

Lección 2: El valle de isótopos estables

Resumen

La radiación radioactiva fue descubierta muy pronto por el ennegrecimiento de las placas fotográficas. El origen de la radiación fue investigado y descrito con leyes muy simples. El estado final de todos los isótopos son los elementos químicos estables. Midiendo unas cantidades características de algunos isótopos, se pueden sacar conclusiones de gran alcance sobre la historia del universo. Sin embargo, todos los resultados siempre deben ser considerados críticamente, ya que el estado cósmico original se refiere a suposiciones no verificables.

Tabla de contenidos

- Folio 2: Principios básicos de la desintegración radiactiva
- Folio 3: Radiación alfa
- Folio 4: Tiempo de desintegración
- Folio 5: Fuentes de radiación alfa
- Folio 6 – 8: Radiación beta (1-3)
- Folio 9: Fuentes de radiación beta
- Folio 10: Radiación gamma
- Folio 11: La ley de desintegración radiactiva
- Folio 12: Cadenas de decaimiento
- Folio 13: El valle de isótopos estables
- Folio 14 – 17: Geocronología (1-4)
- Folio 18 – 19: Síntesis de los núcleos atómicos (1-2)
- Folio 20 – 21: La edad de los elementos pesados (1-2)
- Folio 22: El sistema solar
- Folio 23: La evaluación de la edad cósmica

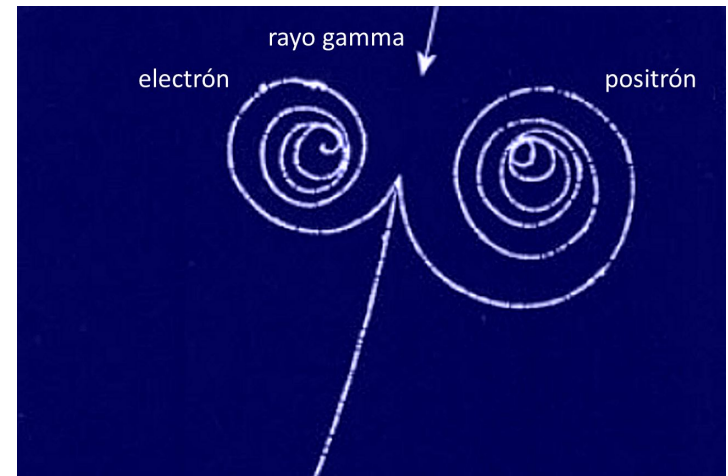
Principios básicos de la desintegración radiactiva

El descubrimiento de la radiación radioactiva se debe a Becquerel. En investigaciones posteriores se demostró que por el cambio de dirección de las trayectorias en un campo magnético se pueden distinguir 3 tipos principales de radiación:

Radiación alfa: partículas de tamaño atómico cargadas positivamente, identificados como núcleos de helio.

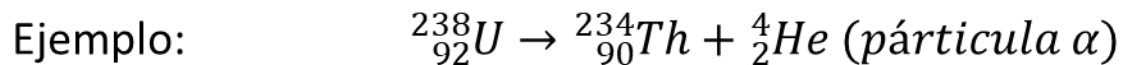
Radiación beta: Partículas con carga negativa de tamaño subatómico, identificadas como electrones.

Radiación gamma sin desviación en el campo magnético, identificada como radiación electromagnética de alta energía emitida por los núcleos altamente excitados como productos de descomposición de núcleos inestables.



Radiación alfa

En la desintegración alfa, un núcleo atómico emite un núcleo de He, la partícula alfa, compuesta de 2 protones y 2 neutrones. Esto reduce el número de nucleones del núcleo atómico por 4:



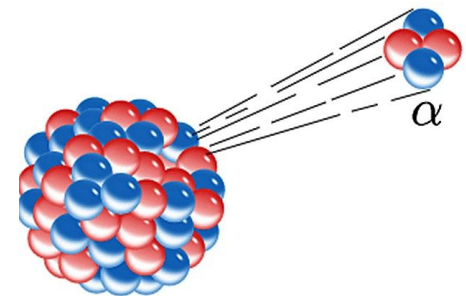
El elemento resultante aparece como un isótopo en la tabla periódica de los elementos, desplazado 2 unidades hacia el lado más ligero a la izquierda. El desintegración alfa espontánea sólo puede ocurrir energéticamente en los núcleos atómicos pesados.

Número de nucleones > 170

Número atómico > 60

La energía cinética de las partículas alfa está en el rango

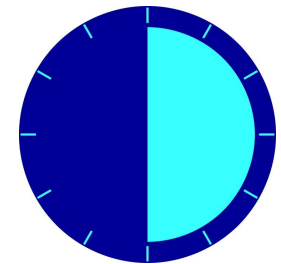
$$E_{kin,\alpha} = 4 - 9 \text{ MeV}$$



Tiempo de desintegración

La energía necesaria para superar la repulsión electrostática es mucho mayor, por lo que la desintegración alfa se interpreta teóricamente como un efecto túnel. Hay unos 450 isótopos que se transforman por la desintegración alfa. La desintegración se caracteriza por el tiempo que transcurre hasta que la mitad de los átomos se han transformado, la vida media.

