



FUSIÓN NUCLEAR

La panacea energética: una quimera
cada vez más real

RESUMEN

Una pequeña introducción a la posible energía del futuro, su historia, su estado actual y su previsible futuro

Tío Gamyi



Contents

1.)	Introducción	2
2.)	La energía del Sol: qué es la fusión nuclear	3
2.1)	La importancia de una letra: la fusión no es fisión	4
2.2)	Obstáculos en el camino a las estrellas	5
2.3)	Transmutando la materia sin alquimia: métodos para la fusión	6
3.)	La energía que <i>siempre</i> está a 50 años vista.....	7
3.1.)	Las bases teóricas	7
3.2.)	Encendiendo el fuego estelar	7
3.3.)	Todos quieren un tokamak	8
3.4.)	La fusión inercial se dispara	9
3.5.)	Rompiendo récords de energía y temperaturas	9
3.6.)	¿Ciencia patológica o incomprendida? el bluff de la fusión fría	11
3.6.1.)	El sorprendente anuncio	11
3.6.2.)	Frenesí, entusiasmo y confusión	11
3.6.3.)	Escepticismo y rechazo	12
3.6.4.)	Epílogo: un frío legado	13
4.)	ITER: este es el camino.....	14
4.1)	Un tokamak colosal.....	14
4.2.)	Cuánto cuesta seguir la senda	14
4.3.)	Se hace camino al andar: las siguientes etapas	15
4.4)	La contribución española al recorrido.....	15
5.)	Últimos avances	16
5.1.)	Ignición en el NIF: breakeven sí, pero menos	16
5.2.)	El “sol artificial chino”	17
5.3.)	Fusión a cañonazos.....	17
5.4.)	Microsoft no espera: ¿fusión para 2028?	18
	Bibliografía.....	20



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



"A star is drawing on some vast reservoir of energy by means unknown to us. This reservoir can scarcely be other than the subatomic energy which, it is known, exists abundantly in all matter; we sometimes dream that man will one day learn how to release it and use it for his service. The store is well-nigh inexhaustible, if only it could be tapped".

(Arthur Eddington, astrónomo. 1920)

1.) Introducción

Imaginad: una fuente de energía **barata, limpia, segura y virtualmente inagotable**. Prácticamente sin residuos y con cero emisiones de carbono a la atmósfera. ¿Ciencia ficción? ¿Demasiado bueno para ser cierto? Sin duda el discurso suena al timador que en la serie animada de *Los Simpson* le vendía el monorraíl a la ciudad de Springfield.

Pero lo cierto es que la Humanidad lleva persiguiendo este **Santo Grial de la energía** desde hace 70 años y, aunque los avances son lentos, la quimera parece cada vez más al alcance de la mano. Todas las grandes potencias mundiales invierten hoy día **cifras exorbitadas** en la investigación de esta energía.

La necesidad de encontrar alternativas a los **combustibles fósiles**, junto con la urgencia impuesta en los últimos tiempos por el **cambio climático**, y las crecientes demandas de energía del planeta¹ hacen que la fusión resulte cada vez más atractiva, y concite aún mayores esfuerzos entorno a su consecución efectiva y rentable.

En este episodio nos gustaría explicar en qué consiste la fusión, aún poco conocida y nacida con el estigma negativo de "nuclear", pero que puede convertirse en una herramienta fundamental para el futuro de la Humanidad. Repasaremos brevemente su historia, en qué punto se encuentra en la actualidad, cuáles han sido los últimos avances y cuáles son los planes de futuro.

¹ Recuerdo haber leído en uno de los libros de divulgación científica de Paul Davies de finales de los 80 la descripción de la siguiente situación imaginaria para ilustrar las necesidades energéticas del planeta: supongamos un futuro en el cual la humanidad ha encontrado la manera de deshacer el gigante gaseoso Júpiter y convertirlo en una nube opaca entorno al Sol, de forma que toda su energía de luz y calor queda atrapada en el interior y puede ser aprovechada. Pues bien, Davies estimaba que, si la demanda energética de la Tierra seguía aumentando conforme a la tendencia de las últimas décadas, en no muchos años llegaríamos a necesitar cantidades de energía similares a las proporcionadas por ese fantástico escenario de ciencia ficción.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

2.) La energía del Sol: qué es la fusión nuclear

La fusión nuclear es el fenómeno físico por el que dos átomos de un elemento químico se unen para generar otro más pesado, liberando en el proceso una **gran cantidad de energía**, en forma de luz y calor².

La fusión es el fenómeno que **hace brillar a todas las estrellas**, y habitualmente se da con los elementos químicos más abundantes en el Universo (que son también los más simples), esto es: dos átomos de **hidrógeno** (H, número atómico 1, con un protón y un neutrón en el núcleo, orbitados por un electrón) se unen para formar uno de **helio**³ (He, número atómico 2, con 2 protones en su núcleo), emitiendo neutrones y energía⁴.

En el interior de una estrella como nuestro Sol, sometidos a **temperaturas de unos 15 millones de grados** centígrados y a unas **presiones inimaginables**⁵, los átomos de H colisionan entre sí y, venciendo la repulsión de Coulomb, se fusionan: se calcula que cada segundo 600 millones de toneladas de H lo hacen formando He. Durante el proceso, parte de la masa de los átomos de H se convierte en energía.

La fusión no solo se produce con átomos de hidrógeno; átomos más pesados pueden fusionarse y dar pie a elementos más complejos: los átomos de helio se fusionan en carbono (reacción que se produce en las llamadas gigantes rojas). A su vez, el carbono genera oxígeno y neón. El neón se combina en magnesio, este en silicio y finalmente (con un núcleo estelar a 2000 millones de grados, más la inmensa presión generada por la masa estelar) el silicio se fusiona generando hierro⁶.

Algunos cosmólogos especulan con que nuestro sistema solar se formase con materiales de estrellas antiguas; así, por ejemplo, todo el hierro de la tierra vendría del núcleo de astros desaparecidos tiempo atrás.

Desde el punto de vista de la fusión artificial, lo anterior no es más que una curiosidad astrofísica: a efectos prácticos, la fusión que se intenta crear en la Tierra usa como combustible el elemento más ligero: hidrógeno.

² Detrás de esto se encuentra, por supuesto, la archiconocida fórmula de Einstein $E=mc^2$ (la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz) y también un curioso efecto llamado "defecto de masa" por el cual un núcleo atómico pesa menos que la suma del peso de sus componentes por separado.

³ Este elemento recibe su nombre del nombre griego del sol *Helios*, ya que fue detectado por primera vez en el espectro solar durante un eclipse el 18 de agosto de 1868 por el astrónomo Sir Joseph N. Lockyer (1836-1920) y el químico Sir Edward Frankland (1825-1899). No se consiguió aislar hasta 1895.

⁴ Esto es, como se puede suponer, una simplificación extrema del fenómeno: la física de partículas añade mucha más sutilezas y complejidad al proceso, pero ya que escapan a nuestra comprensión, y por el bien del episodio, vamos a obviarlas.

⁵ Debidas a la gravedad que provoca la descomunal masa de estos cuerpos; p. ej, en el núcleo solar supera los 250 mil millones de atmósferas.

