

TEMA 9: NÚCLEOS E PARTÍCULAS.

8¹¹

9.1.- O NÚCLEO ATÓMICO. CONSTITUCIÓN. DEFECTO DE MASA.

- $1 \text{ u (u.m.a.)} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- Radio nuclear: $R = R_0 \cdot A^{1/3}$, $R_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, A nº másico
- Defecto de masa:
 - No núcleo (entre nucleóns): forzas nucleares de interacción forte
 - A masa total M dun átomo (masa atómica) sempre é inferior á suma das masas dos nucleóns e electróns que o constitúen. Esta diferenza chamábase defecto de masa:

$$\Delta m = Z (m_p + m_e) + (A - Z) m_n - M_{\text{átomo}}$$

- Energía de enlace: enerxía liberada na formación dun núcleo;

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad (\text{fórmula Einstein equivalencia masa-enerxía})$$

- Energía de enlace por nucleón: $\bar{E} = \frac{E}{A}$, representa a enerxía necesaria para extraer un nucleón do núcleo; indica o grao de estabilidade

9.2.- DESINTEGRACIONES α , β E γ . REACCIONES NUCLEARES.

9.2.1.- Desintegración radiactiva ou radiactividade natural:

- É o fenómeno consistente na emisión espontánea de partículas ou fotóns que fan lupar varias substancias, como U, Po, Ra.

- Tres tipos de emisión:

1) partículas α : núcleos de helio-4 ${}^4_2\text{He}^{+2}$

2) partículas β : electróns; Como no núcleo non hai electróns: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

3) radiación γ : fotóns

- Leis do desprazamento radiactivo ou leis de Soddy:

a) emisión part. α : ${}_Z^AX \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{Z-2}^{A-4}Y$ ($\neq$ elemento)

b) " part. β : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_Z^AX$ ($\neq$ elemento) $n \rightarrow p$ $\begin{cases} A = A \\ Z \rightarrow Z+1 \end{cases}$

c) " raio γ : $[{}_Z^AX]^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$ (libera enerxía) ($=$ elemento)

9.2.2. Reacciones nucleares:

- Proceso no que um núcleo cambia a súa composición.
- Fisión nuclear: división dun núcleo pesado en dous núcleos de masa intermedia; resulta do bombardeo cunha partícula pequena (neutrón).
Libérase unha grande cantidade de enerxía: $E = m \cdot c^2$. Ex: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n}$
- Fusión nuclear: unión de dous núcleos lixeiros; libérase enerxía, pero os núcleos deben chegar a gran velocidade (enerxía). Ex: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$

9.3. ESTABILIDADE NUCLEAR. VIDA MEDIA E DECAIMENTO EXPONENCIAL.

- A estabilidade dun átomo depende da relación protón-neutrón.
- A emisión espontánea de partículas (radioactividade) é un proceso aleatorio, que afecta a un elevado número de núcleos e que se rexé estatisticamente.
- Se N é o número de átomos nun intre t , a rapidez de desintegración:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \text{ onde } A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \text{ representa o n}^\circ \text{ de núcleos que se desintegran por segundo; } \lambda \text{ é a constante de desintegración ou cte. radiactiva}$$

A , actividade
($A > 0$, sempre)

Integrando, se N_0 é o n.º de átomos sen desintegrar inicialmente:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- Periodo de semidesintegración; $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$, é o tempo necesario para que unha substancia radiactiva se reduza á metade ($N = \frac{N_0}{2}$, cando $t = T$)
- Vida media: $\tau = \frac{1}{\lambda}$, tempo medio que un átomo fica sen desintegrarse.
- Unidades de actividade: no SI: becquerel (Bq), $1 \text{ Bq} = 1 \frac{\text{desinteg.}}{\text{s}}$
curio (Ci), $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{desinteg.}}{\text{s}}$

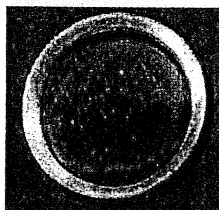
* Balance de enerxía nunha reacción nuclear: $A + a \rightarrow b + B$

Defecto de masa: $\Delta m = (m_A + m_a) - (m_b + m_B)$ (en Kg)

Energía: $E = \Delta m \cdot c^2$

Un club muy restringido

¿Cuántos reactores nucleares de investigación capaces de producir polonio 210 hay en el mundo?, ¿cuatro?, ¿cuarenta? "Más cerca de la segunda cifra", estima el experto Nicholas Priest. La mayor parte de estos reactores, como es lógico, están en Estados Unidos y en la antigua URSS.



