

Reactores nucleares de hace 2000 millones de años y las constantes del universo

(Preimpresión del artículo previsto publicar en *Nuclear España*, marzo 2009)

Guillermo Sánchez (<http://web.usal.es/guillermo>)



Enrico Fermi in Chicago in 1942 made a nuclear reactor with natural uranium. However it had a natural predecessor, the fossil reactor found in 1972 in OKLO. About 2 billion years ago a uranium deposit spontaneously underwent nuclear fission. Xenon samples from this site are now becoming clear how this phenomenon happened. Scientists are learning from the natural reactors the long term behavior of the disposal of nuclear waste. The Oklo reactors may also teach us about the fundamental physical theories.

En 1942 Enrico Fermi puso en marcha la primera pila nuclear construida por los seres humanos. Sin embargo, en la Tierra ya habían funcionado reactores nucleares hace miles de millones de años. Así se ha podido comprobar en los yacimientos de uranio de Oklo. Análisis reciente de muestras de xenón allí encontradas nos descubren detalles de aquel fenómeno. Los resultados pueden ser útiles en diseño de almacenes subterráneos de residuos radiactivos. Además la medida del samario en Oklo puede tener implicaciones en el desarrollo de nuevas teorías físicas.

Un descubrimiento inesperado

En la planta francesa de enriquecimiento de Pierrelatte, en mayo de 1972, el analista quedó extrañado al comprobar que el espectrómetro de masas indicaba un contenido de 0,717% átomos de U-235 en el uranio de la muestra de UF₆ natural. Los resultados de miles de análisis en uranio natural en todas las partes del mundo mostraban que la fracción de átomos de U-235 en el total de uranio era siempre 0,720% (expresado en porcentaje en peso equivale a 0,711%). Incluso los análisis de las rocas lunares y de meteoritos daban siempre ese contenido del isótopo U-235. La discrepancia era pequeña, pero Pierrelatte era una instalación militar donde se contabilizaba rigurosamente el material nuclear. El Comisariado de Energía Atómica francés inició una investigación. Se descartó que la causa fuese una contaminación de la muestra con uranio empobrecido (uranio de un contenido de U-235 menor de 0,72% que se produce como subproducto del proceso de enriquecimiento). Se comprobó [1] que se trataba de uranio que provenía de una mina de Oklo, situada en el sudeste de Gabón (África). Análisis de muestras del mismo lugar mostraron incluso una concentración de U-235 menor. En una de ellas el contenido de U-235 era de sólo el 0,44%. La cuestión que se planteaba era cómo podía explicarse

semejante anomalía. Tras descartar distintas hipótesis se llegó a una explicación aparentemente descabellada: en los yacimientos de Oklo uno o varios reactores nucleares naturales habían funcionado hacía casi dos mil millones de años.



Ilustración. Interior del yacimiento de Oklo donde se observa el alto contenido de rocas de uranio. En Oklo se han localizado 16 reactores fósiles y a unos 20 km, en Bangombe

Reactores nucleares naturales

La posibilidad de que hubiera reactores naturales hace miles de millones de años en yacimientos de uranio había sido predicha por G. Wetherill y M. Inghram en 1953. En 1956 el químico P. Kuroda [2] había calculado las condiciones que deberían darse para que esto ocurriese y eran las siguientes:

- a) La concentración de U-235 en el uranio debería ser al menos del 3%.- Esta situación en la actualidad sólo puede conseguirse a través del proceso de enriquecimiento. Sin embargo, hace miles de millones de años todo el uranio que existía en el Sistema Solar cumplía esta condición. Es así porque de los dos isótopos padre que forman el uranio natural, el U-238 y el U-235, el U-235 (periodo de desintegración: 704 millones de años) se desintegra a un ritmo casi siete veces más rápido que el U-238 (periodo de desintegración: 4468 millones de años). De esto se deduce (Fig. 1) que cuando se formó la Tierra [3], hace unos 4,5 mil millones de años, el uranio natural tenía un 17% de U-235 y hace dos mil millones de años el 3%, similar al del enriquecimiento utilizado por los reactores nucleares civiles. (Con uranio natural aún hoy en día se puede hacer un reactor nuclear. Sin embargo, se requieren condiciones tan especiales que no es creíble que puedan darse de forma natural. Por ejemplo, los reactores CANDU lo consiguen utilizando agua rica en deuterio)

