### 6º Escuela Mexicana de Física Nuclear, 22 de junio al 3 de julio del 2009

# ACELERADORES DE PARTÍCULAS: Irradiación con iones y electrones

Dr. Luis Rodríguez Fernández Instituto de Física, UNAM

### 1. Introducción

Los aceleradores de partículas son instrumentos utilizados para cambiar directamente la velocidad de partículas de orden atómico o menores. El interés de estas notas, en la medida de lo posible, es mostrar una visión panorámica del uso de los aceleradores en los aspectos relacionados con las aplicaciones asociadas a la irradiación con iones y electrones. Para esto, en una primera parte comenzaremos con una visión general sobre la interacción de partículas energéticas con materia y luego indicaremos los procesos fundamentales para la aceleración de partículas. En la segunda parte se describirán sus diversas aplicaciones en lo referente a la irradiación con iones y electrones. Cada una de estas dos partes se presentan como textos independientes, por lo que puede pasarse a la primera parte sin tener que pasar por la segunda.

Una vez que a partir de la sesión anterior impartida por el Dr. Eduardo Andrade, ya cuentan con una visión general de estos equipos, es importante efectuar una serie de consideraciones sobre ellos (especialmente, porque muchos de ellos son llamativos equipotes grandotes):

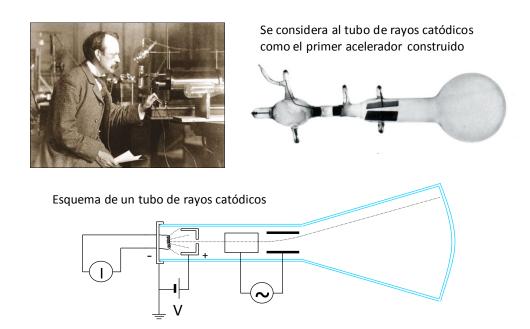
- a) En primer lugar los aceleradores son instrumentos creados con diversos propósitos y no son el fin mismo. De esta manera, el sentido de estos equipos se lo da el uso para el cual se construyen y las instalaciones en donde se encuentren.
- b) Son utilizados en diversas áreas: desde la investigación científica básica hasta los usos industriales pasando por la medicina y servicios diversos. Si bien los aceleradores inmediatamente se asocian con la física básica nuclear y de partículas elementales, a nivel mundial alrededor del 95% están dedicados a estudios y aplicaciones en otras áreas como la ciencia de materiales y la medicina.
- c) Aunque en su origen la motivación para su construcción ha sido principalmente científica, su desarrollo está más asociado a la ingeniería, la tecnología y el diseño.
- d) Son instrumentos constituidos por múltiples equipos y sistemas: eléctricos, electrónicos, hidráulicos, neumáticos, de manejo de gases a presión, vacío, grúas, edificio e instalaciones apropiadas, entre otros posibles. Esto da como resultado que requieran de mantenimiento y financiamiento constante para su operación, lo cual es proporcional a su energía y tamaño. Por este motivo, especialmente en países con economías limitadas, no pueden tenerse grandes laboratorios sin conjuntar el interés claro de una comunidad y el compromiso de llegar a resultados concretos.

¿Cuáles son los aceleradores buenos o mejores? es una pregunta que suele presentarse a menudo entre la gente. La respuesta se obtiene cambiando el sentido de la pregunta por ¿cuál es el más conveniente y apropiado para el objetivo deseado? De esta manera, ya no importa si es grande y energético, o pequeño y de bulbos, viejo o nuevo.

### **PRIMERA PARTE**

### 2. Motivación para acelerar partículas

El origen de los aceleradores de partículas y su desarrollo hacia mayores energías ha sido siempre impulsado por el estudio de los constituyentes y estructura de la materia. El primer acelerador construido fue el tubo de rayos catódicos a finales del Siglo XIX y con este instrumento Joseph John Thomson descubre el electrón en 1897. De manera análoga a como los telescopios son instrumentos que sirven como extensiones para acercarnos a lo más lejano y los microscopios para aproximarnos a lo más pequeño, tenemos que los aceleradores se utilizan para estudiar los aspectos más elementales de la materia. Para lograrlo se analizan los efectos y la radiación que se produce cuando una partícula muy energética choca contra un átomo, un núcleo o una partícula elemental.



**Figura 1.** J.J. Thomson descubrió el electrón en 1897 utilizando un tubo de rayos catódicos. Este opera de manera análoga a los cinescopios de televisión: el interior del tubo se encuentra en vacío (baja presión) y a un filamento colocado cerca del cátodo se le hace pasar una corriente eléctrica. Por efectos térmicos el filamento emite electrones los cuales son acelerados hacia un ánodo cilíndrico con un orificio en el centro de su tapa. Así los electrones son enviados hacia una pantalla y sus trayectorias pueden ser deflectadas por los campos eléctricos generados entre las placas paralelas.

En la figura 2 se ilustran posibles efectos para la colisión de un ion con un átomo [1]. Por otro lado, si tenemos colisiones entre partículas cuyas energías cinéticas sean mayores a las debidas a sus masas pueden presentarse procesos de desintegración, así como otros donde la energía liberada permite la creación de nuevas partículas. Por ejemplo, si consideramos la colisión entre una partícula de masa m y energía cinética  $E_m$  contra otra en reposo de masa M, la energía disponible  $E_d$  para la creación de nuevas partículas está dada por la relación:

$$E_d^2 = 2Mc^2 E_m + M^2 c^4 + m^2 c^4$$

En la figura 3 se muestran los efectos posibles que son causados por la interacción de un ion contra un material sólido [2]. Del recuadro (a) tenemos que un ion incidente a baja energía puede rebotar en la superficie o penetrar en su interior y por choques con los átomos del sólido va perdiendo energía hasta quedar en reposo e implantado en el material. Así, el ion incidente va cediendo su energía produciendo oscilaciones en la red del sólido y desplazamiento de átomos de su lugar original. En (b) cuando un ion pesado posee mayor energía va a penetrar mayor profundidad y en sus colisiones podrá desplazar mayor cantidad de átomos, produciendo lo que se llamaría una traza con daño en el sólido. Por otro lado, el uso de iones ligeros (c) permite generar menos daño y si incrementa las secciones eficaces (proporcionales a las probabilidades) de producir procesos atómicos de emisión de rayos X, así como nucleares acompañados de rayos gamma o partículas. Este tipo de emisiones son la base de muchas de las técnicas IBA. Finalmente, en (d) un efecto destructivo, pero muy utilizado en la fabricación de recubrimientos, películas delgadas e incluso limpieza de superficies, es la erosión que producen los iones incidentes sobre la superficie de un material. En este efecto, conocido como "sputtering", espurreo o erosión iónica, el choque con el ion provoca que uno o varios átomos de la superficie se desprendan del material. De esta manera, la incidencia de iones va erosionando la superficie del material.

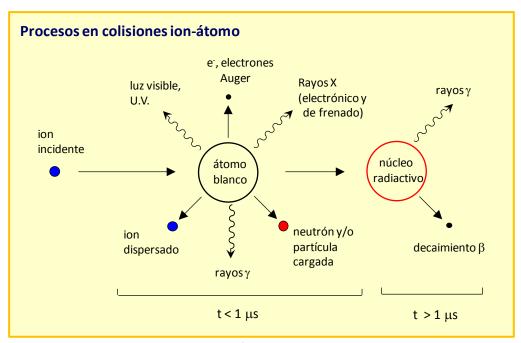


Figura 2.

En el caso de las colisiones con electrones se presentan varios efectos semejantes a los descritos para los iones, pero teniendo en cuenta que su masa es tres órdenes de magnitud menor que la de un protón. Por este motivo no producen desplazamientos atómicos en un sólido, pero si alteran los enlaces químicos y calientan el interior del sólido. También, por esta diferencia de masas frenar o acelerar electrones siempre será más sencillo que los iones. La dispersión lateral en sus trayectorias son mucho mayores que las de los iones.

# Procesos en colisiones ion-sólido

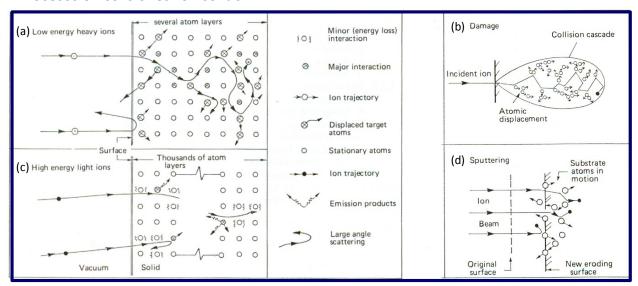


Figura 3

### 3. Fundamentos de la aceleración de partículas

El concepto de acelerador de partículas se aplica a dispositivos o aparatos que permiten cambiar la velocidad de partículas cargadas para aumentar su energía cinética o modificar la dirección de su movimiento. Los fundamentos de la operación de los aceleradores se pueden consultar en múltiples referencias [3-6]. La operación de un acelerador está soportada por la Electrodinámica Clásica, es decir, las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}$$

y la fuerza de Lorentz:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \mathbf{q} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Así los principios del funcionamiento de cada tipo de acelerador pueden describirse completamente con estas ecuaciones.

El procedimiento más simple para acelerar a una partícula cargada es por medio de un par de placas metálicas paralelas, como se muestra en la figura 4(a). Las placas se encuentran separadas una distancia d y conectadas a una batería que produce una diferencia de potencial eléctrico V entre las dos. Cerca del centro de las placas el campo eléctrico es prácticamente horizontal, en tanto que cerca de los bordes el campo comienza a curvarse. La fuerza sobre una carga positiva q estará dada por el vector  $\mathbf{F} = \mathbf{qE}$ . Cerca del centro de las placas el campo eléctrico es constante y con magnitud  $\mathbf{E} = \mathbf{qV/d}$ . Si la carga q se coloca sobre la superficie de la placa de la izquierda entonces la partícula adquirirá una energía cinética  $E_c = \mathbf{qV}$ . De aquí se define a la unidad de energía electrón volt (eV) como aquella que adquiere un electrón después de moverse a través de una diferencia de potencial eléctrico de un volt.

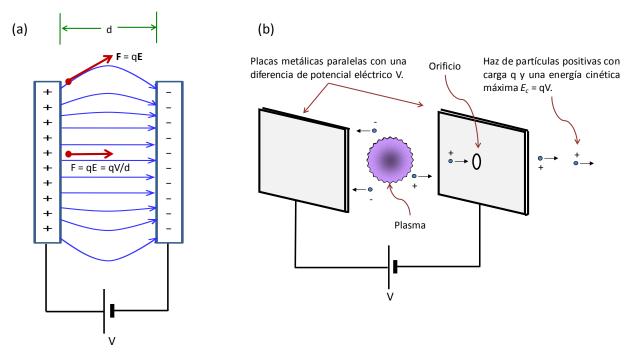
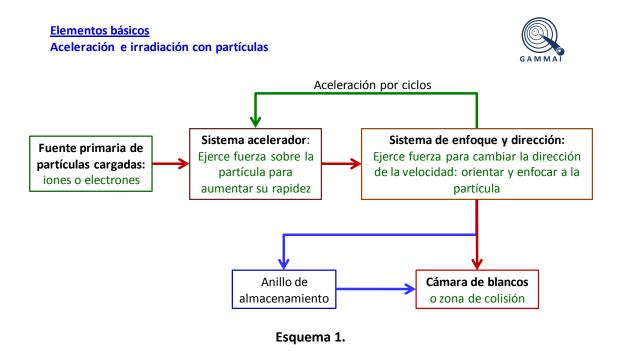


Figura 4. Sistema de aceleración por medio de placas metálicas paralelas

De lo anterior se puede ver que el acelerador más sencillo es el de placas paralelas, como se muestra en la figura 4(b). En este caso se produce un plasma (gas de átomos ionizados) entre dos placas metálicas paralelas y con una diferencia de potencial eléctrico V. Suponiendo que se quiere acelerar a los iones positivos, en el centro de la placa con potencial negativo se hace un orificio de tal manera que algunos de los iones que se mueven hacia esa placa puedan atravesar el orificio y salgan moviéndose con una energía cinética máxima  $E_c = qV$ .