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



$t_{1/2}$ = tiempo de desintegración, $N(t)$: cantidad después del tiempo (t),
 N_0 : cantidad inicial

El tiempo característico de los emisores alfa tiene un rango de:

$$t_{1/2} : 0.3 \mu s (^{212}_{84}Po) - 2.3 \cdot 10^{15} a (^{144}_{60}Nd)$$

Fuentes de radiación alfa

Algunos isótopos de radiación alfa

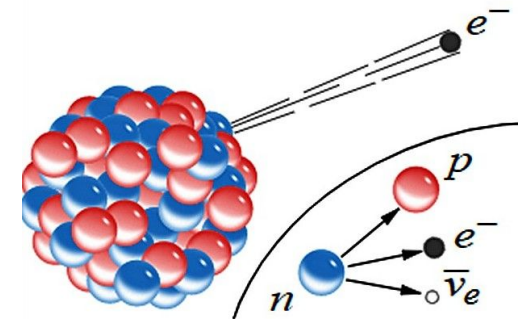
Isótopo	$t_{1/2}$	$E_{\text{cinética}}$ (MeV)
$^{210}_{84}\text{Po}$	138 d	5.3
$^{222}_{86}\text{Ra}$	3.8 d	5.5
$^{224}_{88}\text{Ra}$	3.7 d	4.8
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 a	4.8
$^{235}_{92}\text{U}$	$7.038 \cdot 10^8 \text{ a}$	4.4
$^{238}_{92}\text{U}$	$4.468 \cdot 10^9 \text{ a}$	4.2
$^{238}_{94}\text{Pu}$	87.74 a	5.5
$^{239}_{94}\text{Pu}$	$2.411 \cdot 10^4 \text{ a}$	5.2
$^{241}_{95}\text{Am}$	432.2 a	5.5

Radiación beta (1)

La radiación beta, es decir, la emisión de electrones del núcleo atómico, podría explicarse por razones de conservación de la energía y el momento con la adición de otro conjunto subatómico: el neutrino. Bajo el decaimiento beta se pueden distinguir 3 grupos:

- Radiación β^- : Emisión de un electrón desde el núcleo por la conversión de un neutrón en un protón.

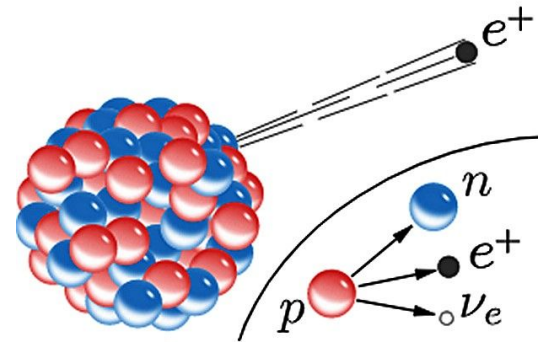
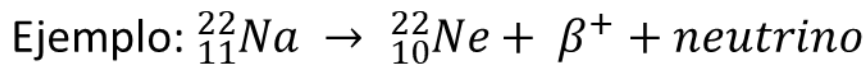
Ejemplo: $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + \beta^- + \text{neutrino}$



El número atómico del núcleo atómico aumenta en 1 con el resultado de que el isótopo del siguiente elemento más alto en la tabla periódica se desliza 1 posición a la derecha.

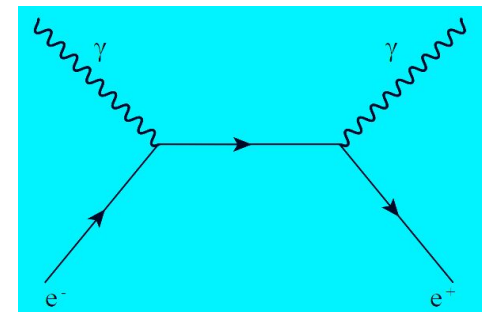
Radiación beta (2)

- Radiación β^+ : Emisión de un positrón (= electrón cargado positivamente, partículas antimateria del electrón).



