

“Descripción de los ciclotrones en sus líneas constructivas generales”

Alejandro Berardinelli – vicaler en gmail.com

Monografía vinculada a la conferencia del profesor Brian F. Hutton sobre "Mejoras en la calidad de imágenes PET mediante modelado de resolución y tiempo de vuelo (TOF, time of flight)" el 16 de Marzo del 2010"

Resumen — El uso de ciclotrones se ha extendido en gran medida al uso medicinal más allá el uso nuclear. Se introduce la teoría de átomos necesaria para comprender la irradiación de energía por parte de los radioisótopos mediante los cuales se obtienen radiografías de pacientes. Se explica además el funcionamiento y la utilización de ciclotrones para la generación de los radioisótopos mencionados.

I. INTRODUCCIÓN

En la medicina más allá del tratamiento de las enfermedades interesa especialmente su pronto y acertado diagnóstico y de esta forma identificar el origen benigno o maligno de determinados tumores. La radiología permite evaluar el funcionamiento de órganos para la aplicación de tratamientos específicos siendo utilizada mayormente para el diagnóstico. Las aplicaciones de radiología y de tomografía de emisión de positrones, PET por su sigla en inglés, abarcan hoy en día la oncología, neurología, radiología y psiquiatría entre otras, resultando la lista de aplicaciones bastante extensa.

Estas aplicaciones no podrían ser posibles sino se contara con ciclotrones utilizados para la aceleración de partículas generando así los radioisótopos. Mediante las radiaciones de estos últimos es que se generan las imágenes.

La radiología y la medicina nuclear se basan en varias disciplinas como ser la química, física y matemática.

En el presente documento se brinda una introducción a la utilización de la radiografía y sus áreas de aplicación. Se explica con mayor detalle el funcionamiento de los ciclotrones y como, a partir de estos, son generados los radioisótopos. Se describen además conceptos como el decaimiento y la captación de radioisótopos.

II. CONTEXTO

En esta sección se tratan resumidamente conceptos y propiedades así como algunas definiciones que resultan necesarias para comprender el resto del trabajo.

La radiología [1] es una especialidad médica que se ocupa de generar imágenes (radiografías) del interior del cuerpo humano mediante diferentes agentes físicos. Durante mucho

tiempo las técnicas más comunes fueron los rayos X o el ultrasonido. Dentro de esta especialidad se encuentra la medicina nuclear basada, entre otros, en el uso de radiofármacos o sustancias radioactivas formados por isótopos radiactivos. Los radiofármacos son comúnmente conocidos como trazadores.

La radiología es utilizada en la medicina con dos motivos principales [2]. Por un lado para agentes terapéuticos y por otro de diagnóstico. Respecto al diagnóstico, además de utilizar las radiaciones, se administran al paciente, típicamente vía intravenosa, los ya mencionados radiofármacos. Dado que cada órgano del cuerpo humano actúa en forma diferente del resto, sus reacciones a los radiofármacos también son distintas. Esto implica que para estudiar el funcionamiento de un determinado órgano se apliquen diferentes radiofármacos. Algunos ejemplos de estos son el Cromo - 51 y el Selenio - 75 y el Flúor - 18. Este último ha probado ser más preciso y menos invasivo en el paciente.

Estos radiofármacos permanecen en el cuerpo del paciente durante algunas horas. Conocido este tiempo como semiperíodo o decaimiento. Para algunos el período es de minutos y para otros de días. Dado que los utilizados para la radiología solo tienen duración de horas deben ser generados previo a la administración al paciente. Esto implica que los hospitales deban contar con equipamiento de alto costo para generarlos previo al estudio.

Los radiofármacos parten de los radioisótopos generados a partir del ciclotrón. La forma en la que son generados así como el funcionamiento de los ciclotrones serán introducidos y explicados con mayor detalle en la sección siguiente. Por ahora interesa dejar en claro que se parte de los radioisótopos generados dentro del ciclotrón por lo que resulta necesaria la fabricación de pequeños ciclotrones de uso médico dispuestos en los hospitales. Los ciclotrones aceleran las partículas y de esta forma se logra la emisión de energía por parte de estas.