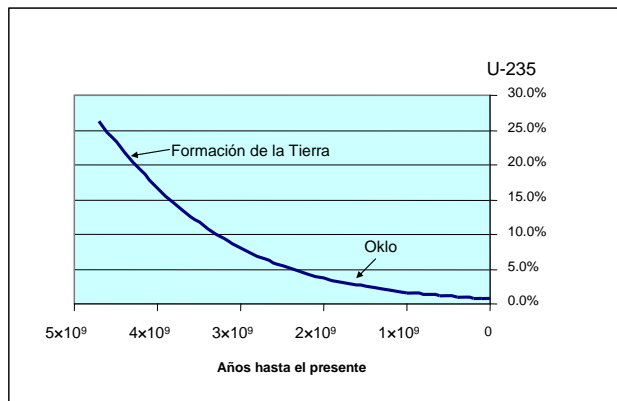


Figura 1- Evolución del contenido de U-235 en el uranio natural. El enriquecimiento del uranio natural cuando se produjeron las reacciones de fisión en Oklo era comparable a la normalmente utilizada por los reactores nucleares en la actualidad.

- b) La mena que contenga el uranio debería ser de al menos 70 cm de espesor.- Con ello se garantiza que tras iniciarse las reacciones de fisión la gran mayoría de los neutrones interaccionan con otros núcleos de uranio. Con espesores menores una proporción importante de los neutrones se fugarían sin fisionar a otros núcleos. Asimismo, la concentración de la mena debe ser muy alta y contener pocos venenos (absorbentes) neutrónicos; en otro caso los neutrones serán absorbidos por átomos no fisionables.
- c) Deberá existir un moderador.- Del mismo modo, en los reactores actuales se requiere la presencia de una sustancia que frene los neutrones favoreciendo la fisión de los átomos de U-235. El moderador universal es el agua, concretamente el hidrógeno que la forma. Aunque hay otros moderadores, como el deuterio o el carbono, la posibilidad de que en un yacimiento se acumulase una concentración suficiente no es creíble.

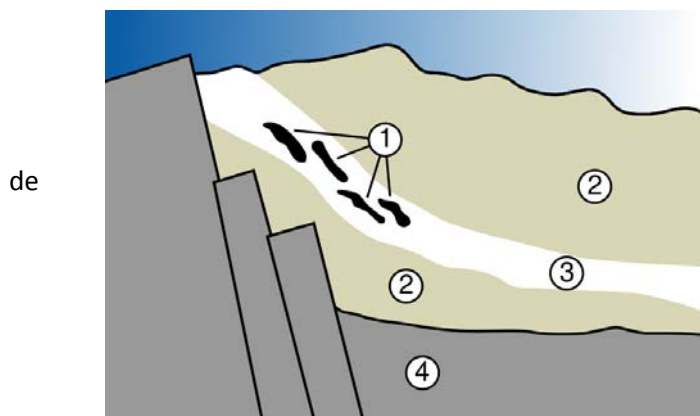


Figura 2.- Esquema geológico de yacimientos de Oklo: (1) Zona donde ocurrieron las reacciones fisión. (2) Arenisca. (3). Mena de uranio. (4) Granito:

<http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0010.shtml>

Estas condiciones se daban hace mil setecientos millones de años en varias de las menas del yacimiento de Oklo (Fig. 2). En total se ha encontrado una veintena de reactores naturales de fisión en Oklo y en dos yacimientos próximos. Además de la anomalía isotópica en la relación U-235/U-238, la presencia de otros isótopos estables resultantes de la desintegración de productos de fisión (Fig. 3). y transuránidos ratificaban sin lugar a dudas que allí se habían producido reacciones automantenidas de fisión.

