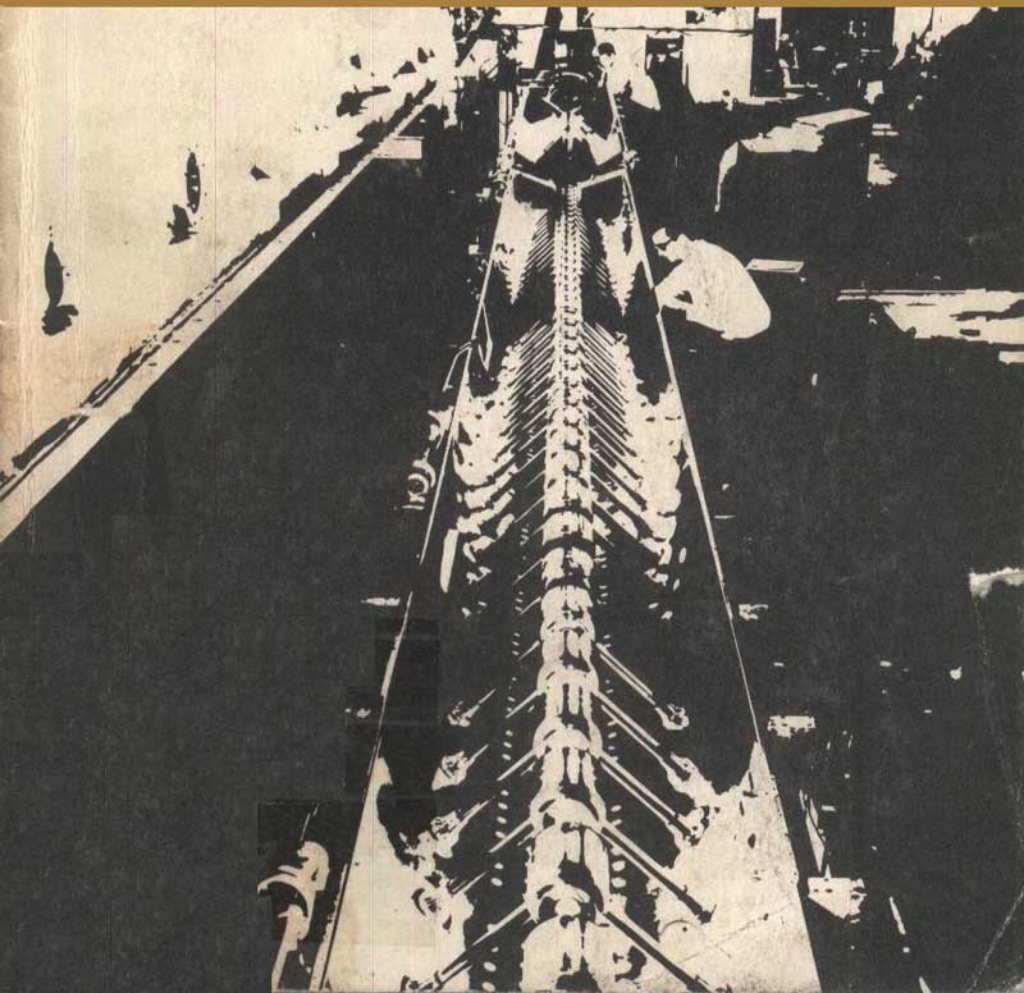


ACELERADORES DE PARTICULAS

Secretaría General de la
Organización de los Estados Americanos
Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico





Portada: Acelerador lineal de protones empleado como inyector del sincrotrón del CERN. Los protones salen por la parte baja de la fotografía (Foto CERN).

ACELERADORES DE PARTICULAS

por

**Fernando Alba Andrade
Instituto de Física
Universidad Nacional Autónoma de México
México D.F., MEXICO**

**Secretaría General de la
Organización de los Estados Americanos
Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico
Washington, D.C.**

© Copyright by
The General Secretariat of the
Organization of American States
Washington, D.C.

Derechos Reservados, 1971
Secretaría General de la
Organización de los Estados Americanos
Washington, D.C.

Primera edición, 1971
Segunda edición,
actualizada, 1982

Esta monografía ha sido preparada para su publicación en el Departamento de Asuntos Científicos y Tecnológicos de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos

Editora: Eva V. Chesneau

Asesor Técnico de

la primera edición: Dr. Wolfgang Meckback
Departamento de Investigaciones
Centro Atómico de Bariloche
Río Negro, Argentina

A los lectores

El programa de monografías científicas es una faceta de la vasta labor de la Organización de los Estados Americanos, a cargo del Departamento de Asuntos Científicos de la Secretaría General de dicha Organización, a cuyo financiamiento contribuye en forma importante el Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

Concebido por los jefes de Estado Americanos en su Reunión celebrada en Punta del Este, Uruguay, en 1967, y cristalizado en las deliberaciones y mandatos de la Quinta Reunión del Consejo Interamericano Cultural, llevada a cabo en Maracay, Venezuela, en 1968, el Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico es la expresión de las aspiraciones preconizadas por los Jefes de Estado Americanos en el sentido de poner la ciencia y la tecnología al servicio de los pueblos latinoamericanos.

Demostrando gran visión, tal altas autoridades reconocieron que la ciencia y la tecnología están transformando la estructura económica y social de muchas naciones y que, en esta hora, por ser instrumento indispensable de progreso en América Latina, necesitan un impulso sin precedentes.

El Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico es un complemento de los esfuerzos nacionales de los países latinoamericanos y se orienta hacia la adopción de medidas que permitan el fomento de la investigación, la enseñanza y la difusión de la ciencia y la tecnología; la formación y perfeccionamiento de personal científico; el intercambio de informaciones, y la transferencia y adaptación a los países latinoamericanos del conocimiento y las tecnologías generadas en otras regiones.

En el cumplimiento de estas premisas fundamentales, el programa de monografías representa una contribución directa a la enseñanza de las ciencias en niveles educativos que abarcan importantísimos sectores de la población y, al mismo tiempo, propugna la difusión del saber científico.

La colección de monografías científicas consta de cuatro series, en español y portugués, sobre temas de física, química, biología y matemática. Desde sus comienzos, estas obras se destinaron a profesores y alumnos de ciencias de enseñanza secundaria y de los primeros años de la universitaria; de éstos se tiene ya testimonio de su buena acogida.

Este prefacio brinda al Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos la ocasión de agradecer al doctor Fernando Alba Andrade, autor de esta monografía, y a quienes tengan el interés y buena voluntad de contribuir a su divulgación.

ÍNDICE

	Página
A los Lectores.....	iii
CAPÍTULO PRIMERO. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO SEGUNDO. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS	3
Consideraciones Relativistas	9
CAPÍTULO TERCERO. ACELERADORES DE CORRIENTE DIRECTA.....	13
Generador Van de Graaff.....	13
Evolución del Acelerador Van de Graaff.....	16
Acelerador Van de Graaff Tandem	18
Acelerador Pelletrón Tandem	18
Multiplicadores de Voltaje	19
CAPÍTULO CUARTO. ACELERADORES LINEALES...	23
CAPÍTULO QUINTO. ACELERADORES CIRCULARES	29
Generalidades	29
Ciclotrón.....	29
Sincrociclotrón o Ciclotrón de Frecuencia Modulada.	33
Betatrón	33
Sincrotrón de Electrones.....	35
Microtrón.....	37
Sincrotrón de Protones	38
Sincrotrones de Enfoque Intenso	43
CAPÍTULO SEXTO. DESARROLLOS RECIENTES.....	47
Ciclotrones de Campo Fijo y Gradiente Alterno (FFAG),	47
Ciclotrón de Órbitas Separadas (SOC)	47
Anillos de Acumulación.....	48
El Acelerador de Batavia	50
CAPÍTULO SÉPTIMO. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES	55
CAPÍTULO OCTAVO. CONSIDERACIONES RELATIVAS AL PERÍODO 1971 - 1981.....	57

	Página
Agradecimientos	60
Bibliografía	61

1

INTRODUCCIÓN

En el sentido más amplio, un acelerador es un instrumento que cambia la velocidad de una partícula cargada, ya sea un ion o un electrón.

Bajo este aspecto, los tubos de los receptores de radio, los cinescopios de televisión y los aparatos de rayos X son aceleradores.

En todas las ramas de la ciencia básica y aplicada se emplean aceleradores en forma de osciloscopios, aparatos de rayos X, microscopía electrónica, espectroscopia de masas, producción de alto vacío por medio de iones acelerados, medida de alto vacío, soldaduras, etc. Recientemente se ha empezado a emplear iones con energía de unas decenas de electrón-voltios en el estudio de reacciones químicas, así como electrones de energía similar en el estudio superficial de cristales.

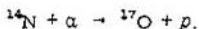
El presente trabajo se limitará a la descripción de algunos de los aceleradores capaces de comunicar a las partículas cargadas una energía superior al millón de electrón-voltios (1 MeV). Estos aparatos han tenido amplia aceptación en la investigación científica y aplicada, y por ello se indicarán además algunas de sus aplicaciones.

Para acelerar las partículas se emplean campos eléctricos, campos magnéticos o la combinación de ambos.

Los aceleradores se desarrollaron notablemente entre 1926 y 1935, principalmente por el interés que había en las investigaciones nucleares y, además, para producir rayos X muy penetrantes con los que se pueden obtener radiografías de objetos metálicos gruesos.

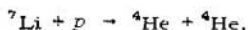
Cuando no se contaba aún con aceleradores de partículas, las reacciones nucleares se podían observar o producir, empleando partículas alfa emitidas por una substancia radiactiva, o por medio de partículas de la radiación cósmica.

La primera reacción en que se observó e identificó una transmutación nuclear fue realizada por Rutherford, en 1919, quien empleó partículas alfa emitidas por una fuente radiactiva natural. El elemento que sirvió de blanco fue nitrógeno. Rutherford observó partículas que tenían un mayor alcance o penetración en dicho gas que las partículas α , llegando a la conclusión que eran protones producidos por la reacción:



Rutherford anticipó que el empleo de partículas aceleradas artificialmente sería un método más eficaz para producir reacciones nucleares que el empleo de las partículas α producidas por las fuentes radiactivas.

La primera transmutación producida por partículas aceleradas artificialmente fue observada por Cockcroft y Walton en 1932, empleando un acelerador ideado por ellos:



Este acontecimiento marcó la iniciación de un tremendo desarrollo en la tecnología de aceleradores de alta energía para el estudio de reacciones nucleares. Además, cuando se encontró que por medio de las reacciones nucleares podían producirse en abundancia radioisótopos de los elementos, de gran valor en medicina, biología, química y tecnología, el interés por desarrollar aceleradores más potentes aumentó notablemente. A estos intereses se vino a sumar el de los ingenieros electricistas en desarrollar fuentes de alto voltaje para reducir el costo de la transmisión de energía eléctrica.

MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

En primer lugar, consideremos que las partículas cargadas se mueven en recipientes previamente evacuados, como ocurre con los electrones en los cinescopios de televisión. En segundo lugar, las partículas se someten a campos eléctricos, magnéticos o a una combinación de ambos.

La fuerza que actúa sobre una partícula de carga q en un campo eléctrico E está dada por

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad [1]$$

Si el campo eléctrico es uniforme y la carga de la partícula no varía, la fuerza que actúa sobre ella será constante, y su trayectoria será, en general, una parábola.

Un caso de particular interés es aquél en que la velocidad inicial es cero o tiene la misma dirección que el vector E . El movimiento será entonces rectilíneo y uniformemente acelerado.

En este caso, la energía cinética ganada por la partícula al recorrer una distancia L y entre dos puntos cuya diferencia de potencial es V , está dada por

$$E_c = qEL = qV. \quad [2]$$

Las unidades empleadas en el sistema MKS absoluto son:

$$1 \text{ julio} = 1 \text{ culombio} \times 1 \text{ voltio}.$$

En la figura 1 (a) se muestra cómo pueden acelerarse electrones por medio de un campo eléctrico uniforme. Los electrones son emitidos por un filamento caliente a una velocidad casi nula, y son acelerados por la acción del campo eléctrico uniforme que se encuentra entre las placas metálicas, hasta adquirir la energía cinética dada por la ecuación [2]. La energía cinética se mantendrá mientras se muevan las partículas en vacío, en regiones libres de campo eléctrico.

En la figura 1 (b) se muestra cómo se comunican impulsos múltiples a los electrones en movimiento dentro de un tubo acelerador al vacío. Este tipo de tubo acelerador es el que se emplea en los aceleradores de corriente directa (véase capítulo 3).

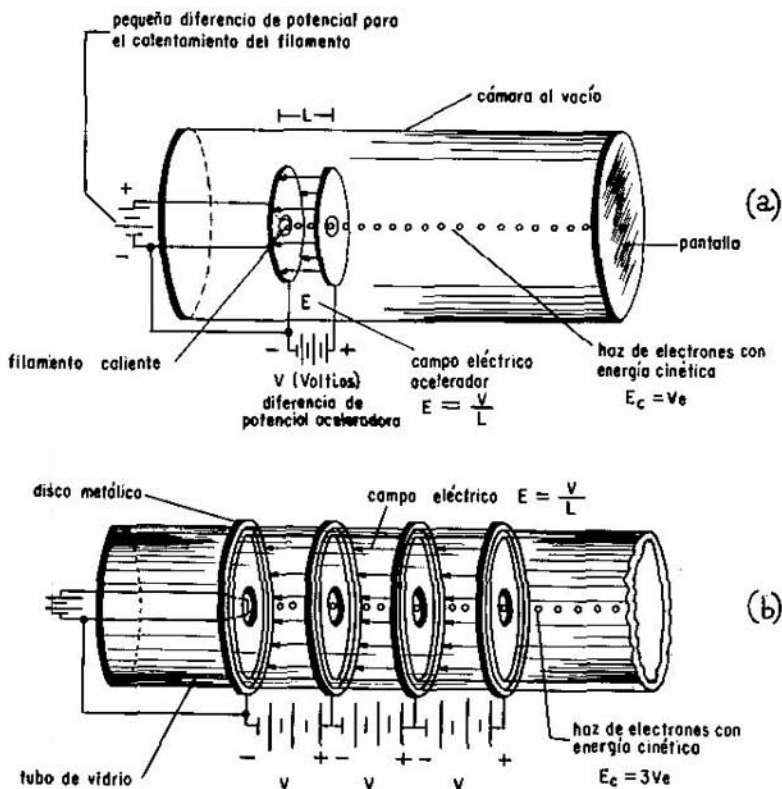


Fig. 1. Aceleración de electrones por medio de un campo eléctrico uniforme.

En la física atómica y nuclear es usual emplear la unidad de energía llamada electrón-voltio "eV", que se define como la energía que adquiere una partícula con la carga de un electrón, al moverse entre dos puntos cuya diferencia de potencial es de 1 voltio.

Sus múltiplos más empleados son:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1000 \text{ electrón-voltios}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1 \text{ millón de electrón-voltios}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = \text{mil millones de electrón-voltios}$$

Teniendo en cuenta que la carga del electrón es de $1,6 \times 10^{-19}$ coulombios, se obtiene de acuerdo con [2]

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ julios.}$$

La fuerza que actúa sobre una partícula de carga q y velocidad v que se mueve en un campo magnético B , está dada por:

$$F = qvB \text{ sen } \theta, \quad [3]$$

en donde θ es el ángulo que forma el vector velocidad \vec{v} con el vector \vec{B} de inducción magnética.

Las unidades son

$$\text{newtonio} = \text{culombio} \times \frac{m}{s} \times \text{tesla}.$$

La fuerza es normal a la velocidad y a la inducción magnética B , y tiene la dirección y sentido indicados en la figura 2 si la carga es positiva, y el sentido contrario si la carga es negativa.

Si se colocan \vec{v} y \vec{B} con un origen común y se gira el vector \vec{v} sobre \vec{B} de manera que el ángulo de giro sea menor de 180° , el sentido en que avance un tirabuzón derecho indicará el sentido y dirección de \vec{F} si q es positiva.

Si una partícula con carga q entra normalmente en un campo magnético uniforme dirigido hacia dentro del papel, estará sometida a una fuerza dada por la ecuación [3]. Esta fuerza será, de acuerdo con la figura 2, normal a la velocidad y al campo magnético, y obligará a la partícula cargada de masa m a describir un movimiento circular uniforme, como se muestra en la figura 3, y se describe por la ecuación [4].

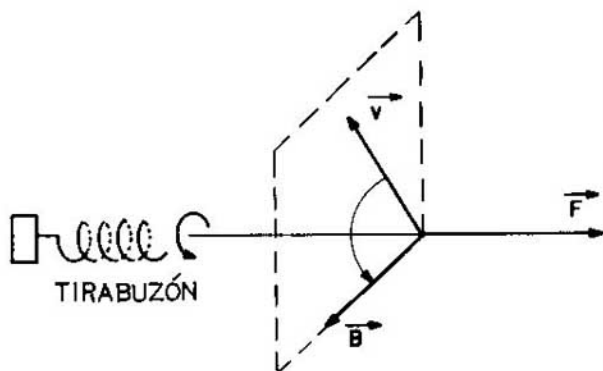


Fig. 2. Dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre una carga positiva que se mueve en un campo magnético.

$$mv = qBr \quad [4]$$

(Unidades MKS; m en kilogramos, v en metros/segundo, q en culombios, B en teslas y r en metros.)

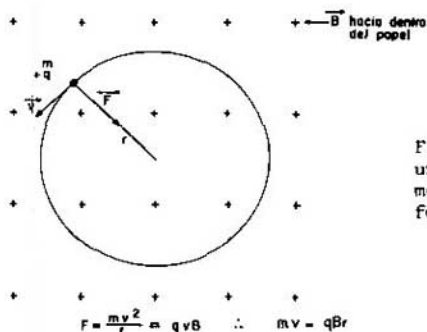


Fig. 3. Movimiento circular de una carga que se mueve normalmente a un campo magnético uniforme.

Frecuentemente la intensidad del campo magnético se expresa en gauss o weber/m²; la equivalencia es

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ weber/m}^2 = 10\,000 \text{ gauss.}$$

6

La ecuación [4] permite determinar la cantidad de movimiento de una partícula cargada y, en consecuencia, su energía si se conoce su carga y el radio de su trayectoria en un campo magnético dado.

La ecuación es correcta en la mecánica relativista si se considera que la masa de la partícula varía con la velocidad, de acuerdo con

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad [5]$$

en donde m_0 es la masa en reposo y c la velocidad de la luz en el vacío, es decir: $c = 3 \times 10^8$ m/seg.

