

CNEA 353

El Proyecto IALE

1. Diseño y puesta en marcha
1966 - 1970

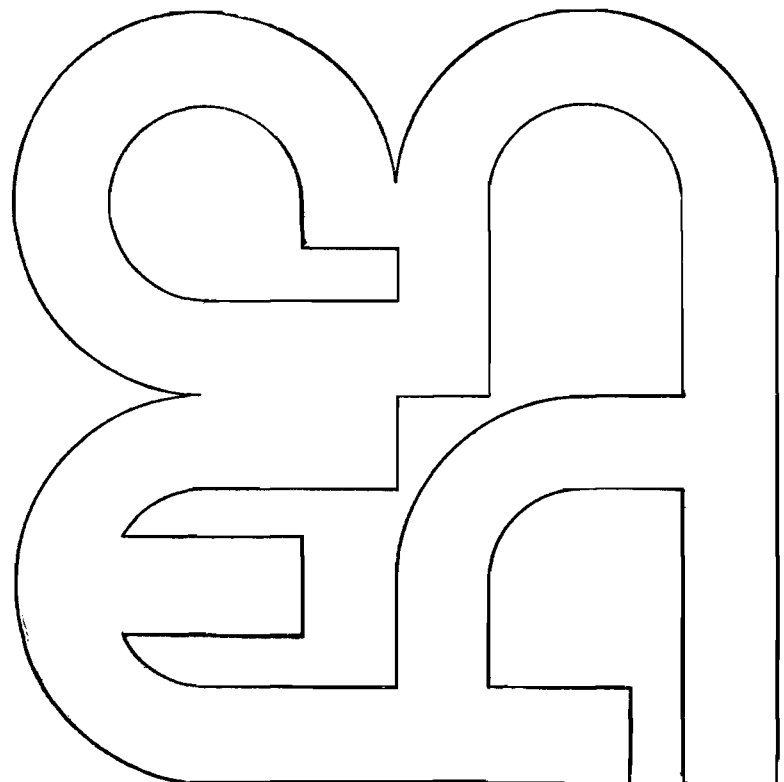
E. O. Achterberg
E. Y. de Aisenberg
F. C. Iglesias
A. E. Jech
E. Kerner
J. A. Moragues
D. Otero

M. L. Pérez
A. N. Proto
R. Requejo
J. J. Rossi
W. Scheuer
J. F. Suárez

Comisión
Nacional
de Energía
Atómica

República Argentina

Buenos Aires, 1973



INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

A34

**ISOTOPE SEPARATION
BETA-MINUS DECAY RADIOISOTOPES
COCKROFT-WALTON ACCELERATORS
SEMICONDUCTOR DETECTORS
IODINE 134
URANIUM 235
THERMAL FISSION
THERMAL NEUTRONS
NEUTRONS SOURCES
FISSION PRODUCTS
GAMMA SPECTROSCOPY
BETA SPECTROSCOPY
LABORATORY EQUIPMENT
FISSION YIELD
ELECTROMAGNETIC ISOTOPE SEPA
DATA PROCESSING
NUCLEAR PROPERTIES**

EL PROYECTO IALE

1. Diseño y puesta en marcha

1966-1970

E.O. Achterberg, E.Y. de Aisenberg, F.C. Iglesias,
A.E. Jech, E. Kerner, J.A. Moragues, D. Otero,
M.L. Pérez, A.N. Proto, R. Requejo, J.J. Rossi,
W. Scheuer y J.F. Suárez

RESUMEN

Se describe un sistema instrumental para el estudio de propiedades nucleares de isótopos de vida media corta, alejados de la línea de estabilidad beta, cuyas partes principales son un acelerador Cockcroft-Walton, un separador de masas, detectores semiconductores y una computadora utilizada como analizador multicanal. El sistema es de producción continua. El presente trabajo incluye nuestros primeros resultados espectroscópicos en el estudio de $^{89,90,91}\text{Kr}$, $^{137,138,139,140,141}\text{Xe}$ y $^{134\text{m}}\text{I}$. Los nucleídos radiactivos fueron obtenidos en la fisión de ^{235}U con neutrones térmicos producidos por la reacción $^7\text{Li}(d,n)^8\text{Be}$ y termalizados en parafina. Mediante una adecuada mezcla de gas noble y yodo como gas de arrastre los productos de fisión son llevados en 1-2 segundos hasta la fuente de iones de un separador electromagnético de masas, de doble focalización tipo escandinavo. Con adecuados diafragmas, colocados en el plano focal del separador de masas, se selecciona la masa a estudiar y se depositan sus iones sobre colectores fijos o móviles cerca de los detectores semiconductores de Ge(Li) y Si(Li). Como analizador se usó un sistema multicanal basado en una pequeña computadora, la cual se utilizó para procesar algunos de los resultados. La información obtenida se procesó con métodos convencionales.

SUMMARY

The Buenos Aires isotope-separator on-line facility (IALE project.)

1. Planning and initial experiences

An experimental set-up to study nuclear properties of short-lived isotopes away from the line of beta stability is described. The main parts are: a Cockcroft-Walton accelerator, a mass separator, semiconductor detectors and a computerized multichannel analyzer system. The whole system works on-line. This paper includes our first spectroscopic results in $^{89,90,91}\text{Kr}$, $^{137,138,139,140,141}\text{Xe}$ and $^{134\text{m}}\text{I}$. The radioactive nuclides were obtained in ^{235}U thermal neutron fission. The neutrons were produced by the $^7\text{Li}(d,n)^4\text{He}$ reaction and thermalized in paraffin. The fission products were swept into the ion-source of a mass separator (double-focalization, scandinavian type, designed and built at our laboratory) in 1-2 seconds by a mixture of rare gas and iodine. Masses were selected at the focal plane of the mass separator with appropriate exit slits and the ions were collected either on a fixed or a moving tape close to Ge(Li) and Si(Li) semiconductor detectors. A computer was used to store the digital spectroscopic information and to perform some of the data processing. The data were processed by conventional computational methods.

EL PROYECTO IALE

I) *Introducción*

- a) Planteo del problema y su interés teórico
- b) Alternativas experimentales
- c) El proyecto IALE

II) *Equipo experimental*

- a) La fuente de neutrones
- b) El uranio y el transporte de los productos de fisión
- c) El separador de isótopos
- d) Equipo de espectroscopía nuclear
- e) El análisis de los datos

III) *Primeros resultados*

I. INTRODUCCION

a) *Planteo del problema y su interés teórico*

Después de varias décadas de investigación en espectroscopía nuclear se han medido propiedades nucleares de más de 1 300 isótopos radiactivos, desarrollándose numerosas técnicas experimentales especiales. Sin embargo, la posibilidad de obtener información sobre la estructura nuclear usando los métodos convencionales de espectroscopía α , β y γ está limitada por la energía relativamente baja de los rayos β (~ 2 MeV) en los núcleos de vida media suficientemente larga ($T_{\frac{1}{2}} > 1$ hora). Esta limitación desaparece en gran parte si observamos núcleos alejados varias unidades del valle de la superficie de masas (línea de estabilidad beta). Dichos núcleos, sin embargo, tienen vida media muy corta. Debido a ello, hasta 1965 las dificultades experimentales eliminaban esta posibilidad, pero actualmente tales estudios pueden encararse con éxito.

Analicemos primero que clase de información sobre estructura nuclear esperamos obtener de nucleídos alejados de la línea de estabilidad β que no sea sustituible por la que ya se tiene actualmente (1), además de aumentar el número de especímenes conocidos en forma sustancial.

A) La obtención de energías de unión en núcleos β -inestables permitiría:

- 1) Determinar con más precisión como varían la energía de superficie y la energía de simetría con la diferencia N-Z. En particular, la primera sería especialmente importante en relación con estudios de fisión.
- 2) Controlar las fórmulas semiempíricas de masas actuales, que si bien reproducen, con bastante precisión, las energías de unión en los núcleos estables, requieren por lo menos unos 40 parámetros. El grado de significación de estos parámetros es difícil de medir usando criterios estadísticos habituales. Sería un test crítico de estas fórmulas semiempíricas aplicarlas en otras regiones, en especial a los núcleos β -inestables alejados de la línea de estabilidad.
- 3) Extender las parábolas de la energía de unión a núcleos con gran exceso neutrónico lo cual tiene fundamental importancia en los estudios de astrofísica, dado que uno de los procesos de formación de elementos tiene lugar a través de sucesivas capturas rápidas de neutrones que, en condiciones dadas de temperatura y flujo, compiten favorablemente con la emisión beta.

