

EL ACELERADOR BEVALAC

A. Dacal

Instituto de Física, UNAM.

México, D.F. 01000. México

Se presentan de manera muy general, las características de los aceleradores BEVATRON y SUPERHILAC que conforman el acelerador de iones pesados BEVALAC. Se mencionan algunos aspectos de su aplicación al campo de la biomedicina y algunos de los resultados interesantes obtenidos en los experimentos de física nuclear.

Introducción.

En el campo de las reacciones nucleares con iones pesados a energías intermedias y altas, el acelerador Bevalac del Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) en California, E.U.A., ha sido el pionero. Los experimentos realizados con esta máquina desde 1974 a la fecha, han generado una intensa actividad, tanto teórica como experimental, en el estudio de la materia nuclear en condiciones que sólo se daban anteriormente en los procesos estelares.

En esta plática se mencionan algunos detalles de los diseños originales y algunas de las modificaciones de los aceleradores BEVATRON y HILAC, ya existentes en LBL, que dieron origen al BEVALAC, un sistema capaz de acelerar iones pesados, con energía variable entre 0.25 y 2.6 GeV/nucleón.

El Bevatron, diseñado originalmente para acelerar protones a energías de 6.2 GeV, se utilizó desde 1954 hasta 1970 en experimentos de física de partículas y a partir de esa fecha comenzó a transformarse en un acelerador de iones pesados. El acelerador lineal HILAC (Heavy Ion Linear Accelerator), para iones pesados con energías máximas de 7.2 MeV/nucleón, también fue modificado alrededor de la misma fecha, para aumentar la energía a 8.5 MeV/nucleón, incluir masas de todos los iones y

usarse como inyector del Bevatron, convirtiéndose en el Super HILAC.

Este sistema de aceleradores está dedicado principalmente a las investigaciones en las áreas de biomedicina y de física nuclear. Por lo que respecta al último campo, más adelante se mencionan algunos de los experimentos que han generado un interés creciente por estudiar la materia nuclear densa y caliente.

Tanto el Super-HILAC, como el Bevatron son objeto de constantes mejoras, con la finalidad de mantener un liderazgo en la investigación.

Hoy día existen varios aceleradores en el mundo que compiten fuertemente con el Bevalac de LBL y que incluso lo superan en energía, pero éste conserva todavía la ventaja de ser el único que acelera desde protones hasta uranio, al menos mientras el SIS-18 de Alemania no entre en operación. Entre las máquinas que alcanzan los GeV/nucleon, destacan las de Darmstad, en Alemania; el Sincrofasotróon de Dubna en la URSS, Saturno en Francia, el SPS de CERN en Europa, el AGS de Brookhaven en los EUA, etc. y existen en proyecto de construcción algunos más, como el Sincrotrón de Chiba en Tokio, Japón, que posiblemente se dedicará a proyectos de biomedicina con iones pesados.

BEVATRON

Los betatrones, que fueron originalmente diseñados para acelerar electrones⁽¹⁾, contienen las premisas básicas de los sincrotrones, ya que la idea fundamental es acelerar partículas cargadas, manteniéndolas siempre en la misma órbita, a través de un campo magnético variable en el tiempo⁽²⁾. Los sincrotrones se han convertido en las máquinas más utilizadas hoy día y parece ser que sus limitaciones son más bien de índole económica que de tamaño y energía.

El bevatrón en el sentido mencionado antes, es una mezcla de betatrón y Linac. Conserva del primero la cámara anular de vacío, con una trayectoria fija y de radio constante, gracias a que aumenta el campo magnético conforme aumenta la energía de las partículas. Del segundo, obtienen las partículas una ganancia en energía, cada vez que completan una vuelta. En los sincrotrones, los imanes que conforman el campo magnético variable, están dispuestos alrededor de un anillo y el espaciamiento entre ellos se utiliza para colocar unidades aceleradoras, que en general, son cavidades resonantes. Requieren también de otros aceleradores, que actúan como inyectores y que pueden ser Cockroft-Walton, Van de Graaff, Linacs, etc.¹

