

Un malentendido pertinaz · José Angosto Garat

Einstein escribió su célebre equivalencia masa-energía por primera vez en su artículo: «*¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?*». Lo envió a la revista *Annalen der Physik* el día siguiente a la publicación del artículo en el que presentaba su teoría especial de la relatividad, en septiembre de 1905. En este artículo de apenas tres páginas puede leerse: «Si un cuerpo cede la energía L en forma de radiación, su masa disminuye en L/V^2 ». Esto es lo más parecido a $E=mc^2$ que aparece en el artículo. L era la letra utilizada para designar la energía, y V para la velocidad de la luz. Luego añadía que dicho resultado «nos conduce a una conclusión más general: si [la energía de un cuerpo] cambia en L , la masa cambia en el mismo sentido en $L/9 \cdot 10^{20}$, cuando la energía se mide en ergios y la masa en gramos». Además, se precisaba: «No se excluye que con cuerpos cuyo contenido de energía es variable en alto grado (por ejemplo, las sales de radio) la teoría pueda confirmarse».

En mi opinión los escritos de Einstein rara vez son tan claros. Por ejemplo, si comunicamos a un cuerpo la energía necesaria para escapar del campo gravitatorio de la Tierra, su masa aumentará aproximadamente un $7 \cdot 10^{-8} \%$. Basta con aplicar las expresiones $\Delta E = \frac{GMm}{R}$ y $\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta E}{mc^2}$. Con otros cálculos sencillos también podemos llegar a comprobar que si explotamos TNT, la disminución de masa será del $5 \cdot 10^{-6} \%$. He ahí por qué Einstein pensó en «cuerpos cuyo contenido de energía es variable en alto grado». Aunque la naturaleza de la radiactividad estaba entonces muy lejos de comprenderse, sí se sabía que cantidades ínfimas de cloruro de radio emitían luz y hacían conductor al aire durante mucho tiempo, lo que hizo a Einstein conjeturar que, al contrario que en los ejemplos anteriores, la radiactividad sí permitiría medir la variación de masa que predecía su fórmula.

Sabemos desde hace ya un siglo que en los procesos nucleares la variación de masa puede alcanzar el 1 %, lo que no sólo es perfectamente medible, sino que hace a la ecuación de Einstein una herramienta cotidiana en el estudio de las propiedades de los núcleos. Por ejemplo, arrancar un protón al ^4He , cuya masa es de 4,00 u, cuesta una energía de 19,8 MeV. lo que supone una variación de masa del 0,53 %. Con estos ejemplos confío en haber aclarado que la diferencia entre los procesos físicos o químicos clásicos y los nucleares frente a la ecuación $E=mc^2$ es puramente cuantitativa. Sin embargo, es ya una tradición asociar dicha equivalencia a la energía nuclear y, de ahí, atribuir a esta energía la propiedad exclusiva de transformar masa en energía, lo que constituye un grave error conceptual: la confusión de causa con efecto. Para ser más concretos:

- **Enunciado correcto:** en una reacción nuclear se produce tanta energía que puede medirse la variación de masa de acuerdo con la ecuación de Einstein.
- **Enunciado falso:** en una reacción nuclear se produce tanta energía porque la masa se transforma en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein.

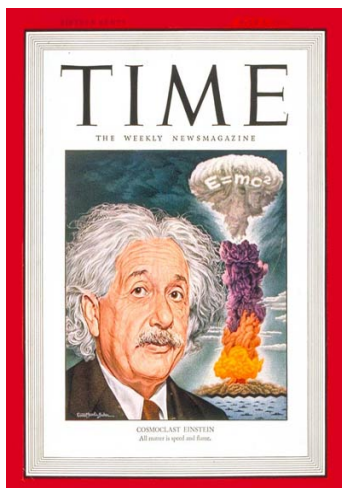


Figura 1: Portada de Time con la famosa ecuación al fondo.
Fuente: Time.

