

PROYECTO DE INSTALACION

DEL

CICLOTRON ISOCRONO DE 130 MeV

- I - El Sincrociclotrón de 28 MeV.
- II - La Situación en América Latina.
- III - Posibilidades para el desarrollo de la Física Nuclear en la Argentina.
- IV - Factores Decisivos en la Elección del Ciclotrón Isócrono.
- V - Descripción del Ciclotrón Isócrono.
- VI - Usos del Ciclotrón Isócrono en las Investigaciones Científicas y Técnicas.
- VII - Datos y Características del Proyecto.
- VIII - Estudio Económico del Proyecto de Instalación del Ciclotrón Isócrono.

I - EL SINCROCICLOTRON DE 28 MeV

El Sincrociclotrón de la Comisión Nacional de Energía Atómica ha prestado importantes servicios durante la primera década de su existencia al desarrollo de la investigación científica en la Argentina.

La máquina fue instalada por Philips durante los años 1952/1953 y en Noviembre de 1954 se produjo la primera irradiación con haz interno con fines de investigación. En 1957, tras las modificaciones introducidas por el grupo de profesionales y técnicos de la CNEA a cargo de la máquina, se dispuso de un haz externo que amplió las posibilidades de realización en forma continuada, de trabajos de investigación científica en física, química, medicina y biología. Por otra parte, se han realizado desarrollos importantes en electrónica nuclear y tecnología de aceleradores.

La máquina fué utilizada también con fines de producción de radioisótopos para aplicaciones durante aproximadamente unas 600 horas anuales.

Un resumen de la actividad realizada, trabajos publicados, subsidios recibidos, científicos extranjeros que han colaborado con el laboratorio, y en general, toda la actividad de importancia realizada durante los primeros quince años de vida del laboratorio, se encuentra en el informe adjunto, titulado "El Sincrociclotrón de Buenos Aires, Informe Retrospectivo 1954-1969".

Mientras el laboratorio de la Comisión Nacional de Energía Atómica cumplía esta tarea se produjo en otros países un gran desarrollo en la tecnología de los aceleradores de partículas. Durante los últimos cinco años se han instalado aproximadamente 40 aceleradores nuevos, algunos de los cuales cubren con exceso las facilidades que el sincrociclotrón de la Comisión Nacional de Energía Atómica ofrecía para trabajos de investigación en física nuclear hace algunos años. Esta circunstancia hizo que se proyectase

perfeccionar y modernizar la máquina, estableciendo un programa gradual de trabajos tecnológicos que incluyó:

a) Cambio del regenerador, agregando un sistema regenerador-compresor a fin de aumentar la eficiencia de la extracción del haz;

b) Introducción de un electrodo auxiliar de radiofrecuencia a fin de repartir el haz en el tiempo y evitar el empaquetamiento temporal del mismo, con la consiguiente saturación de los detectores electrónicos;

c) Cambio de la fuente de iones, con miras a obtener una mayor corriente interna de deuterones y partículas alfa;

d) Modificación del tanque de vacío de la cámara de aceleración para permitir la instalación de las piezas ya mencionadas.

La mayor parte de estas modificaciones ha sido completada ya. En su ejecución surgieron algunos agregados al programa inicial tal como un nuevo sistema de vacío destinado a aumentar la capacidad de bombeo original.

Esto permite disponer, actualmente, de un haz externo de deuterones de corriente 10 veces mayor que la anterior lo cual se traduce en primer término en una ampliación decidida del campo de posibles experiencias, y por otra parte, en una economía de tiempo de irradiación para idénticos requisitos experimentales con la consiguiente reducción de costos de operación y consumo de energía, todo lo cual colocó al sincrociclotrón en condiciones de contribuir al desarrollo de las investigaciones nucleares en el país en forma destacada por un nuevo período.

Sin embargo, el rápido avance de la tecnología en el campo de los aceleradores de partículas mencionado más arriba mostró que

este nuevo período está por concluir. Puede estimarse que el sincrociclotrón permitirá realizar trabajos de investigación en física nuclear en forma competitiva con algunos laboratorios del exterior hasta un máximo de 2 años, y eso con tal que se elijan muy cuidadosamente los temas de trabajo, y se conozcan muy bien los programas de investigación que se estén desarrollando en aquellos laboratorios. Transcurrido ese segundo período de vida útil, volverá a caer en la obsolescencia, debido a la limitación que significa disponer solamente de un haz de partículas de energía fija y de poca intensidad, y a que solo pueden acelerarse con él deuterones y partículas alfa. De modo que se podrá utilizar solamente para la producción de algunos radioisótopos y para la formación de personal.

II - LA SITUACION EN AMERICA LATINA

Durante los últimos años, se han creado modernos laboratorios de investigaciones nucleares en Mexico, Brasil y Chile.

Esto se ha puesto en relieve en el último Congreso de la Asociación Física Argentina, realizado en La Plata desde el 28 de Julio hasta el 1° de Agosto de 1969, con la participación de físicos argentinos y a la que fueron invitados colegas de países Americanos y Europeos.

Durante el Congreso se realizó una mesa redonda sobre Física Nuclear, que tenía por objeto dar a conocer las actividades de los diversos grupos de física nuclear latinoamericanos con miras a una futura cooperación. Un representante de cada grupo expuso cuales eran las tareas que se estaban realizando, con qué medios contaban, y cuales eran los planes futuros.

Lo que sigue es un resumen de las exposiciones, en lo que respecta al campo de las reacciones nucleares:

ARGENTINA:

Existe un grupo de física nuclear importante, el que forma parte del Departamento de Física Nuclear de CNEA. Es la División Reacciones Nucleares, que dispone de un sincrociclotrón de energía fija: 14 MeV de protones, 28 de deuterones, 55 de alfas, con una intensidad de haz externo de 300 nA, y una dispersión de energía de 300 KeV.

El programa de trabajo de medición de reacciones (d,t) que se está llevando a cabo, finalizará en 1971. Después de esa fecha la máquina será demasiado antigua para competir con las varias decenas de aceleradores tandem y ciclotrones isócronos que tienen una energía similar y un haz de mucho menor dispersión de energía (1 a 50 KeV).

En cambio dispone de un grupo de especialistas sumamente completo. El equipo de física experimental está integrado por los Doctores en Física: M.J.Sametband, H.J.Erramuspe, J.E.Testoni, A.E.Ceballos y M.A.Olivos, todos los cuales tienen varios años de trabajo en laboratorios del exterior, y además varios años de experiencia en física nuclear.

Lo mismo puede decirse del equipo de física teórica, que está integrado por los Doctores en Física: E.E.Maqueda, R.Perazzo y G.G.Dussel. Completan el equipo los siguientes Licenciados en Física, que están haciendo sus tesis en el Laboratorio: A.Ferrero, H.M.Sofia (experimentales), O.Dragún y S.L.Reich (teóricos).

Se dispone entonces de un equipo de ocho (8) doctores en física con experiencia y cuatro (4) licenciados en física.

El Laboratorio cuenta además con: un Servicio de Cómputo y Programación, que elabora los programas de física nuclear, prepara las tarjetas o cintas perforadas y hace el enlace con las computadoras disponibles.

Un Servicio de Electrónica, con un Ingeniero Electrónico, especialista en técnica de pulsos, que hace el service de los equipos electrónicos y diseña y construye circuitos transistorizados. Está secundado por tres (3) técnicos electrónicos.

Un Servicio Electromecánico, con un Ingeniero Electromecánico especialista en aceleradores, para el mantenimiento del ciclotrón y la ejecución de los diversos proyectos del Laboratorio. Está secundado por tres (3) técnicos electromecánicos, y tres (3) técnicos mecánicos.

Un Servicio de Preparación de Detectores de Estado Sólido. Produce detectores de silicio con litio difundido para la detección de partículas cargadas en las reacciones nucleares. A cargo del Dr.H.J.Erramuspe, secundado por un técnico.

BRASIL:

El laboratorio más importante es el de Sao Paulo. Allí se está instalando el Acelerador Tandem construido por la National Electrostatic Corporation.

Las características del mismo son:

Energía variable, desde 5 hasta 28 MeV de protones o deuterones, 10 a 56 MeV de alfas. Intensidad del haz: hasta 20 μ A. Un sistema analizador permitirá disponer de un haz externo de 500 nA con una dispersión de energía de solamente 2 KeV.

En el plan de trabajo se incluye acelerar iones pesados, y además protones y deuterones polarizados.

Ha comenzado el montaje de ésta máquina, y esperan comenzar el programa de física nuclear a fines de 1971.

El Laboratorio está dirigido por el Dr. O. Sala, con varios años de experiencia en el exterior y en Sao Paulo. En éste momento cuenta con pocos físicos, casi todos Licenciados que irán al exterior para completar el Doctorado. Cuenta con buenos Servicios de Electrónica, Mecánica y Computación.

CHILE:

El laboratorio más importante es el del Ciclotrón Isócrono de Santiago. Este acelerador, instalado hace dos años, tiene las siguientes características:

Energía variable, desde 2 hasta 11 MeV de protones, 2 a 5 MeV de deuterones, 8 a 16 MeV de alfas y helio -3. La intensidad de corriente externa es de 100 nA, con una dispersión en energía de 60 KeV.

En el plan de trabajo se incluyen reacciones nucleares y físicas de neutrones rápidos mediante tiempo de vuelo. La máquina fue instalada hace dos años y el haz externo existe desde hace unos meses.

El laboratorio está dirigido por el Dr. J. Zamudio, con experiencia en el exterior y Chile. En este momento cuenta con algunos Licenciados en Física, entre los cuales un argentino que trabajó un año en nuestro ciclotrón. Algunos irán al exterior para completar su Doctorado. Cuenta con buenos Servicios de Electrónica y Mecánica.

Ha suscrito un convenio de colaboración con BRASIL, para enviar a sus físicos a realizar experiencias en el Acelerador Tandem de Sao Paulo.

MEXICO:

El Laboratorio de la Universidad Autónoma de México cuenta con un Acelerador Tandem de la High Voltage Eng. de 3 a 12 MeV de protones y deuterones, con un haz externo analizado de varios centenares de nanoamperes y una dispersión en energía de 1 KeV. Tienen un espectrógrafo multigap para analizar los productos de las reacciones nucleares, y moderna instrumentación electrónica.

Cuentan con un buen Servicio de Electrónica y de Mecánica, pero el grupo de físicos experimentales es incipiente, no así el de físicos teóricos, que forma parte de una escuela de jerarquía internacional.

III - POSIBILIDADES PARA EL DESARROLLO DE LA FISICA NUCLEAR EN LA ARGENTINA

Los físicos latinoamericanos asistentes a la Mesa Redonda estuvieron de acuerdo en que en éste momento el Sincrociclotrón de la CNEA es el mejor organizado, por la cantidad de físicos nucleares experimentados, y además, porque por vez primera en América Latina, se han integrado físicos teóricos con físicos experimentales para desarrollar temas de investigación en estructura nuclear. Reconocieron por otra parte que la organización de los Servicios Electrónico, de Cómputo y Electromecánico, están a la altura de los buenos Laboratorios de países avanzados.

Este panorama, halagador para la CNEA y para la Física Argentina, tiene no obstante una contraparte que pronto llegará a ser sombría: El ciclotrón con que se cuenta que cumple 15 años de funcionamiento en noviembre de este año, y que durante años centró al grupo de física nuclear más fuerte de Latino América, es ya obsoleto.

Las reformas terminadas el año pasado permitirán hacer investigación en física nuclear durante otro año y medio a dos más, pero en 1971, cuando el Tandem de Sao Paulo inicie su actividad cubriendo la energía de 28 MeV de deuterones del sincrociclotrón, pero con una dispersión de energía de solamente 2 KeV comparada con la del ciclotrón que tiene una dispersión de 300 KeV, ya no podrá utilizarse nuestra máquina para trabajar en física nuclear, y quedará entonces para hacer algunas irradiaciones de radioquímica

Es evidente el peligro que significa tener laboratorios con aceleradores modernos en dos países limítrofes, BRASIL y CHILE, con escasez de personal experimentado y la intención especialmente en el caso de Brasil, de contratarlo en excelentes condiciones. Simultáneamente se da la situación, en nuestro país, de contar con el mejor grupo de físicos y una máquina casi obsoleta.

Esta situación tiene dos únicas alternativas:

- 1) Que se retarde la instalación de un nuevo acelerador nuclear.

El Laboratorio del Ciclotrón, que durante varios años fué el primero de Latino América, verá entonces dispersarse a sus integrantes.

- 2) Que se decida instalar un ciclotrón isócrono de 10 a 130 MeV.