En la Tabla I se listan algunos de los primeros sincrotrones utilizados para acelerar protones, con algunas de sus características. Los primeros de ellos son máquinas de enfoque débil que funcionan de acuerdo al principio de estabilidad de fase. El Bevatrón, tiene 4 secciones magnéticas de 90° cada una y 4 secciones rectas, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. Cada una de las secciones de 90° está constituida de 36 sectores magnéticos en forma de H, fabricados en fierro laminado, con bajo contenido de carbón, lo que asegura baja fuerza coerciva y alta permeabilidad. Cada uno de estos sectores tiene bobinas de cobre de 88 vueltas cada una, constando cada vuelta de 2 conductores aislados de 1.31 in² de sección, cuyo enfriamiento original fue a través de un sistema general de aire.

En la Tabla II⁽³⁾, se resumen los principales parámetros del Bevatrón, cuando inició sus operaciones en 1954. De aquí, puede verse que los problemas técnicos e ingenieriles de un sincrotrón de esta energía son muy interesantes y complejos, lo mismo que el mantenimiento y operación. Por ejemplo, en relación con la ingeniería eléctrica, la fuente de alimentación de los imanes, consiste de 2 generadores

de 46000 kVA cada uno, acoplados a volantes de 67 toneladas movidos por motores de inducción de 3600 H.P.^(4,5). Este detalle es interesante, dado que siguen funcionando después de 30 años de operación, aunque ya no a toda su potencia, lo que limita la máxima energía alcanzada a 2.6 GeV/nucleón, en el mejor de los casos.

La cámara de vacío originalmente fue construida en acero inoxidable y en cada una de las 4 secciones rectas entre los cuadrantes se colocaron 6 bombas de difusión de aceite de 32", con baffles de freón que permitían alcanzar un vacío de 2×10^{-6} mm de Hg en las secciones rectas y de 4×10^{-6} mm de Hg en las secciones curvas.

El primer inyector del Bevatrón fue un Cockroft-Walton de 500 keV, seguido de un acelerador LINAC, que permitía energías de inyección de 10 MeV. A partir de 1971, se comenzó a utilizar el Bevatrón como acelerador de iones pesados, teniendo los primeros haces de carbón, oxígeno y neón a intensidades de 10^7 , 10^9 y 10^4 partículas/pulso, respectivamente. Fue necesario mejorar drásticamente el sistema de vacío para obtener haces de estos iones pesados con intensidades adecuadas para los experimentos. En 1972, se modificó completamente el sistema de vacío, instalándose bombas criogénicas de nitrógeno y helio líquido⁽⁶⁾.

SUPERHILAC

En 1971, se modificó el HILAC⁽⁷⁾, acelerador lineal tipo Alvarez, con la finalidad de manejar haces de todas las masas desde protones hasta uranio, con intensidades que fluctuaban entre 10^{10} y 10^{15} partículas por segundo y energías variables entre 2.5 y 8.5 MeV/nucleón. Las modificaciones al Linac de Alvarez estuvieron basadas en el equipo existente y sus características. Como fuente de iones se utilizó una fuente PIG⁽⁸⁾ de descarga, que opera dentro de un campo magnético de 4500 gauss y un voltaje de extracción de 18 a 25 kV. Esta fuente puede operarse con cátodo frío, con electrones produciendo emisión secundaria o con cátodo de emisión térmica; lo que permite altos estados de carga o haces intensos con bajo estado de carga. La frecuencia de operación del acelerador es de 70 MHz y el máximo potencial de inyección es 2.5 MV. La figura 2 muestra en forma muy esquemática el acelerador.

