

ERRORES COMUNES SOBRE RELATIVIDAD ENTRE LOS PROFESORES DE ENSEÑANZA SECUNDARIA¹

ALEMAÑ BERENGUER, R.A.
Instituto de Bachillerato Jaime II. Alicante.

SUMMARY

The limited understanding of the Principle of Relativity and its vague and ambiguous formulation in most text-books, may be some of the sources of very common misconceptions on explaining this outstanding piece of the 20th century science. To diagnose these misconceptions a general check of many of books was carried out with the results that are expounded in this work. The conclusions revealed that mistakes emerged through misunderstanding of modern physics assumptions about the proper nature of reality, and difficulty in transferring those new ideas to operative thought in order to achieve an effective learning.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la teoría de la relatividad es un contenido reciente y novedoso en los planes de estudio de enseñanza secundaria que la reforma educativa aspira a implantar. No se trata, desde luego, de que este tema en concreto no fuese contemplado en los anteriores programas de enseñanza media, pero sí se pretende ahora que un nuevo estilo didáctico y enfoques menos superficiales contribuyan al logro de un aprendizaje significativo que anteriormente no se alcanzó con la profundidad que hubiese sido menester. Los objetivos principales de la exposición de este tema clave de la física moderna durante el periodo de enseñanza secundaria consisten tanto en capacitar a los alumnos que intenten abordar el estudio de una carrera científica en la enseñanza superior para la comprensión de uno de sus principios básicos como inculcar en los estudiantes alguna curiosidad e interés siquiera sobre una pequeña parte de los conocimientos que acerca del mundo físico nos ha desvelado la ciencia del siglo XX.

La exigencia que un reto como éste plantea a los profesores de enseñanza secundaria no es sencilla. Por una parte, habrán de transmitir a sus alumnos unas ideas que

no pocas veces se revelan en escandaloso conflicto con la intuición derivada de nuestra vida cotidiana. Por otro lado, se verán en la obligación de actualizar sus conocimientos a la par que poner a prueba su capacidad para luchar contra los prejuicios derivados del en ocasiones no muy fiable «sentido común». El trabajo que a continuación se ofrece se halla presidido por el deseo de colaborar con la tarea —ardua pero gratificante— de disminuir en lo posible los más frecuentes errores y malentendidos que amenazan a quienes han de encontrarse preparados ellos mismos para explicar las bases de esta fascinante parcela de la ciencia.

A causa de las complejidades que esta riquísima teoría encierra, no discutiremos en estas páginas más contenidos que los pertenecientes a la relatividad especial, toda vez que los fundamentos de la relatividad general apenas si se rozan en el nivel de enseñanza que aquí nos concierne. No obstante, es indudable que una adecuada comprensión de la primera constituye una preparación inexcusable para quienes deseen abrirse camino hacia los prometedores horizontes intelectuales e investigadores que nos ofrece la segunda.

EXPOSICIÓN, Y COMENTARIO DE LOS ERRORES MÁS COMUNES EN LOS DOCENTES DE SECUNDARIA ACERCA DE LA RELATIVIDAD

1º) *La ecuación de Einstein sobre la equivalencia entre masa y energía sirve tan sólo para el paso de las unidades de masa a las de energía o viceversa, persistiendo en todo caso una separación profunda entre ambos conceptos.*

Ésta es una confusión harto frecuente que, de hecho, puede hallarse en la práctica totalidad de los textos consultados, no sólo preuniversitarios (Aguelles, 1978; Alsina, 1979; De Lorenzo, 1989; Guillem, 1978; Lloris, 1982; Olarte, 1986, etc.) sino también en los de nivel universitario (Alonso-Finn, 1970; Gettys-Keller-Skove, 1992; Tipler, 1992). Su raíz se esconde en la equiparación, consciente o no, de las transformaciones representadas por la célebre ecuación $E=mc^2$ con las que se obtienen, por ejemplo, entre la masa y el volumen a través de la densidad como coeficiente de transformación. En efecto, se supone que, al igual que la densidad actúa como un factor de conversión permitiéndonos acceder a la masa (o al volumen) a partir del volumen (o de la masa), el cuadrado de la velocidad de la luz resultaría ser una suerte de factor de conversión universal entre la masa y la energía para todos los objetos (Bondi-Spurgin, 1987). De este modo, masa y energía aparecerían como magnitudes interconvertibles aunque básicamente diferentes.

