

¡Extra! ¡Extra! Nació un sol en la Tierra

Margarita I. Bernal-U. y W. Luis Mochán B. Margarita Bernal Uruchurtu y Luis Mochán Backal son miembros de la Academia de Ciencias de Morelos e investigadores titulares del Centro de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, y del Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, respectivamente. Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

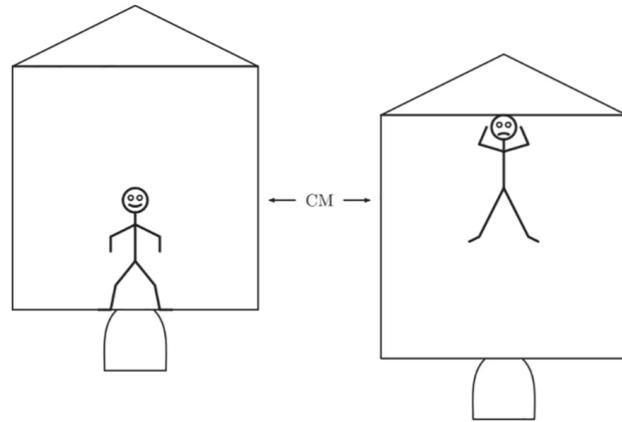


FIGURA 1. ASTRONAUTA en una nave espacial en reposo. Si el astronauta salta hacia arriba, empujaría a la nave hacia abajo manteniendo el centro de masa (CM) fijo.

La noticia

Pocas veces nos encontramos frente a un logro científico que puede convertir una idea concebida hace más de 60 años en una realidad que podría modificar de manera fundamental y positiva la vida en este planeta (1-3). El pasado 5 de diciembre, hoy hace dos semanas, Alex Zylstra se levantó a la 1:03 AM a revisar los datos que había arrojado un experimento que en el *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), llevaban meses preparando. Una prueba en que tenían puestas muchas esperanzas, a pesar de los muchos fracasos sufridos en los meses y años previos. El Laboratorio Nacional de Ignición (*National Ignition Facility*, NIF) es una instalación que ocupa un área equivalente a tres estadios de fútbol juntos, proyecto planeado desde los años 70's, pero cuya obra se inició apenas en 1997 y hasta marzo de 2009 empezó a operar. Allí tuvo lugar la historia que les vamos a contar, en la que sucedió algo que parecía imposible. Miles de personas, cientos de grupos de colaboradores, cantidades millonarias de energía en espacios micrométricos y en lapsos extraordinariamente pequeños son los personajes.

El experimento pensado

Todo empezó hace poco más de un siglo con el análisis de un experimento *pensado*. La *tercera ley de Newton* enuncia que a cada acción le corresponde una reacción igual y opuesta. Por ejemplo, si usted quisiera romper un muro golpeándolo con la cabeza, con una alta probabilidad la reacción del muro le romperá la cabeza a usted. Una consecuencia de dicha ley es que el *centro de masa* de un sistema aislado en reposo no se puede mover sin la acción de fuerzas externas, hagan lo que hagan sus partes internas. Por ejemplo, imagine un astronauta descansando en una nave espacial quieta en el espacio exterior que repentinamente salte hacia arriba. La reacción empujaría a la nave hacia abajo. Conforme él asciende, la nave descendería, de manera que el *centro de masa* se mantendría fijo (ver figura 1).

Si en lugar de brincar, aventara piedras o balas o cualquier otro tipo de proyectil desde el piso hacia el techo de la nave, el centro de masa también permanecería inamovible. Lo que se preguntó Einstein durante 1905 fue algo así como: ¿qué pasaría si en la

nave oscura se prendiera momentáneamente una linterna en el piso de la nave y el techo absorbiera su luz? La luz lleva energía e ímpetu. Al prender la linterna, la nave sería empujada hacia abajo, como si el astronauta saltara, pero ¡el centro de masa no debería moverse, ni siquiera un poquito! ¿Cómo compensar el movimiento de la nave? Al final, la nave volvería a la obscuridad, pero la batería que alimenta la linterna se descargaría, perdería energía, y el techo se habría calentado, ganaría energía. El movimiento de la nave podría compensarse si la batería se aligerara al perder energía y si el techo adquiriera masa al absorber energía, *si la energía pudiera intercambiarse con la masa*. Haciendo las cuentas, Einstein concluyó que... adivinó Ud., $E=mc^2$. En esta ecuación, E representa energía, m representa masa y c es la velocidad de la luz, cercana a trescientos mil kilómetros por segundo. Si, por algún motivo, lográramos hacer desaparecer, digamos, un gramo de masa, la energía libreada sería $E=10^{-3}Kg \times (3 \times 10^8 m/s)^2 \approx 10^{14}$, cien millones de millones de Joules, aproximadamente la energía cinética de doscientos cincuenta millones de autos de una tonelada moviéndose a cien kilómetros por hora, es decir muuuuuucha energía.