Todo lo anterior se conoce desde los años setenta del siglo pasado [4]. En esta misma revista se ha citado el hecho en algunas ocasiones [5]. Sin embargo, nuevas investigaciones con sistemas de medida altamente sensibles nos informan de detalles de cómo debió ser aquel fenómeno. Los resultados pueden ser útiles en diseño de almacenes subterráneos de residuos radiactivos. Pero hay otros aspectos de gran alcance por sus implicaciones en la física fundamental y la cosmología.

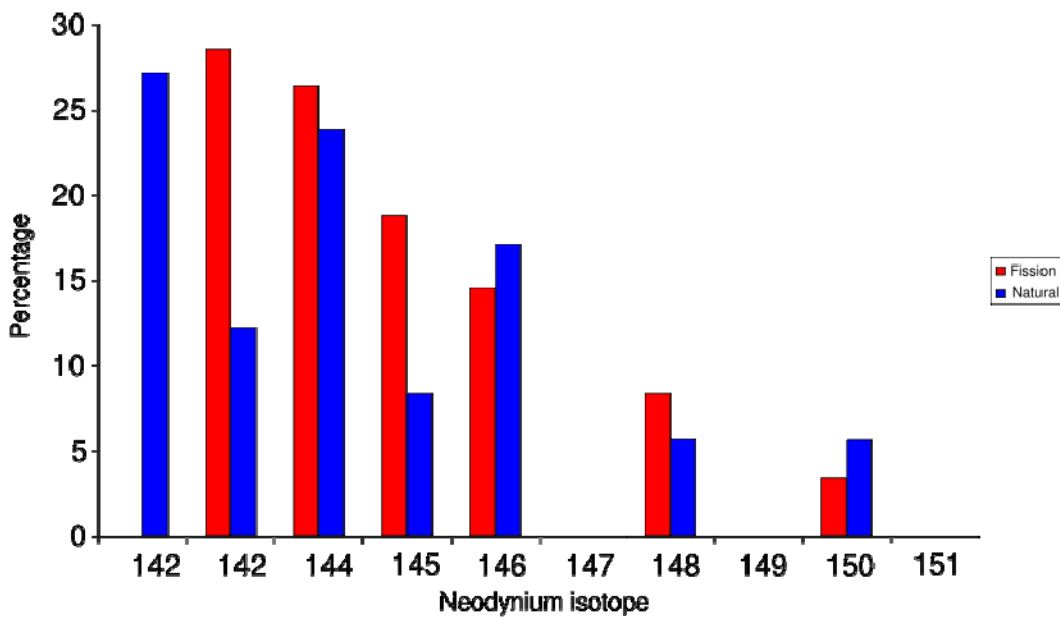


Figura 3.- Se muestra la composición isotópica del neodimio en las muestras de Oklo y se compara con las habituales en la naturaleza. La composición del Nd de Oklo responde a la esperada en productos de fisión (PF) de U-235 (Por ejemplo: el Nd 142 no se genera como PF, y eso casa con las muestras de Oklo)

¿Cómo se formaron y funcionaron los reactores de Oklo?

Una primera cuestión que se plantea es cómo se formó un yacimiento con una concentración de uranio tan alta. Como todos los elementos pesados, los isótopos del uranio se habían formado en supernovas. Durante el proceso de formación de la Tierra habrían acabado altamente diluidos en la corteza terrestre. La intensa actividad orogénica en Oklo fue depositando accidentalmente uranio en una capa de arenisca de hasta 1 km de anchura, que estaba situada sobre capas de granito inclinadas 45°, lo que favorecía la escorrentía del agua hacia el subsuelo profundo. Hace dos mil millones de años la aparición de los primeros seres vivos – las algas azul-verdosas – que utilizaban el proceso de fotosíntesis fue reduciendo el alto contenido de CO₂ que hasta entonces tenía la atmósfera, e incrementando el de oxígeno. Éste alcanzó una concentración comparable a la actual. El oxígeno atrapado en el agua infiltrada favorecía la oxidación de los depósitos de uranio que de esta manera se hacían algo solubles y eran arrastrados hacia la superficie concentrándose en algunas zonas donde la ley del mineral llegó a alcanzar el 10%. En estas zonas las fisiones espontáneas de los isótopos de uranio proporcionaban los neutrones necesarios para inducir las reacciones de fisión. La presencia de corrientes de agua subterránea favorecía que las reacciones en cadena persistiesen un tiempo hasta que el calor producido hacía hervir el agua. El vapor resultante se filtraba hacia fuera del mineral. Sin apenas agua y con el envenenamiento producido por los productos de fisión, las reacciones se paraban hasta el enfriamiento. La fuga de los productos de fisión y la presencia de nuevo de agua líquida reiniciaban el proceso. En cierto sentido el fenómeno es parecido al de los géiseres.

