

CAPITULO V

NOCION DEL MOVIMIENTO

§ 20.—EL MOVIMIENTO COMO CONJUNTO DE TIEMPO Y ESPACIO

(El movimiento como único signo del mundo — nuestro espacio y nuestro tiempo más viejo que nuestros movimientos — el espacio de la materia y de la luz — el principio de Galilei)

Tiempo y espacio se confunden en el movimiento, que es un cambio de posición en el tiempo. Sin el espacio no habría movimiento (la velocidad sería nula) y sin el tiempo no habría movimiento tampoco (la velocidad sería indefinidamente grande, lo que es imposible, aunque se ha creído, sin decirlo expresamente, que la gravedad obraba de este modo).

El movimiento presenta por eso ya en sí un conjunto de espacio y tiempo y para averiguar si lo real es este conjunto o sus dos factores aislados, es de principal importancia recordar que *todo* cuanto sabemos del mundo, lo hemos aprendido por movimientos. Veremos más tarde que será mejor definir estos movimientos como cambios de energía, pero es indudable en sí el hecho de que nuestros sentidos son meramente afectados por movimientos: palabras, señas ópticas o táctiles son imposibles sin ellos; para gustar u oler, son igualmente necesarios; el calor, la electricidad y las varias radiaciones son movimientos y serían imperceptibles sin ellos. *Nuestra realidad es la de los movimientos*; todo lo demás lo conocemos solo indirectamente. Por eso debía parecer una obligación lógica el dar realidad, en primer término, al movimiento, es decir, al conjunto tempo-espacial.

Algo semejante sucedió en verdad. En la esfera lógica, la mecánica, la doctrina del movimiento, parecía la base de toda la física y se creyó por un tiempo que con ella se explicaría todo. Tal

explicación hubiera sido posible en un comienzo; si en realidad fracasó, es debido a que el hombre no comprendió bien el movimiento. No vió en el movimiento, esto es, en el cambio de energía, el verdadero elemento del mundo, sino que cometió el error original, de dividir el fenómeno primordial del movimiento en dos componentes, en espacio y tiempo (y la energía en masa y fuerza lo que trataremos en el cap. VIII). Estos componentes nos parecen la realidad misma y están tan arraigados, que nos resulta casi imposible el abstraernos de ellos. Hoy en día no podemos representarnos lo que es un movimiento en sí, como cosa elemental, real y primitiva; forzosamente lo componemos de sus dos partes, y con ellas el mundo resulta inexplicable.

¿Por qué el hombre ha cometido tal contrasentido? — ¿Por qué se ha creado imágenes de cuya realidad no tiene ninguna noticia directa, y por qué ha descuidado lo que le era próximo y verdaderamente dado? Primeramente debe recordarse que el hombre no ha creado nada, sino que quien ha creado es el animal, del cual tiene sus nociones por herencia, y en segundo lugar esto se explica porque el llamado antropomorfismo es más viejo que el antropos. Era ya para los animales una necesidad innata el ver en el mundo algo semejante a lo que creían ser ellos mismos, es decir cuerpos, cosas concretas; y un movimiento les pareció algo abstracto. Estas dos palabras, abstracto y concreto, no tienen ningún sentido físico, significan solo que nuestra realidad sensorial tiene que ser palpable. En virtud de esta inclinación innata, el hombre lo ha personificado todo; sus dioses eran personificaciones de las energías y su espacio era una personificación concreta del movimiento abstracto. No podemos esperar que el animal fuera más inteligente. Como el primitivo fiaba más que en las energías, en sus dioses, considerándoles creadores del mundo y no creados por su fantasía concretófila, como el moderno se fía más que en la ciencia, en su sensación espacial, y no puede ver por eso que tiempo y espacio no sean más que imágenes fantásticas de la realidad del movimiento, —lo mismo la amiba era amibocéntrica y fiándose en sus sensaciones más que en la ciencia (lo que para ella era aún natural!) ha creado estas formas de nuestro conocimiento que desde entonces quedaban indestructibles. Y para la amiba era además una necesidad; pues su espacio y su tiempo no eran los productos del movimiento, eran simplemente sensaciones de su vitalidad, que consistía en nociones absolutamente subjetivas, sin ninguna relación con la realidad. (Ver § 11). Pero con estas primeras nociones quedaban ya fijados tiempo y espacio como realidades absolutas de las

cuales los descendientes hasta nuestros días no tenían ninguna necesidad de liberarse, pues cuando más tarde los movimientos comenzaron a desempeñar su papel en la historia de los organismos, parecieron forzosamente secundarios, tuvieron que conformarse al tiempo y espacio ya existentes. El movimiento era lo nuevo, y lo nuevo tiene siempre dificultad para imponerse — en este caso fueron necesarios unos cien millones de años. Se comprende ahora mejor por qué he hablado del espacio y del tiempo amíbcos—ellos no son explicables de otra manera que por un ser sin ojos y extremidades, — son las nociones propias de un pedacito de sustancia mucosa organizada.

Esta noción amíbcica del espacio podía durar tantos años porque la noción posterior del espacio era siempre restringida: no provenía de la totalidad de los movimientos, sino exclusivamente de los movimientos relativamente lentos de la materia ponderable. Esta limitación era el gran obstáculo para la formación de un verdadero concepto del espacio, porque ni animales ni hombres podían conocer las otras propiedades que estuviesen eventualmente acusadas por el movimiento rapidísimo de la luz.

Esto, naturalmente, no significa que el espacio tenga dos diferentes clases de propiedades. Como en la naturaleza en general, también en el espacio todo está relacionado entre sí, y en cada uno de sus fenómenos debe estar incluido virtualmente ya lo demás, pudiéndose solo poner en duda el hecho de que llegemos a disponer de aparatos bastante delicados para verlo todo en todo. Hoy sabemos que no lo hemos visto todo, y sabemos también la causa: la laguna entre la velocidad de la luz y las otras velocidades es demasiado grande, y como la perceptibilidad de las propiedades depende de la velocidad, aquellas calidades del espacio que se manifiestan tan evidentemente con la luz, dan con los movimientos corporales diferencias tan mínimas, que nuestros órganos — los naturales como los artificiales — deberían ser millones de veces más aguzados para poder observarlos! También para el futuro hay escasa esperanza; aún por mucho tiempo tendrá que bastarse con los experimentos electro-ópticos y en la materia con algunos casos excepcionalmente favorables, como el de Mercurio.

No se sabe bien por qué los cuerpos materiales (del polvillo apenas visible hasta los astros mil veces más grandes que nuestro sol) nunca se mueven más rápidamente, en relación a la luz, que una babosa en relación a un tren. Cierto es que ni en el cielo ni en la tierra se ha podido observar jamás una velocidad interme-

dia. ⁽¹⁾ El verdadero límite del movimiento material no está determinado, siendo sin duda las velocidades cósmicas, las más grandes que existen, aún mal conocidas. Como término medio se ha elegido la velocidad de la tierra, para la cual el cociente, que se ha acostumbrado a designar con β , tiene justamente el valor de un diez milésimo.

$$\frac{\text{velocidad material}}{\text{velocidad de la luz}} = \frac{30 \text{ km. p. seg.}}{300\,000 \text{ km. p. seg.}} = \frac{1}{10\,000}$$

El “*nuevo espacio de la luz*”, o mejor dicho, las nuevas propiedades acusadas por ella, continuaban forzosamente inaccesibles hasta que la luz misma las esclareció. Por eso la teoría de la relatividad, este ensayo de adaptar al “viejo espacio material” el “nuevo óptico” no era realizable antes de que se conociera cómo se comportaba la luz con respecto al espacio. La determinación de su velocidad unos siglos antes era el primer paso; el método de medir con ayuda de las franjas de interferencia, el segundo, que se daba hace unos decenios. La nueva teoría no venía por contingencia en nuestro tiempo, sino subordinada al desarrollo ordenado del saber humano: imposible hace un siglo, es hoy día una necesidad.

Lo esencial era saber cómo se combinan los movimientos materiales con los de la luz. Conociendo sólo las combinaciones en el mundo corporal, se creía que con la luz debía suceder lo mismo. Esto era un error; un error inevitable, sobre el cual se fundaba — también inevitablemente — el erróneo concepto del espacio que ingenuamente se creía absoluto.

Pero cuando se conocieron un poco mejor las leyes del movimiento (gracias a los trabajos de *Galilei*) se vió bien pronto que con respecto a este absolutismo algo no estaba en orden. Se hubiese podido descubrir en este momento la relatividad de nuestros conceptos espaciales y temporales; pero ellos estaban tan bien cimentados — inconscientemente por las amibas y conscientemente por los filósofos — que nadie osaba tal atentado; por eso se buscaba una escapatoria relativando los movimientos. Es este el célebre principio de la relatividad de las velocidades de *Galilei*. Vamos a ver en qué consiste.

(1) Si se hace abstracción de los rayos canales de los cuales es aún dudoso que consistan en moléculas materiales o en átomos inmateriales. Las más grandes velocidades cósmicas que se han observado son las de los cometas en su perihelio. El cometa 1843 I tenía una velocidad de 560 km. por segundo (?)

Vista desde la tierra, la bala va hacia el Sur con una velocidad de 1000 metros (línea b); vista desde la luna, la rotación terrestre desvía la bala, y ella va un poco más rápido (1,109 km.) al S.S.E. (línea b,e); vista del sol se debe añadir aún la trayectoria de la tierra y resulta la línea b,e,t, 32 km. al E.S.E. y vista de otra estrella, todo esto se combina con el movimiento del sol: la bala al partir del cañón va en un ángulo casi recto al Este con una velocidad de 49 km. p. seg. (línea b,e,t,s.). Estos son los movimientos conocidos. Pero ¿quién sabe si la línea en la dirección b,e,t,s, es el verdadero camino? ¿No se moverá acaso por el espacio todo el sistema de la vía láctea? Pues este espacio inmóvil es una hipótesis, que no tiene por base real más que nuestros conocimientos fortuitos de los movimientos cósmicos y que cambia con cada aumento de los mismos; es un residuo de anteaer cuando la tierra era el verdadero firmamento, y cada movimiento relativo a ella un movimiento absoluto.

Lo curioso es que la velocidad que proviene de la pólvora, tan insignificante cinemáticamente con respecto a las otras, es la única que tiene eficacia; pues los efectos mecánicos del movimiento rápido por el espacio, no difieren en nada de los que resultarían si la bala se hubiese movido con su propia velocidad en tierra firme: bala y animal han andado sus cincuenta kilómetros casi paralelos antes de encontrarse en la muerte de la bestia. Las componentes paralelas se anulan una a otra, y no provocando ningún efecto que pudiera revelarlas no existen, por así decirlo. Así como dos corredores chocándose en plena carrera paralela apenas lo sienten, corriendo en dirección contraria, con velocidad semejante, se matarían al chocar.

Unicamente la diferencia de dos movimientos, o dicho con otras palabras, su movimiento relativo produce efecto. Tal principio de la relatividad es general; nadie podrá jamás distinguir si se mueve en compañía de su ambiente o si todo se para, pues todas las leyes físicas son las mismas, y permanecen invariables por una translación uniforme.

Esto parece tan evidente, que sobra la deducción matemática, aunque sin embargo es muy simple también: una fuerza es proporcional a la aceleración, es decir al *cambio* del movimiento o a la diferencia de dos velocidades. Y como tal diferencia queda igual para tantas velocidades comunes como se adicionen ($53 + 50 = 3 + 100 = -47 + 150 = 103$) las fuerzas, y con ellas toda la físicas, permanecen también invariables. La bala, el animal, el fusil y toda la tierra se han movido ya antes del tiro con una velocidad de

49 km. por el espacio y conservan la misma velocidad después, lo único que cambia, y que puede producir fuerzas y medirse, es el tiro.

