demostraciones complicadas ad absurdum, según el método de los geómetras antiguos. Pues las demostraciones son más cortas mediante el método de los indivisibles; pero, puesto que la hipótesis de los indivisibles parece algo tosca (harsh), y por lo tanto ese método se considera menos geométrico, yo más bien elegí a reducir las demostraciones de las siguientes Proposiciones(1) a las primeras y las últimas sumas y proporciones de cantidades nascentes y evanescentes, es decir, a los límites de dichas sumas y proporciones, y así poner como premisas, tan brevemente como pude, las demostraciones de dichos límites. Pues de esta manera se realiza la misma cosa que (se realiza) por el método de indivisibles; y ahora, siendo demostrados dichos principios, podemos usarlos con mayor seguridad. Por lo tanto, si de aquí en adelante, ocurriere que yo considero a cantidades como constituidas de partículas, o uso pequeñas líneas curvadas por rectas, yo no quisiera que se entiendan éstas como indivisibles, sino como cantidades evanescentes divisibles; no las sumas y proporciones de partes determinadas, sino siempre los límites de sumas y proporciones; y que la fuerza de tales demostraciones siempre depende del método asentado en los Lemas anteriores.

Quizás se objetará que no hay proporción última entre cantidades evanescentes; porque la proporción, antes de que las cantidades han desvanecido, no es la última, y cuando ya están desvanecidas, es nula. Pero, por el mismo argumento, puede alegarse que un cuerpo, llegando a cierto lugar y allí deteniéndose, no posee una velocidad última; porque la velocidad, antes de que el cuerpo llega a dicho lugar, no es su última velocidad; cuando ha llegado, no la hay. Pero la respuesta es fácil; pues, por la velocidad última quiere decirse esa (velocidad) con la cual el cuerpo se mueve, ni antes de que llega a su último lugar y el movimiento cesa, ni después, sino en el instante mismo cuando llega; es decir, la velocidad con la cual el cuerpo llega a su último lugar, y con la cual el movimiento cesa. Y asimismo, por la proporción última de cantidades evanescentes, debe entenderse la proporción de las cantidades, no antes de que desvanecen, ni después, sino con la cual desvanecen. De igual manera, la primera proporción de cantidades nascentes es la (proporción) con la cual empiezan a ser. Y la primera o la última suma es la con la que empiezan a o dejan de ser (o aumentarse o disminuirse). Hay un límite a la que la velocidad, al fin del movimiento, puede alcanzar, pero a la que no puede pasar. Ésta es la velocidad última. Y hay semejante límite en todas las cantidades y proporciones que empiezan a o cesan de ser. Y puesto que tales límites son ciertos y definidos, determinarlos es problema estrictamente geométrico. Mas lo que es geométrico lo podemos usar al determinar y demostrar cualquier otra cosa que también es geométrica.

(1) Es decir, las Proposiciones de los Principia concernientes al movimiento. (Nota de T.)

Puede objetarse también, que si las proporciones últimas de cantidades evanescentes son dadas, sus magnitudes últimas también serán dadas; y así todas las cantidades consistirán en indivisibles, lo cual es contrario a lo que Euclides ha demostrado acerca de los incommensurables en el Libro X de sus Elementos. Pero esta objeción se fundamenta en una suposición falsa. Porque aquellas proporciones últimas con las cuales las cantidades desvanecen no son verdaderamente las proporciones entre cantidades últimas, sino (son) límites hacia los cuales las proporciones entre cantidades, que están disminuyéndose sin límite, siempre convergen; y a los cuales se aproximan más de cerca que por diferencia dada alguna, pero nunca los propasan ni, en efecto, alcanzan, hasta las cantidades se disminuyen in infinitum. Esta cosa aparecerá más evidente con respecto a cantidades infinitamente grandes. Si dos cantidades, cuya diferencia es dada, se aumentan in infinitum, la proporción última de dichas cantidades será dada, a saber, la proporción de igualdad; pero de aquí no se sigue que las últimas o mayores cantidades mismas, cuya proporción la es, serán dadas. Por lo tanto, si a continuación, por consideración de ser más fácilmente entendido, ocurra que yo mencionare a cantidades como mínimas (least), o evanescentes, o últimas, usted no debe suponer que se refiere a cantidades de alguna magnitud determinada, sino a tales que se conciben como siempre disminuyéndose, sin fin.