⁶ Cuando el combustible de la estrella se acaba, esta colapsa (es decir, cuando la tendencia expansiva del calor de la fusión desaparece, el empuje de la gravedad vence). Entonces pueden ocurrir dos cosas. O bien la ganancia de energía producida en el sistema (al aumentar la presión y la temperatura repentinamente con la implosión) logra convertir el hierro en helio, proporcionando nuevo combustible a la estrella para que continúe existiendo como una enana blanca, o bien (si tiene una masa de 1,4 veces la del sol, el llamado límite de Chandrasekhar) el aumento de presión y temperatura es tan violento que provoca su explosión, convertida en una supernova.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

2.1) La importancia de una letra⁷: la fusión no es fisión

Para deshacer malentendidos y aclarar las cosas desde el principio, quizá sea conveniente comenzar por un concepto más familiar, mejor conocido: la **fisión nuclear**, la energía que nos acompaña desde hace décadas y con la que hemos mantenido casi desde siempre una relación de amor-odio, o al menos de amor-miedo, aunque hoy día sea menos, pues incluso se la ha pasado a considerar recientemente como una energía “verde”⁸.

La fisión produce energía mediante la división del núcleo de un átomo pesado en dos o más núcleos de átomos más ligeros. En las centrales nucleares se rompen (fisionan) núcleos de **uranio** o **plutonio** lanzándoles neutrones. Como resultado, se producen no solo átomos más simples (de bario) sino otros neutrones que a su vez bombardean y rompen otros núcleos en un efecto dominó (la conocida reacción en cadena que se sale de madre si no es controlada) junto con radiación electromagnética (calor). Esta energía se utiliza para calentar agua, que a su vez mueve una turbina para generar electricidad.

La fisión es mucho más fácil y barata de conseguir que la fusión nuclear. De hecho, ambas fueron descritas teóricamente en la década de los años 1930 del siglo pasado; mientras que la fisión se logró controlar en un reactor en menos de 10 años, y antes de 20 ya se aprovechaba en la primera central nuclear, casi 100 años después todavía no se ha hecho funcionar la primera central de fusión.

Como todos sabemos, los grandes **problemas** de la fisión son la generación de residuos altamente contaminantes (cuya toxicidad pervive durante cientos o miles de años)⁹ y su potencial peligrosidad: todos tenemos en mente las catástrofes de **Chernobyl** y **Fukushima**¹⁰.

En cambio, la fusión nuclear constituye una fuente de energía con estas ventajosas características:

- **Limpia**: no genera residuos radiactivos, únicamente helio, neutrones y calor.

⁷ Aunque fonéticamente muy similares, etimológicamente ambas palabras provienen de raíces proto-indoeuropeas (PIE) diferentes. “Fisión” viene del latín *fissionem*, “rotura, agrietamiento”, del verbo *findere*, “partirse”, originado en una raíz PIE que significa “partir”. En cambio, “fusión” viene de *fusionem*, del verbo latino *fundere*, “derramar, fundir”, y este de la raíz PIE para “derramar”.

⁸ El Consejo Europeo ratificó el 11/07/2022 la decisión del Parlamento y la Comisión sobre que las inversiones en energía nuclear y gas natural sean consideradas verdes. Desde el 01/01/2023 estas energías se pueden beneficiar de los incentivos a las renovables.

⁹ Según la Sociedad Nuclear Española los residuos de media y baja intensidad almacenados en España se pueden desclasificar tras 300 años. En cambio, el combustible usado, que es un material irradiado, permanece radiactivo durante varios miles de años.

¹⁰ La Asociación Internacional para la Energía Atómica (IAEA) ha definido una “Escala Internacional de Accidentes Nucleares” (INES, *International Nuclear Event Scale*) que clasifica los sucesos en siete categorías según sus efectos nocivos:

- categoría 1: anomalía
- categoría 2: incidente
- categoría 3: incidente importante (ej.: incendio en la central nuclear de Vandellós, 1989)
- categoría 4: accidente sin riesgo fuera del emplazamiento
- categoría 5: accidente con riesgo fuera del emplazamiento (Windscale 1957, Three Mile Island 1979)
- categoría 6: accidente importante (Kyshtym, 1957)
- categoría 7: accidente grave (Chernobyl 1986, Fukushima 2011)



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

- **Barata:** se basa en un **combustible barato** y prácticamente inagotable: como se ha dicho, el hidrógeno, el elemento químico más abundante del Universo, en particular sus isótopos¹¹ deuterio¹², presente en el agua de mar, y el tritio¹³.
- **Segura:** si algo va mal en el proceso, la fusión se apaga, se detiene. Esta es la gran diferencia con la fisión, que es una reacción peligrosa que se debe mantener siempre bajo control. Fuera de un núcleo estelar la fusión es tan difícil de lograr que cualquier fallo en el reactor solamente pararía la reacción, sin ninguna otra consecuencia.
- **Eficiente:** Las reacciones de fusión producen una cantidad de energía muy elevada, cuatro veces superior a la de fisión nuclear. En teoría, con unos pocos gramos de isótopos de hidrógeno se puede producir un terajulio de energía, una cantidad que cubriría aproximadamente las necesidades energéticas de una persona en un país desarrollado a lo largo de 60 años.

2.2) *Obstáculos en el camino a las estrellas*

¿Podemos generar de forma controlada una estrella en el laboratorio? Sí, de hecho, es uno de los fenómenos que ocurren en los **aceleradores de partículas**, eso sí, a escala atómica y durante pequeñísimas fracciones de segundo. También se logra haciendo estallar una **bomba termonuclear** (o bomba H)¹⁴. Sin embargo, producirlo de forma controlada y continuada, a una escala lo suficientemente grande, plantea desafíos científicos y técnicos que a la Humanidad le está llevando décadas resolver. Lo principales son:

El problema del confinamiento: la temperatura a la que hay que someter la materia (100 millones de grados centígrados) es muchas veces superior a la del Sol (de 5500°C en la superficie o 15 millones de grados en el núcleo) ya que la presión es mucho menor. Por ello no hay ningún recipiente convencional que pueda contener el combustible¹⁵. De hecho, la materia a esas temperaturas alcanza un nuevo estado diferente del gaseoso, con sus propiedades específicas, al que se llama "**plasma**".

¹¹ Un isótopo es una "variante" de un elemento con más neutrones en el núcleo que su versión "estándar". También se les denomina con el adjetivo "pesado" ("hidrógeno pesado") pues tienen más masa, y por tanto, un peso atómico superior.

¹² El deuterio tiene dos neutrones en el núcleo (es el componente de la llamada "agua pesada") y el tritio tres. La variante con un solo neutrón se denomina "protio" (tal como se deduce de la raíz griega numeral usada para derivar estos términos). El protio constituye el 99.9885% de todo el hidrógeno natural de la Tierra. El restante 0,0115% es deuterio. Ambos isótopos son considerados estables.

¹³ El tritio apenas se encuentra en estado natural; existen ínfimas cantidades en el agua del mar y en la atmósfera, donde se forma por la acción de los rayos cósmicos, pero se puede obtener como subproducto de algunas reacciones de fisión nuclear convencionales. Cabe reseñar que en la película **Spiderman 2**, (Sam Raimi, 2004) el Dr. Octopus construye un reactor de fusión alimentado con tritio, del cual dice que es rarísimo y del que solo se encuentran "25 libras en todo el planeta" (unos 11 kilos), lo cual es exageradamente falso. Lo que sí es cierto es que es un material muy raro, y muy caro (su precio sería de unos 30.000\$ el gramo).

¹⁴ La bomba de hidrógeno o bomba termonuclear es una bomba atómica convencional a la que se añade combustible de fusión. La explosión nuclear de fisión "enciende" este combustible y provoca su fusión. Las primeras bombas de este tipo fueron detonadas por los EEUU en 1952 y 1954, con una potencia de 10 y 15 megatones respectivamente. La "bomba del Zar" soviética de 1961 es la más potente jamás detonada, con 50 megatones.