Esta ineficacia de los movimientos comunes nos da la certidumbre de poder construir una física perfecta y completa solo con ayuda de movimientos relativos. Gracias a este *principio clásico de la relatividad* podía ya *Galilei* hallar sobre la tierra en movimiento, las mismas leyes que *Newton* ha calculado para el espacio en reposo.

Más el principio no vale rigurosamente. Hay que añadir, según la nueva teoría de la relatividad, algunas correcciones, porque el movimiento común tiene cierta influencia que, prácticamente nula en los movimientos materiales, es bastante grande aproximándose a la velocidad de la luz. Según el viejo principio, la misma fuerza que da a un cuerpo en reposo la velocidad de un metro por segundo, daría al cuerpo que se mueve ya con velocidad cósmica (30 000 m. p. seg.) la velocidad de 30 001 m. p. seg.; mientras que en verdad, en el último caso la fuerza necesaria para este efecto debería ser 0,000 000 000 15 mayor.

Más importante es otro defecto: el principio valía solo para una translación uniforme! La historia de esta restricción es bastante interesante. *Galilei* decía simplemente que *en un sistema de cuerpos, animados por un movimiento de translación, toda fuerza que actúe sobre uno de ellos, le imprime con respecto de los demás el mismo cambio de posición que le imprimiría si el sistema estuviera en reposo.*

Se ve que *Galilei* habla aún, en forma general, de una translación cualquiera, sin limitarse a las uniformes. Esta limitación la introdujo *Newton*, creyendo y sosteniendo que era posible distinguir entre una aceleración *absoluta* que producía fuerzas y una aceleración *relativa* que no las producía.

Tales fuerzas aparecen en la *aceleración rectilínea*, donde ellas se hacen sentir prácticamente por la dificultad de comenzar o terminar un movimiento, p. ej. el de un tranvía en los rieles; y en los *movimientos rotatorios*, p. ej. si se arrojan piedras con una honda.

Estas dos fuerzas — prescindiendo de lo que podían ser en realidad — son ciertamente idénticas; ningún físico duda ni puede dudar de ello. Sin embargo tienen muy diferentes nombres también en los libros de física: la *resistencia* de inercia y la *fuerza* centrífuga.

Esta diferencia y casi opuesta denominación de fuerza y re-

sistencia, se explica por la reminiscencia del modo cómo estas fuerzas se han presentado a nuestros sentidos. La fuerza centrífuga se usaba exclusivamente para *producir* trabajo; mientras que se sentía la “resistencia de la inercia” siempre como *impedimento* de un trabajo: se creía en ella si se necesitaban más fuerzas para iniciar un movimiento que para continuarlo después; pero no se creía en ella, sino en la “fuerza viva” si un movimiento tenía un efecto como el efecto destructor de una bala. Naturalmente, los físicos sabían que las llamadas fuerzas, resistencias y energías eran lo mismo con signos diferentes. Pero el hecho de que se hayan dado dos nombres a una misma cosa, prueba la influencia de la ilusión sensorial. Ella era para *Newton*, sin duda, incomparablemente más fuerte que para nosotros, pues no conocía el ferrocarril, ni el ascensor, ni otros de los actuales medios de locomoción rápida que nos han procurado tantas nuevas sensaciones. Nuestros contemporáneos tienen ya la experiencia de que si un ascensor se para o comienza a moverse, las sensaciones son comparables entre sí; y comparables también con lo que se siente en la plataforma de un tranvía pasando por una curva pronunciada. *Newton* nunca había sentido todo esto; para él, las consecuencias prácticas de sus fórmulas eran en muchos respectos tan abstractas como lo son para nosotros las fórmulas de *Einstein*. Sin eso sería inexplicable la razón por la que *Newton*, para comprobar el espacio absoluto por la aceleración, no habla del movimiento acelerado rectilíneo, sino solo del curvilíneo. ¿Será la causa de este error el hecho de que *Newton intuitivamente* no había ya concebido sus mismas leyes o que al menos en aquel momento no las tenía presentes? Si se hubiese preguntado si en un movimiento rectilíneo acelerado las fuerzas de inercia dependían de un movimiento relativo o absoluto, hubiera ya encontrado el problema del ascensor acelerado, que *Einstein* ha tratado después y que es uno de los fundamentos de su nueva teoría de la gravedad (ver § 45).

Para saber si una rotación absoluta tiene efectos o no, *Newton* ha hecho el célebre experimento del vaso de agua. Si un vaso con agua, puesto a la manera de la fig. 39 y torcido el cordón, se suelta, primero comienza a girar el vaso (quedando el agua en reposo y su superficie horizontal); poco a poco gira después el agua también formando una superficie parabólica, debida a las fuerzas centrífugas. Ahora bien, concluye *Newton*, esta parábola no se ha hecho en el comienzo, cuando el vaso giraba y el lí-

quido no, cuando por eso, la velocidad del agua relativa al vaso, que constituye su ambiente, era máxima. Al contrario, la parábola se ha formado cuando vaso y agua giraban con la misma velocidad, cuando por tal causa el agua no tenía ninguna velocidad relativa a su ambiente, pero sí una gran velocidad absoluta. De aquí concluye, que las fuerzas centrífugas son debidas al movimiento absoluto. Este movimiento absoluto o lo que es idéntico, el espacio absoluto de *Newton*, que “permanece siempre igual e inmóvil merced a su naturaleza y sin referencia a un objeto exterior”, tiene como única razón de ser la de necesitarse para la explicación newtoniana de las fuerzas centrífugas en general y de este experimento en especial. Sin embargo la interpretación del experimento es defectuosa.

Con todo el respeto que se debe al ingenio de *Newton*, su conclusión nos parece hoy sencillamente caprichosa. No comprendemos cómo el descubridor de la influencia de los planetas entre sí, no ha visto que el “ambiente” del agua no es solo el vaso aislado, sino todos los otros objetos también, especialmente la tierra, cuya influencia es millones de veces más grande! Es ilógico hablar de una influencia o relación del vaso y descuidar la de la tierra. Se confunde la influencia de contacto, el roce, con el movimiento relativo, y él que había demostrado que las fuerzas que hacen caer la manzana y girar la luna son las mismas, olvida evidentemente la posibilidad de que aquí las fuerzas a distancia podrían obrar también.

Sin embargo, aún cuando *Newton* no hubiese olvidado la influencia de la tierra, el resultado no habría sido más positivo: no habría podido concluir en la existencia del espacio absoluto; pero la verdadera relación no la hubiese hallado tampoco. Este misterio no se revela a nadie que no pueda acercarse a él con la gran velocidad de la luz!

Más tarde los físicos se preguntaban si no sería posible rela-

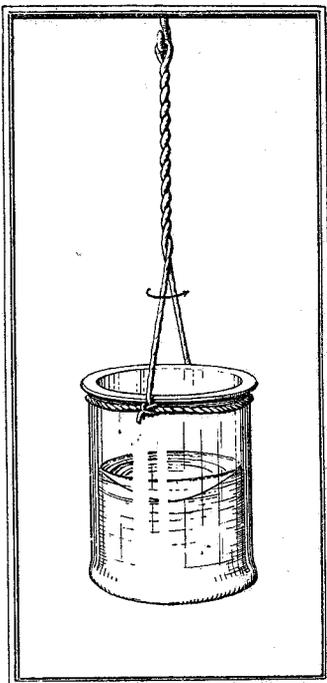


Fig. 59
El experimento de Newton
para probar el espacio absoluto

cionar la parábola del agua en el vaso en especial, y las fuerzas centrífugas, o de inercia en general, con la presencia de las masas lejanas que bajo forma de estrellas llenan el espacio. Entre ellos *Ernesto Mach*, se ha ocupado mucho de la cuestión y había postulado ya un "principio de relatividad universal" que abrazaba también los movimientos acelerados, pero no alcanzando a hallar la fórmula quedaba su ensayo tan solo como un postulado de lógica, que no sabía convertir en un hecho físico.

Pero un día u otro el postulado de *Mach* debía cumplirse, por ser un postulado lógico. Si el principio de la relatividad era un verdadero principio de la naturaleza, debía valer para todo, debía ser universal!

Esta universalización la ha realizado *Einstein*, demostrando:

Primero: que debían hacerse correcciones a nuestras imágenes sensoriales de tiempo y espacio para que todos los movimientos uniformes — incluidos los de la luz — obedezcan al principio de la relatividad (esta primera generalización se llama *teoría especial*, o *restringida* de la relatividad, porque hay una generalización más amplia).

Segundo: que debían hacerse correcciones a toda la realidad sensorial (incluso a nuestras imágenes sensoriales de las fuerzas y las masas) para que podamos comprender las leyes absolutas, eternas y omnipotentes que valen para todo, comprendidos los movimientos acelerados (la que es la *teoría general*).

Este desarrollo histórico explica los diferentes nombres de las partes de la nueva teoría. Para comprenderla bien no deben mirarse ni en la clásica ni en la nueva teoría de la relatividad solamente las partes negativas que han asustado tanto a los que no son físicos. A los físicos, acostumbrados a la abstracción, les basta la fórmula, a los otros no; ellos quieren algo de positivo. Ahora, ya la teoría clásica de la relatividad no consiste solo en la imposibilidad de constatar más que movimientos relativos, sino que tiene también una parte positiva que nos da la seguridad de que son invariables al menos las leyes del movimiento material. Examinando el viejo principio bajo este punto de vista positivo, su generalización, la nueva teoría, aparece por sí mismo como fenómeno positivo, que nos garantiza, ya en su forma restringida, la invariabilidad de la mayor parte de las leyes, (leyes ópticas y electromagnéticas) y de todas en su forma general (también las leyes de la gravitación). Este contenido positivo es ciertamente lo más importante de la teoría.

Pero en la historia del principio de la relatividad se ve otra

cosa más. *Galilei* habla de él en forma general; *Newton* lo limita a las traslaciones uniformes; más tarde, basándose en fenómenos ópticos y electromagnéticos la validez del principio fué limitada aún más. Pero siempre, aún en su forma más restringida, guardaba su viejo nombre “de principio de *Galilei*”, en honor del gran físico que por primera vez había hablado de él, aún cuando los hombres habían olvidado, hace ya mucho, lo que *Galilei* había dicho. De modo que *Einstein* amplificando y generalizando el concepto claro más limitado que el principio tenía en la ciencia moderna, apenas se daba cuenta de que con esto lo había restablecido en su primitiva forma general que *Galilei*, sin conocer las consecuencias, le había ya dado intuitivamente.

Así la ciencia vuelve sobre sus pasos, avanzando sin embargo siempre: la intuición de un genio (*Galilei*), rechazada por otro (*Newton*) por no haber sido comprobada, es restablecida por el tercero (*Einstein*), fundándola esta vez con fórmulas exactas. Cada uno tenía razón desde el punto de vista histórico de su tiempo, y los tres marchan en la misma dirección.

§ 22.—RELATIVIDAD Y RECIPROCIDAD

(La evidencia del principio clásico — su problema — su generalización. — la analogía entre la caída y el tiempo-espacio mismo — el universo de la luz)

La relatividad de los movimientos nos es muy familiar: ¿quién, mirando desde el pretil de un puente la corriente de un río, no ha tenido la sensación de que no es el agua sino el puente el que se mueve? ¿Quién, mirando en una estación un tren vecino al ponerse en marcha, no ha dudado de si se movía su tren? Y esta experiencia de todos los días tiene su significativa razón: no es posible conocer otros movimientos que los relativos. Se puede saber que un cuerpo se mueve con relación a la tierra, que la tierra gira con relación al sol, que el sol cambia su posición con respecto al sistema de las estrellas fijas, pero que este sistema se mueva, solo podría averiguarse, si se viese algo más allá, en relación a lo cual el firmamento se moviese.