Reacciones nucleares

También hace poco más de 100 años se descubrió la radioactividad; resulta que los núcleos de algunos átomos pesados pueden partirse, *fisionarse*, para dar origen a núcleos de otros átomos más ligeros y otras partículas, y núcleos de algunos átomos ligeros pueden pegarse, *fusionarse*, para dar lugar a núcleos de átomos más pesados. En estas *reacciones nucleares* suele suceder que *la suma de las masas de los productos sea menor que la suma de las masas de los reactivos*. La diferencia de masas se libera como energía de acuerdo con la fórmula de Einstein descrita arriba. La forma en que podría aprovecharse esta energía ha motivado innumerables investigaciones. Los átomos de todos los elementos están

formados por tres tipos de partículas: en el núcleo residen los protones, que tienen carga positiva, y los neutrones, que no tienen carga. Alrededor del núcleo giran los electrones, con carga negativa. En un átomo neutro, el número de protones es igual al de electrones y determina las propiedades químicas de cada elemento. El número de neutrones de cada elemento puede variar, dando origen a diferentes *isótopos*, algunos estables, otros no. Por ejemplo, el núcleo del hidrógeno, el átomo más sencillo que existe, tiene un solo protón, pero puede tener un solo *neutrón* (el protón, sin neutrones, *protio*), dos nucleones (*deuterio*) o tres nucleones (*tritio*). De los tres, el protio es el más abundante y estable, seguido por el deuterio y finalmente el tritio. Algunos isótopos de elementos pesados, como el uranio 236 (^{236}U) son inestables y espontáneamente se pueden partir. Por ejemplo, el ^{236}U se rompe en bario 144 (^{144}Ba) y kriptón 90 (^{90}Kr) y dos neutrones que pueden chocar con átomos de uranio 235 (^{235}U) para convertirlos en ^{236}U y volver a empezar el ciclo, liberando en el proceso energía y neutrones en forma descontrolada, como en una bomba atómica, o controlada, como en los reactores nucleares empleados para generar energía eléctrica.

El proceso contrario, unir o fusionar dos o más núcleos en uno mayor es un proceso que también libera una enorme cantidad de energía. La fusión nuclear ocurre en el interior de las estrellas, como el Sol y es la responsable de la luz y el calor que recibe nuestro planeta. También ha sido responsable de la formación de la mayor parte de los elementos. Por ejemplo, en un choque entre dos protones, éstos pueden fundirse para formar un núcleo de deuterio y emitir un *positrón* (una especie de electrón de carga positiva). Un núcleo de deuterio puede fundirse con otro protón para formar un núcleo de helio-3, 3He y dos núcleos de 3He pueden fundirse para formar un núcleo estable de 4He y dos protones adicionales. De esta manera, cuatro protones producen un núcleo estable de helio y otras partículas y aproximadamente 27MeV's de energía (un MeV es un millón de eV's, y un eV es la

energía que gana un electrón al ser acelerado por el campo eléctrico que produce una diferencia de potencial de un Volt). Este es uno de los procesos que producen la energía solar (ver Figura 2). Curiosamente, el helio, segundo elemento más abundante en el universo, se descubrió en el Sol gracias a su peculiar *color* antes de ser hallado en nuestro planeta, donde es muy escaso.

La fusión controlada

La fusión nuclear se ha empleado para armas termonucleares, la temible bomba de hidrógeno, pero a diferencia de la fusión, no ha podido usarse para generar energía útil de manera controlada. Una dificultad con la fusión es que todos los núcleos tienen carga eléctrica positiva y se repelen. Así, es necesaria mucha energía para acercar un núcleo a otro a distancias lo suficientemente pequeñas para que queden unidos por las fuerzas nucleares. Éstas son mucho más fuertes que las eléctricas, pero sólo actúan a distancias muy pequeñas. Es como pretender patear una pelota de fútbol para que ruede hacia arriba por la ladera de un volcán como en la figura 3 y caiga en su minúsculo cráter. Para ello, habría que darle suficiente energía para llegar hasta la cima, pero, además, habría que apuntar muy bien para que no se desvíe de lado, como en la figura 3.