PET es una técnica de radiología muy utilizada en la actualidad [6]. Se basa en radiofármacos de carbono, nitrógeno, oxígeno y flúor que tienen un período de desintegración muy corto como se puede ver en la tabla 1.

Radioisótopo	Tiempo en Mins
Carbono	20
Nitrógeno	12
Oxígeno	2
Flúor	110

Tabla1 – tiempo de desintegración de radioisótopos

PET permite investigar hechos que ocurren a nivel celular, en forma no invasiva, no siendo posible con ningún dispositivo convencional como ser rayos X, tomografías computarizadas o resonancias magnéticas.

Toda esta teoría se basa en la estructura de los átomos [3].

Los átomos están constituidos por neutrones (cargas neutras) y positrones (cargas positivas) residentes en el centro del mismo (núcleo) y electrones (cargas negativas) que giran en órbitas alrededor del núcleo - Figura 1 [4] - asemejándose a un sistema solar en miniatura. Naturalmente, el átomo busca el equilibrio existiendo situaciones en las que esto no es posible. Una situación es cuando absorbe energía del entorno la cual no puede retener por mucho tiempo o porque el número de cargas positivas es superior a las negativas residentes en la órbita dando lugar al isótopo radiactivo.

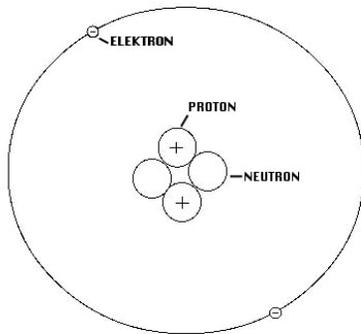


Figura 1 – Estructura del átomo [4]

En cualquiera de estas situaciones el átomo liberará partículas o energía excedente mediante radiaciones, proceso conocido como decaimiento radioactivo. En este proceso se irradian ya sea rayos alfa, beta o gamma.

La liberación de energía se da cuando un positrón colisiona con un electrón dando origen a dos fotones gamma que viajan en sentidos opuestos con una carga de 0.5 MeV. Esta energía, en caso de ser detectada desde dos puntos opuestos, indica la presencia de los fotones mencionados y por lo tanto la ubicación de un radioisótopo. Para la detección el paciente debe ser rodeado de detectores y a esto se debe la forma circular de estos equipos.

III. CICLOTRONES

La generación y administración de radioisótopos al paciente permite la detección de emisiones de radiaciones para la construcción de imágenes. En esta sección se detallará el proceso de generación de radioisótopos en un ciclotrón y

como estos emiten dichas radiaciones. Además de cómo estos son detectados.

Habiendo introducido como se genera la radiación de los radioisótopos, mediante la estructura de los átomos, interesa detallar como son generados estos en los ciclotrones.

Revisando un poco la historia [7], previo a la utilización de ciclotrones se utilizaban aceleradores de partículas que funcionaban en base a campos magnéticos muy grandes.

De los primeros aceleradores se encuentra el de Cockcroft-Walton. Este acelera las partículas multiplicando el campo magnético abriendo y cerrando llaves en forma oportuna junto con un conjunto intrincado de capacitores dispuestos con diodos tal como se puede ver en la figura 2. Estos aceleradores eran capaces de generar potencias de 800 KeV a partir de 200 KeV.

