

ACELERADORES DE PARTICULAS

Dr. EDUARDO ANDRADE
INSTITUTO DE FISICA.
UNAM

Introducción Histórica

Uno de los descubrimientos científicos más importantes para la humanidad fue el ocurrido en el año de 1896 cuando el físico francés Henri Becquerel descubrió el fenómeno conocido como radiactividad y que consiste en la propiedad que poseen algunos átomos (tales como radio, polonio y torio) de emitir energía espontáneamente. En estudios posteriores se determinó la naturaleza de esta energía, consistente en la emisión de partículas y fotones, y se usaron las primeras letras del alfabeto griego para designarlas como radiación: alfa, beta y gama.

La radiación alfa consiste de partículas monoenergéticas, con carga eléctrica positiva y se identificaron como núcleos de helio. La energía de estas partículas se refiere a energía cinética y estas partículas son emitidas con gran velocidad.

La radiación beta esta constituida por electrones tanto con carga positiva y negativa. Los electrones con carga positiva se les llaman positrones. A diferencia de las alfa las partículas beta no eran monoenergéticas y son emitidas con distribución de energías con valor cero hasta un valor máximo.

La radiación gamma no tiene carga eléctrica y son ondas electromagnéticas, al igual que los rayos X, la luz visible, la violeta, etc.. Como es sabido cuando esta radiación interacciona con la materia presenta la característica de fotones.

Ernest Rutherford y sus colaboradores Marsden y Geiger en el año de 1911 utilizaron una fuente de partículas alfa como proyectiles para comprobar la teoría sobre la estructura de la materia propuesta por Thompson, también conocida como el modelo atómico del pastel.

Debido a la trascendencia de los resultados de estos experimentos y de los procedimientos experimentales utilizados, es conveniente recordar algunos detalles. En **la figura 1**, se muestra esquemáticamente el arreglo experimental usado en estos experimentos.

En este experimento se utilizó una pequeña fuente radiactiva de radio de 7 mg, la cual emitía partículas alfa a una razón de 6 millones de partículas por segundo. Se colimó un haz de partículas alfa para bombardear una delgada película transparente de oro. El experimento consistió en determinar como eran desviadas estas partículas en función del ángulo θ . Si la teoría de Thompson era correcta, se esperaba observar que la mayoría de las partículas alfas fueran desviadas ligeramente con respecto a la dirección de incidencia, debido a que la masa de los proyectiles era mayor que el de las partículas constituyentes de los átomos, ya que en esa época se consideraba que los átomos estaban constituidos solo por protones y electrones. El resultado sorprendente que se encontró fue que una partícula alfa de cada diez mil era rebotada a ángulos grandes. En un libro de física, Feynman menciona una analogía para recalcar lo sorprendente de estos resultados y dice: "puede compararse a la sorpresa que tendría una persona que disparara balas con un rifle a una almohada llena de plumas y encontrara que algunas de las balas rebotaran hacia él".

La conclusión a la que llegaría el que está disparando, es que dentro de la almohada además de plumas esta contiene objetos muy masivos tales como balas de cañón. La única forma de explicar los resultados de los experimentos de Rutherford fue la de suponer que la mayor parte de la masa de los átomos de oro, estaba concentrada en un pequeño volumen, al cual se le llamó el núcleo atómico y fue así lo que dio origen al modelo *nuclear de los átomos*.

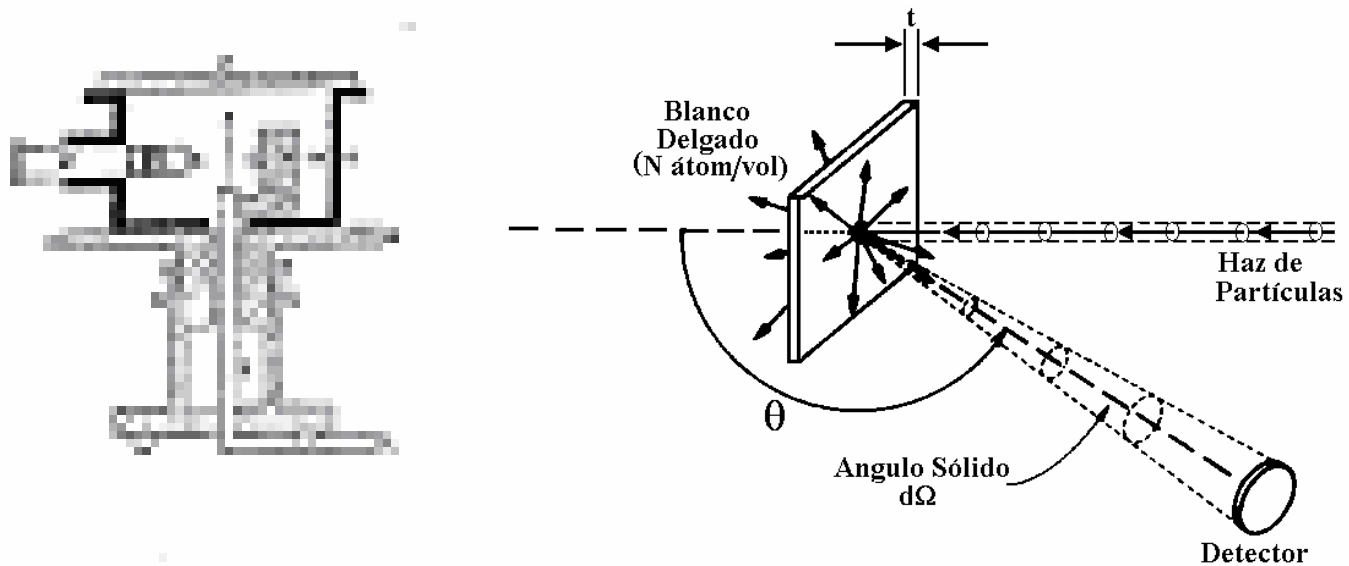


Figura 1. Ilustración esquemática del experimento de Rutherford y colaboradores.

Es importante recalcar que el principio del procedimiento utilizado por Rutherford y colaboradores en este experimento es el mismo que se utiliza rutinariamente en muchos de los laboratorios equipados con modernos y complejos aceleradores de partículas.

El estudio del núcleo atómico tanto en el ámbito teórico como experimental dio origen a una nueva rama de la ciencia llamada la *física nuclear* y el estudio experimental de estos sistemas se hizo inicialmente estudiando las colisiones de los núcleos con proyectiles producidos por fuentes radiactivas. Las limitaciones que tuvieron los primeros físicos nucleares, eran que disponían de pocas fuentes radiactivas y también estas eran poco intensas, por lo que los experimentos eran muy largos y tediosos. Otra limitación fue que los experimentadores no podían seleccionar el tipo de proyectil y su energía tampoco la podían variar adecuadamente.

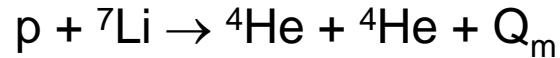
A pesar de todas estas limitaciones *usando fuentes radiactivas se obtuvieron los siguientes importantes resultados: a) el descubrimiento del núcleo atómico, b) el descubrimiento del neutrón, c) se lograron observar las primeras reacciones o transmutaciones nucleares en las cuales intervino el hombre parcialmente, d) se determinaron algunos radios nucleares, etc.*

La necesidad de disponer de instrumentos para generar proyectiles con los cuales el experimentador pudiera controlar el tipo de partícula (protones, deuterones, alfas, etc.) así como su energía y flujo de estos (corriente eléctrica) fue lo que originó el invento de esos instrumentos a los cuales se les llamó *aceleradores de partículas*.

La satisfacción de construir el primer acelerador de partículas para bombardear núcleos y producir la primera reacción nuclear o transmutación nuclear controlada totalmente por el hombre provocó una carrera para lograr este objetivo entre algunos de los científicos de la primera década de este siglo.

Esta carrera duró 20 años y los ganadores fueron los ingleses Cockcroft y Walton, quienes en el año de 1932, fueron los primeros en construir el primer acelerador de iones positivos, con el que generaron un haz de protones de bajas energías y lo usaron para bombardear isótopos de litio ${}^7\text{Li}$. El resultado de este bombardeo fue producir la primera transmutación nuclear hecha totalmente por el hombre. Por este evento Cockcroft y Walton recibieron el premio Nobel de Física en 1933. Actualmente, este experimento se puede producir y llevar a cabo en tres horas y es uno de los experimentos didácticos en el curso de Física Nuclear Experimental, en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

La reacción nuclear observada en este experimento fue:



donde Q_m es la energía debido a la diferencia de masa de las partículas antes y después de la reacción. Aquí los núcleos blancos se consideran en reposo. La energía cinética de los protones fue de 0.15 MeV. La energía después de la colisión fue de cerca de 16 MeV, repartidos en la energía cinética de las dos partículas alfa, por lo que cada una de estas tuvo aproximadamente 8 MeV.

Aparentemente, en esta reacción se está creando energía, sin embargo, la gran energía de las partículas alfa se explica usando el principio de la conservación masa-energía de Einstein, y esta relacionada a la ecuación: $E = mc^2$. En esta reacción la Q_m es positiva y con valor de 16 MeV aproximadamente.

Este experimento mostró que el sueño de los alquimistas de la Edad Media de convertir un elemento en otro, se había logrado usando, pero fue necesario el uso de los aceleradores de partículas.

Componentes básicas de un acelerador de partículas

Después de la construcción del primer acelerador, en la misma década de los 30, se inventaron otros tipos de aceleradores tales como el ciclotrón, los aceleradores lineales y los aceleradores tipo Van de Graaff. Debido a que los primeros aceleradores de partículas se construyeron con el fin de estudiar experimentalmente la estructura del núcleo atómico, por medio de colisiones las que podían originar transmutaciones o reacciones nucleares, fue la razón por lo que al hablar de un acelerador se asociaba automáticamente con un laboratorio de física nuclear. *La importancia de estos instrumentos de física nuclear es similar a la del telescopio en astronomía o al microscopio en bacteriología.* Actualmente el uso de los aceleradores se ha extendido a otras áreas de investigación básica como la física atómica "**el mundo de los electrones**" y en las partículas elementales. Los aceleradores en medicina se usan tanto en los departamentos de radiología, para destruir tumores malignos, como para producir radioisótopos que se utilizan en el diagnóstico de enfermedades (medicina nuclear). El uso de los aceleradores en aplicaciones tecnológicas es muy variado y el más conocido es en la industria de los semiconductores y de la núcleo-electrónica, las cuales se usan un tipo especial de aceleradores conocidos como "**implantadores**" con los que es posible producir los "**chips electrónicos**", circuitos integrados, etc.