El tanque al vacío donde se encuentra el Linac es de 3.15 m de diámetro, 18.5 m de longitud para la parte anterior a la sección de despojo y 30.9 m para la parte posterior,

separados por la sección de despojo de 3m. Todo el tanque se encuentra recubierto con una chapa de cobre y esta construido totalmente en acero. Las cavidades de radio frecuencia (RF) estan construidas en tramos de 6 m, soldadas después de alineadas. El diametro de los tubos de arrastre es sumamente pequeño en relación al diametro de las cavidades, $0.055 < d/D < 0.081$, o sea que las propiedades resonantes están determinadas por el diametro de la cavidad. La carga térmica en las paredes de la cavidad es de 0.3 w/cm^2 y el enfriamiento de estas superficies se logra por un contacto térmico de grasa conductora entre la superficie y los tubos del refrigerante. La superficie total de las cavidades es de $1.7 \times 10^7 \text{ cm}^2$ que requieren una velocidad total de bombeo de 30,000 l/s. El acelerador tiene una criobomba operando a 18°K con la que se logran 10^{-9} mm de Hg en los 50 m del acelerador. Cuenta además, con 8 bombas de difusión de aceite para los gases no condensable.

Inicialmente, este acelerador tenía 2 inyectores: uno de 0.8 MeV para masas menores de 80 y un Cockroft-Walton para masas mayores, operando a 100 kHz, 7.5 ma y alta regulación.

BEVALAC.

El problema de acoplar el Super HILAC como inyector del Bevatron, es un problema en parte topográfico. Ambos aceleradores se encuentran en una colina, con una diferencia de alturas de 60 m y la distancia entre la salida de uno y la entrada del otro es mayor de 200 m. Construyeron una línea de vacío, que garantiza las presiones requeridas por los iones pesados y que cuenta además con varios sistemas magnéticos para evitar que el haz se disperse.

La primera fase de operación del Bevalac fue de agosto de 1974 a la primera semana de diciembre de ese mismo año. En esta etapa se contemplaban 56 horas de operación cada dos semanas, y de estas de 12 a 16 se iban en preparar y optimizar el haz, quedando para los experimentos de 40 a 44.

En marzo de 1975, se inició la segunda fase, pero con un sistema computarizado para el manejo de los aceleradores. Se hicieron mejoras en las intensidades de los haces, mejorando el vacío en la línea de transferencia, que llego a $3.7 \times 10^{-9} \text{ mm}$ de Hg. Ese año se intentó acelerar Kriptón con 36 cargas positivas. En los años siguientes hubo otras mejoras,

como las bombas de titanio para el sistema de vacío del Bevatron, con las que se alcanzaron 10^{-9} mm de Hg. En 1981, se logro acelerar ^{238}U , iniciandose así los estudios de intercambio de carga para este ion. La ionización total de los átomos se logro en el pre-inyector de 2.5 MeV del Super HILAC, usando películas de despojo. Hubo mejoras en los sistemas de monitoreo del haz, con centelladores y detectores de emisión. Para algunos haces de muy baja intensidad, se desarrollaron intensificadores de imagen, con salidas de vídeo, que permiten registrar hasta 10^4 cargas/ cm^2 . Se utilizaron cámaras multialambricas, con ventanas de Kapton de 0.03 mm para monitoreo interno y con ventanas de aluminio para las líneas de experimentación. Los primeros haces que se utilizaron en forma regular, fueron: C, O, Ne y Ar.

El interés del grupo de biomedicina se debe a que la ionización producida por los iones pesados, tiene el marcado efecto de incrementarse al final de su alcance, lo que permite producir grandes volúmenes de ionización a cierta profundidad y muy poca al principio de la trayectoria. Otra idea que le interesaba conocer a este grupo era el efecto de los iones pesados de la radiación cósmica, en los astronautas. Este grupo, utiliza haces de 1 GeV/nucleón, en dos áreas experimentales, una para estudiar efectos de radiación a nivel celular y otra para radioterapia. En la actualidad el grupo de biomedicina trata 15 pacientes al día, cada uno de los cuales requiere de 30 minutos de preparación y sólo unos cuantos de irradiación. El tiempo de haz para la investigación en física nuclear es poco, comparado con el de los biomédicos, además de que los diferentes haces usados en física nuclear, consumen parte de ese tiempo antes de que se puedan aprovechar para un experimento. Con la finalidad de aumentar el tiempo dedicado a física nuclear, en 1986 se reacondicionó el viejo inyector local de 20 MeV, que puede acelerar desde protones hasta silicio, lo que ahorra tiempo en los cambios de haz. Para el Linac de 20 MeV se utiliza una fuente PIG, que alcanza $100 \mu\text{a}$ de Si, que son inyectados a un cuadrupolo de radiofrecuencia (RFQ), en donde se aceleran a 200 keV/nucleón, antes de entrar al acelerador lineal. Las primeras pruebas con el RFQ se iniciaron en agosto de 1983, construyéndose uno para CERN y otro para LBL. Para aumentar la intensidad de los haces, en el Super HILAC se