Sin embargo, nada más lejos de la realidad; la velocidad de la luz o su cuadrado no son llaves maestras que abran el paso de la masa a la energía o a la inversa. Precisamente el hecho de semejante universalidad sin excepciones debería hacernos sospechar de una concepción tan simplista. Fácilmente se ve esto sin más que recordar que las unidades de velocidad —como, por lo demás, toda clase de unidades— son arbitrarias y, por tanto, podemos escogerlas de modo que $c=1$, con lo que nos quedaría sencillamente $E=m$. No ocurre lo mismo con la magnitud *densidad*; el hecho de tomar la de un cuerpo igual a la unidad no afecta en absoluto a las demás, cosa que debiera invitarnos a pensar en c^2 como en el eslabón entre dos nociones que muy bien pudieran ser idénticas.

Desafortunadamente, las exposiciones competentes sobre la verdadera interpretación de esta fórmula y otras cuestiones relacionadas (Eddington, 1963; Eddington 1968; Terletsii, 1968; Misner-Thorne-Wheeler, 1972; Sazánov, 1990) no suelen encontrarse con facilidad al alcance de los docentes de secundaria, bien por la dificultad de localización, bien por la elevada especialización de la materia. Allí se evidencia la naturaleza esencialmente geométrica de la teoría einsteniana, fundada en la multiplicidad tetradimensional que conocemos como «espacio-tiempo». En este marco, la energía y el momento lineal forman un tetravector de cuatro componentes (E, cp_x, cp_y, cp_z), siendo la energía propia —es conveniente evitar la expresión «energía en reposo» para poder incluir en la discusión los fotones y demás partículas con la velocidad de la luz que jamás están en

reposo relativo— el módulo de este vector calculado según la métrica de Minkowski:

$$E_0^2 = E^2 - c^2p_x^2 - c^2p_y^2 - c^2p_z^2$$

Se ve con ello que la energía y el momento lineal son componentes homogéneos (salvo un factor, $[c]$, que puede tomarse siempre como la unidad) de un mismo concepto físico. La diferente descomposición que nosotros hacemos del tetravector energía-impulso en componentes según el sistema de referencia en el que nos encontremos es la que nos hace creer que energía y momento son nociones físicas distintas. Ése es el precio a pagar cuando nos apegamos a la vieja visión tridimensional al adentrarnos en una teoría física enteramente basada en una perspectiva de cuatro dimensiones.

Causa tristeza que algunas autoridades en filosofía de la física no hayan comprendido todavía este extremo (Bunge, 1982, 1983). Podemos leer, por ejemplo, que la ecuación $E=mc^2$ es un teorema de la mecánica relativista de partículas que no figura en las teorías de campos de masa nula, como el electromagnetismo. Es cierto si consideramos la masa en su acepción clásica newtoniana, pero si asumimos la noción de masa como idéntica a la energía, advertiremos que en la mecánica relativista esta nueva idea se representa por una función que asocia un número real positivo a cada cuaterna <partícula, referencial, instante, escala de unidades>. Puesto que la mecánica relativista presupone las transformaciones de Lorentz, bajo las cuales son covariantes las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, es del todo lícito aplicar la noción de *masa* equivalente a la *energía* al campo electromagnético y, por extensión, a los demás cuantos de campo con velocidad c .

Así, igual podríamos escribir todos los componentes del vector energía-momento lineal como cp_i, E_i o $m_i c^2$ —donde el subíndice i recorrería los valores de 1 a 4—, sin que la notación sea más que cuestión de preferencias. Es por esto que la ecuación de Einstein debe ser entendida como la expresión de una identidad largamente ignorada por los investigadores del pasado. La *masa* y la *energía* son dos conceptos sustancialmente equivalentes, o mejor dicho, *es el mismo concepto denominado de dos maneras distintas*. Mejor que el ejemplo de la densidad, bien podríamos tener en mente lo que ocurre cuando medimos una misma distancia en kilómetros o en millas: dos sistemas de unidades diferentes (los kilómetros y las millas) nos sirven para expresar un mismo concepto subyacente (la distancia). Ése es el verdadero sentido de la fórmula de equivalencia entre la masa y la energía.