El uso de aceleradores en Ciencia de Materiales ha sido, tanto para modificarlos por la técnica de "**implantación de iones**" como para su caracterización elemental a través de Técnicas de Análisis de Origen Nuclear (retrodispersión de iones, reacciones nucleares, fluorescencia de rayos x, etc.).

Los parámetros más importantes que caracterizan a un acelerador son: el tipo de partículas que pueden acelerar, el flujo o número de estas y su energía cinética. El número de partículas que produce un acelerador es relativamente fácil de medir ya que el haz de partículas da origen a una corriente eléctrica y su intensidad se expresa en amperios o submúltiplos de esta unidad. Un acelerador que produce un haz de baja corriente, por ejemplo, de un microamperio, equivale a un flujo de 6.2×10^{12} partículas/seg, lo cual da una idea del gran número de partículas si se compara con las producidas por fuentes radiactivas.

Los aceleradores son instrumentos relativamente complejos y su diseño y construcción requiere de alta tecnología e intervienen muchos campos de la ingeniería. Una forma de clasificar los aceleradores es por la energía de los proyectiles y los de alta energía o superaceleradores están instalados, por ejemplo en algunos laboratorios nacionales de los EUA, tal como, en Los Alamos, BrookHaven, FermiLab y en Europa en el CERN.

Las instalaciones de estos superaceleradores son impresionantes por su gran tamaño y los cientos de toneladas de materiales que se requirieron para su construcción. Por ejemplo, el acelerador en el FermiLab es circular y tiene un radio de un Km.

Sin embargo los conceptos sobre los principios de operación de los superaceleradores y de los pequeños aceleradores son los mismos y son simples y se describen a continuación.

Un diagrama sobre simplificado de un acelerador de partículas se muestra esquemáticamente en la figura 2 y cuyos elementos básicos son:

- 1) Fuente de voltaje
- 2) Fuente de iones (en el esquema es un filamento)
- 3) Electrodo.

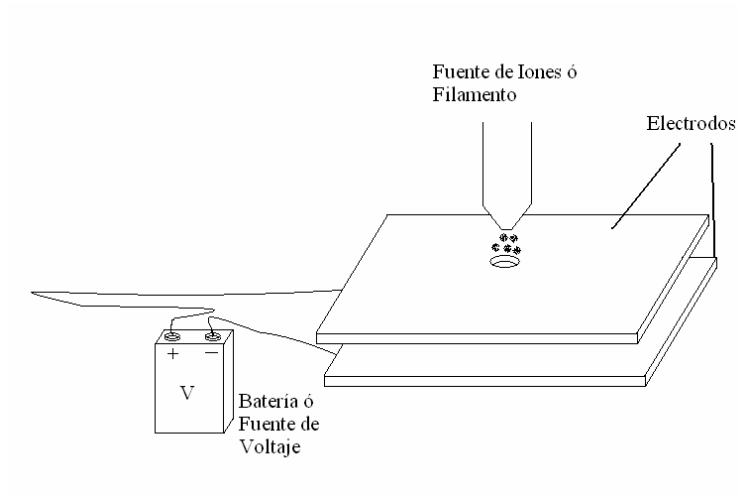


Figura 2. Diagrama esquemático de las componentes principales de un acelerador de partículas.

El principio de funcionamiento de cualquier tipo de acelerador, se basa en la interacción de los campos eléctricos producidos por fuentes de voltaje sobre la carga eléctrica de las -partículas generadas en la fuente de iones y esta es la razón por la que no se pueden acelerar partículas neutras.

Otras partes importantes asociadas a un acelerador son equipos periféricos tales como: sistemas de vacío, líneas de transporte de haz, cámaras de experimentación, etc.

Un tubo de rayos X y el cinescopio de una TV doméstica según la definición anterior son aceleradores de partículas, sin embargo, en la práctica no se les refiere con este nombre.

La energía cinética T de las partículas con carga $q = ze$ ($z = 1,2,3,4\dots$), está relacionada con el voltaje V de aceleración por la relación:

$$T = Vq$$

Como se sabe, las unidades que se usan para la energía en física son los julios y/o ergios. Sin embargo, para cuantificar la energía de los proyectiles acelerados se acostumbra usar unidades de *electrón-volt* (eV) o sus múltiplos: el *keV*= 1 000 eV, el *MeV*= 1 000 000 eV, el *TeV*= 10^{12} eV, etc. El uso de estas unidades de energía es debido a la relación simple de la ecuación anterior, en la cual la energía es numéricamente igual al voltaje. De acuerdo con la ecuación anterior, una energía de 1 eV es el cambio de energía cinética que experimenta una partícula con carga en valor absoluto igual a la del electrón, después de pasar por una diferencia de potencial de un volt.

Desde un punto de vista de la mecánica clásica, la energía cinética T de una partícula está relacionada con la masa en reposo m_0 y la velocidad v por la siguiente relación:

$$T = \frac{1}{2}m_0 v^2 = qV$$

Esta ecuación es un caso particular de la relación general de la mecánica relativista. Una consecuencia de la última ecuación es que la energía de las partículas es independiente de la masa y solo depende de la carga.

Los aceleradores se les llega a clasificar en diferentes formas, tales como: a) electrostáticos, b) circulares (ciclotrón, sincrotrón, etc.), c) lineales, etc.

La sobre simplificación del esquema de la figura 2, para describir el funcionamiento de cualquier tipo de acelerador, tal como los ciclotrones (**Figura 3**) o aceleradores lineales (**Figura 4**) no es obvia. Para explicar el funcionamiento de un acelerador como el ciclotrón, se hace referencia al esquema de la figura 3.

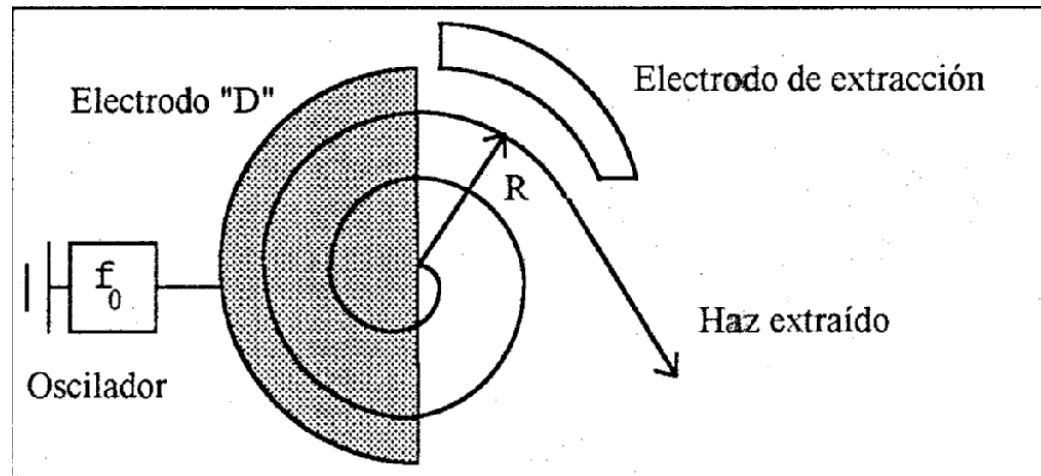
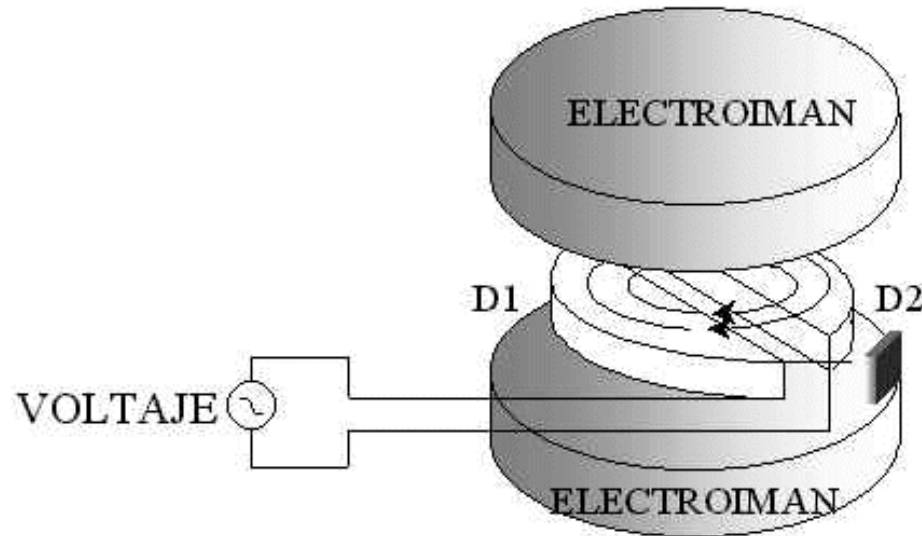


Figura 3a. Diagrama esquemático de las principales componentes de un ciclotrón.



CICLOTRÓN.

Figura 3b. Diagrama esquemático de un acelerador tipo ciclotrón.

El ciclotrón es fabricado de un cilindro metálico plano y hueco dividido en dos partes, denominados “D” (D1 y D2) ligeramente separadas dentro de un campo magnético B perpendicular. En las partes D1 y D2 se le aplica un voltaje alterno que produzca un campo eléctrico alterno entre el espacio que separe las D. Supóngase un ion positivo producido por una fuente de iones tiene carga eléctrica q y masa m .

El campo eléctrico entre las dos D acelera el ion. Mientras el ion está dentro de las D, no hay campo eléctrico. El ion describe una trayectoria circular de radio r debida a la acción del campo magnético B . La ecuación que relaciona estos parámetros es: $r = mv/qB$, donde v es la velocidad del ion. Cuando el ion va a salir de D1, el campo eléctrico cambia de sentido de tal manera que el ion se acelera de nuevo y entra en D2 con mayor velocidad describiendo un semicírculo de radio mayor y así sucesivamente. Finalmente el ion describe una espiral y cuando llega al borde externo de las D, una placa con un voltaje negativo se usa para extraer los iones del acelerador. El campo magnético es un elemento auxiliar que obliga a los iones a describir trayectorias circulares.

En un acelerador lineal, los iones son acelerados en una trayectoria rectilínea y un diagrama esquemático de este tipo de aceleradores se muestra en la Figura 4. Este acelerador tiene similitud al del Ciclotrón en el sentido que también se usa para acelerar los iones un oscilador de radio frecuencia, de algunas decenas de kilovolts, el cual acelera a los iones cuando se encuentran entre dos electrodos contiguos y la energía final es la acumulada por las aceleraciones que ocurre entre cada dos electrodos. La energía final es proporcional al número de electrodos. El acelerador lineal de protones que existe en los Álamos Nuevo México tiene una longitud de 800 m y acelera los protones a energías de 800 MeV.