En el esquema 1 se muestra el diagrama de bloques del proceso general para acelerar e irradiar con partículas. Con las flechas rojas se indica el proceso directo más simple. El primer elemento es la fuente de partículas que serán aceleradas, las cuales pueden ser los electrones (con carga elemental  $q = e^-$ ) emitidos por un filamento o iones (átomos a los que se les han quitado q electrones quedando con carga positiva q = eq; o se les ha dado un electrón quedando con carga negativa  $q = e^-$ ). Una vez producida la partícula, esta se dirige hacia el sistema acelerador el cual con la aplicación de campos eléctricos dirigidos en su dirección de movimiento ejercen una fuerza que aumenta su velocidad. Una vez que la partícula sale del sistema acelerador pasa a moverse a lo largo de una tubería en vacío por donde es enfocada y dirigida hacia la cámara de irradiación en donde se encuentra el blanco. Este sistema de enfoque utiliza los campos magnéticos producidos por uno o más electroimanes para orientar a la partícula por la línea de vació deseada, así como dipolos o cuadrupolos magnéticos para mantener a la partícula enfocada dentro de la tubería.



En unos aceleradores el sistema de enfoque y dirección de haz regresan a la partícula a la zona de aceleración (flecha verde) para que vuelva a ser sometida al campo eléctrico y le permita aumentar su energía nuevamente. En estos casos se habla de la aceleración por ciclos, en donde el proceso se repite hasta que la partícula tenga la energía adecuada para ser enviada a la cámara de blancos. Este proceso es el empleado para producir las partículas de mayores energías.

Finalmente, en algunos laboratorios las partículas aceleradas son confinadas por medio del sistema de enfoque y dirección para que permanezcan moviéndose en torno a lo que se conoce como anillo de almacenamiento antes de ser enviadas hacia la zona de colisión. También, los anillos de almacenamiento

juegan un papel fundamental en los aceleradores sincrotrones dedicados a la producción de radiación electromagnética y que serán abordados en la siguiente lección del curso.

Los sistemas de aceleración son variados y algunos más exitosos que otros. Aquí, sólo mencionaremos los tres que podemos llamar más fundamentales:

- a) Generadores de alto voltaje, conocidos como electrostáticos o de corriente directa.
- b) Los de empuje por ondas electromagnéticas o lineales (Linac).
- c) Los de aceleración por ciclos como los ciclotrones y sincrotrones.

Los aceleradores electrostáticos utilizan la generación de una gran diferencia de potencial en una terminal de alto voltaje. Para producir este potencial existen varios procedimientos, como lo es el generador Van de Graaff por medio de una banda de hule o los Pelletrones que utilizan cadenas de plástico (Nylon®) dieléctricas recubiertas con un casquillo metálico. También se utilizan generadores de cascada consistentes en circuitos eléctricos elevadores de potencia por medio de diodos rectificadores como en los Cockroft-Walton y tandetrones. En todos estos equipos la terminal de alto voltaje está acoplada a un tubo acelerador en vacío por el cual se van a mover las partículas durante su aceleración. Este tubo se encuentra integrado a un sistema de placas o anillos circulares metálicos cada uno conectado con su vecino por medio de resistencias eléctricas, de tal manera que se produce una diferencia de potencial constante entre ellas con un campo eléctrico orientado principalmente en la dirección de salida del tubo acelerador. Con este sistema de placas o anillos equipotenciales a lo largo del tubo acelerador se produce un campo eléctrico semejante al de una serie de aceleradores de placas paralelas y la partícula al salir del tubo tendrá una energía cinética proporcional a la diferencia de potencial eléctrico (tensión) en la terminal. La intensidad del haz de partículas que puede producirse dependerá de la corriente de carga que entreguen los generadores a la terminal.

En la figura 5 se muestra un esquema del Acelerador Van de Graaff de 0.7 MV del Instituto de Física de la UNAM. Una de las ventajas que tienen estos aceleradores, es que producen una corriente continua de haz, a diferencia de los otros dos modos que producen un haz pulsado. Por eso estos aceleradores son empleados en microscopios electrónicos de muy alto voltaje.

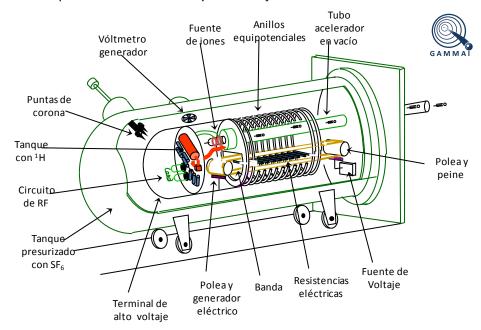


Figura 5. Esquema del Acelerador Van de Graaff de 0.7 MV del Instituto de Física de la UNAM.

En la configuración de los aceleradores tipo tandem se aprovecha en dos ocasiones el potencial en la terminal de alto voltaje. En la figura 6 se muestra un esquema del Acelerador Pelletron Tandem de 3 MV del Instituto de Física de la UNAM. Con esta configuración las fuentes de iones se encuentran en el exterior del acelerador y producen iones negativos, los cuales sufren una primera aceleración hacia la terminal. En el interior de la terminal los iones negativos pasan por una celda con gas  $N_2$  o una lámina de grafito de tal manera que pierda electrones para quedar cargado positivamente. Una vez que se vuelve ion positivo vuelve a sufrir una aceleración por la repulsión eléctrica con la terminal. Al final del proceso si el ion salió con un estado de carga +q su energía cinética será:  $E_c = e(1+q)V$ .

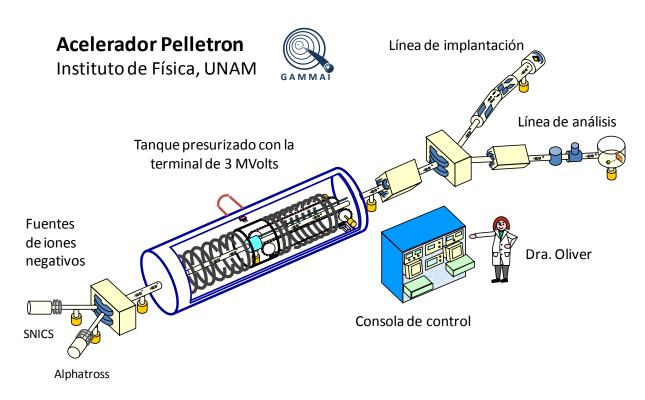


Figura 6. Esquema del Acelerador Pelletron Tandem de 3 MV del Instituto de Física de la UNAM.

El problema de los aceleradores electrostáticos es el límite de potencial que pueden alcanzar y el uso mismo de potenciales muy altos que requiere de tanques presurizados. Con la finalidad de no trabajar con estos potenciales muy altos en un acelerador lineal se busca acelerar a las partículas por pasos a potenciales mucho más pequeños. De esta manera se consigue tener la fuente de partículas y la salida del tubo acelerador al mismo potencial a tierra. En la figura 7(a) se muestra el esquema de una acelerador lineal tipo Wideröe, en donde una partícula es acelerada por pasos a través de una serie de tubos huecos metálicos que van alternando su potencial a medida que la partícula se mueve y de tal manera que siempre hay un campo eléctrico que la acelera aumentándole su velocidad. Toda esta serie de tubos con contenidos en el interior de un tubo más grande en vacío para que la partícula pueda moverse sin colisionar con moléculas de aire.

En la figura 7(b) se muestra un acelerador lineal tipo Alvarez, en el cual para mejorar el proceso se inducen ondas electromagnéticas en el interior de las paredes del todo el tubo contenedor que generan un gradiente de campo eléctrico que va actuando con el movimiento de la partícula. Con esta configuración se obtienen aceleraciones de 6 a 10 MV/m. Este acelerador es más efectivo que el de tipo Wideröe pero aun

así sólo puede acelerar iones positivos a velocidades entre  $0.04 < \beta = v/c < 0.5$  y por este motivo debe de tener un sistema de preaceleración de los iones antes de entrar a la serie de tubos aceleradores.

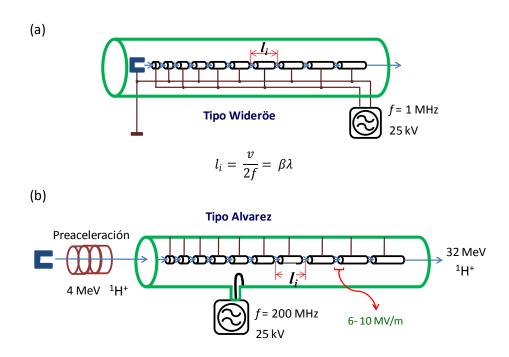
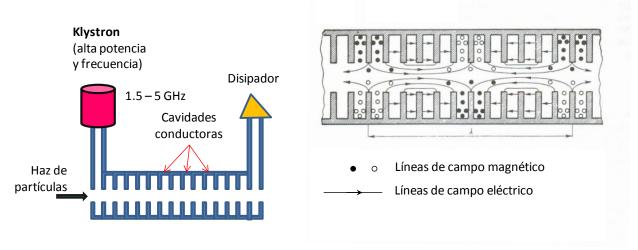


Figura 7. Procesos de la aceleración lineal.

Con base en la idea anterior de utilizar guías de onda se diseñan y construyen cavidades metálicas que se acomodan en serie y son acopladas a generadores de radiofrecuencia de alta potencia (klystrons). Cuando la frecuencia de la fuente de RF, la forma de las cavidades y su distribución es la adecuada se puede producir en su interior una secuencia de gradientes de campo eléctrico en la dirección de movimiento de la partícula. Con este tipo de sistemas se permite alcanzar energías de 10 – 20 MV/m hasta de 100 – 150 MV/m.



**Figura 8.** Esquema de una guía de onda con cavidades metálicas adecuadas para producir una secuencia de gradientes de campo eléctrico en la dirección de movimiento de la partícula.

Debido a que el proceso de aceleración de las partículas es por etapas acopladas a la propagación de ondas electromagnéticas adentro de las cavidades se tiene que las energías que pueden obtenerse corresponden a una serie de valores muy bien definidos. Además, los aceleradores lineales no producen una corriente de haz continua, sino que generan una serie de pulsos de corriente con una frecuencia definida. Esta es una de las desventajas que tienen los aceleradores lineales con los electrostáticos. Este es un precio que hay que pagar para poder acelerar partículas a mayores energías.

Finalmente en los procesos de aceleración cíclicos de partículas se recurre a hacer pasar a la partícula por la misma unidad de aceleración varias veces. El primero de este tipo de aceleradores fue el ciclotrón, indicado con un esquema en la figura 9. En este caso se tienen dos electrodos huecos en forma de "D" conectados a una fuente generadora de radiofrecuencia que permite cambiar la polaridad eléctrica de cada uno de ellos. Estos dos electrodos se encuentran inmersos en un campo magnético constante perpendicular a las "D's" que es generado por un electroimán tal como se indica en la figura. También estos electrodos se encuentran en el interior de una cámara de material no magnético en vacío. En el extremo central de uno de los electrodos se localiza una fuente iones y cuando el potencial del otro electrodo sea negativo los iones serán emitidos en dirección a él. En este paso los iones son acelerados una primera vez y por efecto del campo magnético comenzarán a girar en el plano de las D's cambiando la dirección de su velocidad pero manteniendo la misma rapidez a la que fueron acelerados. Luego el otro electrodo adquiere un potencial negativo y los iones son atraidos hacia él, produciéndose una segunda aceleración. Así, al moverse las partículas en círculos y al variar el potencial en los electrodos se va repitiendo muchas veces este proceso de aceleración hasta que son extraídas afuera de los electrodos.

