



Tema 8: Aplicaciones de la Radiactividad

1. Datación

1.1. Fluctuaciones estadísticas

Hemos visto en el capítulo 3 que las leyes de la desintegración son de naturaleza estadística. Esto quiere decir que no se puede predecir con certeza el instante en que se desintegrará un núcleo concreto. Sin embargo, la utilidad de las leyes estadísticas se hace evidente para muestras numerosas. Si el número inicial de núcleos N es suficientemente grande, se puede predecir con mucha precisión, por ejemplo, cuándo se desintegrará la mitad de ellos: transcurrido un tiempo igual a la semivida T .

En efecto, las fluctuaciones estadísticas asociadas a la desintegración de $N/2$ núcleos son del orden de la desviación típica de la distribución de Poisson $\sigma = \sqrt{N}$. Por tanto es de esperar que el error relativo cometido al suponer que transcurrido un tiempo T se han desintegrado $N/2$ núcleos es del orden de $\sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$. Para un número grande de núcleos $N \sim 10^{24}$ este error relativo es de 10^{-12} , es decir, que la fracción de núcleos presentes en la muestra transcurrido un tiempo T es de $\frac{1}{2} \pm 10^{-12}$. Esto sugiere que se puede usar la desintegración de los núcleos radiactivos como un reloj para controlar el paso del tiempo con mucha precisión. Si se conoce la constante de desintegración λ , se puede utilizar el decrecimiento de la actividad de una muestra para medir el tiempo.

Este procedimiento presenta dificultades cuando intentamos aplicarlo a desintegraciones con semi-vidas en la escala geológica ($\sim 10^9$ a), ya que no se detecta cambio en la actividad. En este caso hay que usar el número relativo de núcleos padre e hijo observados actualmente y compararlo con el número relativo cuando el material (por ejemplo, una roca o mineral) se formó.

1.2. Datación a escala geológica

Consideremos el caso más simple de una desintegración $A \rightarrow B$. Supongamos que se puede determinar (por ejemplo, mediante métodos químicos) el número de átomos $N_A(t)$ y $N_B(t)$ presentes en una muestra en el instante t . Se tiene:

$$N_A(t) = N_A(0)e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Dividiendo por $N_A(0)$ y tomando logaritmos

$$-\lambda t = \ln \frac{N_A(t)}{N_A(0)} \quad (2)$$

de donde, utilizando $N_A(0) = N_A(t) + N_B(t)$ y despejando t

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_A(t) + N_B(t)}{N_A(t)} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_B(t)}{N_A(t)} \right) \quad (3)$$

Dada la constante de desintegración λ , la edad de la muestra está determinada por la abundancia relativa N_B/N_A en el instante t .

Para obtener la expresión anterior hemos supuesto que inicialmente no hay núcleos hijo presentes $N_B(0) = 0$ y que no han escapado átomos A y B de la muestra desde que se formó.

Supongamos ahora que inicialmente hay cierta cantidad $N_B(0)$ de átomos hijo. Ahora se tiene

$$N_A(0) + N_B(0) = N_A(t) + N_B(t). \quad (4)$$

Puesto que hemos introducido una nueva incógnita, $N_B(0)$, ya no es posible obtener directamente el tiempo t , sino que

$$N_B(t) = N_B(0) + N_A(0) - N_A(t) = N_B(0) + N_A(t)(e^{\lambda t} - 1) \quad (5)$$

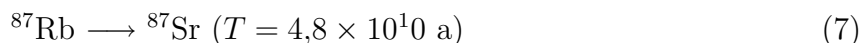
No obstante, en muchos casos de interés también está presente en la muestra un isótopo distinto del hijo B' que, o bien no es radiactivo o bien no se formó a partir de A . Si B' es estable entonces su concentración es constante y podemos escribir

$$\frac{N_B(t)}{N_{B'}(t)} = \frac{N_B(0)}{N_{B'}(0)} + \frac{N_A(t)}{N_{B'}(t)}(e^{\lambda t} - 1) \quad (6)$$

Las razones $\frac{N_B(t)}{N_{B'}(t)}$ y $\frac{N_A(t)}{N_{B'}(t)}$ pueden medirse en el laboratorio, pero aún aparecen dos incógnitas en esta ecuación: el tiempo t y la razón isotópica inicial $\frac{N_B(0)}{N_{B'}(0)}$.

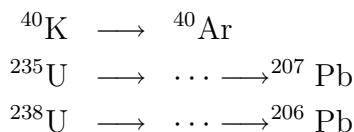
No obstante, es de esperar que los minerales que tienen orígenes comunes cristalizaran en la misma época y tengan edades y razones isotópicas idénticas, aunque la concentración de núcleos A pueda ser muy diferente. Por tanto, es de esperar que existan minerales con distintas razones $\frac{N_B(t)}{N_{B'}(t)}$ y $\frac{N_A(t)}{N_{B'}(t)}$ pero con iguales valores de T y $\frac{N_B(0)}{N_{B'}(0)}$. Esta hipótesis se puede verificar representando gráficamente $y = \frac{N_B(t)}{N_{B'}(t)}$ frente a $x = \frac{N_A(t)}{N_{B'}(t)}$ para distintos minerales. La ecuación (6) corresponde a una línea recta $y = a + bx$ con $a = \frac{N_B(0)}{N_{B'}(0)}$ y pendiente $b = e^{\lambda t} - 1$ de donde se puede determinar la concentración inicial y la edad t .

