









REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

CURSO DE APLICACION DE RADIOISOTOPOS

PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS

María Cristina Palcos de Enquin

R I - 22 j.

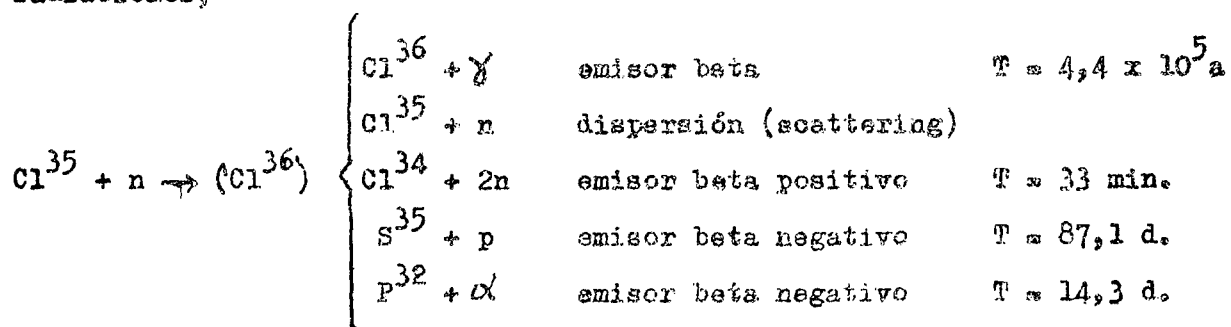
## PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS

La producción de isótopos artificiales es un tema de gran interés dada la amplia difusión adquirida por el empleo de los mismos en física, química, biología y diversas ramas de la ciencia y de la técnica.

La preparación de estos radioisótopos comprende el problema físico de su obtención por medio de reacciones nucleares y el problema químico de su separación y purificación.

### Reacciones nucleares

Según Bohr, cuando un proyectil nuclear interacciona con un núcleo, forma un núcleo compuesto intermedio de vida muy breve, que pueda desintegrarse en distintas formas, dando origen a un nucleído y una o más partículas o radiaciones;



Las reacciones se anotan en este orden: átomo blanco, proyectil, partícula emitida y nucleído producido:  $\text{Cl}^{35} (n,p) \text{S}^{35}$ .

Del ejemplo anterior se deduce que si produjéramos esa reacción en un reactor obtendríamos  $\text{Cl}^{36}$ , contaminado con fósforo y azufre, pero como los períodos de éstos son mucho más cortos que los del nucleído que interesa, pueden dejarse decaer.

La probabilidad de que una reacción se produzca se expresa como sección eficaz (cross section) y se mide en Barns, unidad de superficie igual a  $10^{-24} \text{ cm}^2$ . Podemos imaginar que los núcleos de los átomos estuvieran rodeados por una pequeña área de  $\sigma \text{ cm}^2$ , y que la reacción se produjera de acuerdo a la probabilidad de que un proyectil incidiera en esa área. El número de procesos nucleares que tendrá lugar en un blanco delgado, es decir que no atenúe notablemente el haz incidente, será:

$$P = N \sigma I x \quad (1)$$

N: número de núcleos blanco por  $\text{cm}^3$

$\sigma$ : sección eficaz en  $\text{cm}^2$

I: número de partículas incidentes

x: espesor de la capa en cm.

La sección eficaz total representa la probabilidad de que la partícula abandone el haz por cualquiera de los procesos que están en competencia, y la sección eficaz parcial, la probabilidad de un determinado proceso nuclear:  $\sigma_{\text{scat}}$ ,  $\sigma_{\text{captura}}$ , etc.

La sección eficaz para una determinada reacción varía con la energía del proyectil.

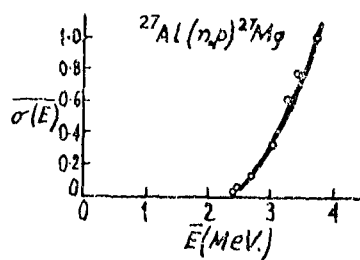


Fig. 1 - Curva de excitación para la reacción  $\text{Al}^{27}(\text{n},\text{p})\text{Mg}^{27}$ .

La menor energía necesaria para producirla se denomina umbral.

Entre las numerosas reacciones que se conocen vamos a considerar sólo las más importantes para la producción de isótopos con alto rendimiento.