B) Prácticamente todo trabajo sobre estructura nuclear se relaciona de una manera u otra con el modelo de capas. Como es sabido, una de sus consecuencias fundamentales es la existencia de 3 núcleos estables mágicos (^{16}O , ^{40}Ca , ^{208}Pb), cuyas estructuras han sido exhaustivamente estudiadas. Entre los núcleos inestables β - puede esperarse una situación análoga en relación con el ^{113}Sn con el interés siguiente:

- 1) Conocer las propiedades de los niveles de partícula independiente, estudiando el espectro de los núcleos con una partícula o agujero fuera de capas cerradas (^{113}In , ^{113}Sn , ^{113}Sn , ^{113}Sb). Estos niveles son parámetros fundamentales en los cálculos teóricos sobre estructura nuclear.
- 2) Estudiar como varían esos niveles en función del número de nucleones (por ejemplo, para los niveles de la capa neutrónica entre los números mágicos 82 y 126, comparar los niveles del ^{113}Sn y ^{207}Pb).
- 3) Conocer el espectro de núcleos con varias (pero no muchas) partículas fuera de capas cerradas, para los cuales pueden realizarse cálculos exactos dentro del marco del modelo de capas. Buscar así los límites de validez del modelo, las aproximaciones que estos cálculos sugieren para tratar configuraciones más complicadas, etc..

- 4) En ^{200}Pb aparecen estados colectivos 0_+ (vibraciones de apareamiento) que están relacionados con oscilaciones del número de partículas pese a ser un núcleo con sus capas de neutrones y protones totalmente llenas. Sería muy interesante verificar las propiedades de estas vibraciones en ^{132}Sn , también doblemente mágico.

C) Núcleos deformados:

- 1) Encontrar nuevas regiones que presenten características rotacionales definidas. Estudiar la influencia de A y Z en los parámetros rotacionales.
- 2) Para el estudio de los potenciales nucleares colectivos, en la zona de los núcleos llamados de transición distribuidos en contornos alrededor de las islas de deformación en el plano N-Z, es importante el conocimiento de las franjas de intersección con dicho contorno lo cual puede hacerse sólo a través de núcleos inestables.

D) El estudio de los estados análogos proporciona importantes informaciones sobre estructura nuclear. La existencia de dichos estados depende de la bondad del spin isotópico como número cuántico, que a su vez está establecida para núcleos con $N-Z \approx 0$ ($A < 40$) y para núcleos con N-Z muy grandes. Es de interés estudiar la pureza de dichos estados en función del exceso neutrónico, observando, por ejemplo, los retardos en las transiciones beta permitidas, tipo Fermi.

E) La zona de núcleos β^+ -inestables con exceso de protones termina cuando los núcleos se hacen inestables respecto de la emisión de protones. Más de una decena de núcleos con estas características han sido detectadas en los últimos años. Este campo tiene posibilidades interesantes porque la deformación que eventualmente se puede extraer de la emisión de protones es mucho más sencilla de analizar que la obtenida con emisión α . Es posible prever un interés análogo en la emisión de neutrones (zona inestables β^-) pero experimentalmente la detección y espectroscopía de neutrones es mucho más difícil.

b) Alternativas experimentales

Las dificultades más importantes para estudiar núcleos alejados de la línea de estabilidad β son su vida media corta (10^2 a 10^{-2} seg) y, como corolario a su alto valor de Q_β , la extrema complejidad de su espectro γ .

Este último problema encontró su solución en los detectores de estado sólido, que poseen la resolución y eficiencia necesaria para obviar las dificultades intrínsecas a los espectrómetros de cristal de centelleo y a los magnéticos: mala resolución y tener que recorrer el espectro punto a punto, respectivamente.

La solución ideal para observar nucleídos de vida media corta es que la producción de estos isótopos y su estudio se realicen en forma continua mediante entre producción y estudio el menor tiempo posible. O sea: producir el nucleído (mediante la reacción nuclear adecuada) y transportarlo hasta el lugar de medición lo más rápido posible, en forma continua.

Métodos de producción, transporte y medición no continuos (por ejemplo: tubos neumáticos, etc.) encuentran su límite rápidamente en cuanto a las vidas medias observables.

Muy pronto se agrega otra dificultad práctica: las reacciones nucleares que generan isótopos alejados de la línea de estabilidad no tienen un único y determinado núcleo resultante. Por ejemplo, la fisión del ^{235}U genera ~ 200 isótopos, y la evaporación de varios neutrones (spallation) entrega, según el proyectil y el blanco, de 10 a 20 isótopos. Por lo tanto es necesario agregar un elemento de separación antes de la detección.

En general los métodos de separación química son lentos (algunos minutos en la llamada química rápida) y no continuos. La separación electromagnética de isótopos, en la cual los productos de la reacción llegan en forma continua al separador, llena las necesidades requeridas.

Resumiendo, para trabajar en este tema es necesario disponer de un reactor o acelerador que produzca la reacción nuclear, una etapa de separación y un sistema de detección adecuado.

Usando un acelerador de mucha energía se puede intentar trabajar en los isótopos ricos en protones, a través de reacciones $X(p, xn)\gamma$, al igual que si se dispusiera de un haz de iones pesados, con la ventaja de la posibilidad de poblar estados de alto impulso angular.

El estudio de los isótopos ricos en neutrones puede encararse mediante fuentes de neutrones que provoquen fisión en un blanco (^{235}U , ^{239}Pu , etc.). En este caso, a las dificultades mencionadas al comienzo se agrega el hecho de que la producción de un determinado núcleo disminuye fuertemente (órdenes de magnitud) con la diferencia en A con los isótopos de los picos de fisión.

Las combinaciones posibles son muchas y distintos grupos han intentado varias de ellas, siendo de especial interés la conexión entre el separador de isótopos y la fuente de nucleidos a estudiar, dado que sus características fijan el límite inferior de las vidas medias de los isótopos analizables mediante el sistema (2).

c) El proyecto IALE

A comienzos de 1966 el Dr. Daniel Bés sugirió que los grupos de Espectrometría Nuclear y de Separación de Isótopos de la CNEA y el de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Buenos Aires trataran de abordar los estudios arriba mencionados.

Se analizaron las posibilidades técnicas y económicas de los grupos y se estudiaron las combinaciones factibles en nuestro medio. Aceleradores grandes, como para encarar la producción de isótopos con exceso protónico, no estaban disponibles en el país, por lo que el estudio se encaminó hacia los isótopos con exceso neutrónico y, en particular, se consideró la posibilidad de utilizar como fuente de neutrones para obtener productos de fisión, a los reactores RA-1 y RA-3 de la CNEA. El uso de un reactor significa, generalmente, que la muestra se ubica a $\sim 4-5$ m del separador de isótopos, lo que genera un tiempo de transporte incompatible con las vidas medias más cortas. Otra posibilidad era usar el acelerador Cockcroft-Walton de 1,2 MeV de la CNEA, para producir neutrones por medio del bombardeo de ${}^7\text{Li}$ con deuterones.

En cuanto al separador de isótopos, se disponía en la CNEA de uno tipo "Calutrón" el cual fue rápidamente desechado por su baja dispersión y la enorme dificultad de su traslado.

Dado que se había planeado comenzar a estudiar isótopos de vida media muy corta y, de ser posible, no gaseosos (Kr y Xe eran el tema de investigación de otros proyectos similares en el exterior) se optó por el siguiente esquema: el acelerador en cascadas Cockcroft-Walton como fuente de neutrones para fisiónar el ${}^{235}\text{U}$; una línea de transporte lo más corta posible (~ 50 cm; la longitud, además de alargar el tiempo de transporte, aumenta la posibilidad de que productos no gaseosos queden atrapados) y la construcción de un separador de isótopos de alta eficiencia y dispersión. También fue necesario equiparse convenientemente para los estudios de espectroscopía nuclear.