¹⁵ A excepción quizá de los vasos de café del bar.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

El problema de la eficiencia (punto de *breakeven*): encender el “fuego de una estrella” conlleva un gasto enorme de energía. Cuando la energía generada por la fusión supera a la inyectada en el plasma se dice que se ha alcanzado el *breakeven*, y este es el objetivo que debe superar un reactor nuclear de fusión para ser eficiente desde el punto de vista comercial¹⁶. Haciendo una analogía con un montón de leña, las chispas que producimos con un pedernal sería la energía que inyectamos en el sistema; una vez la madera prende obtenemos mucha más energía del combustible que la que invertimos para liberarla.

2.3) *Transmutando la materia sin alquimia: métodos para la fusión*

Para conseguir que los átomos se fusionen produciendo otros más pesados junto con una cantidad inconmensurable de energía, se han considerado a lo largo de las últimas décadas diferentes tecnologías:

- Reactores de **confinamiento magnético**: mantienen el plasma cargado eléctricamente en el interior de un poderoso campo magnético, de forma que este no toca las paredes del reactor. Producen la fusión maximizando el tiempo que los iones interactúan unos con otros, es decir, buscan crear y mantener un plasma lo suficientemente caliente durante el mayor tiempo posible. Los campos magnéticos, generados por bobinas recorridas por corrientes de más de **1 millón de amperios**, no solo **confinan** el combustible, sino que lo **calientan** a altísimas temperaturas. Reactores de este tipo son:
 - **Tokamak**: acrónimo de *toroidalnaya kámera magnitnyimi katushkami*, “cámara toroidal con bobinas magnéticas”. Diseñado por los físicos soviéticos Ígor Tam (1895-1971) y Andréi Sájarov¹⁷ (1921-1989), basándose en las ideas propuestas en 1950 por Oleg Lavrentiev (1926-2011)
 - **Stellarator**: inventado por Lyman Spitzer, de la universidad de Princeton, en 1951. Utiliza imanes externos para confinar magnéticamente el plasma. Este diseño no ha sido tan popular como el tokamak, pero dadas las limitaciones de éste, también es usado en la actualidad.
- Reactores de **confinamiento inercial**¹⁸: logran la fusión a base de **acelerar los iones** a tal velocidad que no puedan evitar fusionarse. O dicho de otro modo, aumentando la densidad del combustible a un nivel tal que las partículas no puedan más que chocar y fusionarse. No es un proceso continuo, como el anterior, sino por pulsos. El método más habitualmente usado en esta clase de reactores consiste en provocar la **implosión** de una pequeña esfera de combustible **a base de rayos láser**. Resulta más simple que el confinamiento magnético (en cuanto a complejidad y operación de las instalaciones).

¹⁶ El factor de eficiencia se suele denominar con la letra Q y equivale a dividir la energía obtenida por la suministrada al sistema. El punto de *breakeven* se alcanza cuando $Q=1$. Sin embargo, como veremos más adelante, a lo largo de los años se han considerado diferentes maneras de definir y medir Q.

¹⁷ Premio Nobel de la paz en 1975, en reconocimiento a su activismo en pro de los derechos humanos y las libertades democráticas. El Parlamento Europeo concede desde 1988 el Premio Sájarov para la Libertad de Conciencia.

¹⁸ Concepto propuesto en 1960 por el físico norteamericano John Nuckolls (n. 1930).



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

3.) La energía que *siempre* está a 50 años vista

La ciencia y la ingeniería han recorrido una larga senda, que dura ya 70 años, en pos de la fusión nuclear, de la que se ha dicho irónicamente que *siempre* será la “energía del futuro”, o que *siempre* quedará “a 20 o 50 años vista”.

Ciertamente, los avances han sido lentos como los de un galápago en una maratón, lo cual, unido a la ingente cantidad de fondos invertidos en la investigación, ha hecho que algunos opinen que este tipo de energía jamás se llegará a controlar. Sin embargo, viendo la evolución en perspectiva se entienden mejor los esfuerzos titánicos realizados. La cantidad de recursos técnicos, económicos y humanos necesarios para el desarrollo de cada pequeño paso es enorme, lo cual hace que la escala temporal sobre la que progresa termine abarcando generaciones.

3.1.) Las bases teóricas

Hace unos 100 años que se empezó a entender el proceso de la fusión nuclear. El 2 de septiembre de 1920 el astrónomo británico **Arthur Eddington** (1882-1944) publica el artículo “*The Internal Constitution of Stars*” en la revista *Nature* donde sugiere que lo que ocurre en el interior de las estrellas es la unión de átomos de hidrógeno y de helio¹⁹. Tan solo 7 años después el físico alemán Friedrich Hermann Hund (1896-1997) descubre el “**efecto túnel**”, esencial para entender qué ocurre cuando los núcleos de dos átomos se aproximan lo suficiente como para unirse en uno nuevo, venciendo a la repulsión electromagnética que los mantiene separados. La base matemática correspondiente a este fenómeno cuántico la establece George Gamow (1904-1968) al año siguiente.

Los cimientos teóricos terminaron de asentarse con Robert d’Escourt Atkinson (1898-1982) y Fritz Houtermans (1903-1966), quienes en 1929 afirmaron que grandes cantidades de energía podían ser obtenidas de los procesos de fusión de átomos ligeros.

3.2.) Encendiendo el fuego estelar

La primera vez que se logró de forma artificial la fusión nuclear fue en julio de 1932, cuando el físico australiano Mark Oliphant (1901-2000) logró la fusión de dos isótopos del hidrógeno a mínima escala, en un **acelerador de partículas** construido en el laboratorio Cavendish de Cambridge (en ese mismo dispositivo, en el mes de abril se había conseguido la primera reacción de fisión nuclear generada por el hombre).

¹⁹ “In the stars matter has its preliminary brewing to prepare the greater variety of elements which are needed for a world of life”. Años después, Hans Bethe (1906-2005) se dedicaría a investigar este fenómeno y en 1939 publicaría su trabajo describiendo con detalle cómo la fusión nuclear funciona en las estrellas, el cual le valió el premio Nobel de física en 1967.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

En 1938 se da el primer intento de construcción de un reactor de fusión. Los científicos Kantrowitz y Jacobs del Centro de investigación Langley de Virginia (EEUU) fabrican una botella toroidal magnética donde calentar el plasma.

Tras la detención forzosa debida a la Segunda Guerra Mundial en los años 40, **en los 50** se reanuda la investigación. Es a principios de esta década, mientras las primeras centrales nucleares de fisión comenzaban a producir electricidad en la Unión Soviética y el Reino Unido, cuando los físicos soviéticos Tam y Sájarov diseñan **el tokamak**, el icónico recinto en forma de toro (o donut, por usar un término más prosaico y menos geométrico) que tantas veces ilustra las noticias relacionadas con estas investigaciones, destinado a contener el plasma necesario para producir la fusión.

Sin embargo, las siguientes reacciones de fusión no se lograrían precisamente en un laboratorio. En el marco del **proyecto Manhattan**, dedicado al desarrollo de armas nucleares, se diseñó la bomba de hidrógeno a la que nos referíamos más arriba. La primera de este tipo, *Ivy Mike*, explotó el 1 de noviembre de 1952 en la isla de Elugelab (Islas Marshall, en el Pacífico sudoccidental).

En **1964** los investigadores del Laboratorio Nacional de Los Alamos logran **fusionar deuterio** a temperaturas de **40 millones de grados** centígrados en un reactor de tipo "Z-pinch". Este tipo de diseño se usó durante toda la década y parte de la siguiente, contribuyendo de forma importante a la investigación, pero en 1977, cuando se demostró que su diseño era incapaz de generar una reacción de forma eficiente, se abandonaría de forma definitiva.