En la figura 1 vemos un ejemplo de este procedimiento aplicado a la desintegración



en donde la comparación se hace con respecto a la concentración del elemento estable ${}^{86}\text{Sr}$. Los datos indican que la edad de la tierra es del orden de $t = 4,5 \times 10^9$ años. El buen ajuste lineal indica que la suposición de que no ha habido pérdida de núcleos padre e hijo es correcta.

Otros métodos similares de datación de minerales de la tierra, luna y meteoritos dan una edad común de $4,5 \times 10^9$ a. Los posibles métodos incluyen la desintegraciones



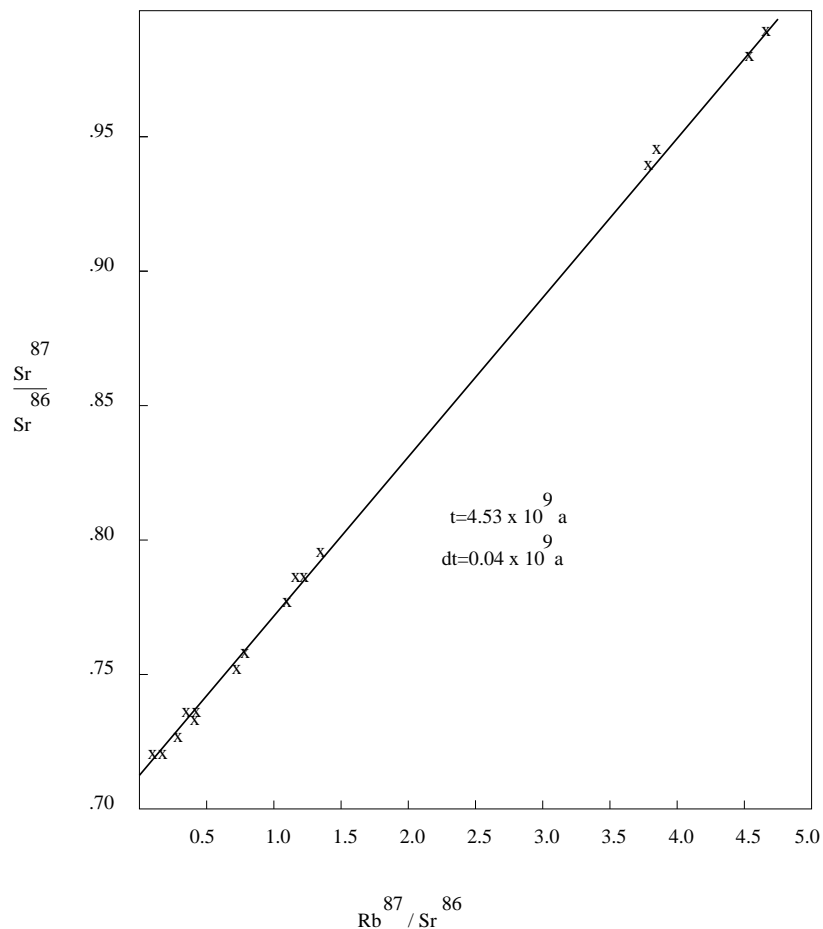


Figura 1: Método de datación de Rb/Sr con presencia de ^{87}Sr . El comportamiento lineal es consistente con la edad común de los diversos minerales, obteniéndose una concentración inicial de $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr}) = 0,7003 \pm 0,0004$.

1.3. Datación de materia orgánica por el método del carbono 14

Ya hemos comentado brevemente el método de datación del ^{14}C en el capítulo anterior. La materia orgánica absorbe continuamente CO_2 de la atmósfera, conteniendo principalmente ^{12}C (98.89 %) y ^{13}C (1.11 %), ambos estables. El ^{14}C radiactivo se forma continuamente en la alta atmósfera debido a la acción de los rayos cósmicos sobre el nitrógeno atmosférico. Toda la materia viviente posee un cierto contenido de ^{14}C . Como la tasa de producción del ^{14}C ha sido relativamente constante durante miles de años, el tejido orgánico alcanza el equilibrio de su carbón con el carbón atmosférico, siendo la concentración relativa de 1 átomo de ^{14}C por cada 10^{12} de ^{12}C . La semivida del ^{14}C es de 5730 a, por lo que un gramo de carbono presenta una actividad de 15 desintegraciones por minuto.

Cuando un organismo muere, pierde el equilibrio con el carbón atmosférico, deja de absorber ^{14}C y la concentración de éste disminuye de acuerdo con la ley de desintegración radiactiva. La edad de una muestra de tejido se puede determinar midiendo la actividad

específica de su contenido en carbón.

La validez de este método se basa en la producción constante de ^{14}C durante los últimos 50000 años. Esto se puede justificar mediante comparación con otros métodos de datación (como grabaciones históricas o contaje de anillos de los árboles). En milenios posteriores es posible que este método no pueda ser aplicable, debido a que durante los últimos 100 años la quema de combustible fósil ha aumentado la concentración de ^{12}C en la atmósfera, mientras que las pruebas de armas nucleares han incrementado el contenido de ^{14}C , posiblemente doblando su concentración.