El sistema del mundo

por Isaac Newton

Sección 1. ¹

(1) La materia de los cielos es flúida.

Era la antigua opinión de no pocos, en las edades más tempranas de la filosofía, que las estrellas fijas estaban inmóviles en las partes más altas del mundo; que por debajo de las estrellas fijas, los planetas eran llevados alrededor del sol; que la tierra, como uno de los planetas, describía un trayecto anual alrededor del sol, a la vez que, por un movimiento diurno, era girada alrededor de su propio eje; y que el sol, como el fuego común que servía a calentar la totalidad, era fijo en el centro del universo.

Ésta era la filosofía enseñada en días de antaño por Filolao, Aristarco de Samos, Platón en sus años más maduros, y la secta entera de los Pitagóricos; y esto fue el juicio aun más antiguo de Anaximandro; y de aquel sabio rey de los romanos, Numa Pompilio, que erigió, como símbolo de la figura del mundo con el sol en el centro, un templo redondo, en honor de Vesta, y decretó que se guardase en su centro un fuego perpetuo.

Los egipcios eran observadores antiguos (early) de los cielos; y probablemente, proveniente de ellos, dicha filosofía se difundía por otras naciones; pues fue de aquéllas y de las naciones en sus alrededores que los griegos, una gente más adicta al estudio de la filología que al estudio de la Naturaleza, consiguieron tanto sus primeras como sus mejor fundadas nociones de filosofía; y en las ceremonias vestales, todavía podemos ver la huella (trace) del antiguo espíritu de los egipcios; pues era su costumbre presentar (deliver) sus misterios, es decir, su filosofía de cosas elevadas más allá del pensar común, bajo el velo de ritos religiosos y símbolos jergológicos.

No puede ser negado que, de cuando en cuando, aparecieron (personas como) Anaxagoras, Demócrito, y otros, quienes

¹ El texto utilizado para la traducción se encuentra en la edición de Cajori de los Principia, pags. 549-550. (Nota de T.)

insistieron (would have it) que la tierra poseía el centro del mundo, y que las estrellas, algunas con más rapidez y otras con menos, eran giradas, hacia el oeste, alrededor de la tierra, quieta en el centro.

Sin embargo, hubo acuerdo común entre ambos partidos, de que los movimientos de los cuerpos celestes se realizaban en espacios enteramente libres y desprovistos de resistencia. El capricho de orbes sólidos, introducido por Eudoxio, Calipo, y Aristóteles, pertenecía a una fecha posterior; cuando la filosofía antigua empezó a decaer (decline) y a ceder lugar a las nuevas ficciones predominantes de los griegos.

Pero sobre todo, los fenómenos de los cometas de ninguna manera pueden tolerar la idea de órbitas sólidas. Los caldeos, los astrónomos más doctos de su época, consideraron a los cometas (los que, en tiempos más antiguos, se habían contado entre los cuerpos celestes) como un tipo especial de planetas que, por describir órbitas excéntricas, se presentaban a la vista solamente por turnos, una vez en una revolución, cuando descendieron a las partes inferiores de sus órbitas.

Y, tal como la consecuencia ineludible de la hipótesis de órbitas sólidas, mientras ésta prevalecía, era la de que los cometas fuesen metidos en los espacios por debajo de la luna; así, cuando las observaciones posteriores de los astrónomos restituyeron los cometas en sus lugares antiguos en los cielos más elevados, necesariamente se les quitó de dichos espacios celestes el estorbo de las órbitas sólidas.

Selecciones de la

ÓPTICA

por Isaac Newton

Libro III, Parte I.