3.3.) Todos quieren un tokamak

Por su parte, los **soviéticos** continuaban investigando entorno a los reactores de tipo tokamak y logrando destacar a finales de los 60, al obtener temperaturas superiores en un orden de magnitud a las logradas hasta entonces por otros dispositivos. De hecho, cuando en **1968** hicieron **públicos** estos **resultados** provocaron una verdadera "fiebre" por los tokamaks, que se comenzaron a construir por todo el planeta.

Europa no quería quedarse atrás en la carrera por la fusión, así que en **1973** comienza el diseño del **JET** (*Joint European Torus*), un proyecto de los países de la Comunidad Europea basado en un reactor de tipo toroidal, cuyo presupuesto se aprueba en 1977 y que empieza a construirse al año siguiente en Culham, Oxfordshire, Reino Unido.

Por otro lado, en **EEUU** y en lo referido a reactores toroidales, el **PLT** (*Princeton Large Torus*) rompe todos los récords de temperatura entre 1975 y 1978, dando pie a su sucesor, el **TFTR** (*Tokamak Fusion Test Reactor*), que se empieza a construir en 1980.

Tanto el JET europeo (puesto en funcionamiento en 1983, sin retrasos ni excesos de presupuesto²⁰) como el TFTR americano (que inicia sus operaciones en 1982) pretendían lograr el punto de breakeven, es decir convertir la fusión nuclear, por fin, en una energía eficiente, tal y como la teoría prometía. Pero ni estos ni el **JT-60**, tokamak con el que en 1985 **Japón** se unía a las investigaciones en este campo, lograron ese objetivo

²⁰ Personalmente creo que este hito debería celebrarse como algo con más mérito y bastante más difícil de conseguir que la fusión nuclear de marras.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



(el JET logra $Q=0,67$ en 1997; el TFTR produce 10 MW en 1993 y 510 millones de grados en 1997, pero sus valores de Q se encuentran entre 0,2 y 0,4; el JT-60 logra llegar a los 522 millones de grados).

Aunque las temperaturas conseguidas eran muchas veces superiores a las del centro del sol, había que considerar más factores: el **tiempo** que duraba la reacción y la **densidad** del combustible. Conforme avanzaron las pruebas se encontraron inestabilidades en el plasma. De hecho, los experimentos apuntaron a la necesidad de un reactor más grande: con esto se fragua el **proyecto ITER**, (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) cuyo diseño conceptual se realiza entre 1988 y 1990, y el diseño de ingeniería entre 1992-2001. El plan es tan ambicioso que cuenta con la participación conjunta de EE. UU., Rusia, Japón y EURATOM (Tratado de la CE para la energía nuclear).

3.4.) La fusión inercial se dispara

Si bien la historia de la fusión nuclear y su investigación va de la mano de instituciones públicas y estados, la **iniciativa privada** ha participado (y ha obtenido éxitos) en más de una ocasión. En Norteamérica, la empresa **KMS Fusion** construye un reactor de **confinamiento inercial basado en rayos láser** y consigue, el 1 de mayo de **1974**, la primera reacción de fusión nuclear inducida por láser.

Pero como es lógico el grueso de los proyectos seguirá concentrado en Universidades y Laboratorios nacionales: el LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) se consolida como la institución puntera a nivel mundial en fusión por confinamiento inercial (**ICF**). En **1978** construye el **láser Shiva**, del tamaño de un campo de fútbol y capaz de concentrar una energía de 10 Kilojulios en un objetivo. Una década más tarde, el **láser NOVA** alcanza los 120 kilojulios.

Los Estados Unidos han apostado de forma decidida por la investigación en ICF: el LLNL diseña y construye, entre 1990 y 1994, el **NIF (National Ignition Facility)**, inaugurado en **1997** y actualmente operativo, en el cual, como veremos, se han logrado los últimos avances en este campo.

3.5.) Rompiendo récords de energía y temperaturas

En Cadarache (sur de Francia), el Tokamak **Tore Supra** (puesto en marcha en 1988, y renombrado como **WEST** en 2013 (*Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak*)) llega a producir 2,3 MW en una reacción de dos minutos de duración, en 1996.

En 1997 el JET consigue **16 MW** (récord hasta 2020). Al año siguiente el JT-60 consigue **$Q=1,25$** récord hasta la fecha (JET logró llegar "sólo" a **$Q=1,14$**)

En 1999 EE. UU. se retira del programa **ITER**, pero vuelve en 2003, cuando hay conversaciones con otros países. Canadá se retira ese año, pero se unen China y Corea del Sur. La localidad francesa de Cadarache es elegida como sede del ITER (se había considerado también **Vandellós**, y una ciudad en Japón).

Entre 2001 y 2009 se construye en el **NIF** un láser de 192 rayos y 500 TW. En 2005, usando 8 rayos, alcanza un pulso de 152,8 KJ.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



En 2006 es completado el **primer tokamak de China, el EAST** (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*), que usa superconductores. En 2013 logra una reacción de 30 segundos en H-mode (alto confinamiento, plasma estable), un orden de magnitud superior a los logrados hasta la fecha. Logra otro récord en 2017, al conseguir una reacción que dura 101 segundos.

En 2012 el JET anuncia un gran avance en el control de las inestabilidades del plasma²¹. A efectos prácticos no resulta muy espectacular, pero da la impresión de que los científicos han de explicar (vender) sus avances de alguna manera.

En el siglo XXI de nuevo el sector privado irrumpe con fuerza en el sector: en enero de 2015, **Microsoft Research** presenta el **Polywell**, un reactor de fusión por confinamiento magnético que usa alternativas al toroide y un plasma diamagnético, basado en proyectos ensayados ya en los 80 y 90.

En agosto de **2015** el MIT presenta el **ARC Fusion reactor** (*Affordable, Robust, Compact*)²², que pretende llegar a $Q=3$ con la mitad de tamaño que el reactor del ITER y con el uso de superconductores a alta temperatura. La primera iteración es SPARC (*as Soon as Possible ARC*), actualmente todavía en construcción. En 2021 realizó ya una prueba de imanes; se espera que esté operativo en 2025 y produzca 140 MW durante 10 segundos, a pesar de su tamaño (radio 1,85m)²³. En los inicios de la década de 2030 se estima que estará listo para entregar energía a la red.

En 2019 Reino Unido anunció un plan de inversión de 200 millones de libras para el diseño de **STEP** (*Spherical Tokamak for Energy Production*), un reactor que se espera esté operativo para 2040. Los **tokamaks esféricos** son toroides que reducen el tamaño del agujero central, semejantes a una manzana sin el corazón. Son más baratos de construir y algunos estudiosos afirman que más eficientes que los tokamaks tradicionales

En 2020 comienza el montaje del ITER, cuyos diversos componentes han estado en fabricación durante años.

2021: el EAST consigue 120 millones de grados por 101 segundos, con un pico de 160 durante 20 segundos. También consigue una temperatura más modesta (70 millones de grados) pero en una reacción que dura mucho más tiempo: 17 minutos 36 segundos.

El JET europeo consigue en febrero de 2022 una reacción que produce 59 megajulios durante 5 segundos.

En febrero de 2023 Febrero el **Wendelstein 7-X**, un stellarator alemán construido por el Instituto Max Planck que entró en funcionamiento en 2015, consigue generar 1,3 GJ durante 8 minutos.