2. Análisis de elementos

2.1. Análisis de activación por neutrones (NAA)

En el análisis de activación por neutrones (NAA) una pequeña muestra del material a analizar se expone a un flujo de neutrones térmicos provenientes de un reactor. Algunos de los núcleos estables pueden absorber un neutrón mediante la reacción (n, γ) . Muchos de estos núcleos son radiactivos y se desintegran β^- con emisión posterior de un fotón. Los distintos rayos γ son característicos de cada desintegración particular. Por tanto, analizando los rayos γ emitidos por la muestra “activada”, es posible determinar los elementos presentes (mediante la energía) y su cantidad (mediante la intensidad de los rayos γ). Se usan ordenadores y analizadores multicanal para determinar automáticamente las energías.

El método de NAA es no destructivo, puesto que, aparte de una pequeña actividad inducida (que disminuye con el tiempo), la muestra queda intacta tras el análisis. Por ello el NAA es útil para análisis de muestras valiosas (cuadros y objetos antiguos), en análisis forense y en investigaciones criminales. Por el contrario, los análisis químicos ordinarios requieren que la muestra sea vaporizada, disuelta, quemada o alterada permanentemente por otros medios.

El límite de detección de un elemento presente en una muestra depende de la sección eficaz de captura neutrónica y del tiempo de vida del núcleo resultante. Dependiendo del núcleo, se logran límites de detección que oscilan entre 10^{-6} – 10^{-5} μg para el Mn y 0,1-1 μg para el Zr (ver figura 2).

El método de NAA tiene aplicaciones en cualquier área donde sea necesario el conocimiento cuantitativo de cantidades minúsculas de materiales presentes en una muestra. Por ejemplo, los polucionantes atmosféricos pueden recogerse y analizarse. En análisis forense esta técnica es ampliamente aplicada. Por ejemplo, la munición de armas de fuego contiene compuestos de Ba y Sb y el disparo de una pistola deja residuos de estos elementos a la mano en cantidades del orden del μg , que serían indetectables por las técnicas convencionales. Sin embargo, estos residuos están 1000 veces por encima del umbral de detección del NAA para Ba y Sb.

2.2. Emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE)

En esta técnica, se coloca una muestra delgada del material en un acelerador de partículas y se bombardea con protones, partículas α o iones pesados. La interacción produce ionización de los átomos del blanco, que emiten sus rayos X característicos. Como la energía de los rayos

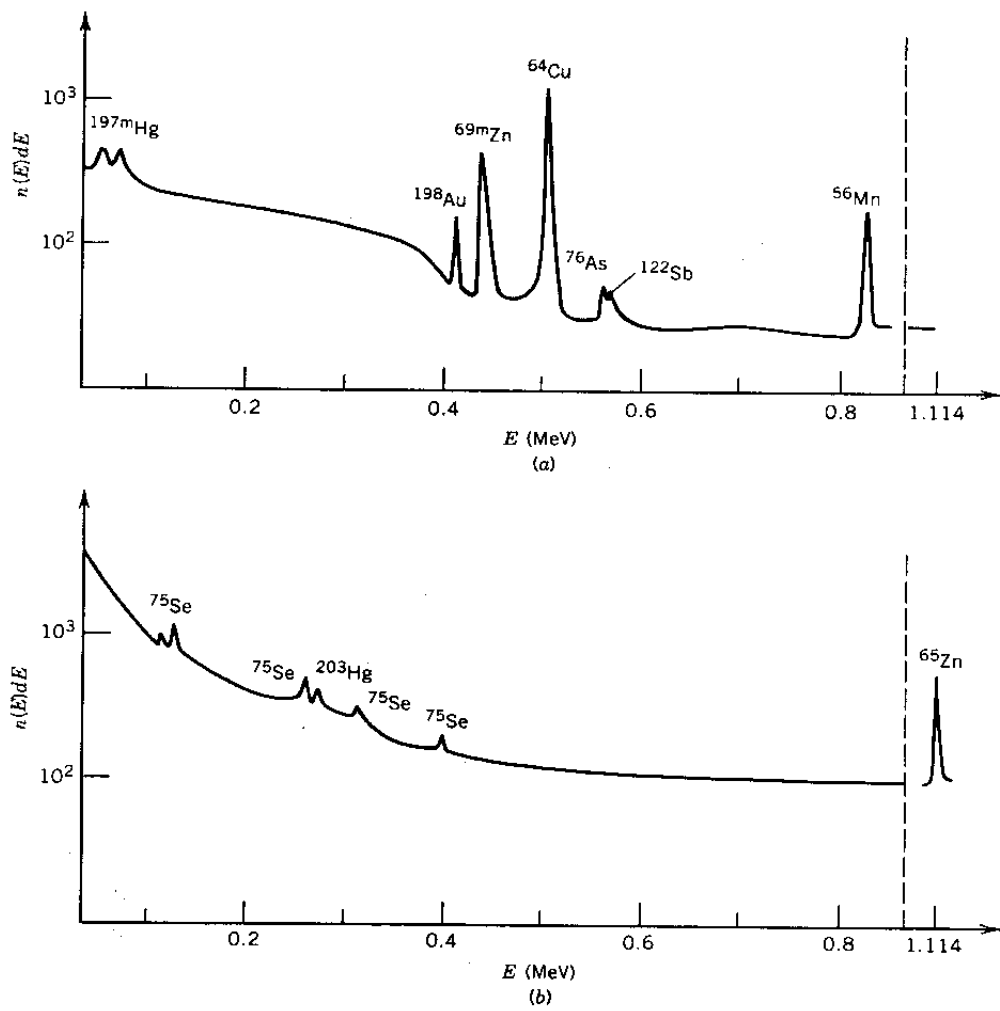


Figura 2: Espectro de rayos γ obtenido por activaci3n neutr3nica de una muestra de cabello humano. El espectro (a) fue obtenido 4 h despu3s de la irradiaci3n, y el espectro (b) 4 semanas m3s tarde. Entre los elementos encontrados se incluyen: mercurio, oro, zinc, cobre, ars3nico, antimonio, manganeso y selenio.