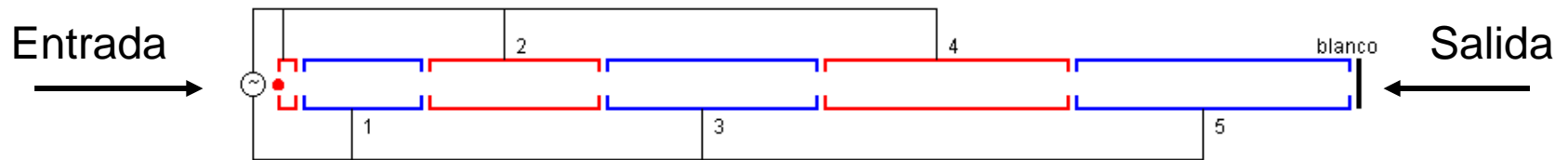


Figura 4. Esquema simplificado de un acelerador lineal.

En los aceleradores electrostáticos los voltajes que se usan para acelerar las partículas son de corriente directa (CD) y son generados por el transporte mecánico de cargas eléctricas o rectificación de corriente alterna para mantener a un alto potencial eléctrico respecto de tierra, a un domo metálico.

En los aceleradores tipo Van de Graaff, la carga eléctrica son transportadas por bandas de un material hulado y modernamente por un sistema llamado "pelletron", que usa cadenas para el transporte de cargas. Los aceleradores tipo Cockcroft-Walton usan la rectificación de corriente para generar el voltaje de aceleración.

La denominación de aceleradores tipo Van de Graaff (VDG) es en honor a su inventor y la Generación de alto voltaje con este método lo logró Robert Van de Graaff en la Universidad de Princeton en el año de 1929. Sin embargo, fue hasta 1935, cuando se pudieron usar los aceleradores para producir reacciones nucleares.

Aunque los aceleradores VDG no ganaron la carrera para usarse en producir la primera reacción nuclear, este tipo de aceleradores son los que más se usaron para el estudio del núcleo atómico, especialmente para medir secciones nucleares y en la investigación de la llamada estructura nuclear que consiste en la determinación experimental de los niveles de energías de los núcleos y de otros "**números cuánticos**" que los caracterizan, tales como el momento angular y la paridad. Puede decirse que más del 60% del conocimiento en el campo de la física nuclear de bajas energías, se produjo usando este tipo de aceleradores. La razón por la cual los VDG eran preferidos por los científicos, se debía a que podían obtener haces de partículas monoenergéticas muy estables, cuya energía e intensidad podían variarse fácilmente. Además el costo de mantenimiento de estos aparatos era bajo con respecto a otros aceleradores.

El Instituto de Física tiene cuatro aceleradores en operación, 3 son del tipo VDG con voltajes máximos de: 0.7 MV, 2 MV y 5.5 y un moderno acelerador de dos etapas (tanden) MV con voltaje máximo en la terminal de 3 MV. En este curso se dará una descripción sobre la operación de los aceleradores del tipo Van de Graaff.

La complejidad y el costo de un acelerador aumenta con la energía de los iones que estos pueden producir, pero este incremento no es lineal sino más rápido. Esto lo podrán observar cuando visiten estos aceleradores y algunos datos sobre estos son los siguientes. El acelerador de 2 MV es un acelerador vertical y se usa para acelerar electrones, tiene una altura de 2.10 m, un peso total de 2 toneladas y un costo estimado de 400 000 dls. Los otros tres son de iones positivos y se pueden acelerar protones, deuterones, alfas, etc. El acelerador de 0.7 MV es horizontal con una longitud de 1.23 m, y un peso de 500 Kg, su costo se estima en 100 000 dls. El de 5.5 MV es un acelerador vertical de 8 m de altura, 40 toneladas de peso y su costo es de 1.5 millones de dls. El tanque del “**pelletron**” tiene un peso de 6 toneladas y este acelerador tiene la capacidad de acelerar cualquier átomo de la tabla periódica, es decir, se pueden acelerar iones desde hidrógeno hasta uranio. El costo de este acelerador fue de cerca de 2 millones de dólares.

Antes de describir con algún detalle los aceleradores VDG, es conveniente mencionar que desde su construcción, hubo interés en desarrollarlos con mayor energía.

El límite del voltaje producido con aceleradores electrostáticos es de 35 MV, aunque en la actualidad está en la etapa de pruebas un acelerador construido en Estrasburgo, Francia; el cual se diseñó para operar a 50 MV. En la figura 5, se intenta condensar la historia a través del tiempo del crecimiento de los diferentes tipos de aceleradores en función de la energía.

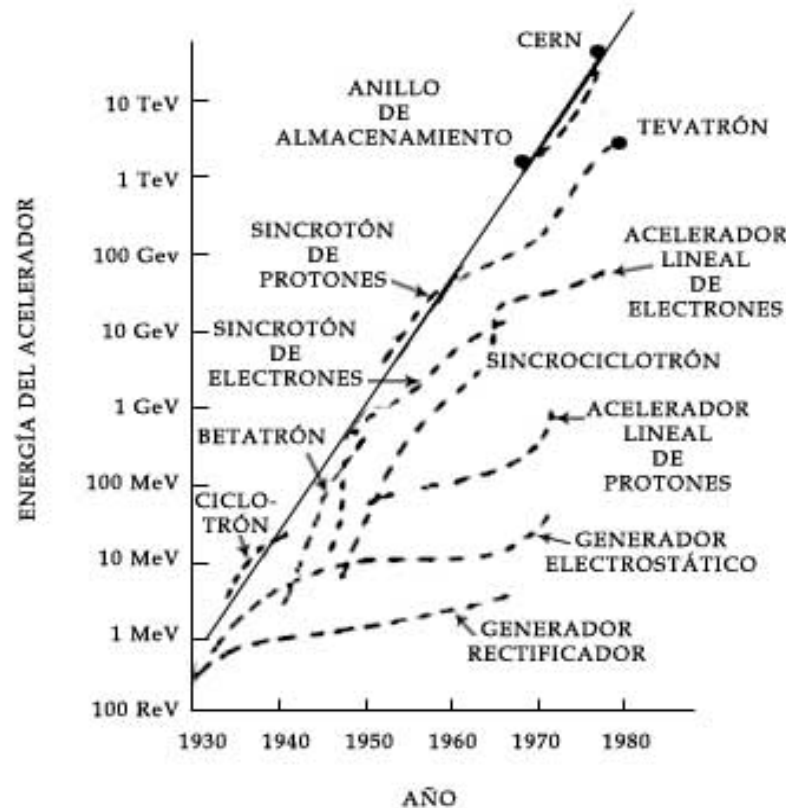


Figura 5. Gráfica de Livingston, en la que se muestra como han crecido de manera exponencial la energía de los aceleradores de partículas entre 1930 y 1980.

Principales equipos asociados con un laboratorio Van de Graaff

Estas notas fueron preparadas en relación a describir el acelerador VDG de 0.7 MV, pero los principios de operación se pueden extrapolar para explicar el funcionamiento de cualquier tipo de acelerador VDG, tal como el acelerador VDG de 5.5 MV que se utilizará en este curso.

Como se mencionó anteriormente, un acelerador es un aparato que produce partículas monoenergéticas que se usan para bombardear “**blancos**” (átomos y núcleos atómicos) con diferentes propósitos. tales como estudiar: a) Reacciones nucleares, b) Reacciones atómicas, c) Caracterización elemental de sólidos a través de técnicas analíticas de origen nuclear, etc. El haz normalmente se puede enfocar en el blanco de un área igual o menor a 1 mm^2 .

Para poder usar un acelerador con cualquiera de estos propósitos, se requiere de otros equipos periféricos asociados con él.

El conjunto acelerador y equipos periféricos asociados constituyen *un laboratorio de un Acelerador*. Obviamente la componente más importante del laboratorio es el acelerador de partículas y quizás esta es la razón de que en la práctica se usen como sinónimos los términos Acelerador y Laboratorio de un Acelerador.

Los componentes principales del laboratorio del acelerador VDG de 0.7 MV del Instituto de Física, se muestran esquemáticamente en la figura 6. La mayoría de las componentes son análogas a las del laboratorio de 5.5 MV, en cambio si hay algunas diferencias con respecto al acelerador de electrones de 2 MV. Estas componentes son:

- a) Acelerador de partículas.
- b) Líneas o tuberías de acero evacuadas para transporte del haz.
- c) Sistema de vacío (Bombas mecánicas y de difusión o turbomolecular, o bomba criogénica etc.).
- d) Electroimán selector de energía del haz.
- e) Rejillas aisladas eléctricamente para regulación de la energía del haz.
- f) Sistema de estabilización electrónica de alto voltaje.
- g) Lentes eléctricas o magnéticas (dipolos o cuadrupolos) para enfocar el haz en el blanco.
- h) Cámara de blancos o de experimentación.
- i) Jaula de Faraday para integrar la corriente del haz.

- j) Detectores de partículas.
- k) Electrónica modular de pulsos eléctricos asociada a los detectores.
- l) Analizador multicanal de altura de pulsos y la computadora asociada con la adquisición de datos.

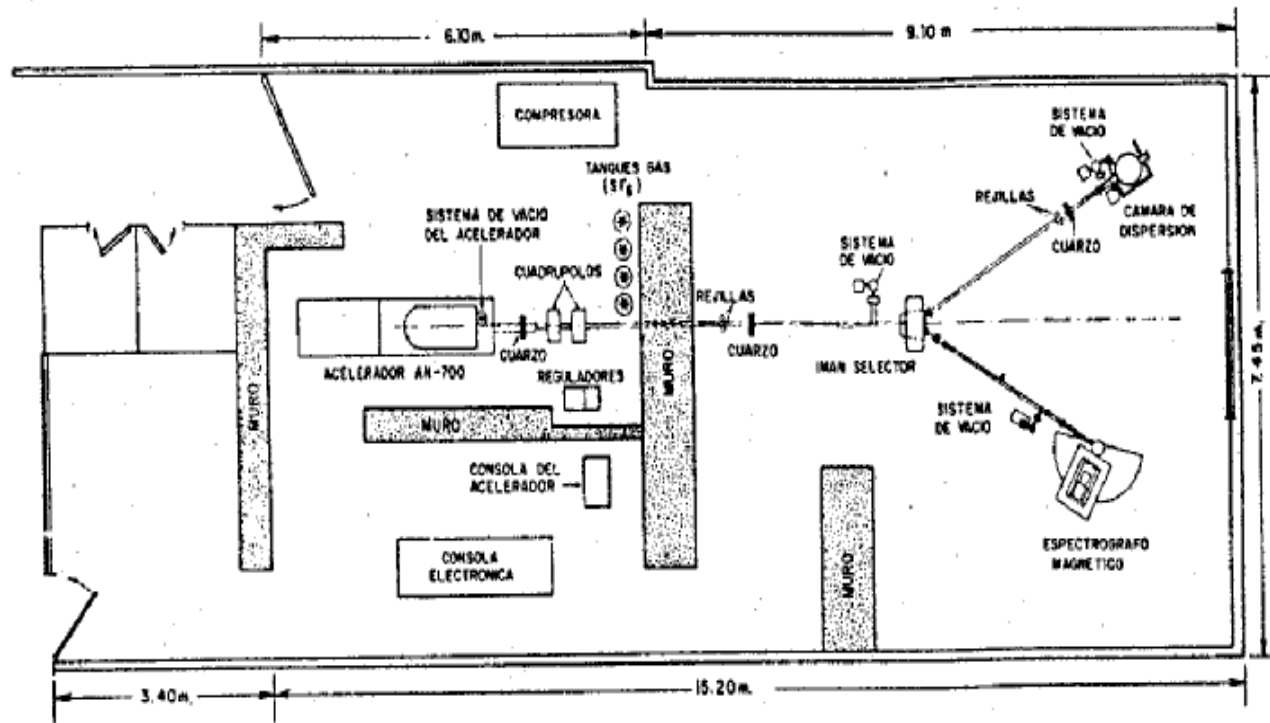


Figura 6. Diagrama esquemático del laboratorio del acelerador VDG de 0.7 MV.