Todo esto se comprende fácilmente; pero esta misma familiaridad con el problema nos hace descuidar sus dificultades, que no son menores que las de la nueva teoría. *Einstein* nos dice que cada observador observa distinto tiempo y distinto espacio, según su propia velocidad: cuanto más rápida ésta, tanto más largos son los

segundos, tanto más cortos los centímetros. Esto nos parece revolucionario y sin embargo no es en sí más extraño que lo que vemos diariamente, solo que se trata de otros objetos, y que lo que se ve diariamente no puede parecernos extraño por definición.

La caída de una piedra la llamamos vertical, porque cae verticalmente al suelo; la llamamos también vertical si cae en un tren en marcha porque cae también vertical al suelo del coche. Pero en verdad observamos cosas muy diferentes, pues la caída en el coche ya no es más vertical a la tierra puesto que durante la caída el tren ha avanzado.

El problema se acusa si la caída es visible de dos sistemas que se mueven diversamente; en este caso no tenemos experiencia directa del fenómeno puesto que nadie puede moverse al mismo tiempo con dos velocidades. Pero es fácil representárselo; lo que hacemos por la fig. 40.

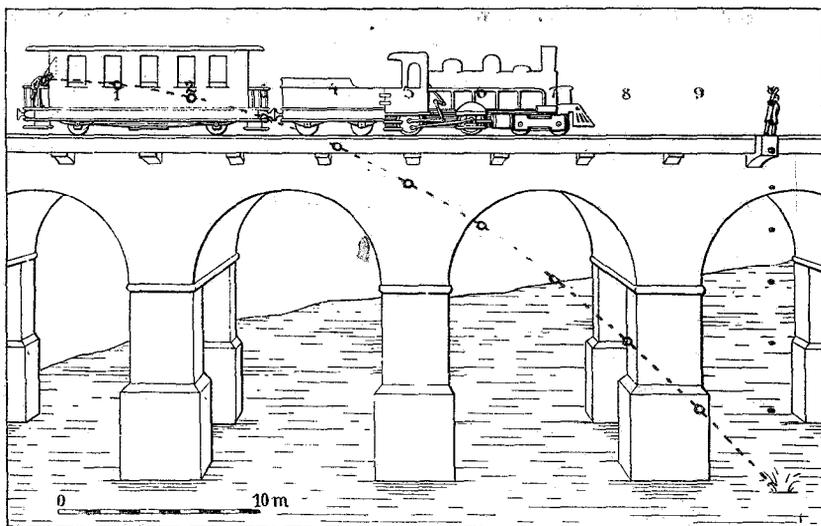


Fig: 40 — La caída de una pelota desde un tren en movimiento y desde un punto fijo (cada uno de los dos observadores ve su caída vertical, la del otro parabólica).

Ella nos muestra gráficamente dos caídas de veinte metros: una pelota, tirada al agua desde un punto fijo, cae verticalmente; tirada desde un tren, en parábola ⁽¹⁾ avanzando siempre, ade-

(1) Al menos prescindiendo del "contraviento" relativo, que, causado por el movimiento del tren, arrastra los objetos, más o menos hacia atrás. Esto cambiaría la curva, pero haciendo el experimento con un viento que sople en la dirección y con la velocidad del tren, la pelota cae según la parábola de la figura.

más de su caída, lo mismo que el tren. Se dice que ella conserva el movimiento que tenía ya antes cuando estaba en reposo relativo en el tren, lo que está designado en la figura por las cifras, que marcan las consiguientes posiciones del observador en el tren, y que son siempre verticales a los puntos correspondientes, en que está en cada momento la pelota. Resulta en todo caso que el hombre en la plataforma del tren, viendo la pelota siempre por debajo suyo, habla de una caída vertical, lo mismo que el hombre que está de pie sobre el puente llamará la caída de su pelota también vertical: mientras que a cada uno de ellos la caída del otro le parece una parábola. Lo mismo es aplicable, naturalmente, a todas las caídas y a todos los movimientos.

Instintivamente el hombre, geocéntrico por limitación forzada, llamará a la trayectoria de la piedra tirada desde un punto fijo la verdadera línea recta, porque es recta con respecto a la tierra. Pero esto no tiene ningún sentido, pues la misma figura de la caída desde el tren, solo con otras relaciones de tamaño, podría dibujarse suponiendo la tierra como un tren que pasa por el espacio, sea este el espacio absoluto de *Newton* o cualquier otro, lo cier-

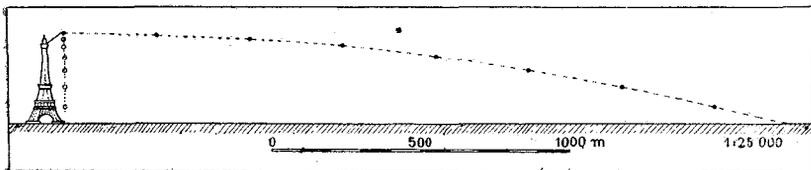


Fig. 41 — La caída desde la torre Eiffel vista desde la luna

to es que la caída no es recta, pues si el punto fijo del puente está situado sobre el ecuador, en los dos segundos que necesita la caída, la tierra ha girado por debajo de la caída casi un kilómetro. La figura 41 muestra cómo sería vista por un telescopio lunar una caída desde la torre Eiffel. En los ocho segundos que necesita la caída, la tierra se ha movido casi dos kilómetros y medio (en París el movimiento giratorio es solo $2\frac{1}{3}$ del ecuatorial). Y vista desde el sol la caída tendría aún otra forma tridimensional, y otra, vista desde Sirio! — y del espacio absoluto. ¿Quién sabe?

Pero ¿qué es la caída en verdad? ¿Es una línea tridimensional, una parábola o una recta? Tal pregunta parecerá superflua a la mayoría de los hombres, los que dirán que *según la posición del observador la caída podrá llamarse parábola o recta; en verdad es una caída según las leyes físicas!* Ahora bien, la misma contestación se puede también dar a quién pregunta ¿qué tiempo es el verdadero? La única diferencia está en que, en el caso de la caída

alterada, el hombre, acostumbrado al asunto, se conforma con la contestación, y en el caso del tiempo, al cual no está, no puede estar acostumbrado, habla de revolución. En el fondo es lo mismo; cada uno observa otra cosa, otra caída, otro tiempo y otro espacio, y cada uno llama a su caída recta o verdadera y a la del otro falsa (curva). La analogía es tanto más grande cuanto que cada uno ve la caída, el tiempo, el espacio del otro exactamente, como el otro ve la caída, el tiempo y el espacio del uno. La caída es un ejemplo especial de un fenómeno general. El hombre del tren y el del puente (o en general observadores en estados variables de movimiento) ven todos los fenómenos diferentes, pero recíprocamente idénticos.

En el caso de la caída esto parecerá a todo el mundo evidente; en el caso del tiempo, no; los otros casos son aún desconocidos. Pero reflexionando unos instantes sin prejuicio, todos los casos nos parecerán iguales: — ¿cómo sería posible que un espectador en movimiento viera algo del mismo modo, que lo ve quién no se mueve, o se mueve de otra manera? Es evidente que deben verlo *todo* bajo diferentes aspectos, todo, incluso el tiempo y el espacio! Espero que después de estos minutos de profunda meditación el amable lector se haya compeñetrado de la necesidad o al menos de la probabilidad de tales diferencias y ahora acaso preguntará: ¿por qué no se ha dado cuenta hasta ahora de tal cambio de tiempo y de espacio? A esta pregunta, mucho más discreta que la anterior, se puede contestar que esto es así, porque las correspondientes diferencias del tiempo y del espacio en la práctica de la vida son mínimas, son proporcionales o al menos relacionadas a la velocidad del movimiento, y ya sabemos que lo que llamamos rápido, lo es solo subjetivamente para nosotros, incapaces de percibir la gran velocidad de la luz directamente.

Solo por la luz vivimos, pues es sabido que solo por ella el organismo es capaz de cambiar lo inorgánico en substancia viva. *Por* la luz hemos aprendido todo lo que conocemos del universo, pues no hay otro puente entre nosotros y el cielo que los rayos luminosos; ellos nos sirven de mensajeros; usándolos con la simple vista o con telescopio hemos descubierto el espacio inmenso del firmamento estrellado y por su disposición en el espectro hemos descubierto el velo de los misterios que envuelven a los astros más remotos.

Pero con esto el papel de la luz no había terminado, pues *de* la luz conocíamos aún poca cosa hasta los últimos años. No porque la óptica no estuviese bien desarrollada, sino por faltarnos un funda-

mento: el conocimiento de su marcha. Hoy se sabe también esto, y las leyes de la marcha de la luz, al comienzo incomprensibles, contradictorias aparentemente no solo con la vieja física sino también con la lógica, están ahora subordinadas a ella y nos han mostrado un nuevo aspecto del universo, que nos ha probado, por una parte que todo lo que creíamos saber como cierto de este mundo, era un engaño de nuestros sentidos, pero por otra parte nos ha mostrado los íntimos lazos—las leyes—que unen en verdad los sucesos del mundo..

“En el comienzo érase la luz”, así dicen el Génesis y los Eddas escandinavos, y ya sabemos que en verdad la luz era indispensable. Profunda palabra, pues la luz, naturalmente la del ojo simple, ha creado el viejo mundo sensorial. Pero en el comienzo del nuevo mundo intelectual érase la luz también; solo que era esta vez la luz del interferómetro. Misteriosa luz en que duerme latente toda la verdad; solo que durante bastante tiempo faltó el Sigfredo que podía marchar por el fuego para sacarla.

La teoría de la relatividad nos ha demostrado una vez más que de la luz nos viene todo — vida y ciencia — y que tenemos el derecho de llamarnos hijos de la luz! Era una honda e instintiva adivinación de la verdad que todos los pueblos jóvenes veneraran en primer término al sol creador. Su signo místico, — los dos ejes cruzados de la rueda solar, la cruz gamada, la svástica, el martillo de Tor, el filfut o la llave del Nilo,—fué en un tiempo adorado en todos los países, era el signo internacional de una humanidad hermana que había comprendido su significación cultural, era el símbolo de la vida.

Hoy vive aún, cambiado en su forma, alterado en su sentido, pero grande y poderoso en la cruz cristiana y el nimbo de la aureola del crucificado recuerda la corona radiante del padre sol; pero hay un agregado: el hombre está fijado a la madera, no es más el signo de la liberación de las sombras por la luz; y la idea de la rueda que gira eternamente, conduciendo a la humanidad a progresos siempre crecientes, vive únicamente en la promesa de resurrección.

Su forma original de svástica ha degradado en una mascota. Da vergüenza y lástima que este signo sagrado de la razón y de la vida se haya trocado por obra de los obscurantismos en signo de muerte, y que en vez de brillar en el píreo-altar sea colocado en el casco de acero! (1)

(1) A las tropas alemanas, que en las provincias del Báltico luchaban

§ 23.—LAS DIFICULTADES DE DETERMINAR EL MOVIMIENTO
DE LA LUZ

(La medida cósmica — la contingencia de esta oportunidad — la necesidad de medir la ida y vuelta en conjunto — el retraso longitudinal (avión) y el retraso transversal (nadador) — los valores numéricos de β y β^2)

Para coordinar y combinar este nuevo mundo de la luz a nuestro mundo material, era necesario, como condición previa, saber de qué modo el movimiento de la luz se combinaba con los de los cuerpos materiales. La completa ignorancia de estos datos físicos era la causa de nuestros errores con respecto al tiempo y al espacio; pues sensorialmente la velocidad de la luz, que llamaremos desde ahora siempre "c", era considerada indefinidamente grande; aún hoy en día sabiendo que no lo es, se usa prácticamente como tal: la luz nos sirve como señal que no necesita tiempo para propagarse. Para estudiar la propagación de los sonidos se dispara un cañón, digamos p. ej. a una distancia de un kilómetro; y observando que el estampido viene tres segundos después del fogonazo concluimos que los sonidos marchan con una velocidad de 330 metros por seg. En verdad el error que cometemos descuidando el tiempo que necesitaba la luz para recorrer este kilómetro es mínimo, siendo solo de tres millonésimos de segundo, como consecuencia de la velocidad fabulosa de la luz, que recorrería el camino alrededor de la tierra, para el cual los estado-unidenses en avión han necesitado casi seis meses, quince veces en un segundo. Claro que *Galilei* no podía medir tal velocidad, con sus linternas; y por vía directa en la tierra ningún otro la ha medido tampoco.

