

# $E = mc^2$ , la ecuación más famosa de la física: Una incomprendida

D. Gil <sup>(1)</sup>, F. Senent <sup>(2)</sup> y J. Solbes <sup>(3)</sup>

(Recibido el 24 de junio de 1987. Versión revisada el 20 de octubre de 1987)

## Introducción

Si alguien se toma la molestia de estudiar qué ecuaciones han aparecido más a menudo en la prensa -tanto en las revistas de divulgación científica o de información general como en los diarios- no hay duda que encontrará, como ha señalado Resnick (1980) que la ecuación más conocida de la Física es la famosa  $E = mc^2$ . En efecto, tanto si se habla del peligro nuclear como de la ciencia contemporánea o del mismo futuro de la humanidad, es bastante probable que se haga referencia a esta ecuación.

Este esfuerzo de difusión, obviamente, parece legítimo y no tendría por qué preocuparnos, si no fuese porque la interpretación que a menudo se le da es totalmente incorrecta, deformando la imagen actual del comportamiento de la materia, que la ciencia ha ido construyendo a lo largo de su historia. Y no se trata sólo de que la prensa diaria o revistas poco informadas incurran en error: alguien puede pensar que eso es la regla general y que tampoco es cuestión de inquietarse demasiado. Sin estar de acuerdo con esa indiferencia hacia el papel jugado por los grandes medios de difusión, hay que precisar que no estamos refiriéndonos a errores debidos a "una prensa superficial". Se trata, por el contrario, de una interpretación incorrecta extraordinariamente difundida, no sólo en la prensa no especializada, sino también en las revistas de divulgación científica más prestigiosas y, lo que es más grave, incluso en los textos de enseñanza media y universitaria.

Antes de seguir adelante explicitaremos en qué consiste esta visión incorrecta: nos referimos a la interpretación de la ecuación  $E = mc^2$  como expresión de transformaciones reales de materia en energía y viceversa y según la cual, literalmente, la "desaparición" de pequeñas cantidades de masa "crearía" enormes cantidades de energía.

Digamos de entrada que se trata de un error muy frecuente pero que ha sido cuidadosamente anali-

zado desde hace tiempo (Warren 1976) y que comienza ya a retroceder, aunque en nuestro país lo haga aún muy lentamente. En efecto, en un análisis realizado con una muestra de 28 textos españoles de enseñanza secundaria, autorizados por el ministerio, (15 de 3° de BUP y 13 de Física de COU) hemos encontrado que el 78.6 % (7.8) incurren en dicho error (Gil, Senent y Solbes 1986). Por su parte, Lehrman (1982), en un análisis realizado sobre 14 textos estadounidenses de nivel preuniversitario, encontró dicho error únicamente en un 50 % de ellos.

El objeto de este artículo es doble: dejar claro que Einstein *no* utilizó la ecuación  $E = mc^2$  como expresión de las transformaciones entre masa y energía e intentar clarificar las razones por las que esta interpretación se ha extendido tanto.

Hay que insistir en que no se trata de una cuestión "de especialistas", sino que afecta esencialmente -como trataremos de mostrar- tanto a la imagen actual del comportamiento de la materia como a la misma concepción de la metodología científica.

## ¿Qué es lo que Einstein estableció?

Sin intentar recorrer aquí el complejo proceso histórico de formulación e interpretación de la ecuación  $E = mc^2$  (Miller 1981; País 1984), destacamos que, en 1905, la revista *Annalen der Physik* publicaba un artículo (Ist die Tragheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?) en el que Einstein -tomando explícitamente la conservación de la energía como punto de partida- deduce que "si un cuerpo emite una energía  $E$  en forma de radiación, su masa disminuye en  $E/c^2$ " y generaliza esta relación a todas las formas de intercambio de energía. Sin embargo, Einstein *no* está diciendo que se haya creado una energía  $E$  y que haya desaparecido una masa  $E/c^2$ ; ni que, consecuentemente, hayan dejado de ser válidos los principios clásicos de conservación de la masa y de la energía, como se afirma tan amenudo, incluso en textos universitarios (Solbes 1986).

Por el contrario: Einstein se refiere explícitamente a la conservación simultánea de la masa y de la energía. Lo que Einstein afirma es que un intercambio de energía  $E$  en cualquiera de sus for-

(1) Departamento de Didáctica de las Ciencias y de las Matemáticas de la Universitat Autònoma de Barcelona.

(2) Departamento de Física Fundamental de la Universitat de València.

(3) Servicio de Formación Permanente de la Universitat de València.



mas comporta un intercambio simultáneo de masa, en una cantidad que viene dada por  $m = E/c^2$ . Así, por ejemplo, cuando un cuerpo irradia ondas electromagnéticas, la radiación emitida no es sólo energía: tiene masa inerte y, por tanto, gravitatoria (aun cuando no tenga masa en reposo); y la masa total –la que queda en el objeto radiante más la que tiene la radiación– se conserva, igual que se conserva la energía total.