INOCUO Y CASI INVISIBLE. Pese a su aspecto inocuo, el isótopo es fácilmente detectable... si se sabe lo que se busca.

Usado para vehículos lunares

Fue la Unión Soviética la que, en los años setenta, utilizó las mayores cantidades de polonio 210 de uso civil: para calentar durante la noche los componentes de sus vehículos lunares 'Lunokhod': una nueva aplicación de la capacidad calorífica del isótopo.

Un veneno en manos de superpotencias

Unas pocas decenas de reactores en el mundo pueden generar el polonio que mató a Litvinenko

JAVIER SAMPEDRO

El polonio 210 utilizado para asesinar al ex espía ruso Alexander Litvinenko no sólo es un veneno sin precedentes conocidos y sin una justificación obvia. También es de difícil obtención: requiere bombardear bismuto con neutrones en un reactor nuclear de investigación adecuado, y los expertos no creen que haya más de 40 instalaciones de ese tipo en el mundo. La mayor parte están en Estados Unidos y en la antigua Unión Soviética, y los mayores usuarios civiles de polonio 210 habían sido hasta ahora los *rovers* rusos que exploraron la Luna en los años setenta. Por lo demás, el material se había usado principalmente como *gatillo* en las bombas nucleares.

Para el físico Priest "es más probable que el polonio 210 procediera de un reactor nuclear"

Un titular llegaba el jueves a la web de *The Times* de Londres: *¿Polonio 210? Es suyo por 69 dólares, sin preguntas*. La noticia, que llevaba un par de días circulando por la Red, se refería a la compañía norteamericana United Nuclear, que ofrece "fuentes de radiación limpias, precisas y certificadas, producidas bajo pedido en un reactor nuclear y enviadas directamente al cliente". En el ca-

tálogo figura el polonio 210, el isótopo radiactivo usado para envenenar al ex espía ruso Alexander Litvinenko. ¿Es así de fácil obtenerlo?

Puede ser, pero sólo si uno va a usarlo para limpiar una emulsión fotográfica de electricidad estática, o para calibrar un medidor de radiactividad de uso científico. "Mi cálculo es que la dosis de polonio 210 usada con Litvinenko es del orden de un microgramo [una milésima de miligramo]", afirma en entrevista telefónica el físico Nicholas Priest, de la Universidad de Middlesex, y el único científico británico que ha trabajado con ese infrecuente y peligroso isótopo radiactivo.

"Un microgramo de polonio 210 emite una radiación de 200 millones de bequerels, o desintegraciones atómicas por segundo, claramente mortal cuando el polonio es ingerido o inhalado. Y si hubieran usado una dosis mayor, la víctima habría muerto mucho antes", Litvinenko tardó tres semanas en morir.

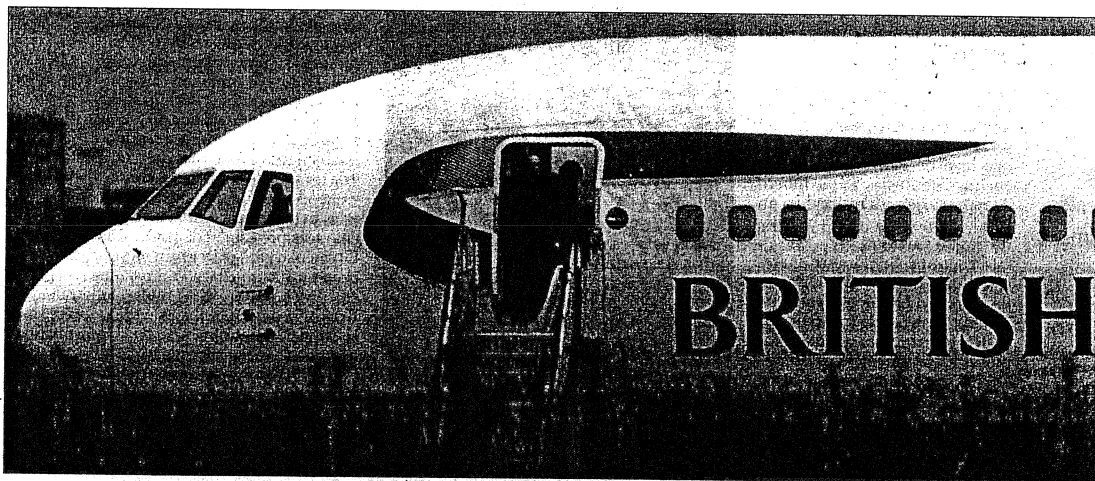
¿Podría obtenerse un microgramo de polonio 210 a partir de los cepillos contra la electricidad estática o los calibradores científicos vendidos por United Nuclear? "Sería posible desde un punto de vista puramente teórico", responde Priest, "pero resultaría muy sucio [messy]. Es mucho más probable que el polonio 210 procediera directamente

de un reactor nuclear de investigación, donde se obtiene bombardeando átomos de bismuto con neutrones".