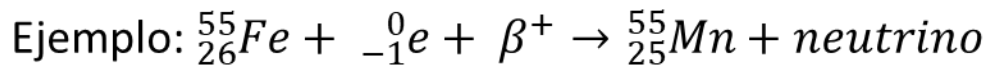
En el núcleo atómico, un protón se transforma en un neutrón, que se convierte en el isótopo del siguiente elemento inferior, es decir, se desplaza un número hacia la izquierda en la tabla periódica. El positrón, como contraparte antimaterial del electrón cargado negativamente, se destruye tras su colisión con un electrón de la esfera atómica. Ambas masas irradian completamente con su energía de masa equivalente ($E_{\text{electrón}} = m_{\text{electrón}} \cdot c^2$) en 2 fotones. Por lo tanto, un decaimiento β^+ sólo puede ocurrir si la diferencia de energía entre el estado inicial y el final es

$$\Delta E > 2 \cdot 0.511 \text{ MeV}$$



Radiación beta (3)

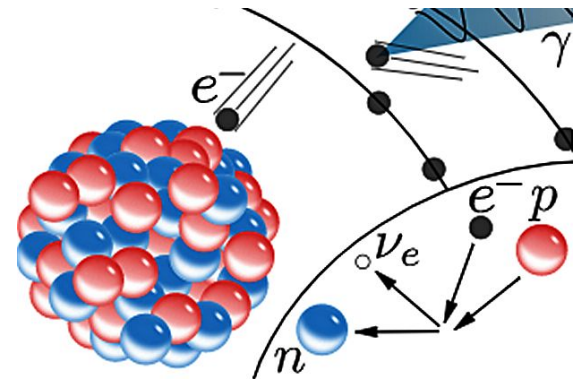
- Captura de electrones



El núcleo atómico puede tomar 1 electrón de una capa más profunda de la cáscara atómica. Al igual que la radiación β^+ , el isótopo de este elemento en la tabla periódica de elementos se desplaza 1 posición a la izquierda.

Las conversiones β se producen con todos los elementos de la tabla periódica. Hay unos 20 emisores naturales de beta. Las vidas medias se extienden sobre un rango extremo:

$$t_{1/2}: 5.5\text{ms} ({}^{34}_{11}\text{Na}) - 7.2 \cdot 10^{24}\text{a} ({}^{128}_{52}\text{Te})$$



Fuentes de radiación beta

Isótopo	Tipo de desintegración beta	$t_{1/2}$	La energía máxima de las partículas β (keV)
3_1H	β^-	12.323 a	18.6
${}^{11}_6C$	β^+	0.34 h	960.1
${}^{14}_6C$	β^-	5730 a	156.5
${}^{13}_7N$	β^+	0.166 h	1199
${}^{15}_8O$	β^+	0.034 h	1732
${}^{18}_9F$	β^+	1.83 h	633
${}^{22}_{11}Na$	β^+	2.603 a	545.7
${}^{32}_{15}P$	β^-	14.28 d	1710
${}^{85}_{36}Kr$	β^-	10.76 a	687
${}^{90}_{38}Sr$	β^-	28.64 a	546.2
${}^{90}_{39}Y$	β^-	64.1 h	2282

Radiación gamma

Después de una desintegración α , una decaimiento β , o una captura de electrones el isótopo está en un estado excitado. A través de la emisión de radiación electromagnética, en este rango de energía llamado radiación- γ , los isótopos cambian a su estado básico. La radiación de los isótopos se caracteriza por la energía y los tiempos de decaimiento. La disminución de la actividad de un isótopo excitado sigue la ley de la desintegración radiactiva, es decir, durante un período del tiempo Δt la cantidad $N(t)$ disminuye con la constante de desintegración λ .

$$\Delta N(t) = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$$

Ecuación diferencial:
$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot dt$$

Integración:
$$\ln N(t) = -\lambda \cdot t + \ln N_0$$

Forma exponencial :
$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad ; \quad N_0: \text{cantidad inicial}$$

La ley de desintegración radiactiva

La vida media se obtiene a partir de la ley de desintegración.

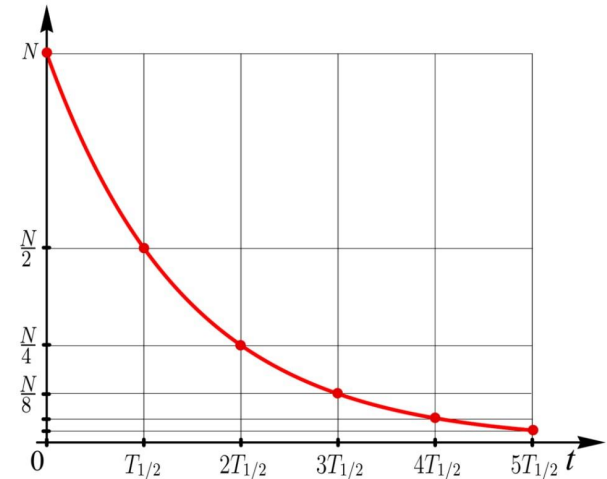
Ley de desintegración: $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Vida media: $N(t_{1/2}) = \frac{1}{2} \cdot N_0$

Insertando: $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$

Decaimiento a la enésima parte: $t_{1/n} = \frac{\ln(n)}{\lambda}$

Ley de desintegración con $t_{1/2}$: $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot t}$



Hay 3 cadenas naturales de decaimiento. Estas son las series de uranio, torio y actinio. Los elementos están todavía presentes, porque las semividas están en el orden de la formación del sistema solar.