Selecciones de las 'Preguntas'.¹

Pregunta 18. Si en dos grandes y altas Vasijas cilíndricas de Cristal, invertidas, se suspenden dos pequeños Termómetros de modo que éstas no tocan las Vasijas, y de una de dichas Vasijas se saca el Aire, y estas Vasijas así preparadas son llevadas desde un lugar frío a un lugar caluroso; el Termómetro in vacuo se calentará tanto, y casi tan pronto, como el Termómetro que no está in vacuo. Y cuando las Vasijas son llevadas otra vez al lugar frío, el Termómetro in vacuo se enfriará casi tan pronto como el otro Termómetro. ¿No es que el Calor del Cuarto caluroso es llevado a través del Vacuum por las Vibraciones de un Medio² mucho más sutil que el Aire, que permaneció en el Vacuum después de que el Aire fue sacado? Y, ¿no es este Medio el mismo que aquel Medio por el cual la Luz es refractada y reflejada, y por cuyas Vibraciones la Luz comunica Calor a los Cuerpos..? Y, ¿no es este Medio extremadamente más raro y sutil que el Aire, y extremadamente más elástico y activo? Y, ¿no es que penetra fácilmente en todos los Cuerpos? Y, ¿no es que se difunde (por su fuerza de elasticidad) por todos los Cielos?

¹ Se utilizó para la traducción la edición de la Óptica de Dover (Véase la Bibliografía), en que se reproduce sin alteración el texto publicado en 1931 por G. Bell and Sons, Londres. Los textos reproducidos aquí corresponden a págs. 348-406 de la edición de Dover. (Nota de T.)

² Nótese que Newton emplea la palabra 'medio' en el sentido de un medio material. (Nota de T.)

Pregunta 21. ¿No es este Medio mucho más raro dentro de los Cuerpos densos del Sol, las Estrellas, los Planetas y los Cometas, que lo es en los Espacios celestes vacíos entre ellos? Y, al pasar desde ellos a grandes distancias, ¿no es que (este Medio) se pone más y más denso perpetuamente, y por esto causa la gravedad de aquellos grandes Cuerpos, el uno hacia el otro, y de sus partes hacia los Cuerpos; todo Cuerpo esforzándose por ir desde las partes más densas del Medio hacia las más raras? Pues, si este Medio es más raro dentro del Cuerpo del Sol que por su Superficie, y más raro allí que a la centésima parte de una Pulgada de su Cuerpo, y más raro allí que a la quincuagésima parte de una Pulgada de su Cuerpo, y más raro allí que por el Orbe de Saturno; no veo ninguna razón por qué el Aumento de densidad deténgase en lugar alguno, y no más bien continúe a través de todas las distancias desde el Sol a Saturno, y más allá. Y aunque este Aumento de densidad sea extremadamente lento a distancias grandes, sin embargo, si la fuerza de elasticidad de este Medio sea extremadamente grande, puede que sea suficiente para impulsar Cuerpos desde las partes más densas del Medio hacia las más raras, con todo ese poder que llamamos Gravedad. Y el que la fuerza de elasticidad de este Medio es extremadamente grande, puede ser colegido de la rapidez de sus Vibraciones. Los Sonidos se mueven aproximadamente 1140 Pies ingleses en un segundo Minuto de Tiempo.....La Luz se mueve desde el Sol a nosotros en aproximadamente siete u ocho Minutos de Tiempo, y dicha distancia es aproximadamente 70 000 000 Millas inglesas..... Y las Vibraciones o Pulsaciones de este Medio, para que pueden causar la Sucesión espasmódica alternante (alternate Fits) de fácil Transmisión y de fácil Reflexión, tienen que ser más rápidas que la Luz y, por consiguiente, más de 700 000 veces más rápidas que los Sonidos. Y por lo tanto, la fuerza de elasticidad de este Medio, en proporción a su densidad, ha de ser más de 700 000 x 700 000 (es decir, más de 490,000,000,000) veces más grande que la es la fuerza de elasticidad del Aire en proporción a su densidad. Ya que las Velocidades de las Pulsaciones de los Medios elásticos son en la Proporción de la raíz cuadrada (subduplicate Ratio) de las Elasticidades y las Rarezas (Rarities) de los Medios, tomados conjuntamente.....