X depende del número atómico Z del material, observando los rayos X emitidos podemos identificar los diversos elementos que componen el material. A partir de la intensidad de los rayos X se puede determinar la proporción relativa de los distintos elementos en la muestra.

Mediante esta técnica se pueden detectar cantidades del orden de $10^{-4} \mu\text{g}$ de material, lo que la hace comparable al NAA en cuanto a sensibilidad.

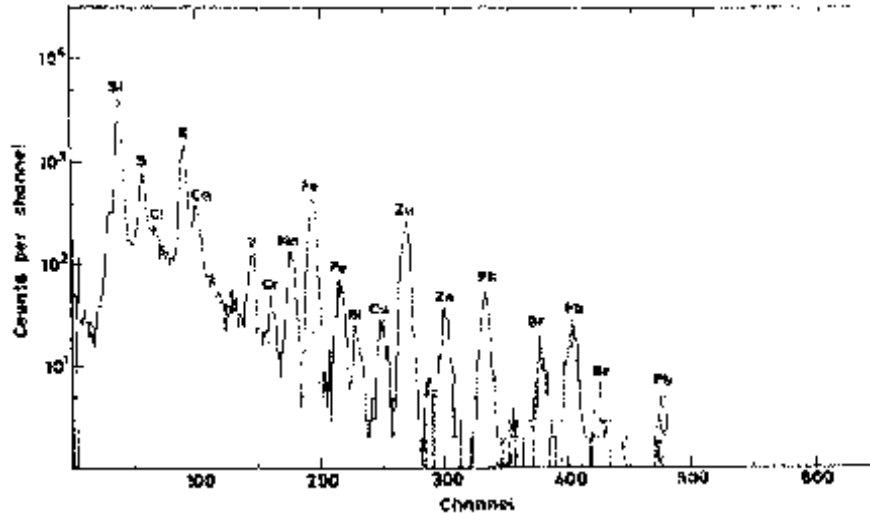


Figura 3: Espectro PIXE.

3. Aplicaciones de la desintegración alfa

3.1. Baterías nucleares

La desintegración α de los núcleos pesados de vida larga poseen dos características importantes: las partículas α se emiten con energías definidas y la tasa de emisión es prácticamente constante (si la vida media es suficientemente larga).

Consideremos por ejemplo la desintegración del ^{238}Pu ($t_{1/2} = 86 \text{ a}$). El valor Q es de 5.6 MeV y la actividad específica es de $A_E = 6 \times 10^{11} \text{ Bq/g}$. Puesto que cada desintegración libera 5.6 MeV, la potencia liberada por unidad de masa es de

$$\begin{aligned}
 P &= \left(6 \times 10^{11} \frac{\text{desintegraciones/s}}{\text{g}} \right) \left(\frac{5,6 \times 10^6 \text{ eV}}{\text{desintegracion}} \right) (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) \\
 &= 0,6 \text{ W/g}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Cada gramo de Pu produce una potencia de 0.6 W. Aunque esto no es suficiente para calentar o iluminar una casa, es adecuado para alimentar circuitos eléctricos simples y tiene la enorme ventaja de que continúa operando a una velocidad prácticamente constante durante años,

incluso bajo condiciones muy adversas (en el vacío y a las bajas temperaturas del espacio, por ejemplo) y sólo necesita ser reemplazada transcurridas escalas de tiempo del orden de su semi-vida. Este tipo de baterías se utilizan en muchas aplicaciones, desde marcapasos cardíacos hasta en la nave espacial Voyager que fotografió Júpiter, Saturno y Urano.

En los marcapasos cardíacos, la energía de la partícula α se deposita en forma de calor y convertida en un pulso eléctrico mediante un convertidor termoelectrónico. Son capaces de producir del orden de $300 \mu\text{W}$ de potencia eléctrica y lo hacen continuamente, limitados sólo por la semivida de 86 años del ^{238}Pu .

3.2. Detectores de humo

Los detectores de humo contienen una pequeña cantidad de ^{241}Am ($t_{1/2} = 433$ años) cuyo valor Q es de 5.6 MeV. Bajo condiciones normales las partículas α ionizan las moléculas de aire en el detector. Los iones formados son atraídos por dos electrodos y cierran un pequeño circuito de corriente estacionaria en el dispositivo.

Los productos de la combustión contienen átomos pesados ionizados. Cuando éstos penetran en el detector, colisionan con los iones responsables de la corriente estacionaria. Se produce entonces una disminución en dicha corriente, lo cual pone en marcha una alarma. El dispositivo se activa no sólo por las partículas visibles de humo (como en el caso del detector fotoeléctrico) sino por los iones cargados invisibles que resultan de la combustión.

4. Aplicaciones médicas de diagnóstico

4.1. Rayos X

Los rayos X pueden atravesar fácilmente los tejidos blandos del cuerpo, pero son atenuados por los huesos. Por lo tanto, las fotografías con rayos X pueden revelar la estructura detallada del esqueleto humano y son de indudable utilidad para el diagnóstico de lesiones óseas. Sin embargo, los rayos X tienen sus limitaciones: no son muy efectivos para diferenciar entre diferentes tipos de tejido blando (localización de tumores) y producen una imagen tridimensional, pero plana, que, incluso aunque revele una anormalidad, no indicaría la profundidad de la misma. Además, parte del tejido blando de interés puede ser apantallado u oscurecido por los huesos, como por ejemplo el cerebro dentro del cráneo.