Los primeros análisis practicados a Litvinenko detectaron talio radiactivo. Cuando Scotland Yard encontró después el polonio, la detección del talio se adjudicó a un error inicial, pero Priest no cree que lo fuera. "La presencia de talio radiactivo es consistente con el método de producción del polonio 210 en un reactor nuclear de investigación", explica el científico. "Tras el bombardeo con neutrones, el bismuto 210 decae como polonio 210 y, en menor cantidad, como talio 206, que tiene una vida media muy corta [véase el gráfico]. Una pequeña contaminación con bismuto en la muestra de polonio usada como veneno explicaría los hechos, puesto que el bismuto seguiría produciendo talio en el cuerpo de Litvinenko durante días".

¿Cuántos reactores nucleares de investigación capaces de producir polonio 210 hay en el mundo?, ¿cuatro?, ¿cuarenta? "Más cerca de la segunda cifra", estima Priest, y empieza a recitar: "Hay uno en el Reino Unido, uno en Japón, uno en Alemania, uno en Australia... En Rusia yo conozco

El polonio 210 es tan radiactivo que genera una enorme cantidad de calor (y de electricidad)



Avión estacionado el pasado miércoles en el aeropuerto londinense de Heathrow para comprobar si emite radiaciones.

REUTERS

Sólo disponible en los laboratorios más avanzados

ENRIQUE GONZÁLEZ ROMERO

EL POLONIO 210 (²¹⁰Po) fue descubierto en 1898 en la pechblenda (uraninita) por Marie Curie. Se trata de un isótopo radiactivo que se encuentra en la naturaleza como resultado de la desintegración del uranio 238. Su concentración es muy pequeña, no alcanzando más de 100 microgramos (un microgramo es una millonésima de gramo) por tonelada de uranio.

Con una vida media de 138,4 días, el polonio 210 resulta muy radiactivo,

emitiendo fundamentalmente partículas alfa muy energéticas y dañinas para los tejidos vivos. La energía de estas partículas es tan grande que una cápsula que contuviese medio gramo puro alcanzaría una temperatura de 500 grados centígrados, si no se evaporase antes. Por otra parte, las partículas alfa emitidas son muy poco penetrantes y pueden ser blindadas con apenas una hoja de papel. Si sólo emitiera partículas alfa, este tipo de isótopos sería fácilmente transportable en cápsulas estancas, debido al corto alcance de dichas

partículas, y difícilmente detectable en un control rutinario de radiactividad. Sin embargo, la mayoría de los emisores alfa, como consecuencia de desintegraciones sucesivas, emite también una o varias partículas gamma (fotones de muy alta energía) que son penetrantes y atraviesan las paredes del contenedor a no ser que dispongan de una gruesa protección de plomo. Justamente, estos rayos gamma son la señal que puede identificar a un emisor alfa con detectores a distancia. La particularidad del ²¹⁰Po es que, justamen-

te, sus emisiones son casi puramente alfa; sólo en una de cada 100.000 desintegraciones se emiten rayos gamma penetrantes (803 keV). El resultado es que este material es difícilmente detectable por detectores genéricos de radiación y apenas necesita blindaje para su transporte. No obstante, existen equipos capaces de identificarlo con precisión si se busca específicamente.

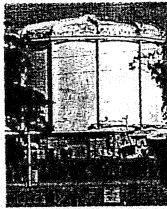
Otro efecto del corto alcance de las partículas alfa emitidas es que para que el ²¹⁰Po afecte a los seres vivos tiene que introducirse dentro de ellos por inhalación (al respirar), por ingestión (en alguna bebida o comida) o por inyección. Una vez incorpo-

rado en un ser humano, bastan unos microgramos (mil veces menos que el peso de un grano de sal) para producir efectos letales en pocos días. En este sentido, es muchos millones de veces más tóxico que el cianuro. El polonio es fácilmente soluble y se distribuye fácilmente por el cuerpo a través de la sangre y otros fluidos, destruyendo células sanguíneas y órganos vitales hasta acabar con la vida de la persona contaminada.