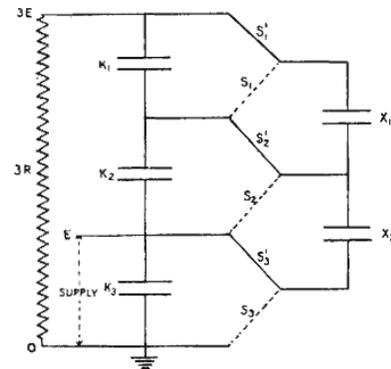


Figura 2 – Estructura multiplicador de voltaje de Cockcroft-Walton

La dificultad en el mantenimiento de altos voltajes llevó a desarrollar nuevos aceleradores usando voltajes menores sucesivas veces, o sea, durante varios ciclos. Fue así como en 1931, Lawrence y Livingstone, generaron un potencial de 80 KeV a partir de poco a poco menos de 2 KeV dando lugar al ciclotrón. Cabe destacar que el ciclotrón acelera las partículas en forma circular mientras que el de Cockcroft-Walton lo hace en forma lineal. Esto presenta una ventaja importante ya que se requiere menos lugar físico respecto a los que aceleran en forma lineal.

A. Estructura

Los principales componentes [8] que forman un ciclotrón son listados a continuación y mostrados en la figura 3:

Imán: Se coloca un polo sobre las “D” y el otro polo por debajo generando así un campo magnético perpendicular a las partículas y de esta forma confinar el haz de partículas a un plano perpendicular al campo.

Electrodos huecos: Son las dos placas grises que se ven en la figura 3 en forma similar a una “D”. Se disponen separados entre sí y están conectados a un oscilador de voltaje. Mediante la alternancia de las cargas positiva y negativa a estas “D” es que se consigue la aceleración.

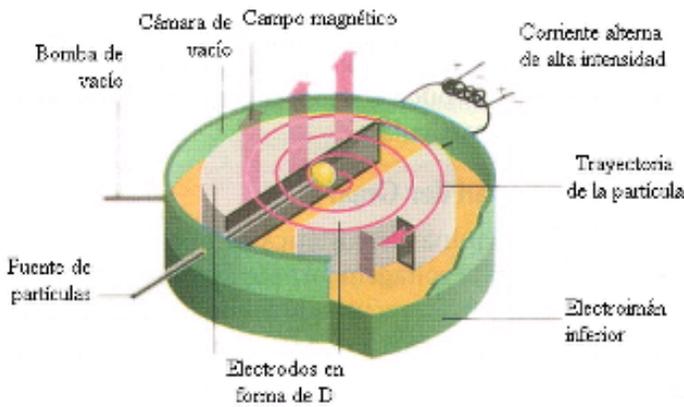


Figura 3 – Estructura de un ciclotrón [8]

Fuente de iones: Formada por cátodos para la producción de positrones y neutrones. Estos iones son inyectados radialmente en la zona central del imán. Fuente de partículas según la Figura 3.

B. Funcionamiento

La aceleración se realiza mediante la acción de dos campos [8]. Uno magnético y uno eléctrico oscilante que acelera los iones haciéndolos girar en órbitas de radio y energía crecientes. Las ya mencionadas “D” son cámaras semicilíndricas, huecas que se encuentran separadas entre sí. Ambas están conectadas a los bornes de un circuito eléctrico creando una diferencia de potencial alterna de una determinada frecuencia. Además están comprendidas entre los polos de un electroimán que proporciona un campo magnético constante y normal a la superficie que estas forman. El espacio interior a las “D” está libre de campo eléctrico y por ende cualquier ión que transite dentro de este no será acelerado. En resumen, el ión se acelera cada vez que cruza la “calle” entre las “D”.

El ciclotrón debe su éxito a que el tiempo que demora un ión en completar una vuelta dentro del campo magnético no se altera al aumentar la energía del ión.

Entonces, se parte de una partícula con una determinada carga q inyectada por la “fuente de iones” antes descrita y a partir de ahí comienza la aceleración como sigue (Figura4):

1. Partiendo con velocidad nula del punto donde fue inyectado el ión, este cruza el espacio entre las “D” ingresando a la “D” opuesta a la de su partida (supongamos D2) con una velocidad v_1 , velocidad generada por la diferencia de potencial entre las “D”.
2. El ión ingresa en D2 trazando un recorrido semicircular de radio r_1 a velocidad constante v_1 . El campo magnético es el que determina el recorrido circular [10]. Esto es, dado que la velocidad se da en el mismo plano en el que están dispuestas las “D” y el campo magnético es normal a estas, la fuerza resultante está en el plano de las “D” y es perpendicular a la velocidad. Así esta fuerza resulta

ser centrípeta sobre el ión describiendo este la trayectoria ya mencionada.