#### Reacciones nucleares producidas con neutrones

La más importante es la captura de neutrones o reacción  $(\text{n}, \gamma)$ , por medio de la cual se pueden obtener isótopos de todos los elementos comunes, excepto He, B, N, O, Ne, Mg y Al. Produce isótopos del mismo elemento irradiado con número de masa  $(A + 1)$ .

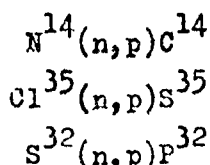


No presenta energía umbral y puede obtenerse con alto rendimiento con neutrones de baja energía (0,025 ev).

La reacción  $(\text{n},\text{p})$  generalmente requiere neutrones de mayor energía que la simple captura, ya que deben comunicar al núcleo blanco la suficiente energía de excitación para emitir un protón que debe vencer la barrera de potencial del núcleo. Esta aumenta con el cuadrado del número atómico, por lo tanto con neutrones de poca energía sólo podrán obtenerse reacciones  $(\text{n},\text{p})$  sobre núcleos livianos. Las secciones eficaces aumentan con la

energía del neutrón incidente, hasta alcanzar la energía en que otras reacciones como  $la(n, \alpha)$  y  $(n, 2n)$  entran en competencia.

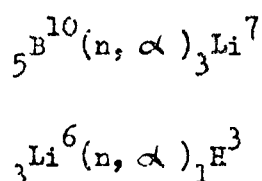
Los más importantes son:



que producen emisores beta muy usados.

La reacción  $(n, p)$  produce nucleídos con el mismo número de masa que el irradiado, pero con  $(Z-1)$ , beta activos, al igual que los producidos por la mayor parte de las reacciones  $(n, \gamma)$ , ya que estos procesos tienden a hacer mayor la relación  $n/p$  de la que le corresponde al nucleído estable de ese mismo número de masa.

La reacción  $(n, \alpha)$  produce nucleídos con  $(Z-2)$  y  $(A-3)$ . Alcanza más altos rendimientos con neutrones de varios MeV. Sin embargo existen dos casos importantes que pueden iniciarse con neutrones térmicos.



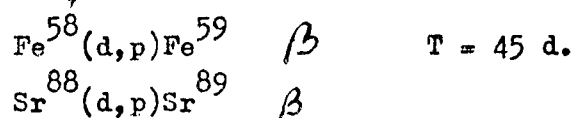
La primera se utiliza para detectar neutrones y la segunda para producir tritio.

Por último, citaremos la  $n, 2n$  que en general requiere energía del orden de 6-8 Mev y produce nucleídos de masa  $(A-1)$ , con deficiencia de  $n$ . Para volver a estabilidad estos nucleídos emiten beta positivo o desintegran por captura electrónica.

#### Reacciones iniciadas con partículas cargadas

Entre las producidas por deuterones acelerados, las más comunes son:

La reacción  $(d, p)$ , que da el mismo producto que  $la(n, \gamma)$



El inconveniente de esta reacción es que va acompañada de otras que producen actividades contaminantes, como por ejemplo:  $Fe^{58}(d, n)Co^{59}$   $Fe^{58}(d, 2n)Co^{58}$ , etc.

Puede obtenerse con menores energías de las que serían necesarias para que el deuterón penetrara la barrera de potencial del núcleo: proceso Phillips-Oppenheimer, que consiste en la ruptura del deuterón en el campo del núcleo, entrando solamente el neutrón al núcleo.

La reacción (d,n) presenta un umbral de 5 a 10 Mev. Con deuterones de energía mayores compite con ella la (d, 2n).

Se usó para preparar  $C^{11}$ , emisor beta positivo de 20 min., utilizado en los primeros trabajos con indicador.  $B^{10}(d,n)C^{11}$ .

La reacción (d, $\alpha$ ) produce nucleídos con (Z-1) y (A-2). Encuentra alta barrera de potencial, pero sobre los núcleos livianos permite obtener algunos isótopos que no pueden obtenerse en otra forma.