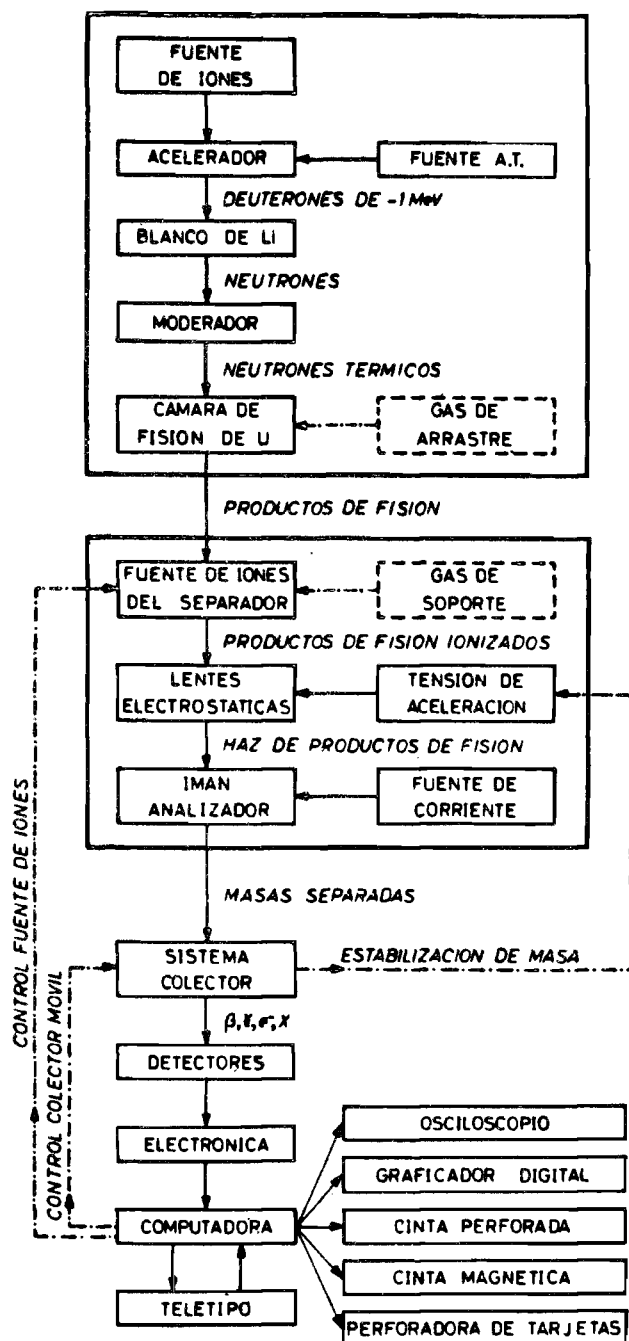


Figura 1
Esquema en bloques del sistema IALE

Evoluciones futuras serían: introducir la muestra de ^{235}U en la fuente de iones del separador, cambiar ésta por una de ^{239}Pu , usar el haz de neutrones térmicos del RA-1 ó RA-3 o poner el separador en línea con un ciclotrón de energía variable cuya adquisición está prevista en los planes de la CNEA. Estos desarrollos serán analizados en el futuro ya que los primeros resultados del conjunto actual aseguran una producción científica sostenida durante algunos años.

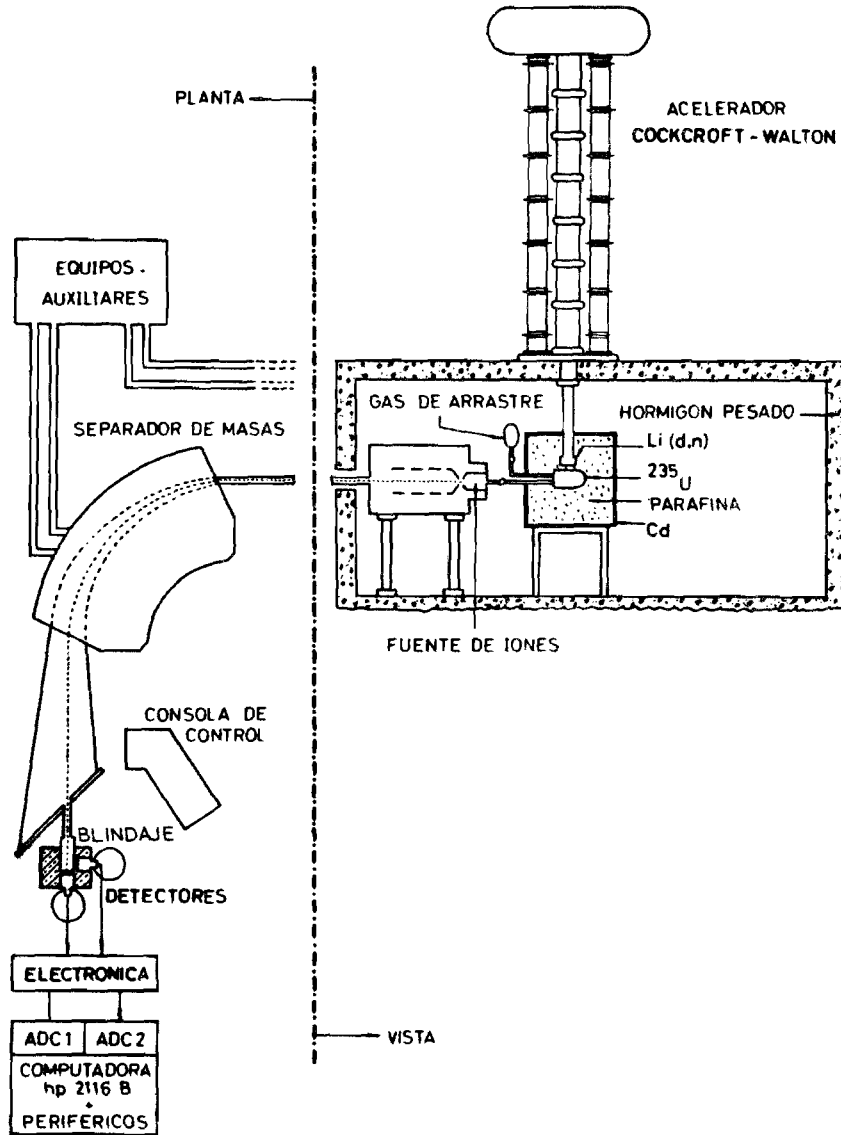


Figura 2
Vista en conjunto del sistema experimental

En resumen, el proyecto IALE consiste en un acelerador en cascadas que produce neutrones mediante la reacción ${}^7\text{Li}(d,n){}^6\text{Be}$; estos neutrones, una vez termalizados, producen fisión en una muestra de ${}^{235}\text{U}$. Los productos de fisión difunden de la muestra y, por un caño muy corto (~ 50 cm), llegan a la fuente de iones del separador de isótopos; éste los separa según su masa y los correspondientes a una de ellas son recogidos frente a los distintos detectores que analizan las radiaciones que emiten.

La realización del proyecto, que fue denominado con las siglas *IALE* (*Isótopos Alejados de la Línea de Estabilidad*) fue decidida a mediados de 1966. A fines de ese año se habilitaron por parte de la CNEA los fondos necesarios. A principios de 1968 se probó con éxito el nuevo separador. Los grupos de Espectroscopía Nuclear y Separación de Isótopos se unieron en uno solo. La obra civil y las reformas del acelerador recién estuvieron listas durante 1968 y a comienzo de 1969 se hicieron las primeras irradiaciones. Entre fines de 1969 y comienzo de 1970 se obtuvieron los datos correspondientes al ${}^{134\text{m}}\text{I}$ que constituyen la primera publicación del proyecto IALE.

La colaboración inicial del grupo de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA, cesó a raíz de la dispersión del mismo en 1966.

Colaboran en el proyecto aproximadamente 10 profesionales y otros tantos técnicos. Se recibieron subsidios del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y de la Fundación ESSO.

II) EQUIPO EXPERIMENTAL

a) la fuente de neutrones

Los neutrones térmicos necesarios para producir la fisión del ${}^{235}\text{U}$ son obtenidos moderando en parafina aquellos que se generan en la reacción ${}^7\text{Li}(d,n){}^6\text{Be}$.

Como se dijo, los deuterones, proyectiles primarios de la reacción, son acelerados hasta energías de ~ 1 MeV con un acelerador en cascadas. La fuente de tensión -tipo Greinacher- del acelerador consta de 7 etapas de rectificadores y condensadores, alimentada por un transformador de 200 V/100 000 V (a 200 Hz, para disminuir la caída de tensión en la cascada y mejorar el filtrado) (3).