Aunque originalmente se extraía el polonio de las minas de uranio, también es posible fabricarlo artificialmente irradiando bismuto, un metal parecido al plomo, con los neutrones proce-

El rastro evaporado

La contaminación por polonio detectada en Londres parece estar relacionada con los lugares que visitó el propio Litvinenko en las horas siguientes a su envenenamiento. Nuevamente, la evaporación de la sustancia sobre sus ropas podría explicar parte de los casos.



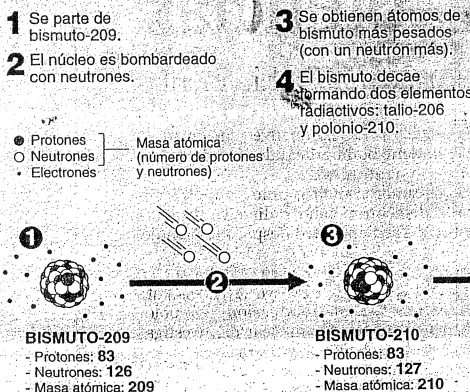
PRODUCTORES DE POLONIO. Sólo en centrales nucleares, como ésta de la imagen, se produce el isótopo.

Alerta innecesaria

Se supone que personas que estuvieron en contacto con el polonio viajaron en un avión de la British Airways, lo que produjo la alerta de la compañía a más de 30.000 pasajeros. Para los expertos, el aviso no tiene ningún sentido porque no corren ningún peligro.

Un veneno de alta tecnología

■ FABRICACIÓN Y DESINTEGRACIÓN DE POLONIO-210



■ USOS DEL POLONIO-210

Disparador de armas nucleares

Las partículas alfa hacen que el berilio emita neutrones, que inician la reacción en cadena de la pila de uranio.

Combustible para células termionucleares

Investigado para su posible uso en satélites. Las partículas alfa producirían calor con el que generar electricidad.

Rovers lunares de la URSS

Utilizado en los años 70 para calentar los componentes de los Lunokhod en la noche lunar.

Uso en fotografía

En pequeñas cantidades para copios que limpian películas fotográficas con electricidad estática.

Fuente: Institutos Nacionales de la Salud de EE UU.

H. LONGAS / EL PAÍS

dos, pero hay más en las ex repúblicas soviéticas. La mayor parte de estos reactores, como es lógico, están en Estados Unidos y en la antigua URSS".

La "lógica" de esas ubicaciones preferentes se deriva de los usos, más bien escasos, que había tenido hasta ahora el polonio 210. El primero de ellos es como *gatillo* en las bombas nucleares. El polonio 210 es uno de los emisores más eficaces conocidos de partículas alfa (unión proyectiles compuestos por dos protones y dos neutrones). Si se mezcla con berilio, éste absorbe las partículas alfa del polonio y emite a cambio un chorro de neutrones que sirve para disparar la reacción en cadena de la bomba.

El segundo uso es como combustible de una pila termionuclear. La desintegración de los átomos radiactivos produce calor, y estas pilas lo aprovechan para generar electricidad.

El polonio 210 es tan radiactivo —5.000 veces más que el radio, que a su vez es un millón de veces más radiactivo que el uranio— que genera una enorme cantidad de calor (y de electricidad). La otra cara de esta moneda es que *se gasta* demasiado pronto: su vida media es de sólo 138 días, lo que lo inutiliza para muchas de las tareas que se suelen asignar a las pilas termionucleares, como alimentar las sondas espaciales de larga distancia (tipo *Voyager*), demasiado lejanas del Sol como para utilizar su energía.

Fue la Unión Soviética la que, en los años setenta, utilizó las mayores cantidades de polonio 210 para uso civil: para calentar du-

rante la noche los componentes de sus vehículos lunares *Lunokhod*: una nueva aplicación de la capacidad calorífica del isótopo, consecuencia a su vez de su enorme eficacia radiactiva.

Las contaminaciones detectadas esta semana en varios puntos de Londres y en los aviones de la compañía British Airways también se derivan, en último término, de ese calor de origen radiactivo. El polonio es un sólido a las temperaturas habituales: se funde a los 254 grados centígrados y se vaporiza a los 962. Pero el polonio 210 se calienta de tal forma debido a su propia radiactividad que, en un ambiente que no pase de los 55 grados, la mitad de su masa se hace vapor en 45 horas.