Si la partícula no entra normalmente al campo magnético, su velocidad puede descomponerse en dos componentes, una normal y otra paralela al campo. La primera producirá un movimiento circular uniforme. Sobre la segunda el campo magnético no actúa manteniéndose el movimiento rectilíneo uniforme en la dirección del campo. Al combinar ambos movimientos resultará un movimiento helicoidal, que es el que describirá la partícula.

Un campo magnético uniforme tiene además propiedades ópticas de enfoque.

Partículas iguales con igual velocidad, que se muevan normalmente a un campo magnético uniforme, describirán trayectorias con el mismo radio.

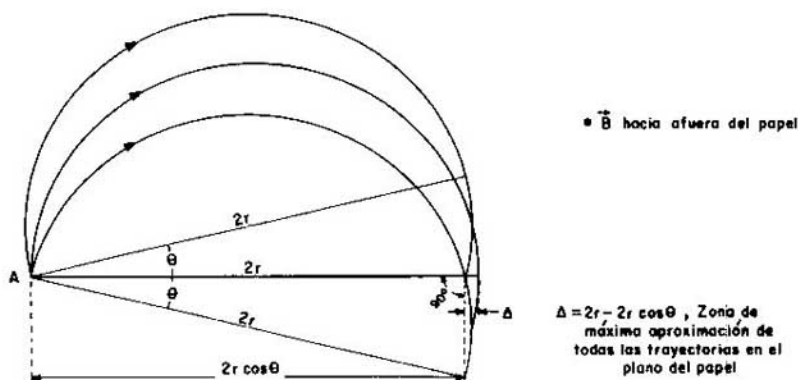


Fig. 4. Propiedades de enfoque de un campo magnético uniforme.

Si dos o más partículas α de la misma energía parten de un mismo punto A, figura 4, en direcciones ligeramente diferentes, sus trayectorias se volverán a aproximar una vez que el campo magnético las desvíe 180° aproximadamente; la separación será de acuerdo con la figura 4

$$\Delta = 2r - 2r \cos \theta = 2r (1 - \cos \theta) = r\theta^2 - r\theta^4/12, \dots \quad [6]$$

en donde la última expresión se obtuvo desarrollando $\cos \theta$ en la serie de Taylor. Por no depender Δ de la primera potencia de θ , se dice que forma una imagen después de girar 180° y con aberraciones de 2o. orden en θ .

Si del punto A son emitidas partículas α de dos energías bien definidas, se formará para cada grupo de partículas una imagen como muestra la figura 5. Tales imágenes pueden registrarse en placas fotográficas, por ejemplo.

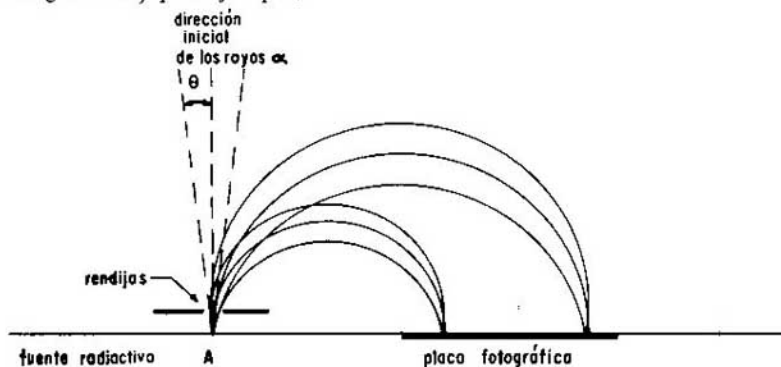


Fig. 5. Enfoque de partículas α de energías diferentes.

Si las partículas α no salen en el plano del papel, sus trayectorias serán helicoidales en vez de circulares, por lo que la imagen del punto A será una línea en la placa fotográfica, figura 6. Es decir, que un campo magnético uniforme tiene poder de enfoque en el plano normal al campo magnético y que se llamará enfoque horizontal, (plano del papel en Fig. 5), pero no lo tiene en la superficie definida por la trayectoria y el campo magnético, que se denominará enfoque vertical (normal a la hoja de papel). Haciendo una analogía con la óptica, se comporta como una lente cilíndrica y no como una lente esférica.

Regiones con campos magnéticos prácticamente uniformes se producen por medio de electroimanes, como se muestra en la figura 6. En este caso, las superficies polares son planos paralelos. La dirección del campo puede invertirse, cambiando el sentido a la corriente eléctrica de las bobinas.

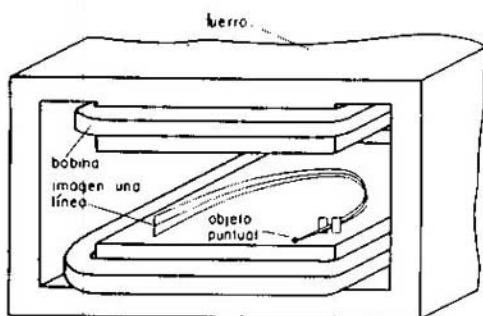


Fig. 6. Un campo uniforme no enfoca en el plano vertical.

Hay diversas maneras de obtener enfoque vertical. En la figura 7 se muestra cómo lograrlo, haciendo que el campo disminuya al alejarse del centro de la trayectoria. Las líneas magnéticas del campo se curvarán como se indica en la figura. Una partícula cargada que se mueva en el plano central del imán, únicamente experimentará fuerzas radiales.

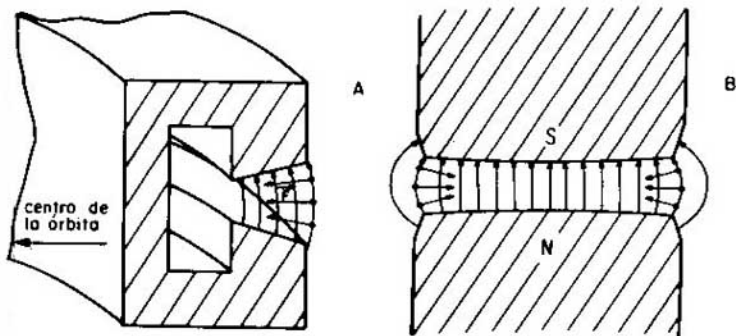


Fig. 7. Campo magnético curvo con enfoque vertical (como si pequeñas esferas se movieran dentro de un barril).

Si la partícula se mueve fuera del plano central, la fuerza magnética ejercida sobre ella tendrá una gran componente horizontal (radial) y una pequeña componente vertical dirigida hacia el plano central, de acuerdo con la ecuación [3] y la figura 2.

Producir un enfoque en el plano vertical, produce un desenfoque en el plano horizontal. La imagen en este plano no se forma después de girar 180° , como en el campo magnético uniforme, sino a un ángulo mayor (si es que se produce el enfoque). Esto puede verse en la figura 4; la trayectoria inferior estará sometida, en promedio, a un campo magnético mayor y por lo tanto el radio de giro promedio será menor y el cruce con la trayectoria central, si lo hay, se producirá después de 180° .

Un campo magnético que aumenta con el radio, producirá efectos contrarios, es decir provocará un enfoque en el plano horizontal antes de los 180° y un desenfoque en el plano vertical. Este tipo de campos juegan un papel muy importante en los grandes aceleradores de enfoque intenso, como se verá posteriormente.

En la figura 8 se muestra cómo una partícula que no se mueva en el plano central está sometida a una fuerte componente centrípeta y a una componente vertical que trata de alejarla del plano central (fuerza de desenfoque).

CONSIDERACIONES RELATIVISTAS

Como se ha visto, la ecuación [5] dice que la masa de un cuerpo aumenta con la velocidad de acuerdo con

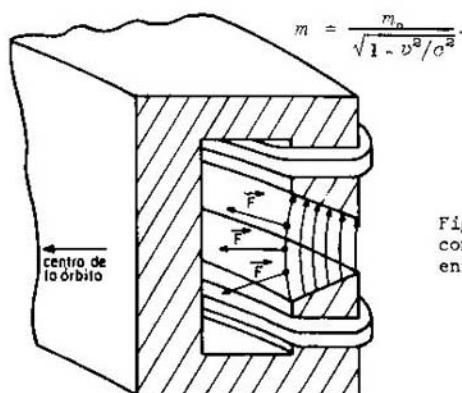


Fig. 8. Campo magnético curvo con desenfoque vertical y fuerte enfoque horizontal.

Pero otras ecuaciones relativistas dicen

$$E_T = mc^2 \text{ (energía total = masa relativista } \times \text{ cuadrado de la velocidad de la luz),}$$

$$E_0 = m_0c^2 \text{ (energía en reposo de la partícula = masa en reposo } \times \text{ } c^2), \quad [7]$$

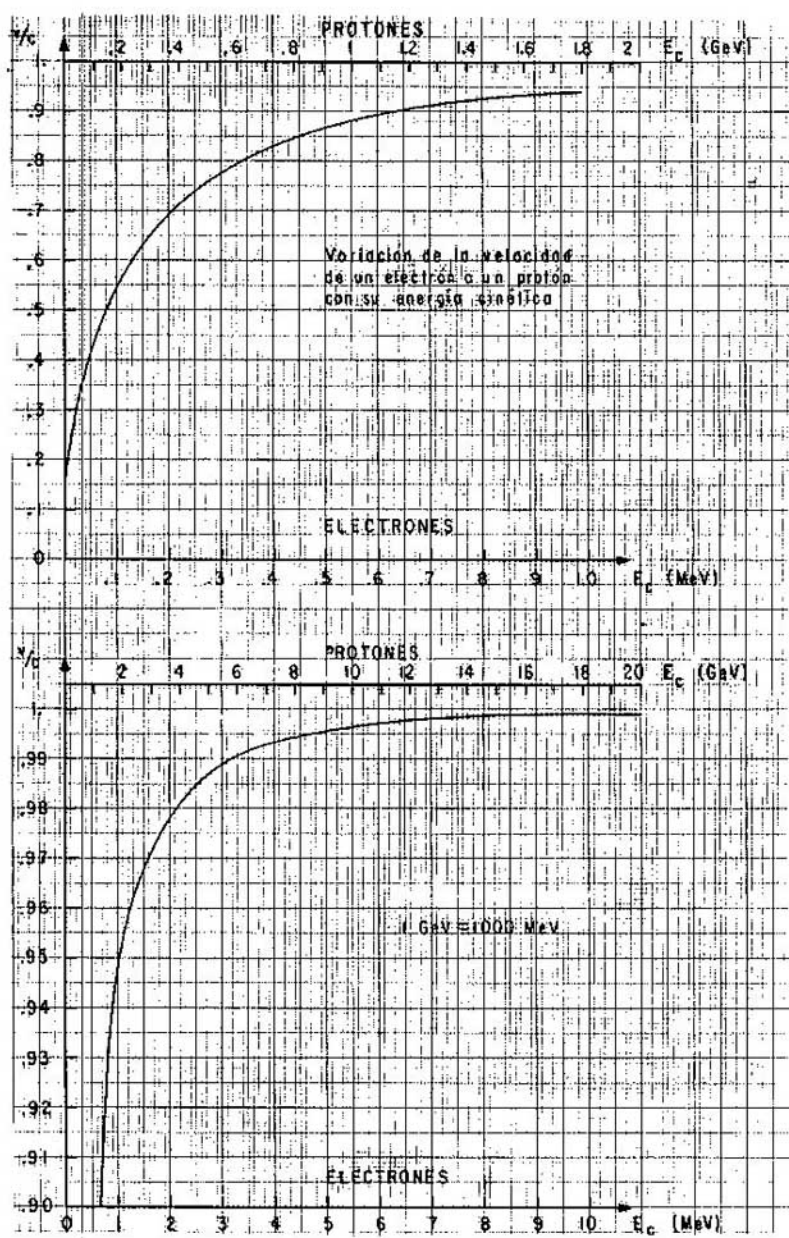


Fig. 9. Variación de la velocidad de una partícula en función de su energía cinética.

$$E_c = E_t - E_o = (m - m_o)c^2 \text{ (energía cinética = energía total - energía en reposo).}$$

De estas ecuaciones

$$\frac{E_c}{E_o} = \frac{m - m_o}{m_o} = \frac{m}{m_o} - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1. \quad [8]$$

En esta ecuación tanto las energías como las velocidades aparecen en forma de relación lo que permite emplear las unidades que más convenga, por ejemplo MeV para las energías.

Teniendo en cuenta que las energías en reposo equivalentes a las masas en reposo de un electrón y de un protón están dadas por

$$\begin{aligned} E_o(\text{electrón}) &= 0,51 \text{ MeV} \\ E_o(\text{protón}) &= 931 \text{ MeV} \end{aligned} \quad [9]$$

o sea que el protón tiene casi 2 000 veces más energía en reposo o masa que el electrón.

Sustituyendo los valores de [9] en [8] se puede construir la figura 9. En ella se ve, por ejemplo, que un electrón con una energía cinética de 2 MeV, se mueve a una velocidad equivalente al 98% de la velocidad de la luz ($v/c = 0,98$). En cambio, un protón con esa misma energía cinética se mueve apenas con $v/c = 0,06$. Para que $v/c = 0,98$, un protón debe tener una energía cinética de 4 GeV = 4 000 MeV.

ACELERADORES DE CORRIENTE DIRECTA

El método más simple de acelerar partículas consiste en mantener un cuerpo a alto potencial respecto a tierra, por medio de la rectificación de la corriente alterna o por el transporte mecánico de electricidad desde tierra al terminal de alto voltaje, y el empleo del campo eléctrico producido para la aceleración de las partículas.

Estos aparatos han tenido un papel muy importante en el estudio de la estructura nuclear. Todos ellos constan de una fuente de iones, un terminal de alto voltaje, un tubo acelerador, una cámara donde se produce la reacción nuclear, equipo de control del haz y equipo analizador para el estudio de los productos de la reacción.

En la figura 10 se muestra el plano del acelerador Tandem y su equipo analizador en el Centro Nuclear de Salazar, México.

Los aceleradores de corriente directa son los más empleados en la investigación de la estructura nuclear debido a sus numerosas características favorables, como:

- la sección transversal del haz de partículas es pequeña y su corriente puede mantenerse constante durante un experimento, o se puede producir un haz pulsado;
- las partículas del haz tienen prácticamente la misma energía, y ésta se puede variar en forma continua en un intervalo de energía muy amplio;
- el intervalo de valores de la energía que cubren (hasta 20 MeV si se trata de protones y deuterones, hasta 30 MeV si las partículas son núcleos de helio y más aún si son iones pesados), es el que se necesita para realizar numerosas investigaciones nucleares.

Son además aceleradores muy confiables, que pueden trabajar en forma casi continua y que permiten realizar investigaciones de gran precisión y resolución. Algunos de ellos se emplean para acelerar electrones y producir así corrientes de hasta 10 miliamperios a 4 MeV (haces de 40 kW, que se emplean en la irradiación de plásticos y derivados del petróleo para mejorar sus propiedades físicas y químicas, en la irradiación de alimentos para estudiar su preservación, y para producir rayos X muy penetrantes).

GENERADOR VAN DE GRAAFF

En 1929, en la Universidad de Princeton, Robert Van de Graaff⁽¹⁾ construyó el primer generador electrostático de este tipo. La figura 11

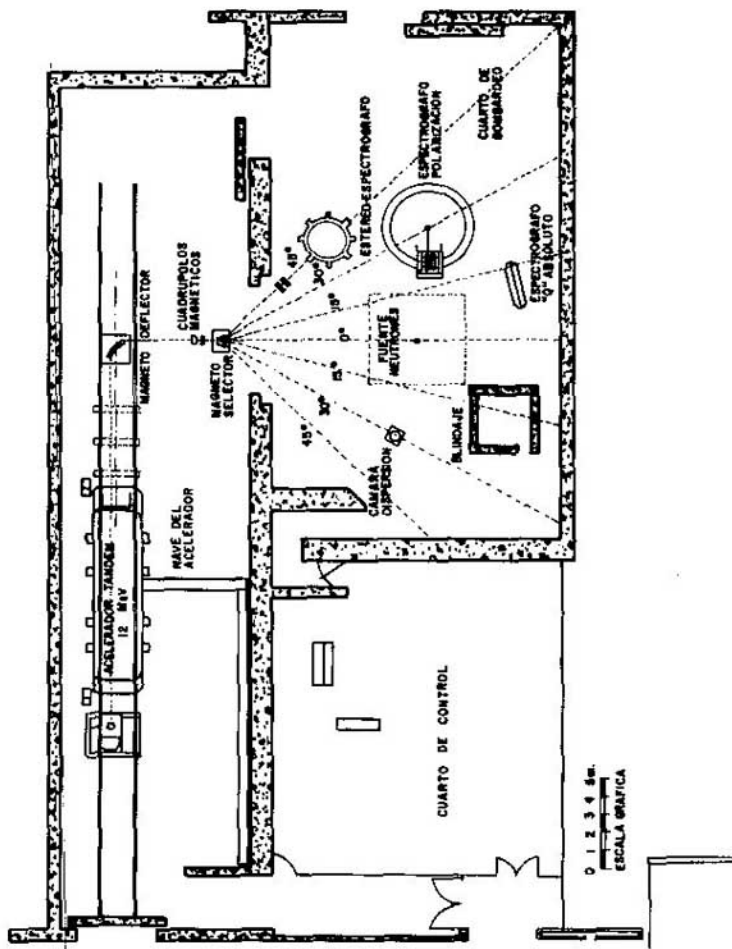


Fig. 10. Acelerador de Salazar, México.

muestra cómo trabaja este aparato. La parte fundamental consta de una banda aislante que gira sobre dos poleas, una dentro del terminal de alto voltaje y la otra conectada a tierra. Por medio de una fuente de alto voltaje y un peine de puntas, se carga la banda con un efluvo de corona. Estas cargas son llevadas mecánicamente por la banda al interior del terminal de alto voltaje, en donde son colectadas por otro peine de agujas conectado al terminal.

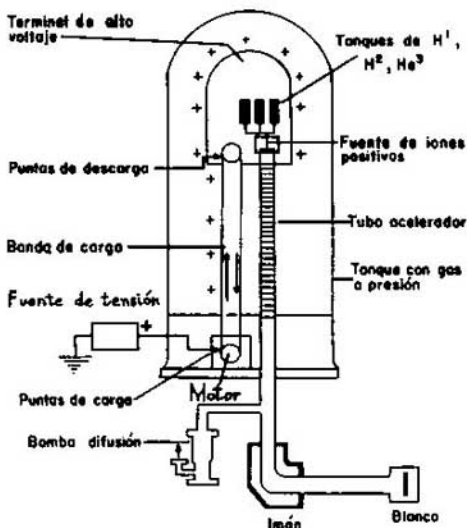


Fig. 11. Esquema de un acelerador Van de Graaff.