Dicha máquina, además de ser uno de los aceleradores más completos para física nuclear, por sus características y por el rango de energías que abarca, permitiría desarrollar otros temas, como ser: estudios de daños por radiación para metalurgia nuclear; estudios de física de neutrones rápidos mediante la espectrometría de tiempo de vuelo; preparación de radioisótopos, entre otros con deficiencia de neutrones, los que no pueden prepararse en reactores análisis por activación con neutrones y con partículas cargadas; preparación de radioisótopos de vida muy corta con fines de investigaciones biológicas.

IV - FACTORES DECISIVOS EN LA ELECCION DEL CICLOTRON ISOCRONO

Hace aproximadamente una década aparecieron en forma casi simultánea dos aceleradores nuevos: el Tandem Van de Graaff, y el ciclotrón isócrono, el uso de los cuales se está difundiendo de manera creciente, y que tienen aplicaciones amplias no sólo en el estudio del núcleo sino también en las investigaciones biológicas, la producción de radioisótopos para uso médico e industrial, y el análisis no destructivo de cantidades infinitesimales de materiales (1 parte en 10^{13}) lo que es especialmente útil en la metalurgia nuclear. Cabe agregar que se los puede utilizar para las investigaciones en física de neutrones, y como fuente pulsante de neutrones rápidos de energía variable.

En la actualidad unos 80 laboratorios nucleares cuentan con aceleradores de uno de estos tipos, con energías que llegan hasta unos 100 MeV para los protones, y centenares de MeV para iones más pesados.

a) Requisitos de un acelerador utilizable en física nuclear.

Los requisitos impuestos a un acelerador utilizable para reacciones nucleares son los siguientes:

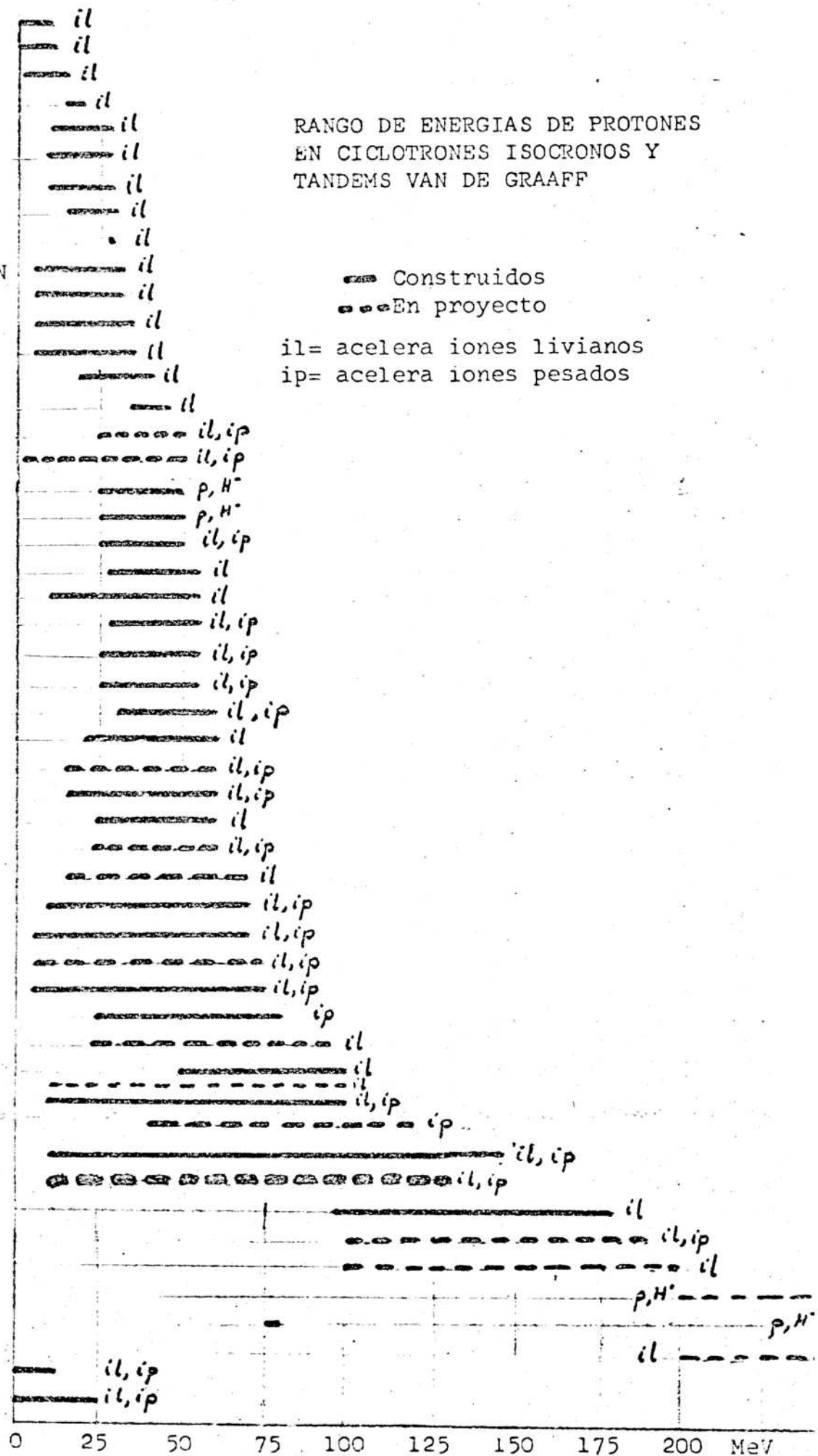
- 1) Su energía debe estar muy bien definida (pequeña dispersión).
- 2) Dentro del rango de energías que pueda proporcionar un acelerador, el paso de un valor de energía del haz, a otro, debe poderse hacer con rapidez y facilidad.
- 3) El haz debe ser lo más paralelo posible, y de sección transversal mínima.
- 4) La intensidad de corriente del haz debe poderse variar con facilidad, y su valor máximo debe ser lo más alto posible.
- 5) Debe poder acelerar haces de iones pesados, y haces polarizados, lo que amplía enormemente el campo de investigación posible.

SANTIAGO
 BIRMINGHAM
 U ILLINOIS
 OREGON SU
 ORSAY
 SACLAY
 U COLORADO
 WASHINGTON U
 PHILIPS DUPHAR
 PHILIPS EINDOVEN
 FREE U HOLANDA
 HAMBURG
 U MICHIGAN
 BROOKHAVEN
 MILAN
 ALMA ATA
 OSAKA
 UCLA SF
 WINNIPEG
 HARWELL
 BONN
 BERKELEY
 MICHIGAN SU
 NASA
 PRINCETON
 ARGONNE NL
 TEXAS A&M
 LOUVAIN
 GRENOBLE
 BIRMINGHAM
 BASEL
 GRONINGEN
 ORNL
 UC DAVIS
 OHIO SU
 USN RES LAB
 CEVIL ORSAY
 USN RADIOL LAB
 KARLSRUHE
 LENINGRADO
 ARGONNE
 MARYLAND
BUENOS AIRES
 JULICH
 UPPSALA
 INDIANA U
 VANCOUVER
 ZURICH
 UCLA
 40 TANDEMS EN
 20 TANDEMS MP

RANGO DE ENERGIAS DE PROTONES
 EN CICLOTRONES ISOCRONOS Y
 TANDEMS VAN DE GRAAFF

— Construidos
 --- En proyecto

il= acelera iones livianos
 ip= acelera iones pesados



Tanto el ciclotrón isócrono como el Tandem Van de Graaff pueden cumplir estos requisitos.

En cuanto al punto 1), ambos aceleradores efectúan un análisis magnético de las partículas que salen de la máquina, para obtener un haz monocromático. Una vez analizado magnéticamente, el haz tiene en ambos casos una dispersión de 0.01%, lo que es ampliamente satisfactorio para las experiencias modernas de física nuclear.

Punto 2). El paso de una energía a otra se hace en pocos minutos en ambos aceleradores. Pero el rango de energías posibles en un ciclotrón es mucho más alto que el del Tandem: este último puede proporcionar haces de protones de hasta 25 MeV; acaba de construirse un ciclotrón isócrono (en Maryland, Estados Unidos) que puede variar su energía de protones entre 10 y 130 MeV. El uso de una máquina así equivale a disponer de una batería de aceleradores con los cuales se estudiarán problemas mucho más variados.

En cuanto al punto 3), el paralelismo del haz, y su sección transversal, son comparables en ambos aceleradores.

En lo que respecta al punto 4), la intensidad de corriente del haz de un ciclotrón isócrono es del orden de 5 veces mayor que en un Tandem Van de Graaff. Esto es sumamente importante para la producción de radioisótopos, estudios de daños en aleaciones por irradiación, física de neutrones.

En lo que respecta al punto 5), ambos aceleradores pueden acelerar iones pesados o polarizados.

b) Costos de instalación y operación.

A igualdad de energía de haz externo el costo del acelerador es mayor para el Tandem. El costo de un acelerador Tandem Van de Graaff es de aproximadamente 10^5 dólares/MeV. y el límite práctico de energía obtenible en un Tandem de dos etapas es de 30 MeV, lo que significa un costo de aproximadamente 3×10^6 dólares, para un acelerador Tandem de 30 MeV y 10 μ A de corriente.

MA

10^5

ORNL

CHALK RIVER

ORNL
SOL

INTENSIDAD DE HAZ EXTERNO vs ENERGIA DE PROTONES
PARA CICLOTRONES ISOCRONOS Y TANDEMS V.de GRAAFF

10^4

- Aceleradores en funcionamiento
- ★ Aceleradores en proyecto

10^3

NASA
PRINCETON

UCLA
DUBNA

10^2

BIRMINGHAM
ILLINOIS

WASHINGTON
SACLAY
MICHIGAN
OSAKA
LOUVAIN
MILAN
LOUVAIN
KARLSRUHE
GRENoble

ALABAMA (RUSIA)
LAWRENCE
BIRMINGHAM
GROENINGEN
ORNL
BAEL
LENINGRAD

PARSONS
MARYLAND
INDIANA
AEG
ALEMANIA

VANCOUVER
ZURICH

40

60
TANDEMS

LOS ANGELES

JULICH

COLUMBIA

SANTIAGO

WINNIPEG

10

10^2

10^3

10^4 Me

Este es también el costo aproximado de un ciclotrón isócrono de 100 MeV y de una intensidad de corriente de unos 50 μ A.

A este costo debe agregarse el del edificio, sistema de transporte del haz, fuente de iones polarizados y computadora "on line", que tienen un precio practicamente igual para ambos tipos de acelerador, del orden de 2,5 millones de dólares, lo que lleva el costo total de un laboratorio instalado a aproximadamente 5,5 millones de dólares para ambos casos.

El consumo de energía eléctrica de un Tandem de 30 MeV es menor que el de un ciclotrón de 100 MeV.

Pero en cambio el gas aislante que llena el tanque del Tandem es un producto sumamente caro, y se pierde parte del mismo con cada operación de apertura de la máquina; se requieren por lo menos 2 ó 3 aperturas anuales para el mantenimiento del Tandem.

El costo de mantenimiento del Tandem de 30 MeV resulta así un poco superior al del ciclotrón isócrono de 100 MeV.

V - DESCRIPCION DEL CICLOTRON ISOCRONO

a) Principios del Funcionamiento

1) Ciclotrón de frecuencia fija

El principio de funcionamiento del ciclotrón convencional es el hecho de que una partícula cargada que gira en un campo magnético necesita el mismo tiempo para hacer una revolución, no importa cual sea el radio o la energía, y que ese tiempo sólo depende de la intensidad de campo magnético y de la carga y masa de la partícula.

Sin embargo, a medida que va incrementándose la energía, la masa de la partícula aumenta debido al efecto relativista, y eso hace que el tiempo de revolución también crezca; se va haciendo cada vez más difícil, y eventualmente imposible, continuar acelerándola.