"La cantidad de polonio necesaria para envenenar a Litvinenko es totalmente invisible en estado sólido", explica Priest. "Lo más probable es que fuera transportado disuelto en cualquier líquido, en cualquier cantidad de líquido. Y a juzgar por la contaminación detectada en los aviones, no parece que la sustancia fuera manejada con mucho cuidado, ciertamente".

Pero la contaminación de los aviones, o al menos la de algunos de ellos, también pudo producirse después del envenenamiento del ex espía, cuando los presuntos autores u otras personas que habían tenido contacto con él tomaron sus vuelos de vuelta. Una vez que el veneno salió de su vial, la evaporación del polonio 210 pudo empezar a contaminar las ropas de los presentes.

Pese a que las partículas alfa emitidas por este isótopo son muy abundantes, tienen una muy escasa capacidad de penetración

—la epidermis las detiene—, y, por tanto, sólo son mortales para quien ha ingerido o inhalado el polonio. Pero aunque el isótopo sea inocuo fuera del cuerpo, sigue siendo fácilmente detectable, sobre todo si uno sabe lo que busca.

La alerta de British Airways a los más de 30.000 pasajeros que han viajado en alguno de esos aviones en el último mes no tiene sentido para ningún experto. "Si acaso", comenta Priest, "podían haber avisado a los pasajeros que habían viajado en los *asientos contaminados*, y aun así ya sería una precaución excesiva". Esos pasajeros tendrían que haber chupado sus asientos para haber corrido algún tipo de riesgo.

La contaminación detectada en algunos lugares de Londres parece estar relacionada con los lugares que visitó el propio Litvinenko en las horas siguientes a su envenenamiento. Nuevamente, la evaporación de la sustancia sobre sus ropas podría explicar parte de los casos.

La detección de una sustancia tan radiactiva como el polonio 210 puede ser extremadamente sensible, incluso en cantidades que están en órdenes de magnitud por debajo de todo nivel de riesgo.

Para despejar sospechas, la firma United Nuclear se apresuró el jueves a asegurar en su web: "Hay docenas de materiales más tóxicos, como Ricin y Abrin, que se pueden hacer fácilmente y no dejan rastro. Aunque es obvio que funciona, el polonio 210 es una mala elección como veneno".

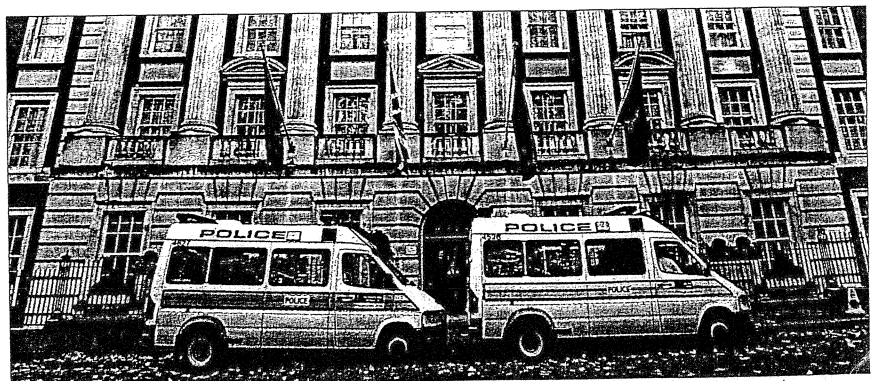
La cantidad de polonio necesaria para matar a Litvinenko es del todo invisible

dentos de un reactor nuclear o de grandes generadores de neutrones disponibles en centros especializados. En ambos casos es necesario separar el polonio del material en que se encuentra disperso. Pero para realizar esta operación de forma segura es necesario contar con instalaciones radioquímicas bien equipadas, sólo disponibles en los laboratorios más avanzados en tecnología o investigación nuclear.

Este material fue utilizado inicialmente para producir fuentes de neutrones (Po/Be) usadas en investigación y en reactores nu-

cleares de producción de electricidad. También ha sido usado para proporcionar calor y electricidad en satélites espaciales. Por otra parte, varios estudios médicos han concluido que mínimas cantidades de polonio, presentes en las hojas del tabaco y procedentes de fertilizantes, suponen, debido a su gran toxicidad, un factor importante en la aparición de cáncer de pulmón entre los fumadores.

Enrique González Romero es Investigador del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).



Los furgonetas policiales en el hotel Millennium de Londres, donde Litvinenko se entrevistó con Lugovoy, otro ex agente del KGB.