Confinamiento magnético e inercial

Para lograr la fusión se requiere que los núcleos se muevan con mucha energía. ¿Cuánta? El alcance de las

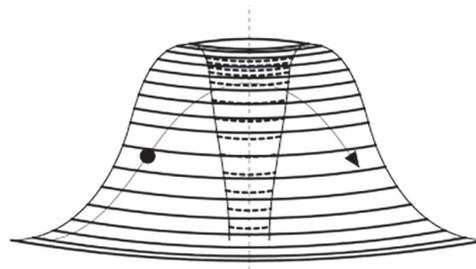


FIGURA 3. ENERGÍA potencial de un núcleo que se acerca a otro, en forma de volcán. Para fusionarse debe tener suficiente energía para llegar a la cima y caer en el angosto cráter. Además, debe tener una dirección adecuada para atinarle al cráter y no pasarlo de lado.

fuerzas nucleares es del orden del tamaño de los protones, alrededor de $r=1fm=10^{-15}m$, una milésima de milonésima de milonésima de metro. Acercar dos protones a dicha distancia requiere vencer la energía de repulsión electrostática $V \propto e^2/r$, donde e es la carga del protón. El resultado es 1.4MeV, más de un millón de electrón-volts. Esas energías corresponden a temperaturas de miles de millones de grados Celsius o presiones altísimas que empujen a una partícula contra otra. El asunto es cómo provocar en un laboratorio en la Tierra y en condiciones seguras, reproducibles y rentables, reacciones de fusión nuclear como las que ocurren en el Sol. Considerando que la temperatura de fusión del acero es de apenas 1,500 grados, podrá usted

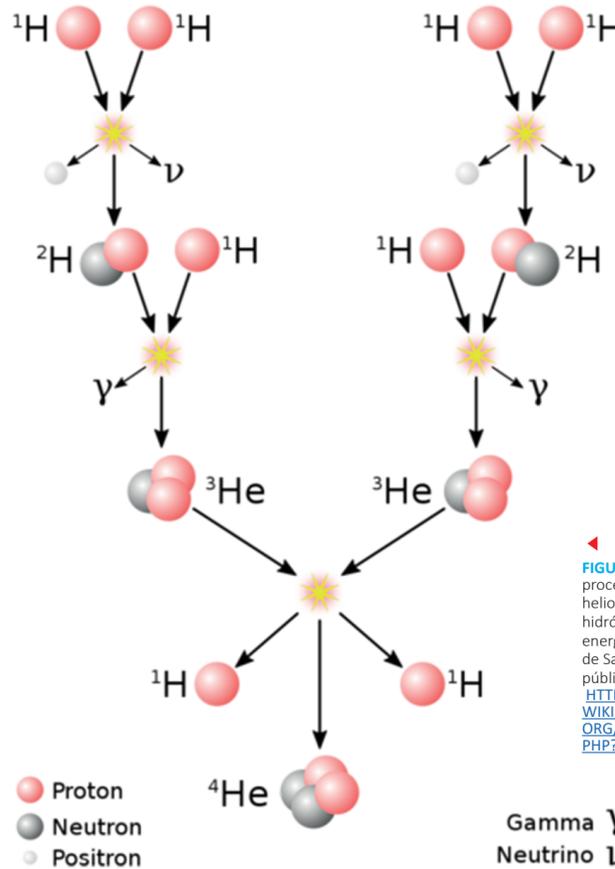


FIGURA 2. UNO de los procesos que forman helio a partir de hidrógeno y producen energía en el sol. (tomado de Sarang (dominio público) [HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/W/INDEX.PHP?CURID=51118538](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=51118538))

imaginar que el principal problema de un reactor de fusión es evitar que se fundan sus paredes. Para ello, es indispensable evitar que las partículas energéticas toquen sus superficies. Una técnica para evitarlo es generar intensos campos magnéticos cuyas líneas de campo atrapan a las partículas ionizadas. Este es el llamado *confinamiento magnético*, empleado en reactores experimentales como el *Tokamak* y el *ITER*, en que los núcleos recorren trayectorias helicoidales dentro de un toroide, una cavidad en forma de dona. Otra técnica, llamada *confinamiento inercial*, consiste en hacer explotar una pequeñísima cápsula esférica llena de gas, suministrándole un pulso ultraenergético que creará un plasma a presión tan alta que mientras las capas externas explotan y se expanden, las fuerzas de reacción compriman a las capas internas, haciéndolas implotar hasta alcanzar densidades y temperaturas comparables o mayores a las presentes en el centro del Sol.