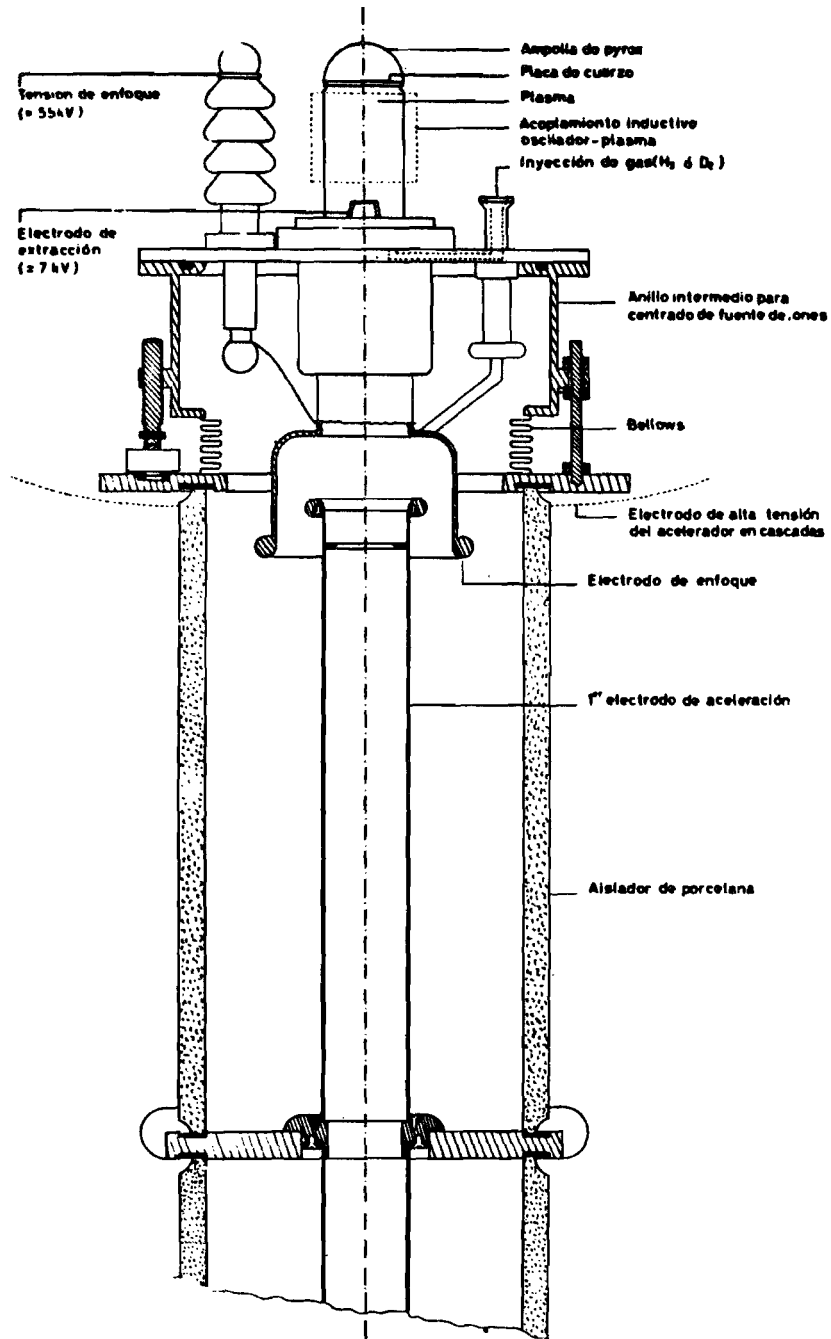


Figura 3

Fuente de iones y extremo superior del tubo acelerador.

El oscilador es de 23 MHz - 1 kW y el canal de extracción axial de una aleación especial de Al, con un diámetro de $\approx 1,8$ mm. La cámara de descarga es continuamente refrigerada con aire. Los valores de tensión dados son típicos y dependen de la presión de gas en la fuente, de la intensidad del haz extraído y de la tensión de aceleración (Escala 1:5)

La fuente de iones original, que se encuentra a nivel de alta tensión (1 MV), fue recientemente reemplazada por otra de tipo de radiofrecuencia (adquirida a la firma Brown-Boveri et Cie. de Alemania). En el banco de prueba fue capaz de entregar los 10 a 11mA de deuterones especificados por los proveedores. Fundamentalmente, consta de una ampolla de vidrio Pyrex, donde se produce el plasma, acoplada inductivamente a un oscilador de 23 MHz y \sim 1kW. La extracción de iones es axial y se hace a través de un canal de \sim 1,8 mm de diámetro, de una aleación especial de aluminio. Electrodo de extracción y enfoque configuran la imagen necesaria, conjuntamente con el primer electrodo de aceleración.

Los siete electrodos de aceleración están ubicados en un tubo de porcelana de \sim 4,2 m de largo y \sim 0,6 m de diámetro. Sus propiedades ópticas y geométricas no eran apropiadas para corrientes del orden del mA ya que la máquina originariamente no entregaba más de 200 μ A. Se tuvo necesidad entonces de revisar este aspecto y, midiendo las corrientes que recogían estos electrodos, se vió que era necesario agrandar los orificios de los dos electrodos más próximos a la fuente de iones.

Pese a estas modificaciones, no ha sido posible enfocar en el blanco más de 2 mA. Esta corriente, siendo bastante menor que la nominal de la fuente de iones, es suficiente para las experiencias actuales y se considera que para aumentarla sería necesario un desarrollo relativamente largo.

Un conjunto completo de servomecanismos permite la operación remota de la fuente de iones así como su alineamiento mecánico frente al primer electrodo de aceleración, estando el equipo en plena operación.

El blanco de litio que recibe los deuterones también fue rediseñado para que fuese capaz de disipar la potencia que, con las actuales corrientes, es del orden de 1 kW. El portablanco es refrigerado con un sistema de agua a sobre-presión. Sistemas de seguridad y enclavamiento evitan que se opere sin un caudal mínimo ya que el blanco se destruiría muy pronto.

A fin de evitar una inútil carga eléctrica de la máquina, los electrones secundarios generados en el blanco son suprimidos mediante un dispositivo electrostático.

El blanco se encuentra en el centro de un cubo de parafina de 0,90 m de arista, volumen necesario para asegurar una termalización eficiente de los neutrones (aproximadamente 80 % de su valor de saturación).

Las condiciones normales de operación continua consisten en acelerar 1 mA de deuterones hasta 1900 kV lo que significa en el hueco central de la parafina (20 × 20 × 20 cm) una densidad de flujo de neutrones térmicos de $\sim 10^8$ n.cm⁻².seg⁻¹, medida repetidas veces con hojuelas de In.

Paredes de bloques de hormigón con mineral de hierro rodean el recinto donde se encuentra el blanco, para asegurar en sus cercanías un nivel de radiación compatible con las normas sanitarias y disminuir al máximo el "fondo" en la zona donde operan los detectores de radiación β y γ , distantes menos de 10 metros del blanco.

b) El uranio y el transporte de los productos de fisión

A través de muchos años de experiencia de radioquímica está bien sentido que los productos de fisión más fáciles de extraer de una muestra de uranio son los gases nobles, y sobre éstos se planearon los primeros ensayos del IALE.

La extracción de gases nobles se basa en la propiedad de "emanación" que poseen algunas sales orgánicas de cadenas largas y abiertas, por ejemplo: los estearatos, palmitatos y también algunos hidróxidos (4).

Por consideraciones sobre estabilidad químico-física frente a la radiación intensa, calor, vacío, humedad, etc., se eligió el estearato de uranilo como la sal más conveniente, siendo también su fabricación a partir del U₃O₈ un proceso conocido en la CNEA y de buen rendimiento. Este último aspecto tiene especial importancia pues se trabaja con uranio enriquecido al 90 % en ²³⁵U. El compuesto fue preparado en el laboratorio de Química Inorgánica del Departamento de Química, bajo la dirección del Dr. Suñer.

Encerrada en un recipiente de acero inoxidable, la muestra de estearato de uranilo (16 g de uranio enriquecido al 90 % en ²³⁵U) es barrida por un gas de arrastre. Este gas estable, además de ayudar a transportar los productos de fisión hasta el separador, le proporciona a éste, condiciones de trabajo estables para su fuente de iones ya que los productos de fisión son cantidades tan pequeñas que no podrían mantener la descarga. Además, el gas de arrastre se utiliza para proveer masas de referencia en el colector del separador.

La cañería que une el recipiente que contiene el uranio con la fuente de iones del separador fue diseñada con miras a mantener la presión dentro de éste lo más baja posible para ayudar a la emanación de los gases nobles y

abrir la posibilidad de que también se observaran los productos de fisión no gaseosos pero volátiles, como ser Br e I.

El flujo del gas de arrastre se puede variar en rangos relativamente estrechos dadas las condiciones de operación estable del separador. Dentro de estos límites se lo varió hasta encontrar para el conjunto arrastre-separador un óptimo en la actividad de un isótopo de vida media corta (^{139}Xe , 40 seg).

El tiempo de transporte fue medido pulsando la fuente de neutrones y observando la actividad en el colector en función del tiempo. El resultado fue que el tiempo de transporte es menor que 1 seg, siendo congruente con la colección de actividades de vida media tan corta como 1,7 seg (^{141}Xe) y avalado por mediciones hechas pulsando el gas de arrastre; estas últimas no son tan valiosas como las realizadas con isótopos radiactivos pues se miden pulsos de presión en el sistema, lo que no significa real transporte de materia.

Estimaciones groseras de la eficiencia del sistema de emanación y transporte la muestran muy cercana al 100 % para gases nobles. Este cálculo adolece del inconveniente de necesitar evaluar eficiencias como la del separador, de la colección, de la detección, y, etc., lo que se hace con errores grandes.

Para observar elementos no gaseosos pero volátiles como Br e I se mantuvo la configuración del sistema pero se agregó al gas de arrastre una fuerte componente de I.

Este agregado aparece como decisivo en la extracción de los halógenos mencionados y una mezcla de I y Xe en proporciones cercanas a 1:1 ha dado buenos resultados para los isótopos del I de vida media corta.

En resumen, una muestra de estearato de uranilo a baja presión y una cañería de baja impedancia nos han significado un tiempo de transporte muy corto y una eficiencia razonable para elementos como el I, lo que era el fin perseguido.

c) El separador de isótopos

Esta máquina fue especialmente diseñada y construída en el laboratorio para el proyecto IALE. Es un separador de alta eficiencia, gran dispersión y resolución, pero sólo es capaz de procesar cantidades pequeñas de sustancia. Es lo que se llama un separador de laboratorio o de tipo escandinavo (5).