Una técnica mejorada consiste en introducir un material no radiactivo de alto Z , como bario o yodo, en un órgano específico. Posteriormente se toma una radiografía. Puesto que el cuerpo contiene una proporción muy pequeña de elementos de alto Z , su introducción resulta en una imagen muy detallada. Es muy común el uso de esta técnica utilizando bario, por ejemplo, como medio de contraste para estudios del tracto gastrointestinal.

4.2. Formación de imágenes mediante rayos gamma

4.2.1. Tiroides

Si introducimos en el cuerpo ciertos isótopos emisores de rayos γ , los rayos emitidos pueden utilizarse para producir una imagen de cierta parte del cuerpo. Una aplicación muy simple de esta técnica es el estudio de la absorción de iodo por el tiroides. El iodo radioactivo se ingesta oralmente y se coloca un detector γ cerca del cuello que mide el incremento de la actividad con el tiempo a medida que el iodo es absorbido por la glándula tiroidea.

Originalmente se utilizaba ^{131}I para estos estudios. El ^{131}I es un producto de la fisión con una semivida de 8 días. Esta semi-vida es demasiado larga, puesto que el tiempo de observación del tiroides es, como mucho, de unas horas, y la dosis absorbida por el paciente resultaría excesiva. Además el ^{131}I emite partículas β de alta energía, que no contribuyen al procedimiento de diagnóstico, pero que elevan la dosis a 3 rads por μCi de ^{131}I . Normalmente se usan varios μCi , lo que eleva la dosis a valores superiores a 30 rads. Un elemento alternativo es el ^{132}I (2.3 h), que es hijo del producto de fisión ^{132}Te (78 h). El ^{132}I se puede separar del Te disolviendo el iodo en un líquido donde el ^{132}Te no es soluble. Más recientemente se viene usando el ^{123}I (13 h), que emite un rayo γ de 159 keV y la dosis absorbida es de sólo 2 rads por 100 μCi , mucho menor que en el caso del I-131 y 132, y su semi-vida es la ideal para la prueba.

4.2.2. Riñones.

También se puede estudiar el funcionamiento de los riñones inyectando un compuesto con ^{131}I (intravenoso). Cada riñón es observado con un detector γ y, mediante comparaciones de la velocidad de absorción del ^{131}I por ambos riñones, se pueden descubrir desórdenes en un riñón. El paciente recibe una dosis relativamente pequeña de radiación porque el compuesto es eliminado casi completamente de la sangre tras su paso por los riñones y posteriormente excretado.

4.2.3. Scanner de rayos gamma.

En la actualidad existen muchos productos farmacéuticos conteniendo isótopos radiactivos. Eligiendo un compuesto que tienda a acumularse en un órgano específico se puede conseguir una concentración local del radioisótopo. Midiendo la distribución espacial de la radiación emitida se puede obtener una imagen completa del órgano (al contrario que una simple medida de la radioactividad acumulada). Una posibilidad es usar un detector de centelleo para explorar un área del cuerpo. Se utiliza un colimador estrecho para observar sólo una pequeña área (2–3 mm de diámetro) y se explora la totalidad de un área rectangular, almacenándose los registros de intensidad. Incluso se puede utilizar un colimador diseñado para explorar a una cierta profundidad.

El isótopo que se usa más frecuentemente en estas exploraciones γ es el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6 h), que es hijo del ^{99}Mo (66 h) obtenido, bien por fisión o por captura neutrónica por ^{98}Mo . El Tc puede ser separado por medios químicos y tiene la ventaja de que emite un único rayo γ de 140 keV (sin β), lo que permite el diseño de colimadores muy precisos.

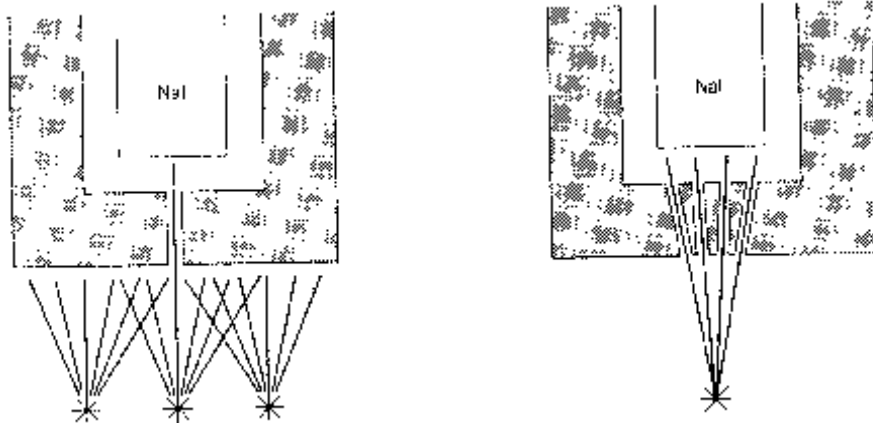


Figura 4: Diseño de colimadores para una cámara de rayos gamma.

4.2.4. Scanner del cerebro.

Uno de los usos más comunes de las técnicas de imágenes por rayos γ consiste en la generación de imágenes del cerebro. Esto es posible debido a que, en condiciones normales, el cerebro absorbe en muy poca cantidad las impurezas contenidas en la sangre. Sin embargo, si hay una enfermedad o un tumor, el ^{99m}Tc se puede concentrar en la región afectada, lo que será revelado en la imagen de rayos γ .