El acelerador Van de Graaff y descripción de su funcionamiento

A continuación se describen brevemente los principios de operación de los aceleradores tipo VDG, los cuales se pueden dividir en:

- a) Generación de alto voltaje V.
- b) La producción de iones
- c) Aceleración de iones positivos.

Las componentes de todos los aceleradores VDG son esencialmente las mismas y para hacer una presentación de estas, en la figura 7 se muestra un esquema de las partes que constituyen un acelerador como el VDG de 0.7 MV.

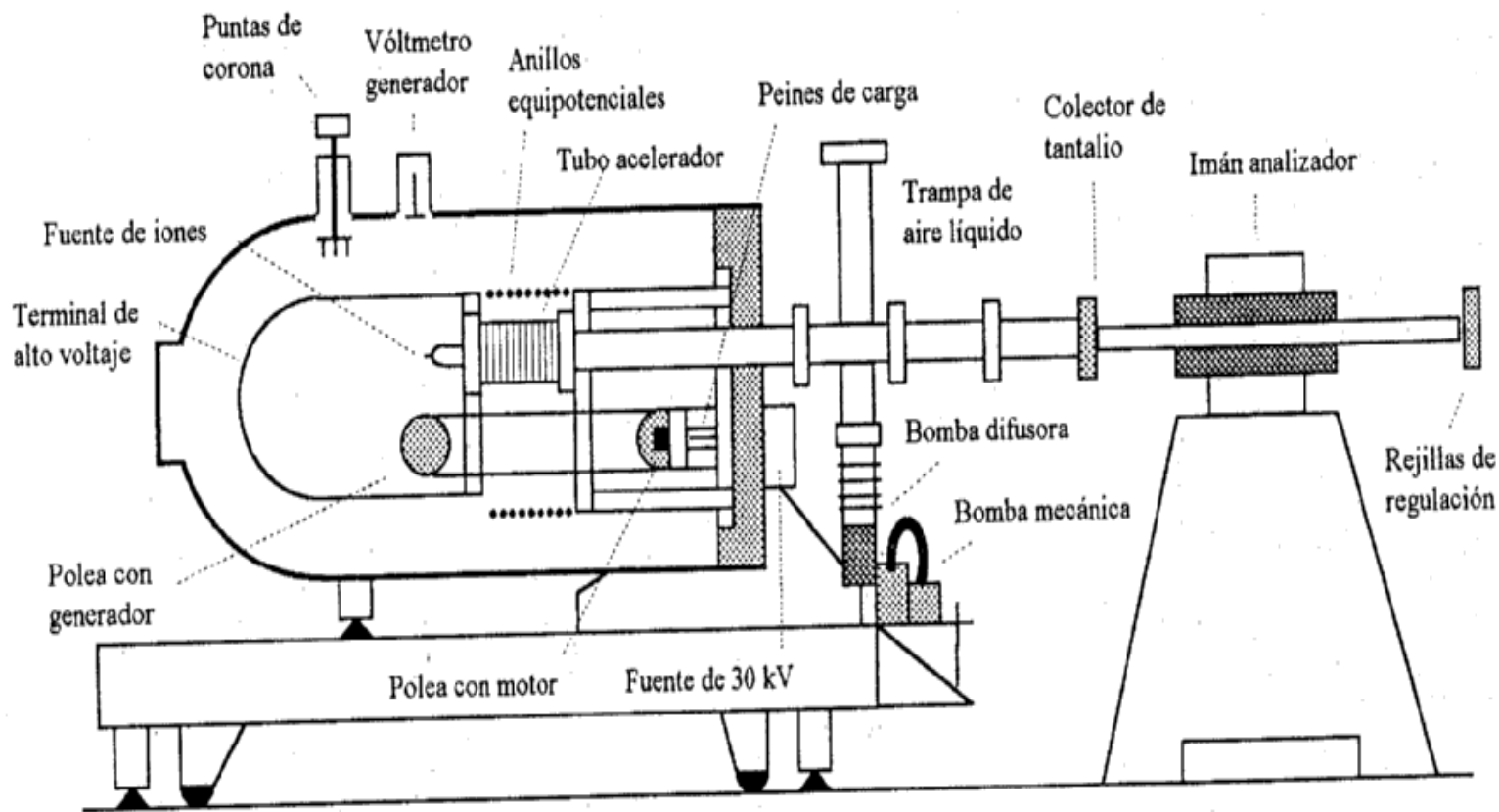


Figura 7. Dibujo simplificado del acelerador VDG de 0.7 MV.

Las principales componentes de los aceleradores VDG son:

- 1) La columna del generador del acelerador; este nombre se le da porque es la estructura mecánica que soporta a los componentes principales del acelerador, tales como la Terminal de Alto Voltaje (TAV) que incluye la fuente de iones.
- 2) La banda que transporte la carga eléctrica que es de varias capas de material textil ahulado.
- 3) Un motor acoplado a la polea inferior, el cual hace girar a la banda.
- 4) La polea superior que también es un generador de corriente alterna de 110 volts y 420 Hz. La banda está tensada entre estas dos poleas.
- 5) Sistema de carga (peine inferior) y de descarga (peine superior) de la banda.
- 6) Fuente de CD de "carga" o polarización de la banda.
- 7) La cubierta metálica de la TAV, es un lámina de acero pulido y en cuya superficie se deposita la carga transportada por la banda.
- 8) El tubo acelerador, al igual que la columna, es una estructura de electrodos de acero inoxidable y vidrio.
- 9) Sistemas de vacío para evacuar el tubo acelerador. Este sistema de vacío normalmente consiste de una bomba mecánica y una bomba de difusión y la presión de vacío es de 10^{-6} Torr, y la presión máxima permisible es de 3.0×10^{-5} Torr.

- 10) La fuente de iones con todos sus componentes, en el que se incluyen los tanques de gas presurizados.
- 11) La extensión del tubo acelerador, la cual está hecha de acero y tiene un blindaje magnético para que no le afecte al haz los campos magnéticos generados por el motor de la banda.
- 12) Puntas de corona.
- 13) Vóltmetro generador.
- 14) Tanque de acero para contener la presión del gas dieléctrico.
- 15) Sistema de refrigeración que es un serpentín por donde circula agua, para extraer el calor producido cuando el acelerador está en operación.
- 16) Consola de control. La operación del acelerador se hace a control remoto para seguridad radiológica de sus operadores.

A continuación describimos los diferentes procesos relacionados con el funcionamiento de un acelerador VDG.

Generación del alto voltaje V

Las principales componentes asociadas para la generación de alto voltaje de un acelerador VDG, son: 1) Polea y peine inferior con su motor impulsor, 2) Polea y peine superior, 3) La Banda, 4) Domo metálico, 5) Columna, 6) Fuente de CD para la polarización de la banda.

La generación de alto voltaje se logra por el transporte de carga electrostática desde el nivel de tierra, al domo metálico que está en la TAV. Este proceso se explica a continuación:

La polea inferior está conectada a un motor impulsor y es lo que hace girar la banda la cual está tensada entre esta polea inferior y la polea superior. La carga es inducida en la banda mediante "**efecto corona**", producida por un campo eléctrico intenso generado por una fuente de alto voltaje (polarización) que se conecta a dos electrodos separados por la banda. Estos electrodos no tocan la banda. Uno de estos electrodos es una malla metálica cuya longitud es la misma que el ancho de la banda, su extremo está frente al otro electrodo (pulido). La malla se "desnuda", quitando algunos hilos de alambre, para que los alambres transversales formen "**puntas agudas**", y así generar un campo eléctrico intenso, que son los que producen por efecto inductivo carga eléctrica a lo largo de la banda. En la polea superior "**el peine**" construido de una malla de alambre flexible si toca la banda, la cual descarga al domo metálico la carga eléctrica transportada. Las cargas eléctricas positivas son neutralizadas por los electrones del domo a través de otra malla metálica (peine superior). En la superficie del domo metálico pulido se distribuye la carga Q positiva homogéneamente.

La banda está hecha de varias capas de un material textil ahulado y el motor impulsor (motor de la banda) gira a 1800 rpm impulsada por un motor de 5 KVA en el acelerador de 0.7 MV y en el caso del acelerador de 5.5 MV el motor es de 25 KVA.

El voltaje V que se produce por la carga Q en la TAV está dado por la relación:

$$V=Q/C,$$

donde C es su capacidad eléctrica expresada en faradios. La Figura 9 represente el circuito eléctrico equivalente que se usa para describir el proceso de generación de alto voltaje V .

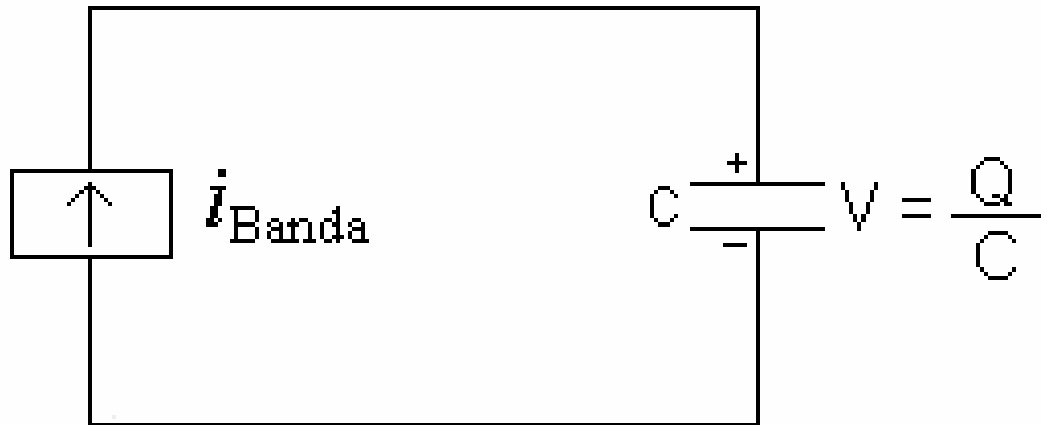


Figura 9. Circuito eléctrico equivalente que se usa para describir la generación de alto voltaje V , de un acelerador Van de Graaff.