En los procesos nucleares la alta variación de energía es la causa, la pequeña variación de masa el efecto. Por tanto, decir que en una reacción nuclear la masa se convierte en energía es una obviedad, pues lo mismo sucede al oxidar hierro o liberar un muelle; pero afirmar que esta conversión es la razón por la que se produce tanta energía en dichas reacciones es simplemente falso. La Figura 1 muestra la referencia más antigua de este error de la que dispongo. En este número de la revista TIME, de julio de 1946, puede leerse: «Fue su ecuación ($E=mc^2$) la que hizo que la bomba atómica fuera teóricamente posible», lo que evoca la disparatada imagen de los científicos del proyecto Manhattan cavilando sobre cómo transformar masa en energía. Parece que esta portada tuvo un impacto mucho mayor que las protestas de G. Gamow, tal y como recoge en su célebre *Biografía de la Física*:

«Se deben decir algunas palabras sobre la afirmación que infesta los artículos de los periódicos y revistas que asegura que la relación masa-energía de Einstein es la base de la invención de la bomba atómica. Esto es un error, con el mismo derecho se puede decir que esa relación sirve de base para la invención de la nitroglicerina por Nobel (sic) o de la máquina de vapor por Watt... el papel de Einstein en el desarrollo de la bomba atómica no fue la fórmula $E=mc^2$ sino la carta que envió al presidente Roosevelt que, con la autoridad de Einstein, puso en marcha el proyecto Manhattan».

Tampoco faltan libros de texto que expliquen con claridad y sencillez el alcance general de la ecuación de Einstein. En mi vieja edición de 1974 del manual de Química de Babor-Ibarz, que se ufana de incluir el laurencio en su tabla periódica, leemos:

«La relación entre masa y energía da lugar a que la ley de conservación de la materia y la ley de conservación de la energía no sean leyes independientes, sino que deben reunirse en una única ley de conservación de la masa-energía. No obstante, las dos leyes pueden aplicarse separadamente con la sola excepción de los procesos nucleares. Si en una reacción química se desprenden 100.000 calorías la masa de los cuerpos reaccionantes disminuye en $4,65 \cdot 10^9$ g, cantidad totalmente inobservable».

Ha sido inútil. La fascinación que produce la ecuación de Einstein impide, según parece, razonar con claridad. En un reportaje sobre la fusión nuclear titulado «Instrucciones para construir el Sol» publicado en *El País* el 8 de septiembre de 2024, aparece la

explicación siguiente: «*Dos hidrógenos se convierten en un helio. Y en ese proceso se desprende mucha energía, porque se produce un déficit de masa, el de la famosa ecuación de Einstein...*». En un vídeo del canal de Youtube del Instituto de Física Teórica podemos encontrar el mismo error hasta tres veces, y en la web del Consejo de Seguridad Nuclear no hay que buscar mucho para encontrar la misma cantinela. Es más, si preguntamos a la IA de Google «por qué se produce tanta energía en la fisión nuclear» responderá, basándose en lo que he encontrado en la red: «*porque, al dividir núcleos atómicos pesados (como el U-235) mediante un neutrón, la masa total de los fragmentos resultantes es ligeramente menor que la masa del núcleo original...*».

Citaremos como último ejemplo el caso del libro titulado $E=mc^2$, biografía de Einstein publicada por David Bodanis. Se trata de un libro ameno e instructivo, plagado de historias apasionantes contadas por un autor bien documentado y que acredita una sólida formación científica, pero tan pronto como en la página 9 podemos leer: «*En 1939 quedaron claros los detalles de cómo se podía utilizar la ecuación de Einstein con fines bélicos*». O, peor aún, en la página 109: «*Eso [las investigaciones sobre el radio y el uranio] acabaría por mostrar cómo se podía acceder a la energía prometida por la ecuación $E=mc^2$* ».