3. Abandona D2 para entrar en el campo eléctrico al cual se le ha invertido su polaridad y de esta forma vuelve a acelerarse. Dado que su energía aumenta en las sucesivas aceleraciones va describiendo semicírculos más amplios a una mayor velocidad. Por lo tanto, al entrar a D1 describirá un trazado de radio $r_2 > r_1$ a una nueva velocidad v_2 .
4. Ahora dentro de D1 traza nuevamente un recorrido semicircular con velocidad constante v_2 pero en la misma frecuencia. O sea, el tiempo permanece constante.

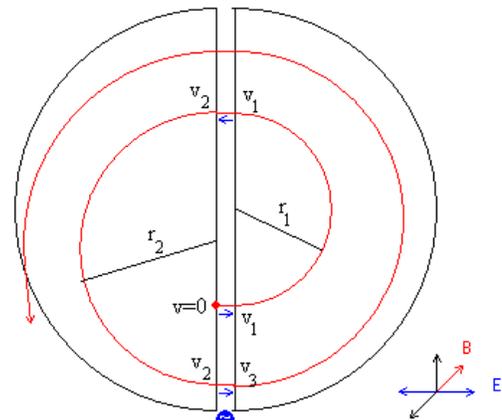


Figura 4 – Funcionamiento del ciclotrón [9]

Esta secuencia se repite hasta que el ión alcanza el radio máximo dependiente del tamaño del imán. En ese punto también alcanza su máximo de energía y ya puede ser utilizado para la aplicación deseada.

Su energía cinética final puede ser calculada multiplicando su carga q , por la cantidad de veces, n , que el ión atravesó el campo eléctrico multiplicada por el voltaje V aplicado a las “D”. La fórmula para la energía cinética del ión, en función de los parámetros mencionados queda [9]:

$$Ec = n \cdot q \cdot V$$

Habiendo explicado como se cargan los iones se continúa detallando la forma en la que esta se pierde.

Resta mencionar que los ciclotrones son equipos caros y su precio queda determinando en gran medida por el costo de los imanes de gran tamaño utilizados.

C. Carga y decaimiento

Luego de ser cargado, el átomo liberará la energía “sobrante” dando lugar así a la irradiación o decaimiento. Rutherford y Soddy plantearon a principios del siglo pasado, la ley del decaimiento exponencial [11], Figura 5[12].

Observaron que se podía asignar un tiempo a los materiales radioactivos en el que la actividad de los átomos decaía la mitad. A este tiempo lo llamaron vida media, también

conocido como semiperíodo. Luego de dos vidas medias, la actividad decaía a una cuarta parte de la original y así sucesivamente dando lugar al decaimiento exponencial.

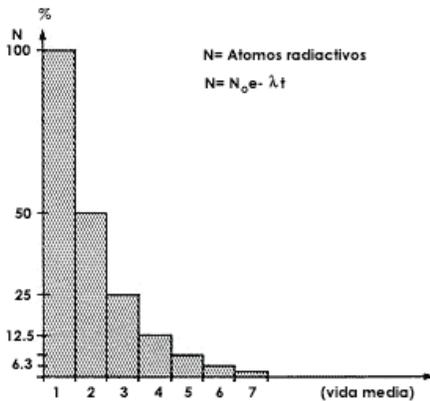


Figura 5 – Ley del decaimiento exponencial [12]

El decaimiento genera radiaciones alfa, beta o gamma provenientes del núcleo atómico [13]:

Decaimiento alfa: El átomo expulsa partículas alfa compuestas de dos neutrones y dos protones.

Decaimiento beta: Un neutrón se convierte en un protón o viceversa emitiendo una partícula beta.

Decaimiento gamma: Si la emisión de partículas alfa o beta no equilibra el átomo, se irradian partículas gamma.