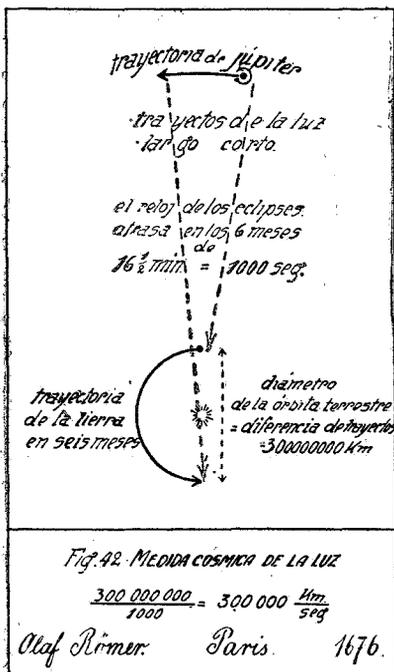
Eran necesarias distancias incomparablemente más grandes: viendo que el reloj celeste, que Júpiter lleva consigo en la rotación regular de sus satélites, atrasaba cada vez 16 $\frac{2}{3}$ minutos en los seis meses, mientras la tierra se alejaba de Júpiter por el diámetro de su órbita (= 300 millones km.) recuperándolos después en los seis meses siguientes de la aproximación, el astrónomo

con aprobación de Francia contra la Rusia soviética, era dada como insignia la svástica, que debían pintarse con tiza en sus cascos, porque claro, los franceses no querían al águila alemana. Por una de las ironías de la historia los nacionalistas, no sabiendo naturalmente nada, hicieron de esta insignia, para ellos de esclavitud, su señal de partido.

danés *Olaf Römer* concluyó que esto sucedía porque la luz necesitaba este tiempo para recorrer la diferencia de los dos caminos. (ver la fig. 42).

Römer ha medido una distancia y un tiempo; dividiéndolos obtuvo el valor de 300 000 (1). Es el método común de medir una

velocidad. De este modo tan simple e no se ha medido otra vez. Para medir cualquier velocidad es preciso conocer el momento en que el objeto (la luz) pasa por dos puntos cuya distancia es conocida. El observador puede estar, naturalmente, solo en un punto y por eso necesita una señal, que le indique, cuando el objeto pasa por el otro punto. En todos los casos de movimientos materiales puede servir como suficiente señal una óptica (u hoy en día una eléctrica ya que marcha con la misma rapidez); pues las velocidades materiales son, en comparación a tales señales, mínimas. Pero ¿qué señal podría usarse para medir la



luz misma, si en este caso la señal llegaría al mismo tiempo que la luz? Fácilmente se ve que de este modo no podría hacerse.

Era una feliz casualidad que el reloj exactísimo de los satélites de Júpiter (que este planeta lleva consigo como cada planeta de rotación regular), fuera legible a tan grandes distancias como consecuencia de los múltiples, casi diurnos eclipses, cuyos principios y fines son fáciles de determinar. Estos tiempos bien conocidos y reunidos en tablas, nos pueden en realidad servir como reloj y sirven p. ej. al marino, que con ellos regula su cronómetro. La luz de Júpiter lleva ya consigo la señal de la hora de su

(1) La velocidad de la luz que es hoy medida con una exactitud aproximada de un cuarto por ciento, debe fijarse entre 299 700 y 300 200 km. por seg.

salida, y como la distancia entre Tierra y Júpiter cambia regular y considerablemente todo era favorable para una medida.

Pero estas circunstancias favorables son únicas. En todos los otros casos tiene que usarse un artificio: para evitar las señales debe dirigirse, por adecuadas reflexiones, la marcha de la luz de modo que ella pase dos veces por el mismo punto; entonces la determinación del tiempo entre los dos pasajes es relativamente fácil. Tal vuelta de la luz es común a todos los métodos terrestres: con la rueda dentada de *Fizeau* (1839) y *Cornu* (1873), con el espejo rotatorio de *Foucault* (1850 y 62) y *Michelson* (1882-85), y con las franjas de interferencias de las cuales hablaremos más detalladamente, se mide siempre únicamente la velocidad media en las dos direcciones conjuntas y no se puede ver directamente si acaso la luz en una dirección va más veloz que en la opuesta.

Sin embargo, justamente esto habría de saberse, para juzgar cómo se combina el movimiento de la luz con los de los cuerpos materiales. Si un hombre camina en un tren en la dirección de la locomotora, su velocidad con referencia a la tierra es mayor que la del tren; es, según el principio clásico de la relatividad, igual a la suma de las dos velocidades; y si marcha en sentido contrario su velocidad es más lenta; pero si ha vuelto al coche donde ha comenzado, su velocidad media es exactamente la misma del tren.

Ahora la cuestión está en si la luz se comporta del mismo modo.

Tampoco esta dificultad es invencible teóricamente. El método a usar puede demostrarse con un ejemplo material, que a la vez demostrará las nuevas dificultades prácticas que resultan. Representémonos la luz marchando en el éter, como un avión que va por el aire: claro que el avión va más rápido *con* el viento y más lento si va en *contra* de él; pero, si va y vuelve con y contra el mismo viento, el tiempo total es siempre un poco más largo que si hubiese hecho el viaje dos veces sin viento. Esta prolongación del tiempo, que parecerá a muchos paradójal, se comprende fácilmente con un viento fuerte, pues si la ida y vuelta de un avión en calma muerta se efectúa en dos horas, y el viento contrario prolonga la ida sola hasta tres horas, un total de dos horas es naturalmente imposible; y si el viento es igual a la velocidad del avión, ningún avance contra el viento será posible, es decir, el tiempo necesario será infinitamente grande.

Para vientos débiles se podría creer, mirando las cosas superficialmente, que lo que se pierde en un viaje se gana en el otro y

que el resultado fuese cero, pero en verdad la pérdida es siempre mayor, cosa que se demuestra con un simple cálculo.

Llamando la velocidad del avión (luz) $= c$
 y la del viento $= v$;
 la velocidad con el viento es $= c + v$
 " " contra el viento es $= c - v$,

y como el tiempo necesario para recorrer una distancia es inversamente proporcional a la velocidad,

el tiempo para andar con el viento $= \frac{1}{c+v}$
 " " " " contra " " $= \frac{1}{c-v}$

y su suma, el tiempo total:

$$= \frac{1}{c+v} + \frac{1}{c-v} = \frac{c-v+c+v}{(c+v)(c-v)} = \frac{2c}{c^2-v^2}$$

Si no hay viento (es decir si $v = 0$) el tiempo total es necesariamente:

$$\frac{2c}{c^2-0} = \frac{2}{c}$$

Ahora se pueden comparar estos dos tiempos y se puede escribir la proporción entre el tiempo de ida y vuelta con viento (t_c) y el tiempo de ida y vuelta sin viento (t_s):

$$\frac{t_c}{t_s} = \frac{\frac{2c}{c^2-v^2}}{\frac{2}{c}} = \frac{2c}{c^2-v^2} \cdot \frac{c}{2} = \frac{c^2}{c^2-v^2} = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

lo que se puede también escribir ⁽¹⁾ en la forma

$$t_c = \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot t_s$$

es decir, la relación es siempre mayor que uno, y el aumento del tiempo, el retraso longitudinal, es proporcional a $\frac{v^2}{c^2}$ lo que es el cociente β^2 ya conocido.

(1) Según la regla para el cálculo con las potencias de cifras cerca de cero: $\frac{1}{1-\varepsilon^2} \approx 1 + \varepsilon^2$ en la cual significa ε un valor pequeño como lo es el cociente $\frac{v^2}{c^2}$. Esta regla explica porque las fórmulas de Lorentz se encuentran muchas veces en formas aparentemente diferentes.

La dificultad práctica está ahora en que este cociente es muy pequeño, si c supera en mucho a v . Ya conocemos la relación entre la velocidad de la luz (avión) y los cuerpos materiales (viento), que es en término medio igual a un diez milésimo, pero su cuadrado es solo un cien millonésimo, una magnitud mínima que, naturalmente, no será fácil determinar.

Pero el viento no viene siempre en dirección exactamente opuesta y en tales casos la diferencia es aún menor. Vamos a ver solo el caso de un viento que caiga perpendicularmente, lo que es importante para la determinación experimental de β^2 efectuado por *Michelson*. Para usar otro ejemplo, representémos un nadador

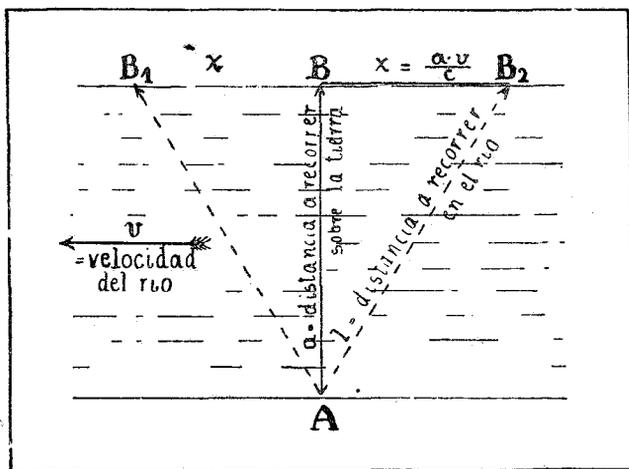


Fig. 45 — Retraso por una corriente transversal

que quiera atravesar un río y que nade con la velocidad c , teniendo la corriente una velocidad v . Si el nadador para llegar de A a B avanza en la dirección A B misma, sería arrastrado por la corriente hasta B_1 en una longitud $= x$; por eso debe ya desde un principio tomar una dirección hasta B_2 que desvíe de la corriente en un ángulo igual pero opuesto; pues será arrastrado la distancia $B_2B = B B_1$ y llegará justamente a B.

El camino $A B_2 = l$, que el nadador debe recorrer en verdad, es más largo que el camino $A B = a$, que recorre aparentemente. La relación entre los caminos a y x es igual a la de las respecti-

vas velocidades: $\frac{x}{a} = \frac{v}{c}$ y $x = \frac{av}{c}$

— 135 —

y por eso es según el teorema de Pitágoras

$$l = \sqrt{a^2 + \frac{a^2 v^2}{c^2}} = a \cdot \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$$

Para deducir el tiempo en los dos casos se debe dividir cada uno de los dos caminos por la velocidad del nadador c . Después se puede formar el cociente de los dos tiempos.

$$\frac{t_c}{t_s} = \frac{1/c}{a/c} = \frac{1}{a} = \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$$

El resultado es muy semejante al anterior, solo que el retraso transversal es proporcional a la raíz cuadrada.