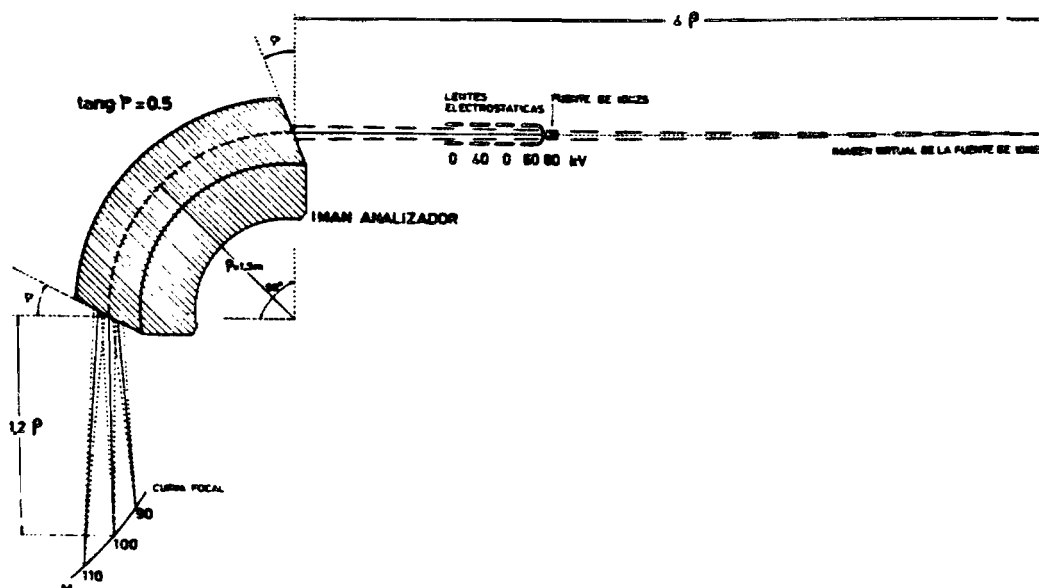


Figura 4

Vista esquemática del separador de masas mostrando la posición de la imagen virtual de la fuente de iones

La fuente de iones, donde termina la línea de transporte de los productos de fisión, tiene una cámara de descarga cilíndrica de grafito y un filamento de tungsteno de 0,8 mm de diámetro. La extracción es axial. El haz de iones es acelerado hasta 80 kV y conformado ópticamente por un sistema electrostático de lentes, de cuatro elementos, que genera la imagen necesaria.

El imán analizador, maquinado en los talleres de ASTARSA (San Fernando, prov. de Buenos Aires) es de 90° de deflexión, con ángulos de entrada y salida no perpendiculares a la trayectoria central con lo que resulta de doble enfoque y de mayor dispersión que los convencionales.

El radio de curvatura es de 1,5 m; el campo máximo en el entrehierro de 10 cm es de 4 300 Gauss.

Las cámaras y sistemas de vacío son convencionales con difusoras de aceite, baffles fríos, etc., alcanzándose una presión de trabajo $\approx 2-3 \times 10^{-6}$ Torr.

Equipos electrónicos, servomecanismos, comandos, etc., completan el sistema y permiten operar la máquina a distancia. Conviene recordar que la fuente de iones y el sistema de lentes electrostáticas están ubicados en el

recinto del blanco del acelerador, a menos de 1 m de dicho blanco y de la muestra de ^{235}U .

El separador ha sido capaz de operar en forma estable con eficiencias del orden del 10 % para gases nobles y una dispersión de 25 mm entre masas consecutivas del Xe con una imagen no mayor de 3 mm de diámetro. Esta performance es ampliamente satisfactoria para la separación de los productos de fisión.

El diseño y construcción del separador demandaron aproximadamente un año de trabajo, colaborando en promedio tres profesionales y cuatro técnicos. Su construcción fue programada por el método del camino crítico. El costo resultó ser de aproximadamente 25.000 dólares, incluida la mano de obra del personal de la CNEA, lo cual significa alrededor de la cuarta parte del precio de un equipo similar de fabricación extranjera.

d) Equipo de espectroscopía nuclear

Siendo necesario que todas las máquinas de producción y separación de isótopos y equipos de análisis de radiación funcionen simultáneamente, es decisivo que cuando se mide "on-line" se extraiga toda la información posible en el mínimo de tiempo de irradiación.

La muestra radiactiva a estudiar se forma en una prolongación del colector del separador de isótopos y las condiciones en que se debe efectuar la detección no son ideales, ya que el fondo debido a neutrones, rayos X y rayos γ es elevado (el colector se encuentra a ~ 10 m del blanco del acelerador y a $\sim 0,40$ m de las otras masas colectadas). Se han instalado blindajes adecuados para atenuar dicho fondo.

Cuando se estudian isótopos alejados de la línea de estabilidad β , en casi todos los casos éstos decaen a otros que también son radiactivos y, probablemente, de vida media corta. Aun cuando estos nucleídos "hijos" del isótopo en estudio no se produzcan en fisión, o el sistema de transporte y el separador no los lleven al colector, sus actividades crecen rápidamente por el decaimiento del "padre" y muy pronto alcanzan valores equivalentes a la de éste (pocas "vidas medias", y éstas son generalmente cortas). Es necesario entonces introducir un elemento de separación adicional. Una forma de tener en cuenta esta 'mezcla' de nucleídos es variar en lo posible la proporción de sus componentes midiendo siempre en los primeros instantes de la colección, cuando los hijos aún no han crecido, y comparar los resultados con los que se observan cuando todas las actividades de la cadena isobárica

ca están saturadas. Medir en los primeros instantes de la colección es bastante ineficaz, pero se puede mejorar mucho el ciclo útil de estas mediciones usando un colector móvil.

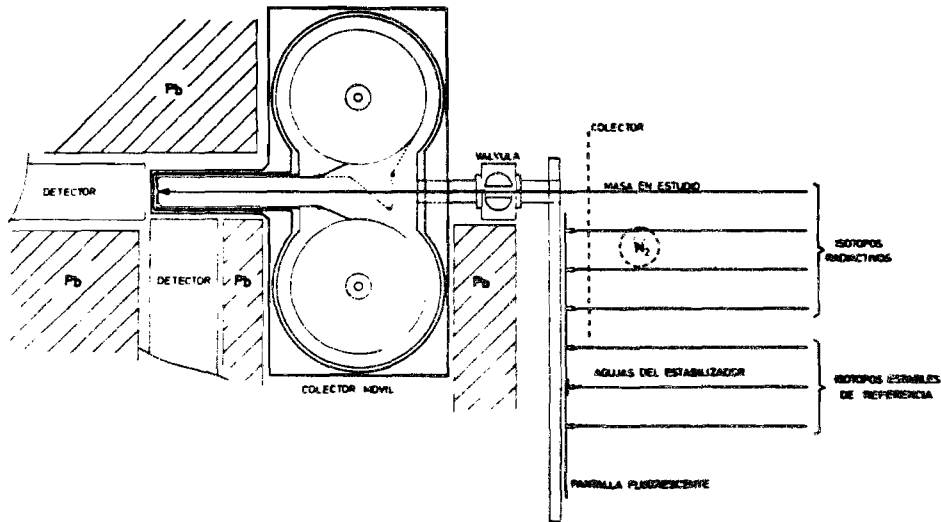


Figura 5

Esquema del colector móvil conectado a la salida del separador, con dos detectores de Ge(Li) dispuestos para una medición de coincidencias (γ, γ'). En puntado se han indicado: a) el colector fijo introducidable lateralmente para el estudio 'no-en-línea' de masas vecinas a la seleccionada, b) una trampa de nitrógeno líquido, utilizada en mediciones de electrones de conversión o de espectros β continuos, c) un recorrido alternativo para la cinta del colector, empleado en algunas mediciones cicladas para acumular la isobara seleccionada a distancia de los detectores mientras se mide aquella acumulada en el ciclo anterior, aumentando de esta manera el tiempo útil del sistema (en esta variante se intercala Pb dentro del colector, entre la posición de acumulación y la de medición).

El método consiste en coleccionar los isótopos sobre una cinta y desplazar ésta a intervalos convenientes, alejando así la actividad recogida y dejando que se acumule otra fresca. También se puede medir algún tiempo después de efectuada la colección, en cuyo caso se estudian los isótopos últimos de la cadena, o sea los de vida media más larga.

La colección de isótopos sobre una cinta móvil resulta muy útil cuando se miden vidas medias ya que luego de cada ciclo acumulación-decaimiento (los detectores registran actividad en función del tiempo) se puede limpiar el colector de la contribución de vidas medias largas e iniciar uno nuevo.

Bajo estas premisas generales se realizan la detección y el análisis en energía de las radiaciones β y γ emitidas y las correlaciones temporales entre ellas.

