

Introducción

Actividades

1. ¿Sabes cómo están constituidos los átomos en su interior?

Están constituidos por una corteza, en la que se encuentran los electrones en orbitales y un núcleo en el que se encuentran los neutrones y los protones que, a su vez, están formados por la agrupación de tres cuarks.

2. ¿Y por qué los núcleos pequeños se unen y los muy grandes se separan desprendiendo energía?

Los núcleos de los átomos van ganando estabilidad cuanto mayores son (hasta un tamaño intermedio, porque la atracción nuclear fuerte entre los protones y neutrones debida a que están constituidos por cuarks aumenta) pero, como la fuerza nuclear fuerte decae a distancias muy cortas, si el núcleo supera estas dimensiones, la fuerza eléctrica de repulsión entre los protones prevalece. Por lo tanto, los núcleos masivos son menos estables que los intermedios.

3. ¿Sabes si los protones, los neutrones y los electrones están hechos de partículas más pequeñas que ellos?

Los protones y neutrones son bariones por lo que están constituidos por tres cuarks de distinto color, mientras que los electrones, por lo menos a nivel de la teoría estándar de partículas, es una partícula fundamental.

De todas formas, según la teoría de las supercuerdas, todas las partículas que conocemos, a su vez, se encuentran formadas por cuerdas más elementales.

4. ¿Qué tipos distintos de fuerzas existen en el Universo? ¿Son a distancia?

Hasta lo que conocemos de momento, existen cuatro fuerzas fundamentales en la Naturaleza. La de gravitación, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. En función de las características que presentaba el Universo en cada momento, pueden estar unificadas entre sí, por lo que se busca la teoría de unificación que consiga considerarlas todas como parte de una sola fuerza primigenia. Hasta el momento, se ha conseguido unificar todas menos la de gravitación, aunque hay datos que hacen pensar que sí forma parte de la misma estructura unificada.

Actividades

1. Resuelve las siguientes cuestiones:

a) Indica la composición de los siguientes núcleos: ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{19}_9\text{F}$, ${}^{31}_{15}\text{P}$, ${}^{59}_{27}\text{Co}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$

Basándonos en el número atómico (esquina inferior izquierda) y en el número másico (esquina superior derecha) podemos contestar la pregunta:

Nitrógeno, N: 7 protones (Z) y 7 neutrones (A – Z); Flúor, F: 9 protones (Z) y 10 neutrones (A – Z); Fósforo, P: 15 protones (Z) y 16 neutrones (A – Z); Cobalto, Co: 27 protones (Z) y 32 neutrones (A – Z); Uranio, U: 92 protones (Z) y 146 neutrones (A – Z).

b) Indica la composición de los núcleos del plutonio-239 y del plutonio-244.

Teniendo en cuenta su número atómico, 94, y el valor del isótopo que nos dan:

Plutonio-239, ${}^{239}\text{Pu}$: 94 protones (Z) y 145 neutrones (A – Z).

Plutonio-244, ${}^{244}\text{Pu}$: 94 protones (Z) y 150 neutrones (A – Z).

2. ¿Cuál es la masa de 1 u expresada en kg? ¿Cuál es su equivalencia en MeV?

En un mol de átomos de carbono-12 (12 g) hay $6,02 \times 10^{23}$ átomos (número de Avogadro). Como 1 u es la doceava parte de la masa de un átomo de carbono-12 podemos calcular:

$$1 \text{ u} = \frac{12 \text{ g}}{1 \text{ mol át C-12}} \times \frac{1 \text{ mol át C-12}}{6,022 \times 10^{23} \text{ át C-12}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \approx 1,66 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{át C-12}}$$

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 \approx 1,49 \times 10^{-10} \text{ J} \times \frac{1 \text{ MeV}}{1,60 \times 10^{-13} \text{ J}} \approx 931 \text{ MeV}.$$

3. La masa atómica del cloro se obtiene calculando la media aritmética ponderada de las masas atómicas de los dos isótopos del cloro: cloro-35 y cloro-37. Determina la masa atómica del cloro sabiendo que existen dos isótopos ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ y ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ cuya abundancia relativa es 77,5 % y 22,5 %, respectivamente. ¿Cuál es la composición de los núcleos de ambos isótopos?

La masa atómica del cloro se calcula aplicando la proporción de cada isótopo:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

$$A(\text{Cl}) = 0,775 \times 35 \text{ u} + 0,225 \times 37 \text{ u} = 35,45 \text{ u}.$$

Núcleo de cloro-35: 17 protones y 18 neutrones (35 – 17).

Núcleo de cloro-37: 17 protones y 20 neutrones (37 – 17).

4. ¿Qué se entiende por estabilidad nuclear? Explica, cualitativamente, la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico.

La energía que se libera al formarse un núcleo a partir de los nucleones que lo constituyen se denomina energía de enlace.

Cuanto mayor es la energía de enlace, mayor es la estabilidad del núcleo.

La energía de enlace por nucleón se obtiene dividiendo la energía de enlace entre el número de nucleones que contiene. Cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón, más estable es el núcleo. La mayor estabilidad se presenta para números masivos comprendidos entre 40 y 100, aproximadamente.

El núcleo más estable es el del hierro-56.

5. Determina el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para el núcleo del carbono-12.

El núcleo está formado por 6 protones y 6 neutrones. La masa de estas partículas es la siguiente:

Masa de 6 protones: $6 \times 1,0073 \text{ u} = 6,0438 \text{ u}$

Masa de 6 neutrones: $6 \times 1,0087 \text{ u} = 6,0522 \text{ u}$

Masa total: 12,0960 u

Masa del núcleo de carbono-12: 12,0000 u

Defecto de masa: 0,0960 u

Como 1 u equivale a 931,5 MeV, la energía de enlace es:

$$E = 0,0960 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} = 89,4 \text{ MeV}.$$

El núcleo del carbono-12 contiene 12 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{89,4 \text{ MeV}}{12 \text{ nucleones}} = 7,45 \frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}}.$$

6. Define las siguientes magnitudes asociadas con los procesos de desintegración radiactiva: actividad, constante de desintegración, periodo de semidesintegración y vida media. Indica sus unidades en el Sistema Internacional.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

La actividad o velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva es el número de desintegraciones por unidad de tiempo. Su unidad en el SI es el becquerel (Bq).

La constante de desintegración representa la probabilidad de que un determinado núcleo radiactivo se desintegre. Su unidad en el SI es el s^{-1} .

El periodo de semidesintegración es el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos presentes en una muestra radiactiva se reduzca a la mitad. Su unidad en el SI es el segundo.

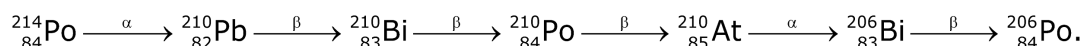
La vida media es el promedio de vida, es decir, el tiempo que por término medio tardará un núcleo en desintegrarse. Su unidad en el SI es el segundo.