2º) *La masa relativista incrementa su valor con la velocidad, lo que explica que un cuerpo acelerado jamás alcance la velocidad de la luz.*

Éste es una malentendido directamente emparentado con el anterior. Si no comprendemos la naturaleza unitaria, desde un punto de vista tetradimensional, de la masa-energía y el momento, mal podremos percatarnos de que en el enunciado superior se utiliza un lenguaje

newtoniano para describir un efecto puramente relativista. No han faltado los autores (Terletskii, 1968; Wangsness, 1992) que han advertido del peligro de, digámoslo así, echar vino nuevo en odres viejos. Wangsness, por ejemplo, ofrece a este respecto un párrafo altamente ilustrativo:

«Por otra parte, no es del todo necesario interpretar en esta forma dichos resultados, y el hacerlo así obedece al deseo natural de escribir el momento lineal como siempre; o sea, como el producto de la masa y de la *velocidad ordinaria* v , y no como el producto de la masa en reposo m_0 por una *nueva función* de la velocidad. De hecho, tal enfoque contradice la filosofía básica del planteamiento covariante de la relatividad, en razón de que (28-106) no está en forma cuadrivectorial. Se tiene una mayor concordancia con los conceptos relativistas al adjudicar una propiedad escalar invariante —la masa en reposo m_0 — a la partícula y después definir el momento cuadrivectorial como el producto de esta invariante escalar con la velocidad cuadrivectorial, exactamente como se hizo en (28-99).»

Aquello a lo que se refiere Wangsness es:

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} v$$

en lugar de:

$$p = m_0 \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

La diferencia no es baladí, pues al manejar la primera en vez de la segunda nos sentimos irresistiblemente tentados a juzgar que hay una cantidad —la «masa»— que crece con la velocidad. Y dado que la masa es una medida de la inercia, o resistencia a la aceleración, es lógico que atribuyamos a su aumento la inaccesibilidad de c . Sin embargo no es así, ya que un escalor dependiente de la velocidad no tiene lugar en la estructura matemática covariante de la relatividad. Es nuestra tendencia a considerar la teoría relativista como una corrección a la física de Newton, cuando entran en juego muy altas velocidades, la que nos hace olvidar el nudo de la cuestión. Y éste no es más que la necesidad de que las cantidades relevantes en relatividad sean o bien escalares invariantes bajo cambio de referencial o bien magnitudes tetradimensionales que obedezcan a las transformaciones de Lorentz.

Explicado muy sucintamente, imaginemos dos observadores, acelerado el uno e inercial el otro (fácilmente distinguibles, pues se curva la línea de universo del primero y no la del segundo). Desde el referencial no acelerado se observa que el tiempo del acelerado se dilata de acuerdo con una aplicación reiterada de las fórmulas de Lorentz (en primera aproximación un sistema de referencia acelerado puede tomarse como una sucesión de distintos referenciales con una velocidad instantánea constante), con lo cual la velocidad, entendida como el cociente del espacio recorrido entre el tiempo

empleado en recorrerlo, tiende a cero, ya que el denominador tiende a infinito cuando su velocidad se aproxima a c . En cambio, desde el punto de vista del referencial acelerado, es el espacio que recorre en cada unidad de tiempo el que se contrae sin cesar tendiendo a cero a causa de dichas fórmulas lorentzianas. De nuevo el cociente del espacio entre el tiempo tiende a cero cuando la velocidad tiende a c , sin que sea en modo alguno necesario mencionar la masa en esta discusión.