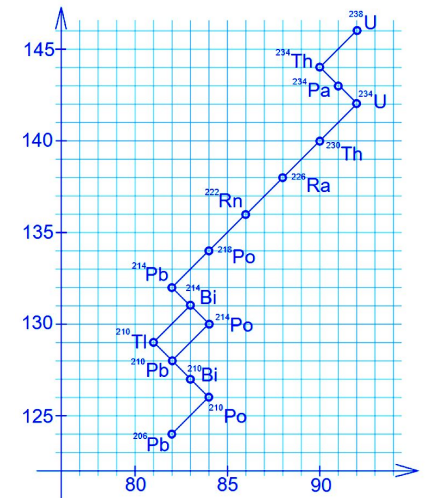
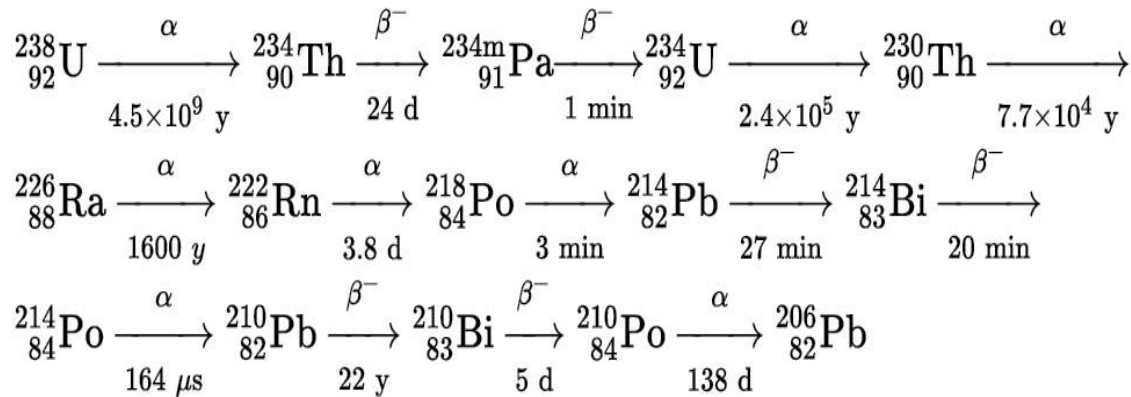
$$t_{1/2}(\text{uranio}): 4.5 \cdot 10^9 \text{ años}$$

$$t_{1/2}(\text{torio}): 1.4 \cdot 10^{10} \text{ años}$$

$$t_{1/2}(\text{actinio}): 7.1 \cdot 10^8 \text{ años}$$

Cadenas de decaimiento

El uranio ($^{238}_{92}\text{U}$) es la fuente de plomo estable ($^{206}_{82}\text{Pb}$) al final de la cadena de decaimiento.

