

# El tiempo en la física: de Newton a Einstein

Manuel García Doncel

Seminari d'Història de les Ciències, U.A.B.

ABSTRACT (*The Concept of Time in Physics, from Einstein to Newton*)

The author gives a detailed account of the concept of time and the different forms of measuring it throughout the history of modern physics (although he sets its precedents as far back as Aristotle): Galileo and Kepler, Newton and his concept of absolute time, the idealism of Kant and its influence on physics, the experiments of Faraday and Maxwell, Mach's criticism of Newton's mechanicism and his idea of absolute time, and, finally, Einstein's concept of time within the limits of the theory of relativity. The author concludes his account with an epilogue on the real and ideal forms of time, in which he defends its character of rational construct based upon an experimental foundation.

## 1. Precedentes: tiempo vulgar, tiempo filosófico y tiempo cinemático

El concepto de tiempo físico, cuyo recorrido histórico pretendemos esbozar, no nace de la nada. Los conceptos científicos nacen de nuestro mundo cultural, de nuestro lenguaje, de nuestra vida. Los precedentes de este concepto físico de tiempo son el concepto vulgar y el concepto filosófico de tiempo.

*El concepto vulgar de tiempo* es el ordinariamente usado en la distribución de nuestra vida, el que marca nuestro ritmo de trabajo, de descanso, y de oración —es curioso que, tanto en el mundo árabe como en el mundo cristiano, uno de los motivos fundamentales de perfeccionar la medida del tiempo era el ordenar las horas de oración—. La concepción originaria es que ese ritmo humano está marcado por los astros, que

señalan las medidas vulgares del tiempo. Como dice la primera página de la Biblia, hablando del sol y la luna —aunque sin mencionarlos, por reacción contra la idolatría de los pueblos circundantes—<sup>1</sup>:

Dijo Dios: «Haya lumbreras en el firmamento celeste para separar el día de la noche, y hagan de señales para las solemnidades, para los días y para los años... y atardeció y amaneció el día cuarto.»

Esa separación del día y la noche era central para la medida del tiempo vulgar. Desde nuestro siglo xx, hemos de hacer un gran esfuerzo para entender una mentalidad pre-edisoniana, quiero decir la mentalidad normal en una época en que la luz artificial era un lujo muy costoso. La jornada se dividía inevitablemente en dos partes, diurna y nocturna. Las horas eran las doceavas partes del día o de la noche. La hora diurna y la hora nocturna eran pues distintas, e iban variando a lo largo del año. Por ejemplo en esta estación primaveral, la hora diurna iba creciendo de día en día, y la hora nocturna decreciendo. Esa era la medida interesante del tiempo, la que realmente servía para regular los ritmos de la vida. La esfera de un reloj antiguo —la seguimos llamando «esfera», sin saber mucho el por qué— representaba simplemente el movimiento de los astros en sus esferas celestes. Aun cuando en los «astrolabios planos» tuviese ya forma circular, en ella se veía una cierta proyección del horizonte, y el giro de la aguja («la red» de astros, con el sol avanzando sobre el zodíaco) visualizaba la salida y la puesta del sol, y los husos horarios correspondientes a las 12 horas del día o las 12 de la noche. Así nace la ciencia de medir el tiempo vulgar, por referencia a los astros (relojes de sol, astrolabios), o reproduciendo mecánicamente sus movimientos (clepsídras, reloj de mercurio de Alfonso el Sabio...).

*El concepto filosófico de tiempo* tenía un sentido más profundo, heredado del mundo griego. Aristóteles había definido el tiempo como «el número [nosotros diríamos quizás "la variable"] del movimiento, según el antes y el después». Él entiende «movimiento» en el sentido más general de «cambio», «transformación»; no precisamente de «cambio del lugar» de un objeto, sino de «cambio de cualquiera de sus cualidades».

Este tiempo filosófico fue elaborándose científicamente en el siglo xiv. primero abstractamente en el Merton College de Oxford y después gráficamente en la Universidad de París, por obra de Oresme y su Escuela. El tiempo del cambio se representaba en la llamada «línea extensiva», mientras en la dirección perpendicular de la «línea intensiva» se representaba la intensidad de las cualidades que varían en el cambio. Tales representaciones constituyen el humus, del que irá brotando nuestra

<sup>1</sup> Génesis, cap. 1, verso 14.

física, precisamente como estudio de ese cambio, o dicho en el lenguaje actual, como estudio de la variación de diversas cualidades (velocidad, temperatura, color...) en función del tiempo. Estos dibujos de Oresme son la primera representación de nuestro concepto matemático de función, aplicado generalmente a funciones del tiempo que tienen sentido físico. De esta elaboración del concepto filosófico, es de donde nace nuestro concepto físico de tiempo.

Pero el *concepto físico de tiempo* se establece en lo que llamamos la cinemática: la teoría del movimiento, entendido ya como movimiento local, y sin tratar todavía de las fuerzas que lo producen. La cinemática más antigua estudiaba los movimientos de los astros. El sistema ptolomaico —con sus diversas esferas y epiciclos, excéntricas y ecuantas— daba razón de las posiciones aparentes de los astros, mediante un conjunto de movimientos circulares uniformes. Se basaba en el principio aristotélico de que el movimiento circular uniforme y perpetuo, era el movimiento natural del mundo incorruptible supralunar. Eso constituye ya un primer esquema cinemático, en el que el decurso del tiempo se manifiesta simplemente en el ángulo de rotación de esas esferas. Copérnico, al variar el orden de las esferas a mitades del siglo XVI, no cambia mucho esa cinemática, pero permite que Kepler la cambie, a principios del siglo XVII. Concretamente en 1609 estudia Kepler en su *Astronomia nova* los movimientos de la «estrella Marte». Y en ese estudio concreto llega a la conclusión de que aquel esquema de círculos y epiciclos no funciona. Y enuncia lo que llamamos la primera ley de Kepler: los planetas describen órbitas elípticas en torno al sol colocado en uno de los focos. Y en esa misma obra de 1609 enuncia la segunda de sus leyes, central para nuestro tema: los planetas se mueven con una velocidad areolar constante (es decir, el radio vector que une el Sol con Marte va barriendo áreas iguales en intervalos iguales de tiempo). Los astrónomos de la época no aplicarán inmediatamente esa ley, por la sencilla razón de que la integral que da ese área les resulta matemáticamente muy difícil de calcular. Pero ello nos da, de una manera científica y comprobable en multitud de planetas y satélites, una verdadera medida del tiempo mediante algo espacial, en este caso mediante una superficie. Diez años más tarde, en 1619, escribe Kepler el *Harmónicas mundi*. En su última parte, dedicada a las armonías de los cielos, llega a dibujar en pentagramas las notas que canta cada planeta, correspondientes a su velocidad orbital. En ese contexto jeroglífico se formula por vez primera lo que nosotros llamamos la tercera ley de Kepler o la ley armónica: los períodos de las órbitas elípticas de los diversos planetas en torno al Sol, o los diversos satélites en torno a un planeta, están en la proporción sexquiáltera (son proporcionales a la potencia  $3/2$ ) de los ejes mayores de las correspondientes elipses. Así se introduce otra medida espacial del tiempo: ciertos

períodos de tiempo están ahora directamente relacionados con ciertas distancias espaciales.