Gran culpable de esta confusión es la costumbre de aproximarse a las leyes de la física desde las formulaciones de Lagrange y Hamilton (Landau, 1973). Algunos autores han advertido de los riesgos de hacerlo así sin el necesario cuidado (Goldstein, 1990), puesto que se corre el serio peligro de trasladar de manera ilegítima a la relatividad la neta separación entre variables espaciales y temporales usual en la mecánica analítica. Así se explica que resulte un abuso de lenguaje hablar de energía «cinética» y «potencial» dentro de la teoría relativista, como hacen casi todos los textos. Ya hemos visto al comentar el tetravector energía-momento que no se habla más de que «energía en reposo» (E_0), y de «energía en cualquier otro referencial» (E). La conclusión es, por lo tanto, que el comportamiento del espacio-tiempo es el que nos veda el acceso a la velocidad de la luz, no la variación de una masa que sólo tiene sentido en la física newtoniana.

3º) En relatividad son completamente equivalentes los conceptos de sistema de referencia, sistema de coordenadas y observador.

Aunque guardan muy estrecha relación entre ellas, no es exacto afirmar que estas tres ideas son por completo intercambiables. Un sistema de referencia —o referencial— es cualquier conjunto de ejes arbitrariamente definidos (rectilíneos o curvilíneos, ortogonales u oblicuos) centrado en un cuerpo material o en un punto del espacio localizable de algún otro modo (por ejemplo, un punto situado a cierta altura, latitud y longitud sobre la superficie de Marte), respecto del cual cobran sentido físico y matemático nuestras asignaciones de coordenadas espacio-temporales (Bunge, 1983; Einstein, 1984). Así, nos es dado establecer un sistema de referencia en la esquina de una calle, en el centro de la Tierra o en el centro de masas de la galaxia, sin que ninguno de estos referenciales (que, repitámoslo, pueden estar ocupados o no por cuerpos materiales) haya de ser considerado mejor que otro excepto por la comodidad que nos procure dependiendo de la situación física bajo estudio.

Por otra parte, hemos de diferenciar de lo anterior la idea de «sistema de coordenadas» en cuanto a tipo de variables matemáticas que usamos para etiquetar puntos del espacio y del tiempo (Bunge, 1983; Einstein, 1984). En este sentido hay infinitud de sistemas de coordenadas que pueden definirse en un mismo sistema de referencia. Dado un sistema de referencia concreto, siempre es posible asignarle un sistema de coordenadas cartesianas, cilíndricas, esféricas, elípticas, etc., sin que —como en el caso precedente— ninguno sea intrínsecamente más correcto que los demás. Tan sólo la simplificación de los

cálculos matemáticos guiará nuestra elección en una situación u otra. Lo que sí sucede, empero, es que se suele denominar «sistema de coordenadas», sin más, a un sistema de referencia al que se ha asignado un tipo de coordenadas bien especificado, por lo que de ordinario la distinción entre ambas nociones se hace ociosa.

Por último, el concepto de observador es secundario en la relatividad, como, por otro lado, lo es también en todas las demás ramas de la física (incluida la teoría cuántica²). La física se ocupa de los sucesos o estados del mundo natural y de las leyes que los gobiernan; es decir, se refiere a la realidad independientemente de cómo se aparezca a un observador en concreto. Por eso es innecesario hacer continua mención del observador en el sistema de referencia tal o cual (como hace, por ejemplo, *Bridgman* [1927] e innumerables otros imitan). Un referencial puede estar ocupado o no por un observador (pensemos en los sistemas de referencia tan habituales en física que se ubican en el centro de la Tierra o del Sol), y en muchas ocasiones ese pretendido «observador» ni siquiera tiene por qué ser humano (piénsese en las sondas espaciales o en los detectores automáticos de multitud de fenómenos).

4º) La relatividad es una teoría que se ocupa de nuestros procesos de medición en condiciones extremas de velocidad o energía. Y dado que los efectos relativistas conciernen, no al espacio y al tiempo en sí mismos, sino a nuestras medidas de ellos, no tenemos razones que nos obliguen a cambiar estos conceptos respecto de los de la física anterior a Einstein.