Aunque los materiales empleados resisten bien las descargas, éstas acortan la vida de las componentes.

Si se quiere acelerar partículas cargadas, como deuterones o helio, hay que colocar dentro del terminal pequeños tanques que contengan tales gases.

Las válvulas de los tanques y demás circuitos dentro del terminal, se controlan desde la base por medio de barras aisladoras, de cordones o de haces luminosos.

Pequeñas cantidades del gas seleccionado pasan a la fuente de iones, figura 12, donde es ionizado por medio de campos de radiofrecuencia o haciendo pasar por él una corriente de electrones. La fuente de iones contiene además campos eléctricos y magnéticos que aceleran y enfocan a los iones positivos para que se los pueda controlar al ser introducidos en el tubo acelerador.

La carga llevada al terminal eleva el voltaje de éste hasta que se alcanza un equilibrio entre la corriente de la banda y la que baja por el tubo acelerador, por las resistencias de carga y por la corriente de corona que se fuga del terminal y la columna a través del gas aislante.

Si por la banda sube más corriente de la necesaria, se produce una descarga entre el terminal y el tanque a través del gas, o una descarga superficial a través de la columna aisladora que sostiene al terminal, la banda o el tubo acelerador.

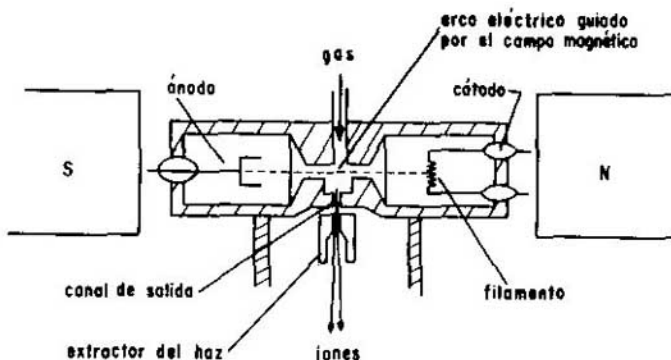


Fig. 12. Fuente de iones de arco eléctrico.

El tubo acelerador está dividido en secciones por medio de anillos metálicos para producir un campo eléctrico casi uniforme desde el terminal hasta la base. En esta forma se reducen notablemente las descargas en el tubo acelerador y se produce un enfoque del haz en la parte superior que se mantiene durante la aceleración en el tubo.

Si estamos acelerando helio y la fuente produce iones de una y dos cargas, y si por ejemplo el terminal se encuentra a 5 millones de voltios, la energía que las partículas adquirirán serán de 5 MeV si son de una carga y de 10 MeV si son de dos.

Evolución del Acelerador Van de Graaff

Es importante el estudio de la evolución de este acelerador, porque lo que se diga al respecto es aplicable a todos los aceleradores de corriente directa.

Los primeros modelos del Van de Graaff consistían en una esfera hueca, de unos 60 cm de diámetro, sostenida por medio de aisladores y expuesta al aire. La carga se subía a la esfera por medio de bandas de seda. Un acelerador de este tipo, con voltaje de 2 millones de voltios, se empleó en el Instituto Tecnológico de Massachusetts en investigaciones nucleares. El terminal consistía de dos esferas de 4 m cada una, formando una mancuerna, y sostenidas por una columna de textolite. Por una subía la banda y de la otra salía el tubo acelerador de unos 7 m de longitud. Un acelerador similar, aunque más pequeño, con esferas de 1 m de diámetro, fue construido en la Universidad de Guanajuato, México, figura 13, para acelerar electrones. En esta figura puede observarse el tubo acelerador dividido en secciones, ideado por W. Coolidge^(a) en 1926 y perfeccionado por M. A. Tuve⁽³⁾, quien en 1933 fue el primero en aplicar con éxito este tipo de acelerador a estudios nucleares.

Con objeto de reducir el tamaño del acelerador para un voltaje dado, se pensó sumergirlo en un medio dieléctrico mejor que el aire

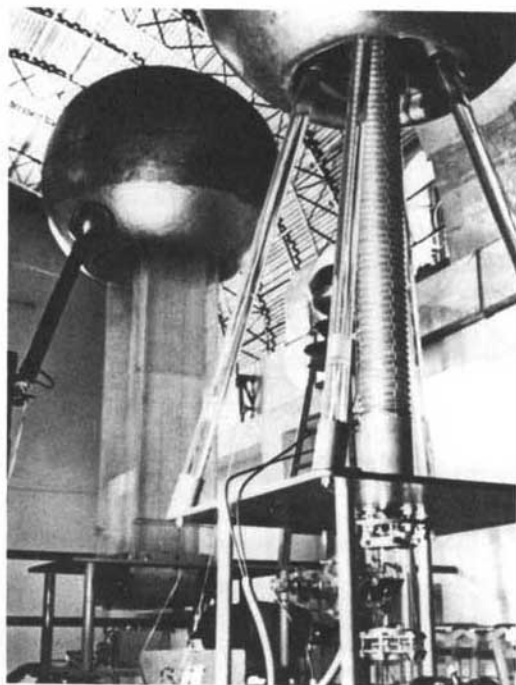


Fig. 13. Acelerador de electrones de 0,5 MeV con aislamiento de aire. Universidad de Guanajuato, México.

a presión atmosférica. Van de Graaff trató de operarlo en vacío, pero las bandas no se cargaban. H. A. Barton lo colocó en un tanque a presión y así pudo elevar el voltaje del terminal, pero no tuvo éxito al tratar de operarlo como acelerador.

Herb⁽⁴⁾ y colaboradores fueron los primeros en construir un acelerador dentro de un tanque a presión que realmente funcionó. Fallaron que, además de reducir las descargas del terminal y a lo largo de la banda, aumentaba la corriente que subía por ésta.

Joliot⁽⁵⁾ descubrió que los vapores de tetracloruro de carbono aumentaban la rigidez eléctrica del aire.

Para reducir los riesgos de incendio dentro del tanque, el aire fue substituido por mezclas de nitrógeno y bióxido de carbono. El gas debe estar bien seco, pues basta una pequeña cantidad de agua para reducir sus propiedades aislantes.

Buechner⁽⁶⁾ estudió el hexafluoruro de azufre como gas aislante, y encontró que tiene propiedades valiosas; en la actualidad se emplea en numerosos aceleradores.

ACELERADOR VAN DE GRAAFF TANDEM

Dado que las dimensiones y costo de un acelerador Van de Graaff aumentan enormemente con la energía de salida, se construyó este acelerador, que tiene entre otras ventajas el que la fuente de iones se encuentra fuera del tanque y a bajo potencial, representado esquemáticamente en la figura 14.

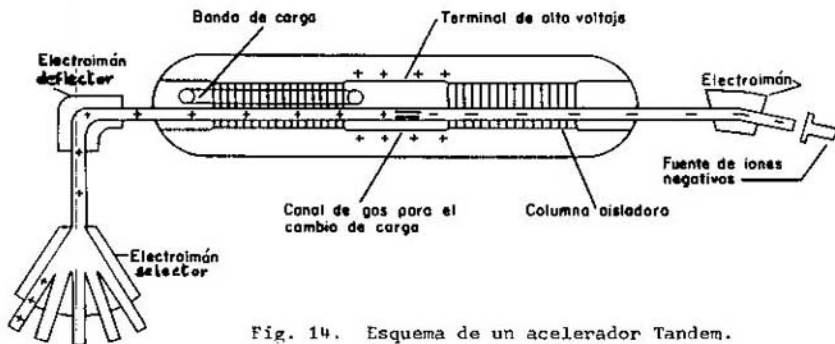


Fig. 14. Esquema de un acelerador Tandem.

De una fuente de iones negativos, por ejemplo de hidrógeno atómico con un electrón de más, salen éstos con una energía de unos 80 keV y son conducidos al tubo acelerador, donde son atraídos por el terminal positivo, ganando una energía de Ve electrón-voltios. En el terminal se los hace pasar por un pequeño tubo que contiene algo de gas o por una hoja muy delgada de carbón. Debido a su gran velocidad, casi todos los iones emergentes del canal de despojo habrán perdido sus dos electrones, y como ahora están cargados positivamente, ganarán otra energía Ve electrón-voltios al actuar sobre ellos una fuerza de repulsión del terminal a tierra en el segundo tubo acelerador.

Átomos más pesados que el hidrógeno quedarán con más de una carga después de pasar por el canal de despojo; si la carga es Ze , la energía de las partículas será $(1+Z)eV$.

Hasta la fecha se han construido aceleradores de este tipo cuyo voltaje en el terminal llega a unos 10 millones de voltios y que aceleran protones hasta cerca de 20 MeV y corriente de varios microamperios.

ACELERADOR PELLETRÓN TANDEM

Un acelerador basado en el mismo principio que el Tandem, pero cuya banda se ha substituido por cadenas formadas por pequeños cilindros metálicos (pellets) unidos por espaciadores aislantes, recibe el nombre de Acelerador Pelletrón. Estos cilindros se cargan eléctricamente en el lado de tierra y se descargan por simple contacto eléctrico dentro del terminal de alto voltaje.

Un acelerador vertical de este tipo se instalará próximamente en la Universidad de San Pablo, Brasil. Según las especificaciones, acelerará protones a 22 MeV con una corriente de 5 microamperios.

El inyector de iones negativos los acelerará a unos 4 MeV y el terminal positivo de alto voltaje tendrá cerca de 9 millones de voltios.

Se pueden emplear fuentes de iones negativos a potencial de tierra, como en la figura 14, y en este caso la energía de los protones sería de 18 MeV.

En la figura 15 se muestra un esquema del acelerador de San Pablo, que será por algunos años el más eficaz de los existentes en América Latina para la investigación nuclear.

MULTIPLICADORES DE VOLTAJE

En 1921 Greinacher diseñó un circuito ingenioso que multiplica y rectifica el voltaje producido por un transformador. Cockcroft y Walton, (7) empleando este circuito, construyeron el primer acelerador mediante el cual se obtuvo una reacción nuclear.

Trabajando en el Laboratorio Cavendish, de la Universidad de Cambridge, llegaron a la conclusión de que un potencial constante es más apropiado para la investigación nuclear que un potencial alterno o pulsado.

El primer acelerador Cockcroft-Walton que empleaba el multiplicador de voltaje con potencial hasta de 800 000 voltios, tenía un tubo acelerador de dos secciones, que suministraba protones a una energía de 700 keV.

Las primeras desintegraciones nucleares se obtuvieron en 1932 al bombardear ${}^7\text{Li}$ con protones, (véase página 2).

En la figura 16 se muestra el circuito de Cockcroft-Walton que multiplica por 6 el voltaje pico de entrada (8,5 veces el voltaje r. m. s. o efectivo).

El voltaje del terminal será la suma de los voltajes de los condensadores C_2 , C_4 y C_6 , que en la práctica pueden considerarse iguales, o sea, en este caso particular, el triple del voltaje aplicado sobre cualquiera de los condensadores antes mencionados.

En la figura 17 se muestra una variación de los multiplicadores de voltaje empleada en los aceleradores llamados Dynamitron; la diferencia radica en la manera de conectar los condensadores. En este caso el voltaje aplicado al condensador C_4 es prácticamente el doble del aplicado al C_2 , y sobre el C_6 actúa todo el voltaje producido

Acelerador Pelletrón 22 MeV
Universidade de San Pablo

1. Fuente de iones negativos pelletrón de 4 MeV. El tanque tiene 1,90 m de diámetro y 4,80 m de altura. El gas es SF_6 a una presión hasta de 10 atmósferas.
2. Selector de velocidades.
3. Electroimán rotatorio de 90° para el empleo de otra fuente de iones.
4. Acelerador de cambio de carga pelletrón con terminal a unos 9 millones de voltios. El tanque tiene 3 m de diámetro y 11 m de altura. El gas es SF_6 a una presión hasta de 10 atmósferas.

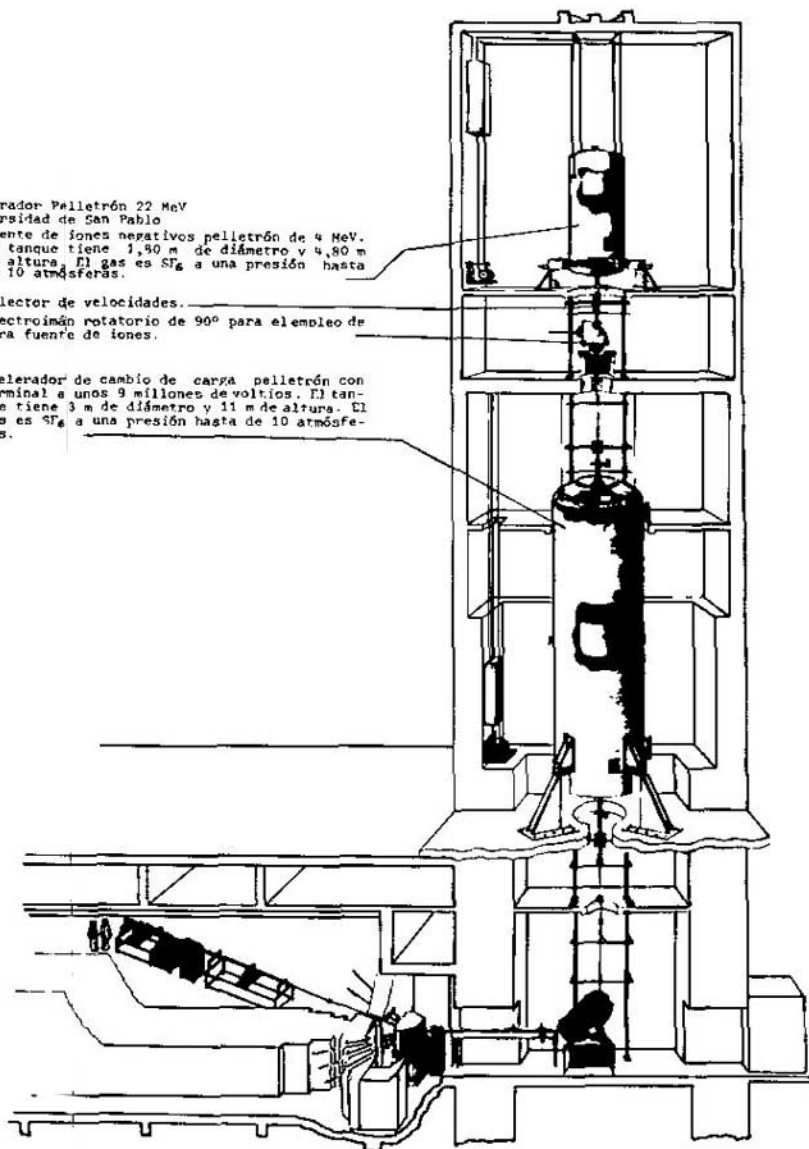


Fig. 15. Acelerador Pelletrón de la Universidad de San Pablo, Brasil.

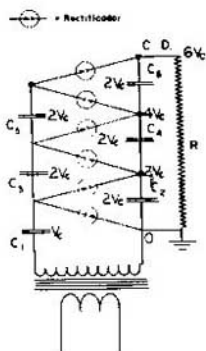


Fig. 16. Esquema de un multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton. V_c = tensión de pico del secundario.

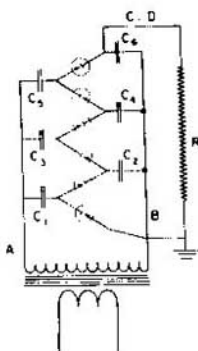


Fig. 17. Esquema de un multiplicador de voltaje Dynamitron.

La ventaja de este método consiste en que al usar un voltaje de radiofrecuencia (100 a 300 kilociclos/segundo), las capacidades necesarias son muy pequeñas y se reducen a la capacidad de acoplamiento entre las placas osciladoras A y B de la figura y unos tubos en forma de C conectados a los rectificadores, eliminando la necesidad de emplear condensadores comerciales. A través de estas capacidades de acoplamiento, pasa la energía que se emplea para calentar los filamentos de los tubos rectificadores. Para evitar descargas todo el aparato se coloca dentro de un tanque que contiene hexafluoruro de azufre a presión. figura 18.

21

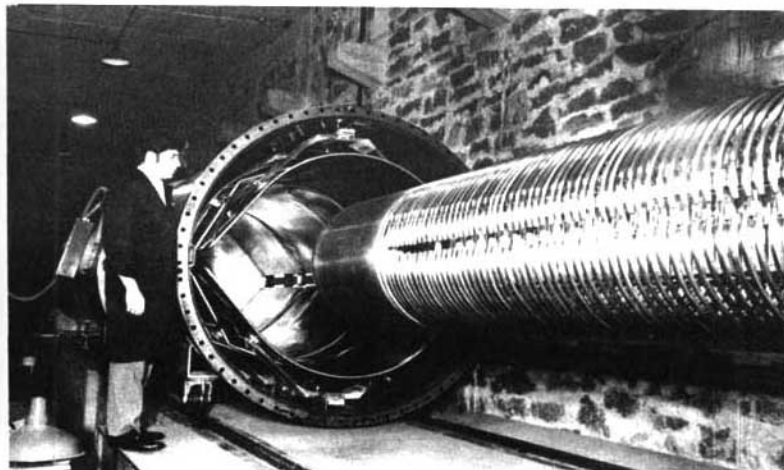


Fig. 18. Acelerador Dynamitron, del Instituto de Física de la Universidad de México.

Al igual que los aceleradores Van de Graaff, estos aceleradores tienen un terminal de alto voltaje y un tubo acelerador, y pueden acelerar electrones, protones, deuterones, núcleos de helio y otros iones más pesados. Con estos aceleradores, pueden producirse actualmente corrientes muy grandes (miliamperios) a voltajes hasta de 4 MeV.

ACELERADORES LINEALES

Los primeros aceleradores de este tipo (también llamados linac) se basaban en el principio de aceleración múltiple, empleando un voltaje alterno de radiofrecuencia de algunas decenas de kilovoltios.