Esta capacidad depende de la geometría del domo y del tanque del acelerador. La geometría del domo es como la de una bala de revólver, es decir, un cilindro coronado por un semiesférico (ver Figura 9).

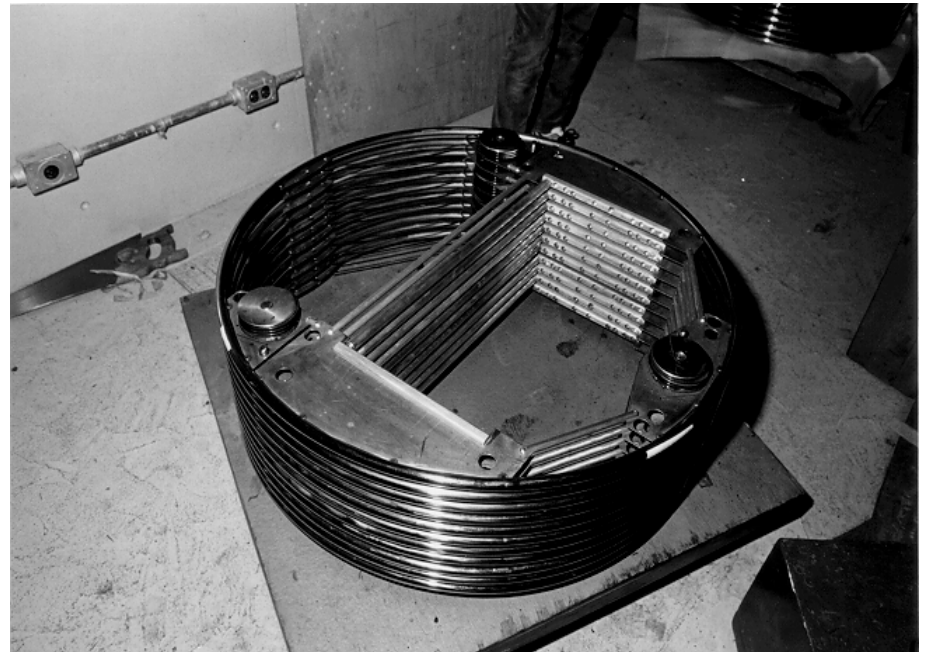


Figura 9. Domo metálico y sección de columna del acelerador VDG de 5.5 MV

Conceptualmente el condensador podría acumular carga eléctrica en forma indefinida, por lo que el voltaje V generado podría ser arbitrariamente grande. Sin embargo, en la práctica existen limitaciones para "**aislar**" altos voltajes. Como se describe más adelante, existen corrientes eléctricas que descargan el domo.

La columna del acelerador tiene este nombre en gran parte para resaltar la importancia estructural, ya que soporta una gran parte de las componentes del acelerador entre otras, parte del sistema de generación de alto voltaje. La columna está formada por aros metálicos de acero inoxidable separados por discos aislantes de vidrio o cerámica. A cada uno de los planos de estos aros se les llama "**planos equipotenciales**" o "**platos equipotenciales**", donde el término potencial se refiere al potencial eléctrico (voltaje). Se establece una diferencia de voltaje entre cada dos planos contiguos, por lo que a lo largo de la columna se establece un gradiente de voltaje, cuyas unidades son kV/cm y por razones de aislamiento eléctrico el gradiente máximo que se puede establecer es de 15.75 kV/cm . Este límite en el gradiente determina la longitud de los aceleradores VDG de acuerdo con el voltaje máximo que se puede operar y también define el número de "**platos equipotenciales**". Así, el acelerador de 5.5 MV la columna tiene 131 platos equipotenciales y una longitud de aproximadamente 7m mientras que el acelerador de 0.7 MV tiene 18 platos y una longitud de aproximadamente 50cm .

Dentro de la columna se aloja el tubo acelerador, la banda, separadores o guías de la banda, las resistencias eléctricas (resistencias de la columna) que se usan para establecer un divisor de voltaje y establecer la diferencia de voltaje entre cada dos platos. El valor de las resistencias que conectan dos platos se seleccionan con un valor de 1000 mega-ohmios, con el objeto de no drenar mucha corriente proveniente de la terminal de alto voltaje (TAV). El diámetro de estos aros es de 50cm para el acelerador de 0.7 MV y 90cm para el acelerador de 5.5 MV. La figura 8 es una fotografía de una sección de columna del acelerador de 5.5.

Un avance tecnológico en la construcción de los aceleradores electrostáticos fue el de confinar el generador de alto voltaje dentro de un tanque, el cual se presuriza con un gas dieléctrico (nitrógeno, exafloruro, etc) a relativa alta presión (unas 10 atmósferas) para poder aislar el alto voltaje. La introducción de este sistema permitió la reducción de la longitud de la columna de los aceleradores en comparación si la columna estuviera a la atmósfera. El tanque tiene ventanas o "bocas" y algunas de estas se instalan instrumentos tales como las puntas de corona y el volmetro generador.

La producción de iones

Inicialmente, el alto voltaje producido por un VDG, solo se usaba para investigar las propiedades dieléctricas de diferentes materiales aislantes y por esta razón se le denominaba como "generador de voltaje".

La incorporación al generador de voltaje VDG de una fuente de iones y de un tubo acelerador, es propiamente lo que constituye un acelerador de partículas tipo VDG.

La fuente de iones que usa este acelerador es del tipo de radiofrecuencia y se pueden ionizar cualquier gas no condensable y normalmente se usa para acelerar protones, deuterones, alfas, nitrógeno, argón, etc. La fuente de iones, se llega a decir que es el cerebro del acelerador y esta localizada en la terminal de alto voltaje (TAV).

La fuente de iones del acelerador VDG de 0.7 MV consta de i) botella cilíndrica de cuarzo, ii) 4 imanes permanentes, iii) tanque de gas a alta presión que contiene los gases de los átomos que se van acelerar, iv) válvula termoeléctricas, que controlan el flujo de estos gases hacia la botella de cuarzo, v) oscilador de radio frecuencia, vi) fuente de CD de control de intensidad de haz, vii) fuente de CD para energizar la válvula termoeléctrica, viii) fuente de CD de enfoque. Un diagrama esquemático de la fuente de iones se muestra en la Figura 10.

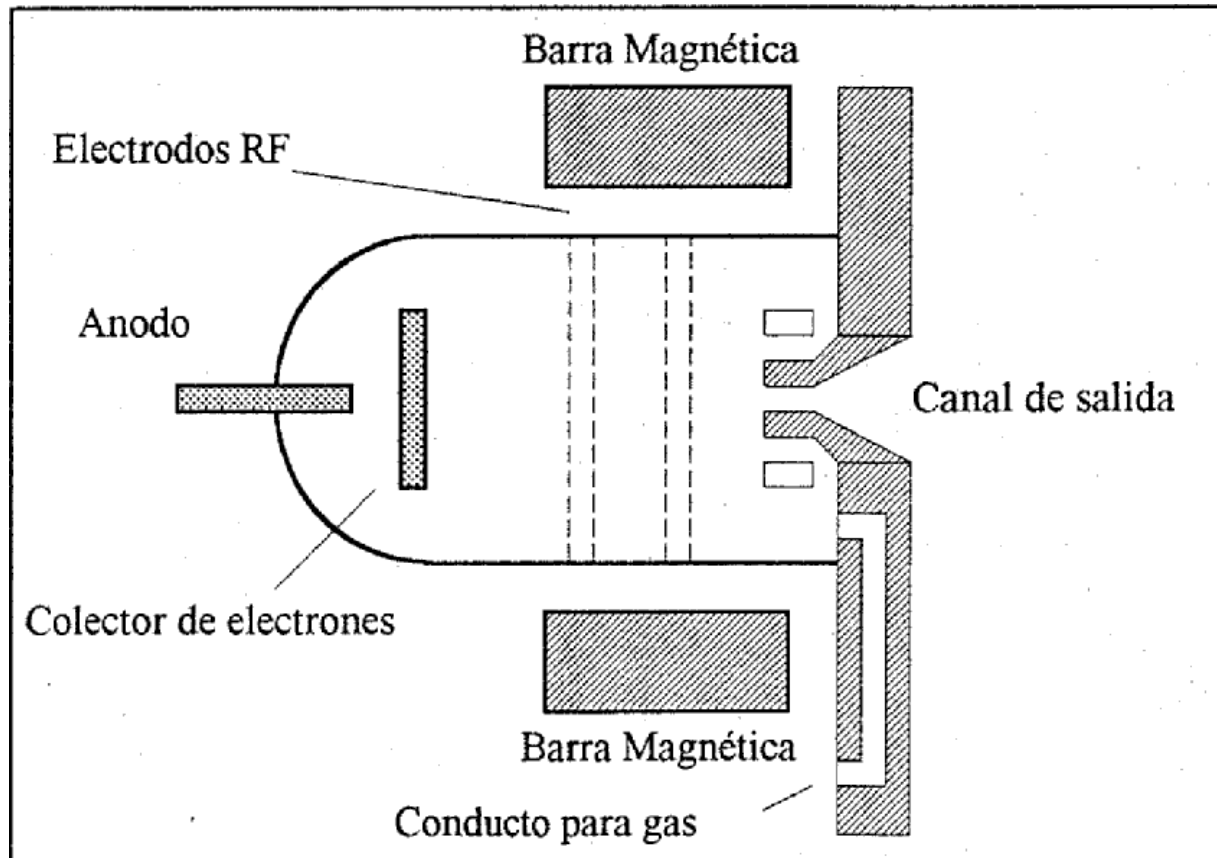


Figura 10. Diagrama esquemático de la fuente de iones del acelerador VDG de 0.7 MV.

Figura 11 se muestra el esquema de la fuente de iones y circuitos asociados al acelerador VDG de 5.5 MV.