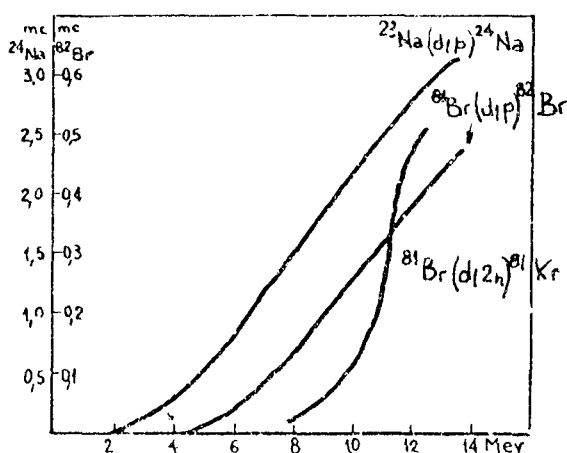


Fig. 2 - Curva de excitación para diversas reacciones, iniciadas con deuterones.

Las reacciones ( $\alpha$ , n); ( $\alpha$ , 2n) y ( $\alpha$ , 3n) se producen a mayor energía, y siempre en competencia.

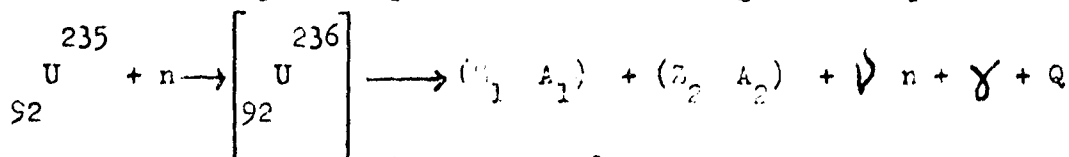
Partículas de energía mayor de 50 Mev producen reacciones de evaporación (spallation): emisión de numerosas partículas o fragmentos del nucleído irradiado. Presentan secciones eficaces del orden de  $10^{-4}$ b.

### Fisión nuclear

Desde su descubrimiento en 1939 por Otto Hahn, esta reacción nuclear ha sido estudiada con gran interés en vista de sus enormes posibilidades como fuente de energía y de isótopos.

Los núcleos más pesados cuando son excitados por la incidencia de fotones o partículas aceleradas fisionan, produciendo por ruptura de su núcleo dos fragmentos relativamente grandes o productos de fisión y dos o más neutrones. Durante la fisión se libera una gran energía y se emite radiación gamma.

La fisión del  $U^{235}$  puede representarse con el siguiente esquema:



por ejemplo: fisión de  $U \rightarrow {}_{57}^{147}\text{La} + {}_{35}^{87}\text{Br} + 2,5 n + 225 \text{ Mev.}$

donde  $Z_1 \ A_1$  fragmento liviano

$Z_2 \ A_2$  fragmento pesado

$\nu$  : número de neutrones por fisión: 2,5

$Q$  : energía cinética de los fragmentos y neutrones

Los  $Z$  van de 30 (Zn) a 66 (Dy) y los  $A$ , de 70 a 166.

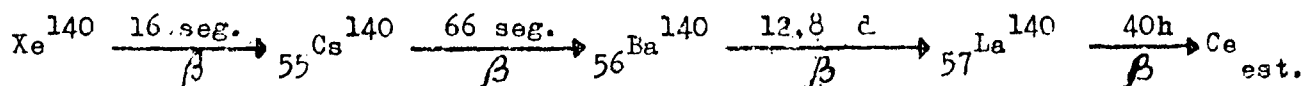
Se cumplen las leyes de conservación de la masa

$$\nu n + A_1 + A_2 = 236$$

y conservación de la carga  $Z_1 + Z_2 = 92$

Los fragmentos no están determinados sino que deben ser complementarios. Debido a que los nucleídos pesados capaces de fisionar: U, Th, Pu tienen una relación  $n/p$  más alta que la que le corresponde a los de la zona media de la tabla, donde se encuentran los fragmentos de fisión, estos resultan todos emisores beta.

Ejemplo de cadena formada en fisión:



Se producen más de 300 isótopos radiactivos, si bien muchos de ellos debido a su corta vida, no hallan aplicación.

Se entiende por rendimiento de fisión de un determinado elemento:

$$\eta = \frac{\text{núm. de fis. que producen dicho nucleído}}{\text{cien fisiones}}$$

Representando los rendimientos de fisión en función del número de masa del producto obtenemos la curva de rendimientos de fisión cuya forma



depende de la naturaleza y energía de la partícula incidente y el núcleo fisionante.

Puede producirse mediante irradiación con neutrones térmicos. La sección eficaz en este caso es de 550 b para  $U^{235}$  y 4 b para U natural. Con neutrones de mayores energías por ejemplo 10 Mev, la sección eficaz se reduce a 0,7 b y para partículas cargadas como p,d o  $\alpha$  las secciones eficaces son aún menores.