A. Meshik y su equipo, a partir del análisis de los isótopos del xenón en un reciente estudio [6], concluyen que las reacciones se repetían en ciclos de media hora de funcionamiento y dos horas de parada. Para ello se basan en lo siguiente:

Entre los productos de fisión más abundantes, varios se desintegran en isótopos estables de xenón que son los que aún se conservan en el yacimiento. Las mayores concentraciones de xenón se han medido en las capas de fosfato de aluminio que rodean al mineral de uranio. Dentro del mineral la concentración de uranio es baja. La explicación más sencilla sería la de suponer que los gases de xenón, al ser calentados en el mineral de uranio, fluyeron hacia el exterior de la zona caliente. Sin embargo, la anómala composición isotópica del xenón encontrado (comparados con un reactor convencional, las cantidades de xenón 131 y 132 son más altas y las de xenón 134 y 138 más bajas que lo habitual) sugiere que parte del xenón corresponde a la desintegración de isótopos de yodo. El yodo es fácilmente soluble en el agua. El agua (Fig. 4), al calentarse por la presencia de reacciones de fisión, se desplaza hacia fuera del mineral de uranio, donde los isótopos de yodo se desintegran en xenón. A partir de la composición isotópica del xenón encontrado se han podido determinar cuáles eran los isótopos de yodo precursores. La explicación de la composición isotópica se adapta bien a un ciclo de

funcionamiento donde las reacciones de fisión se automantienen durante media hora. En las dos horas siguientes, estas reacciones dejaban de producirse hasta que de nuevo el agua penetraba en el mineral, repitiendo el ciclo. La potencia liberada era pequeña, del orden de 100 kilowatios, pero el ciclo se mantuvo durante varios centenares de miles de años. Se calcula que en este periodo la energía total liberada fue de unos 130 millones de megawatios-hora.