7. A partir del $^{214}_{84}\text{Po}$ se han emitido sucesivamente las siguientes partículas: α , β , β , β , α y β , ¿cuál es el núcleo final estable?; ¿qué núcleos se han formado en los pasos intermedios?

De acuerdo con las leyes de Soddy y Fajans:

$$Z = 84 - (2 \times 2) + (4 \times 1) = 84 \quad ; \quad A = 214 - (2 \times 4) = 206.$$

El núcleo obtenido es el de polonio-206, $^{206}_{84}\text{Po}$. Este isótopo no tiene existencia real.



8. De los 120 g iniciales de una muestra radiactiva se han desintegrado, en una hora, el 10 % de los núcleos. Determina:

a) La constante de desintegración radiactiva y el periodo de semidesintegración de la muestra.

Calculamos la masa final: $m_f = 120 \text{ g} - 0,10 \times 120 \text{ g} = 108 \text{ g}$.

Aplicando la ecuación de la desintegración radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \lambda = \frac{-\ln\left(\frac{m}{m_0}\right)}{t} = \frac{-\ln\left(\frac{108 \text{ g}}{120 \text{ g}}\right)}{3600 \text{ s}} \approx 2,93 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}.$$
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{\ln 2}{2,93 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}} \approx 2,37 \times 10^4 \text{ s} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \approx 6,58 \text{ h}.$$

b) la masa que quedará de la sustancia radiactiva transcurridas cinco horas.

$$m = m_0 e^{-\lambda t} = 120 \text{ g} \times e^{-(2,93 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \times 5 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1})} \approx 70,8 \text{ g}.$$

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

9. Cuando se encuentra fuera del núcleo atómico, el neutrón es una partícula inestable con una vida media de 885,7 s. Determina:

a) El periodo de semidesintegración del neutrón y su constante de desintegración.

$$T_{\frac{1}{2}} = \tau \ln 2 = 885,7 \text{ s} \times \ln 2 \approx 613,9 \text{ s}$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{885,7 \text{ s}} \approx 1,129 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}.$$

b) Una fuente de neutrones emite 10^{10} neutrones por segundo con una velocidad constante de 100 km s^{-1} . ¿Cuántos neutrones por segundo recorren una distancia de $3,7 \times 10^5 \text{ km}$ sin desintegrarse?

El tiempo que tardan los neutrones en recorrer la distancia y su número son:

$$v = \frac{e}{t} \quad ; \quad t = \frac{e}{v} = \frac{3,7 \times 10^5 \text{ km}}{100 \text{ km s}^{-1}} = 3,7 \times 10^3 \text{ s}.$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 10^{10} \frac{\text{neutrones}}{\text{s}} \times e^{-(1,129 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \times 3,7 \times 10^3 \text{ s})} \approx 1,53 \times 10^8 \frac{\text{neutrones}}{\text{s}}.$$

10. Una muestra de radón-222 contiene inicialmente 10^{12} átomos de este isótopo radiactivo, cuya semivida (o periodo de semidesintegración) es de 3,28 días. ¿Cuántos átomos quedan sin desintegrar al cabo de 10 días? Calcula las actividades inicial y final (tras los diez días de esta muestra (expresa los resultados en Bq)).

Previamente calculamos la constante de desintegración cuyo valor es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{\ln 2}{3,28 \text{ días}} \approx 0,211 \text{ día}^{-1} \times \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} \approx 2,44 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}.$$

El número de átomos sin desintegrar será, con la ecuación de la desintegración radiactiva:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 10^{12} \text{ átomos Rn} \times e^{-(0,211 \text{ día}^{-1} \times 10 \text{ días})} \approx 1,23 \times 10^{11} \text{ átomos Rn}.$$

Las actividades se calculan con su ecuación correspondiente:

$$\text{Actividad inicial: } A_0 = \lambda N_0 \approx 2,44 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \times 10^{12} \text{ átomos Rn} = 2,44 \times 10^6 \text{ Bq}.$$

$$\text{Actividad final: } A_f = \lambda N_f \approx 2,44 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \times 1,23 \times 10^{11} \text{ átomos Rn} = 2,9 \times 10^5 \text{ Bq}.$$

11. ¿Qué es una serie o familia radiactiva? Cita un ejemplo.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Una serie radiactiva es el conjunto de núcleos que se producen por desintegración de uno inicial (núcleo padre) hasta llegar a uno estable. Ejemplo: familia del uranio-238.

12. Se dispone de 20 g de una muestra radiactiva y en la que, transcurridos dos días, se han desintegrado 15 g de la misma. Calcula:

a) La constante de desintegración radiactiva de dicha muestra.

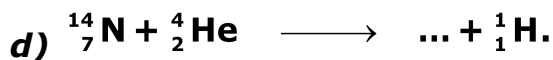
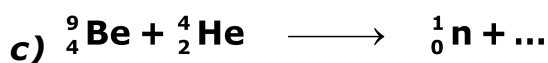
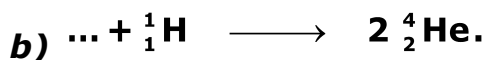
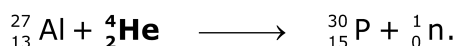
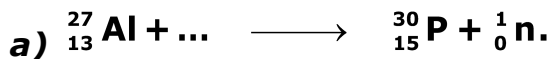
Aplicando la ecuación de la desintegración radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \lambda = \frac{-\ln\left(\frac{m}{m_0}\right)}{t} = \frac{-\ln\left(\frac{15 \text{ g}}{20 \text{ g}}\right)}{2 \text{ día} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} \approx 1,66 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}.$$

b) El tiempo que debe transcurrir para que se desintegre el 90 % de la muestra.

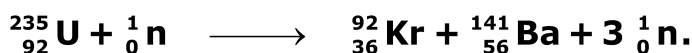
$$t = \frac{-\ln\left(\frac{m}{m_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln\left(\frac{0,1 m_0}{m_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln 0,1}{1,66 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}} \approx 1383000 \text{ s} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \approx 16 \text{ días}.$$

13. Completa las siguientes reacciones nucleares:



14. Calcula la cantidad de energía que se libera en la siguiente reacción de fisión nuclear:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales



Datos de las masas nucleares: $m({}^{235}\text{U}) = 235,0439 \text{ u}$; $m({}^{92}\text{Kr}) = 91,9251 \text{ u}$; $m({}^{141}\text{Ba}) = 140,9140 \text{ u}$; $m_n = 1,0087 \text{ u}$.

Calculamos primero el defecto de masa que se produce (ponemos en la ecuación 2 neutrones porque es la diferencia entre los 3 que se desprenden y el que se necesita aportar):

$$\Delta m = m_f - m_0 = 91,9251 \text{ u} + 140,9140 \text{ u} + 2 \times 1,0087 \text{ u} - 235,0439 \text{ u} = -0,1874 \text{ u}$$

Y con el valor de la masa que acabamos de calcular, aplicamos la ecuación de la energía de Einstein:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = -0,1874 \text{ u} \times \frac{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \times (3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 \approx -2,800 \times 10^{-11} \text{ J}.$$

El signo negativo se debe a que la energía se libera.