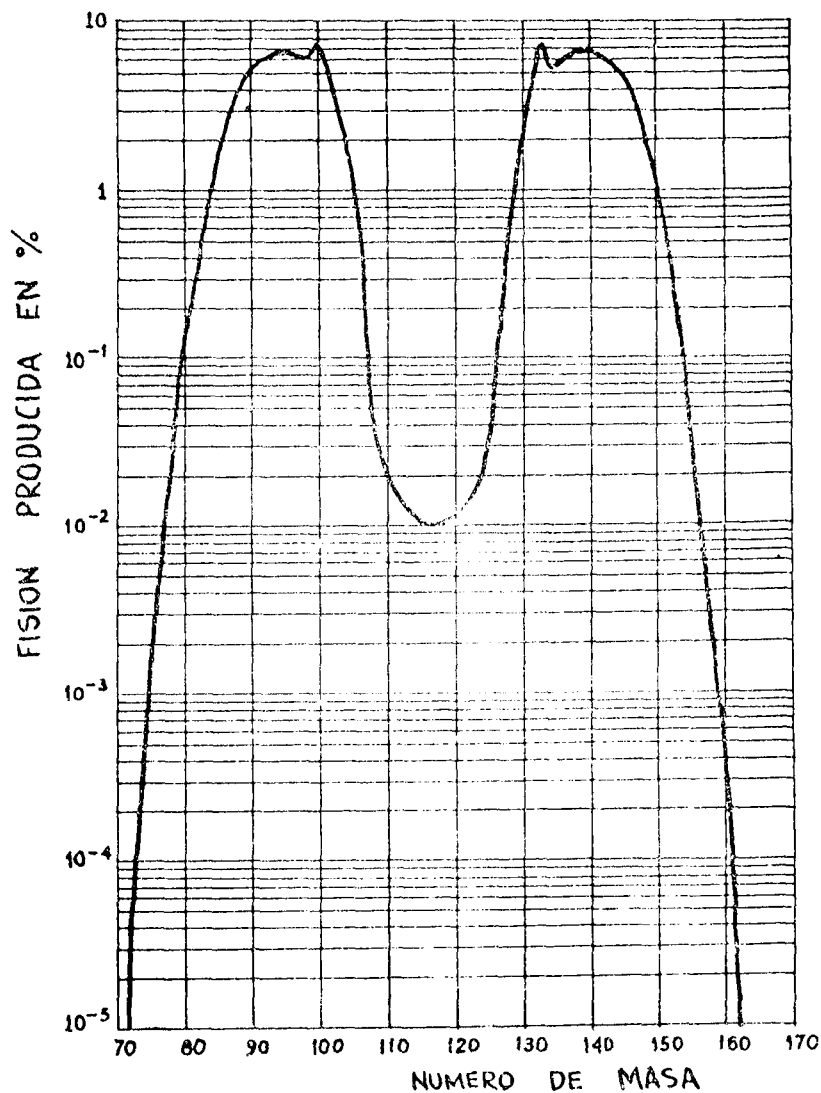


Fig. 3 - Curva de rendimientos de fisión de  $U^{235}$  con neutrones lentos.

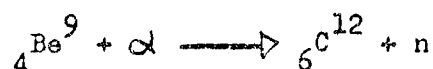
## Irradiaciones con neutrones

rones utilizados en la producción de radioisótopos pueden obtenerse en tres tipos de fuentes:

- 1) fuentes de laboratorio
- 2) reacciones producidas en aceleradores de partículas
- 3) reactores nucleares

### Fuentes de laboratorio

Al primer tipo pertenecen las fuentes que aprovechan las partículas emitidas por sustancias radiactivas naturales para producir reacciones con algunos núcleos livianos.



Las alfas pueden ser las emitidas por el Ra o el Rn. Una fuente compuesta por 1 g de Ra + 5 g de berilio en polvo mezclados íntimamente, emite  $10^7$  n/seg. Presenta una intensa radiación gamma que obliga a utilizar fuerte protección de plomo. Puede hacerse también con Po. Son fuentes sencillas de preparar y trasladar, duran mucho tiempo pero el flujo resulta pobre para obtener grandes actividades.