Se puede ahora relacionar entre sí el retraso longitudinal (resultado del ejemplo del avión) con el retraso transversal (resultado del ejemplo del nadador) y se obtiene (expresando $\frac{v}{c}$ por β .

$$\frac{\text{retraso longt.}}{\text{retraso trans.}} = \frac{1 + \beta^2}{\sqrt{1 + \beta^2}} = \sqrt{1 + \beta^2}$$

es decir el retraso transversal es la media proporcional entre el movimiento verdadero (en reposo) y el retraso longitudinal en el

camino de ida y vuelta. Esta expresión $\sqrt{1 + \beta^2}$ que hemos aquí des-

arrollado en el momento material, donde ella será siempre averiguable fácilmente, es, como veremos más tarde, las fórmulas de transformación de *Lorentz* como así mismo la teoría de la relatividad deben explicar esta falla, claro que esta expresión vuelve en todas sus fórmulas.

En este momento nos basta, para dar una idea de qué valores se trata, la tabla siguiente:

TABLA V. — GANANCIA Y RETRASO POR EL VIENTO.

Relación de las dos velocidades $\beta = \frac{v}{c}$ del avion = c del viento = v		Tiempo necesario para recorrer una distancia				
		sin viento $\frac{1}{c}$	con viento $\frac{1}{c+v}$	contra viento $\frac{1}{c-v}$	con y contra viento $\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$	viento de lado $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
1	10	1	0,0909..	Imposible	Imposible	Imposible
1	1	1	0,5	∞	∞	∞
1	0,8	1	0,5555..	5,0	2,777.....	1,666.....
1	0,5	1	0,6666..	2,0	1,333.....	1,154 470...
1	0,2	1	0,8333..	1,25....	1,041 666..	1,020 620...
1	0,1	1	0,9090..	1,1111..	1,010 101 010	1,005 038...
1	0,01	1	0,9990..	1,0101..	1,000 100 010	1,000 050 000
1	0,001	1	0,9990..	1,0010..	1,000 001 000	1,000 000 500
1	0,0001	1	0,9999..	1,0001..	1,000 000 010	1,000 000 005

El gráfico de la figura 44 da las mismas cifras. Se ve netamente que las diferencias con y contra el viento (las magnitudes de primer orden) son aún para pequeños valores de v relativamente grandes, mientras que son despreciables para el recorrido de ida y vuelta. Si el viento es menor que el *diez por ciento* de la velocidad del avión, en la figura ya no puede verse ninguna diferencia; lo que se valorizará aún mejor recordando que la velocidad de la tierra es a la de la luz solo la *centésima* parte de *uno por ciento*, es decir el punto correspondiente en la figura daría solo en $7,5 \mu$ de la línea de un viento nulo.

Para dar un ejemplo concreto: un avión rapidísimo de 100 m. p. seg. (o de 360 km. por hora) necesitaría para un viaje de mil kilómetros, sin viento, casi tres horas. Un viento de un centímetro p. seg. (o de 36 metros por hora) añadiría a estas tres horas:

1 segundo si el viento es contrario
 $\left. \begin{array}{l} 1/10\ 000 \text{ ,, ,, } \\ 5/100\ 000 \text{ ,, ,, } \end{array} \right\}$ en la ida y vuelta $\left\{ \begin{array}{l} \text{retraso longitudinal} \\ \text{retraso transversal} \end{array} \right.$

Este suavísimo soplo atmosférico de un centímetro por segundo, prácticamente idéntico a una completa calma muerta (pues ya no mueve ningún aparato registrador y debería ser cien veces

más fuerte para que el hombre le sintiese directamente), tiene la misma relación al avión que el movimiento terrestre a la veloci-

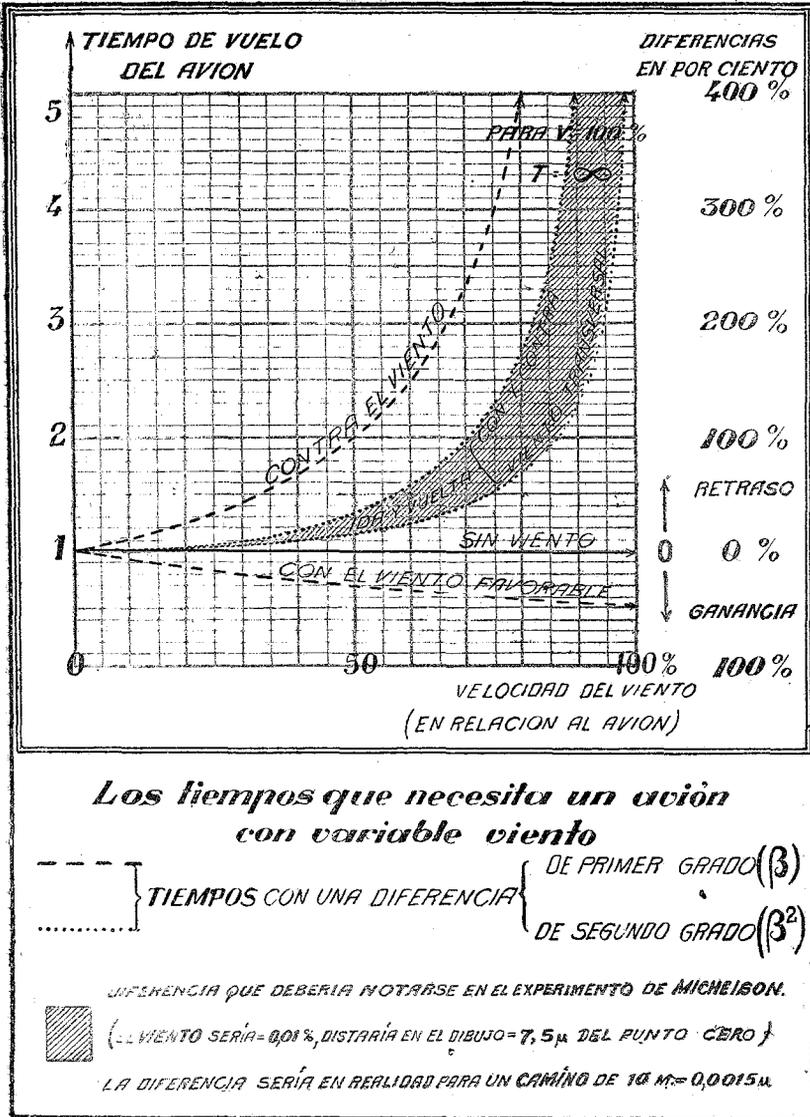


Fig. 44

La determinación de los valores equivalentes a β y β^2 en el mundo material..

dad de la luz. El retraso debido a él no estaría absolutamente fuera del alcance de las medidas comunes, pero aunque no se pueda medirle directamente podemos estar seguros de que esto es así;

pues usando un viento más fuerte será siempre fácil averiguar la ley.

Para la luz tal posibilidad de aumentar el “viento del éter” no existe. Con respecto a ella no hay más que movimientos suavísimos, y este β , un mínimo para el avión, significa el máximo para la luz. Además no hay posibilidad de medirlo, sino solo su cuadrado incomparablemente menor; porque c no se mide en un viaje singular sino solo en el de ida y vuelta.

Se ve, pues, que el problema de la luz, la base experimental de la teoría de la relatividad, tiene sus dificultades.

§ 24.—EL PROBLEMA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ Y DEL ÉTER

(La única posibilidad para medir β directamente — la aberración de la luz — el principio de *Doppler* — el problema parece resuelto — el problema del éter — los peces de la luz — el éter libre o arrastrado — la invariabilidad de c).

He hablado tan detalladamente del cociente β , para que se comprendiera bien, de qué modo se descubrió el hecho fundamental y decisivo; pues ya sabemos que el nuevo mundo nos estaba vedado hasta que se alcanzó a medir β^2 .

El que haya leído atentamente, no lo consentirá acaso. La

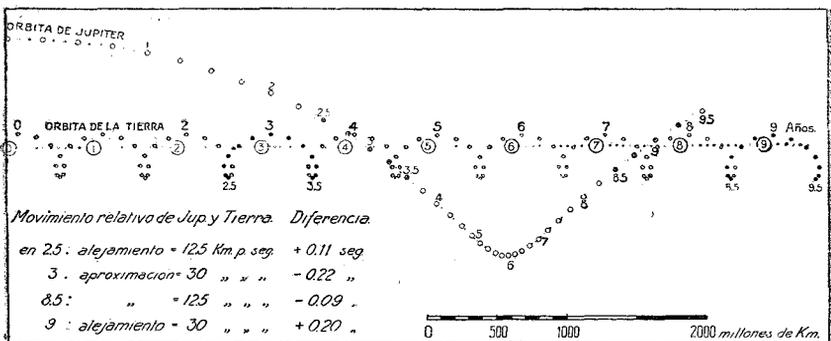


Fig. 45—La determinación de β con ayuda del reloj satelítico de Júpiter

... El movimiento de la tierra ···· el movimiento de Júpiter ○○○ órbita del sol
Con puntos gruesos son marcados los periodos favorables a la observación de β .

necesidad de medir β^2 se sigue del hecho de que en general podemos solo medir la velocidad de la luz, si ella vuelve. Pero como en el único caso de Júpiter se ha medido la velocidad directamente,

aquí debería ser posible medir β también directamente. Y en verdad esto sería posible, al menos teóricamente.

La fig. 45 muestra el camino de Júpiter y Tierra.

Se ve que cada seis años, Júpiter pasa por la órbita del sol. En esta constelación, marcada en la figura por los puntos gruesos de las posiciones trimestrales, el cambio en la velocidad relativa entre los dos planetas tiene su máximo: ella varía aquí en el lapso de seis meses de 12,5 a 30 km. por seg.; lo que debería dar — si el principio clásico de la relatividad valiese también para la luz — diferencias de unos décimos de segundos; pero estas pequeñas diferencias no se podrían observar netamente porque son cubiertas por otras mucho más grandes, pues por la variable posición de Júpiter con respecto a la tierra su reloj en cada rotación terrestre (un año) atrasa y avanza respectivamente en unos 16 minutos y en cada rotación de Júpiter, en casi una hora y media. Deberían compararse los resultados de dos consiguientes pasajes en los cuales las posiciones y diferencias (ver la figura y su leyenda) fuesen simétricas. Este método, aunque un poco circunstanciado y largo, conduciría ciertamente al éxito, si fuese posible leer tan exactamente el reloj de Júpiter. Pero esto no es posible

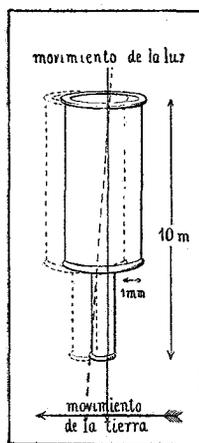


Fig. 46
La aberración
de la luz
Bradley 1725

hasta hoy; la exactitud a este respecto no basta aún. Se conocen los tiempos de rotación de los satélites hasta milésimos de segundo, pero solo contando muchas en conjunto y dividiéndolas después. En un solo eclipse, que sería necesario determinar en este caso, se cometen errores de segundos.

Esta falta de una medida directa de β se creía poderla reemplazar por otras observaciones de las cuales, como se esperaba, el coeficiente β se podía deducir también. La más vieja de estas observaciones es la de la aberración de la luz, descubierta por Bradley ya en el año 1725.

Así como la caída perpendicular de la lluvia parece oblicua a los pasajeros de un coche, lo mismo los terrícolas, recorriendo con su globo el espacio, deben ver desviados los rayos luminosos: si se ha ajustado el tubo de un antejo en la dirección verdadera de una estrella, situada perpendicularmente a la órbita terrestre, el rayo entra en el centro del objetivo y va al centro del ocular. Pero para pasar esta distancia, la luz necesita en un telescopio de

10 metros la treinta millonésima parte de un segundo, y en este tiempo el telescopio con toda la tierra se ha movido un poquito (la treinta millonésima parte de 30 km. = 1 mm.), de modo que el rayo no encuentra más el centro del ocular, sino que va un milímetro afuera: por eso debe darse vuelta al telescopio, para ajustarlo nuevamente, por un pequeño ángulo de 20,5 seg. siendo este el ángulo cuya tangente trigonométrica es igual a 0,0001.