Pero la *cinemática terrestre* nace con Galileo. La segunda parte de su segundo diálogo de 1638, comúnmente llamado los *Discorsi*, está dedicada a «la nueva ciencia del movimiento local». En esa cinemática maneja con toda naturalidad los tres conceptos básicos de espacio, tiempo y velocidad. No los define, pues los tres son para él primitivos. Sólo da las leyes que los relacionan: primero para el movimiento uniforme, después para el «naturalmente acelerado», y por fin para el movimiento compuesto de ambos que siguen los proyectiles.

Una conquista cinemática de Galileo es la definición correcta de ese movimiento «naturalmente acelerado», propio de la caída libre de los graves: en él la velocidad va creciendo proporcionalmente al tiempo. No era trivial ésto para la mentalidad de su época. Pues si las piedras caían porque iban a su centro, su velocidad debía depender de la distancia a ese centro, y no del tiempo. Pero Galileo, tras muchos esfuerzos, llega a esta ley tan sencilla en la que el tiempo empieza a jugar un papel fundamental en la física. Y a partir de esa definición obtiene (mediante lo que para nosotros es una simple integración), una sencilla ley fenomenológica: los espacios recorridos en diversos tiempos de caída son proporcionales a los cuadrados de esos tiempos. Esa deducción formal constituye la faceta teórica de esta primera conquista de la cinemática de Galileo. La faceta experimental, consiste en contrastar esa ley fenomenológica. Para ello inventa el primer aparato físico, el plano inclinado. Con él puede estudiar en cámara lenta ese movimiento, midiendo los tiempos empleados por una bola en recorrer diversas longitudes del canal por el que rueda. Como detalle anecdótico, veamos cuál es el reloj utilizado por Galileo para medir esos tiempos. Lo describe así Salviati, el dialogante que representa a Galileo, y se presenta como testigo presencial de esta experiencia<sup>2</sup>:

En lo que respecta a la medida del tiempo, se empleaba un gran cubo lleno de agua, suspendido en alto, del cual, por un delgado tubito soldado en su fondo, caía un fino hilo de agua, que se recogía en un pequeño vaso durante el tiempo en que la bola descendía por el canal y por sus partes. Luego, las partículas de agua recogidas de este modo, se iban pesando cada vez con una balanza exactísima, dándonos las diferencias y proporciones de sus pesos,

<sup>2</sup> GALILEO GALILEI, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove scienze attenenti alla Meccanica e i Movimenti Locali*, Elsevirii, In Leida, 1638; edición crítica en: *Le Opere di Galileo Galilei*, Edizione Nazionali, Firenze, 1890; cf. p. [213].

la diferencias y proporciones de los tiempos; y esto con tal precisión que, como ya he dicho, repetidas una y otra vez estas operaciones, nunca diferían de modo apreciable.

Esa primitivísima clepsidra es el reloj descrito por el anciano Galileo en su cinemática. Pero Galileo en su juventud, había descubierto la ley del péndulo. Dice la tradición que todo comenzó en una misa dominical de la catedral de Pisa. Galileo habría llegado demasiado pronto, cuando el sacristán encendía las solemnes lámparas de la nave central (de las que sólo se conservan las herederas). Y, sin querer, dio a una de ellas un golpe con el enciente-apaga-velas, y la lámpara empezó a oscilar. Galileo debió estar muy distraído durante aquella misa. Observó que la lámpara al principio oscilaba mucho y al final muy poco, pero el período de oscilación parecía ser siempre el mismo. Así deduce que el período no depende de la amplitud de oscilación (hoy sabemos que, apenas depende de ella, para oscilaciones pequeñas). Averiguará en su casa que tampoco depende del peso suspendido. El período de un péndulo sólo depende pues de su longitud (y de la gravedad del lugar, noción que Galileo desconoce). Y averigua que es proporcional a la raíz cuadrada de esa longitud. El tiempo se mide de nuevo mediante una longitud, y una longitud manejable, no como aquellos ejes de las órbitas planetarias.

Los últimos días de su existencia, Galileo ya totalmente ciego dicta cómo debería construirse un *reloj de péndulo*, qué mecanismo podría «entretener» su movimiento para que pueda medir intervalos largos de tiempo. En su época existían relojes mecánicos, basados en una corona que oscila sobre su eje vertical bajo la acción de un peso. Pero su período de oscilación dependía del peso, y era poco preciso. Ahora el período está fijado por una longitud. A partir de Galileo y a través de Huygens y su *Horologium oscillatorium* de 1673, nacerán las modernas técnicas de medida del tiempo. Durante siglos se irá luchando por eliminar sus errores: que esa longitud no varíe con las dilataciones térmicas, que el entretenimiento no perturbe la oscilación del péndulo. Así se logrará una enorme precisión, sólo superada por los recientes relojes moleculares y atómicos. Sobre ese concepto cinemático y experimental de tiempo físico elaborará Newton su dinámica.

## 2. El tiempo absoluto de Newton

Newton en sus *Principia*, cuyo tercer centenario estamos celebrando este año, define una serie de *conceptos dinámicos*: masa, cantidad de movimiento, inercia, fuerza, fuerzas centrífugas. Son los conceptos que intervienen directamente en sus leyes. Pero después de dar y explicar esas

definiciones, añada en un escolio (un comentario, en el que cabe hacer consideraciones filosóficas)<sup>3</sup>:

Hasta aquí me ha parecido bien explicar algunos términos menos conocidos, según el sentido con que habrán de entenderse en adelante. El tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento son de todos conocidísimos. Y no los defino. Pero digo que [así en la primera edición. Ulteriormente sustituyó esas frases por: «Se ha de notar sin embargo que»] el vulgo no concibe esas cantidades más que por su relación a cosas sensibles. Para evitar ciertos prejuicios que de aquí se originan, es conveniente distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y vulgares.

Pensando en el tiempo, esas tres distinciones parecen inocentes para solventar las opiniones del vulgo y los prejuicios. Pero a renglón seguido identifica el tiempo absoluto, con el verdadero y el matemático, y por otra parte el relativo, con el aparente y el vulgar. Y esto tendrá un gran influjo en la historia de la física. El párrafo entero dice<sup>4</sup>:

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su naturaleza, fluye uniformemente sin relación a ninguna cosa externa, y se le llama, con otro nombre, duración: el relativo, aparente y vulgar es cualquier medida (exacta o imprecisa) de la duración, realizada sensible y externamente por medio del movimiento, la cual es usada vulgarmente en vez del tiempo verdadero: como la hora, el día, el mes, el año.