Los neutrones emitidos presentan un amplio espectro de energías, hasta varios Mev. Como las reacciones con neutrones rápidos tienen secciones eficaces bajas comparadas con la captura de neutrones de bajas energías, la única forma de obtener actividades en cantidad suficiente para uso de laboratorio será aprovechar la alta sección eficaz de la captura  $(n, \gamma)$ . Para reducir la energía de los neutrones se utilizan sustancias moderadoras, que disminuyen la velocidad del neutrón en sucesivos choques. Deben ser sustancias que no tengan tendencia a absorber neutrones. Con este objeto se usa el agua o la parafina.

Por lo tanto rodeando la fuente con 15 cm de espesor de parafina tendremos prácticamente todos los neutrones reducidos a energías del orden de las que poseen las moléculas de un gas debido a la agitación térmica: éstos se conocen con el nombre de neutrones térmicos.

Existen otras fuentes más baratas, que aprovechan la reacción  ${}_4\text{Be}^9(\gamma, n){}_2\alpha$  con emisores gamma de más de 1,6 Mev, como el  $\text{Sb}^{124}$  de  $T = 60$  d. Tienen la ventaja de que sus neutrones son casi monoenergéticos.

### Aceleradores de partículas

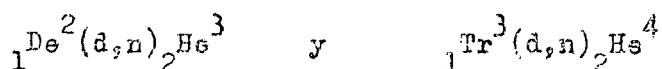
Los más antiguos, tipo Cockroft-Walton, son fuentes de alta tensión.

La caída de voltaje se aplica a lo largo de un tubo de descarga para acelerar deuterones, protones o alfas, hasta energías de alrededor de 1 Mev.

Los Van de Graaff son generadores electrostáticos que permiten acelerar las mismas partículas hasta energías de aproximadamente 8 Mev.

Entre las numerosas reacciones que se pueden iniciar con tales partículas mencionaremos por ser de buenos rendimientos:

- a) para aceleradores de energías inferiores a 1 Mev, reacciones sobre núcleos muy livianos, tales como:



Dan neutrones rápidos y casi monoenergéticos.

- b) Desde 0,8 Mev en adelante.



Dan buenos flujos de neutrones, con un amplio espectro de energías. La energía máxima aumenta con el aumento de energía del deuterón incidente.

En ciclotrones y sincrociclotrones, que aceleran deuterones a energías máximas de 15 y 30 Mev, respectivamente, se puede usar con provecho las dos reacciones que citamos anteriormente. Con deuterones de más de 14 Mev la primera da neutrones con energía máxima de 18 Mev y en el moderador se obtienen flujos  $10^7 - 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup> seg.

### Reactores nucleares

Es un sistema construido en forma de mantener la reacción U (n, fisión) dando productos de fisión y más neutrones, a una velocidad controlada y constante, es decir que la reacción no cese ni se multiplique más allá de los límites seguros. Producen un alto flujo de neutrones ( $10^{10} - 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> seg de acuerdo al modelo de que se trate)

Estos altos flujos hacen de la pila la más importante fuente de isótopos de gran actividad, ya que produce buenos rendimientos incluso con elementos de baja sección eficaz y ha permitido separar en cantidades pesables isótopos tales como el C<sup>14</sup> y elementos artificiales como el tecnecio, plutonio, neptunio, etc.

Presentan además la ventaja sobre los aceleradores, de que en ellas pueden irradiarse muchas muestras a la vez. En su estructura se dejan nu



nerosos canales a través del moderador, por los cuales se desliza un tren de bloques de grafito en el que se ubican cilindros de aluminio de 3 a 50 cc.. En estos envases se colocan las sustancias a irradiar. Cuando hace falta irradiar cantidades mayores por largo tiempo se pueden colocar recipientes especiales en la zona del reflector, como se hace para tritio y  $\text{Co}^{60}$

Las sustancias blanco pueden ser metales, óxidos, carbonatos (para los alcalinos o alcalino-térreos) o sales de K, para los halógenos. La temperatura, en los modelos clásicos, suele mantenerse inferior a 75°. Debe tenerse en cuenta que la intensa radiación puede descomponer algunas sustancias, o modificar los materiales. Asimismo, es necesario tomar precauciones para no contaminar seriamente el reactor. Cuando se irradia un compuesto, el átomo que acompaña al que se quiere irradiar deberá elegirse de modo de no dar una gran actividad contaminante o, si la produce, que sea de período mucho más corto que la que se busca.