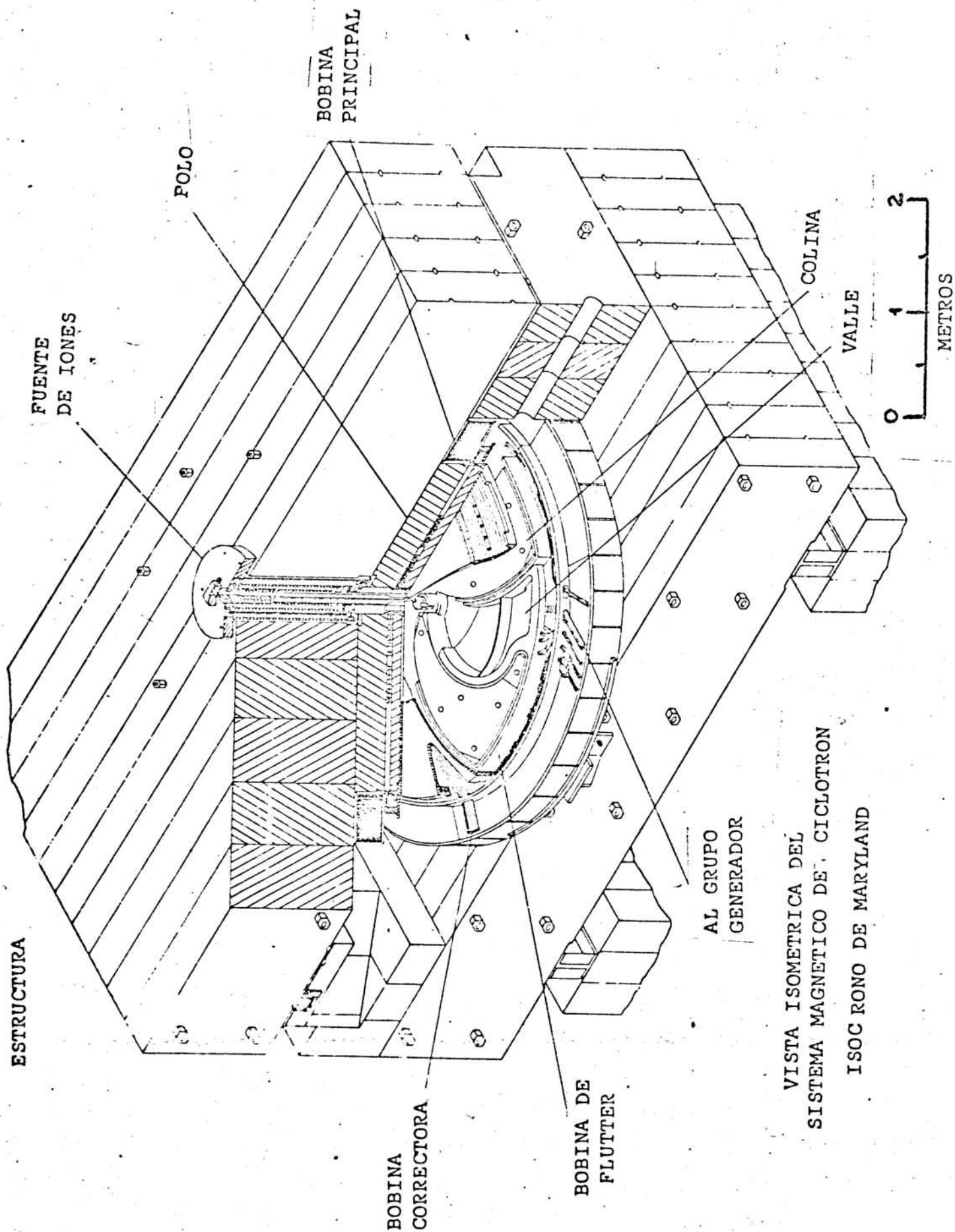
2) Sincrociclotrón

Para continuar acelerando los núcleos a energías mayores, se ha desarrollado el ciclotrón de frecuencia modulada o sincrociclotrón, en el que la frecuencia de variación del campo eléctrico disminuye en forma sincrónica, con el aumento relativista de la masa de los núcleos, compensándolo.

3) Ciclotrón Isócrono

En estos últimos años se ha desarrollado otro método para compensar el aumento relativista de la masa al crecer la energía. Este nuevo principio tiene la ventaja de permitir un ciclotrón de energía variable, mientras que los dos tipos anteriores son de energía fija.

El método consiste en aumentar el campo magnético con el radio de las órbitas, para cancelar exactamente el aumento relativista de la masa. Las partículas pueden ser así aceleradas a frecuencia constante, tal como en los primeros ciclotrones.



VISTA ISOMETRICA DEL
 SISTEMA MAGNETICO DE CICLOTRON
 ISOCRONO DE MARYLAND

Sin embargo, cuando las partículas se mueven en un campo que crece con el radio, se dispersan rápidamente, de modo que hay que proporcionar un método para enfocarlas.

Esto se realiza dividiendo las piezas polares del electroimán en regiones o sectores alternados de campo magnético intenso y de campo débil; el ciclotrón isócrono es también llamado de enfoque por sectores.

Se puede aumentar aún más la fuerza de enfoque de las partículas haciendo que los sectores radiales en que quedan divididas las piezas polares tengan bordes de forma espiral.

Estos campos magnéticos permiten utilizar ciclotrones de frecuencia fija para energías de hasta 1 GeV.

El ciclotrón isócrono tiene así las ventajas de los dos tipos anteriores de máquina: la elevada intensidad de corriente del ciclotrón convencional, y la alta energía del sincrociclotrón; además, la nueva característica de poderse variar su energía en un amplio rango hace que disponer de un ciclotrón isócrono así equivalga a tener varios aceleradores de los tipos anteriores.

b) Componentes

El ciclotrón isócrono está compuesto de muchos elementos, todos los cuales son esenciales en la producción de un haz acelerado. Los cuatro componentes fundamentales son:

- 1) Fuente de Iones
- 2) Imán
- 3) Sistema de Radiofrecuencia
- 4) Sistema de Extracción

La fuente de iones proporciona las partículas; el electroimán; el campo magnético; el sistema de radiofrecuencia, la energía de aceleración, y el sistema de extracción proporciona el impulso que permite a las partículas abandonar su órbita dentro del ciclotrón.

1) Fuente de Iones - Se requieren partículas eléctricamente cargadas para interactuar con los campos eléctricos y magnéticos del ciclotrón. Entran a la fuente átomos neutros, que allí son desprovistos de sus electrones e inyectados radialmente en la zona de aceleración. Estas partículas pueden ser protones, deuterones, tritones, partículas alfa, u otros iones pesados.

2) Imán - El campo magnético del ciclotrón cumple dos funciones esenciales. Primero, obliga a las partículas a mantenerse en órbitas circulares, en las que puedan ser aceleradas repetidamente; segundo, enfoca el haz de partículas, es decir evita que este se disperse.

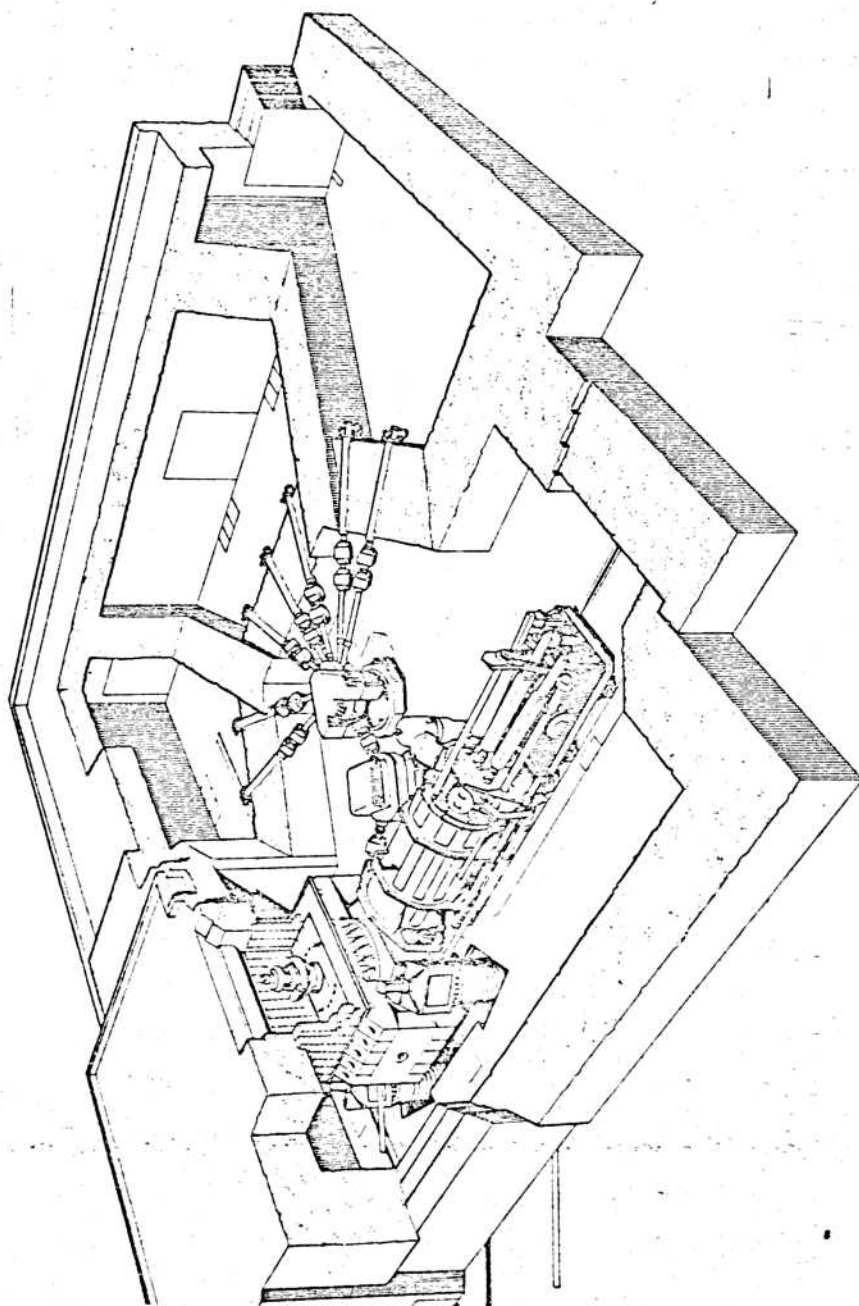
El imán de un ciclotrón de 10 a 130 MeV pesa aproximadamente 500 toneladas, y los polos tienen un diámetro del orden de 2.5 metros. El campo magnético es producido por corriente eléctrica continua que circula por bobinas instaladas en el electroimán y que requieren una energía del orden de 500 KW.

El complicado campo magnético del entrehierro se produce mediante varios tipos diferentes de bobinas. Las bobinas principales arriba mencionadas producen el campo magnético intenso, que llega a 20.000 Gauss y que hace rotar cíclicamente a las partículas.

Otras bobinas forman anillos concéntricos que cubren cada uno de los polos. Su objeto es crear un campo magnético corrector que mantiene constante el tiempo necesario para que las partículas hagan una revolución completa, no importa a qué distancia del centro se encuentren.

El ciclotrón se torna así isócrono (igual tiempo), permitiendo que el voltaje acelerador de radio frecuencia puede ser aplicado con una frecuencia constante durante la aceleración.

Las piezas polares del electroimán no son planas como en un ciclotrón convencional, sino que consisten de secciones de borde espiral, alternativamente elevadas y bajas (valles y colinas). Hay



CORTE DEL AREA EXPERIMENTAL DEL CICLOTRON ISOCRONO DE HARWELL, INGLATERRA

ocho sectores, (cuatro colinas y cuatro valles) dispuestos con sus vértices en el centro de cada polo.

Esta distribución resulta en un campo magnético que varía azimutalmente, y que enfoca el haz de partículas. Sobre los valles y colinas hay un tercer tipo de bobinas, que controlan el grado de enfoque del haz de partículas aceleradas.

Una cuarta clase de bobinas, ubicadas en varios lugares sobre la superficie de cada polo, proporciona una corrección para las inhomogeneidades del campo magnético, y además varían la forma de las órbitas iniciales.

3) El Sistema de Radiofrecuencia - La energía necesaria para la aceleración de las partículas la proporciona el sistema de Radio Frecuencia, que consiste de dos "dés" o cavidades huecas, excitadas independientemente por amplificadores separados, y un oscilador con un rango de frecuencias que vá generalmente de 5 a 25 MHz.

Cada dé está compuesta por placas de cobre. Las dos dés se insertan en el campo magnético del entrehierro, en forma diametralmente opuesta; las partículas son aceleradas por los voltajes alternos aplicados por el oscilador a las dés. El voltaje en las dés puede llegar a 80.000 ó 90.000 voltios.

4) El Sistema de Extracción - Una vez que las partículas tienen la energía deseada el sistema de extracción les dá un impulso para que abandonen el ciclotrón y pasen al sistema de transporte del haz.

El sistema de extracción consiste básicamente de un deflector electrostático que desvía el haz acelerado y lo hace pasar a través de un canal magnético. El canal magnético es un dispositivo que reduce el campo magnético en una pequeña región dentro del ciclotrón, permitiendo así a las partículas abandonar sus órbitas circulares y alejarse del ciclotrón.

Los cuatro sistemas descriptos: fuente de iones, electroimán, sistema de radio frecuencia, y sistema de extracción, realizan las operaciones básicas del ciclotrón. Se requieren sistemas adicionales por razones prácticas. Los más importantes entre estos son el sistema de vacío y el de enfriamiento.