15. Explica en qué consisten las reacciones de fusión y fisión nucleares. ¿En qué se diferencian? ¿Cuál es el origen de la energía que producen?

La fusión consiste en juntar núcleos de elementos ligeros para producir un núcleo de un elemento más pesado. La fisión es el proceso contrario: dividir el núcleo de un elemento pesado en dos o más núcleos de elementos más ligeros.

La energía que producen viene de que, en ambos casos, una parte de la masa se transforma en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein: $\Delta E = \Delta m c^2$.

16. ¿Qué características presentan los reactores reproductores? ¿Qué inconvenientes puede presentar su utilización?

Producen nuevo material fisionable, incluso en mayor cantidad que el consumido durante su funcionamiento.

El principal inconveniente, a efectos de que todos los países accedan a esta tecnología es que el plutonio-239 producido puede utilizarse para fabricar armas nucleares.

17. ¿Qué es la masa crítica? ¿Se puede producir una explosión nuclear, similar a una bomba atómica, en un reactor nuclear?

Se denomina masa crítica a la cantidad mínima de material fisionable necesaria para producir una reacción en cadena.

En un reactor nuclear no se puede producir una explosión similar a una bomba atómica, porque el material fisionable está poco enriquecido en uranio-235.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

18. Explica la función que desempeñan los siguientes componentes de un reactor nuclear: a) uranio enriquecido; b) blindaje; c) barras de control; d) moderador; e) intercambiador de calor; f) agua de refrigeración.

a) El uranio enriquecido es el material fisionable, el «combustible» del reactor. Tiene que estar enriquecido porque si no lo estuviera no podría autosostenerse la reacción.

b) El blindaje impide la salida al exterior del reactor de las distintas radiaciones.

c) Las barras de control absorben neutrones y regulan la reacción en cadena.

d) El moderador frena los neutrones rápidos producidos en la fisión.

e) El calor producido en el reactor se recoge en el circuito primario y se cede al circuito secundario en el intercambiador de calor.

f) El vapor de agua que sale de la turbina se licua en el condensador enfriándose mediante el agua de refrigeración. El vapor producido puede verse sobre las inmensas torres de refrigeración de las centrales nucleares.

19. El Sol emite aproximadamente $3,6 \times 10^{26}$ J de energía cada segundo. Averigua cuánto tiempo tardará la masa del Sol en reducirse a la mitad, suponiendo que la radiación permanezca constante.

Datos: masa del Sol = 2×10^{30} kg.

La energía producida por el Sol se debe a procesos de fusión nuclear. La masa equivalente a $3,6 \times 10^{26}$ J es:

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad ; \quad \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3,6 \times 10^{26} \text{ J}}{(3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2} \approx 4,0 \times 10^9 \text{ kg.}$$

Es decir, el Sol pierde 4×10^9 kg de masa cada segundo. Como su masa es de 2×10^{30} kg, para que se reduzca a la mitad ha de transcurrir el siguiente tiempo:

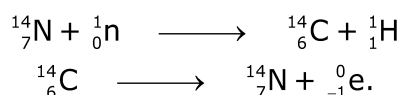
$$t = \frac{1,0 \times 10^{30} \text{ kg}}{4,0 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}} = 2,5 \times 10^{20} \text{ s} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ año}}{365,25 \text{ días}} \approx 7,9 \times 10^{12} \text{ años.}$$

Antes de que transcurra ese tiempo, el Sol se convertirá en una «gigante roja» y después en una «enana blanca».

20. Algunos átomos de $^{14}_7\text{N}$ atmosférico chocan con un neutrón y se transforman en $^{14}_6\text{C}$ que, por emisión beta, se convierten de nuevo en nitrógeno. Escribe las correspondientes reacciones nucleares.

Las reacciones que tienen lugar son:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales



21. Una muestra de madera encontrada en un yacimiento arqueológico presenta una actividad radiactiva que es cinco veces menor que la correspondiente a una muestra de madera nueva de igual masa. Sabiendo que el periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5730 años, ¿cuál es la antigüedad de la muestra encontrada?

Calculamos primero la constante radiactiva con el dato del periodo de semidesintegración:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5730 \text{ años}} \approx 1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}.$$

Aplicando la ecuación fundamental de la radiactividad en función de la actividad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad t = \frac{-\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln\left(\frac{0,2 A_0}{A_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln 0,2}{1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}} \approx 1,33 \times 10^4 \text{ años} = 13,3 \text{ milenios}.$$

22. ¿Cuál es el concepto de cuerda? ¿Qué características tienen?

Las cuerdas son pequeñísimos bucles unidimensionales que vibran.

El tamaño de una cuerda es unas 10^{20} veces menor que el núcleo de un átomo, son indivisibles y los componentes más fundamentales de la naturaleza.

Las características de cada partícula están determinadas por el modo de vibración de la cuerda.

23. ¿Cómo se relaciona la vibración de las cuerdas con la fuerza gravitatoria?

Cuanto mayor sea la amplitud y la frecuencia de vibración de la cuerda, mayor es la energía y, por tanto, mayor será la masa, de acuerdo con la relación relativista entre masa y energía. Pero la masa determina las propiedades gravitatorias. Por tanto, existe una relación directa entre el modelo de vibración de la cuerda y la fuerza gravitatoria.

La teoría de las cuerdas une la Relatividad general de Einstein con la Mecánica cuántica y explica la gravedad. Cuando la cuerda se mueve en el espacio-tiempo, ambos se curvan, se deforman, de acuerdo con la relatividad general.

24. ¿Qué función realizan las partículas portadoras de fuerzas? ¿Cuáles son esas partículas?

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Transmiten las interacciones entre las partículas de materia. La fuerza electromagnética se transmite mediante fotones, la fuerza nuclear débil mediante los bosones masivos W y Z, la interacción nuclear fuerte mediante gluones y la fuerza gravitatoria se supone que se transmite mediante gravitones.

25. Trabajando en equipo, con la bibliografía adecuada, incluido Internet, presentad una cronología del Universo en función de la temperatura y de las partículas que lo formaban en cada periodo, discutiendo la asimetría entre materia y antimateria.

Actividad abierta para realizar en equipo, comparando los resultados obtenidos y poniéndolos en común.

Ciencia, tecnología y sociedad

Cuestiones

1. ¿Crees que hay algún ODS relacionado con lo que hemos visto aquí? Entonces, ¿se deberían seguir utilizando recursos en este campo de investigación?

No hay ningún ODS relacionado directamente con lo que se ha estudiado en la Unidad, aunque podría considerarse que este tipo de investigaciones se pueden encuadrar dentro del ODS 9, Industria, innovación e infraestructuras.

Sin embargo, los avances que, casi con completa seguridad, van a producir las investigaciones que tienen que ver con este campo de la Física van a desarrollar unas tecnologías y recursos energéticos que pueden modificar por completo la sociedad en la que vivimos.