La exactitud de medir ángulos de un tercio de minuto se había ya logrado hace dos siglos; y desde este tiempo se sabe que la luz obedece a este respecto, aparentemente, a la ley clásica.

Más instructivo parece aún otro método:

La línea sinuosa de la fig. 47 representa un rayo de ondas de una longitud de 1 cm. Si las ondas se mueven con la velocidad

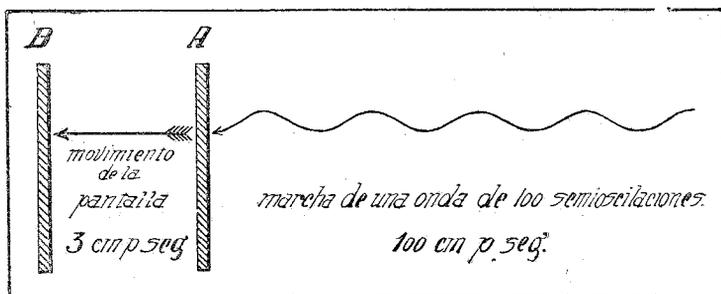


Fig. 47—El efecto de Doppler.

de un metro por seg., en cada segundo cien ondas dan contra la pantalla A; pero si ella se hubiese movido también tres centímetros en el mismo sentido (de A hasta B), las últimas tres ondas, que han pasado por el lugar A, no habrían ya encontrado la pantalla que recibiría por eso solo 97 golpes; y 103, si se moviese en sentido opuesto. Cada cuerpo movido recibe más ondas si se acerca a la fuente vibratoria, menos si se aleja: si una locomotora silba justamente al pasar en frente de nosotros, en el momento de cruzar, el sonido baja muy sensiblemente (porque las vibraciones más lentas producen un sonido más bajo).

Lo mismo vale para las ondas ópticas, solo que naturalmente las velocidades deben ser más grandes, para poder averiguar este principio de Doppler: si la tierra se acerca a una estrella, todas las vibraciones luminosas dan contra nosotros con más rapidez, y el espectro aparece por eso un poco más azul; al contrario se hace más rojo, alejándose. En realidad este cambio de color no se percibe; para eso nuestro sentido cromático es demasiado

torpe. La observación se hace con ayuda de las líneas de Fraunhofer.

La conocida línea del sodio está en verdad compuesta de dos líneas, cuyas ondas tienen las respectivas longitudes, de 0,58962 y 0,58902, es decir que varían en 1,04 por mil. Como β es un diez milésimo, la desviación del espectro es la décima parte de la distancia entre estas dos líneas que aparecen en un espectroscopio común como una sola línea. La desviación no es grande, pero para los modernos instrumentos basta ampliamente, y se ha medido la velocidad de unos millares de estrellas, de lo cual se ha determinado después la velocidad con que el sol — y con él la tierra — avanza. En un principio se mide sólo la velocidad relativa en la línea visual y no se puede distinguir, si la tierra se mueve hacia un astro, o si el astro se mueve hacia la tierra, siendo el aumento de las vibraciones en los dos casos la misma; pero si en el promedio todas las estrellas de un hemisferio se alejan y las del otro se acercan, se concluirá que es más probable que este movimiento sea debido a un movimiento de la tierra y no a uno de toda la bóveda celeste. En realidad, una presunción vale la otra y la moderna teoría las considera como por completo equivalentes.

Pero en todo caso se ha determinado por medio de la luz la velocidad relativa, y se podría pensar que esto basta para probar que la luz también obedece al principio de la relatividad. Hay aún físicos que han dicho directamente que el principio de Doppler no era más que un caso especial del principio de la relatividad, y en la demostración de la fig. 47, esto parece en verdad así: si por un movimiento de la pantalla el número de vibraciones recibidas aumenta, parece una conclusión lógica que la luz, que no es más que la suma de las vibraciones, se mueva también más rápidamente con referencia a la pantalla. Quién no quisiera concluir así, sino reservarse la posibilidad de que la luz vaya con otra velocidad que la indicada por el número de sus vibraciones, estaría forzado a suponer, que la luz cambia su número de vibraciones sólo por el movimiento de la pantalla, lo que parecería tan improbable que no es maravilloso que nadie pensase en la posibilidad de plantear esta suposición, que toca además, evidentemente, a nuestra noción del tiempo y del espacio y a ellos, ya lo hemos visto, el hombre más culto los considera intuitivamente como un "noli me tangere". Por eso creían todos que la conclusión derivada del efecto de Doppler al principio de la relatividad era puramente lógica y por eso infalible. Que esto no es así, que tiempo y espacio no son un "noli me tangere," sino únicamente una sensa-

ción, nos lo ha enseñado el análisis fisiológico. Por eso sabemos que el problema no estaba resuelto ya, y que la averiguación directa de si la velocidad de la luz cambiaba proporcionalmente al cambio del número de vibraciones, no era tan superfluo como todos pensaban. Comprobaciones superfluas no suelen interesar a los hombres y como el problema era, aún teóricamente, muy difícil, nadie se ocupaba de él. Si al fin la cuestión era experimentalmente tratada y hoy en día está resuelta, no es porque alguno haya interrogado expresamente sobre esta cuestión a la naturaleza sino accidental y casualmente, haciendo otros experimentos para saber con qué velocidad la tierra corre por el espacio absoluto, o con una expresión más moderna, cómo corre por el éter.

Aquí se encuentra el problema del tiempo-espacio con el del éter. En realidad es lo mismo: el espacio absoluto era algo que producía fuerzas centrífugas, el éter tenía aún unas propiedades más, pero, en el fondo son idénticos.

Pero ¿qué es el éter?

El éter es una suposición fingida para explicar la luz. Con el hecho singular de una gravedad, obrando y por eso también marchando por el vacío, los hombres se habían quedado, porque no se sabía nada mejor y principalmente porque no se sabía nada de la gravedad. Pero de la luz se sabía que ella consiste, ciertamente, en un proceso rítmico, con el número enorme de más o menos quinientos billones de vibraciones por segundo, (si desde el tiempo en que hay hombres en la tierra uno hubiera marchado día y noche, no habría cumplido tantos pasos como oscilaciones hace la luz en cada segundo). Ciertamente no era fácil suponer que esta manifiesta vibración se hacía en el vacío, o, lo que sería lo mismo, que el vacío vibrara. Para este proceso rítmico se creía necesario un medio, algo que vibrara. Esta suposición lógica se llamaba éter, que por completo desconocido en sí mismo, podía justamente por eso ser dotado de todas las propiedades necesarias para que fuese el adecuado medio de la luz. De sus múltiples y a veces opuestas calidades nos interesa por el momento — fuera de su omnipresencia que llena todo el espacio, así el vacío como los intersticios intermoleculares—solo la alternativa que se creía lógica, de que este vehículo de la luz debía estar en un cierto estado de movimiento o de reposo. Era el anhelo de los físicos resolver esta cuestión experimentalmente.

Como ninguna de las experiencias sobre la luz, de las cuales las más importantes están ya mencionadas en el comienzo de este párrafo, se oponía a la idea de que su movimiento estaba sujeto

al principio de la relatividad, la solución parecía fácil y ofrecía únicamente dificultades técnicas; pero nadie dudaba de que el conjunto de la materia, de la luz y del éter formaban algo análogo al hombre que marcha sobre el puente de un buque que flota en el mar. Como ya hemos visto, conociendo dos de estos tres factores, siempre se podía calcular el tercero.

El movimiento relativo de los cuerpos materiales y de la luz se creía conocer completamente por las experiencias espectroscópicas; él parecía resultar de la simple adición de las respectivas velocidades. Siendo E, en la fig. 48, una estrella emitiendo luz con su conocida velocidad de 300 000 km. por segundo tres casos parecían posibles al encontrar esta luz la tierra:

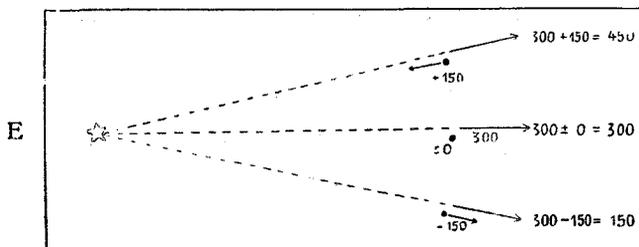


Fig. 48 — La luz de una estrella combinándose con el movimiento de la tierra

- 1) en reposo, la velocidad nos parecería igual a 300 000 km.
- 2) moviéndose en sentido inverso; las dos velocidades deberían sumarse. (Siendo la de la tierra la mitad de la de la luz, ella nos parecería igual a 450 000 km.).
- 3) moviéndose en el mismo sentido; las velocidades deberían sustraerse (nos parecería igual a 150 000 km.).

Las cosas debían ser de este modo; y si no eran así — y se sabía ya hace mucho, que no lo eran — se acusaba al éter, este comodín para todo, de ser la causa: naturalmente si el vehículo de la luz ya se movía, esto debía influenciar la velocidad aparente de la luz y no era necesario que ella estuviese sujeta a la ley de la adición. La explicación era de las más simples.

Dejemos sentado como cierto que la tierra gira por este mar etéreo del universo, como un buque por el océano. Si se representa la luz como una bandada de peces, que giran también en este mar, el movimiento de los peces parecerá más rápido a los pasajeros si el buque va en contra de ellos, y más lento, si va con ellos (ver la fig. 49 A.).

Sin embargo, podría ser también de otra manera:

Existe la posibilidad de que la parte del éter en los intersticios de los cuerpos materiales (a los cuales pertenece el aire de la atmósfera también), sea conducida. En este caso la tierra con su envoltura de aire y éter, sería comparable a un buque que arras-

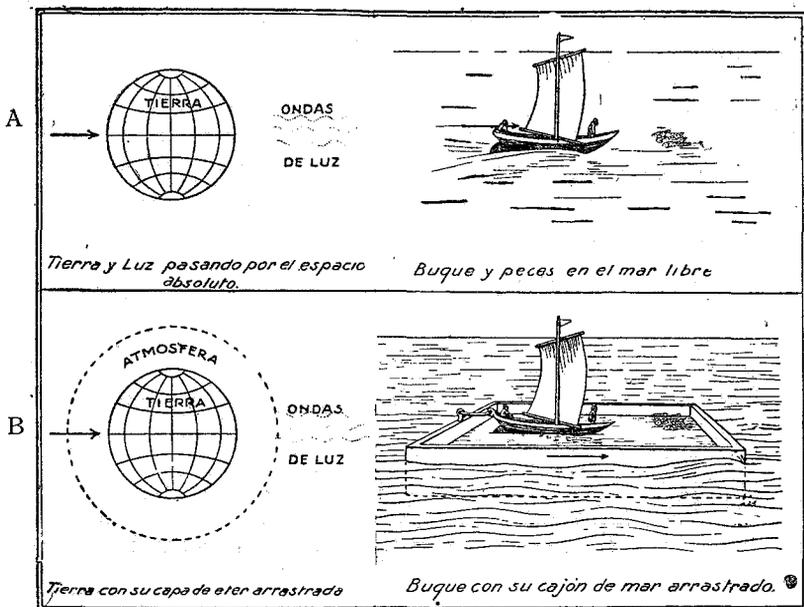


Fig. 49--Las dos posibilidades del movimiento de la tierra por el éter

tra consigo un gran cajón lleno de agua, la que, dentro del cajón, se movería igual que el buque, de modo que los peces en él (o la luz) mostrarían siempre su propia velocidad, de ningún modo alterada por los movimientos del buque (ver la fig. 49 B.).