C - CARACTERISTICAS DEL CICLOTRON A INSTALAR

Las características principales del ciclotrón isócrono a instalar son:

Energía de algunos de los iones a acelerar

Protones y Alfas:	10	a	130	MeV
Deuterones:	5	"	65	"
Tritio:	5	"	40	"
$^3\text{He}^{2+}$	10	"	170	"
$^{12}\text{C}^{4+}$	16	"	160	"
$^{14}\text{N}^{5+}$	15	"	210	"
$^{16}\text{O}^{5+}$	20	"	200	"
$^{20}\text{Ne}^{5+}$	20	"	170	"
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	40	"	80	"

Intensidad del Haz:

	Interno	Externo
Protones (μA)	100	40
Deuterones	100	40
$^3\text{He}^{2+}$	30	20
$^4\text{He}^{2+}$	30	20
$^{12}\text{C}^{4+}$	3	1

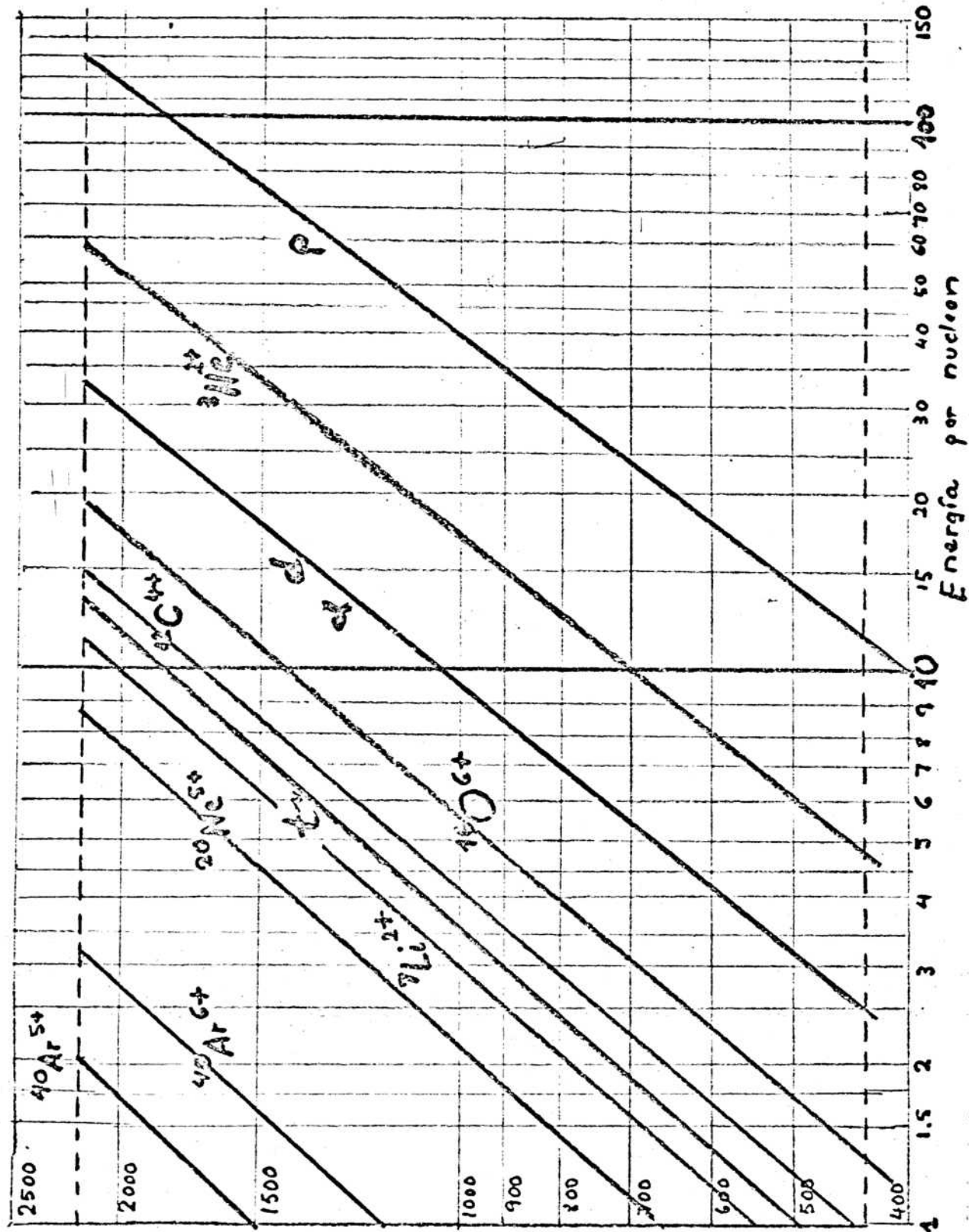
Propiedades del Haz Externo:

Emitancia (100 MeV protones)

Radial (m.m.m. rad) 20

ENERGIA DE LOS NUCLEONES EN FUNCION DEL PRODUCTO CAMPO MAGNETICO POR RADIO EN EL CICLOTRON PROYECTADO

$\bar{B}r$
(kGcm)



Axial	(m.m.m.rad)	25
Resolución en energía		0.3%

Neutrones:

Se pueden obtener haces de neutrones de energía variable con un flujo del orden de 10^{12} - 10^{14} neutrones/segundo.

Un sistema de analizadores magnéticos permitirá obtener un haz externo con una dispersión del orden de 5×10^{-4} para estudios de estructura nuclear.

Se instalará también un espectrógrafo magnético (tipo polo dividido) para analizar productos de reacciones con una resolución del orden de 10^{-4} (para $mE/Z^2 \leq 130$).

Existirá una fuente de iones polarizados para protones y deuterones.

VI - USOS DEL CICLOTRON ISOCRONO EN LAS INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNICAS.

El ciclotrón isócrono es el acelerador que permite mayor variedad de usos en las investigaciones científicas y técnicas, como quedó evidenciado en la Conferencia Internacional sobre "Usos del Ciclotrón en Química, Metalurgia y Biología," realizada en Oxford, Inglaterra, en Setiembre de 1969. Una idea de estas aplicaciones la puede dar la distribución del tiempo de irradiación de los ciclotrones de Harwell, Inglaterra, y Karlsruhe, Alemania, que son casos típicos en el uso actual de estos aceleradores.

Ciclotrón Isócrono de Harwell

Tema	% Tiempo Irradiación
Física Nuclear	15
Química Nuclear (Fisión)	15
Química Nuclear (Radioquímica)	15
Metalurgia	22
Producción de Isótopos	25
Desarrollo Aceleradores	11
Mantenimiento	11
Otros	7

Ciclotrón Isócrono de Karlsruhe

Tema	% Tiempo Irradiación
Física Nuclear	30
Física Neutrones	25
Metalurgia	10
Radioisótopos	15
Desarrollo Aceleradores	10
Mantenimiento	10

Los usos actuales del ciclotrón se pueden clasificar en los siguientes temas:

- 1) Estructura Nuclear
- 2) Física de Neutrones
- 3) Metalurgia y Daños por Radiación
- 4) Química de Radiaciones
- 5) Química Nuclear
- 6) Producción de Radioisótopos
- 7) Biología.

Se pasa a continuación a detallar cada uno de los mismos:

1) ESTRUCTURA NUCLEAR

El tipo de investigación en física nuclear que puede efectuarse mediante el ciclotrón isócrono se detalla a continuación:

- Problema del movimiento de partícula independiente; estados de una partícula en el modelo de capas; modelo óptico. Se requieren más datos experimentales para probar la exactitud de la descripción de partícula independiente en la medición del coeficiente de parentesco fraccionado de los estados de una partícula en un núcleo con doble capa cerrada. Los cálculos habituales de stripping involucran tantas aproximaciones que difícilmente puedan resolver este problema. En cambio parecen más promisorias las experiencias sobre resonancias análogas observadas por dispersión de protones o stripping a energías bien debajo de la barrera Coulombiana.
- Otro problema importante es la dependencia del potencial del modelo de capas con el estado estudiado, que algunas veces se menciona como dependencia de la velocidad o no-localidad del potencial. Se requieren más datos sobre estados de gran energía de unión para aclarar este panorama, ya que aún no se ha comprendido bien cómo es posible tener nucleones independientes ligados por 100 o más MeV, como surge de los análisis de datos experimentales disponibles.

Resulta oscuro además el origen del término imaginario en el potencial óptico y la posible estructura en las intensidades de ese potencial.

El término imaginario puede ser asociado con los llamados "door way states" que se acoplan al movimiento de la partícula incidente; podría quizá representar estados no específicos de partícula-agujero, o podría representar vibraciones colectivas cuadrupolares, octupolares u otras aún no identificadas. Aún no ha sido asignada la contribución relativa de cada uno de estos mecanismos.

Este problema tiene relación directa con la dependencia radial del potencial imaginario y con el problema más general de hasta qué punto es posible reemplazar los acoplamientos específicos por un término imaginario en el potencial de una partícula. Reacciones del tipo interacción directa con transferencia de una o más partículas y acoplamientos partícula-agujero permiten evaluar parámetros de gran valor para el estudio de modelos nucleares. Mediciones de polarización y sección total de reacción son de gran valor a tal fin.

El análisis de estos resultados en términos del modelo óptico y en base a DWBA permite enlazar ciertos resultados con el modelo de capas.

La existencia de conglomerados de nucleones dentro del núcleo formando estructuras estables requieren ser estudiados mediante reacciones con múltiple producción de partículas salientes y correlación angular y temporal de las mismas.

- El problema de algunos efectos de correlación entre partículas en el núcleo que han sido reconocidos como importantes en el estudio de la estructura nuclear: rotaciones y vibraciones de todo el núcleo; correlación entre pares de partículas dentro del núcleo.

Este último fenómeno aún no ha sido bien comprendido. El estudio de las reacciones con transferencia de dos partículas permite conocer este tipo de correlación. Esto permitirá (por primera vez) comprobar el efecto de apareamiento que ha sido usado hasta ahora por sus efectos sobre las energías de los diversos estados excitados, y para explicar estados con mezclas de diversas configuraciones que aparecen

en reacciones con transferencia de una partícula.

Un núcleo con simetría no esférica posee el movimiento rotacional y vibracional. El movimiento rotacional es perturbado por las fuerzas de Coriolis y centrífuga, las que a su vez pueden afectar la forma del núcleo.

Por ejemplo, un núcleo deformado en forma oblate se caracteriza por tener una completa alineación de los momentos angulares de todas las partículas que se hallan fuera de capas cerradas; la excentricidad cambia, pueden aparecer deformaciones no axiales y el "gap" de energía debida a la correlación de pares decrece. Aún no hay una evidencia directa sobre la importancia relativa de esas distorsiones sobre el movimiento intrínseco de los nucleones cuando el momento angular rotacional aumenta.

Midiendo las excitaciones intrínsecas es posible estimar el acoplamiento al movimiento rotacional; midiendo momentos y probabilidad de transición de estados rotacionales excitados es posible medir la variación de forma con la rotación.

Resulta mucho más difícil medir la variación de la correlación de pares con la frecuencia rotacional pero sería de gran valor ese dato.

- El estudio de las excitaciones intrínsecas de los núcleos deformados proveen "tests" de gran valor para nuestra comprensión de las relaciones entre los modelos de partícula independiente y colectivos. La evidencia del movimiento vibracional resulta de la existencia de transiciones multipolares eléctricas muy intensas que se presentan sistemáticamente en estados excitados, los que a su vez resultan ser los más fuertemente excitados en procesos que se cumplen por la interacción del campo nuclear de un proyectil con un núcleo blanco, tales como scattering inelástico de p , α , etc.

Así para el caso de vibraciones cuadrupolares de baja frecuencia sabemos que la excitación puede ser repetida (como se espera para el caso del modo colectivo para un bosón) y dichos estados han sido observados para excitaciones de dos y tres fonones.

- Mediciones de momentos cuadrupolares estáticos de primeros estados excitados 2^+ por medio de excitación coulombiana múltiple han mostrado que el movimiento vibracional no puede ser descrito en términos de un oscilador armónico con cierto grado de anarmonicidad, y por tanto en completa oposición con la imagen de vibración armónica alrededor de un estado esférico de equilibrio.

Cuestiones tales como:

- ¿Cuál es la participación relativa del neutrón y del protón en los modos de vibración dipolar, cuadrupolar y octopolar?
- Existe alguna correlación entre los spines y el movimiento orbital de los nucleones que participan en la vibración?
- ¿Cómo se afecta la correlación de pares por el movimiento vibracional?

resultan de gran actualidad:

Estas cuestiones pueden ser estudiadas por medio del scattering inelástico con intercambio de cargas por medio de efectos de polarización en scattering inelástico y por medio de reacciones con transferencia de dos nucleones.

Del estudio del modelo colectivo y de su comprensión profunda resultará sin duda la interpretación del fenómeno de fisión asociado a modos vibracionales con grandes variaciones en la forma del núcleo.

- La excitación coulombiana con iones pesados provee también una excelente herramienta para estas cuestiones y para el estudio de procesos fotonucleares.