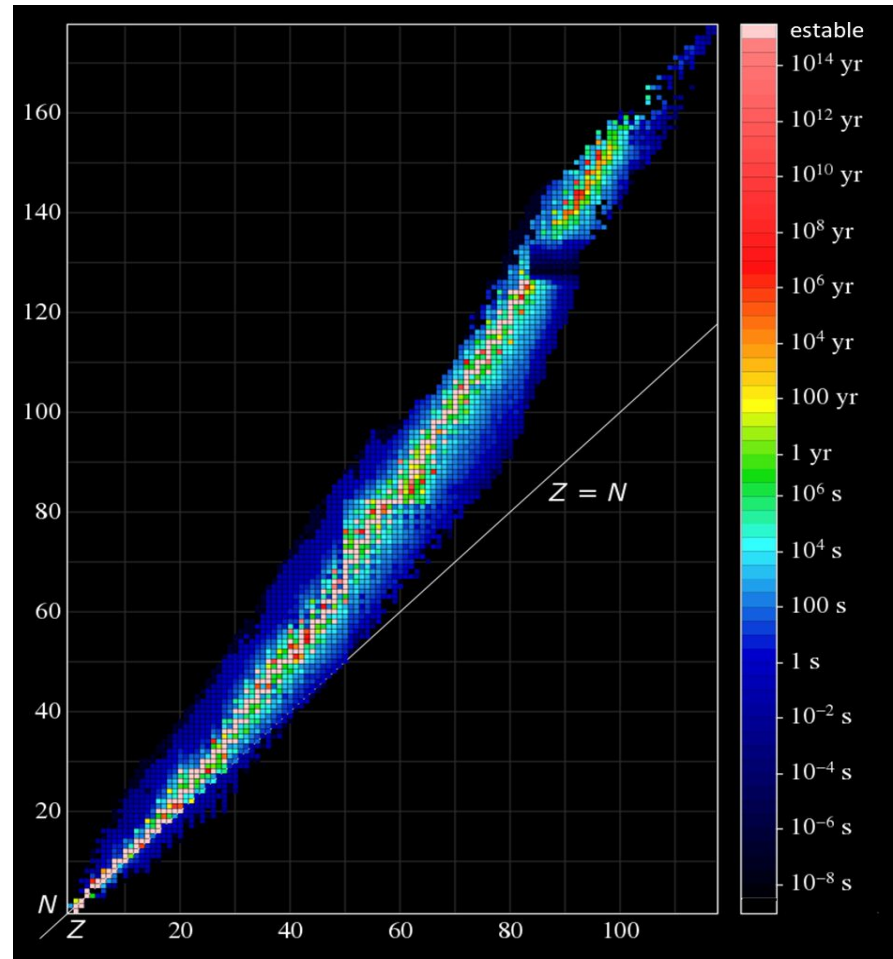


Los miembros de estas familias radiactivas existen en la naturaleza sólo por la constante generación de nuevos elementos durante la desintegración de los otros elementos.

El valle de isótopos estables

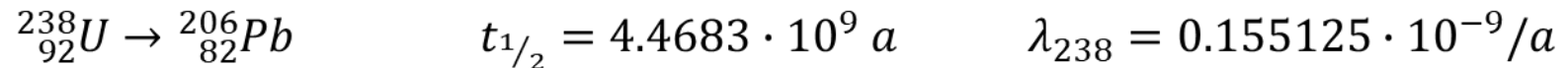
Si se dibuja el número de neutrones N de todos los isótopos conocidos como función del número de protones Z , los elementos estables aparecen en un rango estrecho al final de su serie de decaimiento.

Al cambiar gradualmente el número de sus neutrones y protones en el núcleo atómico, los isótopos se desplazan desde ambos lados hacia esta región, que se denomina valle de los isótopos estables.



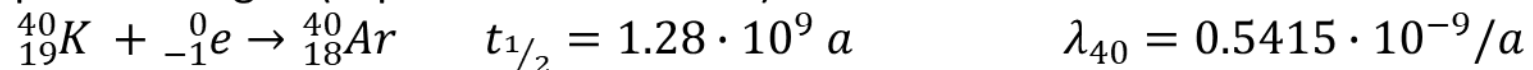
Geocronología (1)

Con el conocimiento de las vidas medias de los elementos naturalmente inestables, la edad de una muestra puede determinarse a través de la medición de la relación isotópica. Según los tiempos que se determinen, los isótopos naturales con semividas similares deben ser analizados con respecto a su concentración. Algunos de los métodos más importantes para el estudio de la antigüedad de la Tierra (geocronología) y en la investigación cósmica (edad del universo) se basan en la cadena de decaimiento de los isótopos del uranio (decaimiento alfa).

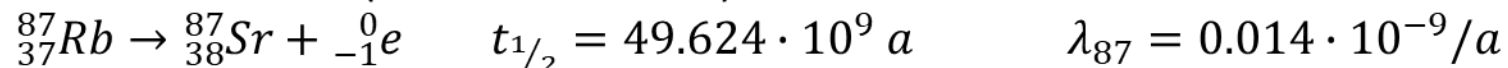


Otros isótopos apropiados son:

potasio - argón (captura de electrones)



rubidio-estroncio (decaimiento beta)



Geocronología (2)

Lo fundamental es la detección de los isótopos de una serie de desintegración sin contaminación con isótopos ya existentes de otras fuentes. La cadena de decaimiento del plomo se da como ejemplo, ya que el mineral circonio (ZrSiO_4) se encuentra frecuentemente en roca terrestre muy antigua y en muestras de meteoritos. Durante su formación, los átomos extraños se incorporan al mineral en una estructura muy estable como una jaula. En el proceso de cristalización se incorporan uranio, torio y muchos otros elementos, pero no plomo. Esto significa que todos los átomos de plomo que se encuentran en este material pueden ser asumidos como de origen radiactivo por la desintegración del uranio. Las muestras para la investigación cósmica existen como impactos de meteoritos en la tierra. Uno de esos actos tuvo lugar el 15 de septiembre de 2007 en Carancas, 11 km al sur de Desaguadero (Perú). Durante este evento se formó un cráter de impacto de 14 m de diámetro, que se llenó gradualmente de agua, sedimento y barro. Se encontraron fragmentos en los alrededores.



Geocronología (3)

¿Cómo se puede determinar la edad de tal fragmento?