Esta visión del principio de relatividad, precisamente por simplificadora y fácil de asimilar, resulta tremendamente peligrosa en tanto que desvirtúa la verdadera naturaleza de la teoría y dificulta los posteriores intentos por lograr una cabal comprensión de la misma. De ninguna manera cabe decir que la relatividad se ocupa ni tan sólo principalmente de nuestras mediciones, aunque sus efectos más llamativos se manifiestan cuando ponemos a prueba sus predicciones a través de nuestras medidas. Esta equivocada manera de ver las cosas nació en las tres primeras décadas del siglo XX, con el auge de la filosofía operacionalista, y ha sido adoptada por una gran mayoría de los libros de texto ignorantes del prejuicio didáctico que ello supone.

Como se mencionaba al final del apartado anterior en relación a los «observadores», las teorías de la física tratan de describir el mundo con independencia de las percepciones concretas de los observadores naturales, revelando lo que de objetivo subyace en el conjunto de tales percepciones. Las tan conocidas transformaciones de Lorentz no se aplican propiamente al comportamiento de «reglas y relojes» (vocabulario éste muy corriente en los textos relativistas), sino al contrario: estas transformaciones determinan las propiedades del espacio-tiempo en sí mismo considerado, lo que a su vez regirá el comportamiento de las reglas y los relojes. Tales «reglas y relojes», por otra parte, no han de ser necesariamente los objetos cotidianos que todos conocemos

por ese nombre. Podría servirnos cualquier proceso físico que permita especificar sin ambigüedad una duración, digamos, la vibración rítmica de una molécula. Si en estas condiciones, la relatividad predice que tal ritmo de vibración así como todos los fenómenos físicos periódicos cualquiera que sea su naturaleza se verán modificados, ya no podremos acogernos a la suposición de que es la constitución interna de las reglas o el mecanismo interior de los relojes lo que resulta afectado (suposición que, por cierto, mantuvieron originariamente Lorentz y Fitz Gerald al deducir sus famosas transformaciones). O bien existe algún tipo de influencia misteriosa, o hemos de admitir que nuestras concepciones sobre el espacio y el tiempo precisan de urgente rectificación.

Es muy frecuente imaginar que las leyes de la relatividad son algo análogo a las reglas ópticas que explican los efectos que percibimos en presencia de un espejismo. Enfrentados a este fenómeno sabemos que hay un objeto «real» con propiedades reales a cuya imagen ficticia llamamos espejismo, y a la que, por tanto, juzgamos como «aparente». Según esta línea de pensamiento, con la relatividad sucedería lo mismo: por un lado, existen longitudes y duraciones «reales», en tanto que, por otro, tenemos otras «aparentes» de cuyo comportamiento nos informan las ecuaciones relativistas en general y las transformaciones de Lorentz en particular. Este planteamiento nos hurta lo que es más esencial en la relatividad, la noción central de la teoría: «que no hay distancias ni duraciones más verdaderas que otras, sino que todas son igualmente legítimas según el sistema de referencia con respecto al cual se determinen».

En este punto es enormemente útil y casi inexcusable recurrir a la formulación geométrica de la relatividad y compararla con nuestras intuiciones geométricas habituales. Si imaginamos, por sencillez, un vector en el plano referido a un par de ejes ortogonales, dicho vector puede descomponerse en sus proyecciones sobre cada uno de los ejes, como sabemos de la geometría vectorial elemental. Si ahora giramos esos ejes respecto de su posición original, o superponemos otros ya girados, obtendremos un nuevo sistema de ejes con respecto al cual las proyecciones del vector serán distintas. No cabe duda de que el vector es el mismo aunque sus componentes en los distintos sistemas de referencia hayan cambiado. Y sería absurdo decir que unos componentes son «reales» y los otros «aparentes»; todos son proyecciones igualmente correctas en cada uno de los referenciales.

Muy semejante es cuanto ocurre desde la perspectiva de la relatividad. Lo que existe con independencia de las percepciones subjetivas de cada observador son los «intervalos espacio-temporales», mientras que las distintas longitudes y duraciones que obtenemos en cada referencial resultan ser las diferentes maneras que tenemos de descomponer ese intervalo tetradimensional en sus proyecciones de espacio y tiempo.