Los efectos de correlación en el núcleo pueden estudiarse mediante configuraciones con 2, 3 ó 4 partículas fuera de capas cerradas interactuando entre sí y con el "core". Observando todos los datos experimentales disponibles al respecto la situación puede resumirse mediante esta pregunta clave: ¿Cuándo una capa cerrada es cerrada?

Así por ejemplo, es posible que muchos aspectos de los espectros resultantes de esa configuración se expliquen en términos de las pocas

partículas extra "core", pero además se encuentra alguno que otro estado de baja excitación, o alguna transición muy favorecida que requiere necesariamente una explicación en términos de excitación del "core" (de capas cerradas) junto con las partículas extra.

Parece hoy bien establecido que la baja energía de excitación de esos estados está asociada con deformaciones colectivas. La descripción detallada de estados deformados y esféricos aún no se ha logrado completamente, y representa el problema de transición entre estados debido a unas pocas partículas extra "core" y estados debidos a movimientos colectivos.

- La parte de altas energías de excitación de todo espectro continúa siendo desconocida. Todo nuestro conocimiento sobre efectos de correlación en el núcleo se refiere a niveles de baja excitación. Seguramente por encima de algunos MeV de excitación los modos que conocemos para baja excitación comienzan a mezclarse y los números cuánticos que los caracterizan pierden significado.

En qué punto es el número cuántico K (que caracteriza bandas rotacionales) destruido por las perturbaciones de Coriolis de las bandas vecinas?

Se desarrollan entonces nuevos modos colectivos?

Cuáles son los conceptos apropiados para discutir una región del espectro con muchos cientos de niveles?

Estos son algunos de los interrogantes que surgirán cuando las energías incidentes disponibles alcancen regiones de excitación no exploradas todavía, requiriéndose entonces el modelo estadístico para su descripción y el uso de los modernos aceleradores que se han expuesto

2) FISICA DE NEUTRONES

El Ciclotrón Isócrono como fuente de neutrones

Fuente continua de neutrones.

El ciclotrón isócrono puede producir un flujo continuo de neutrones utilizando un blanco de uranio o tungsteno y el haz de deuterones o protones. Un proton de 100 MeV o un deuteron de 50 MeV produce aproximadamente 1 neutron/partícula.

Con un haz externo de 50 μ A se tendrá

$$50\mu A \times 6 \times 10^{12} \frac{\text{part}}{\mu A \text{ seg}} \times 1 \frac{\text{neutron}}{\text{part}} = 3 \times 10^{14} \text{ neutrons/seg}$$

Estos neutrones rápidos tienen un flujo del orden de 6×10^9 neutrones/cm²seg. a una distancia de 1 metro del blanco externo. Pero el hecho de que se trata de un blanco externo permite colocar el material a irradiar a una distancia menor, si se lo considera necesario. Así, a 10cm del blanco hay un flujo de 6×10^{11} neutrones/cm² seg.

USOS

Producción de radioisótopos.

Daños por radiación en sólidos.

Fuente pulsada de neutrones

El ciclotrón isócrono como fuente pulsada de neutrones se utiliza cada vez más para la espectroscopía de neutrones rápidos. Las mejoras en las técnicas de tiempo de vuelo son tales que en muchos casos se pueden resolver grupos de neutrones en un espectro con una precisión comparable a la del análisis de partículas cargadas mediante espectrógrafo magnéticos.

El haz acelerado por el ciclotrón no es continuo, sino que tiene una microestructura, formada por pulsos de 1 nseg separados por 2 nseg.

Mediante un deflector que se coloca en la cámara de aceleración, se agrupan estos pulsos de modo que queden más espaciados en el tiempo.

Así, por ejemplo, en el ciclotrón de Karlsruhe se obtienen 2×10^4 pulsos/seg con una intensidad promedio de $3 \mu\text{A}$.

En cada pulso se producen:

$$3 \mu\text{A} \times 6 \times 10^{12} \frac{\text{part}}{\mu\text{Aseg}} \times 1 \frac{\text{neutron}}{\text{part}} \times \frac{1 \text{seg}}{2 \times 10^4 \text{pulsos}} \approx 10^9 \frac{\text{neutron}}{\text{pulso}}$$

De modo que por segundo se produce una intensidad media de

$$10^9 \times 2 \times 10^4 = 2 \times 10^{13} \text{ neutrones/seg.}$$

La intensidad instantánea, teniendo en cuenta que el pulso tiene una duración de 10^{-9} seg:

$$I_p = \frac{10^9 \text{ neutr}}{10^{-9} \text{ seg}} = 10^{18} \frac{\text{neutron}}{\text{seg}}$$

Estas cifras muestran que el ciclotrón como fuente pulsada de neutrones tiene una performance sumamente impresionante.

El uso principal de la misma es para hacer espectrometría de tiempo de vuelo de neutrones rápidos.

Pasaremos a describir rápidamente los parámetros esenciales de los espectrómetros de tiempo de vuelo:

El tiempo de vuelo τ de neutrones a lo largo de una trayectoria L depende de la energía cinética E de los neutrones:

$$\tau = 72.3 L E^{-1/2}$$

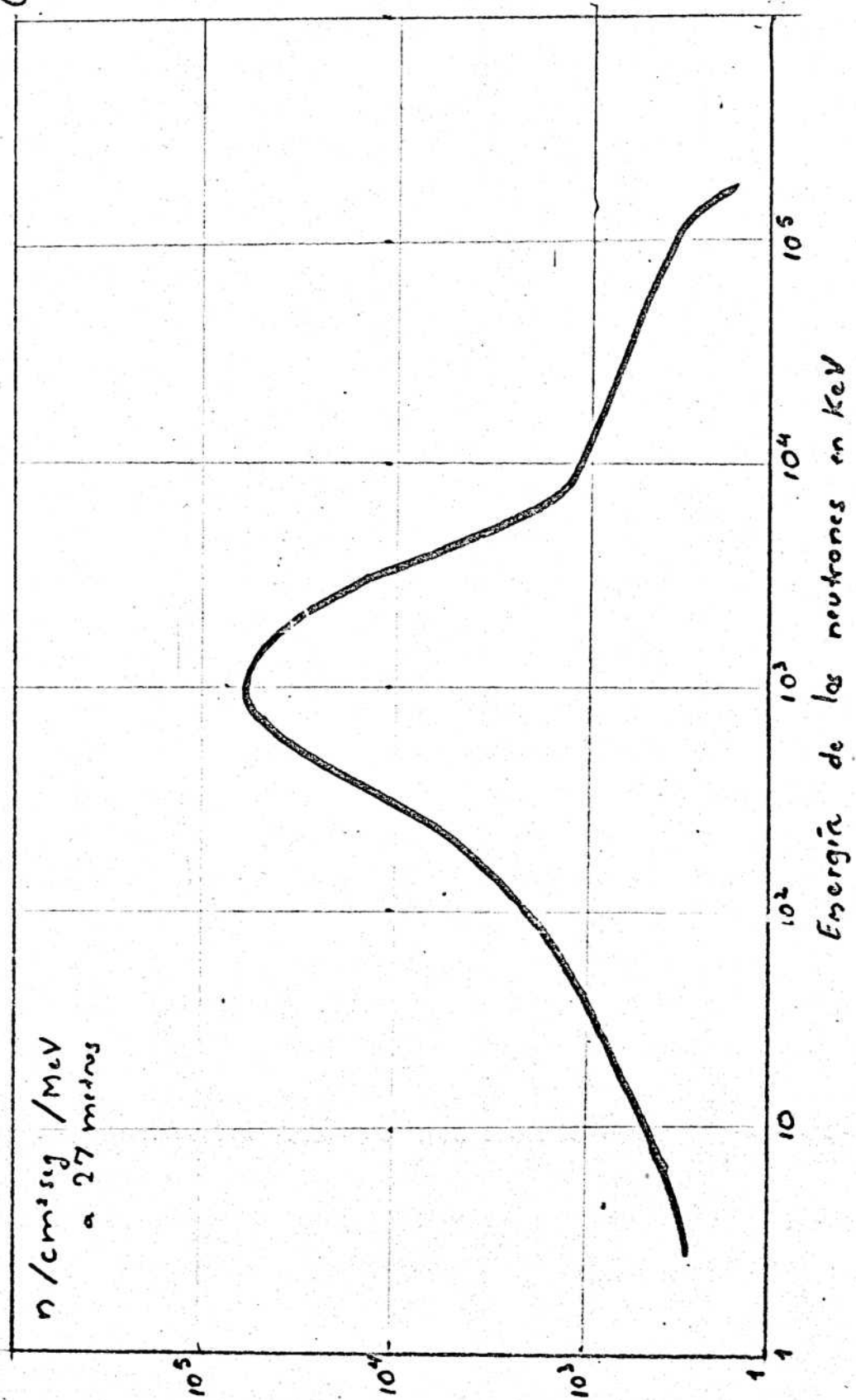
τ (nseg)
 L (m)
 E (MeV)

El poder resolutor de este espectrómetro de tiempo de vuelo, $\frac{\Delta E}{E}$ es proporcional a la resolución en tiempo $\frac{\Delta \tau}{\tau}$

Supongamos que se desplaza un neutrón de 1 MeV en un tubo de 100 metros de largo.

Será entonces $\tau = 7230$ nseg. Si $\Delta \tau$, que depende de la duración del pulso del acelerador, del tamaño del detector, y del equipo electrónico, es de 1 nseg, será $\frac{\Delta E}{E} \approx 1.5 \times 10^{-4}$.

ESPECTRO DE NEUTRONES DE UN CICLOTRON ISOCRONO DE 50 MEV
(HARWELL)



Cuáles son las limitaciones en resolución de energía obtenidas con el método de tiempo de vuelo?

Hay factores tales como el espesor del blanco y la dispersión intrínseca de energía del haz.

Un factor especialmente importante es el que afecta la medición del tiempo. Como la resolución en energía depende de $\Delta\tau/\tau$, podemos aumentarla aumentando τ (o sea aumentando el largo L), o disminuyendo $\Delta\tau$. Teniendo en cuenta que el flujo de neutrones varía inversamente con el cuadrado de L, se ve la ventaja de disminuir $\Delta\tau$.

Es de importancia recordar que ΔE es proporcional a $E^{3/2}$. Por ejemplo si el largo del camino L es 5m y $\Delta\tau = 1$ nseg, al pasar E de 1 MeV a 20 MeV el ΔE pasa de 6 KeV a 500 KeV.

Si se deseara tener un ΔE de 60 KeV para $E=20$ MeV, se requiere un L de 40 metros.

PARAMETROS DE FUENTES DE NEUTRONES INTENSAS

F a c i l i d a d	n por m W seg	τ (seg)	f (seg. ⁻¹)	I promedio (seg. ⁻¹)	I pico (seg. ⁻¹)	N por pulso
LINAC HARWELL (Booster)	2×10^{-6}	1×10^{-7}	600	8×10^{13}	1×10^{18}	1×10^{11}
LINAC G.A. (Booster rápido pulsado)	3×10^{16}	1×10^{-5}	100	5×10^{17}	5×10^{20}	5×10^{15}
SCICLOTRON HARWELL	7×10^{16}	1×10^{-8}	200	1×10^{13}	5×10^{18}	5×10^{10}
CICLOTRON ISOCRONO KARLSRUHE	8×10^{16}	2×10^{-9}	2×10^4	2×10^{13}	7×10^{17}	1×10^9
REACTOR I.B.	3×10^{16}	4×10^{-5}	83	2×10^{14}	6×10^{16}	2×10^{12}

Proceedings International Conference, Nuclear Structure. (Antwerp 1965), pag. 468.

USOS DE LA ESPECTROMETRIA DE TIEMPO DE VUELO

1) Física Nuclear

La mayor parte de las reacciones nucleares se han hecho con haces incidentes de partículas cargadas. Es de importancia comparar esos resultados con los obtenidos cuando se utilizan neutrones.

El campo de la espectroscopía de neutrones permite estudiar los niveles correspondientes a excitaciones correspondientes a la energía de unión de los neutrones, donde normalmente hay gran cantidad de niveles; así en el caso del ^{238}U , el espaciado de niveles es del orden del eV para una excitación de 5 MeV.

Midiendo el espectro de energía de los rayos emitidos a continuación de la captura neutrónica, se pueden determinar los estados excitados cercanos al fundamental. Este campo ha sido ya estudiado con neutrones térmicos y resta investigar lo que ocurre con neutrones de energía de resonancia.

Las propiedades de niveles excitados que pueden determinarse con la espectroscopía de tiempo de vuelo son:

- a) Espaciado entre niveles, D .
- b) Funciones intensidad de neutrones, por ondas s y p.
- c) Ancho medio de radiación $\bar{\Gamma}_\gamma$
- d) Ancho medio de fisión, $\bar{\Gamma}_F$ y $\bar{\Gamma}_{F/D}$
- e) Radio del potencial de scattering, R'

Otros factores a determinar corresponden a los procesos de captura directa, propiedades de niveles cercanos al fundamental de captura neutrónica por resonancia, etc.