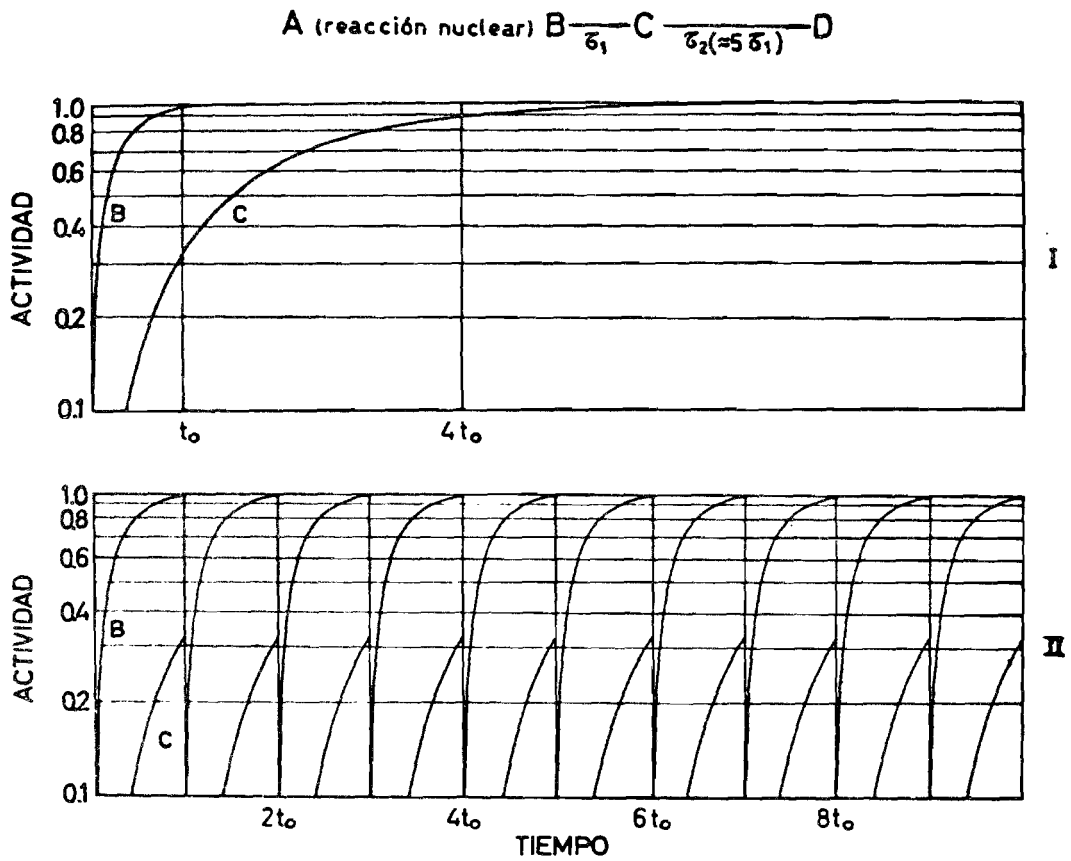


Figura 6

Efecto de un colector móvil sobre las actividades registradas por un detector vecino al punto de colección de la isobara seleccionada. Se supuso que la cabeza B de la cadena tiene vida media aproximadamente 5 veces menor que la de su 'hija' C. Desplazando el colector a intervalos t_0 , el conteo asociado a la hija se mantiene siempre apreciablemente menor que el debido al decaimiento B (gráfico II). Manteniéndolo fijo, las actividades debidas a los decaimientos difieren en solo 10 % al cabo de $4t_0$ (gráfico I).

La espectroscopía γ se realiza fundamentalmente con detectores semiconductores de Ge(Li). En el laboratorio se tienen en funcionamiento dos detectores de tipo coaxial adquiridos a la firma "Nuclear Diodes" de USA. Uno de ellos es de 45 cm³ de volumen sensible, tiene una resolución, incluyendo el equipo electrónico, de 3 keV para la línea de 1 332 keV del ⁶⁰Co y una eficiencia relativa a un detector de INa de 3" x 3" de 5 %. El otro, algo más pequeño (35 cm³), posee una resolución menor de 2 keV.

Para la detección de electrones de conversión y espectros β continuos se dispone de un detector de Si(Li) de 3 mm de profundidad y 1 cm² de superficie, adquirido a la firma Simtec (Canadá), el que mantiene una resolución de \sim 7 keV para la línea K de la transición de 1 063 keV del ²⁰⁷Pb, cuando es operado a temperatura de nitrógeno líquido. Para mediciones "on line" se acopla directamente al vacío del separador de isótopos y para las "off line" posee un sistema de bombas criogénicas.

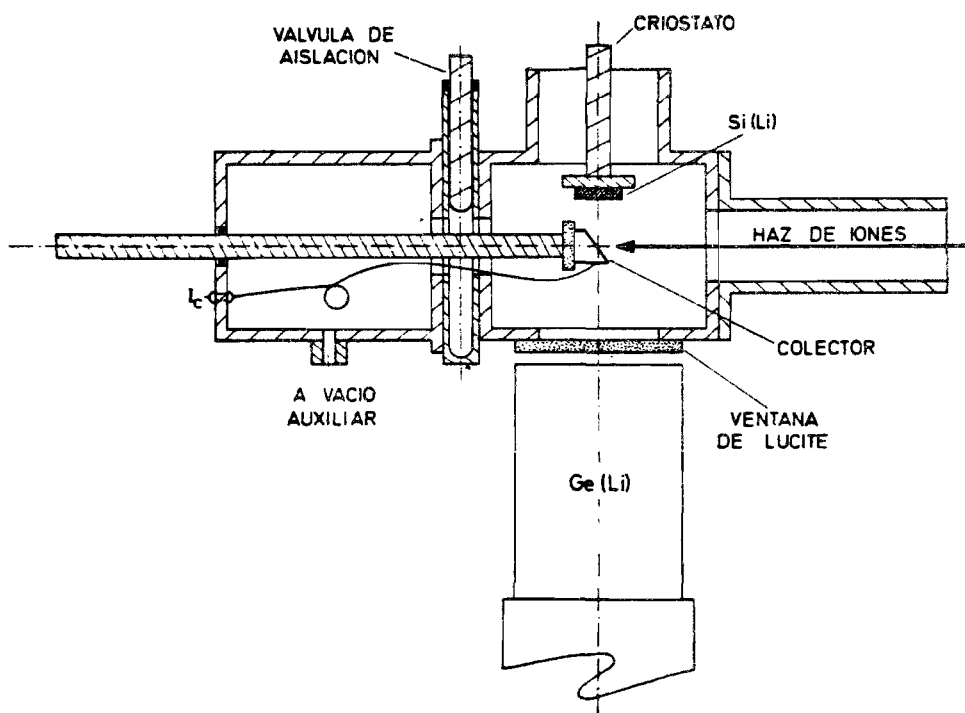


Figura 7

Esquema del sistema de colección y detección utilizado para la determinación de coeficientes de conversión interna. El tubo que conecta al sistema con la cámara de vacío del separador contiene un diafragma de Pb que limita el diámetro de la fuente. El vacío se mantiene normalmente desde la cámara del separador; la conexión de vacío auxiliar se requiere para prevacío al cambiar de colector o montar fuentes de calibración y para acoplar la bomba de criosorción.

La detección de rayos X o de transiciones y de baja energía se realiza con el mismo detector de Si(Li), pero se ha comprado y puesto en funcionamiento recientemente otro detector especial de Si(Li) para rayos X que permite obtener la necesaria clasificación en Z del núcleo emisor de la radiación.

En la detección de neutrones (algunos de los productos de fisión en estudio son emisores de neutrones retardados) se utilizan cristales de "vidrio de litio" enriquecido en ^6Li y plásticos que detectan neutrones rápidos por el retroceso de protones. También está en construcción una batería de 6 detectores de F_2B de 4" de largo \times 1" de diámetro.

En muchas oportunidades es necesario observar muy pequeñas actividades por lo cual se dispone de cristales de Ina(Tl) de alta eficiencia, pero estos detectores presentan el inconveniente de que sus fototubos multiplicadores son muy sensible al campo magnético disperso del separador de isótopos (el fototubo pierde ganancia y empeora la resolución) y el Yodo del cristal se activa con el fondo de neutrones térmicos ($^{127}\text{I}(n,\gamma)$ $^{128}\text{I}(25 \text{ min})$), siendo esto último muy inconveniente en la determinación de vidas medias.

Preamplificadores, amplificadores y amplificadores polarizados de bajo ruido, selectores, etc., completan las líneas que llevan los pulsos de los detectores hasta los sistemas analizadores multicanales. Es de destacar que la mayoría de estos equipos son módulos de fácil adaptación a la experiencia a realizar.

La estabilidad del sistema de espectroscopía gamma ha sido excepcionalmente buena y no se han visto corrimientos ni pérdidas de resolución a lo largo de semanas.

Actualmente se dispone en el laboratorio de analizadores multicanales: uno de 512 canales marca Nuclear Data, otro de 1 600 canales marca RIDL y un sistema 5406B de Hewlett-Packard.