El experimento

En el LLNL se emplearon 192 poderosos láseres ultravioleta que generaron rayos-X en una pequeñísima cavidad, radiación que en unos mil millonésimos de segundo vaporizó una cápsula de diamante que medía apenas unos milímetros y calentó su contenido, una mezcla de deuterio y tritio, hasta temperaturas cercanas a 150 millones de grados Celsius, produciendo un plasma, formado por electrones y núcleos moviéndose con una altísima velocidad (ver figura 4). Simultáneamente ocurrió una violenta explosión a velocidades de cientos de kilómetros por segundo en que la presión llega a ser diez mil veces más grande que la del Sol. La compresión desató el proceso de fusión que produjo núcleos de helio 4He y neutrones, y liberó energía que aceleró otras reacciones de fusión nuclear que generaron más energía aún. Los láseres suministraron una energía de 2.05MJ (millones de Joules) y se obtuvieron 3.15MJ. Por primera vez en la historia, ¡se obtuvo más energía de una reacción de fusión controlada que la energía con que se alimentó al reactor! Se logró la llamada *ignición*.

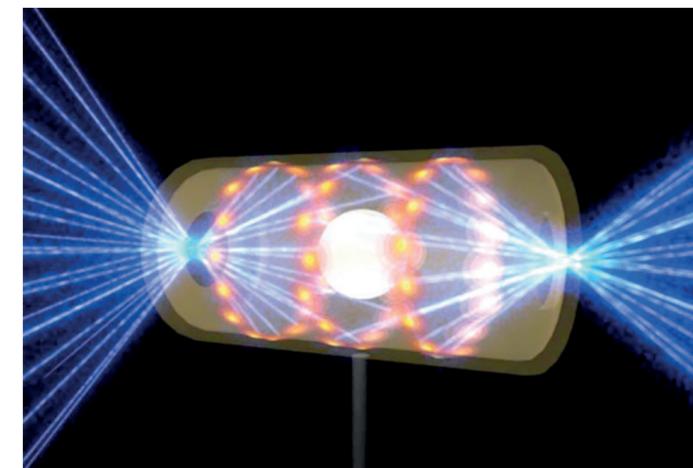


FIGURA 4. CELDA de combustible en cavidad. La luz ultravioleta de numerosos láseres penetra una cavidad de alrededor de un centímetro donde generan rayos X que vaporizan una celda esférica de diamante de alrededor de un milímetro y comprimen un plasma de deuterio y tritio en su interior generando reacciones de fusión nuclear produciendo helio y neutrones. (tomado de <https://bit.ly/3W9BRrA>).

Primer reto: La luz

Durante el último año, un equipo de ingenieros, físicos y técnicos dirigidos por Jean-Michael Di Nicola logró reconfigurar las 192 fuentes de radiación láser para aumentar su potencia en un 8%, produciendo pulsos de luz láser con energía superior a dos millones de Joules con una duración de apenas unos ns (nanosegundos, milésimas de milonésimas de segundo), correspondiente a potencias instantáneas de miles de millones de millones de Watts, mayor a la potencia de toda la red eléctrica de los Estados Unidos. Sin embargo, para alcanzar la ignición,

no solo basta la fuerza bruta. Fue indispensable que todos los láseres estuviesen alineados y sincronizados, de forma que incidieran al mismo tiempo sobre el lugar preciso de la cavidad para distribuir su energía uniformemente. Si no, la cápsula se deformaría y no habría implósion. Considerando que la cápsula apenas medía milímetros y la luz avanza 30cm cada ns entenderemos que este reto técnico es tan delicado como suministrar la energía suficiente para arrancar la fusión.