Ni siquiera se puede identificar la relatividad con una «teoría de la medida» en el sentido en que ésta pueda existir en la física cuántica, pues aquella no trata de

estudiar cómo evoluciona el estado de un sistema físico por efecto de su interacción con otros sistemas (tampoco necesariamente un «observador»). Su propósito es establecer las propiedades físicas que son invariantes frente a cambios de sistemas en el referencial, y por ello se denominan «objetivas», frente a otras que carecen de sentido físico si no se especifican respecto de un referencial concreto. Un ejemplo familiar de ello lo encontramos en la idea corriente del color de los objetos. Nuestras percepciones dependen cromáticamente de la luz ambiente en que tengan lugar, pero, como la inmensa mayoría de nuestra existencia transcurre en mitad de la luz blanca, olvidamos por eso que en un ambiente distinto la coloración de los objetos circundantes se vería alterada. Menos sentido aún tiene hablar de colores en ausencia de luz, de donde se infiere que el color no es una propiedad inherente a los cuerpos cual pueda serlo —por lo que sabemos— su carga eléctrica. Análogamente ocurre en el marco de la teoría relativista con otras propiedades hasta entonces tenidas por «absolutas», como las dimensiones, la velocidad o la energía de los mismos.

5°) *La relatividad nació a resultas de la insatisfacción engendrada por las conclusiones negativas de los intentos de Michelson-Morley sobre detección del movimiento absoluto con respecto al éter. Ese fue el experimento crucial que impulsó a Einstein a desarrollar su teoría de la relatividad especial.*

Ese tópico todavía puede rastrearse en una profusión de libros de texto, no sólo de enseñanza secundaria sino también de nivel universitario (Alonso-Finn, 1970; Aguilles et al., 1979), sin que por ello deje de ser una ilustre falsedad. Existen serias dudas de que Einstein estuviera al corriente de los experimentos de Michelson y, si lo estaba, el hecho es que no influyeron casi nada en su línea de pensamiento (Holton, 1982; Sánchez Ron, 1983). Asimismo, ningún experimento por sí solo, y menos si es negativo, puede generar una teoría; a lo sumo puede plantear el problema de crear una nueva teoría que venga a sustituir la que el experimento fallido ha refutado (otra cosa sería que un solo experimento se considerase prueba suficiente para rechazar una teoría, lo que supondría un caso de experimentismo extremo muy alejado de la realidad). Sucede en verdad que resulta mucho más sencillo para los libros de texto simplificar las a veces tortuosas sendas que siguen los descubrimientos científicos y presentar el relato de los hechos de una forma demasiado lineal.

6°) *La relatividad presupone el electromagnetismo clásico (o en general las teorías de campos de masa nula), por lo que se debería enseñar como una prolongación de la electrodinámica de Maxwell-Lorentz.*

Esta apreciación muestra la intensidad con que el modo en que nace una teoría llega a marcar su correcta comprensión. Si bien es cierto que Einstein desarrolló su teoría de 1905 imponiendo a las leyes de la mecánica las mismas transformaciones (las de Lorentz) válidas en electromagnetismo, no es menos cierto que la teoría así engendrada se emancipó de inmediato de todas sus

sugerencias progenitoras. Todavía hoy el error de considerar esta teoría como un apéndice de la electrodinámica clásica (Whittaker, 1960; Bell, 1990) es localizable en los escritos y en la mente de notables científicos. No ha sido fácil para todos comprender que el principio de relatividad es una especie de requisito geométrico previo (Eddington, 1963; Eddington, 1968; Misner-Thorne-Wheeler, 1973; Sánchez Ron, 1984; Rucker, 1987; Szànov, 1990; Penrose, 1991), en el sentido de la geometría tetradimensional del espacio-tiempo, indispensable para que cualquier otra teoría resulte físicamente aceptable. En una estrecha analogía jurídica cabría hablar de ella como de una «ley orgánica» que regula y determina la forma admisible de otras leyes de rango inferior (Bunge, 1961), en el cuerpo legislativo de la naturaleza.