²¹ Las inestabilidades que surgen en el plasma hacen que una región vibre especialmente, desviándose del confinamiento al que le someten los campos electromagnéticos y propiciando que el plasma toque las paredes del recinto, con lo que se enfriará rápidamente y la reacción perderá toda eficiencia. Los investigadores lograron controlar estas inestabilidades sin perturbar el resto del ambiente, emitiendo radiación electromagnética a través de las mismas antenas utilizadas para calentar el plasma.

²² El nombre está basado en el *arc reactor* del superhéroe de Marvel *Ironman*.

²³ SPARC cuenta también con el apoyo financiero de la compañía estadounidense, Commonwealth Fusion Systems, Bill Gates y Jeff Bezos.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

3.6.) *¿Ciencia patológica²⁴ o incomprendida? el bluff de la fusión fría*

Como hemos visto, la historia de la fusión se caracteriza por sus lentos progresos. No obstante, de vez en cuando se producen **anuncios sorprendentes**, los cuales pudieran hacernos pensar en investigadores negligentes, o en el mejor de los casos, precipitados, ingenuos o inexpertos (sobre todo, a toro pasado, cuando sus afirmaciones se demuestran erróneas o inconcluyentes).

Durante años, el fiasco de la fusión fría (que a mí me pilló siendo un adolescente interesado en esos temas y me impresionó por las posibles repercusiones de algo tan grande) me hizo considerar a sus protagonistas como poco más que vendedores de crecepelo. Sin embargo, analizando el asunto con más detalle, no resulta sencillo ser tan tajante porque entran en juego muchos matices, no solo científicos, sino de la naturaleza humana.

Y es que, aunque la Ciencia se fundamente en los fríos hechos, son personas quienes la hacen. Por ello, tal como nos enseñaba **Asimov**, a la ecuación de los datos empíricos se añaden interpretaciones, intereses personales, económicos o sociales, deseos de fama, reputación y prestigio y otros muchos factores psicológicos, que autores como Collins y Pinch ilustran bien en su libro sobre sociología de la ciencia *El gólem*.

3.6.1.) *El sorprendente anuncio*

En la primavera de 1989 se produjo un gran revuelo en el mundo científico y en los medios de comunicación de masas aparecieron insistentemente noticias que siguieron la cuestión, primero con entusiasmo, luego con creciente desconfianza ante el embrollo, y finalmente con decepción.

Martin Fleischmann (1927-2012) por entonces uno de los principales electroquímicos a nivel mundial y **Stanley Pons** (n. 1943), de la universidad de Utah, realizan una conferencia de prensa el 23 de marzo de 1989 en la que anuncian la producción de fusión fría²⁵ en un experimento realizado con celdas electroquímicas.

La instalación, tan sencilla que se podía ubicar sobre una mesa, involucraba un proceso de electrólisis de agua pesada inducida por una batería en la superficie de un par de **electrodos de paladio**. En la reacción se había producido un exceso de calor que según los investigadores sólo se podía explicar mediante un fenómeno de fusión nuclear del deuterio. Este hallazgo era el resultado de unos estudios iniciados en 1984, financiados por el Departamento de Energía de EE. UU. desde 1988.

3.6.2.) *Frenesí, entusiasmo y confusión*

Junto con la rueda de prensa los científicos publican sus resultados en la revista *Nature*. Los medios de índole general se hicieron eco inmediatamente. En pocos días, equipos científicos de todo el mundo se lanzaron

²⁴ Término acuñado en 1953 por el químico y premio Nobel Irving Langmuir (1881-1957) para referirse a las áreas de investigación donde los científicos se engañan para obtener falsos resultados, llevados por efectos subjetivos o pensamiento desiderativo, abandonando el método científico como tal.

²⁵ El término “fusión fría” fue acuñado por el Dr. Paul Palmer, de la Universidad Brigham Young, en 1986, en investigaciones sobre la posibilidad de la producción de reacciones de fusión en el interior de un núcleo atómico a temperatura ambiente.



frenéticamente a intentar reproducir el experimento: algunos anunciaron que lo habían logrado, otros que no, otros decían haberlo realizado con éxito para luego retractarse²⁶.

Durante unas 6 semanas se produjeron anuncios de verificación, retractación y explicaciones alternativas²⁷, pero nadie conseguía obtener resultados definitivos. Dado que Pons y Fleischmann no habían proporcionado todos los datos precisos sobre la configuración de su experimento, argumentaban que los resultados negativos se debían a instalaciones defectuosas, o procedimientos incorrectos.

3.6.3.) Escepticismo y rechazo

Junto con la esperanzada expectación, desde el principio hubo mucho **escepticismo**. A los físicos nucleares, que llevaban décadas trabajando en la cuestión, les resultaba muy difícil creer que un químico hubiera encontrado una solución tan sencilla. Alguien lo ilustró de forma elocuente con estas palabras: “supongan que ustedes se dedican a diseñar aviones y alguien anuncia que ha inventado una maquina antigraavedad”.²⁸

Se podría decir que, en cierta medida los físicos se arrojaron contra los químicos en esta controversia. Para aquellos, la pretensión de Pons y Fleischmann de haber descubierto la piedra filosofal de la fusión en fenómenos casi cotidianos y tecnologías sencillas y baratas simplemente no resultaba plausible. Además, y no menos importante, amenazaba sus costosísimas investigaciones. La Sociedad Física Norteamericana (*American Physical Society*) se reúne en Baltimore el 1 de mayo y se cierran filas contra los dos electroquímicos²⁹.

El escepticismo fue aumentando conforme diferentes investigadores fueron incapaces de reproducir los resultados del experimento original. Y si la práctica no estaba resultando de ayuda, la teoría tampoco se reveló más útil en este sentido: el extraño fenómeno resultaba muy difícil de explicar desde el punto de vista teórico; las mediciones de neutrones (que supuestamente deberían haberse generado en un proceso nuclear) tampoco contribuían a corroborar el fenómeno. Siguiendo el principio de la navaja de Ockham, el misterioso exceso de calor parecía más probablemente debido a alguna **reacción química** que a una nuclear.

A fines de mayo, el Departamento de Energía de Estados Unidos formó un comité de expertos para determinar la veracidad de la fusión fría. Tras cinco meses, este concluyó que **no existía evidencia alguna que la soportara**,

²⁶ Por ejemplo, el Instituto de Tecnología de Georgia y Universidad A&M de Texas. Especialmente sonado fue el caso del físico italiano Francesco Scaramuzzi, del ENEA (Ente Nacional para el Estudio de la Energía Nuclear y Alternativa), que el 5 de abril afirmó haber logrado la fusión fría cambiando algunos elementos del experimento de Pons y Fleischmann. Scaramuzzi eliminó la electrólisis y cambió el paladio por un ovillo de titanio, sumergiéndolo en deuterio gaseoso a alta presión, produciendo así la fusión. Como prueba de ello afirmó haber medido un exceso de neutrones, pero sus resultados no pudieron ser replicados por otros equipos de investigación y actualmente se consideran erróneos. ENEA siguió financiando durante años la investigación alrededor de estos experimentos sin obtener hasta el momento resultados convincentes.

²⁷ La Universidad de Stanford y la Universidad A&M de Texas (otro equipo diferente del anterior) sí que reproducen los resultados de exceso calorífico; en cambio un equipo de CalTech reporta resultados negativos. Por otro lado, un grupo de la India y otro del Instituto de Los Álamos confirman la medición de trazas de tritio (supuesto producto de la fusión).

²⁸ Citado por E. Mallove en su libro *Fire from Ice, Searching for the Truth Behind the Cold Fusion*, 1991.