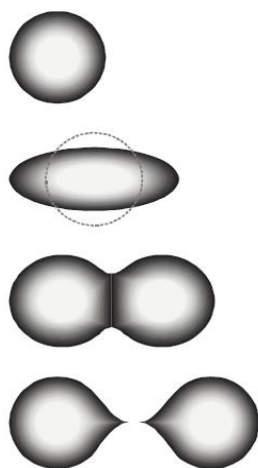


Figura 2: Proceso de fisión en el modelo de la gota líquida. Fuente: Hullernuc (Wikimedia)

¿Energía prometida? ¿Es $E=mc^2$ una nueva fuente de energía? El problema no es sólo confundir causa y efecto, que ya es grave, sino que inevitablemente se elude explicar la verdadera razón por la que se desprende tanta energía en la fisión y fusión nucleares. Se trata de dos mecanismos diferentes que hay que tratar por separado, y que en ningún caso tienen relación con la variación de masa. Esta es, como ya se ha dicho, solamente una consecuencia de la gran variación de energía que tiene lugar en ambos procesos. Como es sabido, cuando un núcleo de ^{235}U absorbe un neutrón lento da lugar a una forma muy excitada de ^{236}U , que se deforma hasta romperse en dos fragmentos, más 2 o 3 neutrones.

La energía necesaria para deformar este núcleo hasta la fisión proviene de la energía de enlace del neutrón absorbido. La Figura 2 muestra esquemáticamente el proceso en el marco del modelo de la gota líquida. En la realidad los dos trozos rara vez son de igual tamaño, uno de ellos suele ser aproximadamente el doble de grande que el otro. En la última etapa de la figura los dos fragmentos están separados por una distancia del orden del tamaño nuclear (en torno a 10^{-14} m) y se repelen con una fuerza inicialmente gigantesca (se sugiere al lector que la estime) que los acelera hasta velocidades próximas al 3 % de la de la luz. La energía cinética que adquieren los productos de fisión supone más del 80 % de la energía desprendida. El resto corresponde a los neutrones emitidos, rayos gamma y, a más largo plazo, desintegraciones beta y gamma.

Si en la fisión es fácil ver cómo la repulsión entre cargas de igual signo produce energía, aunque pasamos de puntillas sobre el mecanismo por el que el núcleo se rompe en la fusión sucede lo contrario: se entiende bien que sólo a temperaturas muy elevadas los núcleos se acercarán lo suficiente para que entre en juego la interacción fuerte, pero no es tan fácil ver cómo se produce energía a partir de ese punto. Esto es lo que pretende aclarar la Figura 3. Aquí d es la distancia entre los núcleos, de aproximadamente 3,8 fm en el máximo de energía potencial, que para dos núcleos de hidrógeno, habitualmente ^2H y ^3H , tiene un valor de unos 0,4 MeV, que corresponde a una temperatura de unos 2.200 millones de K. Por fortuna, el efecto túnel permite que la fusión se produzca a partir de una distancia cincuenta veces mayor, por lo que la temperatura de operación en un reactor de fusión puede ser de 150 millones de K.

Como se aprecia en la gráfica, que evidentemente no está a escala, la energía se produce cuando los núcleos superan la barrera de Coulomb (mejor tomando el túnel) y, en una distancia de apenas 1 ó 2 fm, se aceleran bajo la fuerza de atracción entre nucleones, unas 100 veces más intensa que la electromagnética. La energía neta generada en la colisión se la reparten el núcleo de ^4He que se forma, “doble mágico” en la jerga nuclear y por tanto de gran estabilidad, y el neutrón sobrante que, como exige la conservación del momento, se lleva la mayor parte (14,1 MeV frente a los 3,5 MeV del ^4He).

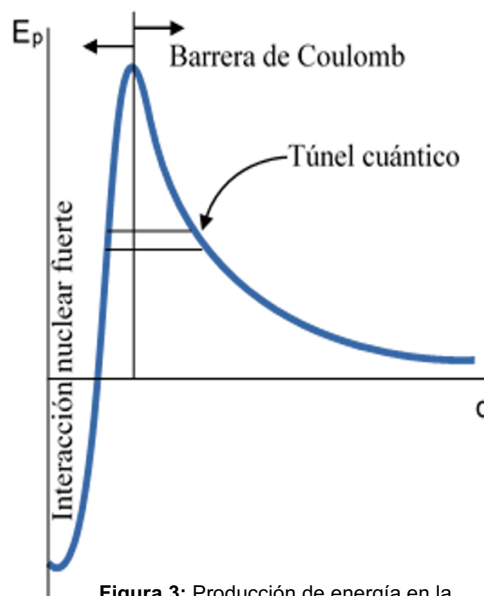


Figura 3: Producción de energía en la fusión nuclear. Fuente: Elaboración propia.