Ley de desintegración:

$N(\text{ahora en existencia})$:

$N(\text{cantidad inicial})$:

$$N(\text{ahora en existencia}) = N_0 \cdot e^{-\lambda_{238} \cdot t}$$

cantidad residual $^{238}_{92}\text{U}$

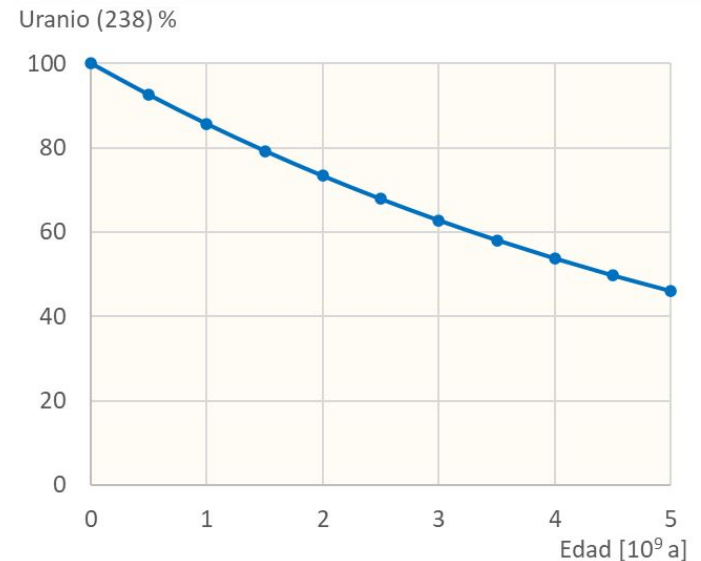
$^{238}_{92}\text{U}$ cantidad en la formación, idéntica a la suma de los átomos de uranio y plomo de hoy en día

Constante de desintegración: $\lambda_{238} = 0.155125 \cdot 10^{-9} / \text{a}$

Edad de formación del mineral: t

$$U = (U + Pb) \cdot e^{-\lambda_{238} \cdot t}$$

En el ejemplo numérico, el análisis químico-físico muestra un 60% de U y un 40% de Pb. Gráficamente representado o también se calcula que la edad del meteorito es de 3300 millones de años.



Geocronología (4)

Para verificar los resultados, se toman dos series de decaimiento. Otra cadena de decaimiento, adecuada de la vida media es el isótopo $^{235}_{92}\text{U}$, cuya desintegración termina con el elemento estable $^{207}_{82}\text{Pb}$.

$$^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{207}_{82}\text{Pb} \quad t_{1/2} = 0.7038 \cdot 10^9 \text{ a} \quad \lambda_{235} = 0.98486 \cdot 10^{-9} / \text{a}$$
$$U = (U + \text{Pb}) \cdot e^{-\lambda_U t} \quad \rightarrow \quad \frac{\text{Pb}}{U} = e^{\lambda_U t} - 1$$

Las ecuaciones pueden unirse por ambos isótopos de uranio.

$$\frac{^{207}_{82}\text{Pb}}{^{206}_{82}\text{Pb}} = \frac{^{235}_{92}\text{U}}{^{238}_{92}\text{U}} \cdot \frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}$$

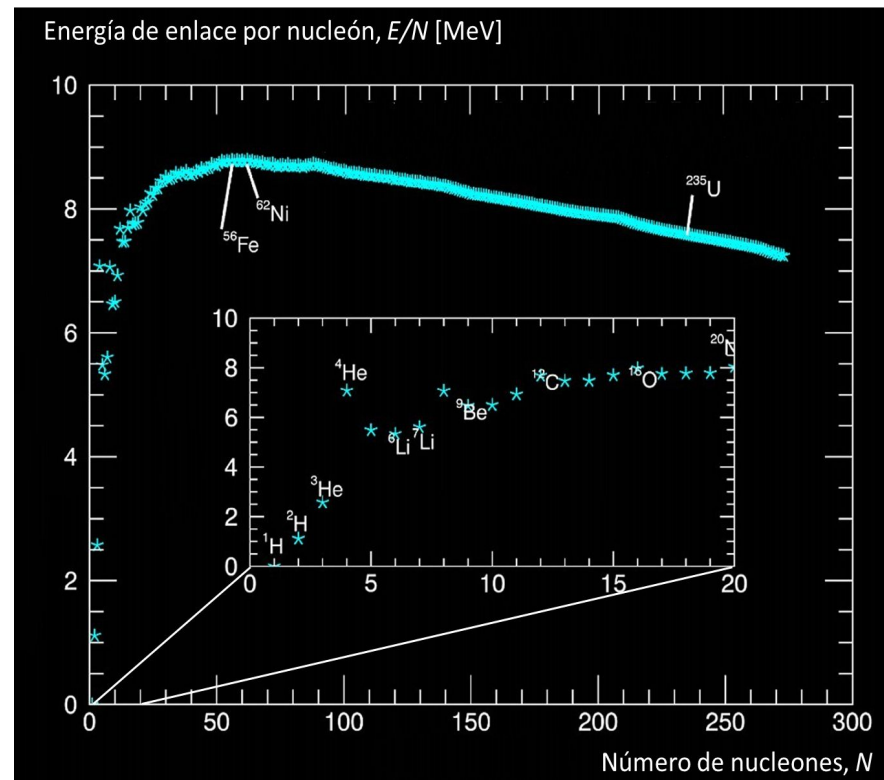
Esto simplifica el análisis para la determinación de la proporción de isótopos de plomo, ya que la proporción de isótopos de uranio es aproximadamente homogénea en todo el mundo con el valor numérico:

$$\frac{^{235}_{92}\text{U}}{^{238}_{92}\text{U}} = \frac{1}{137.8}$$

Síntesis de los núcleos atómicos(1)