4.2.5. Cámaras de rayos gamma.

La técnica de exploración γ posee el inconveniente de que sólo se mide cada vez la actividad de una pequeña región del cuerpo y el resto se desaprovecha y contribuye a proporcionar una dosis de radiación innecesaria al paciente. La cámara de rayos γ es un dispositivo capaz de almacenar de una vez la imagen completa de un área grande. La imagen se obtiene en varios minutos, lo que permite estudios dinámicos de la evolución de las funciones corporales. Un esquema de tal aparato se muestra en la figura siguiente.

La radiación penetra en la cámara a través de uno de los múltiples colimadores y golpea un gran cristal centelleador. La luz de centelleo proveniente de un punto concreto del centelleador es recogida en parte por varios de los 19 tubos fotomultiplicadores que lo recubren, con distintas intensidades relativas, que dependen de la distancia entre cada tubo y el punto de centelleo. A partir de las intensidades relativas registradas en los diferentes tubos, es posible determinar el punto donde el fotón original golpeó al centelleador. A partir de esta información almacenada para gran número de fotones se puede reconstruir una imagen del órgano.



Figura 5: Scanner del cerebro con un detector de centelleo colimado. Se observa un tumor.

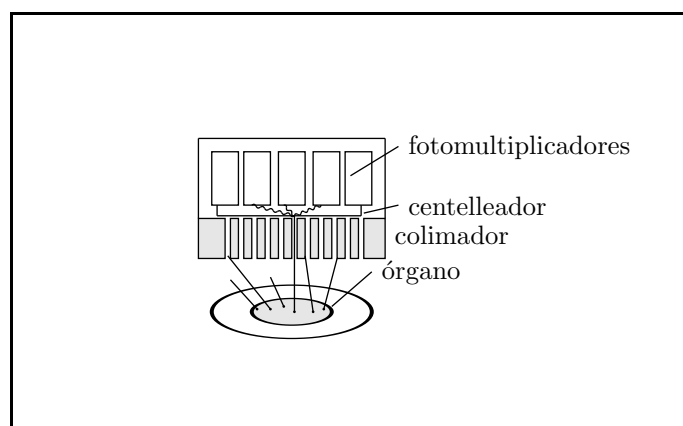


Figura 6: Cámara de rayos gamma

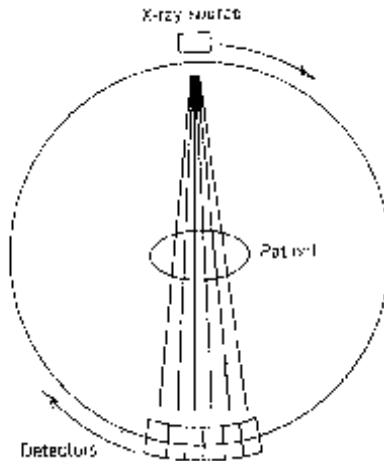


Figura 7: Geometría de un scanner CAT

4.2.6. Tomografía y scanner cerebral

Mediante esta técnica se puede formar la imagen de una “rebanada” específica de los órganos internos. En la tomografía lineal con rayos X, un tubo de rayos X y una película se mueven simultáneamente en direcciones opuestas, de forma que los puntos fijos de un plano específico del cuerpo mantengan su imagen en la película, mientras que los puntos fuera de dicho plano producirán imagen movida o difuminada. El resultado es una imagen enfocada del plano seleccionado, con los demás planos difuminados pero superimpuestos en la imagen, lo que ocasiona una pérdida considerable de contraste.

Las imágenes tomográficas actuales se producen haciendo pasar un gran número de haces de rayos X a través de la región de interés y desde muchas direcciones diferentes. Determinando la pérdida de intensidad de cada haz se obtiene la absorción relativa a lo largo de una dirección particular. A partir de estas proyecciones monodimensionales del perfil del cuerpo es posible reconstruir una imagen bidimensional con ayuda de un ordenador. En los scanners modernos el paciente es rodeado por un anillo con cientos de detectores de rayos X y la fuente de rayos X se mueve alrededor del paciente. Esta técnica se denomina *tomografía axial computerizada* o CAT (Computerized Axial Tomography). En España se conoce por las siglas TAC (tomografía axial computerizada). Se puede obtener una imagen completa en varios segundos, con una resolución del orden del mm.

Otra técnica es la tomografía por emisión de positrones o PET (Positron-emission tomography). Se introducen isótopos emisores de positrones en el área a estudiar y se detectan en coincidencia los dos fotones de 0.511 MeV resultantes de la aniquilación $e^- - e^+$. Para ello se rodea al paciente por un anillo de detectores γ . Los dos fotones se mueven en direcciones opuestas y golpean dos detectores opuestos en el anillo. A partir de un gran número de tales eventos es posible reconstruir la distribución original de radioisótopos y formar una imagen del área. Entre los isótopos usados están el ^{15}O (2 min), ^{13}N (10 min), ^{11}C (20 min) y ^{18}F (20 min), los cuales deben producirse en un ciclotrón que debe estar instalado próximo al



Figura 8: Fotografía del paciente en el interior de una máquina de scanner CAT.