7°) *La característica más sorprendente de la relatividad es que la velocidad de la luz (c) es independiente tanto de la velocidad de la fuente emisora como del observador que la mide.*

Aceptando en favor de la comodidad el lenguaje de «observadores que miden» donde deberíamos decir simplemente «referenciales», no es posible asumir el anterior comentario así expuesto. No sería en absoluto sorprendente desde la concepción de un científico decimonónico la afirmación de que «la velocidad de la luz no depende del movimiento de la fuente». Por la mecánica ondulatoria clásica se sabía ya que la velocidad de una onda es independiente de la de su fuente, hallándose determinada únicamente por las propiedades del medio en que se propaga. Y puesto que se consideraba la luz como una perturbación ondulatoria transmitida por un medio hipotético llamado «éter», no había nada extraño en suponer que compartía las demás propiedades mecánicas de las otras ondas entonces conocidas, por muy estrafalarias que fuesen las características que la experiencia obligase a imputar al presunto éter. Sí es asombrosa, en cambio, la conclusión de que la luz no precisa de medio alguno en el que propagarse, aun cuando parcialmente siga siendo considerada como una onda. Pero abundar en esto conllevaría adentrarnos en las tormentosas relaciones entre las teorías relativista y cuántica, y eso es otra historia.

Con todo, el resultado de mayor impacto fue la completa independencia de c frente a la velocidad del observador que la medía. Para la luz es indiferente que el sistema de referencia desde el que se la detecte se mueva a una velocidad cualquiera o esté en reposo respecto de otro que, a su vez, tomamos como referencia. El resultado experimental será invariablemente el mismo: la velocidad de la luz es siempre c . Es esta propiedad la que no puede ser insertada consistentemente en el marco conceptual de la mecánica clásica, por lo que obligó a modificar nuestra manera de concebir el espacio y el tiempo físicos. Ello dio paso a la idea del espacio-tiempo como una variedad matemática representativa del mundo físico, en la que se realizaba de manera efectiva una geometría no euclídea, la geometría de Minkowski.

8º) *La relatividad, por sus complicaciones teóricas y su alejamiento de la vida práctica, es un artículo intelectual de lujo. Sería mejor prescindir de ella y dejar su enseñanza para quienes deseen ser especialistas en la materia; los demás podemos desenvolvernos muy bien con la física clásica.*

Es comprensible que algunos se sientan desbordados por la riqueza científica de esta teoría y pretendan refugiarse en la comodidad de parcelas de la física a las que están habituados. Sin embargo, ello no les exime de dominar aun siquiera sus rudimentos para enseñarla si buscan seguir siendo unos aceptables enseñantes. Es verdad que el individuo corriente se vale a la perfección para la totalidad de sus asuntos prácticos de la física newtoniana, pero lo mismo cabría argüir de la física aristotélica, mucho más cercana al «sentido común» de la inmensa mayoría de las personas no científicamente educadas. La relatividad especial ha impuesto sus condiciones en toda la física de partículas (colisiones de alta energía, efecto Compton, antimateria, etc.), y ha sugerido una masa ingente de experimentos y explicaciones que sin su existencia hubiesen sido inimaginables: aceleradores de partículas, radioastronomía, reacciones nucleares y un sinfín de fenómenos que con asiduidad son noticia de portada en los medios de comunicación.

La teoría de la relatividad en su conjunto y la relatividad especial en concreto han revolucionado de forma indeleble nuestra concepción del mundo, de modo que ignorarlas supondría un retroceso intelectual imperdonable para quienes han de educar las mentes de los estudiantes hacia un futuro preñado de desafíos.

CONCLUSIÓN

Las bases conceptuales de la relatividad especial constituyen un elemento inexcusable en los modernos planes de estudio de la educación secundaria. Es por ello que los educadores han de realizar un esfuerzo permanente en

estas y otras áreas a fin de mantenerse en condiciones para afrontar el reto que tales enseñanzas imponen.