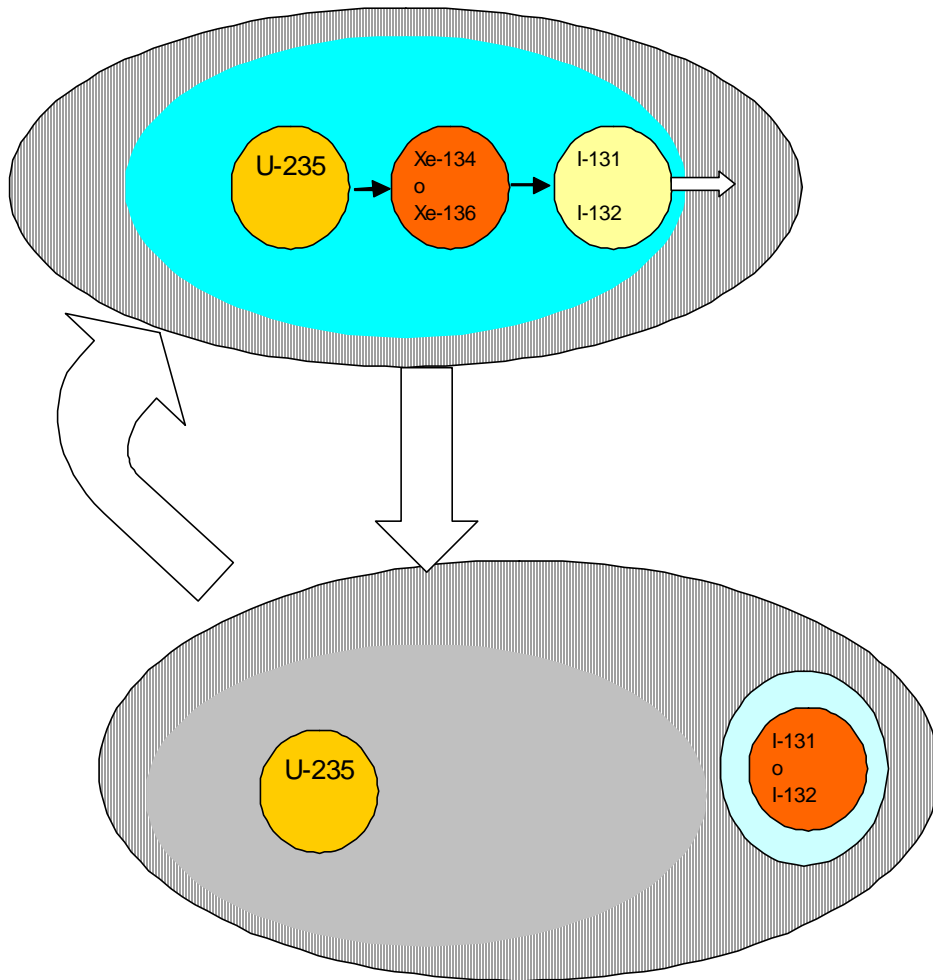


Figura 4.- Esquema conceptual de funcionamiento.- En aquellas zonas con alta concentración de uranio en las que penetra el agua (parte superior de la figura) subterránea se inicia las reacciones de fisión en cadena, que persisten unos 30 minutos, generándose productos de fisión (isótopos de xenón, entre otros). Los isótopos de xenón se desintegran en yodos. El agua hirviendo se fuga arrastrando consigo los yodos, las reacciones de fisión cesan durante un par de horas, hasta que de nuevo penetra el agua fría reanudándose el proceso (Elaboración propia)

Residuos nucleares almacenados durante millones de años

Otro hecho sorprendente es la extraordinaria capacidad del yacimiento para retener sustancias radiactivas por tiempo suficiente para que se conviertan en productos estables. Por ejemplo, el

fosfato de aluminio que rodea algunas de las menas de uranio, transcurridos dos mil millones de años aún mantiene atrapado un gas noble como es el xenón. Esto puede ser de gran utilidad para el diseño de almacenamientos geológicos profundos donde almacenar los residuos de alta actividad de las centrales nucleares hasta que estos pierdan su radiactividad. Ello demuestra que la capacidad de retención de algunas formaciones geológicas permitiría perfectamente mantener confinados los productos de fisión y los transuránidos, como el plutonio 239, durante millones de años, hasta que se desintegren prácticamente todos esos residuos radiactivos [7].

Los yacimientos de Oklo permanecieron aislados durante cientos de millones de años a gran profundidad. Sólo durante los últimos dos millones de años los movimientos orogénicos aproximaron al mineral de uranio lo suficiente a la superficie para permitir su explotación.

Reacciones sorprendentes

Conocer con detalle cómo funcionaron los reactores de Oklo puede tener implicaciones inesperadas en la búsqueda de una gran teoría física que nos explique cómo funciona nuestro universo.

Los diseñadores nucleares y los operadores de los reactores nucleares ponen especial cuidado en controlar el contenido de samario 149. Este isótopo estable se produce a partir de la desintegración del producto de fisión neodimio 149. El samario 149 se comporta como un veneno neutrónico, es decir, posee una alta probabilidad de capturar neutrones de cierta energía (sección eficaz de captura neutrónica elevada). El samario 149 al capturar un neutrón se transforma en samario 150, que es estable tras una emisión gamma. En 1976 el físico ruso A. Shlyakhter [8] se dio cuenta de que la reacción de captura de un neutrón por el samario 149 se produce debido a una rara resonancia del núcleo. Las resonancias ocurren en fenómenos naturales (de todos es conocido cómo un robusto puente puede hacerse añicos al vibrar con una frecuencia determinada). Afortunadamente son infrecuentes; de otro modo viviríamos en un mundo completamente inestable. En el caso de una reacción nuclear, una resonancia se produce cuando la suma de las energías de los componentes que intervienen es próxima a un estado estable del isótopo resultante.

