

2012, Inicio de la Era del Sexto Sol

La energía del Sol

El Sol es una estrella que, como tal, brilla con luz propia. La luminosidad, proviene de la energía generada en su interior profundo mediante un conjunto de *reacciones termonucleares de fusión*. Estas reacciones utilizan a los átomos ligeros y pueden fusionarse a temperaturas de 10 a 15 millones de grados. Como consecuencia, se libera una gran cantidad de energía que se transporta por los mecanismos de radiación y convección, a través de las correspondientes zonas radiativa y convectiva. Este conocimiento fue el resultado de numerosos estudios previos, investigaciones y descubrimientos. Actualmente, continúa el desarrollo de la *nucleosíntesis* estelar para distintos diversos tipos de estrellas. Las presentes ideas son, solamente, una versión de física nuclear básica escrita para obreros.

El descubrimiento de la radiatividad

En 1895, Wilhem Roentgen descubrió un tipo de radiación desconocida a la que llamó X. Hoy se sabe que esos “rayos X” son radiación electromagnética de longitud onda muy corta. Al año siguiente, Henry Becquerel encontró que el elemento *Uranio* (U) emitía unas radiaciones parecidas. A este fenómeno nuevo, Becquerel le llamó “radiactividad”. Después se descubrieron otros elementos radiativos. Marie Curie realizó estudios químicos intensivos descubriendo al *Polonio* (Po) y al *Radio* (Ra). Ernest Rutherford y Frederick Soddy sugirieron que el fenómeno de la radiatividad se debe a la transformación espontánea de los átomos de un elemento pesado en otro.

Se encontró que las radiaciones descubiertas se emiten por los núcleos atómicos, se trata de radiaciones nucleares, que se caracterizan por penetrar a la materia y ionizarla a su paso. Se descubrieron 3 tipos de radiaciones llamadas *alfa* (α), *beta* (β) y *gamma* (γ). Las primeras son núcleos (partículas) del elemento *helio*, las segundas son electrones (partículas) y, las terceras, son radiación electromagnética de longitud de onda muy corta.

La energía de las radiaciones se mide en electrón-volts (eV) o megaelectron-volts (MeV) equivalente a 1 millón de eV. Las radiaciones nucleares son muy energéticas, especialmente las radiaciones alfa, y tienen una vida media variable pero puede ser, también, muy larga. Por ejemplo, el átomo radiativo del uranio-238 tiene una vida media de 4 mil 500 millones de años. Otros elementos como el tecnecio-99, utilizado en la medicina nuclear, tienen una vida media de solamente algunos segundos.

En 1898, J.J. Thompson midió la carga del electrón. En 1900, Max Planck sugirió que la energía de la radiación puede ser *cuantizada*, es decir, se emite en cantidades discretas, formulando la teoría cuántica. En 1905, Einstein propuso la existencia de un cuanto de luz (el fotón), al estudiar el efecto fotoeléctrico. En 1911, Ernest Rutherford probó la existencia del núcleo atómico como resultado del experimento de dispersión de partículas alfa realizado por Hans Geiger y Ernest Madsen. En 1913, Niels Bohr construyó una teoría de la estructura atómica basado en las ideas de la mecánica cuántica y propuso un núcleo central y electrones moviéndose alrededor en órbitas bien

definidas. Werner Heisenberg, en 1927, demostraría que ese modelo atómico era incorrecto.

La energía del núcleo atómico

En 1919, Rutherford logró romper un núcleo atómico al bombardear un átomo de *Nitrógeno* (N) con partículas alfa. De esta manera, un átomo de Nitrógeno-14 fue transformado en otro átomo pero de Oxígeno-16.

La diferencia entre los llamados isótopos de un elemento reside en el diferente número de protones y neutrones que tienen en el interior de sus núcleos, es decir, los isótopos tienen el mismo número atómico (el mismo elemento) pero diferente número de masa (formado por los protones más los neutrones). Con el descubrimiento de los isótopos se dio un trascendente paso al demostrarse que no solamente el átomo (que se consideró indivisible por 2 mil años) tiene estructura sino que, el mismo núcleo atómico, tiene también estructura formado precisamente por protones y neutrones, el primero portador de carga eléctrica positiva y, el segundo, eléctricamente neutro. El núcleo más sencillo es el de Hidrógeno formado por un protón y un neutrón. Un núcleo de Hidrógeno pesado se llama Deuterio (formado por un protón y dos neutrones); un núcleo de Hidrógeno superpesado se llama Tritio (formado por un protón y tres neutrones).

En 1931, James Chadwick descubrió al neutrón (partícula sin carga eléctrica) y, en 1933, Carl Anderson descubrió al positrón (la antipartícula del electrón o antielectrón, de carga positiva). Luego, George Gamow hizo cálculos teóricos tendientes a utilizar *protones* como proyectiles. En 1931, Crookcroft y Walton, desarrollaron una máquina para acelerar protones logrando romper a un átomo de *Litio* en dos partes iguales, cada una consistente en un átomo de *Helio* (He). En esta ocasión se liberaron grandes cantidades de energía resultado de la reacción.

Más tarde, Robert van der Graaf inventó una máquina para acelerar partículas en campos eléctricos muy fuertes; otro tanto hizo Ernest Lawrence. Surgieron los *aceleradores de partículas* que tomaron nombres como ciclotrón, sincrotrón, bevatrón, cosmotrón, etc.

Actualmente, existen grandes aceleradores de partículas en Estados Unidos (p.e., Fermilab, en Illinois) y Suiza (p.e., el CERN de Ginebra) donde se realizan grandes experimentos: Los aceleradores de partículas se aplican, también, con diversos

2007 energía 7 (87) 53, FTE de México
propósitos, médicos e industriales, en Japón y varios países más. El conocimiento actual del átomo está explicado por el llamado Modelo Standard de las Partículas Elementales que considera a las 4 fuerzas de la naturaleza (gravitación, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil) y a las interacciones de 12 partículas (6 quarks y 6 leptones) como constituyentes básicos del universo visible.

Las reacciones termonucleares

En 1924, Louis De Broglie propuso que la materia tiene propiedades de onda. En 1926, Edwin Schrödinger desarrolló la mecánica ondulatoria formulando un nuevo modelo atómico que describe a los electrones no como pequeñas partículas que giran alrededor del núcleo atómico sino como una función de onda, ψ , el cuadrado de la cual representa la probabilidad de presencia en una región limitada del espacio; la zona de probabilidad se conoce como orbital. El mismo año, Max Born le dio una interpretación probabilística; G.N. Lewis propuso el nombre de *fotón* para un cuanto de luz. En 1927, Werner Heisenberg formuló el llamado *Principio de Incertidumbre*.

En 1928, Rutherford realizó un experimento bombardeando un blanco de uranio con partículas alfa, emitidas por el Polonio-214, encontrando que éstas podían penetrar a los núcleos de los átomos de uranio. George Gamow explicó el fenómeno mediante la mecánica ondulatoria desarrollada apenas dos años antes. La desintegración alfa de los núcleos radiativos no podía explicarse con la mecánica clásica pero, con la interpretación cuántica, se pudo explicar teóricamente. Cuando esas partículas penetran en el núcleo atómico alteran la estructura interna y producen una transformación artificial de un elemento químico en otro.

Al año siguiente, Fritz Houterman y Robert Atkinson realizaron estudios para tratar de entender si la energía en el interior del Sol y otras estrellas podía explicarse por medio de las transformaciones nucleares que se originan a las temperaturas extremadamente altas que existen en el núcleo solar. Se utilizaron las condiciones físicas del interior del Sol propuestas por Arthur Eddington (1926), así como la teoría cuántica que da la probabilidad de penetración de dos partículas que chocan a gran velocidad. Entonces, se calculó la velocidad de reacción termonuclear entre diferentes elementos encontrándose que las únicas reacciones que podrían liberar suficiente energía para mantener la

2007 energía 7 (87) 54, FTE de México

reacción observada son las que ocurren entre los núcleos de Hidrógeno y los de otros elementos ligeros que no pudieron ser identificados en ese momento. Después, George Gamow y Edward Teller obtuvieron datos más precisos sobre las propiedades nucleares.

La fusión termonuclear de un cierto elemento se llama “quemado” (nuclear) de este elemento. Dependiendo de las propiedades de las tasas de reacción nuclear se tienen diferentes “quemados” separados por apreciables diferencias de temperatura.

Los ciclos del carbono-nitrógeno-oxígeno

Primero, se estudiaron las reacciones termonucleares entre el Hidrógeno y otros elementos. Hay pocas reacciones que pueden explicar la producción de energía en el Sol. La reacción de un átomo pesado de Hidrógeno o Deuterio con otro similar es muy rápida, lo mismo que la reacción entre un átomo de Litio y un protón (núcleo del átomo de Hidrógeno ligero). Por otra parte, la reacción entre el Oxígeno-16 y un protón, o entre el Silicio-28 y un protón, son muy lentas. Quedaba, entonces, el Carbono (C) y el Nitrógeno (N) reaccionando en el Hidrógeno (H). Hoy, para ciertas estrellas, también se incluye al Oxígeno (O). A estos ciclos se les llama *Ciclos CNO*.

Hans Bethe y Carl von Weizsäcker encontraron que el grupo de reacciones en las que intervienen el Carbono y el Nitrógeno constituyen un ciclo que se repite mientras dura el Hidrógeno. Los núcleos de Carbono y Nitrógeno pasan a través de una serie de transformaciones y reaparecen al final de cada ciclo; se dice que actúan solamente como catalizadores.

Esto último es muy importante porque la duración total del ciclo es de 6 mil 500 millones de años y, si no se regeneraran el Carbono y el Nitrógeno las reacciones nucleares cesarían muy pronto y el Sol dejaría de brillar. Lo que sí se consume es Hidrógeno, el cual se convierte en Helio. El Sol está hecho de Hidrógeno en un 70%, cantidad suficiente para que dure brillando algunos miles de millones de años.

El neutrino solar

Una de las formas radiativas de desintegración se debe a las emisiones de radiaciones beta o electrones. James Chadwick, en 1914, descubrió

que estas partículas no se emiten con una sola energía sino con amplio espectro de energías. Eso parecía violar la ley de la conservación de la energía. Sin embargo, Wolfgang Pauli planteó que, al tiempo que se emite la partícula beta, también se emite otra partícula-onda llamada *neutrino* la cual no tiene carga eléctrica pero sí tiene alguna masa aunque considerablemente pequeña.

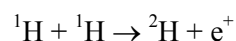
Esta radiación se emite del núcleo del Sol en todas direcciones, interactúa muy débilmente con la materia, se mueve a la velocidad de la luz y es muy difícil de detectar aunque se sabe que un mar de neutrinos proveniente del Sol cubre a la Tierra día y noche.

En 1934, Enrico Fermi desarrolló una teoría matemática de la desintegración beta. Después, se realizaron varios experimentos para detectar a los neutrinos. En 1968, Raymond Davis “capturó algunos neutrinos ... pero no los suficientes”. En 1977, Ramaswamy S. Raghavan propuso experimentos similares. El éxito experimental ha sido mínimo, sin embargo, la teoría sigue en desarrollo.

Hoy en día, se consideran necesarias a 3 generaciones de neutrinos con masa distinta y sigue abierta el área de la astronomía y astrofísica de neutrinos. El tema es motivo de estudio en los campos de la física de partículas elementales y en cosmología física-matemática.

Las cadenas protón-protón

En 1938, Charles Chrisfield propuso una idea diferente a la de Bethe & von Weizsäcker para la generación de energía en el interior del Sol. Se propuso que un protón podía chocar con otro para fusionarse dando como resultado a un deuterón (o Hidrógeno pesado) a través de la siguiente reacción



es, decir, un protón o Hidrógeno ligero (${}^1\text{H}$) más otro protón se transforma en un deuterón (${}^2\text{H}$), ó átomo de Deuterio, más un electrón positivo o positrón (e^{+}). Después, los núcleos de Deuterio se combinan con otros protones y forman, al final, un núcleo de Helio-4 (${}^4\text{He}$). Así, la fusión de 4 protones conduce al mismo resultado que el Ciclo de Carbono.

Las reacciones termonucleares dependen de la temperatura. Durante la fase llamada del quemado de hidrógeno, las *cadenas protón-protón*

(*pp*) requieren menos temperatura que los ciclos de CNO. En el caso del Sol, las cadenas *pp* constituyen el proceso principal pero, en otras estrellas más calientes, los ciclos CNO, e incluso, otras reacciones dominan. De hecho, en las condiciones de temperatura del interior estelar, las cadenas *pp* y los ciclos CNO operan simultáneamente.

Partículas elementales y núcleos que intervienen en las reacciones termonucleares de fusión

partículas	
e^-	electrón
e^+	protón
γ	fotón
ν	neutrino
p	protón
α	alfa

núcleos		
Símbolo	Nombre	Composición en protones y neutrones
H	Protón	p
D	Deuterio	p, n
^3He	Helio-3	2p, n
^4He	Helio-4	2p, 2n
^7Li	Litio-7	3p, 4n
^7Be	Berilio-7	4p, 3n
^8Be	Berilio-8	4p, 4n
^8B	Boro-8	5p, 3n

La masa del Sol se convierte en energía

El Sol brilla luminoso porque parte de su masa se está convirtiendo continuamente en energía. Se pierden 4,200 millones de kg por segundo. Cada

año tiene 31 millones 557 segundos y el Sol ha brillado durante más de 4 mil 500 millones de años y podrá hacerlo un lapso similar más. En cada reacción nuclear se produce una cierta cantidad de energía; la energía liberada en conjunto es la que permite la evolución del Sol.