Pregunta 22. ¿No es que los Planetas, los Cometas, y todos los Cuerpos voluminosos (gross) pueden realizar sus Movimientos más libremente, y con menos resistencia, en dicho Medio Etéreo que en cualquier Fluido, que llena todo el Espacio adecuadamente sin dejar Poros algunos y que, por consecuencia, es mucho más denso que el Azogue o el Oro? Y, ¿no es que su resistencia puede ser tan pequeña como para ser inapreciable? Por ejemplo, si se supusiere que dicho Éter (pues así lo llamaré) sea 700 000 veces más elástico que nuestro Aire, y en exceso de 700 000 veces más raro; su resistencia sería en exceso de 600 000 000 veces menos que la de agua. Y tan pequeña resistencia apenas causaría alguna alteración sensible de los Movimientos de los Planetas en diez mil Años. Si alguien quisiera preguntar cómo que un Medio sea tan raro, (yo contestaría) que él

me diga a mí.....¿cómo que un Cuerpo eléctrico, por Fricción, emita una Exhalación tan raro y sutil, y sin embargo tan poderoso, de modo que, por su Emisión no causar Disminución sensible alguna del peso del Cuerpo eléctrico, y, sin embargo, ser difundida por una Esfera cuyo Diámetro es en exceso de dos Pies, y ser capaz, a la distancia de más de un Pie del Cuerpo eléctrico, de agitar y levantar Lámina de Cobre o Lámina de Oro?

Pregunta 28.Y en contra de llenar los Cielos con Medios flúidos, a menos que éstos sean extremadamente raros, una gran Objeción proviene de los Movimientos regulares y muy perdurables de los Planetas y los Cometas, en toda clase de Trayectos por los Cielos. Pues, de aquí es manifiesto que los Cielos son desprovistos (are void) de toda Resistencia sensible y, como consecuencia, de toda Materia sensible.....

Ahora bien, aquella parte del Poder resistente de algún Medio que proviene de la Tenacidad, la Fricción o el Desgaste (Attrition) de las Partes del Medio, puede ser disminuida con dividir la Materia en Partes más pequeñas, y con hacer las Partes más lisas y resbaladizas: Pero aquella parte de la Resistencia que proviene de la Vis inertiae es proporcional a la Densidad de la Materia.... Y por estas razones, la Densidad de Medios flúidos es casi proporcional a su Resistencia....

....si los Cielos fueran tan densos como el Agua, no tendrían mucho menos Resistencia que (la tiene) el Agua; si tan densos como el Azogue, no tendrían mucho menos Resistencia que el Azogue; si absolutamente densos, es decir, llenos de Materia sin Vacuum alguno, (entonces), por sutil y flúida que sea la Materia, tendrían una Resistencia mayor a la del Azogue. En tal Medio, un Globo sólido perdería aproximadamente la mitad de su Movimiento con moverse tres veces la longitud de su Diámetro, y un Globo no sólido (como lo son los Planetas) sería retardado más pronto. Y por lo tanto, para que haya lugar para los Movimientos regulares y perdurables de los Planetas y Cometas, es necesario vaciar los Cielos de toda Materia, quizás con excepción de algunos Vapores, Vahos o Efluvios, que provienen de los Atmósferas de la Tierra, los Planetas, y los Cometas, y de un Medio Etéreo extremadamente raro, tal como lo hemos descrito arriba. Un Flúido denso no sirve para explicar los Fenómenos de la Naturaleza, (pues) los Movimientos de los Planetas y Cometas se explican mejor sin él. Éste sirve únicamente para perturbar y retardar los Movimientos de dichos grandes Cuerpos, y lograr que la Estructura (Frame) de la Naturaleza languidezca: Y en los Poros de los Cuerpos, sirve únicamente para detener los Movimientos vibratorios de sus Partes, en los cuales su Calor y Actividad consisten. Y como no es de utilidad alguna, e impide las Operaciones de la Naturaleza, y la hace languidecer, asimismo no hay evidencia alguna de su Existencia, y por lo tanto, debería ser rechazado. Y si se lo rechaza, se rechazan junto con él las Hipótesis de que la Luz consista en Presión (Pression) o Movimiento, propagados a través de semejante Medio.