Existe una conocida y milagrosa reacción de resonancia que explica por qué el carbono es tan abundante en el universo, gracias a lo cual existe el que esto escribe, al igual que el lector y el resto de los seres vivos. La explicación la encontró el famoso cosmólogo Fred Hoyle estudiando el proceso de formación de los elementos en las estrellas. Las estrellas emiten energía gracias a las reacciones de fusión que en ellas se van produciendo. En estrellas jóvenes la mayor parte del “combustible” lo aportan la fusión de átomos de hidrógeno y helio, productos remanentes, especialmente el hidrógeno, del Big Bang. Para que se produzca el carbono se requiere la participación de tres átomos de helio. Primero dos núcleos de helio se fusionan

formando el berilio. A continuación el berilio se fusiona con otro núcleo de helio y forma el carbono. Esto es posible porque el carbono posee un nivel energético de 7,667 MeV, que está ligeramente por encima de la suma de las energías de helio más berilio, que es de 7,367 MeV. Cuando la energía térmica del interior de la estrella se añade a la del helio más berilio se alcanza justamente la necesaria para formar carbono. Esta reacción es resonante, produciendo ingentes cantidades de carbono. Sin embargo, la reacción siguiente, carbono más helio para formar oxígeno, afortunadamente es muy improbable al no darse las condiciones de resonancia, y como consecuencia el carbono sobrevive en la estrella. Más adelante los átomos de carbono emitidos al espacio permiten que se origine la vida por su particular avidez en formar macromoléculas. Si el oxígeno presentase una resonancia similar al carbono, el carbono se habría transformado en oxígeno. Las características químicas del oxígeno no permiten que se formen grandes moléculas y por tanto no existiría la vida como la conocemos. Una situación similar a la formación de carbono se da en la reacción de interacción del samario 149 con un neutrón. La energía resultante es casi exactamente la correspondiente al samario 150. De no haber sido así, el samario 149 raramente capturaría al neutrón, y de hacerlo sería transformándose en un isótopo inestable. Shlyakhter se preguntó si estas condiciones también se daban hace 2000 millones de años. Esta reflexión es más profunda de lo que a primera vista pudiera parecer, como se verá.

El samario y la constante de estructura fina

Las reacciones nucleares como las descritas y la estructura de la materia en general las explica la teoría del modelo estándar (TME) al que nos hemos referido en un artículo anterior [9]. La TME, conjuntamente con la teoría general de la relatividad (TGR), que explica la gravedad, utilizan unas veinte constantes fundamentales, como son la velocidad de la luz (c), la constante de Planck (\hbar), la carga del electrón (e), o la constante de gravitación universal (G). Estas teorías utilizan las constantes fundamentales como postulados, es decir, no las explican simplemente, sino que las toman como datos cuyos valores han sido determinados experimentalmente. Las predicciones de ambas teorías se ven reiteradamente confirmadas por los datos empíricos. Si estas constantes tuviesen otros valores, el universo nada tendría que ver con el que conocemos; por ejemplo: pequeñas modificaciones en alguna de estas constantes no permitirían que se formasen átomos estables. El sueño de muchos físicos teóricos es encontrar una gran teoría de unificación (TGU) que abarque a la TME y la TGR, donde estas constantes resulten del propio modelo, y no tengan que tomarse como datos de partida, y además permitan explicar hechos no predichos por ninguna teoría (por ejemplo, la energía y la masa oscura).

Un aspecto fundamental para construir esa TGU sería saber si estas constantes fundamentales son realmente constantes [10] o si son parámetros que van variando muy lentamente con el tiempo. En este sentido los restos de las reacciones nucleares de Oklo pueden ser un laboratorio excepcional. Para entenderlo, retomemos la reacción que permite la