El uso de estos descubrimientos en mejorar la vida de la humanidad puede ser una revolución mucho más notoria que la revolución industrial, la tecnológica o la digital, por poner ejemplos. La obtención de energía en cantidades ingentes, a un coste prácticamente nulo y sin problemas de recursos, acabará con los problemas energéticos de la humanidad, si se gestiona adecuadamente.

2. Basándote en el principio de indeterminación, calcula qué indeterminación de energía es compatible con el tiempo de existencia de W^- .

Buscando en Internet, podemos comprobar que la vida media de un bosón W^- es de, aproximadamente, 3×10^{-25} s.

Como la incertidumbre en el conocimiento de la energía está relacionada con la incertidumbre en el tiempo de existencia, aplicamos el principio de indeterminación:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$
$$\Delta E \geq \frac{h}{4\pi \Delta t} \geq \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}}{4\pi \times 3,0 \times 10^{-25} \text{ s}} \approx 1,8 \times 10^{-10} \text{ J}.$$

En este caso no calculamos la energía en kJ mol^{-1} debido a que la existencia de los bosones W^- se debe considerar como un hecho individual debido a su inestabilidad. No es previsible poder tener al mismo tiempo y en el mismo lugar del espacio varios bosones W^- , y mucho menos una cantidad de bosones cercana al número de Avogadro.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

3. ¿Estamos empezando a elaborar teorías casi increíbles o debemos adaptarnos y dar por válidas las conclusiones a las que llegan? Debatid en clase sobre esto.

Aunque la evolución de las nuevas teorías de la Física hace que pensemos que tienen una cierta consideración de ser muy extrañas e incluso rayar lo increíble, los resultados de los experimentos que se van realizando (alguno de los cuales eran impensables cuando se elaboraron las teorías por lo que no han sido condicionados por estas) están confirmando que dichas teorías pueden ser ciertas por lo que, mientras no encontremos otras teorías que justifiquen los resultados experimentales, debemos pensar que son válidas.

4. Busca en Internet los datos de todas las partículas implicadas y sus valores de masa-energía. Calcula la variación de masa-energía del proceso.

La masa (expresada en unidades MeV/c^2) de las partículas implicadas en el proceso son: cuark u (1,7–3,1), cuark d (4–8), un bosón W^- (80 400), un electrón (0,51) y un antineutrino electrónico ($< 2,5 \text{ eV}/c^2$).

Hay dos procesos diferenciados.

El primero es la conversión de un cuark down en un cuark up y un bosón W^- , que claramente conlleva una ganancia de masa de más de $80 \text{ GeV}/c^2$ aunque inmediatamente se produce la escisión del bosón en un electrón y un antineutrino que provocan una pérdida de masa similar pero mayor que la ganancia anterior.

Actividades finales

Núcleo atómico

1. Indica el número de protones y neutrones que componen los siguientes

núcleos: ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, ${}^{107}_{47}\text{Ag}$, ${}^{206}_{82}\text{Pb}$.

Basándonos en el número atómico (esquina inferior izquierda) y en el número másico (esquina superior derecha) podemos contestar la pregunta:

Carbono, C: 6 protones (Z) y 6 neutrones ($A - Z$).

Hierro, Fe: 26 protones (Z) y 30 neutrones ($A - Z$).

Plata, Ag: 47 protones (Z) y 60 neutrones ($A - Z$).

Plomo, Pb: 82 protones (Z) y 124 neutrones ($A - Z$).

2. ¿Qué te sugiere la enorme diferencia existente entre la densidad nuclear y la densidad de la materia ordinaria?

La diferencia de densidad indica que la materia ordinaria está prácticamente «vacía», pues la densidad de las partículas es mucho mayor que la de la materia visible.

3. La masa del núcleo de litio-7 es 7,0182 u. Calcula el volumen aproximado del núcleo y su densidad.

El volumen lo obtenemos con la fórmula del volumen del núcleo:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \times \pi \times (1,2 \times 10^{-15} \text{ m} \times A^{\frac{1}{3}})^3 = \frac{4}{3} \times \pi \times 1,728 \times 10^{-45} \text{ m}^3 \times 7 \approx 5,07 \times 10^{-44} \text{ m}^3.$$

Dado que conocemos el volumen, para calcular la densidad debemos conocer la masa:

$$m(\text{Li-7}) = 7,0182 \text{ u} \times 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg u}^{-1} \approx 1,165 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

$$d = \frac{m}{V} = \frac{1,165 \times 10^{-26} \text{ kg}}{5,07 \times 10^{-44} \text{ m}^3} \approx 2,30 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}.$$

4. Calcula el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para el núcleo de helio-3.

Datos: masa del protón = 1,007 29 u; masa del neutrón = 1,008 67 u; masa del helio-3 = 3,016 03 u.

El núcleo está formado por 2 protones y 1 neutrón. La masa de estas partículas es la siguiente:

$$\text{Masa de 2 protones: } 2 \times 1,007 29 \text{ u} = 2,014 58 \text{ u}$$

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Masa de 1 neutrón: $1 \times 1,008\,67\,u = 1,008\,67\,u$

Masa total: $3,023\,25\,u$

Masa del núcleo de helio-3: $3,016\,03\,u$

Defecto de masa: $0,007\,22\,u$

Como $1\,u$ equivale a $931,5\,\text{MeV}$, la energía de enlace es:

$$E = 0,007\,22\,u \times 931,5\,\text{MeV}/u = 6,72\,\text{MeV}.$$

El núcleo del helio-3 contiene 3 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{6,72\,\text{MeV}}{3\,\text{nucleones}} = 2,24\,\frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}}.$$

5. Calcula el defecto de masa, la energía total de enlace y la energía de enlace por nucleón del isótopo $^{15}_7\text{N}$, de masa atómica $15,000\,108\,9\,u$.

Datos: $m_p = 1,007\,276\,u$; $m_n = 1,008\,665\,u$; $1\,u = 1,66 \times 10^{-27}\,\text{kg}$; $c = 3 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$.

El núcleo está formado por 7 protones y 8 neutrones. La masa de estas partículas es la siguiente:

Masa de 7 protones: $7 \times 1,007\,276\,u = 7,050\,932\,u$

Masa de 8 neutrones: $8 \times 1,008\,665\,u = 8,069\,320\,u$

Masa total: $15,120\,252\,u$

Masa del núcleo de nitrógeno-15: $15,000\,108\,9\,u$

Defecto de masa: $0,120\,143\,u \times 1,66 \times 10^{-27}\,\text{kg u}^{-1} \approx 1,99 \times 10^{-28}\,\text{kg}$.

Como $1\,u$ equivale a $931,5\,\text{MeV}$, la energía de enlace es:

$$E = 0,120\,143\,u \times 931,5\,\text{MeV}/u = 111,9\,\text{MeV}.$$

El núcleo del nitrógeno-15 contiene 15 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{111,9\,\text{MeV}}{15\,\text{nucleones}} = 7,461\,\frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}}.$$

6. Determina la energía de enlace por nucleón del $^{56}_{26}\text{Fe}$ y del $^{39}_{19}\text{K}$ si las masas de sus núcleos son $55,934\,939\,u$ y $38,964\,001\,u$, respectivamente. Indica cuál de ellos es más estable.