## Esquema de un acelerador ciclotrón

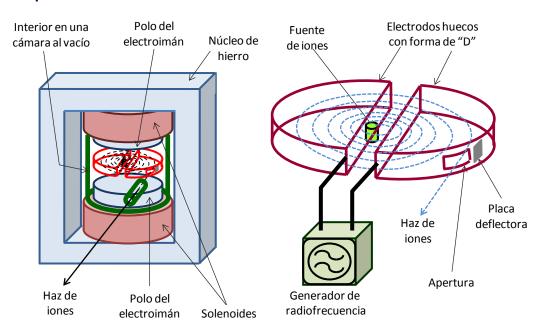


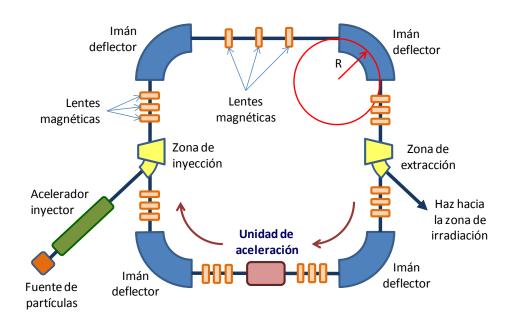
Figura 9.

Haciendo el análisis del movimiento de la partícula en el ciclotrón se encuentra que el tiempo de giro sólo depende del campo magnético, de la carga y de la masa del ion. El hecho de que este periodo no dependa de la velocidad de la partícula permite escoger la variación del potencial en los electrodos de tal manera que las partículas sean aceleradas cada vez que pasan del interior de un electrodo al otro. Este sistema del

acelerador ciclotrón permite tener equipos que aceleran iones a energías de hasta 25 MeV ocupando un espacio físico mucho más reducido que el de un acelerador electrostático. Sin embargo, las energías de aceleración son discretas y las corrientes de haz son pulsadas.

La limitante en cuanto a la energía que puede alcanzar un ciclotrón está asociada en que su diseño fue hecho para mantener partículas cada vez más rápidas bajo un único campo magnético constante. En este caso la energía que se puede proporcionar a una partícula es inversamente proporcional a su masa, la cual aumenta a medida que la velocidad sea mayor, por lo tanto el rendimiento de aceleración de la partícula llega a un límite. Para proporcionar mayor energía se han introducido mejoras en los ciclotrones que permiten modificar el campo magnético durante el proceso de aceleración.

Las partículas con mayores energías se obtienen utilizando los aceleradores sincrotrones. En la figura 10 se muestra el esquema de un acelerador sincrotrón. En estos equipos las partículas son previamente aceleradas por un acelerador lineal e inyectadas a un anillo. Las partículas se hacen girar por el interior de la tubería en vacío del anillo por medio de electroimanes y lentes magnéticas de enfoque. En una parte del anillo se encuentra una unidad de aceleración por donde al pasar las partículas van a adquirir mayor energía. Después de que esto sucede los electroimanes ajustan su campo magnético para poder mantener a las partículas dando vueltas dentro del anillo. Este proceso se repite muchas veces hasta que las partículas adquieren la energía deseada y son extraídas del anillo hacia la zona de irradiación.

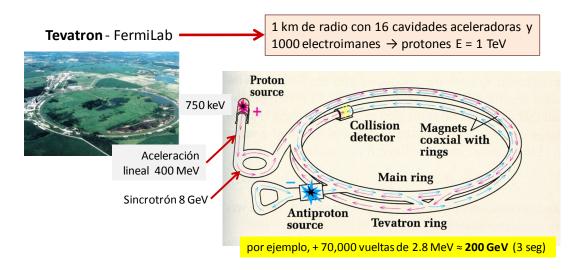


**Figura 10.** Esquema de un acelerador sincrotrón.

Por el proceso de aceleración, estos sincrotrones sólo permiten acelerar grupos (o paquetes) de partículas por ciclos, de tal manera que estos aceleradores entregan ráfagas de partículas muy energéticas. Por ejemplo, en la figura 11 se muestra un diagrama del acelerador Tevatron de Fermilab, cerca de la ciudad de Chicago y que permite acelerar protones hasta una energía cercana a 1 TeV. En esta figura se muestra que un protón adquiere una energía de 200 GeV después de dar 70,000 vueltas en unos tres segundos.

Debido a que las partículas cargadas radian ondas electromagnéticas cuando son aceleradas por los imanes deflectores, el proceso cíclico de aceleración llega a un límite en donde la energía la energía proporcionada se pierde por radiación. Por ejemplo, la mayor energía que puede proporcionarse a electrones con un

sincrotrón es de aproximadamente 100 GeV. Sin embargo una de las mayores aplicaciones de estos aceleradores sincrotrones es su utilización con electrones, pero no para hacerlos colisionar, sino mantenerlos en el interior del anillo y aprovechar la radiación electromagnética que producen cuando son deflectados por los imanes. Este tema será abordado con detalle en la siguiente sesión del curso.



**Figura 11.** Foto aérea del acelerador Tevatron de Fermilab y diagrama con un ejemplo del proceso de aceleración de protones a 200 GeV [7].

### SEGUNDA PARTE

### 4. Usos de los aceleradores de partículas.

Como hemos mencionado desde el principio del texto, los desarrollos originales de los aceleradores han estado enfocados principalmente al estudio de la estructura de la materia. Sin embargo, a lo largo de su aparición y evolución se han desarrollado múltiples aplicaciones con fines diversos a su alrededor. En la figura 12 se muestra un esquema simplificado de este desarrollo, que no es completamente histórico, pero si muestra algunas fechas. En la tabla 1 se muestran los usos más comunes de los diversos aceleradores.

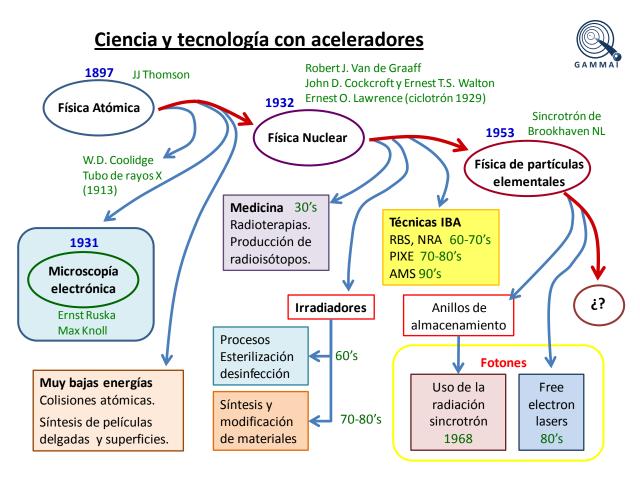


Figura 12.

En la tabla 2 se muestran dos estudios sobre el número de aceleradores que hay en el mundo y sus aplicaciones [8,9]. Sobre el estado de los aceleradores en investigación a nivel mundial la International Union of Pure and Applied Physics publicó en 2007 el IUPAP Report 41, el cual contiene información de las instalaciones con aceleradores cuyas autoridades accedieron a proporcionar información (en este caso se incluyen los aceleradores de la UNAM). En este reporte se muestra que en las universidades del mundo existen alrededor de 90 aceleradores dedicados a la física básica y aplicaciones, sin embargo esta información todavía no es exacta pues muchas instituciones no proporcionaron información aun a sabiendas de que tienen instalaciones con estos equipos.

De manera semejante en la tabla 2 es conveniente tomar con un poco reserva estos datos (pues no hay muchas investigaciones completas al respecto), y los números ahí expuestos provienen de estudios enfocados principalmente a la medicina y biología. Aun así, puede apreciarse en forma general que las principales aplicaciones de los aceleradores están en la medicina ~40% y en el área de materiales con la implantación e irradiación ~45%.



# Aplicaciones de la irradiación con aceleradores de partículas



Tipo de Acelerador	Partícula	Energías Típicas MeV	Máximas	Aplicaciones
Electrostáticos	e <sup>-</sup> <sup>1</sup> H <sup>+</sup> , <sup>4</sup> He <sup>+2</sup> iones	0.25 - 20 0.1 - 3.0 0.5 - 4.0	30 5.0 5.0	Técnicas IBA Implantación e irradiación Procesos de esterilización
Lineales de RF	e <sup>-</sup>	5 – 50 20 – 200	40,000 800	Terapia rutinaria y experimental no convencional, esterilización, Implantación e irradiación de materiales.
Betatrones	e <sup>-</sup>	3 – 45	340	Terapia rutinaria, irradiación
Ciclotrón • convencional • Isócronos • Sincrociclotrones	<sup>1</sup> H <sup>+</sup> iones	2 – 7 6 – 70 50 - 500	10 590 1000	Técnicas IBA Producción de radionúclidos. Terapia rutinaria y experimental. Implantación e irradiación con iones pesados.
Sincrotrones	e <sup>-</sup> iones	1 – 3 GeV 1 – 400	12 GeV 1000 TeV	Análisis con radiación sincrotrón. Procesos de Irradiación Terapia rutinaria experimental

**Tabla 1.** Usos de los diversos tipos de aceleradores.

Los aceleradores surgen a finales del Siglo XIX con el tubo de rayos catódicos y con el cual se descubrió el electrón. Gracias al desarrollo tecnológico para producir bajas presiones ("vacíos") y generar potenciales eléctricos de hasta unos cuantos kiloVolts comienzan los estudios atómicos con aceleradores. Inicialmente son los electrones las partículas aceleradas y posteriormente los iones. Así fueron desarrollándose diversos dispositivos como el tubo de rayos X en 1913 por D.W. Coolidge, en donde electrones acelerados se hacen chocar contra un ánodo de cobre para producir rayos X\*. En 1931 Ernst Ruska y Max Knoll crean la microscopía electrónica acelerando electrones y enfocándolos sobre una muestra para difractarlos y observar la estructura de materiales sólidos. Debido a que la microscopía electrónica ha tenido un desarrollo propio de enormes proporciones y que ha sido fundamental en casi todas las ciencias, la

<sup>\*</sup> Los rayos X fueron descubiertos por W.C. Roentgen en 1895 utilizando un tubo de Crookes (variante del tubo de rayos catódicos con un gas enrarecido o baja presión en su interior). Sin embargo la intensidad de los rayos X producidos no era lo suficientemente intensa para muchas aplicaciones en cristalografía por difracción de rayos X, así como en radiobiología y medicina.

consideraremos aparte de los aceleradores de partículas. De hecho, la ciencia contemporánea está ligada completamente a la microscopía electrónica.

**Tabla 2.** Número de aceleradores en el mundo por aplicación [8,9].

Timo o cotogorío del coelevador	Número aproxim		
Tipo o categoría del acelerador	1994	1998	2009
Aceleradores en investigación de altas energías	112	110	
Aceleradores en industria	1500	1500	
Implantadores de iones Modificación de superficies	> 2000 1000	6000	
Fuentes de radiación sincrotrón	50	60	70
<ul> <li>Aceleradores en Biología y Medicina</li> <li>Radioterapia con fotones y electrones</li> <li>Radioterapia con hadrones</li> <li>Investigación biológica y biomédica</li> <li>Producción de radioisótopos</li> </ul>	> 4000 800 200	4500 30 1000 200	
Total	9662	13,400	

Las colisiones de iones con átomos a energías desde unos cuantos Volts permiten estudiar procesos atómicos. La colisión de los iones con la superficie de materiales sólidos permite múltiples aplicaciones: el limpiado de superficies para remover capas de óxido o suciedad (ionic etching); remover material de un blanco para depositarlo en un sustrato y crecer películas delgadas; implantar átomos en una zona superficial.

También están las aplicaciones analíticas en donde la aceleración de iones o especies de moléculas ionizadas para hacerlas pasar por campos eléctricos o magnéticos observando su deflexión, es lo que se le conoce como espectrometría de masas, y permite identificarlas.