formación del Sm 150. Como decíamos, ésta es posible gracias a la presencia de la elevada sección eficaz que presenta el Sm 149 para la captura de los neutrones de determinadas energías. En la TME, en el cálculo de las secciones eficaces aparece la denominada constante de estructura fina (α). Esta constante es adimensional y se obtiene a partir de las constantes fundamentales e , h y c (en las unidades apropiadas $\alpha = e^2/(h c)$). Es decir, la sección eficaz de captura del Sm 149, y por consiguiente la tasa de captura neutrónica, dependen del valor de α . El valor de la constante de estructura fina es conocido con una precisión y exactitud extraordinaria [$1/\alpha = 137,035999070$ (98)]. Si su valor en el pasado hubiese sido diferente del actual, la tasa de producción de Sm 150 a partir del Sm 149 sería distinta de la que se produce en los reactores actuales. Medidas de gran precisión de la relación Sm 150/Sm 149 en las muestras de Oklo deberían permitir determinar el valor de hace casi dos mil millones de años. Sin embargo, hay un problema añadido: la sección eficaz del Sm 149 depende también de la temperatura (Fig. 5) a la que se produjeron las reacciones de fisión. Para ello es necesario simular y acertar con las características reales de las reacciones que se dieron en Oklo. Varios artículos [11]. se han publicado recientemente sobre el tema sin un acuerdo unánime. La mayoría ratifican que el valor de α no ha variado, al menos durante los últimos dos mil millones de años, pero algunos discrepan. En resumen, sigue siendo un tema abierto.

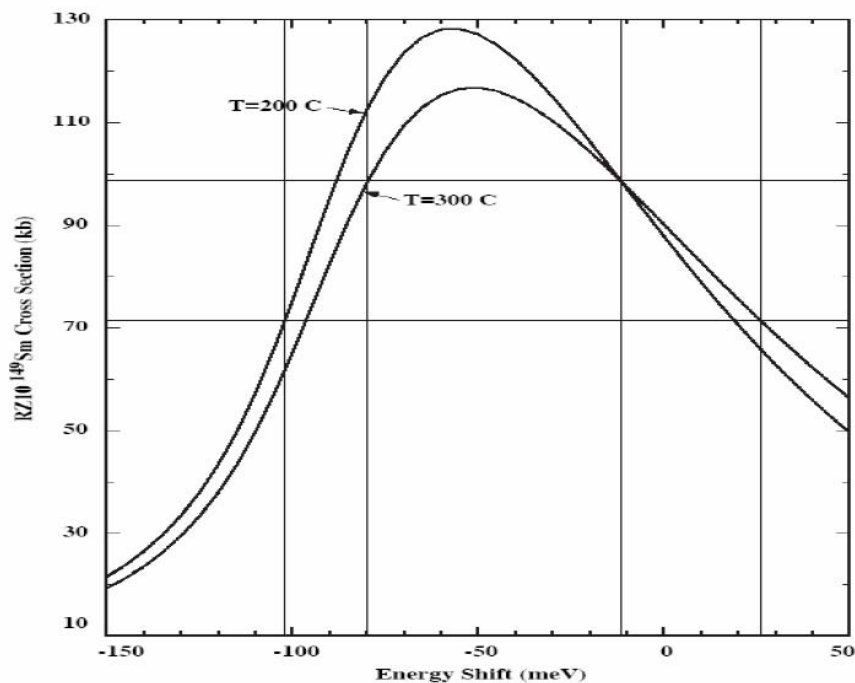


Figura 5.- Sección eficaz de captura neutrónica del Samario 149 ($\text{Sm } 149 + n = \text{Sm } 150$) para $T = 200^\circ\text{C}$ y $T = 300^\circ\text{C}$. Si la constante de estructura fina α hubiese variado en el pasado las curvas anteriores se verían desplazadas, entonces la relación isotópica Sm 149/Sm150 debería ser diferente de la que se produce en los reactores térmicos actuales, sin embargo las incertidumbres, entre otras, en determinar la temperatura a la que funcionó Oklo no permiten llegar a una conclusión.