Y a continuación habla de la igualación matemática de aquel tiempo vulgar, variable de día en día. Dice<sup>5</sup>:

El tiempo absoluto en astronomía se distingue del relativo por la igualación del tiempo vulgar. Los días naturales que vulgarmente para la medición del tiempo se tienen como iguales, son desiguales. Esta desigualdad la corrigen los astrónomos, para medir los movimientos celestes con un tiempo más verdadero.

Viene pues a definir el día solar medio, como tiempo más verdadero y más apropiado al tiempo absoluto, cuyo flujo «no puede cambiarse». Y en este contexto de igualación astronómica menciona «las experiencias del reloj oscilatorio y de los eclipses de los satélites de Júpiter».

Estos satélites de Júpiter son importantes para nuestro tema. Los había descubierto Galileo con su telescopio, y había «decretado que sean lla-

<sup>3</sup> Isaac NEWTON, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, apud Regiæ Societatis Typographos, Londini 1726<sup>3</sup> (edición crítica de A. Koyré e I. B. Cohen, Cambridge Univ. Press, 1972); cf. p. 6.

<sup>4</sup> *Ibidem*.

<sup>5</sup> *Ibidem*, pp. 7-8.

madras Estrellas Mediceas»<sup>6</sup>, para ganarse la benevolencia de los Medici. Mirados desde la tierra (que está prácticamente en el plano de sus órbitas circulares) los vemos oscilar en línea recta en torno a Júpiter. Galileo los identificó fácilmente, observándolos varias noches seguidas. No sólo porque tienen amplitudes de oscilación distintas, sino sobre todo porque cada uno tiene su propio período de oscilación perfectamente definido. Constituyen pues un reloj muy preciso, colocado allí en torno a Júpiter. Es tan preciso ese reloj que, comparado con nuestros relojes más perfectos, se llegó a advertir un pequeño atraso y adelanto anuales. Y es que al alejarse y acercarse la tierra de ese reloj, ¡la luz tarda más o menos en transmitirnos su hora! Así es como Romer, en 1676, estimó la velocidad de la luz por primera vez.

Newton en su escolio, intenta demostrar que podemos alcanzar esas nociones absolutas que son las buenas. Lo desarrolla sobre todo a propósito del movimiento absoluto, el correspondiente a un cambio de espacio absoluto en un tiempo absoluto. Según él, los movimientos absolutos se pueden distinguir experimentalmente de los relativos: por sus propiedades, por sus causas (las fuerzas producen movimientos absolutos), y sobre todo por sus efectos. Y en este contexto describe una famosa experiencia que vale la pena leer, por las repercusiones que tendrá en esta historia del concepto de tiempo y de su carácter absoluto o relativo. Dice así este texto antológico<sup>7</sup>:

Los efectos por los que se distinguen los movimientos absolutos de los relativos son las fuerzas de alejamiento del eje de movimiento circular. En efecto, en un movimiento circular puramente relativo estas fuerzas son nulas, mientras que en el verdadero y absoluto son mayores o menores según sea la cantidad de movimiento. Supongamos que un caldero está colgado de una cuerda muy larga, y se le hace girar continuamente hasta que la cuerda, de retorcida, esté casi rígida, y luego se le llena de agua, y con el agua queda en reposo; y después con una cierta fuerza rápida se le hace girar en sentido contrario, de forma que, al irse relajando el hilo, persevera un largo tiempo en esta rotación; al principio la superficie del agua será plana, como lo era antes del movimiento de la vasija; pero cuando la vasija haga que el agua, al irse imprimiendo en ella la fuerza poco a poco, empiece también a dar vueltas de modo apreciable, poco a poco irá descendiendo el agua por el centro y ascendiendo por el borde de la vasija, para revestir una forma cóncava (según he experimentado yo mismo), y al hacerse el movimiento cada vez más intenso, ascenderá más y más, hasta que al dar vueltas en tiempos iguales a los de la vasija, se quede en reposo relativo respecto a ella. Este ascenso indica la tendencia a alejarse

<sup>6</sup> Ver título del *Sidereus Nuntius* de Galileo.

<sup>7</sup> Ver nota 3, p. 10.

del eje del movimiento, y mediante esta tendencia se reconoce y mide el movimiento circular del agua verdadero y absoluto, completamente contrario en este caso al movimiento relativo.

¿Qué deduce Newton de todo esto? Que lo que produce esa superficie cóncava, o esa tendencia a alejarse del eje de giro, es el movimiento absoluto y no el relativo. Y su razón es clara: al principio, cuando gira el caldero y todavía no el agua, el movimiento relativo del agua respecto al caldero es máximo y el absoluto nulo, y por eso el agua está plana; pero al final, cuando caldero y agua giran juntos, el movimiento relativo es nulo y el absoluto máximo, y por eso se curva el agua.

Newton está pues convencido de que el movimiento absoluto es detectable experimentalmente. A menos, evidentemente, de una traslación uniforme, que sabe muy bien no se puede detectar. Para eliminar esa ambigüedad introduce una hipótesis, la única prácticamente que queda en los *Principia* (es muy curioso analizar históricamente este punto en la edición crítica<sup>8</sup>): Que el centro del Universo está en reposo. Eso no es ningún dato de experiencia. Es una hipótesis básica, que necesita para detectar completamente el movimiento absoluto.

Es pues por unos ciertos principios físicos, discutibles quizás, pero principios físicos, por los que Newton defiende los conceptos absolutos de espacio, tiempo y movimiento. No es sólo por razones teológicas, que también las tiene. Por ejemplo, en el Escolio General de los Principia, añadido en la segunda edición, dice así<sup>9</sup>:

[Dios] no es la eternidad y la infinitud, sino eterno e infinito; no es la duración y el espacio, sino que dura y está presente. Dura siempre y está presente en todas partes, y existiendo siempre y en todas partes constituye la duración y el espacio.

Newton ve, pues, el fundamento de la duración en la eternidad de Dios, como ve el fundamento del espacio en su omnipresencia. Y tiene frases más duras, por ejemplo al llamar al espacio absoluto «el sensorio de Dios». Pero, aparte de esas concepciones teológicas, su concepto de tiempo absoluto se basa en razones físicas.

Mencionemos cómo *la dinámica de Newton* consolida aquella cinemática celeste y terrestre que había introducido el concepto físico de tiempo. Su segunda ley del movimiento establece una relación entre la fuerza y la variación en el tiempo de la cantidad de movimiento, que subraya la prioridad del tiempo, y permite recuperar dinámicamente las leyes cinemáticas establecidas por Galileo. Su primera proposición del

<sup>8</sup> Ibidem, edición crítica, p. [551].