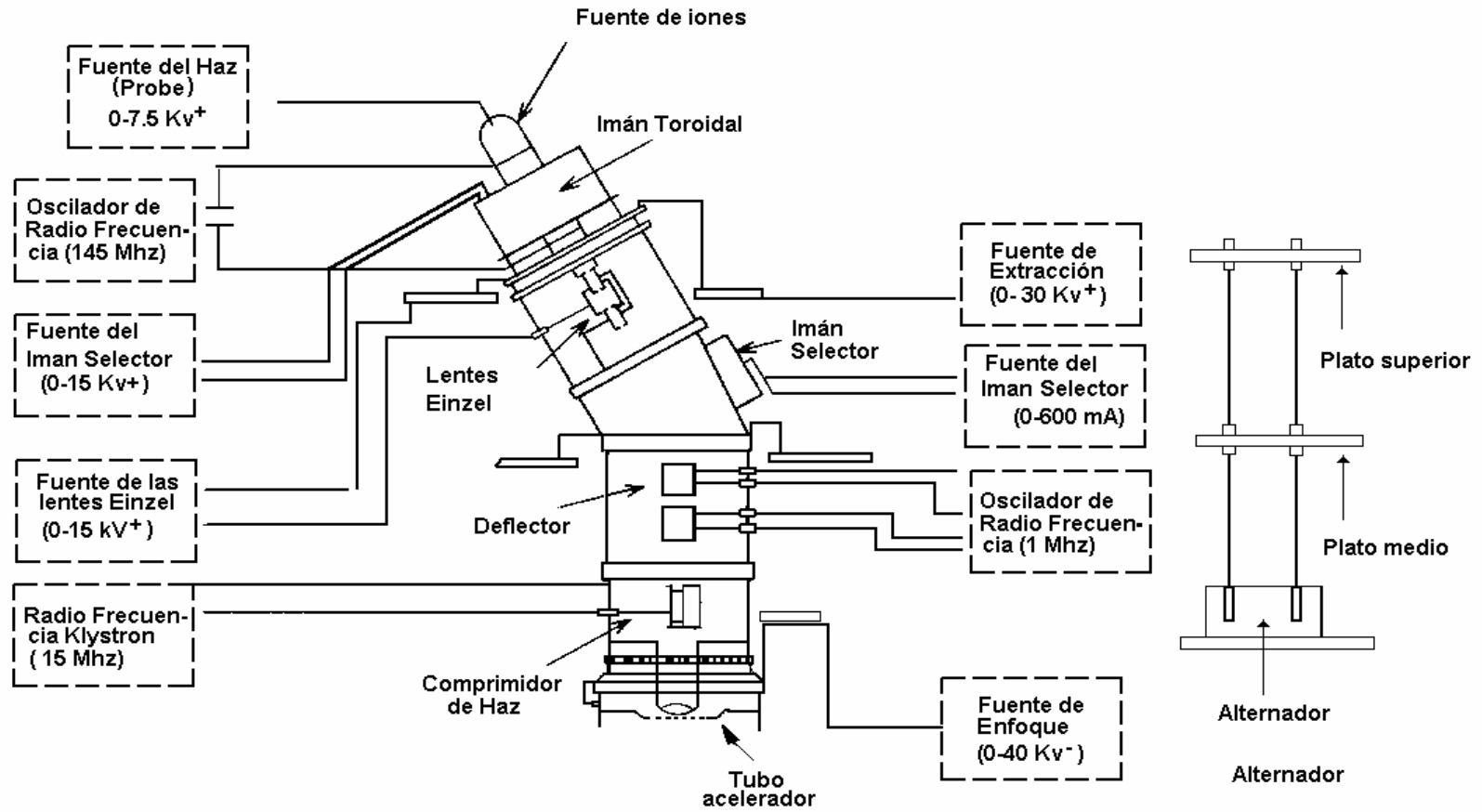


Figura 11. Esquema de la fuente de iones del acelerador VDG de 5.5 MV y circuitos eléctricos y electrónicos asociados.

La botella de cuarzo es de forma cilíndrica con un diámetro de 3cm y una longitud de 12cm y en su extremo superior tiene un electrodo. Esta botella se encuentra normalmente a un alto vacío y esta comunicada con un tubo metálico de diámetro delgado a un tanque presurizado que contiene el gas por ionizar. Entre estos dos elementos hay una válvula termoeléctrica con el que se controla el flujo de gas hacia la botella de cuarzo. A la botella están conectados dos electrodos de la fuente de RF, que tienen forma de abrazaderas, con una separación de unos 5 cm. La fuente de RF oscila con una frecuencia de 80 MHz y una amplitud de 2 kV en el acelerador de 0.7 MV y la frecuencia de 145 MHz y amplitud de voltaje también de 2kV para el acelerador de 5.5 MV.

Los gases a baja presión dentro de la botella de cuarzo son ionizados por la energía electromagnética de la RF y cuando esto ocurre, la botella se enciende como una lámpara neón y produce una luz cuyo color depende del gas en el volumen. Por ejemplo, el hidrógeno produce una luz color "**rosa mexicano**", mientras que el helio el color es "**azul**". El estado físico del gas ionizado es el de un plasma, en el cual están mezcladas tanto las cargas eléctricas positivas como las negativas. Usando una fuente de alto voltaje que se puede variar desde 0 hasta 3000 volts, (en el acelerador de 5.5 MV el voltaje se varia entre 0-7 kV) las cargas eléctricas son separadas del plasma: los iones positivos son empujados hacia el canal de salida de la botella, mientras que los electrones son colectados en el electrodo superior de la botella tienden a descargar el domo metálico. Con esta fuente de voltaje se controla la corriente de haz que se extrae del acelerador

La función de los 4 imanes permanentes que rodean la botella, es usar el campo magnético producido por estos, para concentrar en el eje de esta, los iones positivos y poderlos extraer por el canal de salida más eficientemente. En el acelerador de 5.5 MV no tiene estos 4 imanes sino una bobina toroidal cuyo campo magnético se puede variar y produce el efecto de concentrar los iones en el eje de la botella de cuarzo.

Debido a que los iones emergentes de la botella pueden tener diferentes direcciones, se usa una fuente de CD que se puede variar entre 0 y 40000 volts para "**enfocar**" y corregir la trayectoria de estos.

La energía eléctrica requerida para alimentar los circuitos eléctricos y electrónicos asociados con la fuente de iones, son generados por la polea superior, al hacerla girar la banda tensada. La polea tiene elementos como un "**dinamo**" o generador de corriente alterna y las características eléctricas de este son: voltaje alterno de salida de 110 volts, frecuencia de 420 Hz y potencia de 0.5 KVA, para el acelerador de 0.7 MV y para el acelerador de 5.5 MV la potencia es de 1 kilowatt. La razón de usar alta frecuencia en la TAV es que se reduce el tamaño y peso de los elementos usados en los circuitos de la fuente de iones.

Es obvio que esta potencia eléctrica requerida para operar la fuente de iones, tiene que ser generada en la TAV. La razón de usar alta frecuencia en la TAV es que se reduce el tamaño y peso de los elementos usados en los circuitos de la fuente de iones.

Es obvio que esta potencia eléctrica requerida para operar la fuente de iones, tiene que ser generada en la TAV. Si se intentara alimentar externamente de esta energía con cables eléctricos, a través de estos se fugaría la carga eléctrica deposita en el domo metálico y por lo tanto no se podría generar el alto voltaje V .

En los aceleradores tipo “**tandem**” como es el caso del pelletron, la fuente de iones es externa al acelerador y los iones se inyectan externamente al tubo acelerador.

Para variar parámetros relacionados con la fuente de iones, la comunicación se hace desde nivel de potencial de tierra, con hilos de cáñamo o barras de lucita, los cuales son materiales aislantes.

Aceleración de iones positivos

Los iones positivos son extraídos a través del canal de salida de la fuente de iones con energía despreciable y son inyectados al llamado tubo acelerador que, como su nombre lo indica, es una estructura en forma cilíndrica cuya función es dar a las partículas una trayectoria de aceleración y están diseñados para que esta sea el eje del tubo. En la figura 11 se muestra en forma esquemática la conexión que existe entre la fuente de iones y el tubo.

La construcción de un tubo acelerador es una estructura tecnológicamente compleja y se requirió de muchos años de investigación en propiedades mecánicas y eléctricas de aislantes, conductores y de óptica de iones. El tubo acelerador está construido de discos de vidrio intercalados con electrodos metálicos circulares y estos elementos están unidos usando pegamentos especiales (resinas epóxicas). Algunos de los tubos aceleradores modernos, en vez de vidrio usan cerámicas especiales y se unen a los electrodos por medio de soldaduras. El diámetro del tubo es de 17.5cm y la longitud depende del voltaje máximo y es igual a la longitud de la columna. El plano de cada uno de estos electrodos les corresponde uno de los platos equipotenciales de la columna, por lo que la separación y número de estos es igual a la de los platos de la columna.

Una de las funciones principales del tubo acelerador es que actúa como un elemento de "enfoco" y por esta razón, el voltaje de aceleración total no se aplica en un solo paso, sino que se hace por etapas, generando un gradiente de voltaje a través de la longitud de este y que es el mismo gradiente que existe en la columna, lo cual ya fue discutido. Cada uno de los platos equipotenciales se conecta a un electrodo correspondiente del tubo.

El efecto de enfoque del tubo acelerador es requerido debido a que las partículas que emergen de la fuente de iones no todas tienen la misma dirección requerida y que es la del eje del tubo. Aunque este defecto es parcialmente corregido por la fuente de enfoque asociada a la fuente de iones esto no es eficiente. Las diferencias de voltaje aplicados entre dos electrodos vecinos y por la geometría de estos, producen líneas de campo eléctrico disperso por efecto de borde de los electrodos. Esto se ilustra en el esquema de la Figura 12 en el cual se dibujan los electrodos más cercanos a la fuente de iones. Normalmente la diferencia de voltaje entre los electrodos más cercanos a la fuente de iones, se establece de tal manera que sea un 20% menor con respecto a los más alejados, con el objeto que las líneas de campo eléctrico sean más débiles. En esta forma se logra que las líneas de campo tengan el efecto de un "embudo eléctrico" y las partículas que no tenían la dirección del eje del tubo, corrijan esta trayectoria.

El efecto de enfoque del tubo acelerador depende del voltaje de operación y se tiene un mejor enfoque a altos voltajes. Por lo anterior es más fácil operar el acelerador al máximo voltaje.

La sustentación del tubo acelerador a la base es por medio de una extensión metálica con el objeto de blindar los campos magnéticos generados por el motor de la banda ya que estos perturban al haz de iones.