En 1925 Ising^(e) publicó la idea de acelerar iones empleando radiofrecuencia, y en 1928, Wideroe^(e) operó el primer acelerador lineal, y aceleró con él iones de sodio y potasio a una energía correspondiente al doble del voltaje aplicado, que era de 25 kilovoltios.

La figura 19 muestra el esquema de un acelerador de este tipo, que, en la actualidad, sólo tiene interés histórico. Los electrodos estaban formados por cilindros metálicos cada vez más largos, todos los impares conectados a uno de los terminales del oscilador de radiofrecuencia y todos los pares al otro. Supongamos que los iones positivos provenientes de una fuente de iones, como las empleadas en los aceleradores de corriente directa, se mueven dentro del primer electrodo. Por encontrarse en una cavidad, no están sometidos a ninguna fuerza, pero al asomarse a la región entre los electrodos 1 y 2, estarán sometidos a un campo eléctrico alterno (variable). Si en ese momento el electrodo 1 es positivo y el 2 es negativo, el campo eléctrico los impulsará favorablemente aumentando su velocidad y su energía. Mientras se mueven dentro del segundo electrodo no están sometidos a fuerza alguna. Como la frecuencia del oscilador es fija, se puede diseñar la longitud de los electrodos a fin de que mientras el ion lo atraviese, cambie la polaridad del voltaje de manera que al asomarse el ion entre el segundo y tercer electrodo, la carga del segundo sea ahora positiva y la del tercero negativa para que el ion reciba un nuevo impulso y su energía y velocidad aumenten, y esto se repita en todos los casos.

23

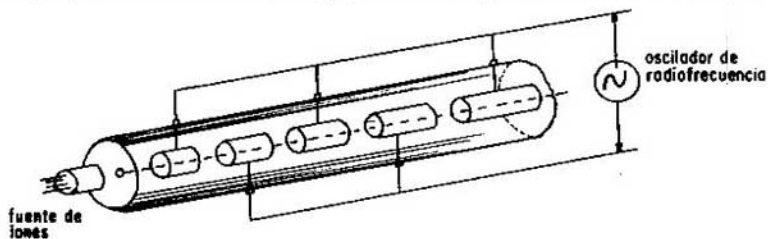


Fig. 19. Esquema de un acelerador lineal tipo Ising-Wideroe.

Como la frecuencia de oscilación es constante, también lo será el tiempo que debe permanecer la partícula dentro de cualquier cavidad

para que reciba impulsos favorables, y como la velocidad va siempre en aumento, se requiere que los electrodos sean cada vez más largos para que el tiempo empleado en recorrerlos sea siempre el mismo.

La longitud del electrodo (L) para que un ion entre en el tubo cuando éste es negativo y salga de él cuando es positivo, será

$$L = v \times \frac{T}{2}$$

En donde v es la velocidad del ion y $\frac{T}{2}$ la mitad del período, o sea el tiempo que el oscilador tarda en cambiar la carga de un cilindro de negativa a positiva.

De acuerdo con la ecuación [2], la energía cinética E_c que adquiere una partícula de carga q después de n impulsos será, para un caso no relativista

$$E_c = nVq = \frac{mv_n^2}{2}$$

$$\therefore v_n = \sqrt{\frac{2nVq}{m}}$$

en donde V representa el voltaje pico aplicado y v_n la velocidad alcanzada por la partícula.

La longitud del electrodo "n" será

24

$$L_n = \sqrt{\frac{2nVq}{m}} \times \frac{T}{2}$$

De acuerdo con la teoría de la relatividad, ningún electrón o partícula puede alcanzar una velocidad mayor que la de la luz en el vacío, $c = 300\,000$ km/seg, por lo que la longitud de los tubos no seguirá aumentando sin límite, y tenderá al valor

$$L = c \times \frac{T}{2}$$

Este tipo de acelerador fue construido y perfeccionado por Lawrence y Sloan⁽¹⁰⁾ en 1931, pero su aplicación a la física nuclear fue insignificante.

Hacia 1939 se habían logrado acelerar iones de hidrógeno molecular hasta una energía de 350 keV, mientras que, en esa fecha, los Van de Graaff aceleraban iones de ese tipo a varios millones de electrón-voltios y los ciclotrones a muchos millones.

Con el desarrollo del radar, la situación cambió radicalmente, pues se construyeron fuentes de muy alta frecuencia, de elevada potencia y circuitos eficientes para operar esa energía.

Los nuevos aceleradores lineales emplean guías de onda o cavidades de resonancia para establecer el campo eléctrico a frecuencias de hasta 3 000 Mc/seg.

En los aceleradores lineales de electrones se emplean generalmente guías de onda cargadas con discos, como se muestra en la figura 20. Estas consisten de un tubo conductor con discos perforados, también con-

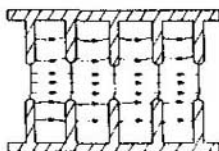
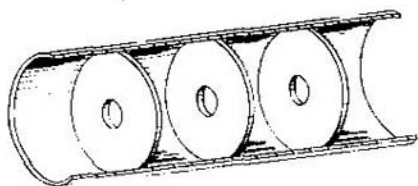


Fig. 20. Guía de onda con discos de carga para disminuir la velocidad de fase hasta tener la velocidad de la luz.

ductores, entre los que se establece un campo electromagnético variable producido por una fuente de alta frecuencia.

La velocidad de fase de la onda electromagnética depende de la frecuencia del oscilador y de la geometría del sistema tubo-discos.

En la figura 21 se muestra esquemáticamente cómo se inyectan las microondas en el tubo acelerador.

25

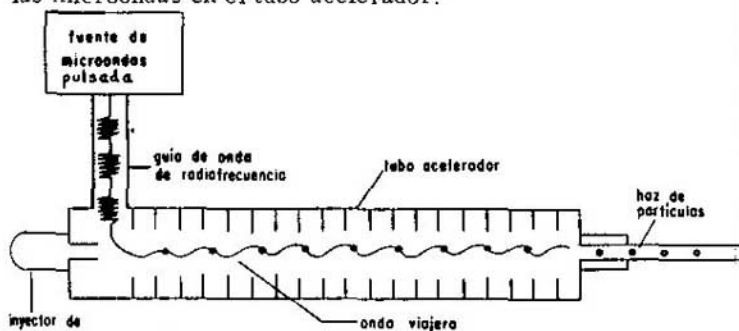


Fig. 21. Esquema de un acelerador lineal de electrones con guías de onda.

Si el acelerador es de electrones, y si el inyector de electrones los acelera a unos 80 keV, entrarán en el tubo acelerador con una velocidad $v = 0,5 c$, o sea de la mitad de la velocidad de la luz en el vacío, que es la máxima posible.

Si la velocidad de fase es cercana a la de la luz, el electrón puede viajar montado en la onda y recibir energía del campo electromagnético en todos los puntos a lo largo de su trayectoria y no sólo en los espacios entre los electrodos, como en el acelerador de Lawrence y Sloan.

Debido a que la intensidad del campo es muy grande dentro de las guías de onda, las pérdidas de potencia son muy grandes, por lo que sólo se inyectan microondas en el tubo durante 1% o menos del tiempo de operación del acelerador. Por lo tanto, los electrones no salen continuamente como en los aceleradores de corriente directa, sino en pulsos cuya duración se mide en microsegundos y se repiten hasta varios centenares de pulsos cada segundo.

El acelerador puede consistir de un tubo de guías de onda o de varios en serie, dependiendo de la energía que se quiera obtener. Las microondas se suministrarán en el principio de cada una de las secciones, y esto debe hacerse en forma sincronizada para mantener la fase correcta de modo que el electrón quede montado en la onda viajera de cada uno de los tubos.

El campo electromagnético puede también entonarse para formar ondas estacionarias, semejantes a las que se producen en una cuerda de guitarra, con ciertos puntos que no vibran, llamados nodos, y otros que vibran con máxima amplitud. Las cavidades del tubo actúan como resonadores. Estas ondas estacionarias pueden considerarse como la superposición de dos ondas viajeras que se mueven en dirección opuesta; una partícula cargada puede viajar montada en una de ellas.

Los aceleradores lineales también se emplean en la aceleración de iones positivos, usando tubos dentro de una gran cavidad de resonancia. (Véase fotografía de la portada.)

Un acelerador de iones pesados, como los de nitrógeno y neón, emplea un acelerador Cockcroft-Walton inicialmente, para producir iones con una energía de 0,5 MeV; a continuación una sección de un acelerador lineal para obtener iones con una energía de 1 MeV por cada nucleón del ion (unos 14 MeV en el caso de iones de nitrógeno); estos iones se hacen pasar luego por un canal de despojo, que contiene un gas a baja presión, para sustraerle muchos de sus electrones y hacer que el ion tenga muchas cargas positivas; y finalmente se aceleran en otra sección de acelerador lineal, donde los iones adquieren una energía de 10 MeV por cada nucleón ($v/c = 0,15$).

Hay numerosos aceleradores lineales que imparten a electrones energías de 10 MeV a varios miles de MeV. La longitud de los aceleradores pequeños es de unos cuantos metros, y el de la Universidad de Stanford mide 3 050 m.

En la Tabla 1 se dan algunas características del acelerador del Centro Atómico de Bariloche y del de la Universidad de Stanford.

Cuando menos, hay 4 aceleradores de este tipo en América Latina, los de Bariloche, Río de Janeiro y San Pablo, que se emplean en investigaciones de física nuclear, y el de la ciudad de México destinado a investigaciones médico-biológicas. Mientras los aceleradores de electrones de muy altas energías, como el de Stanford, se emplean en la investigación de partículas elementales (antipartículas, mesones, etc.) los aceleradores de energías moderadas, como los mencionados

anteriormente, son muy valiosos para el estudio de la estructura nuclear. Si se frenan los electrones haciéndolos chocar contra un blanco de oro, por ejemplo, producirán rayos X que pueden ser empleados en el estudio de reacciones fotonucleares, o bien para producir haces de neutrones pulsados por medio de reacciones fotonucleares, por ejemplo

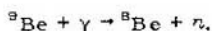


Tabla I

Características de Dos Aceleradores Lineales

	Centro Atómico de Bariloche, Argentina	Universidad de Stanford
Máxima energía del electrón	25 MeV 60 MeV (en el futuro)	40 000 MeV
Duración del pulso	1 microsegundo	2 microsegundos
Corriente pico de electrones	0,1 amperios	0,2 amperios
Frecuencia de repetición	6-50 pulsos/segundos	360 pulsos/segundos

Los neutrones pueden, a su vez, ser empleados en numerosas investigaciones nucleares. La buena aceptación que han tenido estos aceleradores se debe principalmente a que se puede variar la energía de los electrones y a que el haz de éstos al salir del tubo acelerador, puede dirigirse fácilmente a diferentes partes del laboratorio según los distintos experimentos. Además, el tamaño del haz puede controlarse por medio de campos eléctricos y magnéticos. Estas características favorables han limitado mucho el empleo de otro acelerador, el betatrón, que hace algunos años se empleaba en numerosos laboratorios para acelerar electrones, y que se verá en el próximo capítulo.

Finalmente, se emplean también como inyectores de iones positivos en otros aceleradores, como se verá posteriormente.

En las ciencias médico-biológicas se emplean en la irradiación de productos y en terapia médica.

ACELERADORES CIRCULARES

GENERALIDADES

Hasta ahora se ha hablado de aceleradores que emplean el campo eléctrico para suministrar energía a las partículas cargadas; unos requieren gran diferencia de potencial entre los puntos extremos del recorrido de la partícula, y otros emplean modestas diferencias de potencial, que se aplican muchas veces con la fase apropiada.

La idea de la aplicación múltiple de voltaje condujo a varios investigadores (Thibaud,⁽¹¹⁾ Lawrence⁽¹²⁾ y Szilard) a tratar de obtener un acelerador más compacto, el ciclotrón, empleando campos magnéticos que obligasen a las partículas a describir arcos de círculo. Corresponde a Lawrence y Livingston⁽¹³⁾ el desarrollar notablemente este aparato en 1930.

No fue sino hasta 1940 que Kerst⁽¹⁴⁾ diseñó un electroimán que permitió acelerar electrones de acuerdo con la ley de inducción magnética de Faraday, lo que habían intentado numerosas personas desde 1927. Este acelerador recibió el nombre de betatrón.

Posteriormente, en 1945, hicieron su aparición los sincrotrones (Veksler,⁽¹⁵⁾ MacMillan⁽¹⁶⁾ y Oliphant⁽¹⁷⁾), en que se emplean cavidades de resonancia, como en los aceleradores lineales y trayectorias circulares para acelerar partículas a miles de MeV.

El empleo de imanes de enfoque intenso o de gradiente alterno ha permitido la construcción de sincrotrones con radios de trayectoria hasta de 1 km y que pueden acelerar protones a centenares de GeV.

Por lo general, estos grandes aceleradores consisten en una serie de varios aceleradores, por ejemplo, primero un Cockcroft-Walton, luego un acelerador lineal y después uno o más sincrotrones.

CICLOTRÓN

Este acelerador fue el primero en emplear un campo magnético que obliga a las partículas a describir una órbita espiral, y las hace pasar muchas veces a través de un campo eléctrico acelerador. En la figura 22 se muestra un esquema de este acelerador, donde puede verse el campo magnético prácticamente constante, dentro del cual se colocan la caja de vacío y dos cavidades en forma de "D" conectadas al oscilador de radiofrecuencia y una fuente de iones positivos en el centro del imán.

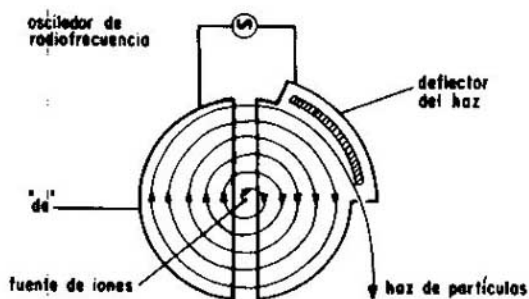
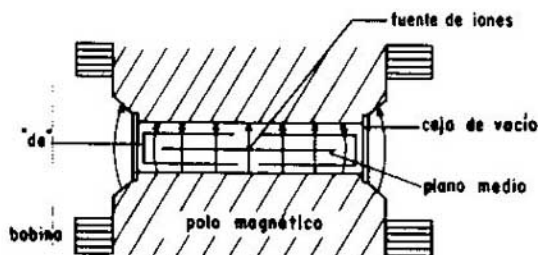


Fig. 22. Elementos principales de un ciclotrón.



30

El ciclotrón de Lawrence acelera por el mismo principio que el acelerador lineal de Wideroe. En vez de cavidades tubulares cada vez más largas, el ciclotrón tiene trayectorias de radio creciente dentro de las cavidades (las Des) debido a la trayectoria espiral.

Se requiere que el tiempo que la partícula pasa dentro de la cavidad sea el mismo que se requiere para que la "D" cambie su carga de negativa a positiva o sea la mitad del período, $T/2$. Debe demostrarse en este caso que el período T es independiente del radio, o sea que las partículas tardan el mismo tiempo en recorrer un semicírculo de pequeño radio (cuando tienen poca energía y velocidad) que uno de radio grande.

La trayectoria circular de una partícula cargada que se mueve normalmente a un campo magnético está dada por la ecuación [4], de la que se obtiene

$$v = \frac{qBr}{m}.$$

El tiempo de permanencia en la cavidad será

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi r}{v}.$$

Sustituyendo el valor de v de la ecuación anterior, se encuentra

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB}.$$

Se ve que este tiempo no depende del radio de la trayectoria, que es la principal característica del ciclotrón.

Después de unas cien revoluciones, las partículas llegan a la orilla del imán, y por medio de una placa deflectora que produce un campo electrostático, son desviadas hacia una línea de vacío que las conduce a la zona del laboratorio en que van a emplearse.

La frecuencia del oscilador está definida por la ecuación anterior

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}, \quad [10]$$

en donde f se mide en ciclos/seg o hercios, q en culombios, B en teslas y m , que se mide en kilogramos, es la masa relativista de la partícula. Esta es la ecuación fundamental del ciclotrón.

Al aumentar el radio, aumentan la velocidad y la energía de la partícula. De acuerdo con la ecuación [5] aumenta también un poco la masa relativista. La frecuencia no podrá ser constante a menos que el campo magnético B aumente un poco con el radio para compensar el aumento de la masa de la partícula. Desgraciadamente, para mantener las partículas enfocadas y evitar que se dispersen y choquen contra las paredes de las "Des", se necesita un campo magnético que disminuya con el radio, como se muestra en la figura 7b, para producir enfoque vertical. Esta dificultad limita en la práctica la energía máxima de estos aceleradores a unos 30 ó 40 MeV, y el número de revoluciones a algunos cientos, dependiendo de la carga y la masa de las partículas aceleradas.

La introducción de frecuencias, campos magnéticos o ambos, que varían con el tiempo para lograr la sincronización, condujo a la construcción de grandes aceleradores, que se verán posteriormente con el título de sincrotrones.

Como hemos dicho anteriormente, los grandes aceleradores se utilizan principalmente en la investigación de partículas elementales. En el estudio de la estructura nuclear son de gran utilidad aceleradores que confieran a las partículas energías de hasta 50 MeV, que tengan gran resolución en energía, y finalmente, que la energía de las partículas pueda variarse a voluntad.

Recientemente se han construido aceleradores con dichas características en los que se emplea un método de enfoque vertical, ideado por L. Thomas⁽¹⁸⁾ en 1938, llamado de enfoque por sectores. Esto se logra quitando material en dos o más sectores de los polos magnéticos del ciclotrón para producir sectores cuyo campo magnético es menor que el del resto, figura 23. Puede demostrarse que al pasar la partícula por las fronteras del sector, recibe un impulso capaz de producirle enfoque vertical, y como ya hemos visto, el campo magnético uniforme produce un enfoque horizontal, lo que hace que un haz de partículas se mantenga dentro de ciertas dimensiones y no se disperse.