²⁹ S. Koonin, de Caltech, habla de la “incompetencia y engaño” de Pons y Fleischmann, mientras que D. Morrison, del CERN, es el primero en mencionar que se trata de un caso de “ciencia patológica”.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



y que tales efectos contradecían todo el conocimiento adquirido sobre las reacciones nucleares durante los últimos años. Así mismo recomendaba específicamente no financiar investigaciones costosas sobre el tema.

3.6.4.) Epílogo: un frío legado

El Instituto Nacional de la Fusión Fría de Utah fue clausurado en junio de 1991. Pons y Fleischmann emigraron a Francia para continuar sus investigaciones, bajo los auspicios de la iniciativa privada: Toyota financió el laboratorio donde continuaron sus experimentos hasta **1998**, cuando fue cerrado tras una inversión de 12 millones de libras que no obtuvo ningún resultado concluyente. Pons obtuvo la nacionalidad francesa y sigue residiendo actualmente en aquel país.

La fusión a temperatura ambiente ha reaparecido en ocasiones en los últimos años, pero suscitando siempre un gran escepticismo y de nuevo sin resultados reproducibles. En 2002 y 2006 el ingeniero nuclear Rusi Taleyarkhan publicó en *Nature* un artículo sobre la llamada **sonofusión o fusión en burbujas** (relacionada con el efecto de cavitación acústica). En 2008 el japonés Yoshiaki Arata anunció que había conseguido fusión fría con una pila de paladio y óxido de zirconio. Ninguno de estos anuncios tuvo mayor trascendencia.

Sin embargo, el fenómeno no se ha descartado del todo y aún se estudia con nombres alternativos que no tienen las connotaciones negativas del original, como LENR, *Low Energy Nuclear Reaction*, o CANR, *Chemically Assisted Nuclear Reaction*.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

4.) ITER³⁰: este es el camino

En la actualidad el principal programa de investigación sobre la fusión nuclear a nivel mundial es el Proyecto **ITER** (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) iniciado en 1986, que une a China, India, la Unión Europea, Corea, Rusia y los Estados Unidos. Su objetivo es “simplemente” demostrar que la tecnología funciona y que la rentabilidad energética es posible. Es por tanto sólo el primer paso de un itinerario a más largo plazo.

4.1) Un tokamak colosal

El reactor del ITER será el mayor dispositivo por confinamiento magnético del mundo (10.000 toneladas de imanes superconductores producirán un campo magnético de 11,8 Teslas³¹ y una energía magnética de 51 gigajulios). En estos momentos se lleva a cabo la construcción del tokamak en las instalaciones de Saint-Paul-lez-Durance, al sur **Francia**, la cual se prevé terminar a finales de 2025. Las primeras pruebas, a realizar en 2026, son de lo más ambiciosas: pretenden alcanzar los 500 segundos de trabajo a máxima potencia y los 1.500 a media potencia, en ambos casos con temperaturas superiores a los 100 millones de grados Celsius y con ganancia energética ($Q>1$).

La operación con un plasma de deuterio-tritio comenzará en **2035**, esperándose ganancias de energía del 1000% con una potencia de fusión de 500 MW, que, sin embargo, aunque no aportará energía a la red, preparará el camino a futuros reactores que sí lo harán.

En última instancia, la **fusión** a lograr será **autosostenida**, es decir, que la energía producida por el plasma de deuterio y tritio confinado servirá para mantener la reacción en marcha.

4.2.) Cuánto cuesta seguir la senda

Este tipo de investigaciones suponen un esfuerzo económico más que importante: por ejemplo, se dice que ‘EAST’ ha podido costar el equivalente a más de 500 millones euros (el dato real es confidencial).

Por su parte, ITER comenzó con un presupuesto de 6.000 millones de euros para una duración de 10 años, en la primera estimación de 2006, pero en 2008 la cantidad se revisó y se aumentó a 19.000 millones. En 2016, se volvió a corregir hasta alcanzar los 22.000 millones de euros y es muy probable que esta no sea la última corrección al alza. Algunas estimaciones (posiblemente malintencionadas, ya que provienen del DOE (Departamento de Energía) de los EE. UU., competencia directa en la carrera por la fusión) apuntan a cifras globales entre los 45 y lo 65.000 millones de dólares, lo que explica su fama de proyecto “pozo sin fondo” siempre ávido de nuevos recursos financieros.

³⁰ En latín, *iter* significa “camino”.

³¹ En comparación, el campo magnético terrestre es de 50 microteslas y el de un imán de frigorífico, 1,2 militeslas



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

4.3.) *Se hace camino al andar: las siguientes etapas*

ITER continuará realizando pruebas en la década de **2030** y acumulando datos empíricos y experiencia esenciales para poner en marcha **la segunda fase, el proyecto IFMIF-DONES** (*International Fusion Materials Irradiation Facility - DEMO-Oriented NEutron Source*), centrado en el **desarrollo de materiales** necesarios para la construcción de un reactor viable y económicamente eficiente (que es el objetivo de la fase siguiente).

Hay que considerar que los factores manejados entorno a un reactor de fusión (los campos magnéticos, el bombardeo de neutrones, los niveles energéticos usados en las instalaciones) implican que los componentes del reactor se vean expuestos a **condiciones extremas de operación y fatiga**. Los desafíos así planteados de estudiarán en el banco de pruebas que IFMIF-DONES representa.

La última y definitiva fase del proceso deberá demostrar la **viabilidad comercial** de la fusión nuclear: **DEMO** (*DEMOstration Power Plant*), una prueba de concepto de reactor de fusión nuclear comercial, cuya construcción se iniciaría hacia **2040**. Para este reactor se prevén ganancias de energía del 2500% con una potencia de fusión de 2000 megavatios, de los que 300-500 megavatios se aportarán a la red.

Dado que su construcción comenzaría hacia 2040, su operación se sitúa en la década de 2050. Los reactores comerciales estarían a su vez listos entre 2050 y 2060.

Como se ve, los plazos son casi como los del pago de la hipoteca de la casa. **Nada de prisas**. La tarea es casi sobrehumana, pero la ruta a transitar se encuentra ante nuestros ojos.

Por no ceder a la desesperanza (no creo que mis ojos lo vean, pero espero que mis hijos o mis nietos sí disfruten de un mundo mejor gracias a la fusión) me gustaría darle el beneficio de la duda al titánico proyecto: creo que ha hecho progresos en todos sus años de vida y el hecho de que haya sobrevivido décadas, a crisis políticas y económicas, es una buena señal.

4.4) *La contribución española al recorrido*

Parte de las instalaciones del proyecto **IFMIF-DONES** se están construyendo en España, en concreto, un acelerador de partículas. El 16 de marzo de 2023 comenzó la fase de construcción en **Escúzar, Granada** (una localidad de 800 habitantes). Para 2029 está prevista la fase de comisionado y puesta en marcha, que terminará en 2033 para continuar con la fase de operación y explotación científica, es decir la realización de experimentos de materiales.

El proyecto implicará 6.000 millones de euros en incremento de producción de bienes, y se estima que creará 50.000 empleos a lo largo de su vida, con una media de 1.000 personas dedicadas al mismo directamente. España financia el 50% del mismo y la Comisión Europea el 20%. El coste del proyecto es de 700 millones de euros, más 50 anuales de coste de operación cuando esté en producción.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

5.) Últimos avances

Después de dar las estimaciones a tan larguísimo plazo sobre la puesta en marcha de la fusión nuclear según el ITER (¡40 años, y eso sin contar con posibles retrasos!), me gustaría que habláramos de los últimos avances relacionados con la fusión, para que no nos olvidemos de que la cuestión se mueve más rápido de lo que podamos pensar.