instaló una fuente MEVVA (metal vacuum vapor arcs) con la que se logra hasta 1 amp. de iones de uranio. También se han utilizado haces de ^{11}C y ^{19}F con una fuente especial de isótopos exóticos, con la que ha sido posible estudiar el ^8He .

El grupo del Bevalac, preocupado por mejorar aún más al acelerador ha considerado dos posibilidades. Una de ellas implicaba un cambio radical, sustituir la vieja máquina por un anillo acelerador y un anillo "stretcher-holder", uno encima del otro y con los que se podría llegar hasta 10 GeV/nucleón. Este proyecto, bastante costoso, no llegó a realizarse y fue conocido como Proyecto Tevalac⁽¹¹⁾. El otro proyecto, consiste en sustituir el sincrotrón de enfoque débil por uno de enfoque fuerte⁽¹²⁾, que probablemente si pueda realizarse ya que representa un inversión menor y desde hace un par de años se están diseñando prototipos de las diversas componentes. Aunque este sincrotrón de enfoque fuerte no representa un cambio respecto a la máxima energía alcanzable, si representa mejoras en la calidad de los haces y un ahorro considerable en los gastos de operación y mantenimiento.

FISICA NUCLEAR EN EL BEVALAC

Como se mencionó antes, en las colisiones de iones pesados a energías del orden de GeV/nucleón, se ha buscado principalmente la materia nuclear densa y caliente. En el Bevalac se iniciaron estos experimentos a través de una colaboración entre LBL y GSI (Gesellschaft fur Schwerionenforschung) Entre los experimentos que destacan de esta colaboración, podemos mencionar el realizado con un detector llamado "Plastic Ball", en el que se midieron los momentos de todas las partículas salientes en colisiones centrales núcleo-núcleo, para los sistemas $\text{Ca} + \text{Ca}$ y $\text{Nb} + \text{Nb}$ a 0.4 GeV/ nucleón, con la idea de obtener información sobre la temperatura alcanzada. La isotropía de las distribuciones de momento perpendicular vs momento paralelo podría dar esta información. Los resultados indican que no se alcanzó isotropía en los fragmentos salientes, para el sistema más ligero, pero el concepto parece tener validez en los sistemas más pesados⁽¹³⁾.

Para diversos sistemas de iones pesados a energías de bombardeo de 0.8 GeV/nucleón, se han medido las secciones eficaces invariantes, para la producción de protones⁽¹⁴⁾. Estas secciones se pueden parametrizar como

$\sigma \exp(-E/E_0)$, donde E es la energía cinética de la partícula y E_0 la pendiente. También en este experimento se midió la sección para piones negativos en el sistema $\text{Ne} + \text{NaF}$. En otro experimento⁽¹⁵⁾ a 2.1 GeV/nucleón se midió la correspondiente a kaones K^+ . De los resultados de estos experimentos, se concluye que la temperatura para kaones es mayor que la de protones, y esta a su vez mayor que la de los piones, lo que puede interpretarse como que las diferentes partículas dan información sobre las diferentes etapas de la colisión. Una etapa más temprana y caliente para los kaones y una etapa final de enfriamiento para los piones.