La física nuclear con aceleradores comienza con la creación de los generadores de altos voltajes como el Van de Graaff o los de circuitos rectificadores, así como con los ciclotrones. Con estos aceleradores se consigue hacer chocar núcleos atómicos y romperlos para estudiar su composición e interacciones fuertes (fuerza nuclear). A las aplicaciones de estos aceleradores son a las que prestaremos mayor atención en las próximas secciones y que podemos llamar "originarias gracias a la física nuclear". Desde su origen fueron utilizados en la medicina para producir rayos X de mayor energía que el de los tubos convencionales y aplicarlos a la radioterapia. También son fundamentales para la creación de radioisótopos de vida media corta utilizados para estudios radiológicos de diagnóstico en pacientes médicos.

La irradiación con electrones o la generación de rayos X con aceleradores tienen aplicaciones en la esterilización de objetos o desinfección de líquidos, así como la modificación de materiales, especialmente polímeros. En el caso de la irradiación con iones se tiene la implantación profunda de iones en sólidos, creación de daño y su modificación estructural.

También tienen sus aplicaciones en el análisis elemental de sustancias observando los efectos atómicos y nucleares producidos en una muestra blanco al ser irradiada con iones. A estas se les conoce como Técnicas IBA del acrónimo en inglés "lon Beam Análisis" y tienen múltiples ventajas en la caracterización de materiales y superficies.

La física de partículas elementales se desarrolla con los aceleradores sincrotrones que permiten proporcionar energías suficientes a las partículas para producir nuevas partículas. El inconveniente que presentaban estos aceleradores al utilizarlos con electrones es que se producían mucha radiación al cambiarles la dirección de su velocidad con los imanes. Esta radiación muy intensa conocida como sincrotrón y que era un desecho, comenzó a ser utilizada a partir de 1968 para el estudio de materiales y sustancias químicas. En la actualidad se construyen laboratorios con aceleradores sincrotrones con el puro propósito de producir radiación electromagnética muy intensa desde el visible hasta los rayos X para ser utilizada en múltiples técnicas de caracterización de muestras diversas. Su utilización ha incidido en prácticamente todas las áreas de la ciencia: física de sólidos, atómica, química, biología, medicina, geología, etc. Existen empresas (como Oxford Analytical y Lyncean Technologies Inc.) que construyen pequeños aceleradores sincrotrones de electrones con la finalidad de producir rayos X y resultan idóneos para colocarse en espacios pequeños. Sin embargo, estos equipos no proporcionan la intensidad de fotones o luminosidad de los 70 laboratorios con indicados en la tabla 2.

También, considerando la radiación emitida por electrones acelerados, se han implementado arreglos magnéticos alternando polaridades con la finalidad de provocar movimiento ondulatorio en electrones para que de esta manera emitan rayos X coherentes. Esto es lo que se conoce en inglés como Free Electron Laser.

Para una visión general sobre el uso de aceleradores en la investigación, la medicina y la industria por parte de grupos mexicanos se recomienda ver la referencia [10]. Para 2004 existían en México alrededor de 40 aceleradores lineales de electrones para radioterapia. La Facultad de Medicina de la Universidad Nacional cuenta con un ciclotrón para la fabricación de radioisótopos de vida media corta. En cuanto a la investigación se cuenta en el país con siete aceleradores electrostáticos con más de 0.5 MV en la terminal. La UNAM cuenta con tres aceleradores de iones positivos: un Pelletron de 3 MV, un Van de Graaff de 0.7 MV y otro de 5.5 MV. Además tiene al Van de Graaff de 2 MV, el cual fue el primer acelerador de iones en México y que actualmente se utiliza como irradiador de electrones. Por otro lado, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares cuenta con tres aceleradores: un tandem de 6 MV, un tandetron de 2 MV y un pelletrón de 1.5 MV para irradiación con electrones.

### 5. Aceleradores en Ciencia de Materiales

Uno de los principales usos que se da a los aceleradores es en las áreas de materiales. En la figura 13 se muestra un esquema del uso de haces iónicos energéticos en ciencia de materiales e ingeniería [11]. Estos requieren de la aceleración de iones y debido a las interacciones de los iones con los sólidos [12] pueden dividirse en tres grupos principales: la síntesis de materiales, su modificación y su análisis.

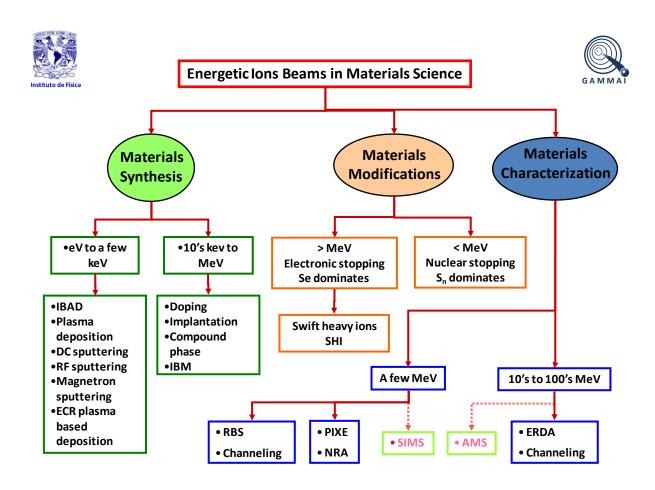


Figura 13. Esquema del uso de aceleradores en ciencia e ingeniería de materiales.

En cuanto a la síntesis de materiales tenemos un primer grupo en donde los iones son acelerados hasta unos cuantos keV y son prácticamente utilizados para la creación de recubrimientos, películas delgadas y limpieza de superficies. En este caso la intensión es crear un haz de iones para hacerlo chocar contra un blanco e ir arrancando átomos de su superficie, efecto conocido como "sputtering". Los átomos arrancados del blanco son depositados en sustratos para ir creando recubrimientos. Para estos procesos se han desarrollado varias técnicas, muchas de ellas basadas en la generación de plasmas en donde el blanco está colocado en un cátodo para que los iones sean acelerados hacia este. Dentro de estas técnicas podemos mencionar (por sus nombres en inglés para que les sea más fácil encontrar información al respecto): Direct ion beam sputtering (DIBS o IBS), Ion beam asisted deposition (IBAD), Electron beam induced deposition (EBID), ion beam induced deposition (IBID), plasma deposition con gases inertes o reactivos, sputtering de corriente directa (DC sputtering), sputtering por radiofrecuencia (RF sputtering), sputtering DC o RF

asistidos con magnetrones, Electron ciclotron resonance (ECR) plasma based deposition. En estas notas no ahondaremos más en técnicas.

Al incrementar la energía de los iones estos no solo produce "sputtering", sino que también pueden penetrar en el material y quedar implantado en su interior. La profundidad a la que quedan implantados y el perfil de daño que generan aumentan con la energía de los iones. Esto permite procesos de síntesis o de modificación de materiales como son el dopado de una matriz con impurezas, la incorporación de átomos de manera controlada por medio de la implantación de iones, el depósito de energía con iones que asiste la generación de cambios de fase en sólidos y en función de la profundidad, la mezcla atómica e interdifusión de elementos en interfaces, y la generación de daño para producir propiedades deseadas en una superficie e interior de un material. También hay procesos de maquinado de microestructuras por medio de la asistencia de un haz de iones que va labrando formas sobre un material en bruto.

En el campo de las nanociencias y los nanomateriales los haces de iones son utilizados ampliamente para su síntesis y modificación. Gran parte de las investigaciones que se realizan actualmente con haces de iones van enfocadas controlar el tamaño de las partículas, controlar su forma y controlar la distribución de formas y tamaños en un material. Muchos de los estudios de síntesis de nanopartículas y nanoestructuras utilizan métodos convencionales que están enfocados a superficies o sistemas granulados, sin embargo para su generación en el interior de matrices específicas y con distribuciones amplias en su interior esto solo se logra utilizando haces de iones energéticos.

El depósito de energía en un material sólido por un haz de iones se debe principalmente al frenamiento que va sufriendo cada proyectil al chocar con los átomos del blanco. Este frenamiento se divide en dos regiones: en una dominan los choques con los núcleos y en otra para mayores energías dominan los choques con los electrones de los átomos. Así, el tipo de daño y modificaciones que pueden generarse en un material dependerá de la energía de los iones.

El movimiento rápido de iones en materia, más conocido como SHV (Swift Heavy Ions) son muy utilizados en la generación de materiales nanoestructurados. Los efectos producidos por el paso de los iones y la energía depositada a lo largo de su trayectoria generan trazas y cambios de fase "instantáneos" metaestables. Posteriormente el reacomodo de los átomos alrededor de estas trazas permite la formación de estructuras nuevas o la deformación de las existentes en el interior del material.

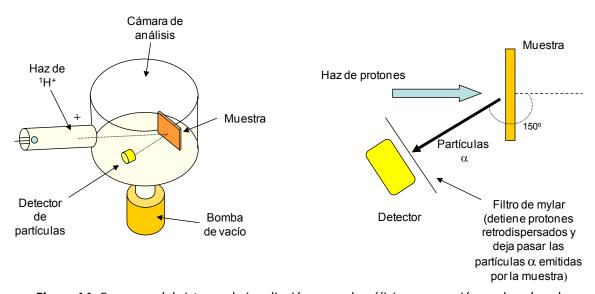
Finalmente, el conocimiento adquirido en torno a las interacciones y los productos generados en los procesos de interacción entre iones energéticos y los átomos de un sólido (ver figura 2) se puede aplicar para conocer la composición y estructura de un material. Esto es lo que ha dado origen a las técnicas de análisis con haces de iones, más conocidas como técnicas IBA (Ion Beam Analysis). Estas son ampliamente utilizadas con aceleradores electrostáticos y de acuerdo a Norton y Duggan [13] para 1999 existían a nivel mundial aproximadamente 350 aceleradores electrostáticos con potenciales en la terminal de hasta 5 MV dedicados al análisis y la implantación de alta energía.

En figura 13, además de las técnicas IBA, se indica el uso de la espectrometría de masas para la determinación de elementos, compuestos moleculares o isótopos. En estos procedimientos es necesario producir fragmentos moleculares o atómicos cargados eléctricamente de una muestra, para luego acelerarlos y hacerlos pasar por un sistema selector de carga/masa. Cuando las aceleraciones son pequeñas de hasta unos keV se tienen la técnica SIMS (Secondary Ion Mass Spectrómetry) y cuando la aceleración es del orden de MeV se tienen los AMS (Accelerator Mass Spectrometry). El AMS es el procedimiento más sensible para la caracterización de elementos e isótopos en una muestra, aunque sus medidas son relativas y no absolutas como puede llegar a obtenerse en algunos casos con las técnicas IBA. Aun así, la alta sensibilidad del AMS dos órdenes de magnitud mayor que el SIMS y varios órdenes de magnitud mayores

que las IBA, encuentra aplicaciones en la industria de los semiconductores en donde las impurezas en un material pueden cambiar completamente sus propiedades a nivel de compuertas y dispositivos microelectrónicos. También la hace una técnica fundamental en estudios de isótopos, como el carbono 14 entre otros, de interés para la arqueología, biología y geología.

### 5.1 Técnicas IBA

En la tabla 3 se muestran las técnicas IBA más comunes [14] junto con las condiciones típicas de haz utilizadas, (aunque uno tiene la libertad de las capacidades del acelerador con el que se cuente). La retrodispersión de Rutherford, RBS, (Rutherford Backscattering Spectrometry), la emisión de rayos X inducidos por partículas, PIXE (Particle Induced X-ray Emission) y el análisis por medio de reacciones nucleares, NRA (Nuclear Reaction Analysis) son técnicas muy bien establecidas. En la figura 14 se muestra el esquema básico de una cámara de análisis IBA, junto con una configuración para la detección de partículas  $\alpha$  emitidas por reacciones nucleares de tipo  $(p,\alpha)$  con átomos específicos del blanco.