Otra posibilidad, lógica y mecánicamente, no parece factible y entre estas dos posibilidades se podía distinguir experimentalmente, supuesto que la velocidad de la luz fuese mensurable. A este fin se hacían los experimentos decisivos. No se quería determinar con ellos la velocidad de la luz, de la cual se creía saber bastante, sino, al contrario, la velocidad de la tierra por el éter o por el espacio absoluto. Los resultados eran como veremos muy sorprendentes, y se hallaba lo que nadie había buscado.

En el primer caso, es decir si la tierra girara por el mar libre del éter, se debería observar en cada momento otra velocidad de los "peces de luz", porque la tierra (ver la fig. 50, que muestra el verdadero camino anual de la tierra con respecto al sistema de referencia de las estrellas fijas) se mueve en cada momento en

otra dirección y por eso también con otra velocidad por este éter en el cual flota la luz.

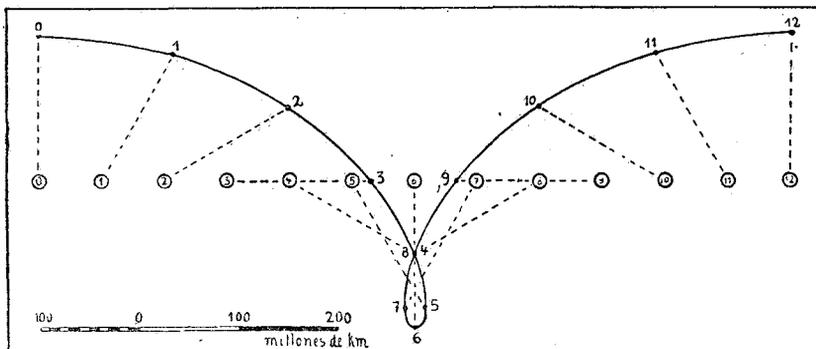


Fig. 50
 El camino de la tierra y del sol por el espacio en un año.
 ○ posición del sol en cada mes ----- radios vectores
 • " de la tierra " " " " " " " " " " " "

En el segundo caso, en el del cajón, es decir, si el éter fuese arrastrado con la atmósfera, no podría esperarse un cambio de la velocidad de la luz en las varias estaciones del año con métodos terrestres. Sólo la observación de los satélites de Júpiter podría dar un resultado positivo, así como los hombres en el buque verían, fuera de su cajón, cambiada también la velocidad de los peces, por el movimiento de su buque. Como ya he mencionado, la exactitud de las observaciones astronómicas es insuficiente para esto, pero se podría lograr un resultado positivo por otros experimentos: la velocidad de la luz debería cambiar en el interior de los cuerpos movidos artificialmente con bastante rapidez.

Como se ve, la cuestión estaría en condición de ser juzgada, si hubiese aparatos bastante delicados para observar un cambio de c en la tierra misma. Su medida en los cuerpos movidos era relativamente fácil, porque aquí la diferencia era de primer orden, y se ha hecho ya a mediados del siglo XIX; pero la velocidad contra el viento del éter se podía medir solo en el recorrido de ida y vuelta. Se debía por eso esperar hasta que la física pudiese medir valores tan pequeños como β^2 .

Naturalmente creyendo que la luz obedezca al principio clásico de la relatividad se debía creer también que uno de los dos experimentos hubiese bastado, porque del uno se podía deducir el otro. Pero al fin se hicieron los dos y el resultado inesperado fué que la velocidad de la luz era siempre la misma, era invariable. La luz no estaba sujeta al principio clásico de la relatividad.

§ 25.—LOS EXPERIMENTOS DE FIZEAU Y MICHELSON
Y LA TEORÍA DE LORENTZ

(El método de las interferencias de Fresnel — el experimento de la materia artificialmente movida — la experiencia de la tierra pasando por el éter — la incompatibilidad de las dos experiencias — Michelson partidario de su propio experimento — la resolución sumaria por Fitzgerald — la resolución matemáticamente exacta por Lorentz — la contracción Lorentziana y el tiempo local)

Un método tan delicado que permitía aún la determinación de la centésima parte del efecto a esperar es el método de las franjas de interferencia. Si de dos rayos de la misma luz el uno hace un pequeño rodeo para reunirse después nuevamente con el otro (como p. ej. en la primitiva disposición de la fig. 51) el número

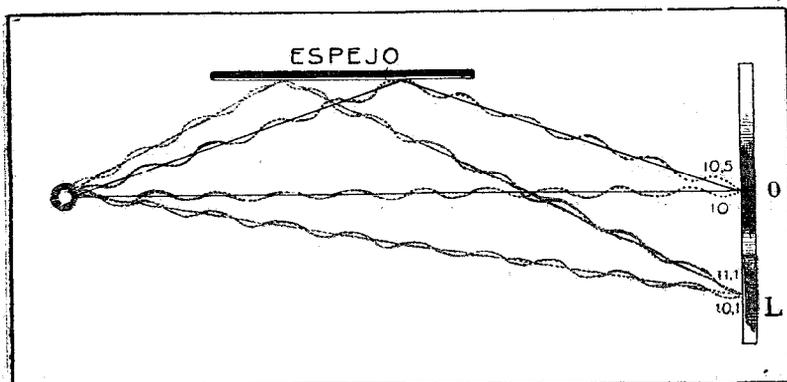


Fig. 51 — Principio del interferómetro

de las vibraciones en los dos caminos no será ya igual. De los dos rayos que van de la fuente de luz (*) al punto O el directo tiene 10, y el reflejado 10,5 vibraciones. En consecuencia, una vibración en fase ascendente, interfiere con otra en fase descendente. Estas dos fases se compensan y anulan una a otra, resultando el fenómeno paradójico de que la suma de dos rayos de luz no da más luz, sino menos. Un poco más abajo (líneas rojas) donde la diferencia es una vibración total (10.1 y 11.1), las ondas llegando con fase idéntica, se refuerzan. Así cambian luz y oscuridad formando las llamadas franjas, que pueden servir para medir distancias mínimas; pues claro está que, si uno de los dos caminos (respectivamente una de las dos velocidades) es alterado, la extinción y el refuerzo de la luz se harán en otros puntos: si las franjas

se han corrido por su mismo ancho, es decir, si se hace sombra donde había luz, es signo de que el camino ha cambiado en una longitud de media oscilación; y como se ve aún un corrimiento mucho menor, pueden medirse *diferencias* (pero solo diferencias!) más cortas que una oscilación luminosa. Sobre esta base se han construido varios interferómetros, que difieren entre sí por la distribución de los espejos. Con ellos se han efectuado los dos experimentos cuya significación he explicado anteriormente.

El experimento de la materia artificialmente movida fué ya hecho por *Fizeau* en 1851 (fig. 52, pág. 149). Un rayo de luz es dividido por una lámina de vidrio semitransparente y semireflectora colocada en un ángulo de 45° a la dirección del rayo. Una parte (la línea de flechas) es reflejada y llega después por cuatro reflexiones más, (en los espejos I a III y en el respaldo del vidrio) al anteojo; la otra (la línea con puntos) pasa por el vidrio y llega, después de tres reflexiones en los espejos III a I y otro pasaje por el vidrio, al anteojo también, de modo que las dos partes del rayo recorren el mismo camino, solo que en sentido inverso. Por este trecho del camino (situado en el interior de un tubo por el cual puede pasar agua u otro líquido) un rayo va siempre a favor de la corriente y el *otro* en contra; por eso, si la velocidad de la luz dependiese del movimiento de la materia, o con la expresión de la teoría del éter, si el éter en los cuerpos se moviese con ellos, habría que esperar, en virtud del principio clásico de la relatividad, que las franjas se corrieran en el momento del comienzo de la corriente. Como de tal traslación, pasando aire, no se veía nada, pasando agua, poco, y en todo caso menos de lo que el cálculo quería, se dedujo que no existía una verdadera participación del éter en el movimiento material. (1) Parecía demostrado, al contra-

(1) Los experimentos confirmaban la fórmula de la *conducción parcial* del éter que *Fresnel* teóricamente, ya antes, había desarrollado, basándose en experimentos de *Arago*, que son más complicados pero de la misma índole.

La conducción sería proporcional a $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$ en lo cual n es el índice de refracción y como este índice es para el aire casi igual a uno, el factor de proporcionalidad se hace cero ($1-1=0$). Esta conducción parcial encierra dificultades casi infranqueables, p. ej. la de que el éter es conducido para cada color del espectro con otra velocidad (porque la conducción depende de n). Se necesitarían por eso tantos éteres como líneas hay en el espectro (es decir innumerables) lo que parece inverosímil! Veremos en el § 42 que estos resultados se siguen de una manera natural del teorema adicional que a su vez proviene de las fórmulas relativistas como consecuencia natural. En todo caso esto no tiene atingencia con nuestra cuestión, porque se trata aquí solo del aire, en el cual la conducción es ciertamente igual a cero.

rio, que el éter no es conducido por la materia y especialmente no lo es por el aire, sino que queda en reposo si el aire pasa por él. De este experimento se podía por eso concluir — y se concluyó aún — que la tierra no lleva su cajón de éter consigo; por consiguiente, flotando ella en el éter como un buque en el mar libre, tendrá que ser posible medir la velocidad de los “peces de luz” en una y otra dirección. Con otras palabras, del experimento de *Fizeau* se podía deducir que debían observarse velocidades variables según la dirección en que la tierra se mueve por el éter.

Sin embargo esto no era así!

Observar el pasaje de toda la tierra por el éter es mucho más difícil que el experimento de *Fizeau*, en que únicamente una parte de la materia (el agua) es movida y los dos rayos van el uno siempre con la corriente, el otro en contra, de modo que se mide la verdadera y simple diferencia de los tiempos = β ; lo que es posible porque se puede dar a la corriente cualquier curvatura, siguiendo con ella la trayectoria de la luz; mientras que para determinar el movimiento relativo entre éter y tierra, debe usarse el viento existente del éter que va naturalmente siempre en una dirección. Por eso los dos rayos que deben provenir de un punto único ⁽¹⁾ y llegar a un punto único, recorren forzosamente, en el total, la misma distancia con y contra el viento del éter, y una diferencia no se obtiene de otra manera que adicionando dos ramificaciones equidistantes, la una perpendicular y la otra paralela a la dirección de la tierra; ahora, cada rayo recorre una de las ramificaciones, yendo y volviendo, y por eso la diferencia puede ser solo de segundo grado ($=\sqrt{\beta^2}$) lo que es la diferencia del retraso longitudinal y transversal como hemos visto en el ejemplo del avión y del nadador § 22). Por eso los aparatos deben ser diez mil veces más sensibles. Si la velocidad cósmica no fuese relativamente tan grande, el experimento sería aún hoy imposible. Otra dificultad está en que, mientras en la disposición de *Fizeau* los dos rayos van, aunque en sentido contrario, por el mismo camino, que es igual y queda igual siempre con todas las casi inevitables perturbaciones fortuitas, aquí (ver la fig. 53) los dos rayos van necesariamente por caminos distintos, siendo su igualación, dada sus mínimas diferencias, bastante difícil. Era con una obra técnica-

(1) Si proviniesen de dos diferentes llamas sus inevitables irregularidades harían imposible una observación de las franjas.