En experimentos de $\text{Ar} + \text{KCl}$ ⁽¹⁶⁾, a energías de bombardeo entre 0.4 y 1.8 GeV/nucleón, se ha medido la multiplicidad de piones negativos en función de la energía de bombardeo. Estos resultados se han comparado con los cálculos de cascada intranuclear, para colisiones centrales. Se observa que para energías entre 1 y 2 GeV/nucleón, las densidades se aproximan a 4 veces la densidad normal de la materia nuclear. En este trabajo también se extrajo una ecuación de estado para la materia nuclear, cuyo coeficiente de compresibilidad concuerda con los predichos a bajas energías.

Entre otro de los trabajos interesantes realizados en el Bevalac, destacan los 10 elementos más ricos en neutrones que se han producido⁽¹⁸⁾.

Con objeto de medir la condensación de piones se hicieron experimentos en el sistema $\text{Ne} + \text{NaF}$ ⁽¹⁹⁾ y los resultados se compararon con las predicciones teóricas de M. Gyulassy⁽²⁰⁾, sin que exista una evidencia clara del fenómeno.

Podríamos seguir mencionando otros muchos experimentos pioneros realizados en el Bevalac, pero para no extendernos demasiado, se puede concluir en términos muy generales, que :

- Se ha comenzado a entender la estructura general de las colisiones núcleo-núcleo a altas energías.
- Se comienza a estudiar la naturaleza transitoria del equilibrio.
- Se tiene evidencia de alta temperatura y densidad.
- Se ha dado un primer paso para extraer una ecuación de estado de la materia nuclear a altas temperaturas y densidades, y
- Han aparecido muchos efectos nuevos que es necesario estudiar.

De manera muy general las áreas de interés hoy día son :

- Reacciones de baja energía (50 -

200 MeV/nucleón). Investigar las regiones de transición entre las fases líquida y gaseosa de la materia nuclear, así como mecanismos de reacción.

b) Hidrodinámica nuclear. Estudios del flujo colectivo de nucleones en colisiones de iones pesados a energías relativistas y estudios de flujo lateral.

c) Fragmentación del proyectil. Medidas del momento nuclear de Fermi, correlaciones entre partículas, producción de núcleos ricos en neutrones, disociación electromagnética fragmentos anómalos del proyectil, estudios sobre la propagación de rayos cósmicos.

d) Fragmentación del blanco. Reacciones de transferencia fría, estudios de masas nucleares, mecanismos de reacción.

e) Espectros inclusivos de n,d,p,t. Formación por coalescencia y extracción de la densidad de congelamiento, razones d/p como medida de la entropía.

f) Producción de piones. Producción más allá de los límites cinemáticos como prueba de efectos cooperativos, sistemática de la producción como función de la energía y las masas del proyectil y del blanco, pruebas de efectos hidrodinámicos, razones π^-/π^+ a la velocidad del proyectil como prueba de efectos de interacción coulombiana, interferometría de piones para estudios del volumen de interacción.

g) Partículas extrañas. Pruebas del mecanismo de reacción cerca del umbral, estudios de las etapas tempranas de la colisión.

h) Fotones. Medidas de producción π^0 , η^0 , etapas más calientes de la colisión.

i) Estructura nuclear. Núcleos lejos de estabilidad, haces secundarios de núcleos no usuales.

Lofgren, K. Lou, R. Main, R. Mobley, R. Morgado, W. Salsig y F. Selph, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS20, 155, 1975.