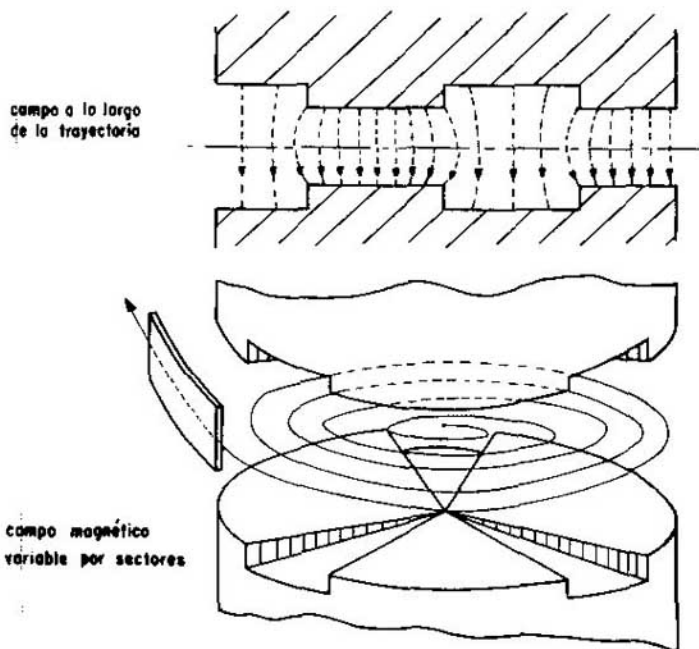


Fig. 23. Polos de un ciclotrón con enfoque vertical producido por campos magnéticos que varían de sector a sector.

La Tabla II proporciona algunas características del acelerador de enfoque por sectores de la Universidad de Michigan, que tiene características muy valiosas.

Tabla II

Acelerador de Enfoque por Sectores de la Universidad de Michigan

Energías	7-35 MeV (protones) 15-50 MeV (deuterones) 30-80 MeV (alfas)
Corriente externa analizada	1 mA
Estabilidad de la energía	0,012 %
Campo magnético en el máximo	1,6 tesla
Campo magnético en el mínimo	1,4 tesla
Radio máximo	0,84 m
Peso total	350 toneladas

SINCROCICLOTRÓN O CICLOTRÓN DE FRECUENCIA MODULADA

Otro paso adelante en el perfeccionamiento del ciclotrón consistió en variar ligeramente, y en forma periódica, la frecuencia del oscilador, para que las partículas que inicien su recorrido cuando la frecuencia disminuye estén sometidas a impulsos sincronizados, ya que así se compensa el aumento relativista de la masa de las partículas, y se satisface la ecuación fundamental del ciclotrón, (ecuación [10]). Una vez que la frecuencia ha llegado a su mínimo valor, que corresponde a la energía de salida o energía máxima de las partículas, se debe aumentar la frecuencia para iniciar un nuevo ciclo. Durante el aumento, la frecuencia no es útil para la aceleración, por lo que las partículas no salen en forma continua sino en pulsos.

En el sincrociclotrón de Buenos Aires, Argentina, la frecuencia de 10,6 megahercios se modula un 4% y produce 2 000 pulsos de partículas cada segundo.

En la actualidad hay unos 20 aceleradores de este tipo, pero ya no se fabrican por haber otros más ventajosos, como, por ejemplo, los ciclotrones de enfoque por sectores. Sin embargo, los sincrociclotrones representaron un paso importante en el desarrollo de los sincrotrones de electrones y de protones, que se describirán más adelante.

En la Tabla III se dan las características de algunos de estos aceleradores.

Tabla III

Características de Algunos Sincrociclotrones

Lugar	Radio del Polo (m)	Energía de Protones (MeV)	Peso del Imán (ton)
Dubna, (URSS)	3,00	680	7 200
Uppsala, (Suecia)	1,15	200	600
Buenos Aires, (Argentina)	0,90	28	196

BETATRÓN

La aceleración de partículas basada en la ley de inducción magnética de Faraday fue intentada por Wideroe desde 1928, pero no se consiguió sino hasta 1940, año en que Kerst diseñó correctamente el imán que permite enfocar los electrones tanto en el plano horizontal como en el vertical, y de esa forma produjo un haz de electrones con energía de 2,3 MeV.

Supongamos que va aumentando el campo magnético en el entrehierro de un electroimán, como el de un ciclotrón. De acuerdo con la ley de Faraday, se producirá a lo largo de cualquier anillo una fuerza electromotriz proporcional a la rapidez con que cambie el flujo magnético en el anillo:

$$V = \frac{d\Phi}{dt} = A \frac{dB_1}{dt}, \quad [11]$$

donde B_1 es el campo que produce el flujo en la espira. Las unidades son: V en voltios, A en m^2 , B_1 en teslas y t en segundos.

Consideremos un anillo circular en el plano medio del entrehierro, que representa la trayectoria del haz de partículas. En este caso

$$A = \pi r^2 \text{ (área del anillo)}$$

$$V = 2\pi r E \text{ (longitud del anillo } \times \text{ campo eléctrico).}$$

Substituyendo en [11]

$$E = \frac{r}{2} \frac{dB_1}{dt}.$$

La fuerza que actúa sobre una partícula cargada q que se mueva en el anillo será:

$$F = Eq = \frac{qr}{2} \frac{dB_1}{dt}. \quad [12]$$

Si se quiere que la partícula acelerada se mantenga en el anillo circular, se debe satisfacer la ecuación [4]

$$mv = qrB.$$

De acuerdo con la segunda ley de Newton, esta ecuación se transforma en

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = qr \frac{dB}{dt}. \quad [13]$$

Las ecuaciones [12] y [13] deben satisfacerse en todo momento durante el cambio en el tiempo del campo magnético de inducción (B_1) y del campo magnético en los puntos de la trayectoria de las partículas (B).

Una posible solución que satisface las ecuaciones [12] y [13] es la llamada condición del betatrón, de acuerdo con la cual, el campo magnético creciente (B) en los puntos de la trayectoria de la partícula acelerada, es en todo momento la mitad del campo magnético (B_1) que produce el flujo de inducción.

$$B = \frac{B_1}{2}. \quad [14]$$

Esto casi puede lograrse en el diseño que se muestra en la figura 24, en donde el campo en el centro es aproximadamente el doble del campo en los puntos de la trayectoria debido a que los polos se encuentran más próximos en el centro que en las orillas. Este diseño también produce enfocamiento tanto en el plano horizontal como en el vertical. Esto último es de vital importancia debido a que en este aparato las partículas debendar del orden de un millón de vueltas para adquirir la energía deseada, por lo que deben moverse en un círculo sin que el haz se disperse.

La cámara de aceleración tiene la forma de un toroide hueco en que se ha hecho un alto vacío. Cuando la partícula ha alcanzado la energía apropiada, se puede enviar una corriente de corta duración por una bobina auxiliar que haga que la trayectoria se contraiga para que el haz

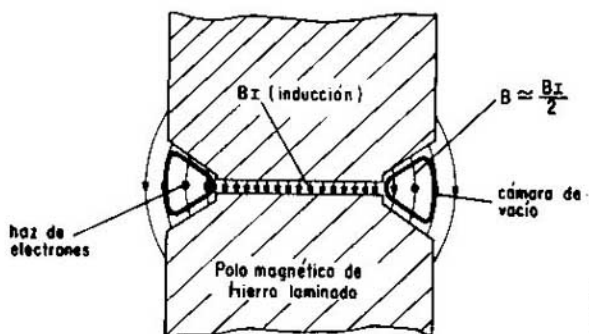
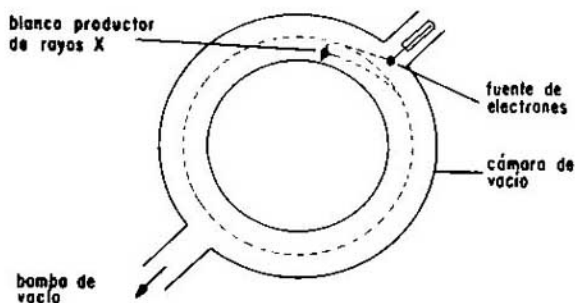


Fig. 24. Elementos principales de un betatrón.



incida en un blanco pesado del que saldrán rayos X de alta energía que pueden emplearse en investigaciones físicas, químicas o biomédicas.

Prácticamente los betatrones han cedido su primacía a los aceleradores lineales, porque en éstos el haz es externo y puede dirigirse con facilidad a diversos puntos del laboratorio, y porque es fácil controlar la energía de salida. Sin embargo, el betatrón fue de gran importancia histórica en el desarrollo de los grandes aceleradores de que hablaremos a continuación, pues su diseño permitió mantener un haz de partículas en una órbita circular durante millones de vueltas.

SINCROTRÓN DE ELECTRONES

Se ha visto cómo en el betatrón se puede mantener, sin dispersarse, un haz de electrones de energía cada vez mayor, por medio de un campo magnético creciente. Para acelerarlos se necesita un fuerte cambio del flujo magnético en la parte central del imán.

Un nuevo tipo de acelerador se obtuvo por medio de imanes que producen un campo creciente sólo en la región del toroide de sección pequeña en que se mueven las partículas, y la aceleración se produce en una o más cavidades de radiofrecuencia colocadas en el toroide mismo, figura 25. Aunque sea pequeña la energía ganada al pasar por una cavidad, de unos 1 500 eV, si pasa 200 000 veces por ella, las partículas obtendrán una energía de 300 MeV.

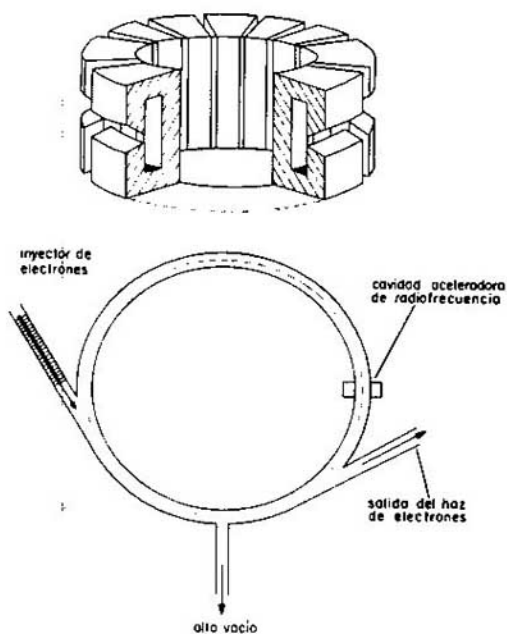


Fig. 25. Elementos principales de un sincrotrón de electrones.

Esto es posible gracias al principio de estabilidad de fase, descubierto por Veksler⁽¹⁶⁾ en 1944 en la URSS e independientemente por MacMillan,⁽¹⁶⁾ en Estados Unidos, poco tiempo después. Según este principio la aceleración puede obtenerse durante un número muy grande de ciclos sin que las partículas pierdan la sincronización, ya que la cavidad impulsa un poco más a las que llegan retrasadas y un poco menos a las que se han adelantado, manteniéndolas por lo tanto en sincronía y evitando que se salgan de fase.

Para lograr esta sincronización a frecuencia constante, si se quiere que las partículas recorran trayectorias prácticamente circulares y de radio constante, es necesario que su velocidad se mantenga casi constante, y esto se logra si tienen una velocidad inicial muy próxima a la velocidad de la luz en el vacío. Para lograr esto, en algunos aceleradores los electrones se aceleran inicialmente por el principio del betatrón y posteriormente con la cavidad electromagnética; en otros se emplea un inyector, que puede ser un acelerador lineal o de cualquier otro tipo.

Una vez que los electrones adquieren la energía necesaria, son desviados hacia una salida que los conduce a la zona del laboratorio en donde serán empleados.

Una limitación de estos aceleradores radica en la pérdida de energía por radiación debida a la aceleración centrípeta a que las partícula-

las son sometidas por describir una trayectoria circular (los aceleradores lineales no tienen esta limitación).

La pérdida de energía por vuelta está dada por la ecuación

$$\Delta T = \frac{88500 E^4}{r} \text{ (eV/vuelta),} \quad [15]$$

en donde E representa la energía del electrón en GeV (1 GeV = 1 000 MeV) y r el radio en metros.

Los sincrotrones de electrones han llegado a producir electrones con energías de 6 GeV. Los más grandes son el Acelerador de Cambridge, operado conjuntamente por MIT y Harvard, el Acelerador de Erevan, Armenia, URSS, y el Acelerador DESY de Hamburgo (Deutsches Elektronen Synchrotron). Todos estos grandes aceleradores emplean además el principio de enfoque intenso del que se hablará más adelante.

En el acelerador de Cambridge de 6 GeV, el radio de la órbita es de 36 metros, y tiene 16 cavidades aceleradoras de radiofrecuencia; el inyector es un acelerador lineal de 25 MeV.

Empleando la fórmula, se encuentra que la pérdida de energía por vuelta es, al final del ciclo, de 3,2 MeV/vuelta, por lo que cada una de las 16 cavidades debe proporcionar a los electrones, al final del ciclo, 200 000 eV, sólo para compensar las pérdidas por radiación.

37

Debido a que estas enormes pérdidas aumentan en función de la cuarta potencia de la energía y sólo disminuyen proporcionalmente al radio de órbita, es difícil concebir aceleradores circulares de electrones con energías muy superiores a las del Acelerador de Cambridge.

MICROTRÓN

El microtrón es un acelerador de electrones ideado por Veksler⁽¹⁶⁾ que emplea un campo magnético constante y una cavidad electromagnética aceleradora. Se emplea para acelerar en la región relativista a electrones que se mueven prácticamente a velocidad constante.

Cada vez que el electrón pasa por la cavidad adquiere un incremento fijo de energía, o lo que es lo mismo, un incremento fijo de masa relativista, puesto que la velocidad es constante (prácticamente la de la luz); también será fijo el cambio de la cantidad de movimiento $m\mathbf{v}$.

Debido a la ecuación [4],

$$m\mathbf{v} = qB\mathbf{r},$$

y puesto que B es constante, la cantidad de movimiento es proporcional a r, por lo que el incremento del recorrido $2\pi r$ será constante y, lo que es más importante, también será constante el incremento del tiempo Δt empleado en recorridos sucesivos.

Si se hace que este incremento de tiempo Δt sea igual al período de oscilación de la cavidad aceleradora (o a un múltiplo del período), los electrones llegarán a la cavidad con uno o más períodos de retraso, pero en fase, y podrá operar el principio de estabilidad de fase que corregirá pequeñas discrepancias.

En la figura 26 puede verse un esquema de este aparato, que se emplea para acelerar electrones a varias decenas de MeV. Por su geometría es muy fácil extraer el haz para enviarlo a cualquier lugar del laboratorio, o bien para emplearlo como inyector de electrones de otro acelerador mayor. Esta es una ventaja importante respecto al acelerador betatrón.

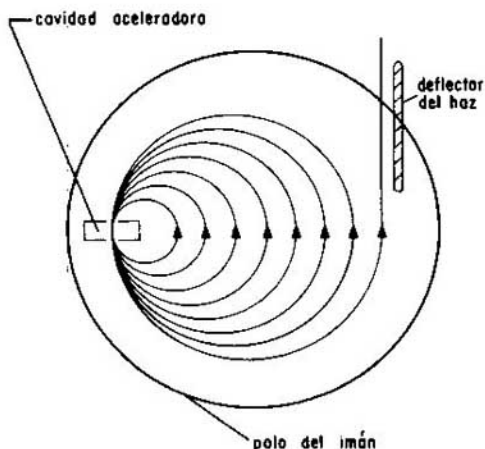


Fig. 26. Esquema de la trayectoria de los electrones en un microtrón.

SINCROTRÓN DE PROTONES

Fundamentalmente este acelerador es similar al sincrotrón de electrones; la diferencia radica en que la masa del protón es unas 2 000 veces mayor que la del electrón. Si en un sincrotrón de electrones se introducen éstos con una energía cinética de 2 MeV inicialmente tendrán una velocidad $v = 0,98 c$, por lo que ésta será prácticamente constante durante la aceleración. En cambio, si en un sincrotrón de protones, se introducen éstos con una energía cinética 20 MeV, por ejemplo, su velocidad será de sólo $v = 0,2 c$, por lo que su valor deberá aumentar muchas veces antes de aproximarse a la velocidad de la luz. Para que los protones puedan adquirir la velocidad $v = 0,98 c$ y considerarse ésta prácticamente constante, deberán tener una energía cinética de 4 GeV.

Exceptuando algunos enormes aceleradores en construcción o en proyecto, que contarán con fuentes de protones con energías de ese orden, y de los que se hablará más adelante, en los actuales la velocidad de los protones aumenta en forma importante durante la aceleración, por lo que la frecuencia de revolución aumenta (número de vueltas

en cada segundo) conforme la partícula adquiere más velocidad. Para compensar esto habrá que aumentar también paulatinamente la frecuencia de oscilación de las cavidades a fin de que los protones lleguen en fase a las regiones aceleradoras; esto introduce complicaciones muy grandes en estos aceleradores, sobre todo porque el campo magnético también debe ir en aumento en forma apropiada.

El hecho de que la masa del protón sea mucho mayor que la del electrón, hace que, para la misma energía, la pérdida por radiación de los protones sea mucho menor que la de los electrones. Esto ha permitido la construcción de aceleradores de protones con energías de centenares de GeV en contraste con los 6 GeV de los aceleradores de electrones.

Si bien el primer sincrotrón que operó fue el Cosmotrón de Brookhaven, en 1952, Oliphant⁽¹⁷⁾ propuso la construcción de uno en 1943. Después de la guerra se inició su construcción y se terminó en 1953.

Estos aceleradores fueron creciendo en energía, tamaño y sobre todo peso, llegando a ser verdaderos colosos de 10 000 y 35 000 toneladas, como puede verse en la Tabla IV. El defecto principal de estos aceleradores radica en el gran tamaño de la sección del toroide, al vacío, por el que circula el haz de partículas (hasta 150 x 40 cm). Esto obligó el empleo de imanes enormes con haces de gran tamaño, lo que es un inconveniente.

En general estos sincrotrones de protones están formados por cuatro imanes de 90°, (Fig. 27), separados por secciones rectas en donde se colocan las cavidades aceleradoras de radiofrecuencia, la entrada del haz proveniente de un Van de Graaff o de un acelerador lineal (linac), y la salida del haz de protones de alta energía, dirigida al laboratorio de experimentación.

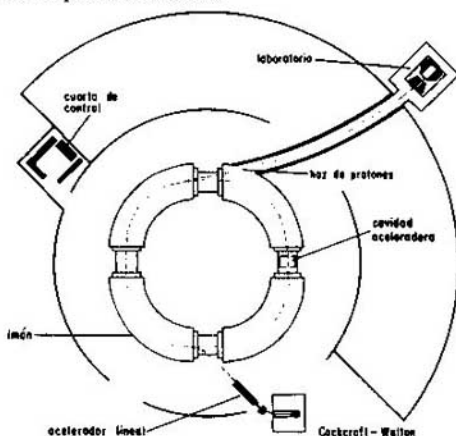


Fig. 27. Esquema de un sincrotrón de protones con cuatro sectores magnéticos de 90° cada uno.