Datos: $m_p = 1,007\,276\,u$; $m_n = 1,008\,665\,u$.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

El núcleo de hierro-56 está formado por 26 protones y 30 neutrones. Calculamos la energía de enlace por nucleón:

Masa de 26 protones: $26 \times 1,007\,276\text{ u} = 26,189\,176\text{ u}$

Masa de 30 neutrones: $30 \times 1,008\,665\text{ u} = 30,259\,95\text{ u}$

Masa total: $56,449\,126\text{ u}$

Masa del núcleo de hierro-56: $55,934\,939\text{ u}$

Defecto de masa: $0,514\,187\text{ u}$

Como 1 u equivale a $931,5\text{ MeV}$, la energía de enlace es:

$$E = 0,514\,187\text{ u} \times 931,5\text{ MeV/u} \approx 479,0\text{ MeV}.$$

El núcleo del hierro-56 contiene 56 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{479,0\text{ MeV}}{56\text{ nucleones}} \approx 8,553\frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}}.$$

Hacemos los mismos cálculos para el núcleo de potasio-39, formado por 19 protones y 20 neutrones:

Masa de 19 protones: $19 \times 1,007\,276\text{ u} = 19,138\,244\text{ u}$

Masa de 20 neutrones: $20 \times 1,008\,665\text{ u} = 20,173\,3\text{ u}$

Masa total: $39,311\,544\text{ u}$

Masa del núcleo de potasio-39: $38,964\,001\text{ u}$

Defecto de masa: $0,347\,543\text{ u}$

Como 1 u equivale a $931,5\text{ MeV}$, la energía de enlace es:

$$E = 0,347\,543\text{ u} \times 931,5\text{ MeV/u} \approx 323,7\text{ MeV}.$$

El núcleo del potasio-39 contiene 39 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{323,7\text{ MeV}}{39\text{ nucleones}} \approx 8,301\frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}}.$$

Por tanto, es más estable el hierro-56.

7. Razona por qué el tritio, ${}^3_1\text{H}$, es más estable que el ${}^3_2\text{He}$.

Datos: $m_{\text{He-3}} = 3,016\,029\text{ u}$; $m_{\text{tritio}} = 3,016\,049\text{ u}$; $m_p = 1,672\,6 \times 10^{-27}\text{ kg}$; $m_n = 1,674\,9 \times 10^{-27}\text{ kg}$.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Será más estable el que tenga mayor defecto de masa ya que ambos tienen tres nucleones.

Las masas del protón y del neutrón en unidades de masa atómica son:

$$m_p = 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg} \times \frac{1 \text{ u}}{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}} \approx 1,0073 \text{ u}$$

$$m_n = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg} \times \frac{1 \text{ u}}{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}} \approx 1,0087 \text{ u}.$$

El tritio contiene un protón y dos neutrones. Calculamos su defecto de masa:

Masa de 1 protón y dos neutrones: $1,0073 \text{ u} + 2 \times 1,0087 \text{ u} = 3,0247 \text{ u}$

Masa del núcleo de tritio: $3,016049 \text{ u}$

Defecto de masa: $0,0087 \text{ u}$

El helio-3 contiene dos protones y un neutrón. Calculamos su defecto de masa:

Masa de 1 neutrón y dos protones: $1,0087 \text{ u} + 2 \times 1,0073 \text{ u} = 3,0233 \text{ u}$

Masa del núcleo de helio-3: $3,016039 \text{ u}$

Defecto de masa: $0,0073 \text{ u}$

Al tener mayor defecto de masa es más estable el tritio, ^3H .

Radiactividad

8. Las tres radiaciones α , β y γ , ¿pueden ser emitidas por un mismo núcleo?

No. Un determinado núcleo se desintegra emitiendo o partículas alfa o beta, pero nunca ambas al mismo tiempo. El que emita una u otra depende de las proporciones entre protones y neutrones en el núcleo.

La emisión y acompaña generalmente a las otras emisiones porque el núcleo resultante de una emisión radiactiva tiene un exceso de energía que tiene que eliminar.

9. ¿Qué cambios experimenta un núcleo atómico cuando emite una partícula alfa? ¿Y si emite radiación gamma?

Si emite una partícula alfa, su número atómico disminuye en dos unidades y su número másico en cuatro.

Si emite radiación gamma, el núcleo pasa de un estado excitado a un estado de menor energía, pero su número atómico y su número másico no varían.

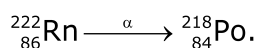
12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

10. El $^{222}_{86}\text{Rn}$ se desintegra emitiendo una partícula alfa. ¿Qué número atómico y qué número másico tiene el núcleo resultante?

De acuerdo con las leyes de Soddy y Fajans:

$$Z = 86 - 2 = 84 \quad ; \quad A = 222 - 4 = 218.$$

El núcleo obtenido es el de polonio-218, $^{218}_{84}\text{Po}$.

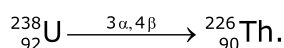


11. Determina el número atómico y el número másico del núcleo que resultará del uranio-238 después de emitir tres partículas alfa y cuatro beta.

De acuerdo con las leyes de Soddy y Fajans:

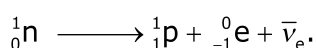
$$Z = 92 - (3 \times 2) + (4 \times 1) = 90 \quad ; \quad A = 238 - (3 \times 4) = 226.$$

El núcleo obtenido es el de torio-226, $^{226}_{90}\text{Th}$.



12. ¿Cómo se puede explicar que un núcleo emita partículas beta si en él solo existen neutrones y protones?

Cuando la relación neutrones/protones en un núcleo es demasiado grande, el núcleo es inestable y se estabiliza convirtiendo un neutrón en un protón, según la reacción:



Lo que ocurre realmente es que un cuark down se transforma en un cuark up.

13. Indica en curios, unidad no SI, las siguientes actividades radiactivas expresadas en desintegraciones por segundo: 200, $2,0 \times 10^6$, $5,0 \times 10^{12}$.

Simplemente debemos aplicar el factor de conversión:

$$200 \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \approx 5,4 \times 10^{-9} \text{ Ci}$$

$$2,0 \times 10^6 \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \approx 5,4 \times 10^{-5} \text{ Ci}$$

$$5,0 \times 10^{12} \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \approx 1,4 \times 10^2 \text{ Ci}.$$

14. Una sustancia radiactiva se desintegra según la ecuación $N = N_0 e^{-0,40 t}$ en unidades SI. Calcula su periodo de semidesintegración.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

De acuerdo con la ecuación fundamental de la radiactividad,

$$N = N_0 e^{-0,4 \times t} \quad ; \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-0,4 \times T_{1/2}} \quad ; \quad \frac{N_0}{2} = \frac{1}{2} = e^{-0,4 \times T_{1/2}}$$

Aplicando logaritmos neperianos se obtiene:

$$T_{1/2} = \frac{-\ln 2}{-0,4 \text{ s}^{-1}} \approx 1,7 \text{ s.}$$

15. La semivida del polonio-210 es 138 días. Si disponemos inicialmente de 1,00 mg de polonio, ¿al cabo de cuánto tiempo quedarán 0,250 mg?