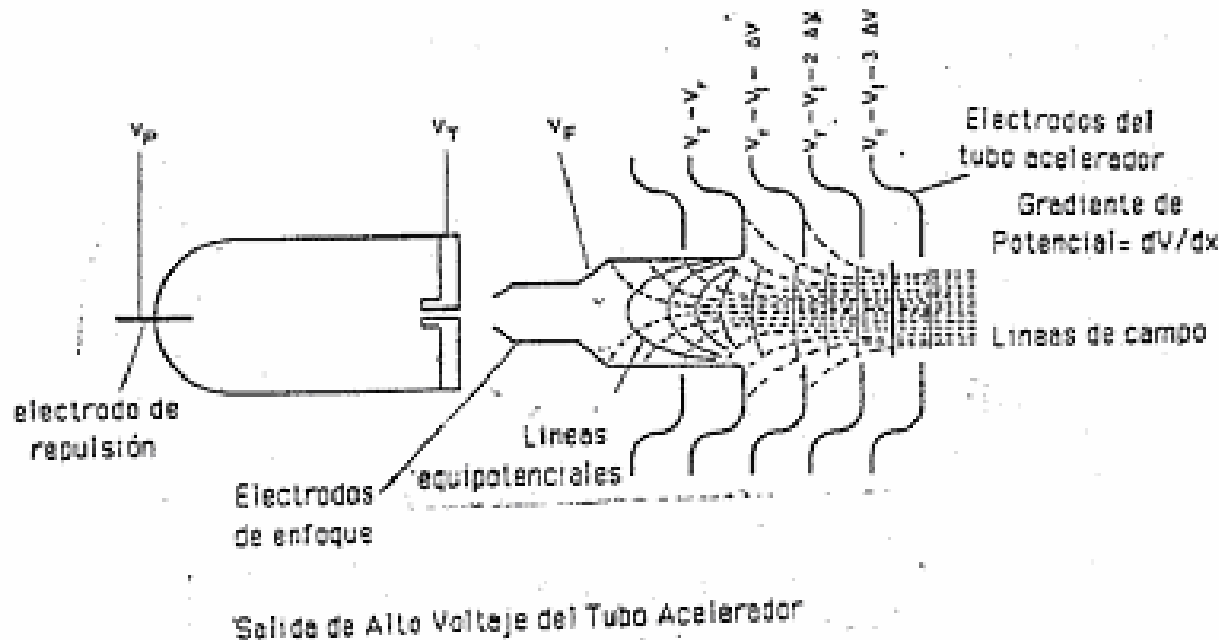


Figura 12. Diagrama esquemático para ilustrar el "efecto de embudo eléctrico" debido al campo eléctrico disperso.

Líneas de transporte de haz y sistemas de vacío

En la mayoría de los experimentos se requiere que los iones producidos por el acelerador lleguen al sitio de experimentación (cámara de blancos) en forma de un haz de partículas enfocado en un área muy pequeña (del orden de 1mm^2), y una energía definida y con fluctuaciones mínimas. Para lograr este objetivo se requiere de un sistema de transporte del haz, que tiene los siguientes elementos: tubos metálicos, bombas de vacío, rejillas, colimadores, deflectores, cuádruplos, medidores e integradores de corriente de haz, monitores de posición de dispersión de haz, un electroimán y las rejillas reguladores de energía, cuya función se discute en la siguiente sección. En la Figura 6 se muestra en forma esquemáticamente el conjunto de todas estas componentes.

Debido a que los iones deben viajar en el vacío, se requiere de interconectar la salida del acelerador con la cámara de blancos, mediante líneas hechas de materiales poco volátiles. Estas líneas normalmente son fabricadas de aluminio y acero inoxidable. Las líneas son evacuadas con tres sistemas de vacío localizados equidistantemente en la línea. El primer sistema está situado cerca de la base del acelerador y evacua el tubo acelerador y la fuente de iones; el segundo sistema está situado a la salida del deflector magnético y el último está situado cerca de la cámara de blancos. Cada uno de estos sistemas tiene los siguientes elementos: bomba mecánica, bomba de difusión de aceite, trampa fría para los vapores de aceite, válvulas de vacío, medidores de vacío y sistemas electrónicos de protección por falta de flujo hidráulico o empeoramiento del vacío.

Las válvulas de vacío son electroneumáticas y se cierran automáticamente cuando empeora el vacío. Los laboratorios con aceleradores modernos usan como sistemas de vacío, bombas turbo moleculares o criogénicas, las cuales tienen un costo elevado (aproximadamente 15000 dólares).

Las rejillas, colimadores, medidores de corriente y cristales de cuarzo son elementos situados estratégicamente en la trayectoria del haz y son usados para diagnóstico. Los colimadores son discos metálicos con un orificio centrado de un diámetro pequeño (del orden de 2mm) y se usan para definir la trayectoria del haz.

Un auxiliar económico de monitorear posición y sección transversal del haz es el uso de cristales de cuarzo, los cuales se usan en forma manual o usando un dispositivo electro neumático operado a control remoto para interceptar el haz, produciendo en el cristal luminiscencia, lo que permite visualizar directamente la posición del haz y su sección transversal por medio de un circuito cerrado de televisión.

Antes de la cámara de experimentación en algunas ocasiones se requiere de colocar un sistema para enfocar el haz en el blanco, el cual puede ser un cuádruplo eléctrico o cuadrópolo magnético.

El electroimán selector de energías

En los aceleradores tipo VDG, no se puede medir en forma absoluta y precisa su voltaje de operación, por lo que tampoco se puede determinar la energía del haz. Una medida no muy precisa sobre el voltaje de operación V , se tiene de la medida de la corriente que se drena de la terminal de alto voltaje a través de las resistencias de columna. Sin embargo es necesario conocer el valor de todas estas resistencias.

Otro método un poco más preciso que el anterior es el de medir el alto voltaje usando el *vóltmetro generador*, el cual se encuentra instalado en una de las bocas del tanque del acelerador. La precisión de medida de V con este método es como de 1% pero esta medida no es lo suficientemente precisa para los requerimientos de algunos experimentos.

El electroimán asociado al acelerador tiene dos funciones: 1) medir en forma precisa la energía del haz y 2) seleccionar el haz que tiene la carga y masa requerida. Esto último es necesario debido a que la fuente de iones produce diferentes especies de iones. Para ilustrar más esta función, asume que se quiere bombardear una muestra con protones. La fuente de iones produce además de los protones, moléculas de hidrógeno molecular con masas 2 y masas 3 y de carga eléctrica igual a la del protón.

En la figura 13 se ilustra la desviación de la trayectoria del haz de energía E, por un campo magnético de radio R. El campo magnético B, es producido al circular una corriente directa por las bobinas del imán. Las fuentes de CD tienen alta regulación y estabilización del orden de una parte en 10^{-4} , para garantizar un campo magnético estable.

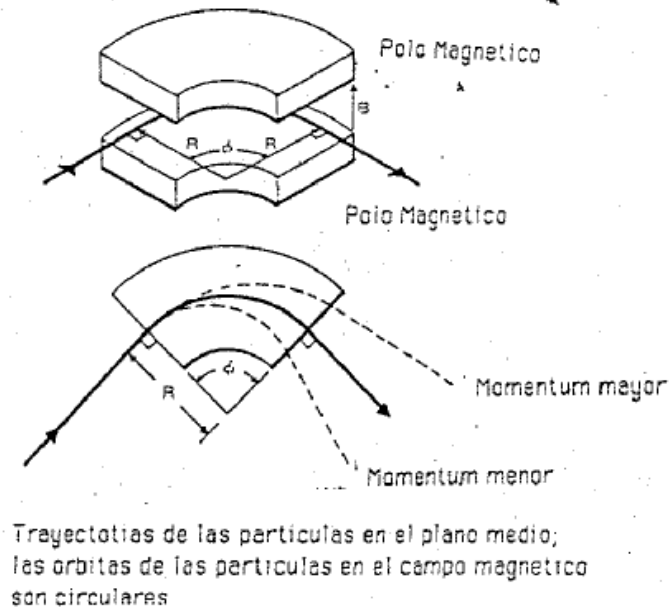


Figura 13. Desviación de un haz monoenergético por un campo magnético B.

Ahora se discute la función del imán para medir en forma precisa la energía del haz. La relación bien conocida no relativista que relaciona la energía cinética T (MeV) la masa m (uam) y la carga (ze) $z = 1,2,3,\dots$ de las partículas del haz con la rigidez magnético BR (kilogauss cm) es:

$$BR = \frac{1}{ze} \sqrt{T + mc^2}$$

Donde

$$BR = 144 \sqrt{\frac{mT}{z^2}} \quad (\text{Kilogauss} \cdot \text{centímetros})$$

Las partículas que constituyen el haz describen una trayectoria circular de radio R en los polos del electroimán. R queda determinado por el ángulo que el haz es desviado respecto a la dirección original. La ecuación anterior se puede escribir en la siguiente forma:

$$T = K \cdot B^2 \quad [\text{MeV}] \quad (5)$$

Donde

$$K = \frac{z^2 R^2}{(144)^2 m} \quad (6)$$

El campo magnético B normalmente se mide hasta con 6 cifras de precisión por el método de Resonancia Magnética Nuclear. (RMN). La relación entre la frecuencia de resonancia f y el campo magnético B es $B = kf$ Cuando se usa una sonda de hidrógeno: $k = 0.22$ kilogauss/MHz.

De acuerdo a las ecuaciones 5 y 6, si se conoce R, la energía del haz puede determinarse midiendo B. Aunque el valor de R puede estimarse geoméricamente por la desviación del haz, este valor no es suficientemente preciso para determinar T.

Existen varios métodos reportados en la literatura para determinar R con mucha precisión. La determinación de R es la que se le conoce también como la calibración de *la energía del acelerador*. La línea de experimentación de 22.5 grados de desviación del laboratorio del acelerador de 0.7 MV, fue calibrada usando la resonancia nuclear de la reacción: $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ y el valor obtenido para R fue 122 ± 0.3 cm. La ecuación 1.5, para esta calibración se pudo escribir para el haz de protones como:

$$T = 22.3 f^2 \text{ (keV)}$$

La ecuación anterior se puede escribir fácilmente para otros iones que tengan otras cargas eléctricas y diferentes masas que la del protón.

Estabilización de energía del haz.

Una de las ventajas de los aceleradores tipo Van de Graaff es que pueden operar con haces de partículas monoenergéticos, con pequeñas fluctuaciones en la energía. Dado que $T = Vq$, quiere decir que el voltaje V en la terminal permanece casi constante en la TAV. Las variaciones de energía en los aceleradores VDG son típicamente de una parte en diez mil, aunque hay aceleradores con sistema especiales, cuyas variaciones son menores a una parte en un millón.

El sistema de estabilización de voltaje (SEV) del acelerador es lo que hace posible que el voltaje en la terminal permanezca casi constante y las partes que lo constituyen son los siguientes: 1) puntas de corona, 2) vólmetro generador, 3) condensador-sensor a fluctuaciones de voltaje (CPU), 4) rejillas mediadoras de corriente de haz, 5) fuente de CD de polarización de la banda, 6) circuitos electrónicos de retroalimentación y 7) el electroimán selector de energías. Las tres primeras componentes se localizan físicamente en las bocas del tanque, mientras que otras se localizan en la línea de transporte del haz, base del acelerador y la consola de control. En otras secciones ya se describió la función de la fuente de CD para polarizar la banda y también del electroimán selector de energía. Con respecto este último, solo se quiere añadir que la fuente de corriente directa que alimenta las bobinas del electroimán son fuentes de alta regulación en corriente, lo que hace posible que se tenga un campo magnético B constante durante la operación del acelerador.