5.1.) Ignición en el NIF: breakeven sí, pero menos

El 13 de diciembre de 2022 la administración Biden anunció el logro conseguido el día 5 en el US NIF (*National Ignition Facility*), parte del Lawrence Livermore National Laboratory de California: la consecución de un fenómeno de **ignición** en fusión nuclear, esto es, la creación de una reacción que generó más energía que la consumida (*breakeven*).

Tratándose de los Estados Unidos, no causa sorpresa conocer que las instalaciones pertenecen al programa de armas nucleares del Departamento de Energía. Aunque todos se felicitaban por la hazaña, hay que decir que se esperaba haber logrado para 2012... y el primer avance significativo no tuvo lugar hasta agosto de 2021.

Para lograrlo se usaron 192 láseres apuntando a un pellet de oro, un cilindro del tamaño de un guisante que contenía deuterio y tritio. Los láseres le aportaron 2,05 MJ al objetivo, cuya reacción generó 3,15 MJ (54% más). Sin embargo, los láseres consumieron 322 MJ en total por lo que la ganancia debe mejorarse aún en 2 órdenes al menos.

El NIF no está diseñado para ser eficiente, sino para producir la reacción de manera que se puedan acumular datos sobre el fenómeno. Por ello, aunque se considera un hito por la prueba de concepto que constituye, no lo es a efectos prácticos: ni siquiera se sabe a ciencia cierta si la ignición por láseres es el mejor método para lograr la fusión. Aparte de la eficiencia, hay que mejorar la frecuencia con que los láseres pueden producir los pulsos de energía y el acondicionamiento de la cámara después de cada reacción.

Este fragmento de la noticia me confundió un tanto. ¿Se generó más energía que la necesaria para iniciar la fusión o no? ¿Hubo *breakeven*? La clave está en la forma en que calculan ese breakeven o eficiencia (Q). Básicamente los muy listillos cambian la forma de obtenerla, para que les favorezca:

Q es el resultado de dividir la energía obtenida de la fusión (P_{fus}) por la introducida en el sistema (P_{heat}). Con esa definición la Q de los dispositivos ICF es extremadamente baja, ya que los láseres que estos usan son muy ineficientes: mientras que el calentamiento mediante campos magnéticos logra una eficiencia del 70%, para los láseres ésta es de alrededor del 1%.

Por ello el LLNL propuso, para el cálculo de Q, considerar P_{laser} , la energía entregada a la cápsula de combustible, en vez de P_{heat} , la energía total consumida por los láseres; es decir, no considerar en el cálculo la ineficiencia de estos. Así, el valor de Q es mucho mejor. Lo llamaron "*breakeven científico*" y se quedaron tan panchos.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

5.2.) El “sol artificial chino”

El pasado abril pudimos ver varios titulares haciendo referencia al nuevo logro del tokamak superconductor avanzado experimental (EAST), referido como “el sol artificial chino”.

El **EAST**, en funcionamiento desde 2006 y ubicado en el Instituto de Física de Plasma de la Academia de Ciencias de China (ASIPP) en Hefei, logró a mediados de abril de 2023 una operación de plasma de alto confinamiento en estado estacionario durante casi **7 minutos** (403 segundos) a **100 millones de grados**. El avance, conseguido después de más de 120.000 disparos, mejoró el récord mundial existente de 101 segundos, establecido por el propio EAST en 2017.

El próximo paso es la construcción del futuro reactor de prueba de ingeniería de fusión de China (CFETR), cuyo diseño se ha completado recientemente, y que se convertirá en el **primer reactor de demostración de fusión del mundo**. Resulta significativo comprobar cómo también en este aspecto científico crucial, China parece estar tomándole la delantera a occidente.

5.3.) Fusión a cañonazos

Las últimas noticias que quisiera comentar son las más sorprendentes. Si bien una de ellas no es reciente (apareció hace un año en los medios) vale la pena citarla al final junto con otra que se ha visto en las noticias estos días: ambas involucran de nuevo a empresas privadas y hacen anuncios bastante rompedores.

En abril de 2022, La **UKAEA** (Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido), la empresa **First Light Fusion**³² y la Universidad de Oxford confirmaron haber alcanzado la fusión nuclear por el método inercial, mediante tecnología exclusiva desarrollada por FLF; en vez de usar láseres, comprimen el proyectil de combustible haciéndolo viajar a una velocidad altísima.

Se trata de una **técnica de pulso**: cada reacción de fusión se consigue con un disparo. Un cañón de gas de hipervelocidad de dos etapas³³ (*Big Friendly Gun*, de 22 m de largo y que usa 3 kilos de pólvora) lanza un proyectil de 100 gramos, en forma de moneda, contra un objetivo de deuterio encapsulado dentro de un cubo de un centímetro de lado. Este dispone de unas cavidades diseñadas para reconducir las ondas de choque y amplificar la presión en torno a la pequeña perla de combustible. **La velocidad** del proyectil es de **6,5 km/s** (Mach 21), pero la experimentada en el interior del objetivo por el deuterio llega a **70 km/s** (por encima de Mach 200), siendo del orden de 100 TPa (1 atmósfera es igual 101 KPa aproximadamente), es decir, mil millones de veces la presión a nivel del mar. Estas **presiones descomunales** son las que logran la fusión.

El cañón no es el único medio usado para lograr las altas velocidades: la empresa lo está usando en paralelo con “Machine 3” un **sistema de electroimanes** que aceleran magnéticamente el proyectil de metal. Tanto éste como el objetivo se encuentran en una cámara de reacción llena de líquido, que protege la instalación de la

³² Fundada en 2011 por los científicos de la Universidad de Oxford Nicholas Hawker y Yiannis Ventikos.

³³ Estos dispositivos son usados por los astrofísicos para simular impactos de meteoritos, o comprobar la resistencia de materiales de la IIS ante impactos de pequeños objetos a velocidades enormes



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

energía liberada. El calor liberado es absorbido por litio, que calienta agua que a su vez moverá turbinas para generar electricidad.

Todas las instalaciones son de bajo coste y mantenimiento, con tecnologías de coste eficiente y disponibles. El prototipo de cañón ha costado 1,27 millones de euros, de un total de financiación de 56 millones. Cuando el reactor comercial esté listo (lo cual requiere una frecuencia de dos disparos por minuto), se estima un **coste operativo de 50 dólares el MW/h**, es decir, tan competitivo como la energía eólica, pero disponible de forma continua.

La previsión es disponer de una central de 150 MW en funcionamiento para la década de 2030. Costaría 1000 millones de dólares, veinte veces menos que el ITER, y estaría listo en treinta años menos... ¿se trata de una apuesta arriesgada de la UKAEA (por no decir un “farol”)? ¿Una forma en la que el Reino Unido pretende reafirmar su independencia energética tras el Brexit? ¿O es una promesa realista de una tecnología que ha logrado finalmente convertir en rentable la ICF?

5.4.) Microsoft no espera: ¿fusión para 2028?

Microsoft, el gigante tecnológico de Redmond ha firmado recientemente un acuerdo con la **startup Helion Energy**. Dicha empresa se ha comprometido a proveer a la corporación fundada por Bill Gates con electricidad generada con fusión nuclear a partir de 2028, generando 50 megavatios o más, después de un período de despliegue de 1 año.