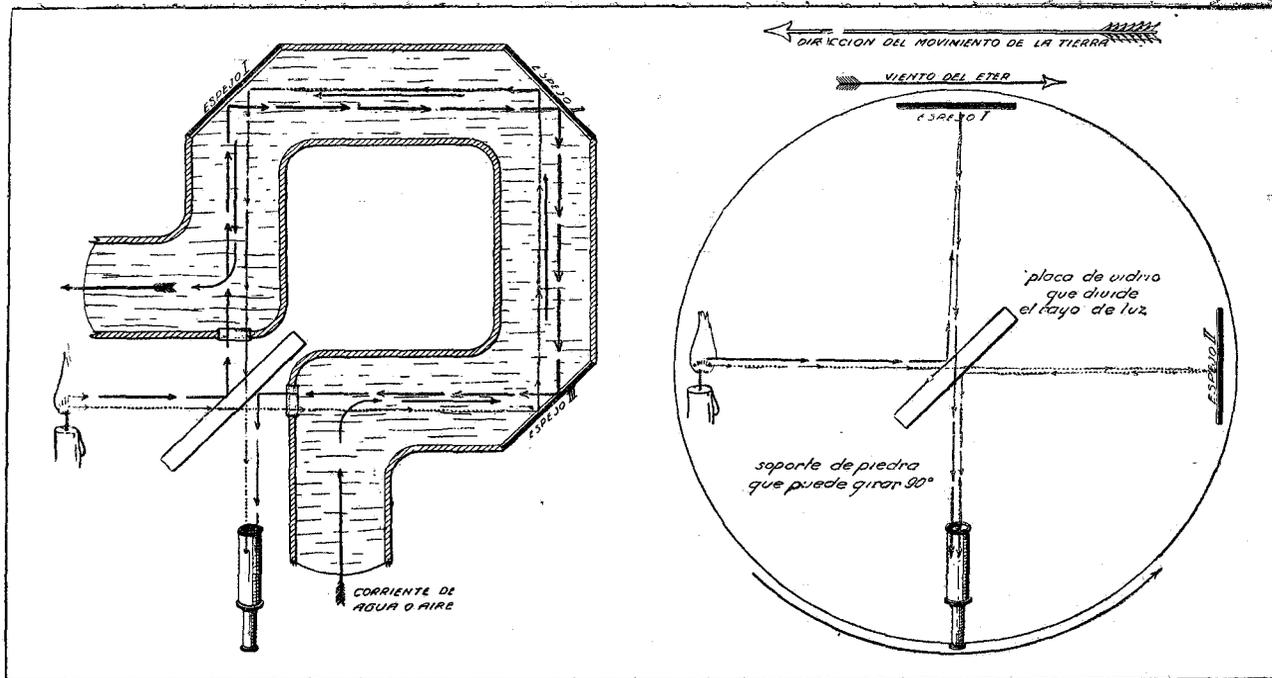


Fig. 52. — Experimento de Fizeau — 1851

La materia movida
no influye, sobre la velocidad de la luz.
(el éter no se mueve en los cuerpos)

Fig. 53 — Experimento de Michelson — 1881

El movimiento de la tierra
no influye sobre la velocidad de la luz.
(el éter se mueve, en los cuerpos)

mente milagrosa, que *Michelson* alcanzaba en 1881 a construir su interferómetro tan delicado que se podía medir con él hasta un centésimo del efecto a esperar.

Un rayo luminoso hiere la lámina de vidrio que refleja una parte al espejo I, y deja pasar otra directamente al espejo II, de donde vuelven, la del espejo I directamente, la del espejo II por reflexión, y van después en conjunto al anteojo.

Si las distancias entre el vidrio y los espejos están debidamente igualadas, los rayos, al reunirse, producen interferencias y si en uno de los caminos hay un retardo, las franjas se corren. Con una orientación del aparato como la indicada por la fig. 53, la luz necesitaría — si hubiese, conforme al experimento de *Fizeau*, un viento de éter en el camino al espejo II, — más tiempo que en el otro, en virtud de lo cual las franjas tendrían una cierta posición; girando después todo el aparato, colocado sobre una gran piedra giratoria, en un ángulo de 90°, debería suceder lo contrario, lo que se revelaría por una alteración de las franjas. *Michelson* hacía sus experimentos en todas las estaciones del año porque en una de ellas la dirección del viento del éter debería ser perpendicular, respectivamente paralela, a la dirección de sus rayos; él repitió los experimentos con aparatos aún más perfectos juntamente con *Morley*; pero nunca se advirtió corrimiento alguno: la velocidad de la luz con respecto a la tierra quedaba igual; perpendicular a su trayectoria y paralela a ella, siempre era igual a 300 000 km. p. seg.

La única conclusión, mecánicamente posible, del experimento era que la tierra arrastra consigo su cajón de éter, es decir que el éter se mueve en los cuerpos, particularmente en el aire, con la misma velocidad que el aire mismo. *Michelson* concluyó así, lo que no era justificado, pues así destruyó su propia base que consistía en el experimento de *Fizeau*, que él mismo había repetido y verificado: fiándose únicamente en su último y más célebre experimento, descuidaba los anteriores que, sin embargo, con una evidencia no menor que la del suyo, demostraban lo contrario.

En verdad, los dos experimentos eran incompatibles mecánicamente, pero esto no era razón bastante para elegir el uno y desear el otro; pues los dos eran hechos físicos y un hecho por mínimo que sea, vale incomparablemente más que todas las leyes que el hombre ha deducido de ellos: *si dos experimentos buenos son incompatibles mecánicamente, no debe caer uno de ellos, sino la mecánica.*

Pero a tal consecuencia epistemológica no se decidieron ni él

ni la mayoría de los físicos. En general no se negaba ni el experimento de *Fizeau* ni el de *Michelson*; pero todo terminaba ahí; y como la teoría del éter inmóvil era ya establecida y tradicional, la mayoría se aferraba a ella. Todo esto no disminuye el gran mérito de *Michelson*, pues no debemos olvidar que es muy fácil ser lógico, una vez descubierta la conclusión lógica; pero antes es otra cosa. Hoy esta incompatibilidad parece evidente, pero para verla por primera vez, era necesaria la ingenua simplicidad innata de un genio; éste ve un hecho en su sencillez primitiva, los otros lo ven por las gafas de las opiniones de sus antepasados.

Diez años más tarde, cuando *Michelson*, esta vez en colaboración con *Morley*, repetía sus experimentos, con cautela aún mayor, los físicos comenzaban a ocuparse del asunto. Se hacían primero las usuales hipótesis auxiliares: que el éter sería arrastrado aún en el ambiente de los cuerpos sólidos, (lo que era falso como *Lodge* lo demostraba experimentalmente); que la velocidad de la luz dependería del movimiento de la fuente luminosa (lo que era falso como *Sitter* lo demostraba también experimentalmente) etc.

El primer ensayo que de veras quería explicar la dificultad era la hipótesis de *Fitz-Gerald*, que *Lorentz* amplificaba y fundaba matemáticamente. *Lorentz* veía con ingeniosa claridad y decía también expresamente, que *el éter no podía ser una verdadera "substancia", si no estaba sujeto al principio clásico de la relatividad, válido para todas las substancias*. Reconocía bien la manifiesta contradicción entre el principio de la relatividad y el hecho experimental de la invariabilidad de la velocidad de la luz, y veía claramente la alternativa inevitable: o se podía revisar el principio, cambiando radicalmente nuestras ideas del éter en primer término y muchas otras cosas enseguida, o se podía, para salvar el éter y el viejo principio, restablecer, de un modo u otro, la variabilidad del movimiento de la luz. *Lorentz* que se fijaba demasiado en el éter, en el cual estaba muy interesado porque en su inmovilidad se fundaba su teoría electro-magnética, optaba deliberadamente por lo segundo y no retrocedía ante la necesidad de negar los resultados experimentales con una hipótesis por osada que ella fuese.

En el experimento de *Michelson*, en virtud del principio clásico, la luz debería marchar en una dirección un poco más lentamente que en la otra; si esto fuese en verdad así y, no obstante, los dos rayos llegan al mismo tiempo, claro que los caminos tienen que ser diferentes; y como *Michelson* los había igualado cuidadosamente, no quedaba otra posibilidad sino la de que ellos ha-

bían cambiado en el experimento. Ya el irlandés *Fitz-Gerald*, había explicado y reconciliado los experimentos de este modo simple y grosero, conjeturando que cada cuerpo que se mueve contra el viento del éter se acorta, por casualidad muy curiosa, justamente lo necesario para que no se observe nada. *Lorentz* aceptaba este cambio de caminos, que contiene de hecho ya la relativación del espacio. Pero quien había aceptado este cambio, solo para salvar la ficción del éter, no podía reconocer la relatividad de la ficción espacial incomparablemente más arraigada que la del éter. Por eso buscaba algo intermedio. *Según Lorentz cambiaba el camino, pero no el espacio*; se acortaban los lentes y el aire y la piedra fundamental del aparato, toda la materia y todo el éter pero lo que restaba aún — la idea pura del espacio — quedaba. Qué es esta idea pura, sería difícil decirlo; pues *si todas las substancias, sin ninguna consideración a su naturaleza química tan diferente, se acortan igualmente, no son ya las diferentes substancias lo que se acorta, sino en realidad, lo que es común en ellas, su extensión, eso es, el espacio*. Tal conclusión parece muy natural; sin embargo *Lorentz* no concluyó así.

Lo mismo sucedía con el tiempo; *Lorentz* advirtió que la fórmula de *Fitz-Gerald* (acortamiento $= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$) era insuficiente y que para explicar el experimento de *Michelson* (y muchos otros experimentos electromagnéticos que se hicieron después) se necesitaba en un sistema en traslación una nueva medida del tiempo. Pero tampoco aquí osaba introducir un cambio del tiempo en sí; solo decía que fuera del “tiempo verdadero” existía algo que llamaba “tiempo de lugar”. También aquí *es difícil representarse lo que podría ser un tiempo de lugar, si no fuese un tiempo común alterado*. En verdad *Lorentz* había ya introducido de hecho, aunque inconscientemente, la relatividad del tiempo, como también la del espacio.

Que con tales suposiciones se explica todo, es claro, pero también es claro lo artificial de estas hipótesis, hechas “ad hoc”, que no son ni refutables ni averiguables. Como en los espejos esféricos (ver § 12), la contracción no podría descubrirse por ningún método, porque cada medida usada se acorta también. Que la noción vaga de un “tiempo de lugar” no se averiguaría jamás, no podía ser dudoso.

Además de su arbitrariedad la contracción Lorentziana de los cuerpos es contraria a las reglas de una física sana, porque no se sabe qué fuerza pudiera producir la contracción de la materia,

ya que tal fuerza debería ser bastante considerable, al menos para las grandes velocidades. Nuestra tierra, con sus treinta kilómetros por segundo, se acortaría solo en 6,5 cm.; pero, moviéndose con la velocidad de un cometa en su perihelio, la contracción sería ya de casi veinte metros.

Lorentz, dándose cuenta de esta falla, ensayaba llenarla con fuerzas eléctricas. Pero como la explicación debe valer para todo, y todo ciertamente no puede ser eléctrico ⁽¹⁾, esta explicación no es suficiente tampoco.

Sus fórmulas que desarrollaremos en el § 32 detalladamente son:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Dimensión de un cuerpo (d')} \text{ que se} \\ \text{mueve con la velocidad (v)} \\ \text{en la dirección del éter} \end{array} \right\} d' = \frac{d - tv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tiempo de lugar (t')} \text{ en un} \\ \text{sistema movido en comparación} \\ \text{con el tiempo verdadero} \end{array} \right\} t' = \frac{t - \frac{dv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

fórmulas que son tanto más interesantes, porque entran íntegramente en la teoría de la relatividad. *Se podría aún decir que formalmente son ya la nueva teoría. No la constituyen en verdad, porque son matemáticamente imaginadas para corregir los hechos, mientras que, para fundamentar una teoría física, deberían emanar espontáneamente de hechos físicos y observables.*

Esta transformación, o mejor dicho, reconstrucción de una teoría matemática en una física, es la obra de *Einstein*.

⁽¹⁾ Por ejemplo en un electrón la electricidad negativa se dispersaría si no existiese otra fuerza que la contuviese.