La extraña coincidencia

Como $\alpha = e^2/(\hbar c)$, un cambio en el valor de α tendría profundas consecuencias en el destino del universo, pues realmente significaría un cambio en al menos una de las tres constantes fundamentales (e , \hbar y c). Si el valor de α fuera apreciablemente mayor, los núcleos atómicos pequeños no podrían existir, pues la repulsión eléctrica de los protones superaría la fuerza de atracción fuerte que los mantiene unidos en el núcleo. Si, por el contrario, el valor de α fuese ligeramente menor que en la actualidad, la densidad de la materia sólida disminuiría, los enlaces moleculares serían menos robustos y los destruirían temperaturas menores que las que aguantan hoy en día. Pero la mayor consecuencia probablemente sería que la reacción que origina el carbono en las estrellas, a la que antes nos hemos referido, no se produciría con un cambio en el valor de α de sólo el 4%, como consecuencia de lo cual la vida basada en el carbono no existiría en nuestro universo. Por tanto, si α varía con el tiempo, el cambio debe ser minúsculo. Una buena modelización de las condiciones en las que se dieron las reacciones nucleares en Oklo y unas determinaciones precisas del samario en el yacimiento, a un nivel abordable por la tecnología actual, permitirían detectar un cambio en α del 1%, incluso menor, en los últimos dos mil millones de años. El descubrimiento de otros reactores fósiles podría ser de gran ayuda.

No deja de maravillarnos que vivamos en un Universo que puede ser descrito por un reducido número de leyes matemáticas y veinte constantes fundamentales, que si tuviesen valores ligeramente distintos darían lugar a un mundo completamente diferente. El reto para las mentes con más capacidad de razonamiento abstracto es encontrar una teoría que permita explicar por qué las constantes fundamentales tienen justamente los valores que nos permiten existir. La mejor explicación que por ahora podemos encontrar es recurrir al principio antrópico, según el cual, de la enorme variedad de universos posibles (la teoría de la supercuerdas lo fija en 10^{500}) estamos en aquel en el que las constantes fundamentales toman los valores que nos permiten existir, y por eso somos conscientes de ello. La búsqueda de una teoría final recuerda a la paradoja de Zenón sobre Aquiles y la tortuga. En cada paso Aquiles estaba a la mitad de la distancia de la tortuga que en el paso anterior, cada vez más cerca, pero nunca la alcanzaría. En cualquier caso, hay que seguir buscando esa gran teoría final. Aunque no se llegue a ella, el camino nos seguirá deparando sorpresas. Oklo ya nos ha dado alguna y aún promete más.

Referencias

- [1] Neuvilly M., et al . C.R. *Acad. Sci.* Paris 275. 1972.
- [2] Kuroda, P.K. *J. Chem. Phys.* 25. 1956.
- [3] Sánchez, G.. Los isótopos radiactivos y nuestro pasado. *Mundo Científico*. Mayo 1994

- [4] G.A. Cowan. A Natural Fission Reactor. *Sci Am*, July 1976
- [5] G. Sánchez. El uranio un elemento poco conocido. *Nuclear España*. Julio 2005.
- [6] A.P Meshik. The Workings of an Ancient Nuclear Reactor. *Sci Am*. Noviembre, 2005 (En español: *Investigación y Ciencia*, enero 2006))
- [7] F. Gauthier-Lafaye. 2 billion year old natural analogs for nuclear waste disposal: the natural nuclear fission reactors in Gabon (Africa). *Appl. Phys.* 3. 2002.
- [8] A. I. Shlyakhter Direct test of the constancy of fundamental nuclear constants,, *Nature* (264) November 25. 1976
- [9] G. Sánchez. El gran acelerador de hadrones y la búsqueda de la partícula divina. *Nuclear España*, Octubre 2008.
- [10] John D. Barrow and John K. Webb Inconstant Constants *Sci Am*. Mayo, 2005. (En español: *Investigación y Ciencia*, agosto 2005)
- [11] Petrov, Yu. V., Nazarov, A. I., Onegin, M. S., Petrov, V. Yu., Sakhnovsky, E. G. Natural nuclear reactor at Oklo and variation of fundamental constants: Computation of neutronics of a fresh core. *Physical Review C* (74) 6. 2006.

El autor:

Trabaja desde 1983 en ENUSA Industrias Avanzadas S.A. Enseña matemáticas en la Universidad de Salamanca desde 1992. Ha publicado más de 100 artículos y ponencias, la mayoría sobre temas científicos. Algunos de ellos están disponibles en <http://web.usal.es/guillermo>.