Segundo reto: La cápsula

Imagine una esfera navideña pero hecha de diamante y del tamaño de un grano de pimienta. Durante años, un centenar de personas trabajó en Estados Unidos y en Alemania para crear este tipo de esfera, depositando átomos de carbono lentamente y a muy bajas temperaturas mediante técnicas de nanotecnología. Estas esferas, cientos de veces más lisas que un espejo, deben unirse a un pequeño tubo cuyo diámetro es cincuenta veces más delgado que un cabello, a través del cual se le suministra el combustible. La esfera debía estar libre de defectos, pero, de acuerdo con el responsable de fabricación de blancos, Michael Stadermann, una región del tamaño de una bacteria con átomos mal acomodados podría arruinar el experimento. Para llevar a cabo el control de calidad, caracterizar cada cápsula, e identificar la posición, forma y tamaño de cualquier defecto, se desarrolló una técnica tomográfica de rayos X, similar a las empleadas para diagnóstico clínico, pero en escalas mucho más pequeñas, y se *entrenaron* sistemas expertos computacionales para analizar las imágenes.

Tercer reto. La medición

El éxito recién logrado es resultado de numerosos ejercicios de ensayo y error, con más errores que logros. Para tener éxito es necesario *medir* los resultados de cada ensayo, diagnosticar sus errores y corregirlos. ¿Cómo medir lo que sucede en el interior de una miniexplosión termo-

que ocupa una región de apenas una décima de milímetro, medir el consumo del combustible, alrededor del 4% de la mezcla original. Cada una de estas tareas es crítica para entender las condiciones del experimento, poner a prueba diferentes hipótesis y entender los efectos de cambiar sus condiciones y optimizarlo. En esta ocasión la reacción de fusión se confirmó pues se formaron núcleos de Helio y neutrones. Contando neutrones se contabilizan las reacciones de fusión. Conociendo la energía liberada en cada fusión se puede confirmar la energía liberada. La cuenta de neutrones liberados se hace de varias maneras a fin de confirmar con diferentes técnicas que la reacción de fusión es responsable de la energía producida.

Perspectivas

En el experimento de ignición se obtuvo más energía, resultado de la fusión nuclear, que la inyectada a través de luz laser. Eso abre las puertas para reponer la energía inyectada y usar la energía sobrante para darle cualquier otro uso, como podría ser generar energía eléctrica. La ventaja de la fusión nuclear como fuente de energía es que usa como *combustible* un elemento muy abundante y no produce residuos radioactivos, tóxicos, ni libera gases de efecto invernadero y permitiría descarbonizar la economía, algo urgente en esta época en que vivimos un acelerado cambio climático que pone en riesgo a nuestra civilización. El experimento es resultado de un esfuerzo masivo que involucró la colaboración de centenares de científicos y técnicos especializados en un sinnúmero de diferentes temas. La energía sobrante obtenida por cada disparo de los láseres, si bien corresponde a un millón de Joules, apenas alcanzaría para hervir unos pocos litros de agua. El sistema de láseres empleado apenas puede dispararse diez veces por semana, por lo que estamos muy lejos aún de un sistema práctico de generación de energía. Peor aún, la energía que los láseres entregan al blanco es apenas una fracción, alrededor del 1%, de la energía requerida para operar los láseres. Si bien se habla de *ignición*, en realidad se gastaron 300MJ para producir 3MJ y la reacción no se puede sostener sola aún. Es un logro indiscutible tras décadas de trabajo el lograr producir más energía en la celda de combustible que la energía que le suministra el sistema de láseres. Pero pasar de este logro a un sistema práctico de generación de energía abundante y limpia requerirá de más décadas de trabajo científico y técnico colaborativo. Así es el progreso de la ciencia y la técnica. Requiere ideas innovadoras, recursos, colaboraciones, muchos logros pequeños, recuperarse y aprender de muchísimos fracasos, paciencia y perseverancia. Debemos aprender de este ejemplo en nuestro país.

Agradecimientos
WLMB agradece el apoyo de DGAPA-UNAM (IN109822).

Bibliografía
Conferencia de prensa sobre el NIF, *Lawrence Livermore National Laboratory*, <https://bit.ly/3V8rBOU>

A shot for the ages: Fusion ignition breakthrough, Lawrence Livermore National Laboratory, <http://bit.ly/3V8nzGn>.

Nuclear scientist Marv Adams explains what happened in the successful fusion experiment, Guardian News, <https://youtu.be/w-5bNFG50KU>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx