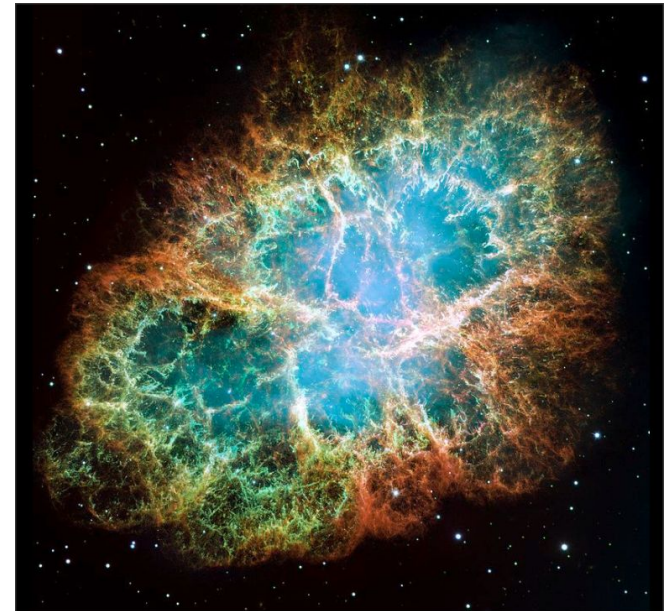
¿Cómo se crearon los elementos químicos?

La síntesis de los núcleos atómicos tiene lugar a partir de las partículas elementales neutrones, protones y electrones en condiciones extremas de densidad y temperatura como un proceso de fusión en el que se libera energía. Este proceso exotérmico es el que proporciona la energía en todas las estrellas siempre que no se supere el límite superior del número de nucleones. Cuando el núcleo atómico alcanza el valor del hierro, el proceso de fusión se detiene.



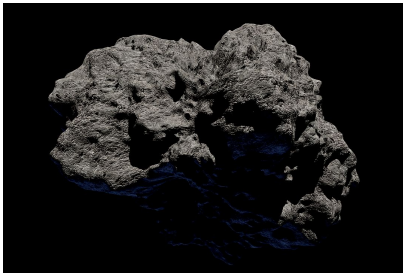
Síntesis de los núcleos atómicos (2)

Para un mayor crecimiento del núcleo atómico por encima del hierro, hay que gastar energía, es decir, la estrella se enfría. Como el suministro de energía se agota cuando los elementos más ligeros se fusionan, esto es inevitable. Como resultado, la presión de la radiación disminuye y la gravedad toma el control. Dependiendo de la masa, la estrella puede colapsar, causando una enorme explosión y una envoltura de gas con una alta densidad de neutrones es expulsada. Este fenómeno se llama supernova. Sólo en condiciones de alta densidad de neutrones con una energía cinética extrema se pueden forzar más nucleones en los núcleos atómicos ya existentes, siempre que los procesos sean más rápidos que los tiempos de desintegración radiactiva más cortos. Estos procesos se denominan, por lo tanto, 'proceso-rápido'. Sólo estos procesos permiten la síntesis de metales pesados como el oro, el platino, el plomo, el uranio, entre otros.



La edad de los elementos pesados (1)

Tanto con los meteoritos más viejos fechados como con la composición de isótopos existente en la Tierra se puede intentar a desarrollar una idea de la edad de la Vía Láctea y del sistema solar con sus planetas.