**Figura 14**. Esquema del sistema de irradiación para el análisis por reacción nuclear  $(p, \alpha)$ .

En términos generales en el RBS se registran los iones que son rebotados por colisiones elásticas con los núcleos del blanco de acuerdo a la sección de retrodispersión calculada por Rutherford, la cual depende de los números atómicos de los núcleos. En el caso de PIXE los iones inducen rayos X que son emitidos por transiciones electrónicas en los átomos del blanco. La energía de estos rayos X es característica de cada elemento atómico y por tanto pueden utilizarse para identificarlos en una muestra. Esta situación es análoga al NRA en donde se registran las partículas características emitidas (fotones gamma, protones, alfas) por la colisión del ión con un núcleo atómico.

PIXE es una técnica que permite la detección de elementos con Z > 12 hasta el orden de partes por millón, o lo que se conoce como detección de trazas elementales. Esta sensibilidad la hace conveniente para el estudio de contaminantes y fenómenos ambientales. Esta técnica también puede complementarse simultáneamente con el PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission), el cual resulta ser conveniente para registrar elementos con  $Z \le 12$ .

Tabla 3. Técnicas IBA más comunes en cada intervalo de energías.

Técnica o procedimiento	Tipo de partículas	Energías [MeV]	Corrientes	diámetro del haz	Aplicaciones
Retrodispersión de Rutherford (RBS)	<sup>4</sup> He	0.7 – 3	< 100 nA	~1 mm	Análisis de superficies y películas delgadas. Perfil de distribución de elementos.
Canalización de iones (channeling)	<sup>4</sup> He	0.5 – 3	< 50 nA	~1 mm	Análisis estructural y detección de intersticiales en cristales.
Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)	<sup>4</sup> He o iones pesados	1 – 20	< 1 μΑ	~1 mm	Perfil de concentración de elementos con Z ≤ 9 en un material.
Inducción de rayos X por incidencia de partículas (PIXE)	¹H	1-4	< 1 μΑ	~1 mm	Análisis de elementos con concentraciones del orden de trazas.
PIXE en aire	Н	1-4	< 1 μΑ	1 a 4 mm	Análisis "no destructivo" de elementos en trazas.
micro RBS Micro PIXE	<sup>4</sup> He <sup>1</sup> H	1-3 1-4	< 1 nA <0.5 nA	10-20μm ~1 μm	Análisis de elementos en relación a su posición en la muestra.
Análisis por reacciones nucleares (NRA)	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He y iones varios	0.35 – 30	1-10 μΑ	1-3 mm	Incremento de la sensibilidad de detección para elementos seleccionados.
Activación por partículas cargadas (CPA)	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> H y <sup>3</sup> He	1 – 50	1-15 μΑ	1 mm – 1 cm	Incremento de la sensibilidad de detección para elementos seleccionados.

El RBS es una técnica muy conveniente para análisis de elementos pesados (masas atómicas grandes) depositados o distribuidos en matrices ligeras (masas atómicas pequeñas). La NRA es un procedimiento conveniente cuando se tienen elementos ligeros distribuidos en matrices pesadas.

Los estudios por medio de la activación por partículas cargadas, CPA (Charged Particle Activation), son muy convenientes para los casos cuando se requiere conocer concentraciones muy bajas de átomos con  $Z \le 9$ . Estas propiedades también la hacen muy utilizada en estudios de corrosión y son muy utilizadas en la determinación de isótopos ligeros en una muestra.

La utilización de pequeños haces de iones hacen posible analizar áreas muy pequeñas y efectuar estudios en función de la posición en una muestra. La combinación de PIXE con RBS puede permitir la determinación tridimensional de elementos.

Todas estas técnicas IBA no producen daños considerables en los materiales irradiados, por lo que son consideradas en muchos casos como técnicas no destructivas que resultan de gran utilidad para el estudio de patrimonio cultural: piezas arqueológicas, artefactos antiguos y obras de arte.

### 5.2 Implantación e irradiación con iones.

Los primeros estudios de implantación de iones fueron llevados al cabo en los Laboratorios Bell entre 1940 y 1950. Fue hasta 1964 que se lograron hacer juntas n-p en el interior de semiconductores y los transistores bipolares fueron los primeros dispositivos microelectrónicos fabricados de esta manera [15]. Desde entonces la implantación y la irradiación con partículas se han convertido en métodos ampliamente utilizados para la síntesis y modificación de materiales. Es muy utilizado en la industria microelectrónica y de fabricación de dispositivos de almacenamiento de información.

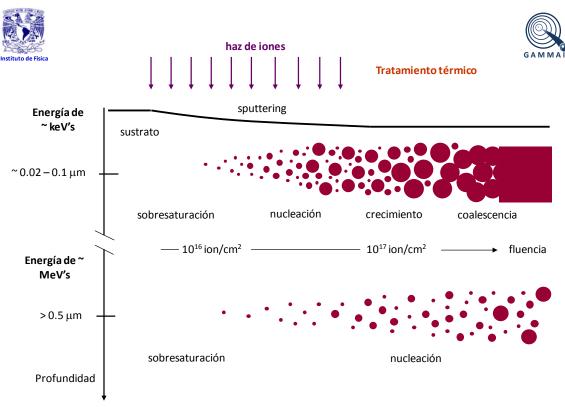
En la tabla 4 se muestran algunos procedimientos con condiciones típicas. Aquí tomamos la siguiente convención: a) consideraremos al procedimiento como implantación cuando se está interesado en la incorporación de átomos externos en el interior de una matriz. b) Se considerará al procedimiento como irradiación cuando nos enfocamos a los efectos debidos al paso de los iones por una región en el interior de la muestra, sin reparar en su implantación al final de su trayectoria.

Tabla 4. Procedimientos típicos de implantación e irradiación de materiales.

Técnica o procedimiento	Tipo de partículas	Energías [MeV]	Corrientes	diámetro del haz	Aplicaciones
Implantación a energía baja	iones diversos	0.010 a 0.1	10 μA a 300 mA	variable de mm's a cm's	Depósito de elementos prácticamente en la superficie. Fabricación de recubrimientos con propiedades magnéticas, ópticas o contactos eléctricos.
Implantación a energía media	iones diversos	0.1 a 0.8	10 μA a 300 mA	variable de mm's a cm's	Depósito de elementos en la superficie y a una profundidad inmediata. Fabricación de dispositivos microelectrónicos.
Implantación a energía alta	iones diversos	1.0 a 10	10 μA a 300 mA	Barrido de haz < 5 mm	Depósito de los elementos completamente en el interior de la matriz. Manufactura de dispositivos optoelectrónicos en semiconductores y dieléctricos.
Irradiación con iones	iones diversos	0.7 a 250	50 nA a > 5 μA	variable de mm's a cm's	Modificación de materiales por la creación de daño a lo largo de la traza producida por el ion.  Deformación de micropartículas, cambio en el índice de refracción, interdifusión de películas delgadas (mezcla atómica).
Irradiación con electrones	e <sup>-</sup>	> 1 MeV		variable de 5 mm a cm's	Modificación de materiales por el rompimiento de enlaces químicos y el favorecimiento de nuevas ligaduras.  Principalmente la modificación de polímeros.

En la figura 15 se muestran los efectos en función de la energía de los iones cuando se hacen incidir sobre una matriz e implantarlos en su interior. De esta figura el eje y indica la profundidad con respecto a la

superficie original de una muestra. Puede apreciarse que cuando los iones tienen energías de keV quedan implantados a profundidades de unas décimas de micrómetro, en tanto que a energías de MeV se depositan a profundidades del orden de micrómetros.



**Figura 15.** Esquema de los efectos producidos por iones incidentes sobre una matriz donde quedan implantados en función de la energía de los iones (eje y) y de la fluencia o cantidad de iones implantados por unidad de área (eje x).

Cuando los iones comienzan a incidir en una matriz estos se alojan en promedio a una profundidad en función de su energía y la composición de la muestra. Inicialmente los iones implantados quedan disueltos en el interior de la matriz hasta llegar a un punto de sobresaturación a partir del cual comienzan a nuclearse en pequeñas partículas. En la medida que aumenta la fluencia de iones (a lo largo del eje x) estas partículas van creciendo de tamaño hasta que puedan llegar a coalecer a manera de formar una capa homogénea en el interior de la matriz.

Debido a que la dispersión en la distribución de iones en el interior de una matriz aumenta a medida que los iones tengan mayores energías, los estados de coalescencia se obtienen a menores fluencias al implantar a menores energías. También, debido a que los iones incidentes pueden ir erosionando la superficie de la muestra por efecto de "sputtering" es posible observar una disminución en la profundidad a la que quedan implantados al aumentar la fluencia.

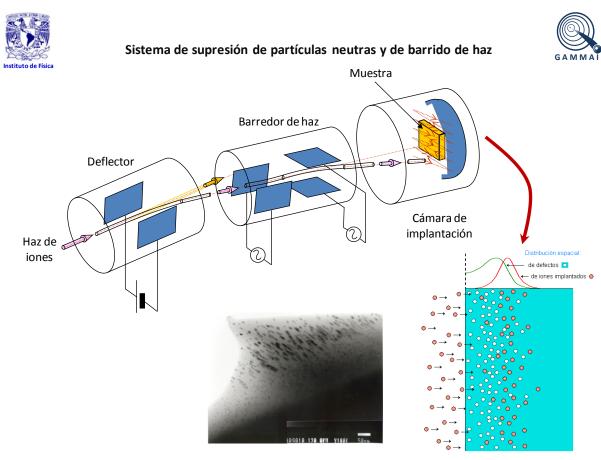
La implantación de iones tiene varias ventajas sobre los métodos convencionales, como la difusión térmica, para dopar o incorporación de elementos en una matriz:

- a) Permite dopar un material con otra clase de átomos fuera del equilibrio termodinámico.
- b) Permite una mayor variedad de elementos guímicos como dopantes.
- c) Permite rebasar el límite de solubilidad de un elemento impureza en cualquier matriz.

- d) Los perfiles de concentración de los elementos implantados pueden controlarse y variarse en un intervalo más grande de profundidades.
- e) Los procesos de implantación ocurren a menores temperaturas reduciendo las difusiones no deseadas.
- f) Bajo una mascarilla es posible incorporar a los iones en las zonas permitidas sin que se difundan en las regiones bloqueadas por la mascarilla.
- g) Posibilita la manufactura de estructuras a lo largo de patrones preestablecidos.
- h) La creación de juntas semiconductoras p-n pueden variarse con la profundidad más fácilmente.
- i) Incorporar impurezas de manera uniforme sobre la superficie del semiconductor.

Cuando la irradiación se realiza con iones a energías de más de 1 MeV, al proceso se le conoce como implantación profunda, la cual tiene además las siguientes ventajas:

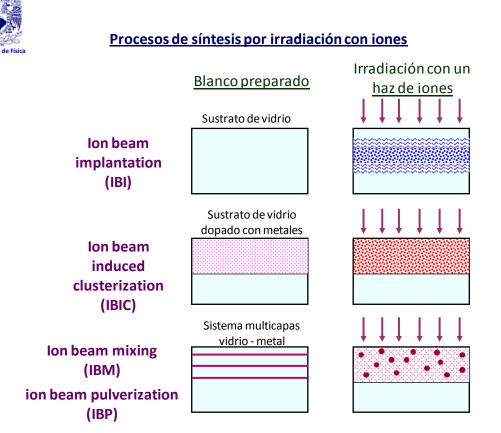
- a) los iones depositados quedan localizados totalmente adentro de la muestra, por lo tanto quedan protegidos por la misma matriz y formando parte integral de la misma.
- b) Es una técnica muy limpia por el uso del imán selector a la salida del acelerador, pues sólo los iones del tipo y la energía deseada son dirigidos a la muestra.



**Figura 16.** Esquema de la cámara de irradiación y sistema de barrido de un haz de iones para la implantación de iones. Abajo se muestra una micrografía de nanopartículas de plata producidas sílice por medio de implantación de iones de Ag<sup>+2</sup> a 2 MeV. Abajo a la derecha se muestra un esquema de los efectos producidos por los iones en la matriz: una zona con una distribución de daño y otra con los iones implantados.