En este último, que es el de mayor uso, se dispone de 8 192 canales y posee dos convertidores analógicos digitales (ADC) de 4 096 cada uno. Es posible acumular datos en muchas y distintas formas de acuerdo a programas cambiables que se introducen en el sistema. En detalle, es posible recoger un espectro simple de hasta 4 096 canales o dos simultáneos e independientes de 2 048 ó un espectro bidimensional de $n_1 \times n_2 = 4 096$ ó n_1 espectros sucesivos de n_2 canales con $n_1 \times n_2 = 8 192$. Las posibles variantes no están agotadas y cada experiencia determina el mejor modo de operación; por ejemplo, para medir vidas medias se toman espectros sucesivos a intervalos prefijados obteniéndose los datos necesarios para evaluar la vida media de todos los rayos que se observan en el espectro.

Los ADC del analizador de 1 600 canales y del sistema Hewlett-Packard tiene compuertas electrónicas que permiten hacer coincidencias lentas ($27\text{ n}\mu\text{s}$) directamente en ellos, disparándolos con un pulso conformado. Se poseen, además, otros dos circuitos convencionales de coincidencias rápido-lentos, uno elaborado en el laboratorio y otro adquirido a la firma ORTEC.

Los multicanales Nuclear Data y RIDL entregan la información por medio de una máquina de escribir y el último, además, por medio de un graficador rápido. El sistema Hewlett-Packard entrega la información por máquina de escribir, cinta de papel perforada, un graficador digital de precisión o una cinta magnética.

El cuadro siguiente resume el equipo que ha sido usado en mediciones "on-line" durante 1970.

<i>Radiación</i>	<i>Detector</i>	<i>Equipo electrónico</i>	<i>Analizador</i>
γ	Ge(Li)-45 cc-3 keV Ge(Li)-35 cc-2 keV INa(Tl) 3" x 3"	Fuente de baja y alta tensión Preamplificadores Amplificadores de bajo ruido	512 - Nuclear Data 1 600 - RIDL
β e- de conversión	Si(Li) 3 mm x 1 cm ² 7 keV (²⁰⁷ Bi)	Selectores monocanales Conversores de tiempo a altura de pulsos	
X	Si(Li) 3 mm x 25 mm ² 290 eV (5 keV Fe ⁵⁵)	Circuitos de coincidencias	4 096 (x2) Sistema Hewlett-Packard 5 406 B
n	Vidrio de ⁶ Li Plásticos	etc., etc..	

e) El análisis de los datos

Una característica importante del estudio de los isótopos alejados de la línea de estabilidad es que la energía disponible para el decaimiento β crece mucho al alejarse del valle de la superficie de masas con lo cual el Q_β alcanza varios MeV y el número de niveles que pueblan en el decaimiento es elevado. Por ejemplo, en el decaimiento del ^{139}Xe al ^{139}Cs se pueden observar más de 200 transiciones γ . También la necesidad de aprovechar al máximo las irradiaciones exige montar varias experiencias simultáneamente.

Todo esto trae como resultado una enorme cantidad de datos cuyo análisis escapa a los criterios usuales. No es posible su evaluación sin la ayuda de métodos de computación.

En el proyecto IALE se utilizan habitualmente programas de computación para análisis de los datos recogidos con los multicanales.

En el análisis de los espectros γ simples se ha usado con éxito el programa llamado "GAMANL", (elaborado en el M.I.T., U.S.A.) (6) que fundamentalmente encuentra la posición de los picos y determina los parámetros de las curvas de Gauss que mejor ajustan a los mismos, dando su área. El programa entrega las intensidades relativas, corregidas por la eficiencia de detección, y la energía de los picos, si se le provee de curvas de calibración.

Las energías gamma se calculan sin embargo con otro programa mucho más breve que ajusta un polinomio de 3er. grado entre los puntos de calibración.

También se utilizan programas que encuentran la exponencial que ajusta mejor a los datos experimentales correspondientes a las mediciones de vidas medias.

Algunos de estos cálculos son aceptados por el sistema Hewlett-Packard 5 406B pero la mayoría de ellos reclaman una capacidad de memoria mucho mayor, por lo que se recurre normalmente a la computadora Bull-GE 625, instalada en YPF y a la IBM 360/65 del Ministerio de Bienestar Social.

III. PRIMEROS RESULTADOS

Dado que algunos isótopos del Kr y del Xe ya habían sido estudiados en proyectos similares (7) (8), los estudios iniciales se enfocaron hacia los gases nobles, con el propósito de realizar un "test" completo del proyecto. Además de significar una prueba para el equipo, era el primer paso para la obtención de isótopos de Br y I, que eran los que revestían mayor interés.

De esta manera se midieron las vidas medias y se estudió el espectro gamma de los isótopos del Kr de masas 89, 90 y 91 y del Xe de masas 137, 138, 139, 140 y 141.

En todos estos casos se reprodujeron los espectros gamma obtenidos en Ames, (Iowa) por el proyecto TRISTAN (9). Cualquiera de ellos es un buen ejemplo de la complejidad que es de esperar en estos nucleidos, ya que los rayos gamma observados superan el centenar. Las vidas medias involucradas van desde 17 min (^{138}Xe) a 1,7 seg (^{141}Xe).

Creemos que el límite de la menor vida media no está dado actualmente por el sistema de transporte, sino por los rendimientos independientes de fisión, que disminuyen rápidamente al alejarse de la línea del Z más probable.

Los nucleidos de la masa 138 y 139 fueron analizados con profundidad y los resultados se presentaron a la 52da. Reunión de la Asociación Física Argentina, en julio de 1969.

Los primeros espectros y correspondientes a isótopos del Yodo se lograron entre fines de 1969 y comienzos de 1970. Las masas 132, 133, 134, 135 y 136 se obtienen con rendimientos razonables para ser medidas. Por su vida media larga las 132, 133 y 135 se estudian "off-line", o sea que se recoge su actividad durante un lapso, (al mismo tiempo que se mide "on-line" otra masa) y luego se mide su decaimiento.