Y para rechazar semejante Medio, tenemos la Autoridad de los más antiguos y famosos Filósofos de Grecia y Fenicia, quienes pusieron un Vacuum, y Átomos, y la Gravedad de los Átomos como los primeros Principios de su Filosofía; y tácitamente atribuyeron la Gravedad a alguna otra Causa que la Materia densa. Filósofos posteriores desechan de la Filosofía natural la Consideración de tal Causa, y fingen (feign) Hipótesis para explicar todas las cosas mecánicamente, y asignan otras Causas a la Metafísica: Pero el Asunto principal de la Filosofía natural es argumentar a partir de los Fenómenos, sin fingir Hipótesis, y deducir Causas de Efectos, hasta que lleguemos a la primerísima Causa, la que seguramente no es mecánica; y no sólo revelar (unfold) el Mecanismo del Mundo, sino, y principalmente, resolver estas Preguntas y otras de la misma índole.

¿Qué está allí en lugares casi vacíos en cuanto a Materia, y de dónde proviene el que el Sol y los Planetas gravitan el uno hacia el otro, sin Materia densa entre ellos? ¿De dónde proviene el que la Naturaleza no hace nada en vano; y, de dónde proviene todo ese Orden y toda esa Belleza que vemos en el Mundo? ¿Para cuál fin son los Cometas, y de dónde proviene el que los Planetas se mueven todos de una y la misma manera en Orbes concéntricos, mientras que los Cometas se mueven de maneras muy variadas en Orbes muy excéntricos? Y, ¿qué impide que las Estrellas fijas caigan la una sobre la otra? ¿Cómo llegaron a ser tramados con tanto Arte los Cuerpos de los Animales, y para cuáles fines fueron sus sendas Partes? ¿Fue tramado el Ojo sin Habilidad en Óptica, y el Oído sin Conocimiento de los Sonidos? ¿Cómo se siguen de la Voluntad los Movimientos del Cuerpo, y de dónde proviene el Instinto en los Animales? ¿No es el Sensorio de los Animales ese lugar al (o, en el) cual la Substancia sensitiva (sensitive) está presente, y al cual (into which) las Especies sensibles de las Cosas son llevadas por medio de los Nervios y el Cerebro, de modo que sean percibidas allí por su presencia inmediata ante dicha Substancia? Y, despachadas correctamente dichas cosas, ¿no parece seguirse de los Fenómenos el que existe un Ser incorpóreo, vivo, inteligente, omnipresente, quien, en el Espacio infinito, como en su Sensorio, por decirlo así, ve las cosas mismas íntimamente, y las percibe cabalmente, y las comprende íntegramente por su presencia inmediata ante él mismo? De cuales cosas sólo las Imágenes, llevadas por medio de los Órganos de Sensibilidad a nuestros pequeños Sensorios, son vistas y contempladas allí por lo que, en nosotros, percibe y piensa. Y aunque todo Paso verdadero que se da en esta Filosofía, no nos lleva inmediatamente al Conocimiento de la primera Causa, sin embargo, nos lleva más cerca de él, y por esta razón debe ser altamente valorizado.

Pregunta 31. Tal como en las Matemáticas, así también en la Filosofía Natural, la Investigación de Cosas difíciles por el Método de Análisis siempre debe preceder el Método de Composición (Composition). Este Análisis consiste en realizar Experimentos y Observaciones, y en sacar Conclusiones generales de ellos por Inducción, sin admitir ningunas Objeciones en contra

de las Conclusiones, salvo tales que se toman de Experimentos, o de otras Verdades que tienen certeza. Pues las Hipótesis no deben ser consideradas en la Filosofía experimental. Y aunque argumentar a partir de Experimentos y Observación mediante la Inducción no sea Demostración de Conclusiones generales; sin embargo, es el mejor modo de argumentar que la Naturaleza de las Cosas admite, y puede considerarse tanto más firme en cuanto la Inducción sea más general. Y si ninguna Excepción proviene de Fenómenos, la Conclusión puede ser afirmada de modo general. Pero si en algún tiempo posterior, alguna Excepción ocurrirá en los Experimentos, entonces en aquel tiempo se puede empezar a afirmar la Conclusión con tales Excepciones que ocurran. Mediante este modo de Análisis, podemos proceder desde Compuestos a Ingredientes, y desde Movimientos a las Fuerzas que los producen; y en general, desde Efectos a sus Causas, y desde Causas particulares a las de mayor generalidad, hasta el Argumento termine con la más general. Esto es el Método de Análisis: Y la Síntesis consiste en suponer que las Causas son descubiertas y establecidas como Principios, y en explicar mediante ellas los Fenómenos que provienen de ellas, y en comprobar las Explicaciones.....