Me encontré con la gráfica de la Figura 4 por primera vez en el último curso de licenciatura. En los primeros ochenta del pasado siglo no era tan famosa como ahora, cuando podemos encontrarla en cualquier libro de texto de Física de 2.º Bachillerato.

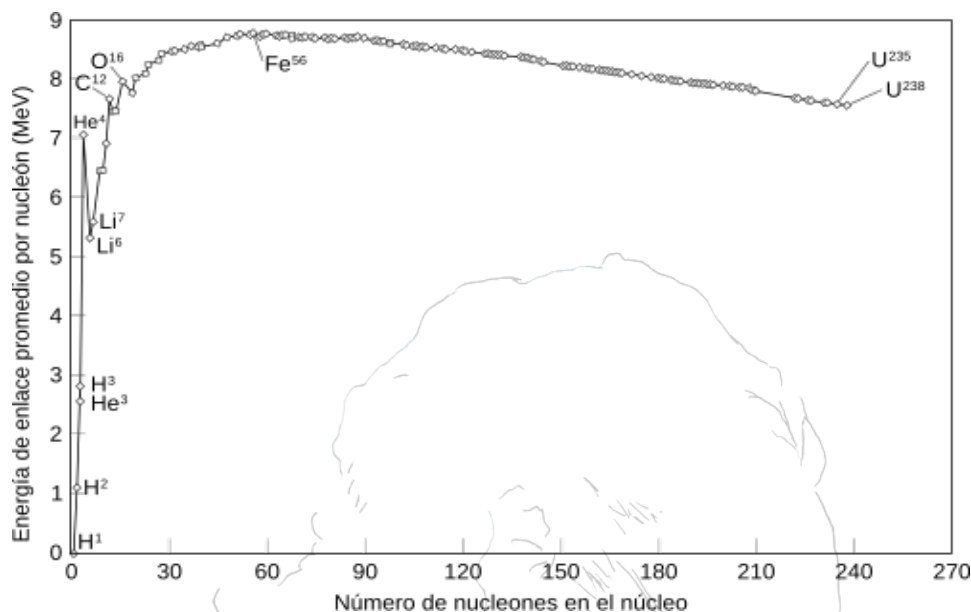


Figura 4: El sueño de todo físico. Fuente: Wikipedia.

Hay que reconocer que se trata de un gran logro científico. El tramo creciente muestra cómo obtener energía de la fusión, el decreciente de la fisión, el máximo la abundancia de carbono y oxígeno en estrellas muertas. Lo tiene todo: bombas atómicas, centrales nucleares, tokamaks, estrellas... ¡y encima $E=mc^2$! Sí, también esta fórmula, porque las energías de enlace se han obtenido multiplicando los defectos de masa por c^2 . Ese es exactamente el papel de la célebre fórmula en esta gráfica.

¿Cuál es el fallo? ¿Por qué tras aprendernos esta gráfica y aprobar la Física Nuclear algunos, demasiados, tardamos tan poco en proclamar que $E=mc^2$ explica el balance de energía en las reacciones nucleares? Nada en la gráfica sugiere que se obtiene energía porque desaparece masa. Los protones y neutrones del 4He están más fuertemente ligados que los del 3H o 3He . Si separarlos cuesta mucho se obtuvo mucha energía al unirlos. El mismo argumento es válido para la fisión, pero esto es solamente un balance de energía. Es opinión mía que debería insistirse en el mecanismo de producción de energía, repulsión electrostática para la fisión y atracción entre nucleones para la fusión, y también en que la disminución de masa es secundaria: sucede en todo proceso en que se desprende energía, únicamente que aquí sí se desprende tanta energía que es posible medirla. ¿Acabaremos así con el mito que yo llamo “Energía nuclear= mc^2 ”? Teniendo en cuenta el éxito que tuvo Gamow lo dudo, pero algo hay que hacer, aunque solamente sea protestar.

José Angosto Garat

joseangosto@gmail.com