<sup>9</sup> Ibidem, p. 528.

libro primero demuestra muy simplemente que un planeta, por el mero hecho de estar atraído centralmente hacia el Sol, ha de moverse en torno a él con velocidad areolar constante. Otras proposiciones más enredadas, la undécima y decimoquinta del libro primero, demuestran que, por ser esa atracción central inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, los planetas han de describir elipses, y por ser además proporcional a sus masas, sus períodos han de satisfacer la ley armónica respecto a los ejes mayores de esas elipses. Aquella espacialización de los tiempos cobra pues ahora un carácter dinámico. Pero esa ley de gravitación universal, el que toda masa atrae a toda masa en proporción directa de ambas masas e inversa del cuadrado de su distancia, la concibe Newton como una acción a distancia, instantánea. Veremos cómo ese concepto de acción a distancia será sustituido por el de campo.

Por otra parte, *las matemáticas* mismas de Newton están impregnadas de la noción de tiempo. Sus infinitésimos, que constituyen el instrumento matemático central de sus *Principia*, los ve como «razones o cantidades primeras y últimas» en una cierta sucesión. (La misma palabra «sucesión» que hoy empleamos, conserva aún esta idea de tiempo, de un término «después de» otro.) Y nuestra expresión «en el límite» es para él «en último término» (el adverbio latino «ultimo»), dentro de esa sucesión. Su cálculo de fluxiones está también montado sobre la variable tiempo. Una cantidad «fluyente», es una función que él concibe como dependiente del tiempo, y su «fluxión», lo que hoy llamamos su derivada, da su variación respecto al tiempo.

Cuando la dinámica newtoniana adopte ese formalismo diferencial, por obra de los Euler, los Lagrange y los Hamilton, resultará aún más clara su fundamentación sobre el tiempo. Las «leyes del movimiento» para un cierto sistema dinámico aislado, son por así decir, eternas. Y, fijadas ciertas «condiciones iniciales», predicen toda la evolución temporal del sistema. Así es como la mecánica newtoniana se convertirá en mecanicismo determinista. El sùmmum de ese mecanicismo lo representa la «inteligencia de Laplace»: si una inteligencia pudiera conocer todas las fuerzas del universo y la posición y velocidad de todas sus partículas en un instante dado, podría predecir todo el futuro y aún todo el pasado del universo. Tal determinismo extrapola al universo la evolución temporal, regida por leyes mecánicas perfectamente fijadas a partir de condiciones iniciales infinitamente precisas.

### 3. La mecánica newtoniana y el idealismo kantiano

Esta visión newtoniana tendrá repercusiones filosóficas. Hume, en su *Tratado de la naturaleza humana* de 1739, criticará las ideas filosóficas

básicas de «sustancia» y de «causalidad», pero no tanto las nociones de «espacio» y de «tiempo». Cree que estas últimas satisfacen el criterio empirista de estar basadas sobre percepciones, aunque ellas no sean directamente percibidas. Dice, por ejemplo, así <sup>10</sup>:

Mientras no tengamos percepciones sucesivas, no tenemos noción de tiempo, aunque exista una sucesión real en los objetos... El tiempo no puede hacerse aparente a nuestra mente sólo o ligado a un objeto fijo e inmutable, sino que siempre es descubierto por una sucesión *perceptible* de objetos que cambian.

Y muy elegantemente dice poco después <sup>11</sup>:

Cinco notas tocadas con una flauta nos dan la impresión y la idea de tiempo, por más que el tiempo no sea una sexta impresión que se pretende al oído o a algún otro sentido. Ni es una sexta impresión que la mente encuentre en sí misma por reflexión... Sino que ésta sólo advierte la manera como se manifiestan los diferentes sonidos...

Cierto que algunas frases de Hume suenan a relativistas <sup>12</sup>:

Las ideas de espacio y tiempo no son ideas separadas o distintas, sino meramente las de la manera u orden con que existen los objetos.

Pero, en su contexto, tal frase no tiene nada de relativista. Simplemente dice, que la idea de espacio no es separable del orden de colocación de los objetos y la de tiempo no es separable del orden de su sucesión.

Sabemos que esa crítica empirista de Hume despertará a Kant de su «sueño dogmático», y que la solidez de la ciencia newtoniana le incitará a reflexionar sobre las condiciones de posibilidad de una metafísica. Para Kant, el espacio y el tiempo son formas puras de la percepción. Por ejemplo, en su *Opus postumum* (Kant murió en 1804) dice así <sup>13</sup>:

Espacio y tiempo no son objetos de la intuición, sino formas de la intuición misma, y de la relación sintética de la multiplicidad dada en el espacio y en el tiempo, y proceden *a priori* previamente a la existencia de los objetos sensibles. [...]

Sólo hay *un* espacio y *un* tiempo (en esto consiste la infinitud) y sólo *una* experiencia. [...]

Espacio y tiempo son formas de la intuición externa e interna, dadas *a priori* en una representación sintética. [...]

<sup>10</sup> David HUME, *A Treatise of Human Nature*, primera edición del Book I, 1739; nueva edición, London 1886 (reproducido por Scientia Verlag, Aalen, 1964); cf. p. 342 (n.º 2-3).

<sup>11</sup> *Ibidem*, p. 343 (n.º 2-3).

<sup>12</sup> *Ibidem*, p. 346 (n.º 2-4).

<sup>13</sup> Immanuel KANT, *Opus Postumum* (1938), pp. 89-81 y 998.

Kant distingue tres modos del tiempo: duración, sucesión y simultaneidad.

Estas concepciones kantianas influyen también en los científicos. Pensemos, por ejemplo, en William R. Hamilton, a quien acabamos de citar entre los reformuladores de la mecánica newtoniana. Hamilton en la última etapa de su vida estaba preocupado por descubrir un elemento geométrico que describiera el espacio ordinario, diríamos que buscaba el «vector» tridimensional. Y buscando el vector se encontró con el «cuaternión», algo que él no buscaba, que en vez de tener tres componentes tenía cuatro. No vamos a entrar en la descripción de su descubrimiento<sup>14</sup>. Pero el cuaternión lo considerará inmediatamente dividido en dos partes: a una la llama vectorial y es el elemento tridimensional correspondiente al espacio, y a la otra la llama «escalar» y la hace corresponder al tiempo. En esa escala es donde han de poderse colocar todos los sucesos, cronológicamente ordenados. Hamilton recuerda como ya anteriormente habían estudiado el álgebra (que trata de esos escalares), como la ciencia del orden en progresión, y comenta<sup>15</sup>:

...considerar el ÁLGEBRA no meramente como arte o lenguaje, ni primeramente como ciencia de la cantidad; sino más bien como ciencia de orden en progresión [...] Y aunque los sucesivos *estados* de tal progresión pueden (sin duda) representarse mediante *puntos sobre una línea*, no obstante pensé que su simple sucesión era concebida mejor comparándola con los momentos de tiempo, despejados, sin embargo, de toda referencia a *causa y efecto*; de forma que el «tiempo» considerado aquí puede llamársele abstracto, ideal, o *puro*, como ese «espacio» que es objeto de la geometría. De esta manera fui conducido, hace muchos años, a considerar el álgebra como la CIENCIA DEL TIEMPO PURO; y publiqué [en nota: animado por ciertos pasajes de la crítica de la Razón Pura de Kant] en 1835 un Ensayo que contiene mi concepción de ella en cuanto tal.