2) Estudio de parámetros de reactores

Las mediciones hechas con esta técnica proporcionan datos para el diseño de reactores nucleares. En general se los puede encuadrar dentro de las cinco categorías siguientes:

a) Espectros dentro de reticulados.

La aplicación más útil del tiempo de vuelo a los reticulados de reactores está en la medición del espectro de neutrones.

Una de las partes menos desarrolladas de la física de reactores rápidos es la que concierne a la predicción del espectro de neutrones exacto dentro del reactor. Si bien hay bastante hecho en la región térmica, y la medición de espectros en la zona epitérmica y de resonancia, ~~en la que~~ por tratarse de tiempo de vuelo con neutrones rápidos, el ciclotrón isócrono es el acelerador más adecuado.

b) Datos más exactos para isótopos fisionables.

Se requiere medir σ_{2200} y $\sigma(E)$, tanto para fisión como para captura, y además medición de las cantidades η , ν y α .

c) Datos para absorción de productos de fisión

d) Datos para absorción y dispersión en materiales estructurales

En el caso de los reactores rápidos las mediciones de absorción de productos de fisión no son tan importantes como para los reactores térmicos, pero en cambio los datos para materiales estructurales son de mayor interés.

Además los datos requeridos para reactores rápidos involucran procesos, tales como el scattering inelástico de neutrones, que son más complejos, y para los que hay menos datos que para los reactores térmicos.

e) Para reactores rápidos y térmicos, datos de scattering.

Estos incluyen $\sigma(E, E')$ y $\sigma(E, E', \theta)$.

3) FISICA DE LOS ESTADOS SOLIDO Y LIQUIDO

La dispersión de neutrones térmicos presenta muchas oportunidades para la investigación de la estructura y movimiento de átomos en sólidos y líquidos. Los neutrones térmicos son especialmente valiosos porque su longitud de onda es del orden de $2 \text{ \AA}$ y su energía es 0.025 eV , o sea del mismo orden que el espaciado y la energía vibracional en la materia.

En muchas investigaciones es más importante determinar la estructura del sistema atómico y no su dinámica. Esos estudios se realizan con rayos X y con neutrones "rápidos", midiendo en este último caso sea la distribución angular de los neutrones dispersos con un espectrómetro de cristal doble axial, o con un espectrómetro de tiempo de vuelo.

Haciendo mediciones de dispersión inelástica de un haz de neutrones mono energéticos sobre un cristal único, se puede inferir la relación entre el número de onda y la energía del fonón, y determinar así las fuerzas inter atómicas en la red.

El mismo principio puede aplicarse a la dispersión inelástica de neutrones en un líquido.

3) METALURGIA NUCLEAR

En el diseño de reactores nucleares es de gran importancia el conocimiento del daño por radiación en los elementos combustibles y materiales constructivos, y se ha dedicado mucho esfuerzo a estudiar las propiedades mecánicas de los materiales irradiados.

Se ha comprobado en centros nucleares, como Harwell, Oak Ridge y Saclay, que el ciclotrón isócrono es una poderosa fuente de irradiación para determinar estos daños, en muchos casos más adecuada que los reactores destinados específicamente a estudios. Esto se debe a que:

- 1) Un ciclotrón que emite un haz de iones de decenas de microamperes de intensidad y decenas de millones de electrón volts de energía, entrega varios kilowatts al blanco bombardeado; por lo tanto entrega energía a una velocidad mucho mayor que el reactor promedio, acortando así el tiempo necesario para provocar el daño por radiación en un experimento. Así, si se quiere determinar el daño por radiación que se tendrá en un reactor de potencia después de un uso de 20 años, se coloca el material a estudiar en un reactor destinado a ensayar materiales (Materials Testing Reactor), cuyo flujo de neutrones es 10 veces mayor, y por lo tanto el daño podrá estudiarse al cabo de 2 años. La entrega de energía del ciclotrón hace que éste produzca el mismo daño en un día.
- 2) El equipo requerido para irradiaciones en un ciclotrón es mucho más simple que para las que se hacen en un reactor, donde la necesidad de montar muestras en un espacio limitado dentro del núcleo, de conducir dispositivos hacia éstas, y de evitar la salida de neutrones del agujero por el que entra la muestra, conduce a diseños complejos y costosos.
Las medidas de seguridad son también menos estrictas en las irradiaciones en un acelerador.

- 3) Las irradiaciones con partículas cargadas activan menos las muestras que las se efectúan en un reactor, y la activación de los equipos adyacentes a la muestra es también considerablemente menor. En una irradiación con el haz externo del ciclotrón el calentamiento de la muestra puede restringirse a ésta y no al recinto que la rodea, como ocurre en un reactor. Estos factores permiten usar una variedad mucho mayor de materiales en el acelerador.

Actualmente se están utilizando los ciclotrones isócronos en tres tipos de experimentos:

- a) Implantación de iones
- b) Daño por radiación con iones positivos o neutrones
- c) Channeling de iones.

Pasaremos a describir algunas experiencias en ejecución en diversos laboratorios del mundo.

a) Implantación de iones

Se utiliza esta técnica para simular la formación de productos de reacciones nucleares en los elementos combustibles y estructurales en un reactor; en éste el flujo de neutrones produce reacciones (n,p) y (n,α) que tienen una concentración prácticamente uniformemente en dichos materiales. Se ha comprobado que concentraciones de helio que varían entre 10^{-7} y 2×10^{-5} reducen severamente la ductilidad de materiales tales como el acero inoxidable 304, material para reactores rápidos de metal líquido.

En Harwell, donde éstas experiencias han sido hechas por un número considerable de años, se comprobó que las microburbujas de Helio formadas por las reacciones (n,α) en los elementos de un reactor son idénticas a las producidas implantando Helio con un ciclotrón, y que 10 años de radiación en un reactor provocan un daño estructural equivalente al logrado irradiando la muestra durante unas horas con el haz del ciclotrón.

En varios grupos de metalurgia nuclear hay programas de implantación de iones de diversos elementos; así, por ejemplo, en Harwell se están implantando iones de carbono en molibdeno, para estudiar el efecto de cantidades controladas de impurezas intersticiales.

La elección de la partícula para un tipo determinado de daño por radiación depende de muchos factores: así, para un daño uniforme en profundidad usan iones de energía media o alta.

b) Daños por radiación con neutrones o iones positivos. Uso de neutrones:

Se utilizan neutrones o partículas energéticas como proyectiles para desplazar átomos de su posición en la red cristalina del material irradiado.

Un haz de 50 μA ^{de} protones de 100 MeV o ~~de~~ ^{de} deuterones de 50 MeV produce aproximadamente 3×10^{14} neutrones rápidos por segundo. Estos neutrones se pueden usar para hacer daño por radiación en materiales. El equipo requerido para la irradiación con haz externo en el ciclotrón es mucho más simple que el que se necesita para una irradiación en el reactor, donde hay la necesidad de montar muestras en un volumen limitado del núcleo. En el haz externo del ciclotrón no hay limitación en el espacio, tamaño de la muestra, ni temperatura, y consiguientemente la ejecución de la irradiación requiere dispositivos mucho menos complejos.

Uso de iones positivos:

En diversos ciclotrones se utilizan haces de hidrógeno, helio, litio y otros elementos. En Harwell y en Oak Ridge se ha llegado en la tabla periódica hasta acelerar N, O y Ne.

Estos iones se usan como proyectiles para desplazar átomos de la red cristalina del material investigado; eligiendo cuidadosamente el tipo y energía del ión, se puede simular el daño producido por neutrones rápidos o epitérmicos en un reactor.

1) Producción de defectos puntuales

El haz del ciclotrón entrega kilo-watts de energía a un blanco, o sea dosis totales locales equivalentes a las de la vida entera de un reactor en pocas horas. Un estudio comparativo realizado en Harwell muestra que el daño por radiación producido en un reactor diseñado para probar materiales, como el DIDO, se mide en 2×10^{-11} átomos/at.seg. Un ciclotrón que acelere un haz de protones de 10 μ A de intensidad y 50 MeV causa un daño que llega a 2×10^{-6} átomos/at.seg, o sea 100.000 veces mayor.

2) Experimentos de Sputtering a alta energía

Se puede obtener información de secuencias de colisiones atómicas producidas por partículas de alta energía por el estudio de sputtering de átomos proyectados desde la superficie de cristales.

c) Estudios de channeling

Las investigaciones que se están realizando muestran ejemplos de partículas que producen menos daño del que puede esperarse normalmente, debido a su penetración a lo largo de ciertas direcciones en la red cristalina, en que hay canales. Estos estudios se hacen midiendo el rango de las partículas en función de la orientación del cristal, o midiendo la amplitud del scattering cuando rota el cristal. En este caso representando la amplitud en función del ángulo de rotación se ven una serie de picos que corresponden a canales a lo largo de los que hay una transmisión preferencial del haz. Con el ciclotrón se emprenden experiencias a un rango mayor de partículas y a flujos de radiaciones mayores.

4) QUIMICA DE RADIACIONES

Pasaremos a discutir tres líneas de investigación de entre las varias posibles en éste campo:

- a) Química de radiación de sistemas heterogéneos
- b) Radiolisis de gases
- c) Efectos de transferencia lineal de energía

a) Sistemas heterogéneos

El diseño de reactores depende de un conocimiento de los efectos de la radiación en los sistemas componentes de un reactor. Hay varios tipos de sistemas heterogéneos que pueden formar parte de un reactor; por ejemplo, la reacción entre CO_2 y grafito en reactores moderados con grafito y enfriados a gas; la corrosión de metales en agua o vapor en reactores con agua; la corrosión de metales en gases de enfriamiento en otros reactores. Todos estos efectos ocurren en un intenso campo de radiación γ y neutrones, y por ello se emplea bastante tiempo en estudiarlos por irradiación en reactores. Es difícil obtener una comprensión fundamental del proceso, ya que tales irradiaciones se efectúan sobre el sistema total, y en general es difícil determinar si los efectos observados se deben a:

- 1) Daño producido en el sólido que aumentan su reactividad.
- 2) Producción de especies reactivas en la fase líquida o gaseosa que reaccionan con el sólido.
- 3) Efectos específicos en la interfase entre dos fases, como por ejemplo en una capa absorbida en el sistema gas-sólido.

La cinética química muestra que pueden ocurrir cualquiera de los tres efectos.

Para aclararlos se puede irradiar en el reactor variando la geometría y cambiando el flujo de la fase móvil, pero la interpretación de los resultados sigue siendo difícil. Si en cambio se usa un acelerador se puede bombardear el sólido solo o la fase gas o líquido antes de que esté en contacto con el sólido, y con las altas dosis obtenibles se pueden producir concentraciones de estado estacionario apreciables del reactivo.

Además, enfocando el haz, se puede restringir la zona irradiada a una región muy estrecha que sea rasante a la superficie entre el sólido y la otra fase.

Un ejemplo típico de estos estudios es el de la reactividad del óxido de magnesio, que normalmente no actúa químicamente con el oxígeno; después de ser irradiado en el vacío con rayos γ o neutrones rápidos, absorbe fuertemente al oxígeno. Se comprobado que los γ producen la ionización y población de los defectos ya existentes en el óxido de magnesio, mientras que los neutrones rápidos producen la población de los defectos y además causan nuevos defectos no solamente en la superficie, sino en todo el volumen.

El ciclotrón se usa para estudiar el daño producido y la reactividad resultante cuando se varía la energía y masa de las partículas bombardeantes, y estudiar así el daño en función de la profundidad.

Usando iones adecuados se pueden introducir iones de impurezas, estudiando su efecto en la reactividad; por ejemplo bombardeando MgO con iones de O, Si con iones de C, etc.

b) Radiolisis de gases

La dosis que se puede aplicar con un acelerador es mayor que la obtenible con fuentes γ o con la radiación $(n+\gamma)$ de reactores, y se puede así estudiar reacciones simples de descomposición donde con dosis bajas no se pueden obtener concentraciones medibles de los productos de reacción.

c) Efectos de transferencia lineal de energía

La deposición de energía de la radiación ionizante cuando atraviesa la materia ocurre en volúmenes discretos ("spurs"). Dentro de éstos se produce ionización y excitación y los iones o especies excitadas pueden reaccionar para producir átomos y radicales, lo que produce un cambio químico. A medida que crece la densidad de ionización, crece la concentración local de iones y especies excitadas, y eso pro-

duce un cambio cuantitativo en los productos de reacción observados cuando se pasa de radiación de partículas livianas (γ , electrones) a más pesadas (protones, alfas).