Más aún: lo que Einstein estableció es que ambas leyes de conservación quedan ligadas por la nueva relación  $E = mc^2$ : *si la energía de un sistema aislado se conserva, la masa tendrá que conservarse también y viceversa*. Estas dos leyes que se habían establecido independientemente aparecen ahora ligadas, interdependientes. O, dicho con otras palabras, ambos principios pasan a ser uno solo (como lo evidencia el hecho de ser  $c$  una constante universal). Hay que resaltar que esta es una característica fundamental del método científico: unificar campos considerados inicialmente como desligados y establecer relaciones de deductibilidad entre leyes diferentes, convirtiendo así el conjunto de conocimientos implicados en un todo coherente (Bunge 1972).

En resumen: el artículo de Einstein aparece hoy como un modelo de exposición clara y sin ambigüedades que no pone en absoluto en cuestión los principios de conservación de la energía y de la masa, sino que, por el contrario, los refuerza al mostrar su interdependencia.

### ¿Cuál es el origen del error?

Si Einstein no dio pie –ni en el artículo citado ni en ningún otro lugar– a hablar de “transformaciones de masa en energía”, ¿por qué esta interpretación se ha popularizado tanto, afectando incluso, durante algún tiempo, a textos universitarios? Hemos de insistir en que no estamos refiriéndonos a cuestiones terminológicas: el uso de expresiones como “materialización” –para la producción de, por ejemplo, un par electrón/positrón– tiene un sentido preciso en el “argot” usual de los físicos de Alta Energía, que no implica necesariamente que se esté incurriendo en el error que estamos analizando. Nos referimos, por el contrario, a expresiones que desarrollan muy explícitamente la interpretación errónea, como diversos autores han puesto en evidencia (Warren 1976; Gil 1981; Lehrman 1982; Gil, Senent y Solbes 1986). Es más, la supuesta transformación de masa en energía se expone en muchos textos en el marco mismo de la Física clásica, al presentar el principio de conservación de la energía (Solbes 1986). No se trata, pues, de referencias al cambio de significado que conceptos como el de masa sufren en la Física relativista (distinguiendo entre masa relativista y masa en reposo, etc.); simplemente se afirma en dichos textos que los principios de conservación de la masa y de la energía no son válidos y deben ser substituidos por un nuevo principio.

¿Cuáles pueden ser las razones de que hoy –cuando dicho error ha sido criticado reiteradamente en las revistas especializadas– no aparezcan las rectificaciones de los científicos en los trabajos de divulgación, en la prensa o en la T.V. que tan fácilmente han ayudado a difundir la visión incorrecta?

Podemos referirnos, en primer lugar, a la distinción clásica entre materia y radiación –equivalente en muchos aspectos a la distinción entre corpúsculos y ondas en la física clásica– según la cual la luz, por ejemplo, no era considerada materia. Hoy sabemos que la radiación electromagnética es tan material como los electrones o cualquier otro objeto: está sometida a la interacción gravitatoria (los rayos de luz procedentes de una estrella “se doblan” al pasar cerca del Sol), posee cantidad de movimiento (efecto Compton), etc. Pero, el establecimiento de este carácter material de la luz ha sido el fruto de un desarrollo científico nada fácil que, como frecuentemente ha sucedido en muchos otros dominios, ha tenido que vencer las “evidencias” del sentido común, dadas las notables diferencias de comportamiento entre la radiación –cuyas partículas no poseen masa en reposo, etc.– y la materia ordinaria. De hecho, como señala País (1984) el fotón fue la partícula que más tiempo tardó en ser aceptada como tal. No debe extrañarnos pues que, incluso hoy, la aceptación de ese carácter material provoque reticencias. Conviene, por supuesto, matizar que la visión unitaria de toda la materia, que la ciencia ha ido construyendo, no es una visión uniformizadora y reduccionista, sino que contempla la existencia de niveles de organización que se rigen por leyes distintas. Dicho de otro modo: reconocer el carácter material de la radiación electromagnética (o de otros campos bosónicos) no supone ignorar sus diferencias respecto a las “partículas” fermiónicas (caracterizadas por un principio de exclusión, etc.).

En cierta medida la situación recuerda a la que históricamente se produjo en relación con los gases: no hace tantos siglos que era puesto en duda su carácter material y no se sospechaba que pudieran transformarse en algo de propiedades tan distintas como un líquido o un sólido. El principio de conservación de la masa, por otra parte, no pudo ser establecido hasta considerar sistemas aislados que impedirían la fuga de los gases. También en la nueva teoría la masa de un sistema aislado se conserva; pero ahora –tal como mostró Einstein– el aislamiento del sistema debe ser más riguroso y tener en cuenta la materia existente en forma de radiación luminosa, etc.