Así, las concepciones newtonianas del espacio y el tiempo absolutos, impregnadas de idealismo kantiano, retornan a las matemáticas.

#### 4. Los campos electromagnéticos y su transmisión por el éter

Pero la historia de la física avanza, y durante el siglo XIX se elabora el concepto de campo electromagnético. Con él cambiarán diversos aspectos de nuestro concepto físico de tiempo. El primero es que aquella acción

<sup>14</sup> Ver, p. ej., M. GARCÍA DONCEL, «Orígens Físics de l'Anàlisi Vectorial», en: *El Desenvolupament de les Matemàtiques al segle XIX*, Institut d'Estudis Catalans (Arxius de la Secció de Ciències, LXXV), Barcelona, 1984; cf. pp. 145-149.

<sup>15</sup> William ROWAN HAMILTON, *Lectures on Quaternions*, Dublín, 1853; cf. p. (2).

a distancia instantánea, imaginada por Newton en relación a la gravitación universal, será relegada.

La electrodinámica que intentaban hacer en el continente los Ampère y los Weber se basaba en esa acción a distancia instantánea entre cargas y entre elementos de corriente. Pero el Faraday que investiga en la Royal Society de Londres va elaborando otra mentalidad distinta. Y cuando en 1831 descubre las «corrientes inducidas» en un conductor por un cambio magnético, afirma que esas corrientes se producen cuando el conductor corta las «líneas de fuerza magnética» que hay diseminadas por el espacio y transmiten la acción magnética de un sitio a otro. Es curioso que al año siguiente, exactamente el 12 de marzo de 1832, escriba Faraday una «nota secreta» y la deposite sellada en la Royal Society, para mantener su prioridad sobre la idea siguiente<sup>16</sup>:

Ciertos resultados de las investigaciones que están incorporadas a los dos artículos titulados *Experimental researche in Electricity* últimamente leídos ante la Royal Society [los que exponen su descubrimiento de las corrientes inducidas] [...] me han conducido a creer que la acción magnética es progresiva y requiere tiempo; es decir, que cuando un imán actúa sobre otro imán o sobre una pieza de hierro distantes, la causa influyente (que puedo de momento llamar magnetismo), procede gradualmente a partir de los cuerpos magnéticos y requiere tiempo para su transmisión, el cual probablemente resultará ser muy perceptible.

Creo también tener razones para suponer que la inducción eléctrica se realiza en un tiempo progresivo análogo.

Añade que no ha podido comprobarlo experimentalmente. Pero deposita esta nota secreta para que, cuando se compruebe, se reconozca su prioridad en la idea de una transmisión progresiva del magnetismo y la electricidad.

Este es uno de los elementos básicos de la teoría de campos: toda acción se transmite en el tiempo, y no hay acciones a distancia instantáneas. Maxwell elaborará matemáticamente esa teoría del campo electromagnético, sobre las ideas de Faraday. Para ello, en todo punto del espacio —aún del espacio vacío— define ciertas cantidades vectoriales, entre las que destacarán dos, llamadas «campo eléctrico» y «campo magnético». Y formula las «ecuaciones de Maxwell», que fijan la variación temporal de cada uno de esos campos en función de la variación espacial del otro.

Maxwell, inspirado también por Faraday, presenta la luz como un fenómeno electromagnético. De la misma manera que la caída de una

<sup>16</sup> Ver, p. ej., L. PEARCE WILLIAMS, *Michael Faraday: A Biography*, Chapman and Hall, London, 1965; cf. p. 181.

piedra sobre un estanque en calma produce ondas, una fuerte perturbación en un punto del campo electromagnético nulo del vacío —o de cualquier medio transparente— produce ondas electromagnéticas. Las ecuaciones del campo electromagnético permiten calcular la forma de esas ondas y la velocidad de su propagación, a partir de las propiedades electromagnéticas del vacío —o del correspondiente medio transparente—. El hecho de que esa medida electromagnética de la velocidad coincida con la medida óptica de la velocidad de la luz (medida que vimos había comenzado a hacer Romer en 1676, y realizaron con mucha más perfección Fizeau en 1849 y Foucault en 1862) le proporciona a Maxwell la certeza de la existencia del éter. Su frase en uno de los últimos capítulos del *Treatise* es filosóficamente muy elegante <sup>17</sup>:

...y la combinación de la evidencia óptica con la eléctrica producirá una convicción de la realidad del medio, semejante a la que obtenemos, en el caso de otros tipos de objeto, de la evidencia combinada de los sentidos.

Viene a decir: «¿Cómo estoy yo cierto, por ejemplo, de que aquí hay una mesa? ¿Porque la veo? ¡Eso no bastaría! Podría sufrir un error óptico, estar ante un holograma que me la hace ver incluso en relieve. Estoy cierto, ¡porque la veo y la toco, y lo que veo y toco coinciden!» Pues bien ese éter tiene propiedades como esta velocidad de transmisión de una perturbación, tanto en el vacío como en un medio cristalino, como en el agua, que «percibo» a través del electromagnetismo y «percibo» a través de la óptica. De la concordancia de ambas percepciones surge la convicción de la realidad del éter, cuyas propiedades estamos analizando. En la elaboración ulterior del electromagnetismo por Lorentz y otros, este éter se identificará con el espacio absoluto newtoniano.

Esa concepción física de la teoría de campos se impondrá, apenas Hertz haga patentes las ondas electromagnéticas en 1888. Para nuestro tema interesa subrayar que esa concepción reduce la óptica a una parte del electromagnetismo, desterrando de él la idea newtoniana de acción a distancia instantánea, y sustituyéndola por una transmisión continua a la velocidad de la luz. Y que sin embargo conservará, como último bastión mecanicista, el concepto de un éter básico, identificado con el espacio absoluto newtoniano, y asociado a un tiempo absoluto. Por otra parte la concepción física del mecanicismo postnewtoniano, al desarrollar la teoría cinética de los gases y la mecánica estadística, reduce análogamente la terminología a una parte de la mecánica. Y en ésta siguen rigiendo el

<sup>17</sup> James CLERK MAXWELL, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2 vols., Clarendon, Oxford, 1873; reproducción en: Dover, New York, 1954; cf. vol. 2, p. 431 (n.º 781).

espacio absoluto y el tiempo absoluto newtonianos. Veremos como Mach criticará esta concepción mecanicista, y cómo Einstein suprimirá el éter y armonizará ambas ramas de la física —mecánica y electromagnetismo—, introduciendo los conceptos de espacio y tiempo relativos.