Una descripción simplificada del SEV se da a continuación. Como se había mencionado, el voltaje V del acelerador se debe a la carga Q distribuida en la superficie del domo metálico; estos parámetros están relacionados por la ecuación: $V = Q/C$, C es la capacidad en faradios del acelerador. La carga Q en el domo se debe a la corriente que transporta la banda y esta se controla con la fuente de CD de la fuente de polarización. La terminal de alto voltaje a su vez pierde carga a través de las siguientes corrientes: columna, corona y haz. La condición de que $V =$ constante en el tiempo solo se cumple si la corriente que sube (banda) es igual a la suma de las corrientes que descargan el domo: (corriente de columna, de haz y de corona). Esta condición se puede representar esquemáticamente en la figura 14, en términos del siguiente circuito eléctrico:

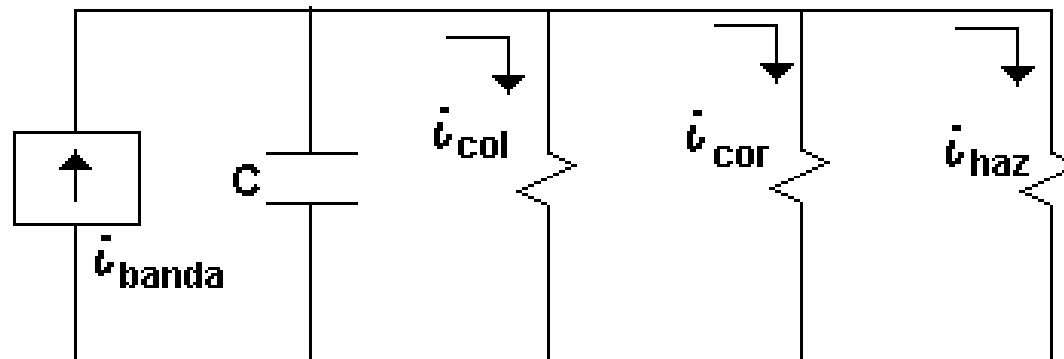


Figura 14. Circuito eléctrico de corriente para representar la operación del acelerador VDG a un voltaje constante.

Una de las componentes básica del SEV son las puntas de corona y sus circuitos electrónicos asociados. Un conjunto de 12 agujas, similares a las agujas que se usan en los fonógrafos, con puntas muy agudas está montado en una pieza metálica hueca, cuya superficie es la mitad de una esfera de 5 cm de radio. Las puntas de las agujas están alineadas en un plano que es paralelo a la superficie del domo metálico. Cuando existe un alto voltaje en la terminal se genera un campo eléctrico muy intenso que se concentra en la punta de las agujas, lo cual produce una corriente eléctrica a través del gas dieléctrico, llamada corriente de corona. Las puntas de corona están aisladas eléctricamente del tanque y se conectan a la placa de un tubo al vacío (tetrodo) y a través de este elemento se cierra el circuito de corriente a tierra.

El tetrodo es un tubo o válvula de vacío, el cual es poco conocido por las nuevas generaciones de técnicos en electrónica, pero siguen teniendo aun gran utilidad en algunos usos especiales. Las puntas de corona están montadas sobre una barra que puede acercarse o retirarse de la terminal de alto voltaje, usando un motor que se controla desde la consola de mando del acelerador. Para un voltaje del acelerador dado, se ajusta la distancia de las puntas a la terminal de tal forma que esta corriente sea del orden de $25 \mu\text{A}$.

Una forma de variar ligeramente la energía del haz es modificando la distancia de las puntas de corona respecto a la TAV; así, si se desea bajar la energía, se acercan las puntas para que se incremente la corriente que se drena por este circuito y *si* se desea aumentar la energía, se alejan las puntas, para que disminuya esta corriente y aumenta el voltaje en la terminal.

Pequeñas variaciones en esta corriente de corona son usadas en un *circuito electrónico de retroalimentación* negativa de respuesta muy rápida (ms) con lo que se logra que el voltaje en la TAV permanezca constante. Una descripción simplificada de como funciona este sistema es el siguiente y se usa el esquema de la Figura 15. El sensor básico es el uso de dos barras aisladas que se les denominan *rejillas reguladores de energía*, las cuales se encuentran a la salida del imán analizador y en los cuales se puede medir la diferencia de corriente de haz que es transnútido a la cámara experimentación. Si el haz de una energía T pasa centrado respecto a las rejillas la diferencia de corriente en estas es nula. Si el voltaje en la terminal por alguna razón se incremento ligeramente el haz va incrementar su energía y el haz va a tener una desviación menor y la trayectoria de este, ya no va hacer el centro, produciéndose una diferencia de corriente. Un circuito electrónico genera una señal de voltaje conectada a la *reja del tetrodo* lo cual hace que se incremento la corriente de corona, lo que hace que el voltaje en la TAV disminuya, hasta que la diferencia de corriente en las rejillas vuelva hacer cero. La otra posibilidad es que el voltaje en la TAV disminuya, entonces el haz va a sufrir una mayor desviación y la diferencia de corriente no va ser nula. El circuito electrónico genera un voltaje en la reja del tetrodo para que la corriente de corona disminuya y así aumente el voltaje en la TAV.

Consola de control

La operación del acelerador se hace a control remoto desde una consola de control localizada en el cuarto de control. Debido a que durante la operación del acelerador, sobre todo cuando se aceleran "**deuterones**", se producen radiaciones ionizantes en niveles peligrosos para la salud, principalmente neutrones y fotones energéticos, no es recomendable la exposición a esas radiaciones, del personal que labora en el laboratorio. Los sitios donde se producen estas radiaciones están localizados cerca de la TAV de los aceleradores y donde el haz es frenado. En el caso de que se use un haz de deuterio, los neutrones son generados en los colimadores o donde el haz choque. El caso del acelerador de electrones, las intensidades de radiación ionizante siempre son a niveles altos por la gran producción de rayos X y no debe haber ninguna persona o ser biológico en el área de experimentación.

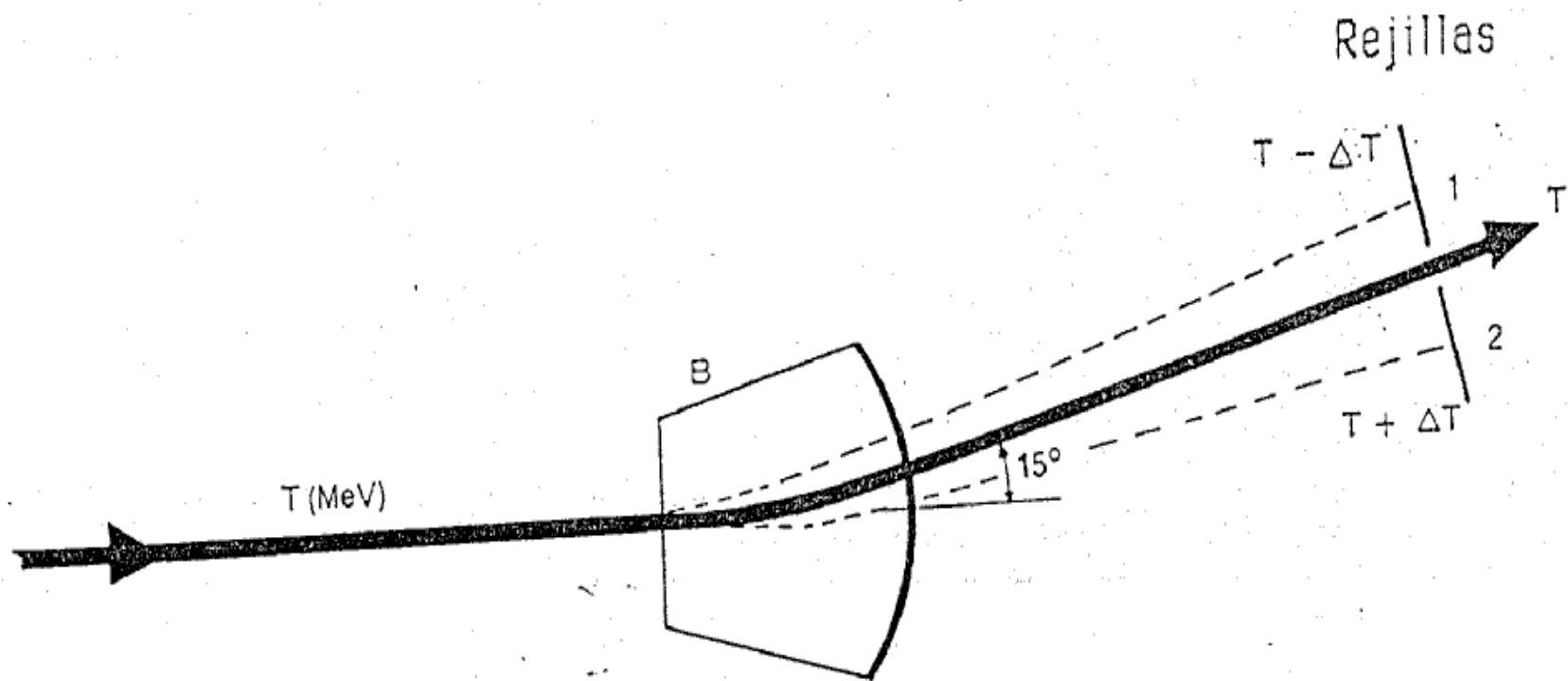


Figura 15.

Entre la consola de control y la base del acelerador hay una distancia adecuada según el acelerador y están separados por la pared que divide el área de experimentación con el cuarto de control. Con esta distancia y con el grueso de la pared de concreto, el nivel de radiación en el cuarto de control con la máquina operando es semejante a los niveles de la radiación de fondo. La consola está conectada al acelerador y sistemas periféricos por medio de cables eclécticos, cuya longitud total puede ser miles de metros.

En la consola existe un conjunto de controles y otro de indicadores, siendo los más importantes medidores de las corrientes de banda, corona, haz, alto voltaje, etc. La variación de un parámetro en la terminal de alto voltaje (TAV) se requiere de una pareja de motores tipo *se/syns* y un transformador de voltaje llamado variac, el cual está en la TAV. La comunicación entre la base del acelerador y la TAV se hace por medio de hilos de cáñamo o barras aisladas de Incita. La razón es que estos elementos son aislantes eléctricos y son simples de conseguir. En los aceleradores modernos, la comunicación se están usando las llamadas *fibras ópticas*.