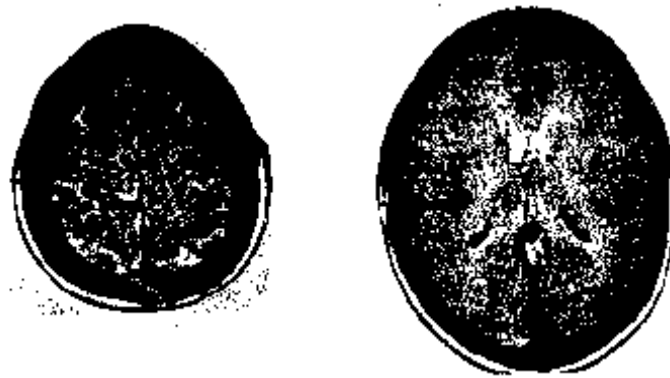


Figura 9: Scanner del cerebro con la técnica CAT

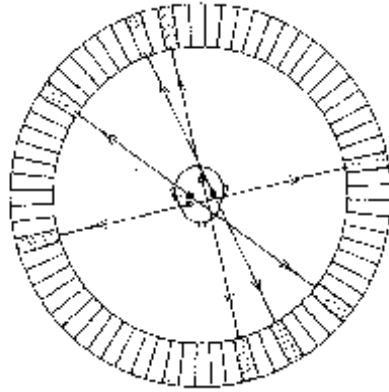


Figura 10: Geometría de la tomografía por emisión de positrones o PET.

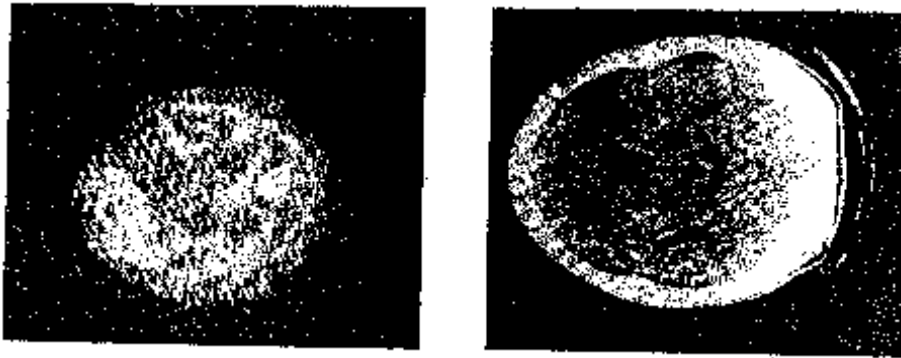


Figura 11: Scanner del cerebro obtenido con la técnica PET.

área de diagnóstico, dada la corta vida de tales isótopos.

En el caso de scanners cerebrales, la PET ofrece muchas ventajas sobre la CAT, puesto que ésta última es esencialmente estática y muestra sólo la densidad del tejido, mientras que la PET puede revelar efectos dinámicos, como el flujo de sangre. Por ejemplo, una imagen PET del cerebro tomada después de inhalar ^{15}O mostrará las regiones del cerebro pobres en oxígeno como resultado de un flujo de sangre anormalmente reducido. Utilizando glucosa con ^{18}F se puede observar el metabolismo cerebral, puesto que las zonas más activas concentrarán dicho isótopo.

5. Aplicaciones médicas de terapia

El principal uso terapéutico de las radiaciones nucleares es la destrucción del tejido inservible o con malfuncionamientos, como un tumor cancerígeno o una glándula del tiroides

hiperactiva. Este efecto destructor se produce en varios pasos:

1. La radiación ioniza los átomos en las moléculas del material irradiado. Este cambio físico ocurre en una escala temporal del orden de 10^{-16} s.
2. Las moléculas ionizadas participan en reacciones químicas que producen radicales libres u otras moléculas excitadas. Este es un cambio químico que ocurre en una escala temporal de 10^{-15} - 10^{-3} s.
3. Estos radicales libres pueden incorporarse en estructuras biológicas a nivel molecular y alteran su función biológica. Los efectos de estos cambios biológicos pueden aparecer en cuestión de horas o quizá años.

5.1. Tumores

En este tipo de terapias sería deseable concentrar la radiación sobre el área enferma y simultáneamente minimizar la exposición en el área circundante. Debido a su gran penetración, la radioterapia se ha realizado tradicionalmente con rayos X y γ , con el riesgo de dañar el tejido sano. Estos riesgos se minimizan haciendo girar la fuente alrededor de un eje que pasa por el tumor, de manera que el área de piel y tejido irradiados son mucho mayores y el daño es menor. Generalmente se usa una fuente radiactiva que se gira alrededor del paciente. Se pueden usar fuentes de hasta 10 000 Ci de ^{60}Co .

Otra forma de minimizar el daño al tejido sano es colocar la fuente de radiación dentro del tumor implantando agujas o gránulos de radio. Existen, por ejemplo, agujas sólidas hechas de ^{60}Co o de ^{198}Au . También se pueden inyectar soluciones coloidales de ^{198}Au o ^{90}Y en el tumor.

5.2. Tiroides. Glóbulos rojos

El yodo tiende a acumularse en la glándula del tiroides. Si la actividad de esta glándula es demasiado grande, puede reducirse y mantenerla controlada mediante la administración oral de ^{131}I . La superproducción de los glóbulos rojos de la sangre se puede corregir igualmente suministrando al paciente pequeñas dosis de ^{32}P , que se acumula en la médula del hueso, donde se forman los glóbulos rojos, y reduce su actividad.