Tabla IV

Sincrotrones de Protones Convencionales

Lugar	Brookhaven EE. UU.	Birmingham Inglaterra	Berkeley EE. UU.	Dubna URSS	Saclay Francia	Princeton EE. UU.	Harwell Inglaterra	Argonne EE. UU.			
Nombre	Cosmotrón						Bevatrón Sincro- fasotrón	Saturno	P. P. A.	Nimrod	ZGS
Fecha de operación	1952	1953	1954	1957	1958	1964	1964	1964	1964	1964	1964
Energía máxima GeV	3	1	6,4	10	3	3	3	7	12,5	27	8
Radio de la órbita (m)	10	4,5	15	30	11	12	24	27	27	27	8
Número de sectores magnéticos	4	1	4	4	4	16	8	8	8	8	8
Campo magnético máximo en teslas (1 tesla = 10 000 gauss)	1,4	1,3	1,5	1,3	1,5	1,4	1,4	1,4	2,1	2,1	2,1
Cámara de vacío	91	50	122	150	60	18	91	81	22	21	22
Ancho (cm)	22	21	30	40	10	7	24	15	12	10	7
Pulsos por minuto	12	6	10	5	19	140	28	15	3,5	0,5	10
Energía del inyector (MeV)	1	1	1	2	1	4	1	2	1	1	1
Número de regiones aceleradoras	1	1	1	2	1	4	1	1	1	1	1
Peso del hierro (ton)	1 600	800	10 000	35 000	1 100	350	7 000	4 000	1 600	800	10 000

Para reducir las corrientes eléctricas parásitas debidas al cambio del campo magnético en el hierro, cada uno de los imanes de 90° consta de numerosos imanes menores (Fig. 28) formados por placas de hierro (lo mismo que se hace en los transformadores eléctricos).

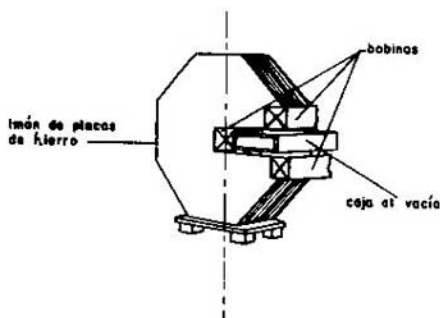


Fig. 28. Esquema de uno de los imanes individuales con los que se forman los sectores del sincrotrón de protones.

En la figura 29 puede verse una fotografía de uno de estos aceleradores.

Con el desarrollo de la óptica de iones, impulsada notablemente durante la década de 1950-1960 y de la cual Thomas⁽¹⁸⁾ fue un pionero desde 1938, al demostrar que se podía obtener enfoque vertical haciendo que la partícula pasara por sectores que tuvieron diferentes campos magnéticos, (Fig. 23), se encontró que el campo disperso entre los sectores produce el enfoque vertical si se diseña apropiadamente, y el campo magnético uniforme produce el enfoque horizontal.

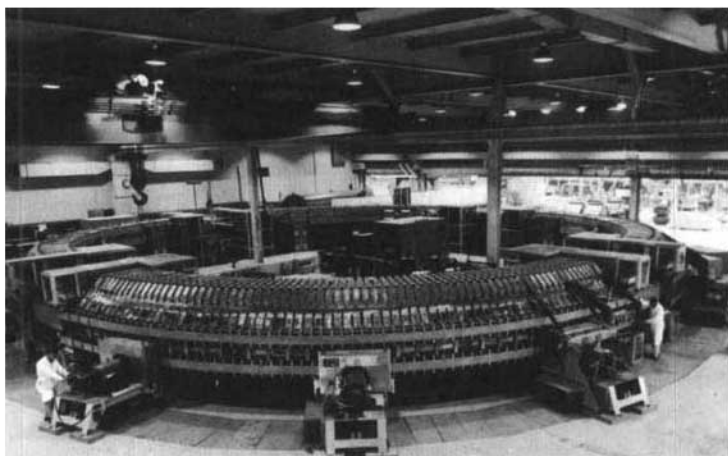
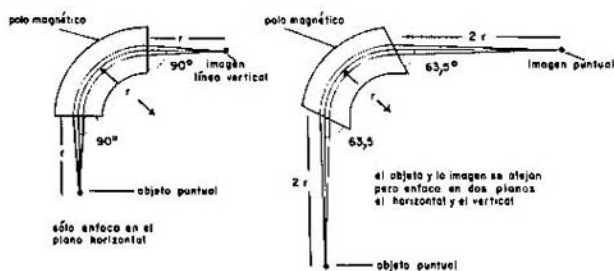


Fig. 29. Cosmotrón del Laboratorio Nacional de Brookhaven.

En los sincrotrones de protones convencionales en operación a partir de 1962 se empleó esta idea. Se aumentó el número de sectores y así también el número de campos dispersos al pasar el haz del campo del sector a regiones rectas donde no hay campo. Diseñando apropiadamente el ángulo que forma el haz con el borde del imán (frontera entre región con campo y región sin campo) se puede producir en el aparato un enfoque tanto horizontal como vertical, (Fig. 30), lográndose un haz de sección reducida que permite emplear una cámara al vacío de sección pequeña; además, como el campo es uniforme, los imanes pueden trabajar a campos altos. Esto reduce notablemente el tamaño del acelerador y, por lo tanto, su costo, y permite producir haces más intensos de partículas.



42

Fig. 30. Propiedades de enfoque vertical y horizontal de un imán con campo magnético uniforme si las partículas no entran normalmente a la frontera del campo.

En la figura 31 se muestra un esquema del acelerador de Argonne ZGS (Zero Gradient Synchrotron).

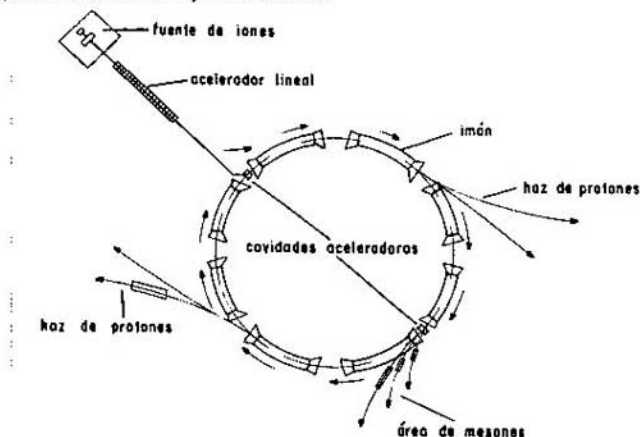


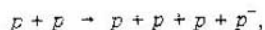
Fig. 31. Sincrotrones de protones con enfoque vertical producido por la frontera inclinada a la entrada y salida de las partículas en los campos magnéticos.

La importancia de estos aceleradores se debe a que, por primera vez, se dispuso de haces de protones cuyas partículas tenían bastante más energía cinética que energía en reposo. En la Tabla IV se dan las características principales de los sincrotrones de protones convencionales.

Hace varias décadas el estudio de las partículas de alta energía era un campo exclusivo de la radiación cósmica; así se encontraron diversas partículas con masa entre la del electrón y la del protón, llamadas mesones, y otras más pesadas que el protón, llamadas bariones.

Gracias a estos aceleradores fue posible estudiar los procesos de desintegración de estas partículas bajo condiciones controladas, con haces dirigidos y enfocados, millones de veces más intensos que los de radiación cósmica, si bien en ésta hay partículas con energías muchísimo mayores que las producidas con aceleradores hasta la fecha.

Por ejemplo, con el sincrotrón de protones de la Universidad de California (el Bevatrón) al lanzar protones (p) de más de 4,3 GeV contra los protones de la materia, se produjeron antiprotones (\bar{p}) de acuerdo con la reacción



es decir, además de los dos protones originales, se crea un par protón-antiprotón. De la energía de 4,3 GeV, se invierten aproximadamente 2 GeV en la energía en reposo del protón y antiprotón así creados, y el sobrante (2,3 GeV) se emplea en proporcionar a las cuatro partículas la energía necesaria para que se conserve la cantidad de movimiento del sistema.

SINCROTRONES DE ENFOQUE INTENSO

En 1950 el griego Christofilos⁽¹⁹⁾ patentó en Estados Unidos un nuevo método llamado de enfoque intenso; este mismo método fue descubierto posterior e independientemente por Courant, Livingston y Snyder,⁽²⁰⁾ quienes lo perfeccionaron y aplicaron.

En el primer capítulo, (Fig. 7), se vio que un campo magnético que disminuye al alejarse del centro de la trayectoria, produce un enfoque en el plano vertical y un desenfoque en el plano horizontal.

La figura 8 ilustra cómo un campo que aumenta al alejarse del centro de la órbita produce, al contrario, un desenfoque en el plano vertical y un enfoque en el plano horizontal.

La idea de Christofilos⁽¹⁹⁾ consistió en considerar al acelerador formado por un gran número de imanes en los cuales alternadamente el campo aumenta hacia el centro de la órbita en uno de ellos y disminuye hacia el centro en el siguiente, figura 32. En esta forma, las partículas están sometidas a fuerzas alternas de enfoque y desenfoque tanto en el plano vertical como en el horizontal.

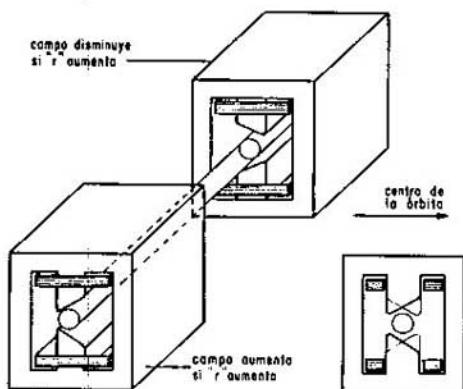


Fig. 32. Manera de obtener el enfoque intenso por medio de un gradiente alterno del campo.

Puede demostrarse que, en esta forma, se mantiene al haz sin dispersarse y su sección es pequeña. El problema es similar al de mantener un haz luminoso sin dispersarse y conservando una sección pequeña, empleando alternativamente lentes convergentes y divergentes. Una lente desvía más las partículas (luminosas o cargadas, según el caso) que pasan lejos del centro de la lente, que a las que pasan cerca de él. En la figura 33 puede verse que, en promedio, las partículas pasan más lejos del centro en las lentes positivas que en las lentes negativas, lo que produce un enfoque del haz.

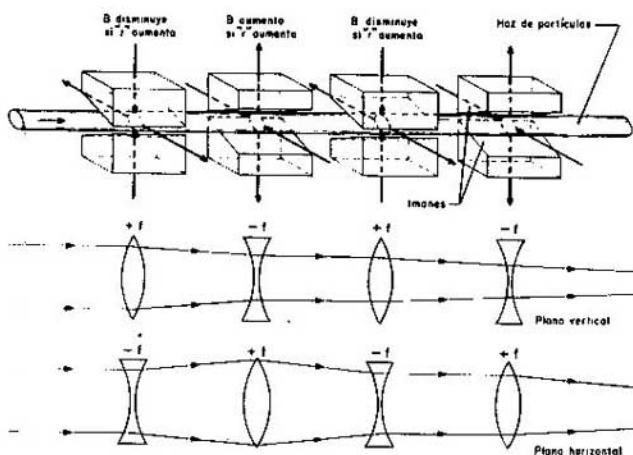


Fig. 33. Analogía del enfoque intenso con un caso óptico.

Gracias a este principio de enfoque intenso, se pudo reducir en forma notable la sección del haz y hacer que éste siga casi la misma trayectoria durante la aceleración, lo que a su vez permitió reducir la cámara de vacío que lo contiene.

El resultado fue la construcción de aceleradores muy esbeltos y ligeros, y por lo tanto una reducción notable del costo por GeV de energía de las partículas.

El primer acelerador de protones de enfoque intenso o gradiente alterno, fue el de 28 GeV del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), en Ginebra (Fig. 34).

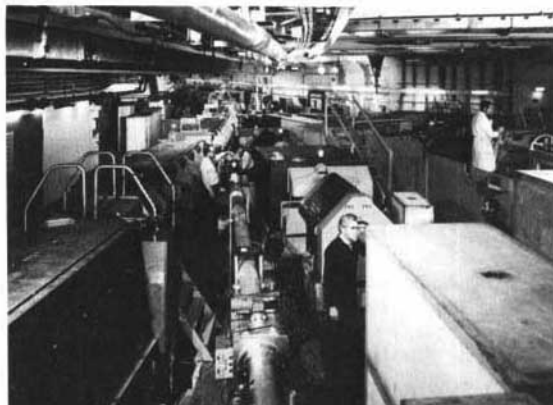


Fig. 34. Vista parcial del anillo formado por imanes de enfoque intenso del sincrotrón del CERN. Se ven además salidas de los haces de partículas que provienen de un blanco interno. (Foto CERN).

La cámara de vacío tiene una sección de forma elíptica cuyas dimensiones son de $7 \times 14,5$ cm en contraste con los 40×150 cm del acelerador de 10 GeV de Dubna, URSS, que durante varios años fue el más potente del mundo y cuya construcción es de fecha anterior al descubrimiento del enfoque intenso. En la Tabla V se comparan algunas características de estos dos aceleradores, y puede verse que, gracias al nuevo principio, con un décimo del peso, puede obtenerse una energía casi triple.

Tabla V

Características de Dos Sincrotrones de Protones

	Dubna URSS Convencional	CERN Ginebra Enfoque Intenso
Máxima energía	10 GeV	28 GeV
Radio de la órbita	30 m	100 m
Energía de inyección	9 MeV	50 MeV
Inyector	Acelerador lineal	Acelerador lineal
Pulsos por segundo	5	2,4
Cavidades aceleradoras	2	16
Peso total del imán (ton)	35 000	3 300

Los sincrotrones de protones, de enfoque intenso, son máquinas gigantes que representan la culminación de 40 años de trabajo en el campo de los aceleradores de partículas.

La Tabla VI es una lista de los aceleradores de este tipo en operación en 1970.

Tabla VI

Sincrotrones de Protones de Enfoque Intenso

Lugar	Energía Máxima	Fecha de Operación
CERN		
Ginebra, Suiza	28 GeV	1959
Brookhaven, EE. UU.	33 GeV	1960
Moscú, URSS	7 GeV	1961
Serpújov, URSS	70 GeV	1967

DESARROLLOS RECIENTES

Es de esperarse que se produzcan próximamente grandes mejoras en los aceleradores de baja y mediana energía.

CICLOTRONES DE CAMPO FIJO Y GRADIENTE ALTERNO (FFAG)

La teoría de Thomas sobre el ciclotrón con campo magnético por sectores (Fig. 23) se ha difundido en grado notable gracias al desarrollo de la óptica de iones. En vez de sectores rectos, se han propuesto sectores curvos que producen un enfoque más intenso. La figura 35 muestra un caso interesante. Nótese que la trayectoria está formada por arcos de círculos de distinto radio debido a que el campo magnético es mayor en las crestas que en los valles, produciendo esa trayectoria en forma de pera.

La ventaja de estos ciclotrones, designados por la sigla FFAG (fixed-field alternating-gradient), consiste en que permiten alcanzar energías mucho mayores que con los ciclotrones convencionales, y el haz es continuo e intenso. Otras ventajas técnicas son que el campo y la frecuencia son fijas y que el voltaje aplicado no es muy grande. Además, es posible cambiar la energía de las partículas del haz.

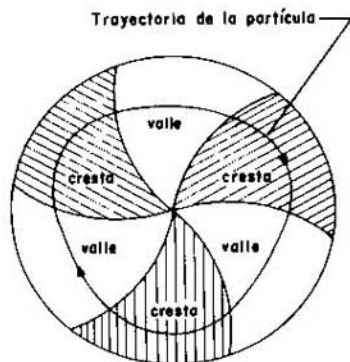


Fig. 35. El esquema muestra el polo dividido en sectores de un ciclotrón FFAG (fixed-field alternating-gradient) así como la órbita de una partícula.

CICLOTRÓN DE ÓRBITAS SEPARADAS (SOC)

Los ciclotrones de órbitas separadas (SOC), pueden considerarse un caso particular de los ciclotrones FFAG. Parece que con estos aceleradores se obtendrán partículas con energías intermedias, aunque con corrientes muy altas.

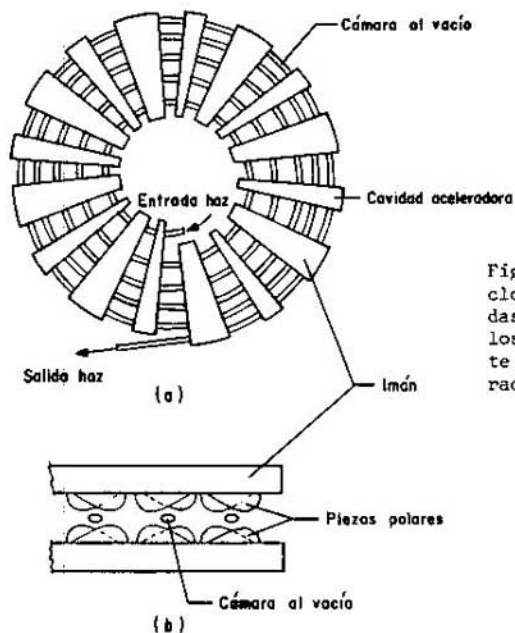


Fig. 36. Esquema de un ciclotrón de órbitas separadas (SOC) donde se muestran los imanes de enfoque fuerte y las cavidades aceleradoras de radiofrecuencia.

Empleando campos de enfoque fuerte (Fig. 36) se pueden acelerar partículas que se mueven dentro del tubo espiral, por medio de cavidades de resonancia colocadas entre los polos. Es decir, en este acelerador se combinan las ideas del ciclotrón, del acelerador lineal y del de enfoque fuerte.

Se predice que aparatos de este tipo acelerarán protones hasta de 1 GeV con corrientes de 75 miliamperios.

ANILLOS DE ACUMULACIÓN

Una manera de producir efectos que sólo podrían obtenerse con enormes aceleradores, consiste en hacer que choquen dos haces de partículas que se muevan en sentidos opuestos.