9. H.A. Grunder y F. Selph. Ann. Rev. Nucl. Sci. 27,353,1977.
10. J. Barale, R. Force, H. Grunder, J. Guggemos, G. Lambertson, C. Leemann, F. Lothrop, R. Morgado, R. Riehter, D. Rondeau, F. Selph, J. Staples, M. Tekawa y V. Voelker. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS22,1672, 1975.
11. Comunicación Privada.
12. J. Alonso. Proc. 8th High Energy Heavy Ion Study, pag. 1, 1987.
13. S. Nagamiya, M.C. Lamairé, E. Moeller, S. Schnetzer, G. Shapiro, I. Tanihata. Phys. Rev. C24, 971,1981.
14. S. Nagamiya et al. op. citae.
15. S. Nagamiya y M. Gyulassy. Adv. Nucl. Phys.
16. R. Stock, R. Bock, R. Brockmann, J.W. Harris, A. Sandoval, H. Stroebele, K.L. Wolf, H.G. Pugh, L. S. Schroeder, M. Maier, R. Renfordt, A. Dacal y M.E. Ortiz. Phys. Rev. Lett. 49,1236,1982.
17. T.J.M. Symons, V.P. Viyogi, G.D. Westfall, P. Doll, D.E. Greiner, H. Faraggi, P.J. Lindstrom, D.K. Scott, H.J. Crawford y C. McParland, Phys. Rev. Lett. 42,40,1979.
18. E.M. Friedlander, R.W. Gimple, H.H. Heckmann, Y.J. Karant, B. Judek y E. Gaussauge. Phys. Rev. Lett. 45, 1084,1980.
19. S. Nagamiya, H. Hamagaki, P. Hecking, S. Kadota, R. Lombard, Y. Miake, E. Moeller, S. Schnetzer, H. Steiner e I. Tanihata. Phys. Rev. Lett. 48,1780,1982.
20. M. Gyulassy. Nucl. Phys. A354,395, 1981.

REFERENCIAS.

1. R.Wideroe, Arch. Elektrotech. 21,387,1928.
D.W. Kerst, Phys. Rev. 58,841,1940.
2. M.L. Oliphant, J.S. Gooden, G.S. Hide, Proc. Phys. Soc. (London) 59,666,1947.
3. G.K. Green y E.D. Courant
4. J.L. Boyer y C.R. Marcum, Trans. Amer. Electr. Eng. 69,1110,1950.
5. J.V. Kresser, Electr. Engng. 71,338,1952.
6. R.A. Byrns y J.T. Tanabe, IEEE Trans. Nucl. Sci. 20,91,1975.
7. R.M. Main, Nucl. Instr. Meth. 97,51,1971.
8. A. Ghiorso, H. Grunder, W. Hartsough, G. Lambertson, E.

TABLA I
PRIMEROS SINCROTRONES DE PROTONES

Laboratorio	E(GeV)	Enfoque	Intensidad part/s	Peso Ton	Año de Operación
Brokhaven	2.9	Débil	5×10^{10}	2000	1952
Birmingham	1.0	Débil		800	1953
Berkeley	6.4	Débil	10^{11}	10000	1954
Dubna	10.0	Débil	10^9	35000	1957
Saclay	3.0	Débil	5×10^{10}	1080	1958
CERN	28.0	G.A.	5×10^{11}	3400	1960
Brookhaven(AGS)	33.0	G.A.	3×10^{11}	4000	1961
Moscu	7.0	G.A.	5×10^9	2700	1963
Rutherford	7.0	Débil	5×10^{11}	7000	1963
Argonne (ZGS)	12.5	E.B.	10^{12}	4000	1963
Princeton-Penn.	3.0	Débil	2×10^{12}	350	1963

G.A. Gradiente alterno
E.B. Efecto de borde

TABLA II
PARAMETROS DEL BEVATRON

Energía Máxima	6.2 GeV
Radio Ro	15.24 m
No. de Secciones Rectas	4
Long. Secciones rectas	6.1 m
Sec. Transversal de los Imanes	$6.25 \times 2.9 \text{ m}^2$
Peso del Hierro	9700 Ton
No. de vueltas del embobinado	88
Peso del cobre	350 Ton.
Corriente máxima	8300 amp
E inicial	14000 volts
Energía almacenada (max)	80,000,000 joules
Tiempo de subida	1.9 seg.
Razón de repetición	10 p.min.
Campo de Inyección	300 gauss
Campo máximo	15400 gauss
Entrehierro	$0.33 \times 1.68 \text{ m}^2$
Apertura	$0.30 \times 1.17 \text{ m}^2$
Diseño $n = -(r/B_z)(\delta B_z/\delta t)$	0.6
Energía de inyección	9.9 MeV
dB / dt	9000 gauss/seg
Δr /vuelta	4.2 mm
Vacío	10^{-6} mm Hg
Frecuencia inicial	355 kHz
Frecuencia final	2.47 MHz
Energía ganada por vuelta	1.5 keV
Potencia	100 MVA
Pérdida promedio en los imanes	3500 kw