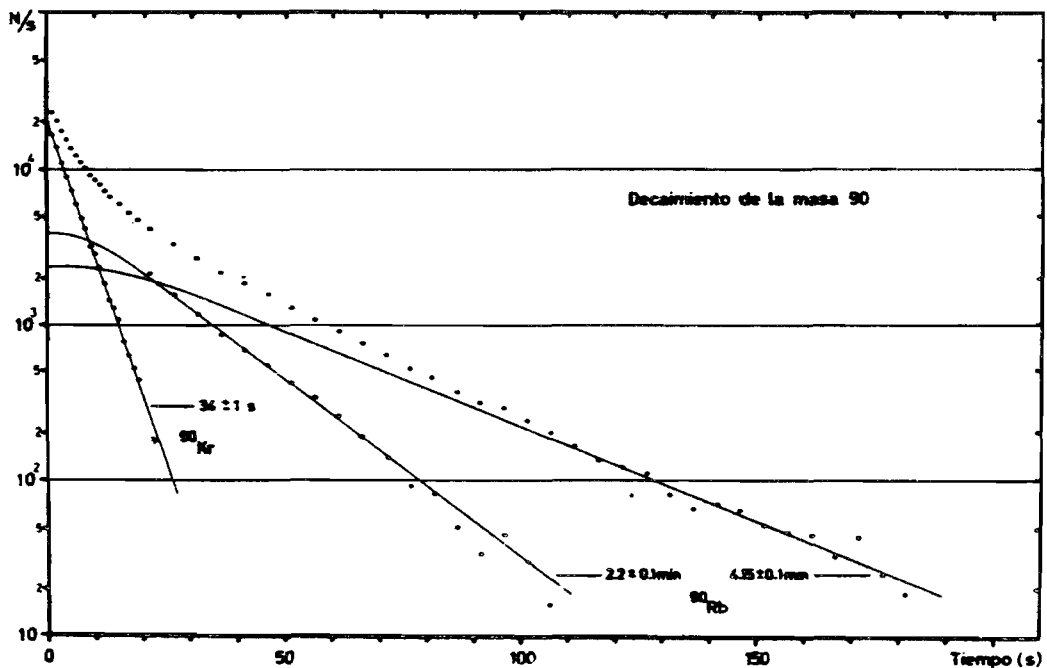


Figura 8
Vidas medias de ^{90}Kr y ^{90}Rb

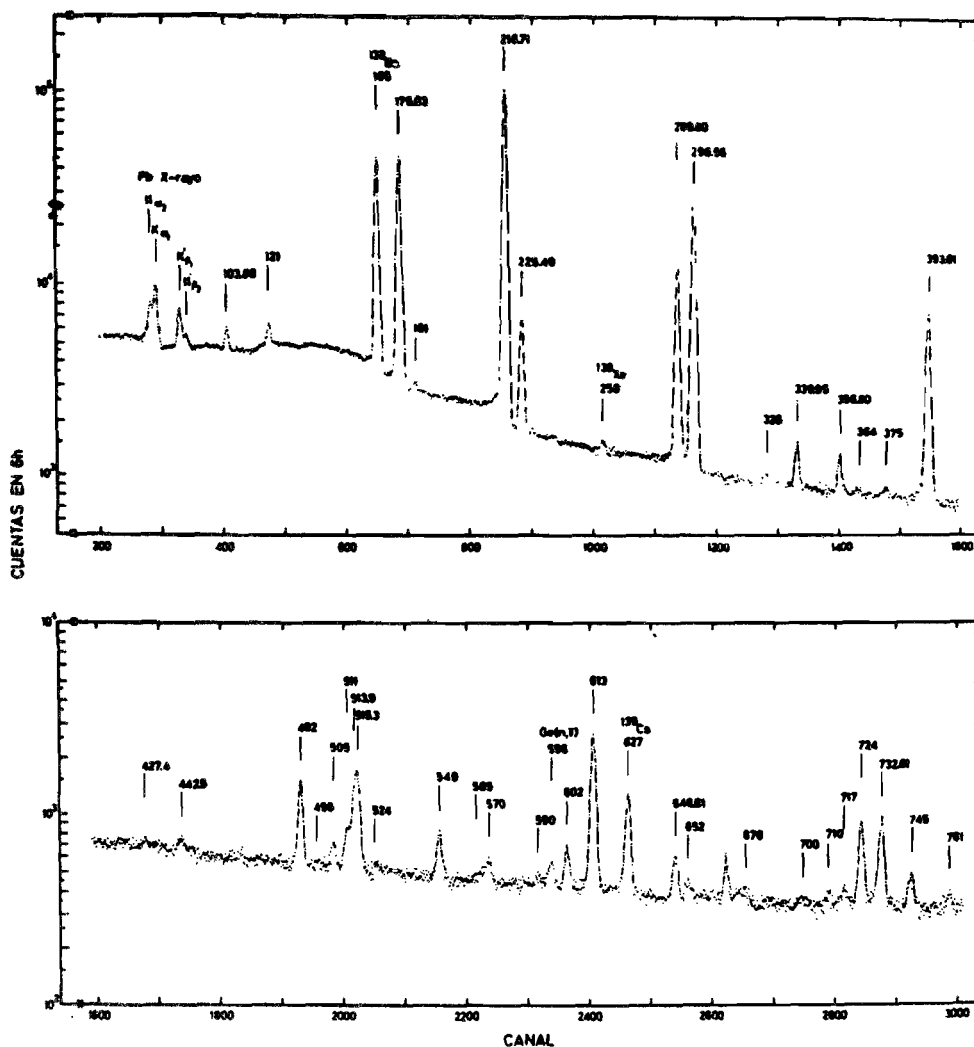


Figura 9
Espectro parcial de los rayos γ y del decaimiento del ^{139}Xe , medido 'en-línea' durante 6 h con el detector de Ge(Li) operado a 0,25 keV/canal

El esfuerzo ha sido puesto en el estudio del decaimiento del estado isomérico de 3,5 min del ^{134}I (10). Las energías e intensidades relativas de los rayos gamma observadas en el decaimiento del estado fundamental ($T_{1/2} = 53$ min) están en buen acuerdo con las recientemente publicadas (11).

Se midió la vida media y la energía de la transición isomérica resultando $3,56 \pm 0,08$ min y $272,2 \pm 0,3$ keV respectivamente. Para poder establecer definitivamente su carácter de isomérica se le midió el coeficiente de conversión a esta transición. El resultado $\alpha_K = 0,20 \pm 0,03$ y la relación $K/L + \dots = 2,6 \pm 0,3$, aseguran una multipolaridad $E3+$ ($< 1\% M4$). La diferen-

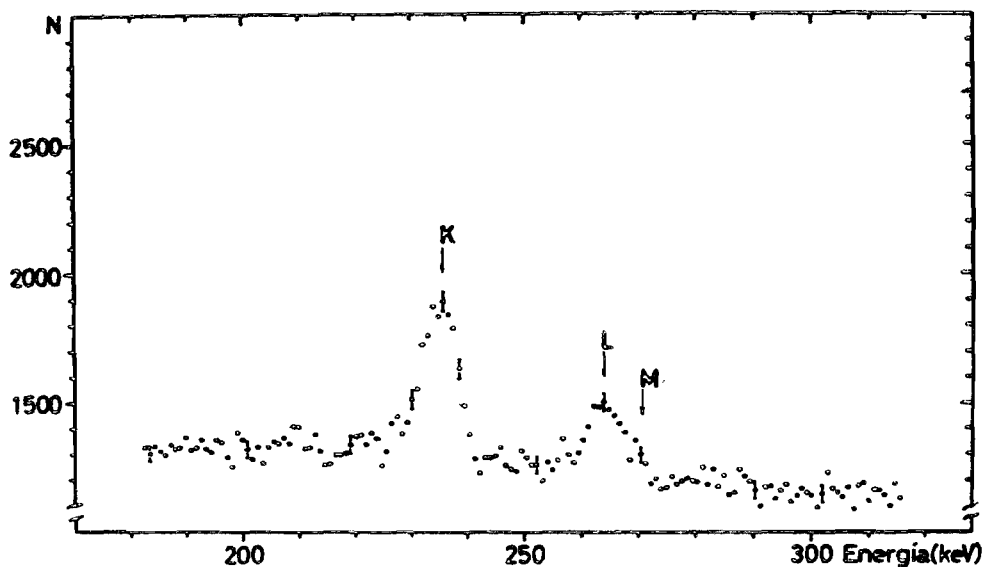


Figura 10
Espectro de electrones de conversión de la transición de 272 keV en ^{134m}I .
Detector de Si(Li) de 0,3 cm³.

cia de energía entre las líneas de conversión L y K, que resultó ser de $28,4 \pm 0,2$ keV, ubica esta transición en el Yodo. Además, mediciones de coincidencias γ - γ muestran que el rayo de 272 keV no está en coincidencia con las transiciones de 847 y 884 keV que son las más intensas en el ^{134}Xe .

La cantidad de rayos X de ~ 29 keV observados con el detector de Si(Li), que tienen vida de 3,5 min es muy alta para corresponder a la conversión de la transición de 272 keV solamente. En consecuencia, debe existir por lo menos una transición de baja energía con este período.

Mediciones de coincidencias X-gamma dieron por resultado coincidencias entre el rayo de 272 keV y la radiación X, lo que indica que hay una transición de baja energía ubicada en el Yodo, pero no fue posible observarla directamente por razones instrumentales. Se determinó la existencia de una alimentación β directa desde el nivel isomérico a los niveles del ^{134}Xe , con una intensidad de 8 ± 6 %.

El decaimiento del ^{135}I da lugar a gran número de rayos γ , entre los cuales se encuentra uno de energía igual al que desexcita al nivel isomérico de 15,6 min del ^{135}Xe . Puesto que en el espectro de electrones de conversión también se lo observa como una transición de vida media larga, el nivel de 15,6 min aparece poblado desde el ^{135}I .

La determinación de multipolaridades de transiciones permite asignar impulsos angulares y paridades a niveles nucleares. Se obtuvieron multipolaridades de transiciones en los isotópos $^{133, 136}\text{Xe}$, $^{133, 135, 137, 138, 139}\text{Cs}$ y $^{138, 139}\text{Ba}$ a través de la medición de los coeficientes de conversión interna de la línea K y de las relaciones de intensidades de las líneas de conversión K y L + M.

BIBLIOGRAFIA

1. D.E. BES; Nucl. Instr. and Meth. 38 (1965) 277.
2. G. ANDERSSON; Arkiv for Fysik 36 (1967) 61.
3. E.J. BERTOMEU y C.A. MALLMANN; publicaciones de la CNEA, miscelánea N° 1 (1954)
4. A.C. WAHL; J. Inorg. Nucl. Chem. 6 (1958) 263.
5. T. ALVAGER and J. UHLER; Prog. Nucl. Tech. Instrum. 3 (1968) 159.
6. T. INOUE, T. HARPER and N.C. RAMUSSEN; Nucl. Instr. and Meth. 67 (1969) 125.
7. S. BORG, V. FAGERQUIST, G. HOLM and F. KROPFF; Nucl. Instr. and Meth. 38 (1965) 296.
8. T. ALVAGER, R.A. NAUMANN, R.F. PETRY, G. SIDENIUS and T. DARRAH THOMAS; Phys. Rev. 167 (1968) 1105.
9. W.L. TALBERT; Comunicación privada
10. H.N. ERTEN, C.D. CORYELL and W.B. WALTERS; B.A.P.S. 14 (1969) 1225 C.E.8.
11. W.G. WINN and D.G. SARANTITES; Phys Rev. 184 (1969) 1188.
12. A. LUNDAN and A. SIVOLA; Ann. Acad. Sci. Fenn. Ser. A VI N° 288 (1968) 1.