En segundo lugar hay que referirse a las connotaciones ideológicas del problema que, como tantas otras veces a lo largo de la historia, han jugado un papel indudable. En efecto, en el casi constante enfrentamiento entre lo que, simplificando mucho, podemos denominar “materialismo” e “idealismo”, el que la materia no se conservara aparecía como una clara contradicción de las posturas materialistas. Esta forma de “contaminación” ideológica ha estado siempre presente a lo largo de la historia de



la ciencia –ahí están las condenas de la obra de Copérnico, Galileo o Darwin para demostrarlo– y constituye, de hecho, un aspecto indisolublemente asociado al trabajo científico: la idea de una ciencia “neutra y objetiva”, libre de implicaciones ideológicas, no es más que un mito que falsea profundamente el proceso de creación científica (Aikenhead 1985). Hay que reconocer, por el contrario, que los científicos no parten de cero y abordan los problemas desde determinadas posturas teóricas e ideológicas. Sólo así es posible analizar estas posturas, sin que escapen a la crítica.

Llegamos así a una tercera razón que, a nuestro parecer, justifica la persistencia de visiones tan erróneas como las supuestas transformaciones materia/energía que estamos tratando. Nos referimos a una tendencia hoy muy generalizada –y que deforma gravemente la propia metodología científica– consistente en considerar la ciencia como una construcción puramente operativa, según la cual las leyes físicas agotarían su significación en el simple contenido matemático (Feynman 1970). Desde esta postura, hablar de transformaciones masa/energía, no tendría ninguna importancia, ya que serían “pura convención” y el tema no merecería la atención que le estamos prestando. Pero, de hecho, como ya hemos señalado y puede constatarse fácilmente, la relación  $E = mc^2$  continúa interpretándose mayoritariamente e incorrectamente como una expresión de transformaciones reales materia/energía.

Vemos así que renunciar a interpretar es dejar el campo libre a cualquier interpretación que, obviamente, escapará a la crítica. Se niega así a la ciencia capacidad para incidir en la transformación de las ideas y de las concepciones del mundo. La historia nos muestra que las cosas han sido diferentes: no hay, ni puede haber, una ciencia neutra, puramente operativa; detrás de este mito se esconde, repetimos, más o menos conscientemente, una defensa de determinadas posturas ideológicas que intentan escapar así a la crítica.

## A título de conclusión

Hemos intentado mostrar cómo la relación  $E = mc^2$  ha sido –y, en buena medida, sigue siendo– profundamente mal interpretada, deformando así la visión que la Física moderna proporciona del comportamiento de la materia. Puede afirmarse, en efecto, que todo el desarrollo de la nueva Física no es sino una constante afirmación de la idea de una materia de complejidad inagotable, mostrando, además, las limitaciones de ciertas visiones simplis-

tas. En este proceso, la identificación de la luz –en la Mecánica cuántica– como una forma de existencia de la materia, es un resultado totalmente coherente con la ecuación  $E = mc^2$ , que establece que todo intercambio material conlleva un intercambio energético; que no existe una energía “al estado puro”, sin sustrato material; y que de este hecho deriva la existencia de una ligadura indisoluble entre el principio de conservación de la masa y el principio de conservación de la energía, que pasan a constituir un único principio.

Este es el significado de la ecuación  $E = mc^2$  y no la existencia de “desmaterializaciones”, ni en los procesos nucleares ni en ningún otro. Una reacción nuclear no supone ni pérdida o “defecto” de materia ni creación de energía, de la misma forma que cuando se quema petróleo tampoco desaparece materia; en ambos casos, y en cualquier otro –siempre que consideramos un sistema convenientemente aislado– la masa total y la energía total se conservan; lo que se produce son transformaciones de unas formas de existencia de la materia en otras, acompañadas también de transformaciones de unas formas de energía en otras.

Conviene hacer hoy un esfuerzo para aclarar estas ideas y para deshacer interpretaciones erróneas que dificultan una correcta comprensión de las concepciones actuales sobre el comportamiento de la materia y contribuyen a propagar una imagen deformada de la naturaleza del trabajo científico. Esto es lo que hemos pretendido con estas breves consideraciones.

## Referencias bibliográficas

- Aikenhead, G.S., 1985, Collective decision making in the social context of science, *Science Education*, 69, 453-475.  
 Bunge, M., 1972, *La investigación científica*, (Ariel: Barcelona).  
 Feynman, R., 1970, *La naturaleza de las leyes físicas* (Robert Lafont: Paris).  
 Gil, D., 1981, *Evolución de la idea de materia*, (ICE Universidad de Valencia: Valencia).  
 Gil, D., Senent F. y Solbes J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna en la enseñanza media, *Revista de Enseñanza de la Física* (se publicará).  
 Lehrman, R.L., 1982, Confused Physics: A tutorial critique, *The Physics Teacher*, 20, 519-523.  
 Miller, A.I., 1981, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, (Addison-Wesley: Reading, MA).  
 Pais, A., 1984, *La ciencia y la vida de Albert Einstein*, (Ariel: Barcelona).  
 Resnick, R., 1980, Misconceptions about Einstein, *Journal of Chemical Education*, 57, 854.  
 Solbes, J., 1986, *La introducción de los conceptos básicos de la Física Moderna*. Tesis doctoral leída en la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia.  
 Warren, J.W., 1976, The mystery of mass-energy, *Physics Education*, 11, 52-54.