

LA ECUACIÓN $E = mc^2$

A la vez fantasía filosófica y genial, física práctica y arma aterradora, $E = mc^2$ se ha convertido en sinónimo del conocimiento técnico por antonomasia. Nuestras ambiciones científicas, nuestras ansias de conocer y nuestras peores pesadillas están encerradas en esos breves trazos de la pluma.

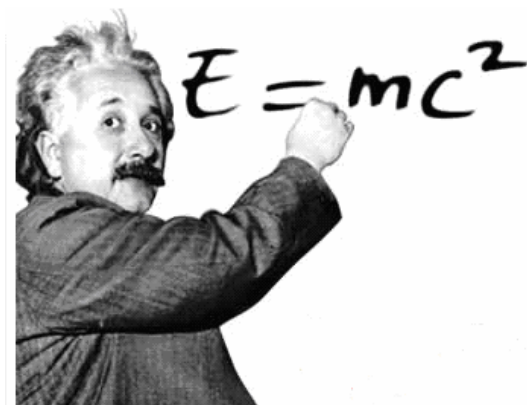
Peter Galison, "La ecuación del sextante"

La ecuación $E = mc^2$ está considerada como la más famosa en la historia de la ciencia, y, con sólo tres letras, una de las más simples. Con ella expresaba Einstein la equivalencia entre la masa y la energía, afirmando que "la masa es una forma extraordinariamente concentrada de energía". La ecuación significa que una minúscula porción de masa m , equivale a una gran cantidad de energía E , que puede calcularse multiplicando dicha masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío, c , unos 300.000 km/s.

Para hacernos una idea de la magnitud de esa equivalencia entre masa y energía, pensemos que una persona tiene unas necesidades energéticas de unas 2500 kilocalorías al día, aportadas por los alimentos que consume. Pues bien, un solo gramo de materia transformado íntegramente en energía, suministraría la que necesitarían 300 personas a lo largo de sus vidas, consideradas de unos 80 años de duración.

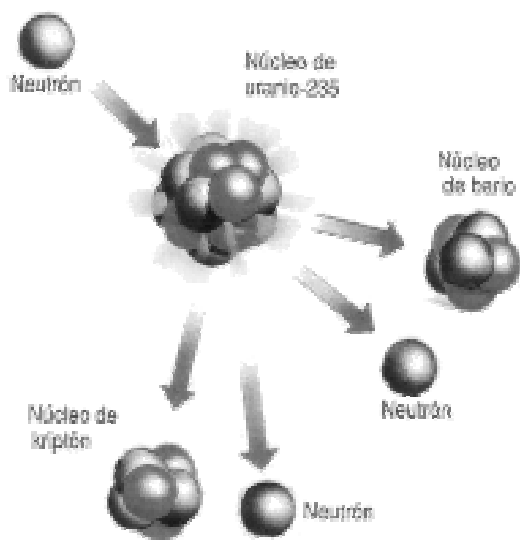
Cuando en 1905 apareció la ecuación en uno de los famosos artículos que ese año publicó Einstein, se abrieron las puertas a la investigación de lo que se llamó la *energía atómica*. Muchos físicos dirigieron su trabajo al objetivo de liberar la energía concentrada en el interior de la materia.

En 1938, los físicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann descubrieron que un núcleo pesado como el de uranio se escinde en dos núcleos más ligeros por la acción de un neutrón, que al no tener carga eléctrica llega hasta el núcleo con facilidad. La masa de los núcleos resultantes era algo menor que la del núcleo inicial. ¿Dónde iba esa masa desaparecida durante la fisión? En la reacción se libera una enorme cantidad de energía (200 MeV), que equivale, según la ecuación de Einstein, a la disminución de la masa de los productos finales de esa reacción con relación a los productos iniciales. O sea, la pérdida de masa se convierte en energía según la ecuación $E = mc^2$.



En ese proceso de *fisión nuclear* se obtienen también otros dos o tres neutrones que pueden colisionar con otros núcleos de uranio, produciendo nuevas fisiones, dando lugar a la llamada reacción de fisión en cadena.

La velocidad con que se lleva a cabo esta reacción en cadena es muy elevada en el caso de ciertos núcleos como el de uranio 235 o el de plutonio 239, por lo que en pocas décimas de segundo el número de fisiones es muy grande y por lo tanto la energía total obtenida en esta reacción tiene un valor muy elevado.