D. Captación

Luego de que los iones han sido cargados se realiza su aplicación que puede ser tanto medicinal o nuclear para el estudio del comportamiento de los átomos. En el medicinal interesa principalmente captar estas emisiones. Para esto se crean equipos con forma de anillos detectores que permitan captar las emisiones provenientes en cualquier ángulo.

El componente principal [14] para la detección es el colimador el cual detecta la radiación gamma que interesa. Además filtra las emisiones provenientes de direcciones no deseadas, esto es, las que no tienen una dirección paralela a la del cabezal que los colimadores contienen.

Además del colimador otro componente importante es el cristal de centelleo el cual detecta los fotones gamma transformándolos en impulsos eléctricos. Estos impulsos son dirigidos a través de foto tubos llegando por último a un computador el cual procesa las señales y construye las imágenes a estudiarse.

Previo a presentar otros aceleradores se presenta la figura 6 que muestra la generación de la radiación, los fotones de 0.5MeV emitidos junto con los detectores y su disposición.

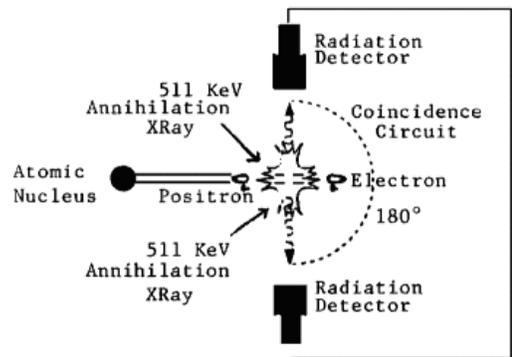


Figura 6 – Radiación y captación [15]

E. Otros aceleradores

Para dar cierre a esta sección se presentan brevemente otros aceleradores circulares.

En primer lugar el ciclotrón no es perfecto y tiene sus limitantes. Una de ellas es que este no permite generar grandes cantidades de energía para experimentos con partículas.

El Betatrón [8], construido en 1945, acelera las partículas por inducción magnética generando altas energías de 300MeV.

El sincrotrón [8], desarrollado en 1945, genera energías de 320MeV. La diferencia principal entre este y el ciclotrón, es que el sincrotrón aumenta el campo magnético en cada ciclo. Esto hace que el radio de la órbita permanezca prácticamente constante y que los imanes utilizados sean mucho menores. Existen dos variantes a este y son el sincrotrón de electrones y el de protones.

IV. CICLOTRONES EN LA MEDICINA Y MÁS

El uso de los ciclotrones en la medicina, como ya se ha mencionado, se divide en dos: diagnóstico médico y terapéutico (radioterapia). Permitiendo la marcación de ciertas sustancias como glucosa es que se utilizan para diagnósticos clínicos. Es válido recalcar la corta validez de los radioisótopos por lo que los equipos de detección deben contar con un ciclotrón para su producción in situ.

Previo a la utilización de ciclotrones y la radiación de isótopos, se utilizaban técnicas como los rayos X donde el paciente es “bombardeado” por haces de rayos cuya intensidad es detectada en el lado opuesto a la emisión. Por otro lado estos permiten solamente estudiar anatomía y no funcionalidad como lo permite PET.

Su uso no solo se resume al humano sino que también es llevado a animales y alimentos [5].

Respecto a los animales la misma ha sido utilizada en el ganado en la aplicación de vacunas que permitan combatir enfermedades parasitarias que afectan la producción. Los animales sometidos a tratamientos soportan durante períodos más prolongados la reinfección.

En los alimentos se aplican radiaciones aumentando así su vida útil. Estas radiaciones reducen en forma considerable el número de microorganismos patógenos y alterantes presentes en alimentos de consumo masivo. Esto incide positivamente en el almacenamiento y conservación de los mismos.

También, y dentro del tratamiento de humanos, es importante en el seguimiento de terapias en pacientes con cuadros neurológicos (demencias, epilepsias, tumores cerebrales, etc), accidentes cardiovasculares y trastornos psiquiátricos.