## 5. La mecánica newtoniana y el positivismo machiano

Ernst Mach, defenderá un cierto «positivismo psico-físico», para el que la realidad básica son las sensaciones, y los objetos no son sino «conjuntos de sensaciones». Desde él arremeterá su crítica contra el mecanicismo, conceptualmente dogmático, que reinaba en su época. En su *Historia de la Mecánica* de 1883, al tratar de la mecánica newtoniana y comentar aquello del espacio y el tiempo absolutos en oposición al espacio y el tiempo «vulgares», pondrá el grito en el cielo, y tildará a Newton de «medieval», «irreal», «no científico», «metafísico» y «vano»<sup>18</sup>:

Se diría que Newton, al hacer las observaciones citadas, se encuentra aún bajo el influjo de la filosofía medieval y llega a hacerse infiel a su propósito de investigar únicamente hechos reales... No tenemos derecho a hablar de un tiempo «absoluto»: de un tiempo independiente de todo cambio. Tal tiempo absoluto no puede medirse por comparación con ningún movimiento; por consiguiente, no tiene valor ni práctico ni científico, y nadie tiene derecho a decir que sabe algo de él. Es una concepción metafísica vana.

Apelando a las más diversas ciencias positivas, pretende demostrar que la única noción de tiempo justificable es la de tiempo relativo, la cual está basada en la interconexión de nuestras sensaciones<sup>19</sup>:

No sería difícil mostrar, desde el punto de vista de la psicología, de la historia o de la lingüística (a partir de los nombres de las divisiones cronológicas), que alcanzamos nuestras ideas de tiempo en y a través de la interdependencia de unas cosas con otras...

Llegamos a la idea de tiempo —para expresarlo breve y popularmente— por la conexión de lo contenido en el campo de nuestra memoria con lo contenido en el campo de nuestra percepción sensorial.

Y, aludiendo a su obra anterior *Principios del Calor*, intenta explicar

<sup>18</sup> Ernst MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883; traducción inglesa: *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*, Open Court, Chicago, 1893; reedición Dover, New York, 1974; cf. pp. 272-273 (n.º 2-6).

<sup>19</sup> Ibidem, pp. 274-275 (n.º 2-6).

psicológicamente la «hipostatización» que supone el concepto newtoniano de «tiempo absoluto»<sup>20</sup>:

He intentado anteriormente... indicar la razón de la tendencia natural del hombre a hipostatizar los conceptos que tiene gran valor para él, especialmente aquellos a los que llega de modo instintivo, sin conocer su desarrollo. Las consideraciones que aducía allí a propósito del concepto de temperatura, pueden aplicarse fácilmente al concepto de tiempo, y hacen inteligible el origen del concepto newtoniano de tiempo «absoluto».

Y el argumento del caldero, propuesto por Newton para probar el carácter fenoménico de los conceptos de espacio, tiempo o movimiento absolutos, Mach da una respuesta que resulta poco positivista<sup>21</sup>:

Si todavía hay autores modernos que se dejan guiar por el argumento sustentado por Newton de la vasija de agua, para distinguir el movimiento absoluto del relativo, es porque no piensan que el universo nos es dado sólo *una vez*, que la concepción ptolomeica o copernicana es interpretación *nuestra*, y que ambas son igualmente efectivas. Que ensayen fijar la vasija con agua de Newton y hacer girar la esfera de las estrellas fijas, y prueben entonces la ausencia de fuerza centrífuga.

Y lo repite unas pocas páginas después:

La experiencia de Newton con la vasija de agua que gira nos enseña simplemente que la rotación relativa del agua respecto a las paredes de la vasija *no* despierta ninguna fuerza centrífuga apreciable, pero que ésta *es*, en cambio, provocada por la rotación relativa respecto de la masa de la tierra y de los demás astros. Nadie puede decir cómo se habría desarrollado cuantitativamente y cualitativamente la experiencia, si las paredes de la vasija se tornaran cada vez más espesas y macizas hasta llegar a un espesor de varias millas. No tenemos, ante nosotros, sino una sola experiencia, y debemos ponerla de acuerdo con el resto de los hechos que nos son conocidos, pero no con nuestras fantasías arbitrarias.

Ya es curioso que un positivista para quien sólo cabe basarse en sensaciones, argumente contra el caldero de Newton que todos vemos, proponiendo la contra-experiencia de hacer girar las estrellas fijas o hacer crecer kilómetros nuestro caldero. Pero es que en realidad Mach ha absolutizado su principio de que sólo es válido el movimiento relativo. Este es el contexto en que entra Einstein en escena.

<sup>20</sup> Ibidem, p. 276 (n.º 2-6).

<sup>21</sup> Ibidem, p. 279 (n.º 2-6).

<sup>22</sup> Ibidem, p. 284 (n.º 2-6).

## 6. El tiempo relativista de Einstein

Albert Einstein a sus 16 años asiste a la escuela cantonal de Aarau en Suiza, tras el suspenso sufrido en la prueba de selectividad del Politécnico de Zürich, debido a su desconocimiento de lenguas. Según sus recuerdos, en ese curso 1895-96 hizo la primera «experiencia mental relacionada con la relatividad especial». Le atormentaba una paradoja: si pudiera cabalgar sobre un rayo de luz, ¿cómo experimentaría su campo electromagnético? La paradoja proviene de combinar la velocidad de la luz con la del observador. Pero demos un salto de siete y ocho años. Einstein ha acabado sus estudios en el Politécnico de Zürich y reside en Berna. Buscando afanosamente colocación, pone un anuncio en el periódico: «Se ofrecen clases de física teórica a dos francos y medio la hora». Este reclamo atrajo a Maurice Solovine, estudiante rumano de humanidades y ciencias, a quien quizá dio algunas clases de física teórica, pero con quien ciertamente trabó una gran amistad. Otro amigo era Konrad Habicht, estudiante de matemáticas. Los tres fundaron en Berna lo que pomposamente llamaron «Academia Olimpia». Se conservan anécdotas de sus reuniones vespertinas en la habitación de uno u otro de esos tres estudiantes<sup>23</sup>. Pero lo que aquí nos interesa es que en esa Academia Olimpia, se sabe muy bien, leyeron y comentaron Hume, el *Tratado de la Naturaleza Humana* de que acabamos de hablar. Leyeron también Mach pero, según asegura Einstein, Hume le dejó más huella. Lo dice en varios textos, y al final de su vida describe así su prolongación a la crítica de Hume<sup>24</sup>:

Hume reconoció claramente que ciertos conceptos, por ejemplo el de causalidad, no pueden ser deducidos a partir del material experimental mediante métodos lógicos, y los mantuvo como premisas necesarias del pensamiento y las distinguió de los conceptos de origen empírico. Yo estoy convencido de que esa distinción es errónea, es decir, no hace justicia al problema de un modo natural. Todos los conceptos, aun los más próximos a las vivencias, son desde el punto de vista lógico composiciones libres, exactamente como el concepto de causalidad, sobre el que se había centrado la cuestión en primer término.