Si los haces de dos aceleradores entraran en colisión, nada se observaría porque las corrientes son muy bajas. Para obtener resultados, es necesario acumular la corriente del acelerador en dos anillos, como se muestra en la figura 37. Los dos anillos pueden ocupar áreas diferentes o bien encontrarse prácticamente superpuestos; en éste último caso, si se diseñan las órbitas de tal modo que no sean completamente circulares, se podrán obtener más de dos zonas de colisión.

Muy pronto se empleará el sincrotrón del CERN de 28 GeV como inyector de 2 anillos localizados en la misma área con 8 zonas de colisión y una energía equivalente a 1 800 GeV del haz contra un blanco fijo.

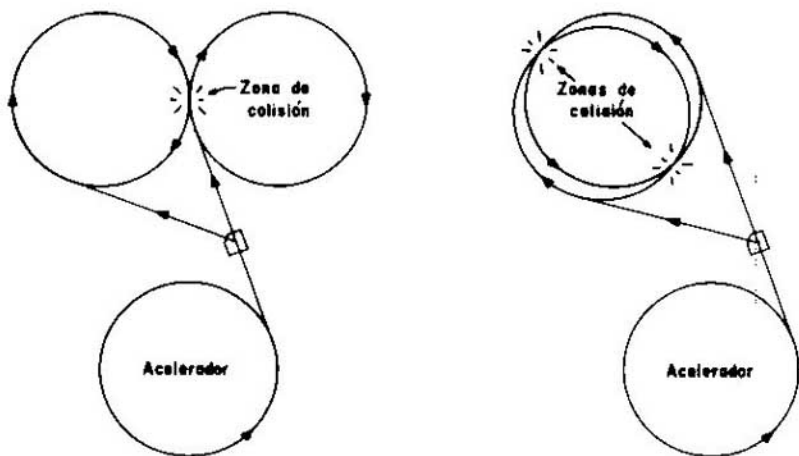


Fig. 37. Esquema de dos diseños de anillos de acumulación de partículas.

Su manera de operar puede ser la siguiente: durante varios minutos se acumularían partículas en el primer anillo, hasta producir una corriente del orden de 1 amperio; después se enviaría el haz para acumular las partículas en el segundo anillo. Los haces permanecerían en los anillos por períodos de varias horas produciendo las colisiones deseadas.

Los anillos deberán tener imanes de enfoque intenso similares a los del acelerador, pero el campo magnético deberá ser constante, en vez de creciente como en el acelerador. Debido al largo tiempo que las partículas permanecen en el anillo, es necesario contar en la cámara del haz con un vacío muy alto (10^{-9} mm de Hg), unas mil veces superior al vacío del acelerador (10^{-8} mm de Hg).

A pesar de la acumulación de partículas, el número de colisiones producidas es pequeño comparado con el que produciría un acelerador contra un blanco fijo, pero, en cambio, la ventaja es muy grande en relación con la energía de colisión.

Supóngase que dos haces de protones de 20 GeV (1 GeV = 1 000 MeV) cada uno entran en colisión. De acuerdo con la figura 9 o la fórmula [8], las partículas se moverían con una velocidad $\frac{v}{c} = 0,999$ cada una, medida en el laboratorio. Si estuviéramos viajando en una de ellas ¿con qué velocidad veríamos que nos acercábamos a la otra? De acuerdo con la física clásica, la velocidad de acercamiento debería ser el doble de la velocidad de la partícula o sea $\frac{v}{c} = 1,998$. (Si dos coches se acercan y cada uno se mueve a 100 km/h, desde cualquiera de los coches se ve acercarse al otro a 200 km/h.)

Pero $\frac{v}{c} = 1,998$ significa que desde una de las partículas se ve a la otra moverse con una velocidad mayor que la de la luz, lo que contradice uno de los principios básicos de la teoría de la relatividad, según la cual ningún observador puede ver moverse una partícula con una velocidad mayor que $\frac{v}{c} = 1$.

Según la teoría de relatividad si dos partículas se mueven acercándose con velocidades v_1 y v_2 respectivamente, la velocidad relativa V_a con que desde una partícula se ve acercarse a la otra, está dada por

$$V_a = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

$$\text{si } \frac{v_1}{c} = \frac{v_2}{c} = 0,999, \quad \frac{V_a}{c} = 0,9999995.$$

Vemos que de acuerdo con esta fórmula la velocidad relativa es casi igual a la velocidad de la luz, pero menor que ella.

La figura 9 no llega a estos valores de la velocidad, pero la fórmula [8], nos dice que a esta velocidad corresponde una energía de la partícula de unos 940 GeV, o sea que con un acelerador de 20 GeV y dos anillos de acumulación, se puede obtener una energía de colisión de 940 GeV, mayor energía que la de cualquier acelerador actual o en construcción.

Cuando se quiere que entren en colisión una partícula cargada y su antipartícula, por ejemplo electrones (-) y positrones (+), o bien protones (+) y antiprotones (-), basta un solo anillo que por la diferencia de signo, de acuerdo con la fórmula [3] y figura 2, deben moverse en sentidos contrarios para estar sometidos a la misma fuerza centrípeta.

EL ACELERADOR DE BATAVIA

En 1960 un grupo de investigadores, bajo la dirección del profesor Sands de California, propuso un proyecto de acelerador de protones que emplearía primero un acelerador lineal de 50 MeV como inyector de un sincrotrón de enfoque intenso de 10 GeV, y éste se emplearía a su vez como inyector de otro sincrotrón de 1 300 m de radio para producir protones de 300 GeV.

Un acelerador muy parecido al del proyecto anterior está siendo construido en Batavia, Estados Unidos, bajo la dirección de R. R. Wilson, y se espera que entre en operación en 1971.

Este acelerador de protones consiste de un Cockcroft-Walton de 750 keV que alimenta a un acelerador lineal de 200 MeV. El siguiente paso consiste en un sincrotrón de enfoque intenso de 8 GeV que sirve de inyector a otro sincrotrón de enfoque intenso de 500 GeV a baja corriente o 200 GeV a corriente normal, cuyo radio es de 1 000 m.

El sincrotrón de 8 GeV, que se emplea como inyector del acelerador principal, es similar al del CERN y al de Brookhaven, y consiste de 96 imanes; en la mitad de ellos el campo aumenta con el radio y en los otros disminuye, y se encuentran colocados alternadamente.

Este acelerador recibirá los protones de 200 MeV con una velocidad $\frac{v}{c} = 0,55$ y los pasará al acelerador principal con $\frac{v}{c} = 0,994$, por lo que

la frecuencia de las cavidades aceleradoras debe cambiar en forma importante de 30 a 54 Mhercios. Como el sincrotrón de 500 GeV recibirá a los protones casi con la velocidad de la luz, sólo será necesario modular a la frecuencia de las cavidades (54 Mhercios) en 0,5%.

En el acelerador principal, las partículas serán aceleradas en 16 cavidades de radiofrecuencia, y ganarán en total 4 MeV en cada vuelta, por lo que sólo durante el período de aceleración deberán dar unas 125 000 vueltas al anillo y recorrer una distancia equivalente a la de ida y vuelta a la luna.

En el sincrotrón principal el enfoque intenso se logra por medio de cuadrupolos magnéticos, como el que se muestra en la figura 38.

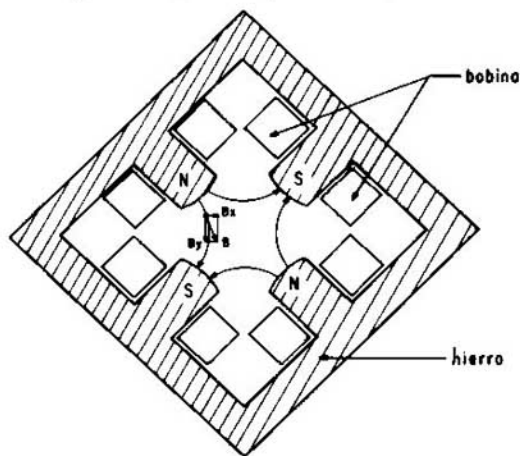


Fig. 38. Cuadrupolo magnético para producir enfoque intenso.

De acuerdo con la ecuación [3] y la figura 2, para un haz de partículas positivas que entre normalmente al plano del papel, se producirá un enfoque en el plano vertical y un desenfoque en el horizontal. Si cambiamos el sentido de la corriente en las bobinas del imán, se cambiará el sentido del campo magnético y se tendrá un imán que desenfoca en el plano vertical y enfoca en el horizontal.

Debido a que estos imanes no desvían al haz para obligarlo a describir una trayectoria circular, es necesario emplear además imanes deflectores de campo uniforme.

El acelerador está dividido en 96 secciones cada una de las cuales consta de un cuadrupolo con enfoque en el plano horizontal, cuatro imanes deflectores de campo uniforme, un cuadrupolo con enfoque en el plano vertical y cuatro imanes deflectores de campo uniforme.

Cada uno de los imanes deflectores mide 6 m y pesa sólo 10 toneladas. Los cuadrupolos miden 2, 10 m y a continuación de ellos se encuentra una sección recta también de 2, 10 m en la que se colocan pequeños imanes correctores y dispositivos sensitivos para controlar el haz.

El diseño del acelerador permite el empleo de cámaras de vacío de sección pequeña, que varía de acuerdo con las necesidades entre $3,7 \times 12$ cm y 5×10 cm; los resultados son el empleo de imanes muy ligeros, esbeltos y económicos. El peso total de los imanes del acelerador es de 10 000 toneladas, considerablemente inferior al de otros aceleradores de energía mucho menor.

En la figura 39 se puede ver un esquema del acelerador, y en la figura 40 fotografías de las diferentes etapas de aceleración.

Estos gigantescos aceleradores requieren un sistema de computadoras para controlar los numerosos detectores que permitan la buena marcha del instrumento. Se requiere un gran número de científicos que dirijan las investigaciones y de técnicos que lo mantengan en funcionamiento satisfactoriamente, aunque en principio una sola persona podría operarlo desde los controles.

Las zonas de experimentación contienen detectores enormes, de centelleo, Cherenkov y cámaras de burbuja de hidrógeno líquido con campos magnéticos, en donde las partículas dejan la traza de su paso en forma de pequeñas burbujas. Las trayectorias son reconstruidas en tres dimensiones con ayuda de una computadora que trabaja sobre fotografías de las trazas tomadas desde diferentes posiciones.

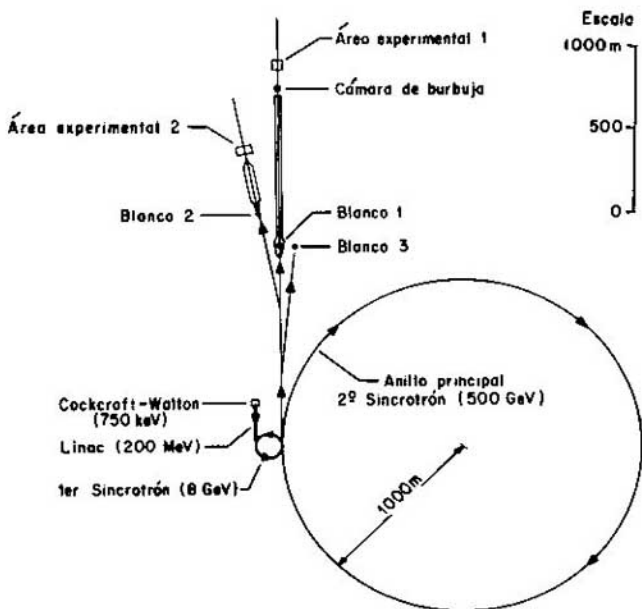


Fig. 39. Esquema del acelerador de Batavia EE.UU. (National Accelerator Laboratory) que muestra las partes principales que lo integran.

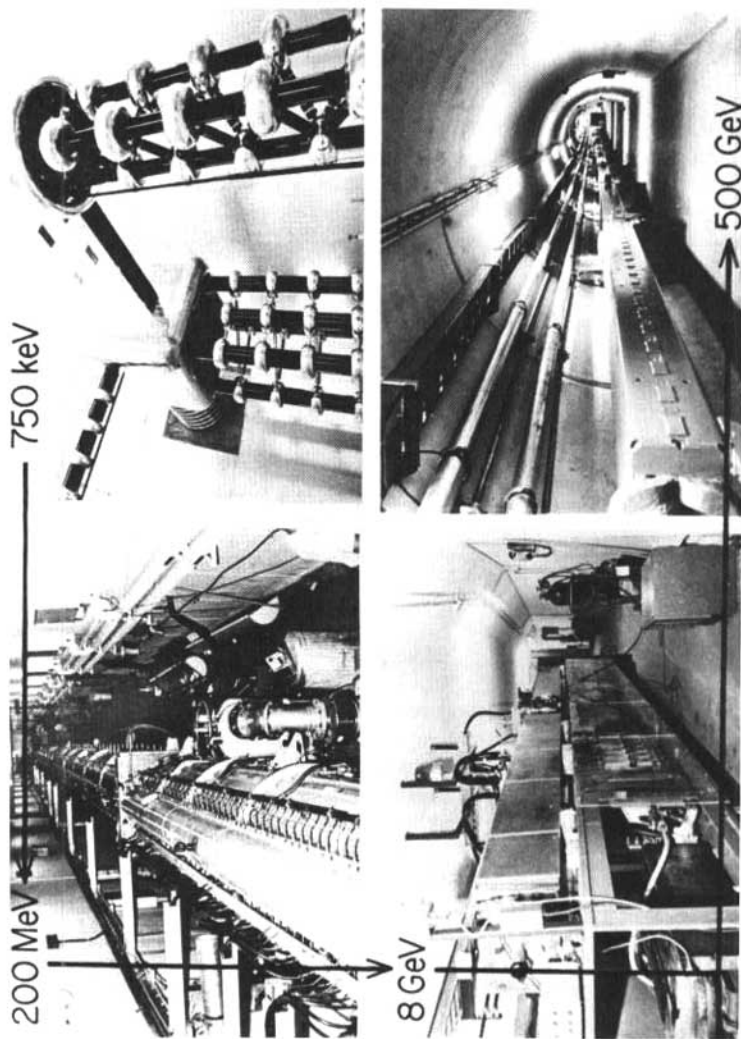


Fig. 40. Fotografías de las diferentes etapas de aceleración del acelerador de Batavia, EE. UU.

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

CONSIDERACIONES FINALES

Han pasado 40 años desde que Cockcroft⁽²¹⁾ inventó el primer acelerador de protones de 300 000 voltios. En este lapso de tiempo la energía alcanzada por los aceleradores ha aumentado un millón de veces a razón bastante regular de 10 veces cada 6 ó 7 años, ó 1 000 veces cada 20.

Es posible imaginar un acelerador como el de Batavia que sirva de inyector a otro de 5 000 GeV y de 20 km de diámetro. Es claro que dadas las pérdidas por radiación, su costo enorme, la energía eléctrica que necesitaría y el espacio que ocuparía, sería casi imposible construir uno de 50 000 GeV.

Más real es el proyecto de un acelerador de 1 000 GeV, llamado Cibernético, presentado por la URSS en la reunión sobre aceleradores celebrada en Moscú en 1968.

Se ha hablado de emplear bajas temperaturas para producir campos magnéticos por superconductividad, eliminando el hierro y reduciendo el tamaño de los aceleradores. Con la tecnología actual esto no es posible por razones económicas.

El empleo de superconductores ha tenido éxito en campos estáticos, pero en campos rápidamente variables, como se necesitan en los sincrotrones de protones, se producen pérdidas importantes, por lo que se necesitan refrigeradores más costosos y potentes; sin embargo se espera que en algunos años se resuelva este problema.

En el CERN se ha planeado construir un sincrotrón de protones de 150 GeV empleando como inyector el sincrotrón existente de 28 GeV, y posteriormente, duplicando los imanes, llegar a 300 GeV. Si para ese tiempo los imanes superconductores de baja temperatura se perfeccionan satisfactoriamente, se podrá llegar a energías de 500 GeV empleando la mitad de imanes de superconductores, o bien a 800 GeV, empleando todos los imanes de superconductores.

Se ha hablado de aceleración por impacto coherente por medio de plasmas para que las partículas adquieran grandes energías en muy cortas distancias, pero hay poca esperanza de lograrlo.

Todo parece indicar que los aceleradores se están aproximando a un límite de energía difícil de superar y que la regla del aumento de la energía con el tiempo, no será válida en el futuro.

CONCLUSIONES

Se ha visto que en los países en curso de desarrollo, como Argentina, Brasil y México, existen instalaciones valiosas para el estudio de la estructura nuclear; para estos estudios se necesitan aceleradores cuya energía alcance unas decenas de MeV.

Para producir mesones y bariones se emplean aceleradores de centenares de MeV a algunos GeV. Al lanzar las partículas aceleradas contra la materia, éstas interaccionan, no con los núcleos propiamente, sino con algunos de los protones o neutrones que forman dichos núcleos.

Por su alto costo, estos aceleradores sólo se encuentran en algunos países desarrollados como Francia, Italia, Alemania e Inglaterra.

Aceleradores capaces de acelerar partículas a energías de decenas de GeV sólo existen en Estados Unidos, la URSS y en un consorcio de países europeos con sede en Ginebra, Suiza, el CERN.

El acelerador de Batavia cuesta centenares de millones de dólares y es factible que algunos aceleradores del futuro lleguen a costar más de 1 000 millones de dólares.

Este campo se ha desarrollado rápidamente por la competencia que, por razones de prestigio, ha existido entre los dos países más ricos. Debido al costo enorme y creciente de estas investigaciones, hay el peligro de descuidar otros campos, que también son de gran importancia.

En razón de su alto costo y por ser un campo de investigación fundamental en el que no se prevén aplicaciones importantes a corto plazo, es factible y deseable ampliar la cooperación internacional ya existente.

CONSIDERACIONES RELATIVAS AL PERÍODO 1971-1981

En los años transcurridos desde la publicación de esta monografía se han producido muy pocos cambios de importancia en los conceptos fundamentales relacionados con los aceleradores de partículas.

Los multiplicadores de voltaje Dynamitron que aceleran electrones producen en la actualidad haces de gran intensidad que llegan a tener una potencia de 150 kW con corrientes superiores a los 30 mA.

El único cambio verdaderamente notable que ha tenido lugar durante este período ha consistido en desarrollar la tecnología para producir campos magnéticos más intensos por medio de superconductores; actualmente se pueden construir electroimanes con un campo de 4,5 teslas, que es el doble respecto al producido por los electroimanes convencionales.