Para obtener una distribución uniforme de iones implantados sobre una superficie, las cámaras de irradiación cuentan con sistemas de placas eléctricas para generar el barrido del haz sobre un área determinada. En la figura 16 se muestra el esquema de un sistema de implantación típico, como el que se encuentra en acelerador Pelletron del IFUNAM. Una vez que el haz de iones tiene la energía seleccionada con un electroimán, este pasa primero por un sistema de placas paralelas cargadas eléctricamente que desvía a las partículas cargadas hacia un sistema de barrido de haz. De esta manera se eliminan a las partículas neutras que puedan acompañar al haz. En el barredor de haz se encuentran dos pares de placas metálicas paralelas conectadas a fuentes alternas que hacen variar el campo eléctrico entre ellas de manera que el haz desarrolla un movimiento de barrido de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo sobre un área.

En la figura 17 se muestran esquemáticamente los efectos que suelen producen al irradiar una matriz con iones a energías del orden de MeV, considerando el caso de una matriz de vidrio con tres posibles preparaciones. El primer caso es el de una matriz pura de vidrio en la cual los iones incidentes quedan implantados y distribuidos en su interior en torno a una determinada profundidad. Podemos llamar a este proceso como IBI (Ion Beam Implantation).



**Figura 17.** Efectos y procesos producidos al irradiar con iones un sustrato de vidrio con tres diferentes preparaciones: vidrio puro, vidrio con una región dopada y un sistema multicapa vidrio - metal.

En el segundo caso tenemos un sustrato de vidrio dopado con átomos de un elemento metálico en la región cercana a la superficie. Al irradiarlo con iones puede producirse el proceso de formación de cúmulos o

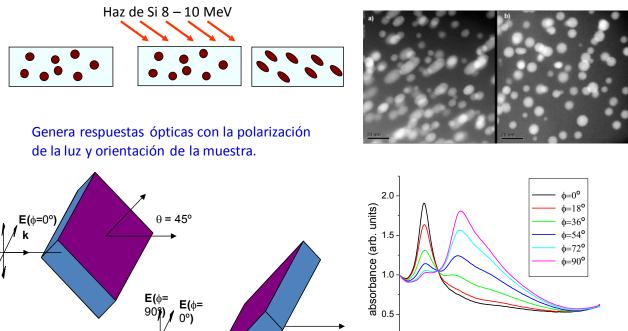
"clusterización", cuando los elementos dopantes se agrupan en las zonas donde se producen las trazas. Este proceso es conocido como IBIC (Ion Beam Induced Clusterization). En el tercer caso ocurre cuando puede tenerse un arreglo de multicapas vidrio/metal sobre vidrio. Dependiendo del grosor de las capas, estas al ser irradiadas pueden presentar un efecto de interdifusión entre ellas, conocido como mezcla atómica, IBM (Ion Beam Mixing). En otros casos cuando el grosor de las películas metálicas son muy delgadas puede producirse la pulverización de la película delgada, dando como resultado la formación de cúmulos metálicos en una matriz de vidrio. Este proceso se le llama IBP (Ion Beam Pulverize).

Es conveniente tener presente que por lo general los procesos de implantación o de irradiación van seguidos por un tratamiento térmico bajo diversos tipos de atmósferas y presiones.

Como un ejemplo, también en la figura 18 se muestran los efectos de la modificación de microestructuras al ser irradiadas con iones [16,17]. En este caso nanoparticulas metálicas con simetría esférica en el interior de una matriz dieléctrica son irradiadas con un haz de iones de silicio a energías de 8 a 10 MeV, produciendo nanopartículas con formas esferoidales con el eje principal orientado en la dirección de incidencia del haz. Se puede observar claramente este efecto a partir de las fotografías de microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas antes y después de ser irradiadas con los iones de silicio.

# Deformación de nanocúmulos metálicos en sílice por irradiación





**Figura 18.** Procesos de deformación de microestructuras al ser irradiadas con iones. Arriba a la izquierda se muestra el proceso al irradiar partículas con simetría esférica con iones a energías de MeV con una inclinación con respecto a la superficie. Al final del proceso se obtienen partículas esferoidales. Arriba a la derecha se muestran dos fotografías de microscopía electrónica de transmisión en donde se observan las partículas antes y después de ser irradiadas. Abajo se muestran los efectos en la absorción de luz en función de la orientación de la muestra el estado de polarización de la luz.

 $\theta = -45^{\circ}$ 

300

800

600

wavelength (nm)

700

900

La deformación de todas estas nanopartículas en una misma dirección tiene efectos para la interacción del material con luz polarizada. En la parte de abajo a la derecha de la figura 18 se muestran los efectos en la absorción de luz en función de la orientación del material y del estado de polarización de la luz. Puede apreciarse como claramente cambia la longitud de onda de la luz que es más absorbida por el material para determinadas orientaciones y estados de polarización de la luz. Esto puede aplicarse a la fabricación de filtros selectivos de luz necesarios a su vez en otras aplicaciones tecnológicas.

Así como en este ejemplo anterior, existen otros casos en donde la modificación de microestructuras para nuevas aplicaciones tecnológicas sólo puede efectuarse de manera controlada por medio de la irradiación con iones.

### 5.3 Irradiación con electrones.

Debido a que la masa de los electrones es muchísimo más pequeña que la de los iones, su interacción con los átomos de un material no produce los mismos efectos en cuanto al desplazamiento de átomos, pero si aumenta la excitación e ionización de los átomos del blanco. Por este motivo la irradiación con electrones se utiliza preferentemente para generar efectos químicos en una muestra.

Los polímeros son de los materiales preferidos para ser irradiados con electrones y a continuación se muestran algunos ejemplos en este caso:

- a) En algunos casos se utiliza para efectuar la polimerización de componentes moleculares menores (monómeros). Si el caso es apropiado, la irradiación con electrones puede aumentar hasta en un factor de 100 el proceso en comparación con procedimientos convencionales.
- b) La irradiación con iones puede dar mayor estabilidad química a fibras de madera o papel para hacerlas más resistentes al fuego. Esto se aplica también en la fabricación de ropa antifuego e hidrofóbica en textiles de acrilatos y siloxanos.
- c) Crear ligaduras entrelazadas en los polímeros eliminando terminales susceptibles a ligarse químicamente. Esto es muy conveniente para generar estructuras con mayor resistencia a solventes químicos. Esto es muy conveniente para materiales de polietileno utilizados en tuberías y en aislante de cables eléctricos que operan en ambientes corrosivos.
- d) Es posible el efecto de vulcanización de hule por radiación produciendo en unos casos mejores ligaduras entrelazadas. Análogamente se encuentra el curado de pinturas y recubrimientos.

Pero además de los polímeros, los efectos en las moléculas también hacen que la irradiación con electrones sea útil en muchos otros tipos de procesos:

La degradación de compuestos orgánicos en aguas residuales para reducir los compuestos más tóxicos al ambiente. Por ejemplo, las espumas de los detergentes son muy estables y difíciles de manejar (debido a la cantidad de espuma dificulta su transporte. Al ser irradiadas con electrones las espumas son reducidas a sustancias que son más sencillas de remover. De manera semejante se utiliza para la degradación de sustancias industriales de desecho como tintas y celulosas. En aspectos ambientales puede llegar a utilizarse para la remediación de suelos altamente contaminados.

El tratamiento de gases expulsados a la atmósfera por industrias o actividades humanas por medio de la irradiación puede reducir también moléculas dañinas por otras menos peligrosas. Por ejemplo, gases nitrosos o con azufre se hacen pasar por vapores de amonia (NH<sub>3</sub>) para mezclarse y luego por una zona de

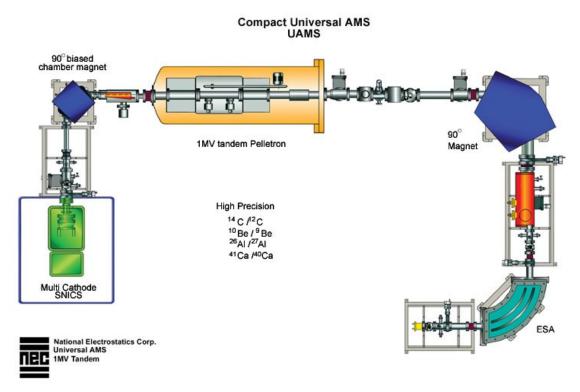
irradiación con electrones que inicia reacciones con las moléculas de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> que dan como resultado la precipitación de sales que son atrapadas y retiradas.

Actualmente, la industria microelectrónica investiga los efectos de la radiación en los microcircuitos electrónicos para conocer su estabilidad en satélites espaciales. Para ello, los microcircuitos son irradiados con electrones con la finalidad de estudiar su degradación y métodos para aumentar su durabilidad. Finalmente, otros usos de la irradiación con electrones serán expuestos en la sección 6.

### 5.4 Espectrometría de masas con aceleradores, AMS.

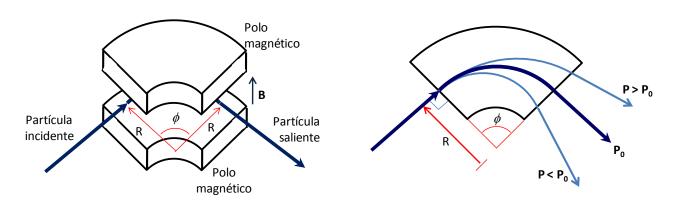
La sensibilidad de los espectrómetros de masa puede incrementarse proporcionando altas velocidades a las partículas. Por este motivo el uso de aceleradores electrostáticos con potenciales de MV se ha desarrollado también en la espectrometría de masas AMS (Accelerator Mass Spectrometry). Este tipo de equipos resulta mucho más ventajoso para el estudio de isotopos, como el <sup>14</sup>C, que los métodos convencionales de registro de la actividad por decaimiento radiactivo. Además, por su mayor sensibilidad, se requieren menores cantidades de muestra para los análisis. Esto último resulta muy útil en el campo de la arqueología.

En la figura 19 se muestra el esquema de un acelerador pelletron tandem de 1 MV adaptado para ser utilizado como AMS. Para su operación primero se tiene que depositar al elemento cuyos isótopos se desea cuantificar en un cátodo sólido. Este cátodo se coloca en la fuente de iones del acelerador para producir iones negativos de dicho elemento que serán acelerados hacia la terminal de alto voltaje en donde pasarán por la celda de gas "stripper" para quedar con carga positiva y ser enviados hacia un imán analizador.



**Figura 19.** Ejemplo de un acelerador pelletron tandem acondicionado para utilizarse como espectrómetro de masas.

El efecto del campo magnético del imán analizador sobre las partículas se muestra en la figura 20. En este imán con las condiciones adecuadas solamente las partículas que tengan una relación de carga-masa particular podrán ser deflectadas hacia la siguiente sección del sistema. Al final las partículas pasaran por un analizador electrostático de energía o ESA (Electrostatic Energy Analyzer), que eliminará cualquier otro tipo de ion que interfiera con el isótopo de interés. Al final del trayecto se cuenta con un sistema de detección que permite determinar el número de isótopos particulares producidos por la muestra.



**Figura 20.** Esquema de un imán analizador. El campo magnético del imán se ajusta para que las partículas que tengan un momentum determinado  $p_0$  se muevan en un círculo de radio R y sean deflectadas  $90^\circ$ .

### 6. Aceleradores en Biología y Medicina

Desde el descubrimiento de los rayos X y el inicio de los aceleradores en física nuclear estos fueron aplicados inmediatamente a la medicina debido a los efectos de la radiación ionizante sobre las células. En esta sección iniciaremos revisando los efectos de la radiación sobre los seres vivos en general y posteriormente mostraremos sus aplicaciones a la medicina.