Para domesticar esta enorme fuente de energía se necesitará entonces algún método que permita controlar el número de fisiones que se producen, impidiendo que este número alcance valores muy elevados, y controlando en cualquier momento la reacción en cadena para que no avance más allá de los límites deseados. Este objetivo se consigue en los llamados reactores nucleares donde se genera energía de forma lenta, pues de lo contrario la reacción en cadena se convertiría en una bomba atómica, como las utilizadas por EEUU en 1945 sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki.

En los meses finales de ese año, la equivalencia entre masa y energía descrita en la ecuación de Einstein, constituía a la vez una promesa sin

límites y una tremenda amenaza. La liberación controlada de energía a una escala razonable podría alterar por completo la economía y la capacidad militar de los países. Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, las relaciones entre las potencias vencedoras se hicieron muy difíciles, dando lugar a una época que se ha conocido con el nombre de Guerra Fría. Por este motivo, no era frecuente recibir noticias de lo que sucedía, en materia de investigación nuclear, desde los países implicados en ese conflicto. Sin embargo, en junio de 1954, en la antigua Unión Soviética, por primera vez en la historia, se había puesto en funcionamiento una central que producía electricidad gracias a la energía generada por la reacción de fisión nuclear. La primera central nuclear comercial del mundo occidental se inauguró en Calder Hall, Inglaterra, en 1956. En España tuvimos nuestro primer reactor nuclear de investigación en 1958, y la primera central productora de electricidad entró en funcionamiento en 1969, en Almonacid de Zorita (Guadalajara).

Fusión

Por la misma época en que Hahn y Strassmann explicaban el mecanismo de la fisión, el físico estadounidense de origen alemán Hans Bethe, aclaraba el ciclo de reacciones termonucleares de producción de energía en las estrellas, mecanismo conocido como *fusión nuclear* que, en síntesis, consiste en que dos núcleos de elementos ligeros se funden para producir otro núcleo ligeramente más pesado. Esta reacción origina el caudal ilimitado de energía en el Sol y

en las demás estrellas que, como él, están compuestas principalmente por *hidrógeno* y *helio*. El proceso ocurre allí de modo natural debido a su elevadísima temperatura interior.

Bethe sugirió que cuatro núcleos de protio (isótopo del hidrógeno, con sólo un protón en su núcleo), se fundían en un núcleo de helio con emisión de dos *positrones*, (partículas iguales a los electrones pero con carga positiva). Al igual que en el caso de la fisión, en la fusión hay una pérdida de masa de los productos finales de esa reacción con respecto a los reactivos, y esa disminución de la masa proporciona una cantidad equivalente de energía dada por la ecuación de Einstein $E = mc^2$.

Para que la reacción de fusión sea posible hay que vencer la repulsión eléctrica que, según la ley de Coulomb, existirá entre los núcleos cargados positivamente cuando se acercan a la distancia requerida para que puedan fundirse. En las estrellas la alta temperatura existente en ellas proporciona la energía necesaria para vencer esa repulsión. Para producir en la Tierra una energía de este tipo debidamente controlada, la temperatura necesaria debe ascender a unos 100 millones de grados centígrados. En esas condiciones, la materia se encuentra en forma de gas ionizado, que exhibe un comportamiento colectivo, llamado *plasma*, considerado como un nuevo estado de la materia, distinto a los de sólido, líquido y gas. La primera reacción de fusión artificial, tuvo origen en la investigación militar, fue una bomba termonuclear, llamada bomba H o de Hidrógeno. Para obtener la tempera-

tura adecuada que iniciaba el proceso de fusión, unos veinte millones de grados, se utilizó una bomba atómica de fisión.

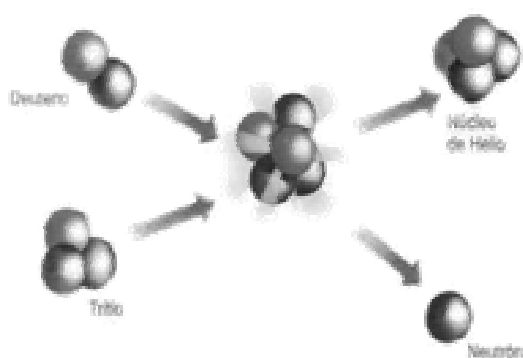
A las altas temperaturas necesarias, todo lo que entra en contacto con la mezcla de reacción se funde. Existen dos métodos para evitar tal cosa: el confinamiento magnético y el confinamiento inercial. Este último consiste en almacenar el reactivo en una diminuta bola de cristal, que se calienta y comprime hasta que se produce la reacción de fusión y se origina una "micro-explosión", pequeña para deteriorar el receptáculo, pero suficientemente importante para producir energía útil.