5.3. Terapia con piones

Recientemente se han realizado estudios de radioterapia con haces de neutrones y piones. Los piones π^- son partículas con carga $-e$ tienen la ventaja de que pueden ser enfocados a una profundidad específica, dependiente de la energía del haz de piones, hasta un punto donde son capturados por un núcleo, el pion desaparece y su energía en reposo (~ 140 MeV) es liberada produciendo partículas pesadas (p, n, α) que depositan su energía en las proximidades. Puesto que son partículas cargadas, los piones también dejan una estela de iones a su paso, pero las partículas pesadas y nucleones producidas en el punto de captura producen una dosis grande en un volumen relativamente pequeño.

6. Aplicaciones tecnológicas

6.1. Radiografías industriales

Los rayos X y γ se utilizan con usos industriales. Las soldaduras, fundiciones y piezas de forja se tienen que examinar para encontrar los posibles fallos y esto se hace con rayos X o bien con radioisótopos. Para examinar una soldadura en una tubería basta enrollar una película fotográfica alrededor de la parte externa de la soldadura, colocar la fuente en el eje de la tubería en el plano de la soldadura y dejarla durante el tiempo de exposición correcto. El coeficiente de absorción de un material disminuye con la energía del fotón y aumenta con el número atómico, por lo que se necesita radiación de alta energía para objetos pesados y gruesos, y de baja energía para objetos delgados o materiales ligeros. Por ejemplo, se puede emplear ^{60}Co ($E_\gamma = 1,17, 1,33$ MeV) para radiografías de objetos de acero de 5 a 15 cm de espesor, y ^{137}Cs ($E_\gamma = 0,66$ MeV) para 2.5–10 cm de espesor.

6.2. Medida de espesores con radiación

La intensidad de un haz de radiación que atraviesa la materia se atenúa en función del espesor de ésta. Por lo tanto, registrando la radiación no absorbida se puede determinar el espesor del material. El instrumento se puede calibrar directamente en unidades de espesor. Esto tiene aplicaciones en la industria, donde se necesita conocer si cierto producto tiene el espesor uniforme deseado, por lo que el método se modifica para que sólo se indiquen las variaciones del espesor. Se puede diseñar la maquinaria para que se corrija el espesor del producto automáticamente al detectar anomalías.

Se usan fuentes β para materiales de pequeña densidad superficial, como papel, láminas de aluminio, plástico, goma, etc. Para materiales más pesados y gruesos, como acero, se usan fuentes γ .

Se usa el mismo fundamento para medir el porcentaje de plomo en la gasolina, porque el plomo aumenta la absorción. Otra aplicación es el medidor de nivel de líquidos en recipientes. Cuando el líquido alcanza el nivel de la muestra, se reduce la corriente en el detector. Estos medidores son útiles cuando el líquido es vidrio o hierro fundido o está contenido en un recipiente cerrado. Esta idea se aplica al inspector de paquetes. Los paquetes llenos absorben más que los vacíos. Por ejemplo, en una envasadora de latas de refresco se pueden detectar las latas vacías y la radiación puede indicar si están llenas hasta el nivel requerido.

7. Aplicaciones en ecología

7.1. Trazadores

Se denominan así los isótopos radiactivos usados frecuentemente para seguir el camino que ha tomado un producto químico determinado. Mediante este método se pueden detectar cantidades microscópicas del orden de 10^{-12} g. Por ello, se pueden usar cantidades minúsculas para minimizar el riesgo sanitario.

Se puede seguir de esta manera el movimiento de las aguas residuales después de que se han desaguado en el mar. Para ello se puede vertir en dichas aguas una solución conteniendo ^{32}P y seguir su movimiento posterior con un contador geiger desde una embarcación.

Esta técnica se empleó para seguir el movimiento de lodo en el estuario del Támesis introduciendo un material radiactivo de la misma densidad que el lodo. Su recorrido se detectó arrastrando tubos geiger a lo largo del fondo. Con métodos similares se puede seguir el movimiento de arena y cantos rodados bajo agua.

Los escapes en tuberías de agua se detectan disolviendo bicarbonato sódico que contiene ^{24}Na (γ) en el agua que se hace pasar por la tubería. Luego se inspecciona el suelo próximo al lugar del escape con un contador geiger para detectar la presencia del ^{24}Na , por ejemplo, bajando el tubo Geiger por un agujero realizado en el suelo. En el caso de oleoductos se inyecta en el petróleo una solución que contiene ^{82}Br (γ) y que se hace pasar por la tubería. A continuación le sigue un rascador (dispositivo para limpiar el interior de un oleoducto) con un contador Geiger. Cuando el rascador pasa junto a un escape, se registra el líquido radiactivo que ha escapado al suelo.

7.2. Descubrimiento de la fotosíntesis

El descubrimiento del mecanismo de la fotosíntesis se debe, en gran parte, a la técnica de los trazadores. Para ello se expuso la planta a la luz solar, durante dos minutos, en una atmósfera conteniendo dióxido de carbono marcado con ^{14}C . Se detuvo entonces la fotosíntesis metiendo a la planta en nitrógeno líquido y se separaron los distintos productos químicos en la planta, identificándose más de 50 compuestos con ^{14}C , lo que da una idea de la velocidad de la fotosíntesis. Se repitió el proceso reduciendo paulatinamente el tiempo de exposición al sol, hasta que una exposición de dos segundos produjo solamente los dos o tres primeros compuestos. Este procedimiento permitió descubrir la secuencia de reacciones.