En cuanto a la forma de calcular el rendimiento que puede esperarse de una irradiación dada, requiere el conocimiento del flujo de neutrones  $\Phi$  en la zona del reactor de que se trate, la sección eficaz  $\sigma$  y el tiempo de irradiación. Para simplificar los cálculos consideraremos el flujo constante durante el tiempo  $t$  que dure la irradiación.

La fórmula que se obtiene es análoga a las que daban el crecimiento de una hija radiactiva a partir de una madre de período largo: el acelerador o pila, en este caso.

$$A = \frac{dN}{dt} = N \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

A: actividad producida, en des/seg, al final de la irradiación

N: número de átomos del blanco irradiado.

$\Phi$ : flujo de partículas bombardeantes en  $\text{n/cm}^2 \text{ seg.}$

$\lambda$ : constante de desintegración del nucleído formado en 1/seg.

t: tiempo de irradiación.

Tratándose de irradiaciones con neutrones lentos, el flujo no se altera sensiblemente dentro de la muestra irradiada, a menos que sea de un material especialmente absorbente de neutrones como el Cd o el Eu. Por esta razón no interviene el espesor de la muestra, que aparecía en la fórmula (1).

Cuando el tiempo de irradiación es largo comparado con el período del isótopo que se busca, tendremos:

$$A = N \sigma \Phi$$

Se ha llegado a una situación de equilibrio: la velocidad del proceso de formación del nucleído es igual a la velocidad de desintegración del mismo. Por lo tanto no se mejoraría el rendimiento aunque se prolongara la irradiación. La actividad resultante llamada actividad a saturación es la máxima para ese flujo y esa reacción.

Problema: Hallar cuántos milicurios de  $\text{Na}^{24}$  pueden obtenerse irradiando a saturación un gramo de sodio natural con un flujo de neutrones de  $10^{11} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$ .

Reacción utilizada:  $\text{Na}^{23}(\text{n}, \gamma)\text{Na}^{24}$

Sección eficaz para captura de n térmicos:  $\sigma = 0,53 \text{ barns}$

$\text{Na}^{24}$  emisor  $\beta$  y  $\gamma$ , de  $T = 15 \text{ horas}$

$$A = N \sigma \Phi$$

$$A = \frac{1,6 \times 6,06 \times 10^{23}}{23 \text{ g}} \times 0,53 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$$

$$A = 139,6 \times 10^7 \text{ des/seg}$$

Recordando que un curio =  $3,7 \times 10^{10} \text{ des/seg}$

$$1 \text{ mC} = 3,7 \times 10^7 \text{ des/seg}$$

por lo tanto

$$\frac{139,6 \times 10^7}{3,7 \times 10^7} = 37,7 \text{ mC}$$

Se han obtenido 37,7 mC de  $\text{Na}^{24}$

#### Reacciones con partículas cargadas

Se obtienen con los aceleradores ya citados, de los cuales los más usados por el amplio rango de energía que producen, son los ciclotrones y sincrociclotrones. Los primeros van hasta 15 Mev pero pueden dar un flujo de partículas varias veces más intensos que los segundos, que en cambio pueden alcanzar energías mayores. El sincrociclotrón de la Comisión puede acelerar alfas a 60 Mev y el de Berkeley, protones hasta 450 Mev.

Si se desean haces intensos y de gran energía deben colocarse las sus-

tancias a irradiar dentro de la cámara evacuada del ciclotrón. Con este objeto se dispone de unos blancos (targets) de cobre o aluminio provistos de pequeñas perforaciones que se llenan con la sustancia a irradiar. La cantidad que se puede poner es de alrededor de 150mg. Tampoco pueden hacerse irradiaciones muy largas ya que sólo se puede trabajar con una muestra a la vez. Deben elegirse compuestos que resistan la temperatura producida por la incidencia del haz, sin fundirse ni volatilizarse. Las drogas a irradiarse se elegirán muy puras, sobre todo de elementos que puedan activarse mucho.

El rendimiento es difícil de calcular cuando se trata de partículas cargadas, que van perdiendo su energía al atravesar el blanco.

Por estas razones es fácil ver que si bien los ciclotrones son muy útiles, por la variedad de reacciones que pueden producir, como instrumento de investigación sólo en pocos casos presentan ventajas para la obtención de isótopos en cantidades mayores.