Faltan datos en la zona de radiación de partículas pesadas, que pueden determinarse mediante los haces de iones pesados del ciclotrón.

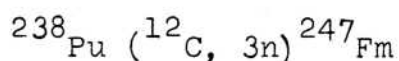
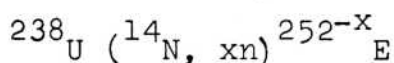
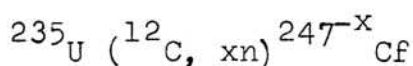
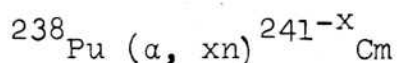
5) QUIMICA NUCLEAR

Se puede dividir el campo en tres categorías principales:

- a) Preparación de nucleídos de elementos pesados para estudios de Química Nuclear o de trazadores.
- b) Análisis por activación
- c) Estudios del proceso de fisión
- d) Química de átomos calientes.

a) Preparación de nucleídos de elementos pesados

Se preparan nucleídos de actínidos deficientes en neutrones bombardeando con iones positivos del haz externo del ciclotrón. Así, se utilizan las reacciones:



Mediante bombardeos de larga duración pueden prepararse también nucleídos de vida larga, útiles como trazadores para estudios químicos tales como el ^{235}Np , ^{236}Np , ^{236}Pu , ^{209}Po y ^{208}Po .

Un haz de 50 μA de protones de 50 MeV produce 1mc de ^{235}Np en 18 horas de irradiación, 1mc de ^{236}Pu en 40 horas y 1mc de ^{208}Po en 2 horas.

Se podrían colocar blancos rasantes en el haz externo, de modo de tener un área de 3 a 5 cm^2 .

La cantidad útil obtenible en un área de 3 cm^2 sería de 10 gramos para protones y 1 gramo para deuterones. La producción en el blanco de productos de fisión con una actividad de hasta 50 curies requiere la manipulación $\beta - \gamma$ en una caja blindada, lo que requerirá la instalación de un laboratorio caliente contiguo al ciclotrón.

b) Técnicas de análisis por activación

El uso de un ciclotrón ofrece varias posibilidades para el análisis por activación que no ofrece el reactor.

Una posibilidad es la activación por neutrones rápidos, utilizando el haz externo o interno sobre un blanco de berilio o tantalio. La otra posibilidad es hacer activación con partículas cargadas, utilizando el haz externo.

En este caso el espectro obtenido es mucho más complicado que para la irradiación con neutrones, debido a que ocurren mucho más reacciones nucleares. Pero la técnica de análisis por activación con neutrones no puede ser aplicada fácilmente a elementos livianos tales como C, O y N. Si se dispone de ambos tipos de haz, se tiene una variedad infinita de posibilidades.

c) Estudios de procesos de fisión

Se puede utilizar el ciclotrón para obtener información sobre rendimientos independientes de fisión para nucleidos de vida corta, y sobre sus espectros β y γ . Se pueden hacer separaciones rápidas, mediante un separador electromagnético de isótopos, y determinar características para isótopos muy alejados de la línea de estabilidad.

El ciclotrón, con su energía elevada y corriente intensa es muy adecuado para estudiar estos nucleidos, y determinar la distribución de masa y energía cinética de los fragmentos de fisión, y para detectar y medir los isómeros de fisión.

d) Química de átomos calientes

La gran ventaja del ciclotrón con respecto a otros aceleradores es que proporciona un flujo de neutrones rápidos muy alto y con energías suficientemente elevadas como para dar buen rendimiento de ^{11}C , ^{13}N y ^{18}F .

La química de átomos calientes del carbono ha sido estudiada extensamente, en base a la reacción $^{14}\text{N} (n,p) ^{14}\text{C}$, lo que requiere la adición de un compuesto de nitrógeno, que complica el sistema químico, y requiere además la irradiación en un reactor, lo que causa un serio daño por radiación. El uso de la reacción $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ posibilita estudiar reacciones de átomos calientes de carbono en un

sistema con un solo componente químico, y evitar así la mayor parte del daño por radiación.

El uso de ^{11}C es importante en la química del átomo caliente de compuestos orgánicos.

Es de interés también el uso del ^{13}N y el ^{18}F , para estudiar compuestos de amonio, hidrazina, nitratos y compuestos fluorados.

6) PRODUCCION DE RADIOISOTOPOS

Los ciclotrones fueron los principales productores de radioisótopos hasta el fin de la segunda Guerra Mundial.

El desarrollo subsiguiente de los reactores nucleares trajo aparejada la producción de radioisótopos mucho más abundante y menos costosa. Pero el creciente uso de preparaciones radioactivas hace que nuevamente se utilicen ciclotrones para su producción, en especial de aquellos radiosótopos que no pueden ser producidos en el reactor con actividad específica suficiente, como el ^{65}Zn , ^{74}As o aquellos que producidos en el reactor tienen propiedades nucleares desfavorables para utilizarlos como trazadores (vida media muy corta o larga, decaimiento inadecuado), como ^{22}Na , ^{52}Mn , ^{48}V , ^{85}Sr , ^{57}Co .

Por otra parte, cuando se requiere un isótopo de vida media no muy corta, en cantidades muy pequeñas, su producción en el ciclotrón puede ser más barata que en el reactor.

En base a los datos publicados por el Directorio Internacional de Radioisótopos, OIEA (1962) sabemos que los isótopos producidos comercialmente por ciclotrones en el mundo son:

Be^7 , ^{22}Na , ^{28}Mg , ^{26}Al , ^{48}V , ^{52}Mn , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{67}Ga , ^{58}Ge , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{181}W , ^{195}Au , ^{206}Bi , ^{207}Bi .

Todos estos tienen vidas medias de días hasta años de duración. En cuanto a los isótopos de vida corta, de algunos minutos hasta horas de duración, utilizados en la medicina, se los detalla en el capítulo correspondiente a la biología.

7) BIOLOGIA

Los haces de protones e iones pesados de alta energía que proporciona el ciclotrón isócrono tienen muchas aplicaciones en investigaciones biológicas asociadas con las propiedades de ionización específica de estas partículas. Se los utiliza en:

- a) Estudio del efecto de haces de partículas cargadas de alta energía sobre diferentes tejidos animales, para su posterior análisis histológico, e histoquímico.
- b) Producción de radioisótopos de vida muy corta para usos médicos. Es evidente el creciente uso de estos isótopos por parte de los médicos debido a las ventajas siguientes:
 - 1) La dosis que recibe el organismo es considerablemente menor que cuando se utilizan isótopos de vida larga.
 - 2) Se pueden suministrar dosis altas, lo que trae aparejada una mayor precisión en las mediciones.
 - 3) Se puede repetir la aplicación con mayor frecuencia.
 - 4) Los problemas de contaminación del lugar y las medidas de seguridad son mínimas.

La lista que sigue, basada en el artículo de Clark et al. en *Nucleonics* 25 (1967) 54, detalla algunos de los radioisótopos producidos en el ciclotrón de Hammersmith, y sus aplicaciones médicas.

Radioisótopo

Aplicación Médica

CO_2^{15}

Detección de shunts del corazón y medición de flujo sanguíneo regional del pulmón.

N_2^{13}

Ventilación regional del pulmón y flujo sanguíneo.

C^{11}O_2

Pozos de CO_2 y control de ventilación.

C^{11}O

Volumen sanguíneo.

F^{18}	Detección de lesiones óseas.
KBF_4^{18}	Mapas cerebrales.
Cs^{130}	Flujo coronario y mapas del corazón
I^{123}	Estudio de tiroides
Fe^{52}	Absorción de hierro y estudio de médula
Cu^{64}	Alta actividad específica
Kr^{81m}	Solución de gas inerte para estudios de flujo sanguíneo.

VII - DATOS Y CARACTERISTICAS DEL PROYECTO

Los recintos e instalaciones de apoyo para el acelerador, hacedores externos y áreas experimentales consistirán de:

1. Un edificio para la facilidad experimental, apropiado para extensiones futuras, que contendrá el acelerador y las áreas experimentales.
2. Un conjunto de oficinas, laboratorios y talleres, colocado de manera tal de dejar libres las futuras extensiones de la facilidad experimental. Este conjunto deberá quedar completado antes de la facilidad experimental principal para albergar permanentemente el equipo de desarrollo de la facilidad para mejor eficiencia de la etapa de construcción del acelerador.

Se pasa a detallar las características pertinentes del proyecto

a) Area Requerida

- Ciclotrón:

Rectángulo de $(46 \times 55) \text{ m}^2 = 2.500 \text{ m}^2$

Está compuesto de las siguientes áreas:

- 1) Recinto del ciclotrón $(21 \times 13) \text{ m}^2$
- 2) Area experimental $(14 \times 9) \text{ m}^2$
- 3) Area experimental $(14 \times 9) \text{ m}^2$
- 4) Area espectrógrafo magnético $(15 \times 20) \text{ m}^2$
- 5) Area grupo Generador
- 6) Area de control, en un primer piso ubicado sobre el área 5)
- 7) Subsuelo, debajo del área 5), para la sala de bombas.
- 8) Subsuelo, debajo de las áreas 1) a 4).

Las paredes que separan el recinto del ciclotrón de las áreas experimentales y espectrógrafo magnético tienen 3m de espesor, y son de hormigón denso en algunas partes.

El edificio del ciclotrón está rodeado de un muro de tierra que hace de blindaje.

El recinto del ciclotrón tiene una altura de 9 metros. El subsuelo tiene 3 metros de altura útil.

- Edificio laboratorios, facilidades auxiliares y zona de control de seguridad.

Está adosado al del ciclotrón formando una L. Tiene 2 plantas, con un área de (25×80) m² cada una. En la planta baja de este edificio estará el taller mecánico, taller de electrónica, depósitos de materiales, laboratorios de: radioquímica, de análisis por activación, de preparación de blancos, de detectores de estado sólido y laboratorios auxiliares, además del área de control de seguridad.

En la planta alta: biblioteca y sala de seminarios, cuartos de los usuarios del ciclotrón, oficina de ingeniería electrónica. La altura de este edificio será de 8 a 9 metros.

- El área total ocupada por los dos edificios es entonces de 4.500 m². Hay 6.500 m² cubiertos.

b) Altura de Edificios

Ambos edificios tendrán una altura máxima de 9 metros.

c) Cargas Concentradas

El ciclotrón, de 500 toneladas de peso, tiene una base de aproximadamente 8 x 3 metros.

d) Piezas más pesadas

El espectrógrafo magnético y el imán desviador tienen un peso de 20 toneladas cada uno, con una base de aproximadamente 2x2 m.

e) Requerimientos de agua de refrigeración

Total: 30 m³/h de agua filtrada.

Este caudal se utilizará para disipar el calor del sistema primario de refrigeración del ciclotrón para el sistema de aire

acondicionado (conectado separadamente), y para los sistemas primarios de refrigeración del espectrógrafo magnético, imán deflector múltiple, cuadrupolos.

La temperatura del agua de refrigeración debe estar entre 15 y 19°C; si es necesario se proveerá de una máquina enfriadora con ventiladores eléctricos para el circuito primario.

El sistema de refrigeración secundario del ciclotrón es un circuito cerrado.

El agua en este sistema se enfría mediante una unidad refrigerante, el agua pasa, luego de circular por las bobinas del ciclotrón, a través del intercambiador de calor del sistema primario, y retorna a la unidad refrigerante a través de la bomba de recirculación.

f) Requerimientos de fuerza motriz

El consumo estimado es de 1.600 kVA.

La instalación de fuerza motriz comprende 2 grupos generadores de corriente continua de 800 kVA para la alimentación del ciclotrón, espectrógrafo magnético, imán deflector múltiple y cuadrupolos, operados a control remoto; llaves magnéticas y transformadores trifásicos para los circuitos de alimentación. Tres transformadores trifásicos de 13,2 KV a 220/380 V, con 800 kVA cada uno, para la alimentación principal. Uno de ellos es de emergencia. Un grupo generador Diesel de emergencia de 200 kVA y 220/380 V, al que se conectarán todas las cargas que deben permanecer en operación durante cortes de tensión: sistemas de refrigeración, circuitos de seguridad, luz, etc.

Uno de los transformadores trifásicos de 800 kVA alimenta al ciclotrón, y compensa variaciones de tensión de hasta $\pm 5\%$.

g) Otros requerimientos esenciales

No se conocen.

h) Riesgo Radiactivo

El blindaje estará construido de modo tal que el fondo por neutrones térmicos no sea mayor de 12 neutrones por cm^2 y segundo, en los lugares de permanencia del personal, en el edificio del ciclotrón.

Para la eliminación de sustancias radiactivas se dispondrá de:

1) Para contaminación del aire:

El aire potencialmente radiactivo que circule por el edificio del ciclotrón será filtrado antes de descargarse a la atmósfera.