Helion Energy fue fundada en 2013 por David Kirtley, Chris Pihl, John Slough y George Votroubek. La compañía hoy cuenta con unos 150 empleados y su sede se encuentra en Everett, Washington. En los últimos años, ha captado el interés de varios millonarios del sector tecnológico, quienes han decidido invertir en la propuesta, como Reid Hoffmann, cofundador de LinkedIn, Dustin Moskovitz, cofundador de Facebook, y Sam Altman, CEO de OpenAI, que ha aportado **375 millones de dólares**. La *startup* recibió en 2021 una inyección de **2.200 millones de dólares** de varios inversores, incluyendo entre ellos a Peter Thiel (cofundador de PayPal, inversor inicial en Facebook y otras grandes tecnológicas) y su fondo de inversión **Mithril Capital**. Se desconoce por el momento la cantidad que Microsoft ha podido aportar.

El acuerdo anunciado es el primero de este tipo, por el que Helion estará obligada a pagar una multa si no cumple el plazo, que ha sido calificado como “increíblemente audaz” por los físicos teóricos concedores de las dificultades involucradas.

La compañía, que ya ha desarrollado seis prototipos de su generador, el reactor Polaris, asegura ser la primera empresa privada en haber alcanzado **temperaturas de plasma de 100 millones de grados centígrados**. En 2024 tiene previsto presentar su séptimo prototipo con el que sería capaz de generar electricidad a un precio imbatible: 0,01\$ el KW/h, sin contar con las posibles subvenciones estatales (frente a los más de 0,10\$ actuales en EE. UU.)

Para lograr la fusión utilizan un dispositivo de configuración de campo inverso (FRC *Field-Reversed configuration*), un tipo de reactor de confinamiento magnético emparentado con los *spheromaks* o tokamaks esféricos. En esta instalación, cuando el plasma se expande, mueve el campo magnético generando, según la ley de Faraday, una corriente que es capturada directamente como electricidad. Esto último constituye la gran



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



diferencia con los tokamak usuales, que usan el calor generado por la fusión para calentar agua y mover una turbina. Según Helion, esa conversión hace que se pierda energía por el camino, pero su método, dicen, es mucho más eficiente porque transforma la energía generada directamente en electricidad.

Microsoft pretende utilizar electricidad generada mediante fusión nuclear como paso fundamental para lograr su meta de ser negativa en carbono en 2030.

Otras iniciativas privadas que prometen fusión nuclear en menos de 10 años son:

- El SPARC del MIT, respaldado también por Bill Gates y otros entes privados, que entrará a operar comercialmente a inicios de la década de 2030.
- General Fusion, una empresa con sede en Canadá, respaldada financieramente por Jeff Bezos, anunció un acuerdo para construir una planta nuclear de fusión en el Reino Unido que podría estar conectada a la red en 2030.
- La compañía californiana TAE Technologies, que ha conseguido alcanzar temperaturas de 75 millones de grados Celsius en el plasma de su reactor tokamak, se ha fijado también como objetivo el año 2030 para terminar la construcción de un reactor comercial de fusión.

¿Cuántos años habremos de esperar para disfrutar de la cornucopia energética de la fusión? ¿40? ¿20, 10..., 5? Dado nuestro recorrido hasta el momento, no podemos ser impacientes. Aunque sí parece que cada vez nos encontramos más cerca de la meta.



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es

Bibliografía

Generalidades sobre la fusión:

- <https://theobjective.com/sociedad/2023-01-24/fusion-nuclear-futuro/>
- <https://theobjective.com/economia/2022-12-30/energia-fusion-nuclear-posible/>
- <https://www.csn.es/fusion-nuclear#:~:text=Un%20ejemplo%20de%20reacciones%20de,percibimos%20como%20luz%20y%20calor.>
- <https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/que-es-la-fusion-y-por-que-es-tan-dificil-de-lograr#:~:text=Las%20reacciones%20de%20fusi%C3%B3n%20producen,son%20tipos%20pesados%20de%20hidr%C3%B3geno.>

Fisión y fusión:

- <https://www.vozpopuli.com/next/energia-nuclear-fusion-fision.html>

Fusión en las estrellas:

- Introducción a la Ciencia 1. Isaac Asimov 1973 Orbis.

Historia de la fusión nuclear:

- https://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2022-12-17/fusion-nuclear-como-empezo-todo_3540588/
- https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nuclear_fusion#:~:text=Working%20with%20Rutherford%20and%20others,up%20to%20600%2C000%20electron%20volts.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_nuclear_fusion
- https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_energy_gain_factor#Scientific_breakeven_at_NIF
- <https://www.engineering.com/story/why-is-fusion-power-is-always-50-years-away>
- <https://www.newtral.es/energia-nuclear-gas-verdes-union-europea-europa-consecuencias/20220711/>
- Artículo de A.S. Eddington: <https://zenodo.org/record/1429642#.ZGEJAHZBxPa>
- Sobre Spider-man 2 y el tritio: <https://scienceonblog.wordpress.com/2016/10/27/tritium-in-spider-man-2/>

Sobre la fusión fría

- https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_fr%C3%ADa
- El Gólem. Lo que todos deberíamos saber acerca de la ciencia. Harry Collins & Trevor Pinch. Ed. Crítica 1996.

Sobre la ignición del NIF en diciembre de 2022:

- https://www.scientificamerican.com/article/nuclear-fusion-lab-achieves-ignition-what-does-it-mean/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=space&utm_content=link&utm_term=2022-12-15_featured-this-week&spMailingID=72446111&spUserID=NDM2NjcyODY2NzQ0S0&spJobID=2262962149&spReportId=MjI2MjE0OQs2

Sobre la fusión inercial por proyectil del Reino Unido:

- <https://www.eldebate.com/ciencia/20220405/paso-mas-fusion-nuclear-energia-acabara-todos-problemas.html>



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es



- https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-11-14/canon-fusion-nuclear-hidrogeno-hipersonico_3522777/
- <https://www.ans.org/news/article-2901/first-light-fires-first-shots-from-gun-built-for-pulsed-fusion/>

Contribución española al ITER:

- <https://theobjective.com/espana/andalucia/2023-04-28/granada-mayor-inversion-infraestructura-cientifica/>

Sobre el último logro del EAST en China:

- <https://elperiodicodelaenergia.com/el-sol-artificial-chino-da-un-paso-mas-hacia-el-milagro-de-la-fusion-nuclear/>

Últimos avances y países experimentando con la fusión:

- <https://elcomercio.pe/tecnologia/actualidad/sol-artificial-estos-son-los-paises-que-compiten-con-china-por-la-energia-limpia-e-ilimitada-energia-nuclear-east-estados-unidos-noticia/#:~:text=Estados%20Unidos%2C%20Jap%C3%B3n%2C%20Corea%20del,de%20energ%C3%ADa%20en%20nuestro%20sistema.>
- <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/china-lidera-carrera-energia-limpia-ilimitada-sol-artificial-eeuu-europa-le-pisan-talones>

Microsoft apoya la fusión nuclear:

- <https://hipertextual.com/2023/05/microsoft-comprara-electricidad-fusion-nuclear>
- https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2023-05-16/fusion-nuclear-microsoft-suministro-energia-helion_3630311/#:~:text=La%20compañía%20estadounidense%20Helion%20Energy,megavattos%20de%20potencia%20en%202028.
- <https://elperiodicodelaenergia.com/helion-cierra-el-primer-ppa-de-la-historia-de-la-energia-de-fusion-con-microsoft/>

Imagen de portada: the European JET Tokamak, both during (right) and after operation. Photo: CCFE, JET.

<https://www.iter.org/sci/MakingitWork>



FAN KINGDOM (el podcast)

Esto es.....Fan Kingdom, el sitio para hablar de tus aficiones, el podcast de ocio y divertimento para todo fandom, el lugar donde residen tus hobbies».

www.fankingdom.es
info@fankingdom.es