#### Separación y purificación de isótopos radiactivos

Para adaptar a la radioquímica los métodos tomados de la analítica común hay que tener en cuenta diversos factores: la limitación de tiempo, los riesgos de ciertas manipulaciones, los comportamientos anómalos que pueden presentarse debido a que a veces se trabaja con cantidades del orden de  $10^{-14}$  g, es decir concentraciones muy por debajo de lo que en química se llaman trazas ( $10^{-6}$ g). El criterio de pureza cambia fundamentalmente; se busca un nucleído puro desde el punto de vista radiactivo. El criterio de pureza a aplicarse será la medición de su período, de la energía máxima de su radiación o del espectro completo de la misma.

También conviene tener en cuenta que es frecuente que los isótopos de elementos fácilmente hidrolizables o poco solubles en ese medio den radiocoloides.

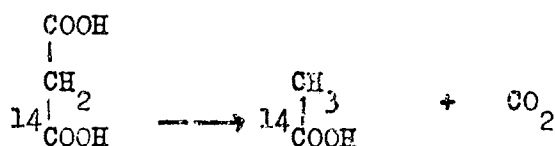
Las dificultades originadas en la pequeña concentración de la sustancia activa, como el peligro de adsorción en los recipientes o en pequeñas impurezas o formación de radiocoloides, pueden evitarse agregando algunos miligramos del átomo estable correspondiente, que actuará como portador o "carrier" Ej.: para  $I^{131}$ ,  $I^{127}$  estable.

El portador puede ser isotópico como en el ejemplo citado o no isotópico, cuando se agrega otro elemento que se comporta en forma parecida al isótopo que queremos separar en el proceso de extracción. Ej.: renio para tecnecio, elemento artificial que no tiene isótopos estables.

Cuando se agrega un portador debe tenerse presente que los átomos activos formados por irradiación pueden hallarse en más de un estado de va-

lencia, que siempre intercambia con el portador. Ej.:  $S^{35}$  como sulfato y portador sulfato. Se aconseja someter al conjunto a una reducción energica seguida de oxidación, de manera que el elemento recorra todos los posibles estados de oxidación.

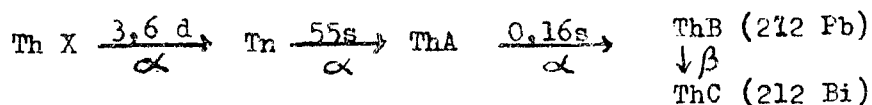
En la mayor parte del trabajo radioquímico suponemos entonces que los isótopos activos se comportan químicamente como los átomos estables del mismo elemento, pero existen algunos casos en que se produce cierto fraccionamiento debido a las diferentes masas atómicas en cuestión. Este efecto es más notable con elementos livianos como el tritio usado como indicador de hidrógeno. La relación de sus masas  $Tr/H \approx 3/1$ . Esta diferencia de masa puede afectar la energía de las ligaduras. Se observó que calentando ácido malónico marcado, el acético formado se enriquece en  $C^{14}$  y se empobrece el  $CO_2$  desprendido.



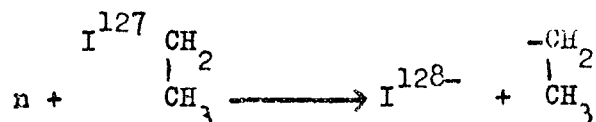
Existen dos métodos propios de la radioquímica que permiten obtener altas actividades específicas, es decir, alta relación de átomos activos con respecto a átomos estables de portador. La actividad específica se expresa en cuentas por minuto por miligramo de sustancia.

El primer método aprovecha la energía de retroceso que se produce cuando un átomo emite una partícula. La sustancia hija queda con cierta energía cinética y desprovista de varios electrones orbitales por lo que se comporta en cierta forma como un ión. Poniendo una lámina metálica a unos milímetros sobre la fuente y aplicando entre ésta y la lámina una cierta diferencia de potencial, se pueden recoger las hijas con una eficiencia del 60 al 90%, de acuerdo a la naturaleza del depósito de la madre y de la superficie colectora.

Este método da fuentes muy puras de ThB y ThC.



El segundo método, de Szilard-Chalmers, aprovecha la ruptura de las uniones químicas y el cambio de estado de oxidación del átomo irradiado, para separarlo del compuesto que sirvió de blanco.



Quedan 80 ev disponibles para romper uniones de aproximadamente 5 ev.



Se agita con agua con IK o  $\text{SO}_2$  para separar el  $\text{I}^{128}$  al estado de yoduro.