Habrán transcurrido el tiempo de dos semividas, es decir, dos periodos de semidesintegración, por lo que habrán transcurrido: $t = 2 \times 138 \text{ días} = 276 \text{ días}$.

También se podría haber contestado aplicando la ecuación fundamental de la radiactividad y la relación entre periodo de semidesintegración y constante radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \frac{m}{m_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad ; \quad \ln \frac{m}{m_0} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t \quad ; \quad t = T_{1/2} \frac{\ln \frac{m}{m_0}}{-\ln 2} = 138 \text{ días} \times \frac{\ln \frac{0,25 \text{ mg}}{1,00 \text{ mg}}}{-\ln 2} = 276 \text{ días.}$$

16. Se tiene una muestra de 20 g de polonio-210, cuyo periodo de semidesintegración es de 138 días. ¿Qué cantidad quedará cuando hayan transcurrido 30 días?

Calculamos previamente la constante de desintegración:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{138 \text{ días}} \approx 5,02 \times 10^{-3} \text{ día}^{-1}.$$

La masa que quedará se calcula con la ecuación de la desintegración radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} = 20 \text{ g} \times e^{-5,02 \times 10^{-3} \text{ día}^{-1} \times 30 \text{ día}} \approx 17,2 \text{ g.}$$

17. El $^{212}_{83}\text{Bi}$ tiene un periodo de semidesintegración de 60,5 minutos. ¿Cuántos átomos se desintegran cada segundo en 50 g de bismuto-212?

Los átomos que se desintegran por segundo es la actividad de la muestra. La calculamos aplicando la relación entre constante radiactiva y número total de átomos de la muestra:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{\ln 2}{60,5 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} \times 50 \text{ g Bi} \times \frac{1 \text{ mol}}{212 \text{ g Bi}} \times \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ át}}{1 \text{ mol}} \approx 2,7 \times 10^{19} \text{ Bq.}$$

18. El radón-222 se desintegra en un periodo de 3,9 días. Si inicialmente se dispone de 20 mg, ¿cuánto quedará al cabo de 7,6 días?

Considerando que el dato dado por el problema de periodo se refiere a periodo de semidesintegración y llamándolo $T_{1/2}$, la constante de desintegración es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{3,9 \text{ día}} \approx 0,178 \text{ día}^{-1}.$$

La masa al cabo de 7,6 días la calculamos con la ecuación de la desintegración radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} = 20 \text{ mg} \times e^{-0,178 \text{ día}^{-1} \times 7,6 \text{ día}} \approx 5,2 \text{ mg.}$$

19. Tenemos $6,02 \times 10^{23}$ átomos del isótopo radiactivo cromo-51, con un periodo de semidesintegración de 27 días. ¿Cuántos átomos quedarán al cabo de seis meses?

Llamando $T_{1/2}$ al periodo de semidesintegración, la constante de desintegración es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{27 \text{ día}} \approx 2,57 \times 10^{-2} \text{ día}^{-1}.$$

El número de átomos que quedan sin desintegrar después de seis meses (180 días) es:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 6,02 \times 10^{23} \text{ átomos} \times e^{-2,57 \times 10^{-2} \text{ día}^{-1} \times 180 \text{ día}} \approx 5,9 \times 10^{21} \text{ átomos.}$$

20. La constante de desintegración de una sustancia radiactiva es $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Si tenemos 200 g de ella, ¿cuánto tiempo debe transcurrir para que se reduzca a 50 g? ¿Cuál es su periodo de semidesintegración y su vida media?

Aplicamos la ecuación fundamental de la radiactividad:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \frac{m}{m_0} = e^{-\lambda t} \quad ; \quad \ln \frac{m}{m_0} = -\lambda t \quad ; \quad t = \frac{\ln \frac{m}{m_0}}{-\lambda} = \frac{\ln \frac{50 \text{ g}}{200 \text{ g}}}{-2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}} \approx 6,9 \times 10^5 \text{ s.}$$

Obtenemos el periodo de semidesintegración y la vida media aplicando las relaciones que tiene con la constante radiactiva:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}} \approx 3,5 \times 10^5 \text{ s} \quad ; \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 5 \times 10^5 \text{ s}.$$

21. La semivida del radio-226 es de 1600 años. Calcula la actividad radiactiva de una muestra de 2 g de radio-226.

La actividad de la muestra es el número de átomos que se desintegran por segundo. Calculamos la actividad aplicando la relación entre la constante radiactiva y el número total de átomos de la muestra:

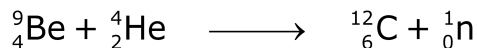
$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} N = \frac{N \ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$$

$$A = \frac{2 \text{ g Ra} \times \frac{1 \text{ mol}}{226 \text{ g Ra}} \times \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ át}}{1 \text{ mol}} \times \ln 2}{1600 \text{ año} \times \frac{365,25 \text{ día}}{1 \text{ año}} \times \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}}} \approx 7,3 \times 10^{10} \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \approx 2 \text{ Ci}.$$

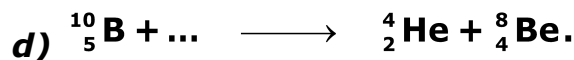
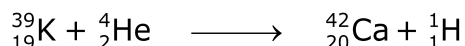
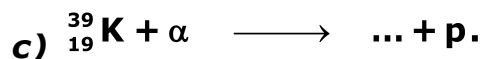
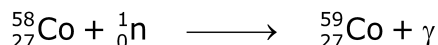
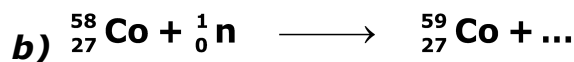
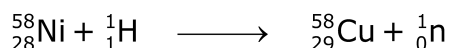
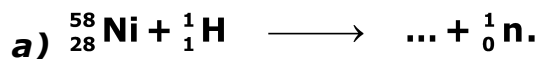
12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Reacciones nucleares. Fisión y fusión nuclear

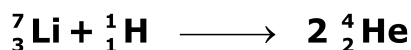
22. Al bombardear berilio-9 con partículas alfa se obtiene carbono-12 y otra partícula. Escribe la reacción nuclear correspondiente.



23. Escribe y completa las siguientes reacciones nucleares:



24. Calcula la energía que se libera en la reacción nuclear:



Datos: $m_{\text{Li-7}} = 7,0182 \text{ u}$; $m_{\text{p}} = 1,0073 \text{ u}$; $m_{\text{He-4}} = 4,0038 \text{ u}.$

La energía liberada en el proceso la obtenemos aplicando la relación masa-energía de Einstein al defecto de masa que tiene lugar:

Masa de los reactivos iniciales: $7,0182 \text{ u} + 1,0073 \text{ u} = 8,0255 \text{ u}.$

Masa de los productos finales: $2 \times 4,0038 \text{ u} = 8,0076 \text{ u}.$

Defecto de masa: $8,0255 \text{ u} - 8,0076 \text{ u} = 0,0179 \text{ u}.$

Energía liberada: $0,0179 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} = 16,7 \text{ MeV}.$

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

25. Durante el proceso de fisión de un núcleo de $^{235}_{92}\text{U}$ por un neutrón se liberan 198 MeV. Calcula la energía liberada al fisionarse 1 kg de uranio.