Einstein ve pues, inspirado por Mach y sobre todo por Hume, cómo todos nuestros conceptos son construcciones nuestras, basadas en la

<sup>23</sup> Ver, p. ej., M. GARCÍA DONCEL, «La Génesis de la Relatividad Especial y la Epistemología de Einstein», *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, vol. 45 (1981), pp. 7-35; cf. pp. 17-18.

<sup>24</sup> Albert EINSTEIN, «Gesprochenes Glaubensbekenntnis», *Die Naturwiss.*, 56 (1966), 198.

experiencia. También nuestros conceptos de espacio y tiempo. Y quizás eso le haga caer en la cuenta de que no los hemos sacado de una experiencia suficientemente universal, que hay otras experiencias posibles.

El hecho es que en 1905, llamado su «año estelar», Einstein publica tres artículos famosísimos y su tesis doctoral. El último de ellos es el que introduce la Relatividad especial. Cuando está aún en borrador, lo comenta así con su amigo Habicht, el matemático de la Academia Olimpia<sup>25</sup>:

El cuarto trabajo está todavía en borrador, y es una electrodinámica de cuerpos en movimiento que utiliza una modificación de la doctrina del espacio y el tiempo; la parte puramente cinemática de este trabajo te interesará ciertamente.

Es pues «la doctrina del espacio y el tiempo» la que Einstein pretende modificar. A su amigo Habicht, viene a decirle: la segunda parte que trata de las ecuaciones de Maxwell probablemente no la entenderás, pero la primera que es puramente cinemática «te interesará ciertamente».

El trabajo comienza notando, con una visión muy einsteniana, que la física de su tiempo no es armónica, tiene distintas simetrías. Como ya hemos indicado, en la física de su tiempo hay como dos grandes tratados: la mecánica, elaborada a partir de los *Principia* de Newton, y el electromagnetismo, elaborado a partir del *Treatise* de Maxwell. Y ambos tratados tienen distinta simetría. La mecánica resulta la misma vista desde cualquier referencial inercial, esté en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme. Mientras que el electromagnetismo resulta distinto visto desde esos diversos referenciales. Lo describe al principio de su artículo, imaginando la experiencia sencillísima de las corrientes inducidas de Faraday. Tomemos un imán recto y un circuito perpendicular a él, e introduzcamos un extremo del imán en el circuito. En éste se inducirá una corriente, que depende, según diría Faraday, de cómo corta el circuito las líneas de fuerza magnéticas. Pero como hace notar Einstein, según las ecuaciones de Maxwell, este problema es totalmente distinto si consideramos que se mueve el imán o el circuito. Podemos imaginar que el movimiento es uniforme, y eso equivale a considerar el fenómeno desde el referencial inercial del circuito, o el del imán. Las ecuaciones de Maxwell a emplear son distintas. Porque si el imán está en reposo, allí únicamente hay un campo magnético, pero si se mueve produce además campos eléc-

<sup>25</sup> Ver, p. ej., Max FLÜCKIGER, *Albert Einstein in Bern*, Paul Haupt, Bern, 1974; cf. p. 90.

tricos transversales. El problema teórico es distinto, por más que el resultado sea el mismo. Según Einstein, tales asimetrías<sup>26</sup>

sugieren que los fenómenos de la electrodinámica, como los de la mecánica, no poseen propiedades que correspondan a la idea de reposo absoluto.

Para armonizar mecánica y electromagnetismo, introduce dos principios generales de toda la física: el *principio de relatividad*, según el cual toda la física se ve igual desde cualquier referencial inercial, y el *principio de la constancia de la luz*, según el cual la velocidad de la luz en el vacío no depende de la velocidad del observador o de la fuente, sino que es la misma vista desde cualquier referencial inercial. Esto solventa la paradoja que le preocupaba desde los dieciséis años: la velocidad de la luz no se suma ni se resta a la velocidad del observador. Pero como indica inmediatamente Einstein, estos dos principios parecen totalmente incompatibles. Para que no lo sean es necesario cambiar las nociones de tiempo y espacio, y eso es lo que tiene el coraje de hacer.

Tras esa introducción, comienza la primera parte cinemática, con la crítica filosófica a nuestro concepto de tiempo y de simultaneidad. Aquí es donde Einstein escribe frases de las que su futuro colaborador Leopold Infeld dirá que jamás en un artículo científico había leído frases tan triviales. Las frases son estas<sup>27</sup>:

Hemos de caer en la cuenta de que nuestros juicios en que interviene el tiempo son siempre juicios sobre sucesos [Ereignisse] *simultáneos*. [...] Si, por ejemplo, digo «el tren llega aquí a las 7 en punto», quiero decir algo así: «el señalar hacia el 7 la manecilla pequeña de mi reloj y la llegada del tren son sucesos simultáneos». Parecerá que se pueden superar todas las dificultades referentes a la definición de «tiempo» sin más que sustituir «tiempo» por «la posición de la manecilla pequeña de mi reloj». Y de hecho tal definición es satisfactoria cuando se trata de definir el tiempo únicamente para el lugar donde está definido el reloj; pero si hemos de conectar en el tiempo series de sucesos que ocurren en lugares diferentes, ya no es satisfactoria.

Da a continuación un criterio de sincronización de relojes colocados a distancia, que no utiliza más que sus dos principios generales y un postulado trivial. Pero de su razonamiento resulta, que ese criterio depende

<sup>26</sup> Albert EINSTEIN, «Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, 17 (1905), 132-148; trad. inglesa en: Arthur I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, pp. 392-415; cf. p. 392.

<sup>27</sup> *Ibidem*, p. 393.

del sistema inercial desde el que se establece la simultaneidad. La conclusión de Einstein es solemne<sup>28</sup>:

Vemos, pues, que no podemos conceder ninguna significación *absoluta* al concepto de simultaneidad, sino que dos sucesos, que, observados desde un sistema de coordenadas, son simultáneos, no pueden ser observados como sucesos simultáneos, desde otro sistema que esté en movimiento relativo respecto al primero.