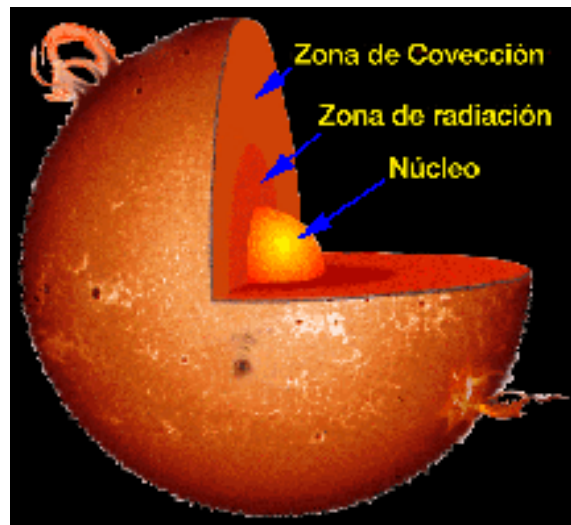
Pero la energía del Sol no ocurre solamente porque pierde masa, sino como resultado de las reacciones nucleares. Es decir, el Sol no se va a desintegrar o apagar porque pierda toda su masa; ésta, tampoco desaparecerá cuando se haya agotado su Hidrógeno. De hecho, el Sol pierde solamente el 0.727% de su masa al convertir todo el Hidrógeno en Helio. Esa cantidad de masa perdida (llamada defecto de masa) es la que se convierte en energía a través de la fórmula de Einstein, $E=mc^2$, donde c representa a la velocidad de la luz. Cada segundo, se están convirtiendo 580 mil millones de kg de Hidrógeno en Helio.

Pero el Sol no está formado solamente del Hidrógeno, el 28% es de Helio y el 2% restante está constituido por otros elementos más pesados o “metales”. Sin embargo, el Sol no “quemará” todo su Helio porque no tendrá la posibilidad de alcanzar en su núcleo las altas temperaturas que se requieren. Antes, se producirán otras transformaciones. No obstante, al menos otros 7 mil millones de años, seguirá brillando el Sol.

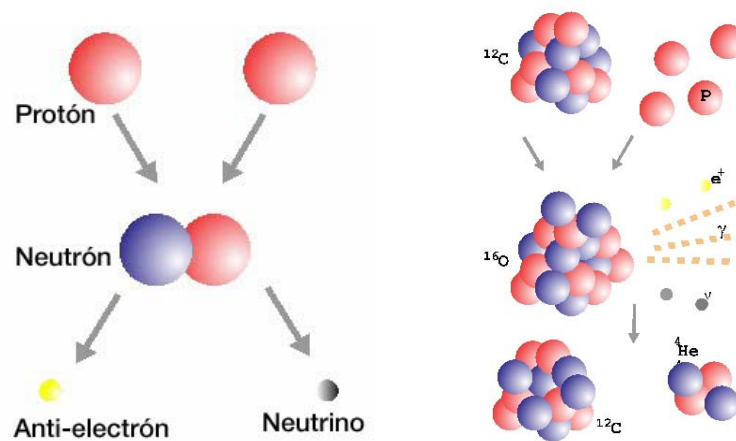
Con base en estos principios para la generación de energía es se hacen esfuerzos en el mundo para dominar en la Tierra los procesos de Fusión Termonuclear Controlada y lograr una fuente prácticamente inagotable de energía en grandes dispositivos llamados “Tokamak”. Uno de los proyectos más importantes es el Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER). En términos de energía liberada, la reacción Deuterio-Tritio se considera la más eficiente.

Referencias.

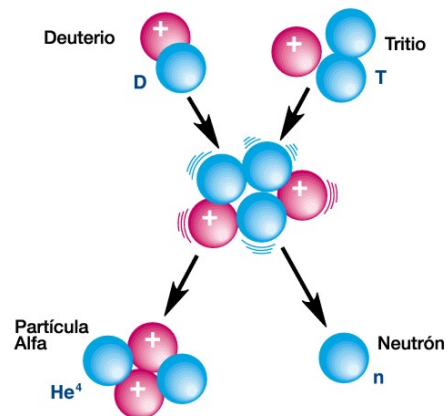
- Asimov I. 1983, *El Sol brilla Luminoso*, Plaza&Janes.
- Bahen D. 2007, *La Energía del Sol*, FTE de México.
- CERN 2007, *Teaching Standard Model at High School*, CERN; en <http://teachers.web.cern.ch>
- E70 2005, *La Energía de las Estrellas*, en *energía 5* (70) 16, FTE de México.
- E86 2007, *La Estructura del Sol*, en *energía 7* (86) 54, FTE de México.
- Ucar 2007, *El Proceso de Fusión del Hidrógeno*, en www.windows.ucar.edu
- Gamow G. 1967, *Una Estrella llamada Sol*, Espasa-Calpe.
- Ucar 2007, *El Proceso de Fusión del Hidrógeno*, en www.windows.ucar.edu
- Wikipedia 2007, *Atomo*, en www.wikipedia.org



Las energía del Sol se genera en su núcleo



Reacciones nucleares que ocurren en el interior del Sol



Reacción nuclear utilizada en un reactor de fusión