Aplicamos los factores de conversión adecuados dados en el planteamiento del problema:

$$E = 1 \text{ kg U} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ mol}}{235 \text{ g U}} \times \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ núcleos}}{1 \text{ mol}} \times \frac{198 \text{ MeV}}{1 \text{ núcleo}} \times \frac{1,60 \times 10^{-13} \text{ J}}{1 \text{ MeV}} \approx 8,11 \times 10^{13} \text{ J}.$$

26. ¿Qué cantidad de energía se libera en la reacción de fusión $2\text{}^2_1\text{H} \longrightarrow \text{}^4_2\text{He}$?

Datos: $m_{\text{deuterio}} = 2,0141 \text{ u}$; $m_{\text{He-4}} = 4,0026 \text{ u}$.

El defecto de masa de la reacción es:

$$\Delta m = 2 \times 2,0141 \text{ u} - 4,0026 \text{ u} = 0,0256 \text{ u}$$

Energía liberada:

$$E = 0,0256 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} \approx 23,8 \text{ MeV}$$

27. ¿Qué misión cumple el moderador en un reactor nuclear?

Frena los neutrones rápidos procedentes de la fisión nuclear.

28. ¿Qué es un reactor reproductor? ¿Qué ventajas e inconvenientes presenta?

Es un reactor diseñado para producir más plutonio-239 que el uranio-235 que consume. Permiten producir material fisionable, pero esta producción es difícil de controlar y puede utilizarse en la fabricación de armas nucleares. El plutonio-239 producido puede utilizarse para fabricar armas nucleares.

29. ¿Qué ventajas presenta la obtención de energía por fusión nuclear frente a la obtenida mediante procesos de fisión nuclear?

La materia prima (deuterio y tritio) es abundante y barata.

Los reactores de fusión presentarán menos problemas con los residuos radiactivos que los de fisión y serán más seguros.

30. En un reactor nuclear se detecta una pérdida de masa de 54,0 g. Calcula cuántos kWh de energía se habrán producido.

La energía producida, aplicando la ecuación de Einstein, es la siguiente:

$$E = \Delta m c^2 = 54 \times 10^{-3} \text{ kg} \times (3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 \approx 4,9 \times 10^{15} \text{ J} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ J}} \approx 1,35 \times 10^9 \text{ kWh}.$$

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Partículas y fuerzas fundamentales

31. La carga del electrón se ha considerado durante mucho tiempo como la unidad natural de carga eléctrica. ¿Te parece lógico mantener este criterio?

Se pensaba que la carga del electrón era la más pequeña que podía existir. Tras el descubrimiento de los cuarks, no parece lógico mantener este criterio.

32. Compara cualitativamente las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza en función de las energías involucradas.

La interacción nuclear fuerte es la más intensa, pero de muy corto alcance, no se aprecia fuera del núcleo. Es siempre atractiva, afecta a los cuarks por su color y mantiene unidos los protones y los neutrones que componen el núcleo de los átomos.

La interacción electromagnética es la segunda en intensidad. Actúa sobre partículas cargadas eléctricamente y puede ser atractiva o repulsiva. Es la responsable de que los átomos, las moléculas y la materia en general sean estables.

La interacción nuclear débil es la responsable de la desintegración beta de los núcleos atómicos y las transformaciones entre leptones. Tiene un radio de acción muy corto, solo en el interior del núcleo, y es más débil que la interacción electromagnética.

La interacción gravitatoria es la más débil de todas, es atractiva entre todas las masas y es la responsable de la estructura general del Universo.

33. ¿Qué relación existe entre el bosón de Higgs y la materia?

La masa surge de la interacción de las partículas elementales con el campo de Higgs, cuya partícula asociada es el bosón de Higgs. Cuanto mayor es la interacción de una partícula elemental con el campo de Higgs, mayor es la masa de la partícula.

34. Responde a las siguientes cuestiones:

a) ¿Qué función realizan las partículas portadoras de fuerzas? ¿Cuáles son estas partículas?

Las partículas portadoras de fuerza transmiten las interacciones entre las partículas de materia. Son: fotones, partículas W y Z, gluones y gravitones.

b) ¿Sobre qué partículas materiales actúan los gluones?

Los gluones transmiten la interacción nuclear fuerte que mantiene unidos a los protones y neutrones en el interior del núcleo atómico.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

c) Según la teoría de las supercuerdas, ¿qué relación existe entre el modelo de vibración de la cuerda y la fuerza gravitatoria?

Cuanto mayor sea la amplitud y la frecuencia de vibración de la cuerda, mayor es la energía y, por tanto, mayor será la masa, de acuerdo con la relación relativista entre masa y energía, y es la masa la que determina las propiedades gravitatorias.

d) ¿Qué dice el principio antrópico?

El Universo debe resultar adecuado para que exista vida inteligente.

Aplicaciones de los isótopos radiactivos

35. Comenta la siguiente frase: «Debido a la desintegración del carbono-14, cuando un ser vivo muere se pone en marcha un reloj».

Cuando un ser vivo muere su concentración de carbono-14 va disminuyendo con el tiempo.

Este hecho permite determinar el tiempo transcurrido desde su muerte.

36. Se ha medido la actividad de una muestra de madera prehistórica, observándose que 90 átomos/hora se desintegran cuando en una muestra actual de la misma naturaleza la tasa de desintegración es de 700 átomos/hora. Calcula la antigüedad de la madera. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5730 años.

Calculamos primero la constante radiactiva con el dato del periodo de semidesintegración:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5730 \text{ años}} \approx 1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}.$$

Aplicando la ecuación fundamental de la radiactividad en función de la actividad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad t = \frac{-\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln\left(\frac{90 \text{ átomos h}^{-1}}{700 \text{ átomos h}^{-1}}\right)}{1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}} \approx 1,7 \times 10^4 \text{ años} = 17 \text{ milenios}.$$

37. Los restos de un animal encontrados en un yacimiento arqueológico tienen una actividad radiactiva de 2,6 desintegraciones por minuto y gramo de carbono. Calcula el tiempo transcurrido, aproximadamente, desde la muerte del animal. Datos: la actividad del carbono-14 en los seres vivos es de 15 desintegraciones por minuto y por gramo de carbono. $T_{1/2} = 5730$ años.