### 6.1 Aceleradores en radiobiología.

En la radiobiología, disciplina dedicada al estudio de los efectos de la radiación ionizante en tejidos biológicos y organismos vivos, los aceleradores son instrumentos idóneos para producir fotones o partículas cargadas con distribuciones en energías controladas en comparación con fuentes radiactivas. El estudio de los efectos de la radiación ionizante en células tiene importancia directa en el análisis de efectos producidos por la radiación en seres humanos.

Cuando radiación ionizante atraviesa tejidos vivos o células, por efectos principalmente coulombianos, se producen átomos y moléculas en estados excitados o ionizados que dan lugar a disociaciones moleculares y la generación de radicales libres. Los radicales libres son moléculas con gran poder reactivo que van a interaccionar con las moléculas de la célula, como las proteínas, pudiendo dañar aquellas que son fundamentales para la integridad y funcionalidad de la célula.

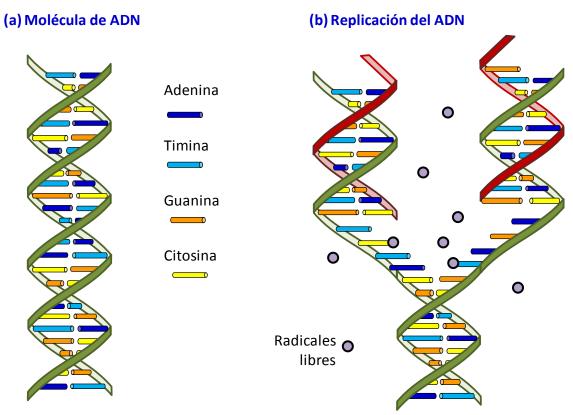
En las células la interacción de la radiación ocurre principalmente con las moléculas de agua (alrededor del 80% de las células está compuesta por agua), produciendo radicales libres de vida corta pero extremadamente reactivos como el H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> ("ion de agua") o OH<sup>-</sup> (radical hidroxilo). Estos radicales como tienen electrones o vacantes no apareadas pueden romper las ligaduras químicas de proteínas y producir cambios químicos en ellas desarrollando daños biológicos.

Uno de los daños más graves ocurre cuando se afecta el ADN de las células. El ADN está formado por dos brazos largos que soportan a las bases adenina, timina, guanina y citosina. Estas bases se unen entre sí por medio de puentes de hidrógeno, ocasionando que los brazos se entrelacen a manera de una doble hélice, como se muestra en la figura 21(a). Además, el ADN cuenta con la presencia de enzimas que constantemente reparan las alteraciones que puedan sufrir en su estructura y mantener la integridad del código.

Puede verse que durante la etapa de división celular cuando el ADN se está duplicando, es el momento en el cual las bases son más susceptibles a los efectos de los radicales libres, figura 21(b). Esto produce la oxidación de las bases del ADN y por lo tanto no permiten su replicación correcta dando como consecuencia la muerte de la célula. Por este motivo las células y tejidos más propensos a sufrir daños son aquellos que se encuentran constantemente proliferando, como son médula ósea, las paredes internas del intestino, la piel y las células pilosas.

También, muy grave resulta el daño directo a la molécula del ADN cuando la radiación ionizante produce roturas múltiples en las cadenas de nucleótidos, tal como se muestra en la figura 22, el cual afecta seriamente el ciclo de división celular.

Las consecuencias del depósito de energía por la radiación en tejidos vivos tienen lugar desde tiempos de  $10^{-13}$  segundos, seguidos por reacciones químicas a  $10^{-3}$  seg debidos a radicales libres y especies excitadas producidos antes. Los efectos bioquímicos debidos a productos metaestables pueden tomar horas en aparecer y finalmente efectos biológicos, como cáncer, pueden aparecer hasta varios años después. Un resumen de estos efectos en función del tiempo se muestra a continuación en la tabla 5 [18].



**Figura 21.** Molécula del ADN compuesta por dos hebras o brazos que soportan las bases

**Tabla 5**. Efectos de la radiación en células en función el tiempo.

Procesos	<b>Tiempo</b> (segundos)	Efectos		
Físicos	$10^{-18}$ $10^{-16}$ $10^{-14}$ $10^{-12}$	Movimiento o paso de las partículas cargadas incidentes por células. Ionización, excitación atómica y molecular. Disociación molecular. Exceso de electrones en agua (Electron hydration), termalización de los electrones.		
Fisicoquímicos	10 <sup>-11</sup> 10 <sup>-9</sup> 10 <sup>-6</sup>	Reacciones entre radicales. Reacciones con solutos concentrados. Distribución homogénea de los radicales.		
Químicos	10 <sup>-4</sup> 10 <sup>0</sup>	Reacciones con solutos diluidos. Reacciones completas para los radicales libres.		
Bioquímicos	10 <sup>1</sup> 10 <sup>3</sup>	Remoción enzimática de oxígeno. Reparación enzimática.		
Biológicos	10 <sup>4</sup> 10 <sup>5</sup> 10 <sup>7</sup> 10 <sup>9</sup>	Efectos en la división celular. Daño temprano en los tejidos. Daño posterior en los tejidos. Carcinogénesis.		

# (a) Radiación ionizante rompe con una cadena de ADN Partícula

**Figura 22.** La radiación puede romper uno o los dos brazos de la cadena de ADN, los cuales son difíciles de reparar por las enzimas.

La irradiación de células puede resultar en nueve efectos posibles:

- 1. No se produzca ningún efecto.
- 2. Se retrase la división celular.
- 3. Apoptosis: La célula muere antes de dividirse, o después por fragmentación en partes menores que son tomadas por las células vecinas.
- 4. Fallo en la reproducción: La célula muere cuando intenta su mitosis.
- 5. Inestabilidad genómica: hay un retraso en la reproducción y efectos genómicos inestables.
- 6. Mutaciones: La célula sobrevive pero con mutaciones en su descendencia.
- 7. Transformación: La célula sobrevive pero la mutación la transforma en otro fenotipo y posible carcinogénesis.
- 8. Metastasis: la célula sobrevive y envía señales a células vecinas normales e induce daño genético en ellas.
- 9. Respuestas adaptativas: La célula irradiada es estimulada a reaccionar y volverse más resistente a irradiaciones subsecuentes.

Actualmente una de las líneas de investigaciones que se están realizando es el de observar los efectos en seres vivos por la irradiación con iones energéticos. Esto está directamente asociado con los efectos que pueden sufrir astronautas en viajes espaciales debido a la radiación cósmica. En estos casos los aceleradores de partículas se emplean para simular las condiciones que pueden presentarse en el espacio exterior. Las condiciones que deben de cumplir en parte estos laboratorios para poder incidir en la investigación son [19]:

- a) Debe permitir acelerar los iones más abundantes en el cosmos: H, He, C, O, Mg, Si y Fe. Aproximadamente el 90% de los efectos físicos y biológicos que se producen en el espacio tienen que ver con estos iones.
- b) Se requieren haces de protones con energías de 50 a 1000 MeV y otro tipo de iones a energías entre 50 MeV hasta varios miles de MeV's.
- c) Deben de permitir ofrecer razones de dosis adecuadas para llevar al cabo experimentos de radiobiología con células y animales.
- d) Contar con la infraestructura para realizar estudios completos de genética y otras propiedades biológicas.

### 6.2 Aceleradores en Radioterapia.

Por lo expuesto en el apartado anterior, la exposición a la radiación ionizante es perjudicial para los seres vivos, pero por otra parte, este efecto dañino, puede ser usado de manera letal para eliminar células que generan tumores cancerosos.

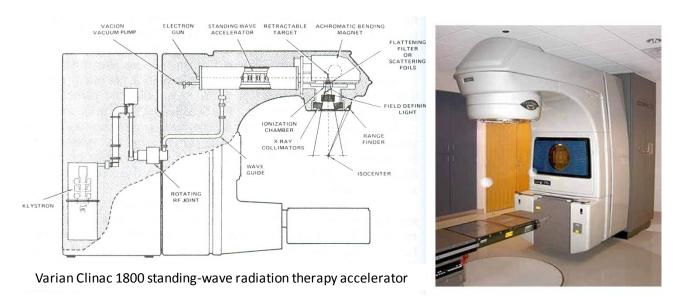
En términos generales el cáncer es una enfermedad en la cual el organismo produce un exceso de células con crecimiento y división más allá de los límites normales, formando tumores que son malignos cuando invaden tejidos o inducen el crecimiento de nuevos tumores (metástasis). El cáncer es producido por anormalidades en el material genético de las células.

El objetivo de la radioterapia es irradiar las zonas del cuerpo humano donde están creciendo tumores para destruirlo y procurar producir el menor daño posible en los tejidos normales sin producir complicaciones serias al paciente. Así, las dos reglas de la radioterapia son:

- (1) Dar la dosis suficientemente alta para erradicar un tumor
- (2) Minimizar la dosis sobre tejidos normales, particularmente los órganos críticos.

En 1913 W.D. Coolidge desarrolló el tubo de rayos X y desde su inicio fueron utilizados en el tratamiento de tumores malignos en personas. Los primeros utilizados para tratamientos operaban con voltajes de 140 kV y corrientes de 5 mA. El inconveniente que tienen para la radioterapia es que producen rayos X muy poco energéticos y las dosis son muy superficiales. Por ello se utilizaron más que nada en tratamientos de la piel y siempre se buscaron fuentes de radiación más penetrante en radionúclidos emisores de rayos gamma como el Co-60. En Estados Unidos desde los años 80's se utilizan más aceleradores que fuentes de Co-60 que sólo emiten fotones de 1.25 MeV.

Con la aparición de los aceleradores electrostáticos, los tipo Van de Graaff fueron los primeros que se utilizaron para producir rayos X. Posteriormente fueron los betatrones (1943) y los linacs (1956) los más empleados para producir rayos X. Los betatrones fueron muy utilizados en los años setentas y parte de los ochentas, pero debido al peso que tenían y a el menor grado de libertad en su movimiento para fueron quedando en desuso. En la actualidad los linacs son los más utilizados pues ocupan poco espacio, permiten mayores grados de movimiento para la irradiación sobre un paciente y ofrecen razones de dosis de 200 a 400 rad/min. En la figura 23 se muestra un acelerador lineal para radioterapia tanto con electrones como por rayos X. Su ventaja clínica es que permite mayores penetraciones de la radiación y proporcionar dosis máximas por debajo de la piel.



**Figura 23.** Acelerador lineal de electrones marca Varian modelo Clinac 1800 para radioterápia. Permite acelerar electrones a energías de 4, 9, 12, 16 y 20 MeV, así como también producir fotones de rayos X de energías entre 6 y 18 MeV.

En el modo de rayos X los electrones acelerados se hacen chocar contra un blanco, generalmente de cobre, a la salida del cabezal del equipo. Los fotones producidos con potenciales de 6 u 8 MV son utilizados en el caso de tumores de tórax, abdomen y pelvis.

En el modo de electrones estos salen directamente del cabezal del equipo al paciente. Debido a que los electrones tienen mayores probabilidades de interacciónque los fotones de rayos X, los electrones permiten un depósito mayor de energía en los tejidos. Así el haz que penetra en el paciente se va frenando rápidamente de tal manera que más allá de algunos centímetros de profundidad no existe prácticamente dosis alguna en los tejidos subyacentes. Su empleo terapéutico es entonces específico en lesiones de pocos centímetros de profundidad. Claro que cuanto mayor sea la energía de los electrones, mayor es su alcance terapéutico. El empleo de Electrones de alta energía, como 20 MeV, amplía enormemente el rango de aplicaciones: cabeza y cuello, columna en irradiación de metástasis y tratamiento profiláctico de raquis en pediatría, entre otras. En la tabla 6 se muestran los alcances promedio para electrones en tejidos vivos.

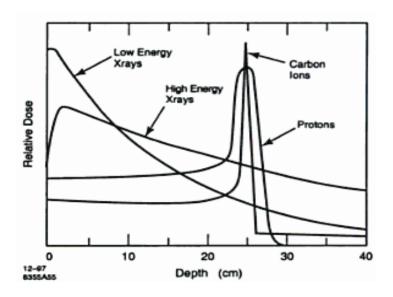
Tabla 6. Alcances promedio de electrones en tejidos vivos.