BIBLIOGRAFÍA

Obras a las cuales se hace referencia en el
presente trabajo.

- A. d'Abro, The Evolution of Scientific Thought from Newton to Einstein, Dover, New York, 1950.
- Aristóteles, Física; De cielo; Metafísica.
Los textos en inglés citados en este trabajo se encuentran en The Basic Works of Aristotle, redactado por Richard McKeon, Random House, New York, 1941.
- David Bohm, Causalidad y azar en la física moderna, Colección "Problemas Científicos y Filosóficos", UNAM, México, 1959. (Versión original en inglés: Causality and Chance in Modern Physics, Routledge & Kegan Paul Ltd., Londres.)
- Louis de Broglie, Materia y luz, versión en español de Espasa - Calpe.
- "La reinterpretación de la mecánica ondulatoria", en Examen de la mecánica cuántica, Suplemento del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, 2ª serie, Núm. 29, UNAM, 1961. (Versión original en francés: "L'interprétation de la mécanique ondulatoire", La Pensée, Núm. 91, mayo-junio, 1960, págs. 16-45)
- Edwin Arthur Burt, The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science, Doubleday Anchor Books, New York, 1954.
- René Descartes, Meditaciones; Principia Philosophiae.
(Versión en inglés utilizada para este trabajo: A Discourse on Method, Everyman's Library, J.M. Dent & Sons Ltd, Londres, 1953. Trad. de John Veitch.)
- Albert Einstein y Leopold Infeld, The Evolution of Physics, Cambridge University Press, 1961.
- Euclides, Elementos de Geometría, UNAM, 1944. Trad. de Juan David García Bacca. Tomo I.
- Philipp Frank, Philosophy of Science, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1957.
- Galileo Galilei, Dialogues Concerning Two New Sciences, Dover, New York. Trad. de Henry Crew y Alfonso de Salvio.
(Versión original en italiano: Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, Leyden, 1638.)

Eli de Gortari, "La categoría de espacio en la física atómica", Diánoia, UNAM, 1957.

-- Dialéctica de la física, Colección "Problemas Científicos y Filosóficos", UNAM, 1964.

Harvard Case Histories in Experimental Science, redactado por James Bryant Conant, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957.

G.W.F. Hegel, The Phenomenology of Mind, George Allen & Unwin Ltd, Londres, 1955. Trad. de J.B. Baille. (Versión original en alemán: Phänomenologie des Geistes)

Kant, Immanuel, Crítica de la razón pura, Librería General Victoriano Suarez, Madrid, 1960. Trad. de Manuel G. Morente. (Versión original en alemán: Kritik der reinen Vernunft)

Lucretius, The Nature of the Universe, Penguin Books, Baltimore, Maryland, 1951. Trad. de R.E. Latham. (Versión original en latín: De rerum natura)

Ernst Mach, Desarrollo histórico-crítico de la mecánica, Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1949. (Título original en alemán: Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt). Trad. de Jose Babini.

Sir Isaac Newton, Opticks, Dover Publications, New York, 1952. Esta edición reproduce sin alteración la edición de G. Bell, basada en la 4ª edición (1730). Con Prólogo de Albert Einstein, Introducción de Sir Edmund Whittaker, y Prefacio de I. Bernard Cohen. Índice analítico preparado por Duane H.D. Roller. La Óptica se publicó por primera vez en 1704, en inglés.

-- Mathematical Principles of Natural Philosophy.

Versión modernizada por Florian Cajori, basada en la versión inglesa de Andrew Motte (1729). University of California Press, Berkeley, Calif., 1960. (Véase la información bibliográfica acerca de los Principia en Capítulo I, Nota 1.)

Newton's Philosophy of Nature - Selections from his Writings, Redactado por H.S. Thayer y J.H. Randall, Jr., Hafner Publishing Co., New York, 1953.

Platón, Timeo.

El texto citado en este trabajo se encuentra en The Dialogues of Plato, versión inglesa de B. Jowett, Random House, New York, Tomo II.

Alfred North Whitehead, An Introduction to Mathematics, Galaxy, Oxford University Press, New York, 1958. (Primera edición en Inglaterra, 1911.)