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

Calculamos primero la constante radiactiva con el dato del periodo de semidesintegración:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5730 \text{ años}} \approx 1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}.$$

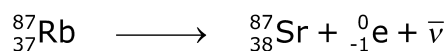
Aplicando la ecuación fundamental de la radiactividad en función de la actividad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad t = \frac{-\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)}{\lambda} = \frac{-\ln\left(\frac{2,6 \text{ desintegraciones min}^{-1}}{15 \text{ desintegraciones min}^{-1}}\right)}{1,21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}} \approx 14500 \text{ años}.$$

Aplica lo aprendido

38. Debido a la desintegración beta del rubidio-87, los minerales de rubidio contienen estroncio. Se analizó un mineral y se comprobó que contenía el 0,85 % de rubidio y el 0,0089 % de estroncio. Suponiendo que todo el estroncio procede de la desintegración del rubidio y que el periodo de semidesintegración de este es $5,7 \times 10^{10}$ años, calcula la edad del mineral. (Solo el 27,8 % del rubidio natural es rubidio-87.)

La desintegración que tiene lugar es:



Si consideramos 100 g de mineral, en él habrá 0,85 g de rubidio, de los que sólo el 27,8 % es rubidio-87.

Masa de rubidio-87, $0,85 \text{ g} \times 0,278 = 0,2363 \text{ g}$.

La masa de estroncio-87 que se ha formado, 0,0089 g, debe provenir de la desintegración de 0,0089 g de rubidio-87, por lo que la muestra debía contener inicialmente $0,2363 \text{ g} + 0,0089 \text{ g} = 0,2452 \text{ g}$ de rubidio-87. Aplicando estos valores en la ley de la desintegración radiactiva:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad \frac{m}{m_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad ; \quad \ln \frac{m}{m_0} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t$$
$$t = T_{1/2} \frac{\ln \frac{m}{m_0}}{-\ln 2} = 5,7 \times 10^{10} \text{ años} \times \frac{\ln \frac{0,2363 \text{ g}}{0,2452 \text{ g}}}{-\ln 2} \approx 3,04 \times 10^9 \text{ años}.$$

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

39. La energía desprendida en la fisión de un núcleo de uranio-235 es aproximadamente de 200 MeV. ¿Cuántos kilogramos de carbón habría que quemar para obtener la misma cantidad de energía que la desprendida por fisión de 1 kg de uranio-235? El calor de combustión del carbón es de unas 7000 kcal/kg.

Aplicamos factores de conversión para conocer la energía desprendida en la fisión:

$$E = 1 \text{ kg U} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ mol}}{235 \text{ g U}} \times \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ núcleos}}{1 \text{ mol}} \times \frac{200 \text{ MeV}}{1 \text{ núcleo}} \times \frac{1,60 \times 10^{-13} \text{ J}}{1 \text{ MeV}} \approx 8,2 \times 10^{13} \text{ J}.$$

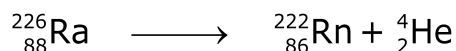
Para calcular la cantidad de carbón al que se debe aplicar la combustión para obtener esa cantidad de energía volvemos a aplicar los factores de conversión necesarios:

$$m = 8,2 \times 10^{13} \text{ J} \times \frac{1 \text{ kcal}}{4180 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ kg de carbón}}{7000 \text{ kcal}} \approx 2,80 \times 10^6 \text{ kg de carbón}.$$

40. Cuando un núcleo de $^{226}_{88}\text{Ra}$ emite una partícula alfa se convierte en un núcleo de radón (Rn).

a) Escribe la ecuación del proceso nuclear correspondiente.

La desintegración que tiene lugar es:



b) Suponiendo que toda la energía generada en el proceso se transfiere a la partícula alfa, calcula su energía cinética y su velocidad.

Datos: $m_{\text{Ra}} = 226,025\,406 \text{ u}$; $m_{\text{Rn}} = 222,017\,574 \text{ u}$; $m_{\alpha} = 4,002\,603 \text{ u}$.

La energía liberada en el proceso la obtenemos aplicando la relación masa-energía de Einstein al defecto de masa que tiene lugar:

Masa inicial: $226,025\,406 \text{ u}$.

Masa final: $222,017\,574 \text{ u} + 4,002\,603 \text{ u} = 226,020\,177 \text{ u}$.

Defecto de masa: $226,025\,406 \text{ u} - 226,020\,177 \text{ u} = 0,005\,229 \text{ u}$.

$$E = \Delta m c^2 = 0,005229 \text{ u} \times \frac{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \times (2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 \approx 7,804 \times 10^{-13} \text{ J}.$$

Si toda esta energía se transmitiese a la partícula α la velocidad de esta, considerada como no relativista, sería:

12 Física nuclear. Partículas y fuerzas fundamentales

$$E = \frac{1}{2} m_{\alpha} v^2 \quad ; \quad v = \sqrt{\frac{2E}{m_{\alpha}}} = \sqrt{\frac{2 \times 7,804 \times 10^{-13} \text{ J}}{4,002603 \text{ u} \times \frac{1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}}}} \approx 1,53 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}.$$

41. Una central nuclear, de 800 MW de potencia, utiliza como combustible uranio enriquecido hasta el 3 % del isótopo fisionable. ¿Cuántas fisiones por segundo deben producirse? ¿Cuántas toneladas de combustible consumirá en un año? Se supone que en la fisión de un núcleo de uranio-235 se liberan 200 MeV.

Podemos calcular el número de fisiones que se producen por segundo aplicando la relación entre potencia y energía y utilizando los factores de conversión necesarios:

$$\frac{800 \text{ MW} \times \frac{10^6 \text{ J s}^{-1}}{1 \text{ MW}}}{200 \frac{\text{MeV}}{\text{fisión}} \times \frac{10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1}} = 2,5 \times 10^{19} \text{ fisión s}^{-1}.$$

Para calcular la masa necesaria en un año volvemos a aplicar los factores de conversión necesarios, teniendo en cuenta que solo un 3 % de la cantidad total de uranio es fisionable:

$$2,5 \times 10^{19} \text{ fisión s}^{-1} \times \frac{100 \text{ núcleos U}}{3 \text{ fisiones}} \times \frac{235 \text{ u}}{1 \text{ núcleo U}} \times \frac{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \approx 3,27 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$$

$$3,27 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{365,25 \text{ día}}{1 \text{ año}} \approx 1,03 \times 10^4 \text{ kg año}^{-1} = 10,3 \text{ t año}^{-1}.$$

42. Un electrón y un positrón se aniquilan mutuamente y se produce un rayo gamma. ¿Cuál es la frecuencia y la longitud de onda de la radiación obtenida?

Datos: $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Dado que el enunciado da como dato que se aniquilan, toda la materia que poseen ambas partículas se debe transformar en energía. Si esa energía se convierte en una radiación electromagnética su frecuencia será:

$$\left. \begin{aligned} E &= \Delta m c^2 \\ E &= h f \end{aligned} \right\} \quad f = \frac{\Delta m c^2}{h} = \frac{2 m_e c^2}{h} = \frac{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2}{6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}} \approx 2,5 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

$$c = \frac{\lambda}{t} = \lambda f \quad ; \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{\frac{2 m_e c^2}{h}} = \frac{h}{2 m_e c} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}}{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \approx 1,21 \times 10^{-12} \text{ m}.$$