El recinto de control, y el de contaje, que están dentro del edificio del ciclotrón, serán conectados a un sistema separado de aire acondicionado.

Para la sala de fuerza motriz del ciclotrón se instalará un sistema de ventilación separado, con el objeto de asegurar que las grandes cantidades de calor de este recinto se eliminen adecuadamente.

2) Para contaminación del agua

Se instalará un sistema de colección de desperdicios radiactivos líquidos, destinado a recoger todo desperdicio líquido contaminado con radiactividad que se encuentre en la planta, previendo así la contaminación de las aguas cloacales.

El sistema consiste de:

a) Una estación de colección y bombeo en el edificio del ciclotrón, y otra en el de laboratorios.

b) Un sistema de 2 o más tanques de 2 ó 3 m^3 cada uno, y uno de 5 m^3 , para recoger los líquidos contaminados antes de descargarlos al sistema cloacal.

Cada tanque deberá incluir una bomba, válvulas, filtros y un dispositivo para muestreo.

c) Un equipo para transmitir las señales de alto nivel de actividad al recinto de control.

3) Contaminación del suelo

No se prevé un aumento significativo de la actividad en el suelo.

Transporte del material radiactivo

Para el transporte de material radiactivo se podrá instalar un sistema de tubos neumáticos, o un sistema de transporte de rieles, según cuales sean los requerimientos del grupo de preparación de radioisótopos.

Protección y monitoraje de la radiación

El sistema de protección del personal se instalará para toda área en que se pueda encontrar radiación gamma o durante la operación del ciclotrón. El sistema actúa sobre la máquina, y corta la radiofrecuencia, con lo que deja de haber haz, cuando entra una persona en el área controlada.

Todas las puertas de acceso al área controlada tienen luces indicadoras de que el ciclotrón está en operación.

Antes de poner en operación a la máquina el físico responsable deberá asegurarse de que no hay nadie en el área controlada, y operará la llave maestra para iniciar la irradiación.

Para el monitoraje se instalarán monitores fijos de gammas y neutrones en el recinto del ciclotrón, las áreas experimentales y el acceso a las mismas.

Los datos de la medición se transmitirán en forma continua al recinto de control, donde se graficarán automáticamente, los monitores deberán tener contactos que inicien una alarma si el límite permisible de la radiación es excedido, y corten la radiofrecuencia, cesando así la irradiación.

Se instalarán contadores de alfa, beta y gamma para manos y pies a la salida del recinto del ciclotrón y de las áreas experimentales.

En la entrada del sistema de descarga a la atmósfera del aire radiactivo que sale del recinto del ciclotrón y áreas experimentales, se instalará un monitor de aire, que detectará la cantidad de tritio y de todos los otros tipos de materiales radiactivo presentes.

La actividad de los desechos radiactivos líquidos se controlará por análisis de las muestras extraídas del sistema colector.

i) Personal previsto

Es difícil hacer una estimación precisa de la cantidad total de científicos que trabajarán con el ciclotrón isócrono. Un cálculo conservativo y aproximado, en el que se supone que el personal actual se duplicará con la nueva máquina es el siguiente:

Física Nuclear

Personal estable del Laboratorio del Ciclotrón Isócrono: 15

Personal de otros laboratorios de física nuclear de CNEA: 15

Física de Estado Sólido

Personal del Departamento de Metalurgia de CNEA: 6

Radioquímica

Personal del Departamento de Producción de Radioisótopos de CNEA: 5

Cristalografía y Fisicoquímica de las Radiaciones

Personal del Departamento de Radiaciones Atómicas y Moleculares de CNEA: 4

Análisis por Activación

Personal del Departamento de Química de CNEA: 10

Biología

Personal del Departamento de Radiobiología de CNEA: 5

No se han incluido en estas cifras los estudiantes universitarios no graduados, ni los estudiantes graduados que estén realizando tesis, que se estima serán de 10 a 20 personas.

Departamentos de Física de las Universidades Nacionales

Se espera que las Universidades de Buenos Aires y La Plata envíen estudiantes no graduados para realizar trabajos de investigación, estudiantes graduados para realizar tesis, además de los físi-

cos nucleares que integran esos Departamentos.

Instituciones Extranjeras

Se prevé la colaboración con Instituciones ^{La Inmigración} de Alemania y Francia lo que involucrará la presencia durante períodos de semanas a un año de científicos de otros países que vendrán a realizar programas de investigación, además de los becarios y estudiantes graduados de esos países.

Personal para la operación y mantenimiento del ciclotrón isócrono

Equipos eléctricos y mecánicos: 2 ingenieros, 12 técnicos

Equipos electrónicos: 2 ingenieros, 6 técnicos

Computación: 1 profesional, 2 técnicos

Personal de Limpieza: 3

Administración: 2 secretarias y telefonistas

El total aproximado de personas que trabajarán en el edificio del ciclotrón será de 100 (60 permanentes).

VIII - ESTUDIO ECONOMICO DEL PROYECTO DE INSTALACION DEL CICLOTRON ISOCRONO

A: INVERSION

Costo de la Máquina (A financiar)

Ciclotrón de Energía variable	u\$s.	3.200.000.=
Sistema de fuente de iones externa	"	110.000.=
Sistema control automático	"	100.000.=
Transporte a Buenos Aires	"	180.000.=
	u\$s.	3.590.000.=

Sistemas auxiliares (a construir en el país)

Sistema transporte del haz y espectrógrafo magnético

Materiales	u\$s.	200.000.=	
Refrigeración, grúas, etc.			\$ 350.000.=
Grupos generadores, estabilizadores, etc.	"	300.000.=	
	u\$s.	500.000.=	\$ 350.000.=

Edificio

Edificio para ciclotrón (2.500 m²)

Edificio para laboratorios y talleres (4.000 m²)

\$1.500.000.=
"2.400.000.=
<u>\$3.900.000.=</u>

Totales Parciales

u\$s.	4.090.000.=	\$ 4.250.000.=
-------	-------------	----------------

Totales Parciales en:

\$	114.315.000.=	\$ 4.250.000.=
----	---------------	----------------

Total General en Pesos Ley 18.188: \$ 18.565.000.=

B: INVERSION MAS INTERESES

Costo total ciclotrón y edificio:

\$ 18.838.220.=

Intereses:

" 3.593.590.=

\$ 20.431.810.=

C: PERSONAL

Año	Personal actual que se destina al proyecto.	Personal a Incorporar	Costo Anual \$
0	SAMETBAND M.J. (A-5) ERRAMUSPE H.J. (A-6)	Físico A-12	66.000.=
1	Idem, más SINDERMAN J.E. (A-9) FAZZINI N.A. (A-11) FERRERO A.M.J. (A-12) CEBALLOS A.E. (A-10) DIAZ ROMERO A. (B-8) RISO J.M. (B-13)	Ing° Mecánico A-12 Ing° Electrónico A-11	196.300.=
2	Idem, más TESTONI J.E. (A-9) DRAGUN O. (A-11) SOFIA H.M. (A-12) RODRIGUEZ J.C. (B-10) IETRI B.G. (B-11) PROFESSI M. (B-10) BOLAÑOS C.A. (B-10) ARDITO R. (Beca A.1)	Técnico Electrónico B-12 Téc. Vacío y Detectores B-14 Técnico Computación B-11	329.160.=

C: PERSONAL

Año	Personal actual que se destina al proyecto.	Personal a Incorporar	Costo Anual \$
3	Idem, más GARANZINI J. (B-9) CORALO J.J. (B-11) MORALES A.R. (B-14) TAU S. (B-14) GOMEZ D.B. (E-20) de BRASI O. (F-24) CORVALAN J.M. (E-1)	3 Físicos A-12 Ordenanza F-20	447.950.=
4	Idem, más MAQUEDA E.E. (A-9) PERAZZO R.P.J. (A-10) DUSSEL G.G. (A-10) REICH S.L. (Beca A.1)		537.000.=

A partir del año 5, se mantiene al personal básico anterior y tiene lugar un crecimiento vegetativo fijado por la actividad desarrollada y que está expresado en D.

D: CUADRO DE RECURSOS ENTI LOS AÑOS 0 Y 15

Año	Amortización Ufs VER NOTA 4	Intereses Ufs	Edificio \$	Sistemas Ufs	Auxiliares \$	Personal \$	Gastos Funcionam. \$	TOTALES PARCIALES ANUALES Ufs	TOTALES ANUALES \$	TOTAL GENERAL ANUAL \$
0	359.000					66.000		359.000	66.000	1.322.500
1			1.500.000	100.000		196.300		100.000	1.696.300	2.046.300
2			2.400.000	100.000	350.000	329.160		100.000	3.079.160	3.429.160
3	359.000			300.000		447.990		659.000	447.990	2.754.490
4	287.200	186.680				537.000		473.880	537.000	2.195.580
5	287.200	168.012				537.000	700.000	455.212	1.237.000	2.830.242
6	287.200	149.344				537.000	700.000	436.544	1.237.000	2.764.904
7	287.200	130.676				550.000	850.000	417.876	1.400.000	2.862.566
8	287.200	112.008				550.000	850.000	399.208	1.400.000	2.797.228
9	287.200	93.340				600.000	900.000	380.540	1.500.000	2.831.890
10	287.200	74.672				600.000	900.000	361.872	1.500.000	2.766.552

AÑO	Amortización U\$S VER NOTA 1	Intereses U\$S	Edificio \$	Sistemas Auxiliares		Gastos		TOTALES		TOTAL GENERAL ANUAL \$
				U\$S	\$	Personal \$	Funcionamiento \$	PARCIALES ANUALES U\$S	\$	
11	287.200	56.004				600.000	1.000.000	343.204	1.600.000	2.801.214
12	287.200	37.336				600.000	1.000.000	324.536	1.600.000	2.735.876
13	287.200	18.668				650.000	1.100.000	305.868	1.750.000	2.820.538
14						700.000	1.300.000		2.000.000	2.000.000
15						700.000	1.300.000		2.000.000	2.000.000

NOTA N° 1: Los cálculos corresponden al cuadro de costos detallado en A y a la forma de financiación que se considera fácilmente obtenible de acuerdo con las conversaciones mantenidas hasta el presente.

NOTA N° 2: Se ha supuesto pago de intereses a plazo vencido.

E: INCIDENCIA PRESUPUESTARIA

Presupuesto del año 1969 de CNEA: \$ 68 Millones.

Presupuesto 1969 del Programa de Investigación y Desarrollo: \$ 13 Millones.

Relación: 19.2%

Incidencia del Proyecto del Ciclotrón Isócrono:

(En millones de pesos)

Año 1969: 13 + 1,32 = 14,32: 21.1%

Año de máxima: 13 + 3,42 = 16,42: 24.2%

Promedio anual: 13 + 3 = 16: 23.6%

La incidencia real es menor, puesto que se han computado los gastos en personal como si todo el personal a incorporar al proyecto fuera nuevo.

Una estimación del caso real, descontando el personal ya existente, daría como resultado una incidencia presupuestaria total del 23.7% en el año de máxima y 22.9% en el año promedio.

NOTAS

- 1.- Se han computado los sueldos al mismo nivel que en el año 1969.
- 2.- La relación entre \$ y u\$s. es la vigente en el año 1969.
- 3.- Si se quisiera mantener el Sincrociclotrón actual funcionando para aplicaciones habría que agregar al personal, solamente 3 técnicos.
- 4.- En los gastos de personal cargados a funcionamiento no se incluye personal usuario del Ciclotrón ya cubierto por programas independientes del Laboratorio.

PROGRAMA DE CONSTRUCCION Y MONTAJE DEL CICLOTRON

AÑO 0 1 2 3

ELECTROIMAN	FABRICACION		TRANSF. MONTAJE	MEDICIONES Y AJUSTE
ALIMENTACION PRINCIPAL BOBINAS PRIME. Y ARMONICAS	FABRICACION		TRANSF. MONTAJE	MEDICIONES Y AJUSTE
BASAMENTO CABLEADO DE LA INSTALACION ELECTRICA	ESTUDIOS, ESPECIFICACIONES		BASAMENTO PIRE ACORDIC. INSTALACION	
REFRIGERACION	ESPECIFICACIONES		INSTALACION	
ALTA FRECUENCIA	ESTUDIOS	FABRICACION	MONTAJE Y CONTROL EN FABRICA TRANSF. MONTAJE	INSTALACION
VACIO	FABRICACION	CONTROL	TRANSF. INSTALACION	
DISPOSITIVOS DE MEDICION		FABRICACION	CONTROL	INSTALACION
INYECCION FUENTES IONES	DISENO	FABRICACION	CONTROL	INSTALACION
EXTRACCION	DISENO	FABRICACION	MONTAJE	AJUSTE
SALA DE CONTROL	INSTALACION			

ENSAYOS HAZ INTERNO HAZ EXTERNO