Las investigaciones actuales, no obstante, se centran principalmente en el sistema de confinamiento magnético del tipo *Tokamak*, recipiente en forma de rosca, en el que se mantiene el plasma separado de las paredes gracias a un campo magnético muy potente, creado mediante una intensa corriente eléctrica inducida en el interior del propio plasma. Otra variante es el confinamiento magnético tipo *Stellerator*, en el que el campo magnético se genera con corrientes eléctricas producidas por bobinas en el exterior del plasma.

Existen diversos tipos de reacciones de fusión aprovechables desde el punto de vista energético. De entre todas, la reacción entre núcleos de deuterio y tritio es la que presenta más eficiencia para temperaturas no excesivamente altas y, por tanto, más fácil de obtener de manera controlada. El deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno, con un protón en su

núcleo, al que acompaña un neutrón en el caso del deuterio, y dos neutrones en el tritio. En la reacción se genera helio y un neutrón residual.

El deuterio es relativamente abundante en el agua del mar, pero el tritio no existe en estado natural y es preciso producirlo por reacción de un neutrón sobre núcleos de un isótopo de litio, elemento abundante en la corteza terrestre.



La obtención de energía a través del proceso de fusión presenta ciertas ventajas sobre la obtención a partir del proceso de fisión:

- Comparativamente, la fusión proporciona más energía que la fisión.
- El "combustible" necesario, deuterio y tritio, es barato, ilimitado y fácil de obtener.
- Se precisa una cantidad muy pequeña de combustible, del orden de un gramo.
- No se producen reacciones en cadena, difíciles de controlar.

- El único residuo de la reacción es el helio, sin apenas productos que afecten al medio ambiente.

- Las especiales condiciones de la reacción hacen que cualquier desequilibrio de las mismas interrumpa automáticamente el proceso aumentando la seguridad del mismo.

Ahora bien, el problema principal estriba en que la energía de fusión está todavía en fase de investigación. No está resultando nada fácil el reto de "embotellar una estrella". Los físicos dedicados a la fusión vienen diciendo desde siempre que faltan unos 50 años para que pueda ser controlada y aprovechada; por eso se habla irónicamente de esos 50 años como "la magnitud física mejor conservada".

No obstante, a pesar del complejo problema tecnológico aún por superar, parece que la fusión nuclear controlada constituye en la actualidad una de las mejores opciones para hacer frente a la fuerte demanda de energía que la sociedad plantea.

Las previsiones de gasto de energía a nivel mundial apuntan a que para mediados del presente siglo XXI, las necesidades energéticas se multiplicarán por tres respecto a las que teníamos a finales del pasado siglo XX.

Para cubrir una parte sustancial de esas necesidades energéticas previstas disponemos de las siguientes fuentes de energía:

Combustibles fósiles: principalmente el carbón, ya que se estima que en condiciones favorables de explotación las reservas de petróleo durarán unos 50 años y las de carbón unos 200 años. Por otra parte, los combustibles fósiles presentan problemas de contaminación ambiental, como lluvia ácida y exceso de gases de invernadero.

Energías renovables: hidráulica, solar, eólica, maremotriz, geotérmica, biomasa, etc. Aunque vayan cubriendo algunas necesidades energéticas, son por el momento fuentes dispersas, de baja concentración para usos industriales y de un mayor coste económico a nivel general, al margen de que también pueden ocasionar problemas de contaminación sonora y alteración estética del paisaje.

Energía nuclear de fisión: las reservas de uranio podrían durar tal vez unos miles de años, pero las centrales nucleares de fisión llevan asociados el problema del almacenamiento de residuos de alta radiactividad, y el peligro de posibles escapes de materiales muy contaminantes.

Energía nuclear de fusión: las ventajas apuntadas más arriba hacen de ésta, la opción con mayor capacidad potencial de suministro de energía a gran escala para el siglo XXI. Para superar las dificultades técnicas que la hagan viable se trabaja actualmente en un gran proyecto internacional conocido como ITER, cuya sede será el CEA de Cadarache, en Saint-Paul-Lez-Durance, a unos cuarenta kilómetros al norte de Aix-en-Provence, en el sureste de Francia, donde se instalará un potente reactor nuclear, con un precio estimado de diez mil millones de euros.

Del éxito de ese proyecto dependerá en buena medida que en el futuro dispongamos de energía abundante y fácilmente accesible, aprovechando el fundamento teórico que nos legó Einstein en su sencilla ecuación $E = mc^2$.