Esto es lo que hace eliminar el concepto físico de tiempo absoluto y la idea de simultaneidad absoluta. Decíamos que el tiempo lo concebimos como una escala, en la que podemos colocar ordenadamente todos los sucesos del universo. Y ahora resulta que cada uno de nosotros tiene su escala. Ciertamente que los habitantes del planeta, al movernos unos respecto a otros con velocidades pequeñas respecto a la de la luz, tenemos prácticamente la misma escala. Pero un astronauta que se alejara o acercara a nosotros con velocidades próximas a la de la luz, tendría una escala cronológica en que colocaría los sucesos en un orden muy distinto al nuestro. Y tendría tanto derecho como nosotros a defender la ordenación cronológica de su escala. Eso es lo que significa, a partir de Einstein, que la simultaneidad es algo relativo. Podemos decir que depende del ángulo espacio-temporal con que se miran los sucesos. A los que están en esta audiencia, yo podría ordenarlos de izquierda a derecha, pero esta ordenación depende evidentemente del ángulo espacial con que yo los mire. Apenas me desplace en la tarima veré un oyente de la primera línea a la izquierda o a la derecha de otro de la décima. De la misma manera, para dos sucesos muy alejados en el espacio, mi decisión de que uno es anterior o posterior al otro, depende de mi orientación espacio temporal, es decir de la velocidad con que me acerco o alejo de ellos.

Esa dependencia del tiempo respecto al movimiento tiene como consecuencia la famosa paradoja de Langevin: si uno viaja muy deprisa por el mundo se mantiene más joven que si se queda quieto. No se trata de turismo veraniego, pues para que eso sea apreciable, ha de viajar a velocidades próximas a la de la luz. El profesor Costa de Beauregard nos recordaba esta mañana una experiencia hecha con dos relojes muy precisos, transportados por dos aviones que giran alrededor del ecuador en ambos sentidos. El que se dirige hacia el Este se mueve mucho más que el otro, y su retraso relativo es pequeñísimo, pero medible. Y las partículas llamadas tienen una vida muy corta. Pero cuando nos llegan a la tierra como rayos cósmicos, tienen tiempo de penetrar toda la atmósfera, debido simplemente a que, al moverse casi a la velocidad de la luz, su

<sup>28</sup> Ibidem, p. 396.

reloj va mucho más lento que el nuestro, y nos parece que su vida se alarga.

Este carácter relativo del tiempo tiene diversas consecuencias cinemáticas. Una importante es que las velocidades, al componerse, no se suman simplemente. Cuando un barco se mueve respecto a la costa, y un marinero se pasea por cubierta de popa a proa, su velocidad respecto a la costa, no es exactamente la suma de las dos velocidades, como afirmaba explícitamente Newton en sus *Principia*. Ello es debido a que el tiempo de la tierra firme con que se mide la velocidad del barco no coincide con el tiempo del barco con que se mide la velocidad del marino. Einstein lo calcula explícitamente en la parte cinemática de su trabajo, después de hallar las expresiones de la transformación de coordenadas para dos referenciales en movimiento<sup>29</sup>. La suma de las velocidades ha de dividirse por la unidad más el producto de las dos velocidades divididas por la velocidad de la luz. Es fácil ver que según esa fórmula, la composición de la velocidad de la luz con cualquier otra da justamente la velocidad de la luz. Esto prueba, como afirmaba Einstein, la compatibilidad del principio de relatividad con su principio de conservación de la luz.

El carácter relativo del tiempo, y la necesidad de considerarlo en relación al tiempo, lo expresaba claramente Hermann Minkowski al comienzo de una famosa conferencia dada en 1908, poco antes de morir<sup>30</sup>:

Señores: Las consideraciones sobre espacio y tiempo, que quisiera desarrollar para ustedes, han crecido sobre un terreno físico-experimental. En eso está su fuerza. Su tendencia es radical. A partir de ahora el espacio solo y el tiempo solo han de sumergirse totalmente en las tinieblas, y únicamente un tipo de unión de ambos ha de conservar su autonomía.

## 7. Epílogo: realidad e idealidad del tiempo

Sobre este tema discutíamos esta mañana filósofos y científicos en una mesa redonda. Creo que mi posición se entenderá mejor después de este breve recorrido histórico.

Para mí el concepto de tiempo es a la vez ideal y real. Propiamente es un constructo mental, pero está fundado en la realidad. Y en esto no me creo innovador. Es una tradicional tesis escolástica: «Tempus est ens rations, cum fundamento in re». Se funda en la duración, la sucesión y

<sup>29</sup> Ibidem, p. 403.

<sup>30</sup> Hermann MINKOWSKI, «Raum und Zeit» (Conferencia a la 80ª Naturforscherversammlung, Köln 21 Sep. 1908), *Phys. Zeit*, 20 (1909), 104-111; cf. p. 104.

la simultaneidad, que percibimos constantemente en nuestra experiencia interna y externa. Pero propiamente es un constructo mental, en cuanto que, a partir de esas experiencias, concebimos el tiempo como un marco universal, como aquella «escala» de ordenación cronológica de todos los sucesos. Y en ese marco realizamos nuestras objetivaciones perceptivas.

Pero creo que no podemos ignorar la revolución conceptual einsteiniana de esos últimos ochenta años. «El tiempo sólo —como decía Minkowski— ha de sumergirse totalmente en las tinieblas», y nuestra objetivación ha de fundarse en una alianza de tiempo y espacio. Creo, con Einstein, que no hay razón, ni apriorística ni experimental, para suponer que entre dos sucesos cualesquiera se da simultaneidad o anterioridad o posterioridad absolutas. Hay muchos sucesos (los que pueden transmitirse un mensaje sin superar la velocidad de la luz) que pueden influirse como causa y efecto, y su ordenación cronológica es absoluta. Pero para los demás tal ordenación es totalmente relativa al movimiento del observador.

Repitamos la analogía. Nadie defenderá que los objetos de nuestro mundo puedan ordenarse absolutamente en una forma espacial bidimensional. Porque, por más que nuestra visión sea siempre bidimensional, en nuestro estadio infantil de mirón y palpador, aprendimos a captar a través de ella la tridimensionalidad de nuestro mundo. Pues yo diría que si, en una generación futura, se diera un adiestramiento en naves espaciales con posibilidad de moverse a velocidades comparables con la de la luz, esa generación abandonaría espontáneamente toda idea de una forma temporal, independiente del movimiento del observador.

Esta revolución conceptual nos obliga a reinterpretar el idealismo kantiano. Cabrá decir, a la Ernst Cassirer, que la forma pura objetivante es espacio-temporal, y todo sigue igual. Pero el problema es descubrir que tal forma no es *a priori* para nuestro entendimiento, sino fruto de una experiencia física profundizada durante siglos. Una experiencia ciertamente racional, que no cabe calificar, con algunos epistemólogos evolutivos, de *a priori* respecto al individuo, y *a posteriori* respecto a la especie humana. Tal revolución patentiza más bien que elementos básicos de nuestro ser están enraizados en la cultura humana.