Los más frecuentes errores cometidos por los docentes a este respecto consisten en el deslizamiento hacia una explicación de las ideas relativistas basada en nociones newtonianas, lo que a su vez conduce a la confusión de conceptos y a la inadecuada interpretación de fenómenos cuya significación varía radicalmente de una teoría a otra. El mejor modo, sino el único, en que tales equivocaciones pueden enmendarse viene aparejado a un conocimiento más profundo de esta fascinante teoría, así como la estrategia preferente de fundamentar su exposición en una perspectiva geométrica. A este respecto es muy aconsejable el uso con profusión de esquemas, dibujos, gráficas de ordenador y cuantos medios de apoyo nos proporcionen las modernas tecnologías. Ha de hacerse hincapié en el concepto de espacio-tiempo, generalizando el de espacio tridimensional, como idea inervadora de nuestra actual comprensión de la realidad, resaltando la disparidad de sus propiedades geométricas (no euclídeas) de las de la geometría euclidiana ordinaria. Sólo así podremos abordar con esperanzas de éxito la tarea de introducir a los alumnos en una de las teorías físicas más destacadas y profundas del siglo XX.

NOTAS

¹ Las referencias citadas en *cursiva* son las consideradas como fuentes de información en algún sentido defectuosa, siendo recogidas las acertadas en tipo normal. En ocasiones en un mismo texto pueden hallarse errores y aciertos por lo que no debe sorprender encontrar una misma obra en ambas clases de referencia.

² Se sabe —o debería saberse— que ningún epistemólogo realista acepta ya la «interpretación de Copenhague» debida a Bohr, ni la axiomatización de Von Neumann (que es incluso defectuosa como tal axiomatización), en las que algo tan espúreo como la «mente del observador» interviene en procesos físicos (Bunge, 1967; Margenau, 1970).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUELLES J. et al. (1978). *Física COU*. Madrid: Magisterio Español.
 ALSINA J. et al. (1979). *Física COU*. Madrid: Teide.
 BELL, J. (1990). *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*. Madrid: Alianza.
 BONDI-SPURGIN. (1987). Energy has mass. *Phys. Bull.*, 38.
 BRIDGMAN, P. (1927). *The logic of modern Physics*. Nueva York: MacMillan.
 BUNGE, M. (1961). Laws of Physical Laws. *Am. J. of Phys.*, 29, p. 518.

BUNGE, M. (1967). *Foundations of Physics*. Nueva York: Springer Verlag.
 BUNGE, M. (1982). *Filosofía de la física*. Barcelona: Ariel.
 BUNGE, M. (1983). *Controversias en física*. Madrid: Tecnos.
 EDDINGTON, A. (1963). *The Mathematical Theory of Relativity*. Gran Bretaña: Cam. Univ. Press.
 EDDINGTON, A. (1968). *Space, Time and Gravitation*. Gran Bretaña: Cam. Univ. Press.
 EINSTEIN, A. (1984). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza.

- GETTYS-KELLER-SKOVE (1992). *Física clásica y moderna*. Madrid: McGraw-Hill.
- GOLDSTEIN, H. (1990). *Mecánica clásica*. Barcelona: Reverté.
- GUILLEM, M. (1978). *Física COU*. Madrid: De Marfil.
- HOLTON, G. (1982). *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza.
- LANDAU-LIFSHITZ. (1973). *Teoría clásica de campos*. Barcelona: Reverté.
- LLORIS, A. et al. (1982). *Física COU*. Madrid: SM.
- MARGENAU, H. (1970). *La naturaleza de la realidad física*. Madrid: Tecnos.
- MISNER-THORNE-WHEELER. (1973). *Gravitation*. San Francisco: Freeman.
- OLARTE, M. et al. (1986). *Física COU*. Madrid: SM.
- PENROSE, O. (1991). *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Mondadori.
- RUCKER, R. (1987). *La cuarta dimensión*. Barcelona: Salvat.
- SÁNCHEZ RON, J. (1983). *Origen y desarrollo de la relatividad*. Madrid: Alianza.
- SAZÁNOV, A. (1990). *El universo tetradimensional de Minkowski*. Moscú: MIR.
- TERLETSKII, Y. (1968) *Paradoxes in the Theory of Relativity*. Nueva York: Plenum Press.
- TIPLER. (1992). *Física* (Vol. II). Barcelona: Reverté.
- WANGSNES, R. (1992). *Campos electromagnéticos*. México: Limusa.
- WHITTAKER, E. (1960). *A History of the Theories on Aether and Electricity*. Nueva York: Harper & Bros.

[Artículo recibido en marzo de 1996 y aceptado en mayo de 1997.]