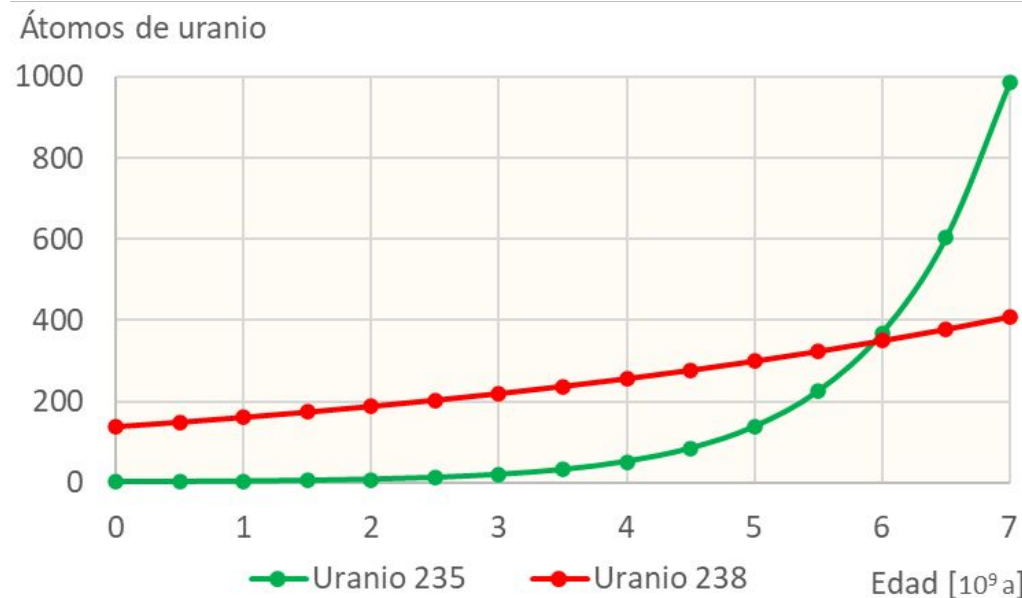


Ya que se conoce la proporción de los isótopos de uranio $^{235}_{92}\text{U}$ y $^{238}_{92}\text{U}$ y sus constantes de desintegración, se puede calcular el tiempo pasado en el que se debe haber formado el número atómico idéntico. Aquí se supone que la tasa de síntesis del proceso-rápido es aproximadamente la misma para pesos atómicos casi idénticos. Gráfica o numéricamente, el resultado se deriva de la ley de desintegración radiactiva.

$$N_0 = 1 \cdot e^{\lambda_{235}t} = 137.8 \cdot e^{\lambda_{238}t} = N_0$$

La edad de los elementos pesados (2)

La misma cantidad de isótopos de uranio debe haber estado presente hace unos 6000 millones de años.



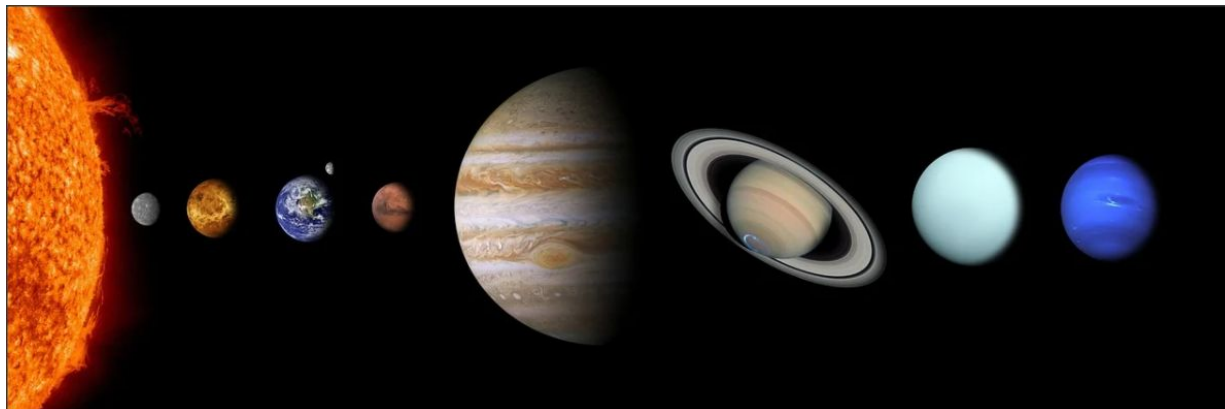
Este resultado indica que más o menos en esta época en la Vía Láctea, en la relativa proximidad - a escala cósmica - del Sol actual, se produjo una explosión de supernova en cuya nube de gas de alta densidad de neutrones se sintetizaron numerosos elementos más pesados que el hierro.

El sistema solar

Después de la nucleosíntesis, los restos de la nube de gas que se expandía en el espacio se condensaron con la materia interestelar para formar una nebulosa solar primordial.



Con suficiente masa, el centro se colapsó y el proceso de fusión pudo encenderse en el Sol actual. Después, trozos más grandes del polvo restante se agregaron para formar los planetas.



La evaluación de la edad cósmica

Suponiendo que la duración del proceso de condensación es de 1500 millones de años, la edad del sol sigue con unos 4500 millones de años. Una corteza terrestre sólida con la formación de minerales como los circones puede datarse en una edad de 4300 millones de años mediante el análisis de isótopos.

Aunque las leyes se entiendan bien, las evaluaciones numéricas se basan a menudo en suposiciones que parecen plausibles pero que no se pueden verificar. Si se obtienen resultados diferentes, éstos no tienen que ser incorrectos. En tal situación es necesario comprobar si la suposición original de una nube de polvo primordial con una cierta concentración de elementos químicos es válida en absoluto. Siempre es deseable diseñar un modelo mejor que permita una visión más profunda de los fenómenos naturales.