Por último se utiliza también para la desinfección de instrumentos médicos (esterilización).

Se presenta a continuación la figura 7 [14] la cual engloba varios de los conceptos que entran en juego luego de que al paciente se le ha administrado la traza.

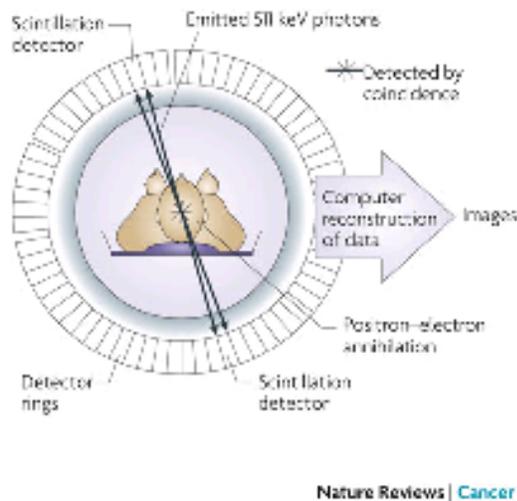


Figura 7 – PET [14]

V. CONCLUSIONES

Los ciclotrones permiten la aceleración de partículas siendo utilizados principalmente en la medicina, generando un uso masivo hoy en día, y en estudios nucleares. Mediante la irradiación de los iones acelerados se permite la generación de imágenes mediante tecnologías como PET. Además se debe tener en cuenta que su uso se extiende más allá de la medicina humana considerando también la medicina veterinaria y la tecnología de los alimentos.

Son equipos caros y son limitados los que existen en la región. Recién a fines del 2009 llegó a Uruguay el primero con un costo de 10 millones de dólares.

Por otro lado, la aplicación de ciclotrones tampoco resuelve todas las necesidades de su área de aplicación siendo necesario considerar otros aceleradores como ser sincrotrones.

Como trabajo a futuro se puede considerar el estudio más a

fondo de los otros aceleradores y sus aplicaciones hoy en día.

REFERENCIAS

- [1] Rush University Medical Center
URL: <http://www.rush.edu/spanish/sadult/radiology/nucmed.html>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [2] World Nuclear Association
URL: <http://www.world-nuclear.org>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [3] Rafael Mejía – Medicina Nuclear
URL: <http://www.saludymedicinas.com/imprimirNota.asp?ID=1638>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [4] Jenny Justrom - 2003
URL: http://www.irf.se/norrskan/Norrskan_facts.html
Ultimo acceso: Junio 2010
- [5] Dr. Artur Coral-Folleco - 2005
URL: <http://www.ipitimes.com/radioactividad.htm>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [6] Física Médica: Tomografía por emisión de positrones
URL: <http://www.encomix.es/~fisico/temas/pet.htm>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [7] Early Particle Accelerators
URL: <http://www.aip.org/history/lawrence/epa.htm>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [8] Blog destinado a ciclotrones
URL: <http://www.el-ciclotron.blogspot.com/>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [9] Movimiento de partículas cargadas
URL:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_elecmagnet/movimiento/ciclotron/ciclo.x.html
Ultimo acceso: Junio 2010
- [10] Movimiento en un campo magnético
URL:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/mov_campo/mov_campo.html
Ultimo acceso: Junio 2010
- [11] Rutherford y Soddy, "The Cause and Nature of Radioactivity"
Philosophical Magazine 4, 370-92, 1902
- [12] La Materia
URL:
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_6.html
Ultimo acceso: Junio 2010
- [13] Segovia,
Naturaleza 5, p. 107, 1974.
- [14] Medicina nuclear
URL: <http://www.medicinanuclear.cl/generalidades.htm>
Ultimo acceso: Junio 2010
- [15] PET for Oncologic Applications
URL:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/bookshelf/br.fcgi?book=hsarchive&part=A2219>
Ultimo acceso: Junio 2010