Esto se logró en el Acelerador de Batavia, EE. UU., ahora llamado Fermi National Accelerator Laboratory o simplemente Fermilab, mediante un alambre de cobre de 0,7 mm de diámetro que contiene 2 100 finísimos filamentos de una aleación de niobio-titanio que, cuando se enfría a la temperatura del helio líquido, puede conducir una corriente de 250 A con un consumo muy bajo de energía. Véase la figura 41.

57

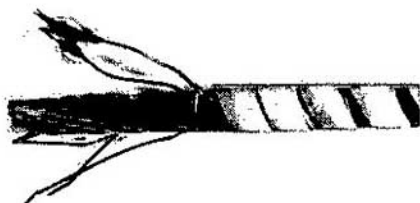


Fig. 41. Cable superconductor formado por 23 alambres de cobre, que contienen cada uno 2 100 alambres de una aleación de niobio-titanio. Al enfriarse éste en helio líquido, pueden circular por él 5 750 A.

Basado en esta tecnología, se diseñó y se está construyendo un super anillo formado por 240 cuadrupolos, cada uno de 1,35 m de largo y 774 dipolos que producen un campo superior a 4 teslas y que miden 7 m de largo cada uno. ⁽²²⁾ Este super anillo se está colocando

debajo del anillo principal del acelerador y en el mismo tunel (Fig. 42). Como el campo magnético en los dipolos del super anillo es el doble que el campo en los electroimanes del acelerador principal, la energía de los protones acelerados en el super anillo también será doble.

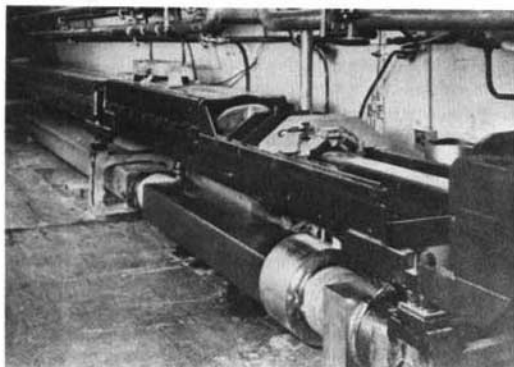


Fig. 42. Imanes superconductores del super anillo, montados debajo del anillo principal del acelerador de Batavia. Próximamente el acelerador doblará su energía de 500 GeV a 1 000 GeV = 1 TeV.

58

Se espera que la energía de las partículas aceleradas sea de:

$$10^{12} \text{ eV} = 1\,000 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV (Tevaelectrón-voltio),}$$

por lo que este acelerador también se llama el Tevatrón.

La manera de operar este acelerador será la de bajar la energía de los protones en el anillo principal de 500 GeV a 100 GeV e inyectarlos en el super anillo para acelerarlos a 1 TeV, o sea que el Tevatrón será un acelerador de cinco etapas en vez de las cuatro indicadas en la página 53.

Al disponer el Tevatrón de dos grandes anillos, se podrán producir protones de 1 TeV en el super anillo, mantenerlos ahí y acelerar en el anillo convencional y en sentido opuesto protones hasta de 0,5 TeV. Estos dos haces se podrán hacer entrar en colisión en regiones que han sido diseñadas con este propósito.

La tecnología de los electroimanes superconductores también se está empleando en la construcción de aceleradores de energías intermedias y esto reduce mucho su costo y el consumo de energía. Estos aceleradores se emplearán para acelerar iones pesados a fin de realizar investigaciones nucleares. ^(23,24)

En la Universidad del Estado de Michigan, EE. UU., se ha construido un ciclotrón superconductor de 500 MeV, que se empleará en el futuro como inyector de otro ciclotrón superconductor de 800 MeV.

En Chalk River, Canadá, se ha construido un ciclotrón superconductor de 500 MeV, que emplea como inyector en la primera etapa un acelerador Tandem.

En la Universidad de Milán, Italia, está en vías de construcción otro ciclotrón superconductor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores Luis de la Peña A. , Marcos Mazari M. y Jorge Rickards C. , por haber leído el manuscrito y por las valiosas sugerencias que me hicieron.

A José Manuel Ramos y Alfonso López Quiñones agradezco la preparación de los dibujos; a Pilar Castellanos y Lucila Golzarri de Palacios el mecanografiar la monografía, y a Raymundo de Pavía su ayuda en general.

BIBLIOGRAFIA

Libros Sobre el Tema

- (1) McMILLAN, E. M. Particle Accelerators, Parte XII del libro Experimental Nuclear Physics, Volume III, E. Segré (Editor), Wiley, Nueva York, N. Y. (1959).
- (2) LIVINGSTON, M. S. y BLEWETT, J. P. Particle Accelerators, McGraw-Hill, Nueva York, N. Y. (1962).
- (3) LIVINGSTON, M. S. (Editor). The Development of Particle Accelerators, Dover, Nueva York, N. Y. (1966).
- (4) ENGE, H. Introduction to Nuclear Physics, capítulos 12 y 15, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1966).
- (5) PERSICO, E., FERRARI, E. y SEGRÉ, E. Principles of Particle Accelerators, Benjamin, Nueva York, N. Y. (1968).
- (6) ROSENBLATT, J. Particle Acceleration, Methuen, Londres (1968).

Artículos de Revistas y Memorias

- (1) VAN DE GRAAFF, R. J. *Phys. Rev.*, 38, 1919 (1931).
- (2) COOLIDGE, W. D. *J. Franklin Inst.*, 202, 693 (1926).
- (3) TUVE, M. A., HAFSTAD, L. R. y DAHL, O. *Phys. Rev.*, 43, 1055 (1933).
- (4) HERB, R. G., PARKINSON, D. B. y KERST, D. W. *Rev. Sci. Instr.*, 6, 261 (1935).
- (5) JOLIOU, F., FELDENKRAIS, M. y LAZARD, A. *Compt. Rend.*, 202, 291, (1936).
- (6) BUECHNER, W. W., VAN DE GRAAFF, R. J., SPERDUTO, A., McINTOSH, L. y BURRILL, E. *Rev. Sci. Instr.*, 18, 754 (1947).
- (7) COCKCROFT, J. D. y WALTON, E. T. S. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 136A, 619 (1932).
- (8) ISING, G. *Arkiv Math. Astron. Phys.*, 18, 30 (1924-25).
- (9) WIDEROE, R. *Arch. Elektrotech.*, 21, 387 (1928).
- (10) LAWRENCE, E. O. y SLOAN, D. H. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.*, 17, 64 (1931).

- (11) THIBAUD, J. *Congres International d'Electricité* (París, 1932)
Vol. 11 p. 962.
- (12) LAWRENCE, E. O. y EDLEFSEN, N. E. *Science*, **72**, 376 (1930).
- (13) LAWRENCE, E. O. y LIVINGSTON, M. S. *Phys. Rev.*, **37**, 1707
(1931).
- (14) KERST, D. W. *Phys. Rev.*, **58**, 841 (1940).
- (15) VEKSLER, V. *Compt. Rend. Acad. Sci. URSS.*, **43**, 444 (1944).
- (16) McMILLAN, E. M. *Phys. Rev.*, **68**, 143 (1945).
- (17) OLIPHANT, M. L., GOODEN, J. S. y HIDE, G. S. *Proc. Phys.
Soc. (London)*, **59**, 666 (1947).
- (18) THOMAS, L. H. *Phys. Rev.*, **54**, 580 (1938).
- (19) CHRISTOFILOS, N. U. S. Patent N° 2, 736 799 (solicitada 1950).
- (20) COURANT, E. D., LIVINGSTON, M. S. y SNYDER, H. S. *Phys.
Rev.*, **88**, 1190 (1952).
- (21) COCKCROFT, J. D. y WALTON, E. T. S. *Proc. Roy. Soc.
(London)*, **129A**, 477 (1930).
- (22) WILSON, R. R. *Phys. Today*, **30** (10), 23 (1977).
- (23) GUNDER, H. y SELPH, F. *Ann. Rev. Nuc. Sci.*, **27**:353-392 (1977).
- (24) SIN AUTOR. Superconducting Cyclotrons, *Phys. Today*, **34** (8),
21 (1981).

Publicadas

Serie de matemática

- Nº 1. La Revolución en las Matemáticas Escolares, por el Consejo Nacional de Maestros de Matemáticas de los Estados Unidos de América.
- Nº 2. Espacios Vectoriales y Geometría Analítica, por Luis A. Santaló.
- Nº 3. Estructuras Algebraicas I, por Enzo R. Gentile.
- Nº 4. Historia de las Ideas Modernas en la Matemática, por José Babini.
- Nº 5. Álgebra Lineal, por Orlando E. Villamayor.
- Nº 6. Algebra Linear e Geometria Euclidiana, por Alexandre Augusto Martins Rodrigues.
- Nº 7. El Concepto de Número, por César A. Trejo.
- Nº 8. Funciones de Variable Compleja, por José I. Nieto.
- Nº 9. Introducción a la Topología General, por Juan Horváth.
- Nº 10. Funções Reais, por Djairo G. de Figueiredo.
- Nº 11. Probabilidad e Inferencia Estadística, por Luis A. Santaló.
- Nº 12. Estructuras Algebraicas II (Álgebra Lineal), por Enzo R. Gentile.
- Nº 13. La Revolución en las Matemáticas Escolares (Segunda Fase), por Howard F. Fehr, John Camp y Howard Kellog.
- Nº 14. Estructuras Algebraicas III (Grupos Finitos), por Horacio H. O'Brien.
- Nº 15. Introducción a la Teoría de Grafos, por Fausto A. Toranzos.
- Nº 16. Estructuras Algebraicas IV (Álgebra Multilineal), por Artibano Micali y Orlando E. Villamayor.
- Nº 17. Introdução à Análise Funcional: Espaços de Banach e Cálculo Diferencial, por Leopoldo Nachbin.
- Nº 18. Introducción a la Integral de Lebesgue en la Recta, por Juan Antonio Gatica.
- Nº 19. Introducción a los Espacios de Hilbert, por José I. Nieto.
- Nº 20. Elementos de Biomatemática, por Alejandro B. Engel.
- Nº 21. Introducción a la Computación, por Jaime Michelow.
- Nº 22. Estructuras Algebraicas V (Teoría de Cuerpos), por Héctor A. Merklen.
- Nº 23. Estructuras Algebraicas VI (Formas Cuadráticas), por Francisco M. Piscoya.

Serie de física

- Nº 1. Concepto Moderno del Núcleo, por D. Allan Bromley.
- Nº 2. Panorama de la Astronomía Moderna, por Félix Cernuschi y Sayd Codina.
- Nº 3. La Estructura Electrónica de los Sólidos, por Leopoldo M. Falicov.
- Nº 4. Física de Partículas, por Igor Saavedra.

- Nº 5. Experimento, Razonamiento y Creación en Física, por Félix Cernuschi.
- Nº 6. Semiconductores, por George Bemski.
- Nº 7. Aceleradores de Partículas, por Fernando Alba Andrade.
- Nº 8. Física Cuántica, por Onofre Rojo y Harold V. McIntosh.
- Nº 9. La Radiación Cósmica, por Gastón R. Mejía y Carlos Aguirre.
- Nº 10. Astrofísica, por Carlos Jaschek y Mercedes C. de Jaschek.
- Nº 11. Ondas, por Oscar J. Bressan y Enrique Gaviola.
- Nº 12. El Láser, por Mario Garavaglia.
- Nº 13. Teoría Estadística de la Materia, por Antonio E. Rodríguez y Roberto E. Caligaris.
- Nº 14. Aplicações da Teoría de Grupos na Espectroscopia Raman e do Infra-Vermelho, por Jorge Humberto Nicola y Anildo Bristoti.

Serie de química

- Nº 1. Cinética Química Elemental, por Harold Behrens LeBas.
- Nº 2. Bioenergética, por Isaias Raw y Walter Colli.
- Nº 3. Macromoléculas, por Alejandro Paladini y Moisés Burachik.
- Nº 4. Mecanismo de las Reacciones Orgánicas, por Jorge A. Brieux.
- Nº 5. Elementos Encadenados, por Jacobo Gómez Lara.
- Nº 6. Enseñanza de la Química Experimental, por Francisco Giral.
- Nº 7. Fotoquímica de Gases, por Ralf-Dieter Penzhorn.
- Nº 8. Introducción a la Geoquímica, por Félix González-Bonorino.
- Nº 9. Resonancia Magnética Nuclear de Hidrógeno-1 y de Carbono-13, por Pedro Joseph-Nathan.
- Nº 10. Cromatografía Líquida de Alta Presión, por Harold M. McNair y Benjamín Esquivel H.
- Nº 11. Actividad Óptica, Dispersión Rotatoria Óptica y Dicroísmo Circular en Química Orgánica, por Pierre Crabbé.
- Nº 12. Espectroscopia Infrarroja, por Jesús Morcillo Rubio.
- Nº 13. Polarografía, por Alejandro J. Arvía y Jorge A. Bolzan.
- Nº 14. Paramagnetismo Electrónico, por Juan A. McMillan.
- Nº 15. Introducción a la Estereoquímica, por Juan A. Garbarino.
- Nº 16. Cromatografía en Papel y en Capa Delgada, por Xorge A. Domínguez.
- Nº 17. Introducción a la Espectrometría de Masa de Sustancias Orgánicas, por Otto R. Gottlieb y Raimundo Braz Filho.
- Nº 18. Cinética Química, por Rodolfo V. Caneda.
- Nº 19. Fuerzas Intermoleculares, por Mateo Díaz Peña.
- Nº 20. Físico-Química de Superficies, por Tibor Rabockai.
- Nº 21. Corrosión, por José R. Galvele.
- Nº 22. Introducción a la Electroquímica, por Dionisio Posadas.
- Nº 23. Cromatografía de Gases, por Harold M. McNair.
- Nº 24. Cinética de Disolución de Medicamentos, por Edison Cid Cárcamo.

Serie de biología

- N° 1. La Genética y la Revolución en las Ciencias Biológicas, por José Luis Reissig.
- N° 2. Bases Ecológicas de la Explotación Agropecuaria en la América Latina, por Guillermo Mann F.
- N° 3. La Taxonomía y la Revolución en las Ciencias Biológicas, por Elías R. de la Sota.
- N° 4. Principios Básicos para la Enseñanza de la Biología, por Oswaldo Frota-Pessoa.
- N° 5. A Vida da Célula, por Renato Basile.
- N° 6. Microorganismos, por J. M. Gutiérrez-Vázquez.
- N° 7. Principios Generales de Microbiología, por Norberto J. Palleróni.
- N° 8. Los Virus, por Enriqueta Pizarro-Suárez y Gamba.
- N° 9. Introducción a la Ecología del Bentos Marino, por Manuel Vegas Vélez.
- N° 10. Biosíntesis de Proteínas y el Código Genético, por Jorge E. Allende.
- N° 11. Fundamentos de Inmunología e Inmunología Química, por Félix Córdoba Alva y Sergio Estrada-Parra.
- N° 12. Bacteriófagos, por Romilio Espejo T.
- N° 13. Biogeografía de América Latina, por Angel L. Cabrera y Abraham Willink.
- N° 14. Relación Hospedante-Parásito. Mecanismo de Patogenicidad de los Microorganismos, por Manuel Rodríguez Leiva.
- N° 15. Genética de Poblaciones Humanas, por Francisco Rothhammer.
- N° 16. Introducción a la Ecofisiología Vegetal, por Ernesto Medina.
- N° 17. Aspectos de Biología Celular y la Transformación Maligna, por Manuel Rieber.
- N° 18. Transporte a Través de la Membrana Celular, por P. J. Garrahan y A. F. Rega.
- N° 19. Duplicación Cromosómica y Heterocromatina a Nivel Molecular y Citológico, por Néstor O. Bianchi.
- N° 20. Citogenética Básica y Biología de los Cromosomas, por Francisco A. Sáez y Horacio Cardoso.
- N° 21. Ecología de Poblaciones Animales, por Jorge E. Rabinovich.

65

En preparación

Serie de matemática

- Estructuras Algebraicas, VII (Estructuras de Álgebras), por Artibano Micali.
- Ecuaciones en Derivadas Parciales, por Lorenzo Lara-Carrero.

Serie de física

- Teoría de Fluidos en Equilibrio, por Antonio E. Rodríguez y Roberto E. Caligaris.

Geofísica, por Alvaro C. Espinosa.
Superconductividad, por Miguel Kiwi.
Efecto Mössbauer, por Jacques A. Dannon.
Fundamentos de Cristalografía Física, por Jaime Rodríguez Lara.
Introducción a la Espectroscopia Atómica, por Mario Garavaglia
y Athos Giacchetti.
Aplicaciones Metrológicas del Láser, por Mario Garavaglia.
Teoría Cuántica del Momento Angular, por Manuel de Llano y
Mauricio Fortes.

Serie de química

Catálisis Homogénea, por Eduardo Humeres A.
Catálisis Heterogénea, por Sergio Droguett.
Fisicoquímica de Interfases, por Francisco Javier Garfias.
Química de Suelos, por Elemer Bornemisza.
Introducción a la Electrocatálisis, por Alejandro J. Arvía y María
Cristina Giordano.
Química de Sólidos, por Julio César Bazán.
Química Bioinorgánica, por Enrique E. Toma.
Introducción a la Farmacocinética, por Edison Cid Cárcamo.

Serie de biología

Etología: El Estudio del Comportamiento Animal, por Raúl Vaz-
Ferreira.
Principios Básicos de la Contracción Muscular, por Carlos
Caputo.
A Germinação das Sementes, por Luiz Gouvêa Laboriau.
Clastogénesis y Contaminación Ambiental, por Fernando Noel
Dolout.
Fotosíntesis, por Rubén H. Vallejos.
Introducción a la Teoría y Práctica de la Taxonomía Numérica,
por Jorge V. Crisci.
Cromosomas Humanos y de Primates, por Máximo E. Drets y
Héctor Seunanz.
¿Qué es la Diferenciación Celular?, por Roberto B. García y
Susana Pereyra-Alfonso.
Metodología para la Descripción y el Análisis de la Vegetación,
por Silvia Matteucci y Aída Colma.
Los Sistemas Ecológicos y el Hombre, por Ariel E. Lugo y
Gregory L. Morris.
Limnología Aplicada, por Samuel Murgel Branco.
Aprovechamiento de Aguas Dulces y el Cultivo de Peces, por
Argentino Bonetto.

Nota: Las personas interesadas en adquirir estas obras deben diri-
girse a la Unidad de Ventas y Promoción, Organización de los
ricanos, Washington, D. C., 20006 - 4499 o a las
OEA en el país respectivo.