Energía [MeV]	Alcance [cm]	
6	2	
9	3	
12	4	
16	5.5	
20	7	

Es importante mencionar que en todos estos tratamientos siempre se debe de garantizar el cumplimiento de un exhaustivo programa de control de calidad, de tal manera que involucra una estrecha cooperación

entre médicos radioterapeutas, físicos especialistas en radioterapia, técnicos operadores e ingenieros de mantenimiento.

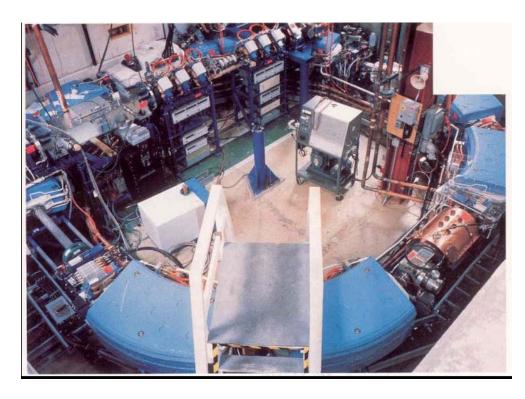
El empleo de partículas más pesadas como protones o iones más pesados ofrece la posibilidad de mejorar la relación de daño en el tumor maligno y el tejido sano. Con estas partículas se consigue un depósito de energía más localizado. A los tratamientos con este tipo de partículas se les llama terapias con hadrones. En la figura 24 se muestra a manera de ilustración la dosis depositada en función de la profundidad abajo de la piel para diversos tipos de radiación [18]. Para estas terapias con hadrones se requiere de aceleradores más grandes que puedan proporcionar energías arriba de varios cientos de MeV. Por ejemplo, para que los protones tengan un alcance de 30 cm en tejido humano se requiere de 250 MeV. En el caso de iones más pesados se requieren de energías mucho más grandes. Esto complica su instalación en hospitales y en comparación con los linacs de electrones todavía hay muy pocos de estos equipos usados en radioterapia.



**Figura 24.** Dosis depositada en función de la profundidad abajo de la piel para diversos tipos de radiación.

El Hospital Universitario de Loma Linda, California, fue el primer centro con un acelerador sincrotrón para terapias rutinarias utilizando protones. En la figura 25 se muestra una fotografía de este sincrotrón el cual permite acelerar protones hasta una energía de 250 MeV [20]. Hacia el año 2006 existían a nivel mundial 35 centros con irradiadores de protones y 5 de iones de carbón. Los protones e iones de carbón son las partículas más utilizadas para estas terapias, pero de manera experimental se hacen estudios con otro tipo de iones e incluso con mesones  $\pi$ .

Uno de los inconvenientes de estas terapias es que el haz de partículas no puede orientarse desde diferentes ángulos sobre el paciente como en el caso de lo linacs. En estos casos es necesario rotar al paciente a posiciones en las cuales es difícil evitar que se mueva o se desplacen tejidos internos aunque sea de unos cuantos milímetros.



**Figura 25.** Fotografía del sincrotron del Hospital de Loma Linda que permite acelerar protones de 250 MeV. Este fue el primer equipo con el que se comenzó de manera rutinaria la radioterapia con protones.

### 6.3 Aceleradores en producción de radioisótopos.

Otra de las mayores aplicaciones de los aceleradores en la medicina es en la fabricación de radioisótopos, principalmente para su utilización en procedimientos de diagnóstico.

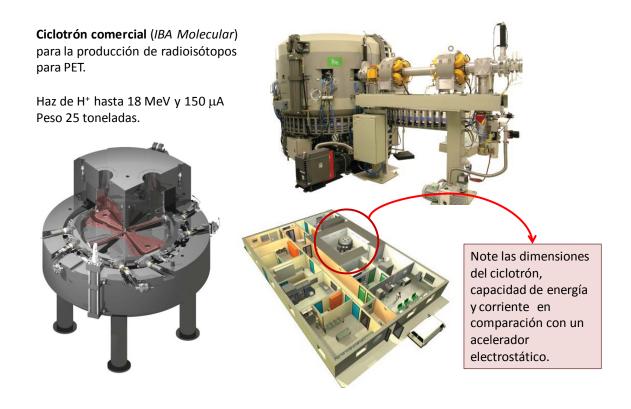
Para estos propósitos los aceleradores más utilizados son los ciclotrones debido a sus características, entre ellas el tamaño y el "bajo costo" de operación y mantenimiento. Existen varios fabricantes de estos equipos, como Siemens y General Electric. La Facultad de Medicina de la UNAM cuenta con uno Siemens RDS-11, que permite acelerar protones de 11 MeV y con el cual se producen radioisótopos para estudios por tomografía de emisión de positrones, PET (Positron Emission Tomography).

En la figura 26 se muestran imágenes de un ciclotrón marca IBA Molecular tomadas de un folleto comercial<sup>1</sup>. Como puede verse, esta propaganda incluye un esquema genérico de las instalaciones que deben de integrarse en un centro médico. Como puede verse también, estos ciclotrones no están integrados por dos electrodos huecos aceleradores en forma de "D", sino que tiene varios triangulares para acelerar al protón varias veces más en cada vuelta.

En la tabla 7 se muestran cuatro de los radioisótopos más utilizados para estudios por radiodiagnóstico. En la tabla 8 se muestran los radioisótopos para estudios por PET producidos eficientemente por reacciones nucleares por abajo de los 11 MeV. Para este caso son necesarios radionúclidos correspondientes a

<sup>1</sup> Hubiera sido bueno poner imágenes del ciclotrón de la Facultad de Medicina de la UNAM, pero como este equipo tiene un blindaje integrado no permite observar las características propias de un ciclotrón.

elementos de alta actividad biológica y son sintetizados en sustancias como  $CO_2$ , CO, HCN,  $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $NH_4$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ , HF, etc.



**Figura 26.** Imágenes de un ciclotrón marca IBA Molecular utilizado para fabricar radioisótopos. Las fotos fueron tomadas de su propaganda comercial.

Tabla 7. Algunos de los radioisótopos más utilizados en procedimientos de diagnóstico, la reacción nuclear utilizada, la región de energías utilizadas para la reacción y su principal aplicación.

Radionúclido	Reacción nuclear	Energías de reacción [MeV]	Aplicación
<sup>67</sup> Ga	<sup>68</sup> Zn(p,2n) <sup>67</sup> Ga	12 - 28	Estudios de imagen de inflamaciones.
<sup>111</sup> ln	<sup>112</sup> Cd(p,2n) <sup>111</sup> In	12 - 28	Marcado de proteinas, localización de tumores.
<sup>201</sup> TI	$^{203}\text{TI}(p,3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{TI}$	17 - 28	Estudios al miocardio.
<sup>124</sup>	<sup>124</sup> Te(p,2n) <sup>123</sup> I	20 - 25	Localización de carcinomas en hígado y cerebro.

Tabla 8. Radioisótopos para estudios por PET producidos eficientemente por reacciones nucleares por abajo de los 11 MeV.

Radionúclido	Reacción nuclear	Vida media [minutos]	Energía de los positrones [keV]
<sup>11</sup> C	$^{14}$ N(p, $lpha$ ) $^{11}$ C	20.4	960
<sup>13</sup> N	$^{6}$ O(p, $lpha$ ) $^{13}$ N $^{13}$ C(p,n) $^{13}$ N	9.96	1190
<sup>15</sup> O	<sup>15</sup> N(p,n) <sup>15</sup> O	2.05	1720
<sup>18</sup> F	<sup>18</sup> O(p,n) <sup>18</sup> F	109.6	635

### 6.4 Procesos de esterilización

Debido a los efectos de la radiación en microorganismos, como se vio en la sección 6.1, una de las aplicaciones de los aceleradores de electrones es en procesos de esterilización, tanto por la irradiación directa con electrones o indirectamente produciendo rayos X. De esta manera son utilizados para la eliminación de microorganismos en aguas, suelos y alimentos. Se utilizan en la desinfección de desechos hospitalarios para reducir los riesgos en los basureros aun cuando sean especializados en este tipo de desechos.

Industrialmente, su mayor uso está en la irradiación de empaques y equipo médico para su esterilización y la de alimentos para su conservación. La ventaja de los aceleradores sobre las fuentes radiactivas de Co-60 para realizar estas tareas radica en que no se necesita un cementerio nuclear para su depósito final.

### Referencias:

- [1] J. R. Rickards Campbell, "La física de las radiaciones en materia", Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM, 2001.
- [2] J.R. Bird and J.S. Williams, "Ion beams for material análisis", Academic Press, Sidney, 1989.
- [3] Edward J. N. Wilson, "An introduction to particle accelerators", Oxford University Press, 2001.
- [4] Alexander Wu Chao, Mauri Tigner, Editores: "Handbook of accelerator physics and engineering", Word Scientific, 1999.
- [5] Stanley Humphries, "Principles of Charged Particle Acceleration", John Wiley and Sons, 1986. Disponible en pdf: http://www.fieldp.com/cpa.html.
- [6] En la web existen notas sobre cursos de aceleradores de partículas que se han impartido en varios laboratorios del mundo, como el CERN y FERMILAB. Como ejemplos, pueden consultar las páginas: http://preprints.cern.ch/cernrep/1994/94-01/94-01\_v1.html, http://preprints.cern.ch/cernrep/1996/96-02/96-02.html
- [7] H. D. Young, "University Physics", Addison-Wesley, 1992.
- [8] W.H. Scharf and O.A. Chomicky, "Medical Accelerators in Radiotherapy: Past, Present and Future", Physica Medica 12 (1996) 199.
- [9] U. Amaldi, "The importance of particle accelerators", Proceedings of the European Particle Accelerator Conference, 2000.
- [10] María de la Paz Ramos, coordinadora: "Experiencia mexicana en aceleradores de partículas", UNAM Siglo XXI, 2004.
- [11] D.K. Avasthi, "Nanostructuring by energetic ion beams", Hyperfine interactions 160 (2005) 95.
- [12] M. Nastasi, J.W. Mayer and J.K. Hirvonen, "Ion-solid interactions: Fundamentals and applications", Cambridge University Press, 1996.
- [13] G. Norton y J.L. Duggan, "Industrial applications electrostatics accelerators", en "Handbook of accelerator physics and engineering", Alexander Wu Chao, Mauri Tigner Editores. Word Scientific 1999, pag 24.
- [14] J.R.Tesmer and M. Nastasi, Editores: "Handbook of modern ion beam material analysis", Materials Research Society, 1995.
- [15] P. R. Morris, "A history of the world semiconductor industry", Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [16] Rodríguez-Iglesias, V., Silva-Pereyra, H.G., Cheang-Wong, J.C., Reyes-Esqueda, J. A., Rodríguez-Fernández, L., Crespo-Sosa, A., Kellerman, G., Oliver, A., "MeV Si ion irradiation effects on the optical absorption properties of metallic nanoparticles embedded in silica", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **266** (2008) 3138-3142.
- [17] Oliver, A., Reyes-Esqueda, J.A., Cheang-Wong, J.C., Román-Velázquez, C.E., Crespo-Sosa, A., Rodríguez-Fernández, L., Seman, J.A., Noguez, C., "Controlled anisotropic deformation of Ag nanoparticles by Si ion irradiation", Physical Review B, **74** (2006) 245425.
- [18] W. H. Scharf, "Biomedical particle accelerators", AIP Press, New York, 1994.
- [19] W. Schimmerling, J. W. Wilson, F. Cucinotta, and M-H Y. Kim, "Requirements for simulating space radiation with particle accelerators",
- [20] S. Peggs, T. Satogata, J. Flanz, "A survey of hadron therapy accelerator technologies", Particle Accelerator Conference 2007 (PAC 2007, 2007 accelconf.web.cern.ch).

  IEEE Xplore Issue, 25-29 June 2007 Pages:115 119.