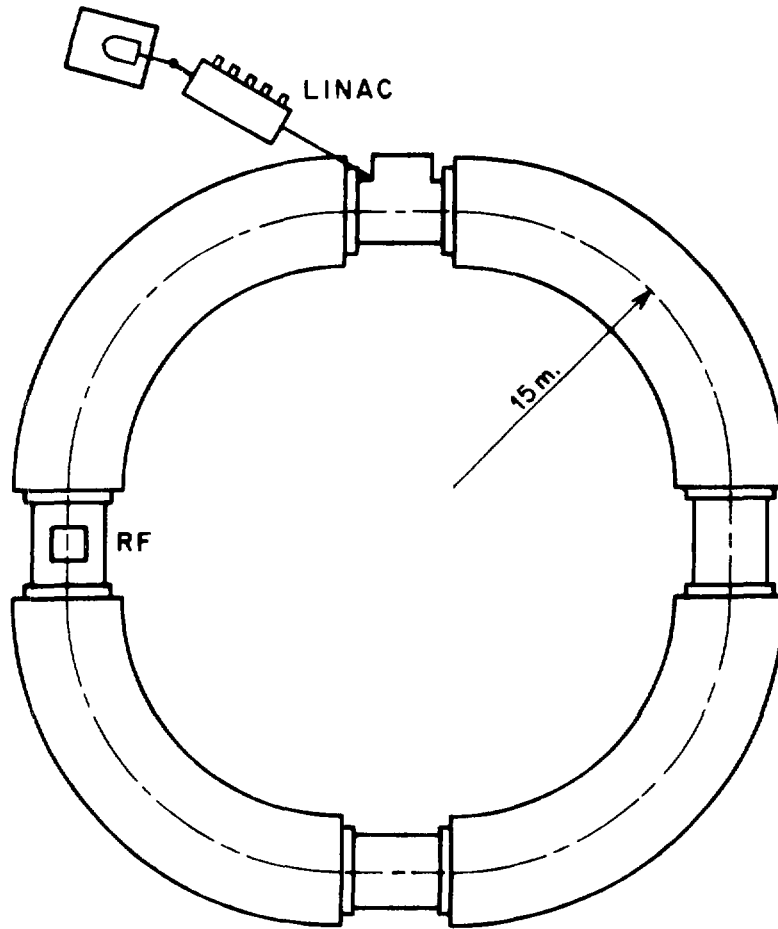


Fig.1 Esquema de los cuatro sectores magnéticos del Bevatrón de LBL.

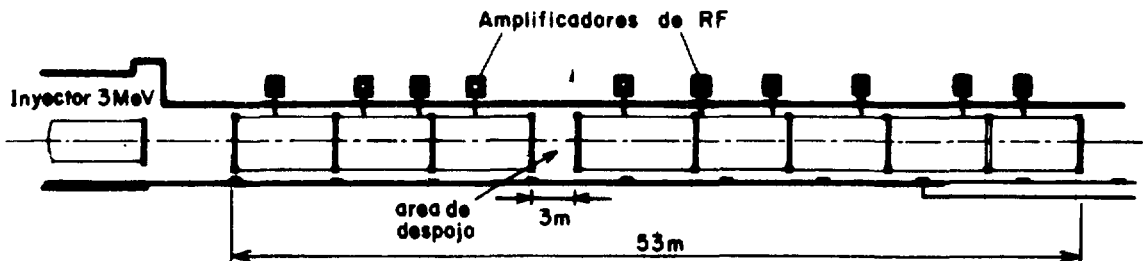


Fig.2 Esquema del acelerador SUPERHILAC de LBL.