Entre los procedimientos de la química común especialmente usados en radioquímica, se encuentran las reacciones por precipitación, los métodos electroquímicos, extracción por solventes, cromatografía e intercambio iónico.

### Reacciones de precipitación

En las reacciones de precipitación se aprovechan los fenómenos de co-precipitación y adsorción. Un ejemplo lo constituye la precipitación de microcomponente Ra con  $\text{SO}_4\text{Ba}$ .

Cuando los precipitados son gelatinosos y de gran superficie el efecto de adsorción es muy grande. Esto se aprovecha para algunas separaciones a partir de una mezcla de radioisótopos. Como ejemplo se puede citar la separación de los alcalinos de todos los que forman hidróxidos insolubles. Para ello se precipita hidróxido férrico en la solución y éste arrastra la mayor parte de las actividades sin portador. Esta operación recibe el nombre de "scavenging" o barrido. A la actividad que se quiere conservar habrá que agregarle un portador de retención, para que quede en solución.

### Extracción por solventes

La separación de isótopos utilizando la extracción por solventes se basa en el hecho de que los microcomponentes se distribuyen entre los dos solventes con el mismo valor del coeficiente de partición que cuando están presentes en concentraciones mayores.

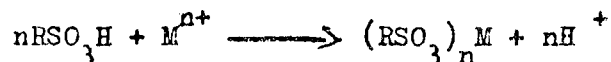
Este método, así como también el de intercambio iónico sobre resinas, debe muchos de sus avances a la búsqueda incesante de procedimientos que pueden adaptarse al uso en columnas y ser manejados por control remoto, para satisfacer las necesidades de la tecnología del uranio y combustibles nucleares. Se han usado en la radioquímica, además de los solventes clásicos, otros como las dicetonas, los butil-fosfatos, etc. Asimismo, se utiliza la formación de complejos orgánicos que son fácilmente solubles en disolventes orgánicos, con lo que los métodos por extracción se amplían mucho.

### Resinas de intercambio

Están formadas por polímeros de compuestos orgánicos, con grupos activos como  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{COOH}$ , etc. Fijan los cationes (o aniones según la resina) en una banda angosta en la parte superior de la columna. Luego, por medio de eluyentes adecuados o pH determinados, se van sacando las actividades a

pareciendo primero las que tienen menor afinidad por la resina. Quedan más firmemente unidas las de mayor valencia y dentro de la misma valencia, las de menor tamaño iónico.

Podemos representar lo que sucede en una resina por la que se pasa una solución de un metal M , de valencia n, en la siguiente forma:



R: radical orgánico unido al grupo activo.

Son especialmente útiles para separaciones de tierras raras y elementos como sodio, que no dan reacciones de precipitación suficientemente específicas.

Encuentran aplicación para el estudio del estado de oxidación y valencia de elementos que no podían obtenerse en cantidades pesables. Entre las resinas más usadas se encuentran las Dowex 50, IRA 120 etc.

#### Métodos electroquímicos

Se pueden depositar actividades sin portador en chapas metálicas por electrólisis. En algunos casos, como el Po, no es necesario aplicar diferencia de potencial externo. Se deposita fácilmente sobre lámina de Cu, Pt, Ag.

#### Cromatografía

Puede hacerse sobre alúmina, carbón o caolín. Un método muy útil para analizar actividades sin portador es la cromatografía sobre papel. Elijiendo disolvente y eluyentes adecuados se logra desarrollar cromatogramas que pueden medirse directamente en contador Geiger-Müller provistos de una ranura angosta en la protección de plomo.

#### Volatilización

Es un método muy rápido y la actividad se obtiene muy pura. Como aplicaciones del mismo se pueden citar: la separación de rutenio como tetróxido y del cadmio, obtenido por irradiación de plata con deuterones. En este caso se calienta el blanco de plata a 900° en el vacío; el cadmio que volatiliza se recoge sobre una chapa de metal frío.

Habiendo pasado revista rápidamente a los principales métodos usados en radioquímica, conviene recordar que en todos ellos se persigue fundamentalmente la pureza radiactiva y muchas veces se sacrifica el rendimiento cuantitativo de las operaciones, prefiriéndose los métodos más específicos. Si se quiere hallar el rendimiento cuantitativo de la operación se agrega un portador inactivo en cantidades conocidas y se lo pesa o titula al final de la purificación.