

# La Física Nuclear en otras ciencias, la industria y la tecnología

Manuel García León y Alejandro Martín Sánchez

*El desarrollo de la Física Nuclear ha proporcionado técnicas y metodología experimental utilizadas para la resolución de problemas en muchas áreas de la Ciencia, la Tecnología, las Humanidades y la Salud. Detectores de radiación, aceleradores, reactores nucleares, elementos radiactivos, etc. son potentes herramientas para la investigación en laboratorios, museos, hospitales y otras muchas y variadas instalaciones no directamente relacionadas con la Física Nuclear. Además, su uso ayuda a resolver incluso problemas sociales inmediatos. El mundo de la Física Nuclear Aplicada crece continuamente y encuentra cabida en cada vez más ámbitos científicos y sociales. Pretendemos en este artículo reflejar todo este potencial de aplicaciones de la Física Nuclear.*

## 1. Introducción

Puede considerarse que la Física Nuclear comenzó hace aproximadamente un siglo, durante la “década milagrosa”, entre 1895 y 1905, cuando se establecieron los fundamentos de prácticamente toda la Física moderna [1]. Como resultado de los estudios realizados y las teorías propuestas, hoy en día poseemos un entendimiento bastante razonable de la estructura y propiedades de los núcleos. Pero además, las técnicas matemáticas y las experimentales empleadas en Física Nuclear han tenido repercusiones importantes en muchas otras áreas de la Física, entre las que podemos citar Física Atómica o Física de la Materia Condensada, Física de Partículas, Astrofísica, etc. [2].

Es más, las técnicas experimentales e instrumentación típicamente nucleares tienen hoy día un inmenso campo de aplicación. Como ejemplo paradigmático sirven las aplicaciones a la Medicina, ya que, con las técnicas de Física Nuclear se pueden llevar a cabo diagnóstico y terapia en partes del cuerpo humano que serían inaccesibles sin el uso de cirugía. Tampoco hay que olvidar que es la energía desprendida en los procesos de fisión nuclear que tienen lugar en las centrales nucleares, la que suministra una buena proporción de la energía eléctrica consumida en las sociedades desarrolladas. La energía nuclear de fisión, controvertida fuente de energía, es, para muchos, totalmente necesaria para hacer frente al consumo energético actual. En este sentido, cabe también puntualizar que es en el proceso de fusión nuclear donde se han puesto las esperanzas de futuras fuentes de energía sin los engorrosos desechos radiactivos.

Aparte de esas aplicaciones, existen otras muchas, y muy importantes, a la industria, la minería, la historia, el medio ambiente, etc. El objeto del presente artículo es realizar una descripción de las técnicas nucleares empleadas en muy diversos campos de la actividad humana, excluyendo intencionadamente las aplicaciones a la Medicina y a la Tecnología Nuclear que son objetos de sendos artículos en este número monográfico.

Hemos estructurado el trabajo en dos partes. La Sección 2 está dedicada a las aplicaciones que surgen asociadas al uso de radionucleidos y a la detección y medida de la

radiactividad. La segunda parte de este escrito se dedica a la revisión de las que, a nuestro juicio, son las aplicaciones más relevantes de los aceleradores de partículas y los reactores nucleares como instrumentos típicamente nucleares que son. Estos dos temas son los que nos ocuparán las secciones 3 y 4 del presente artículo. Finalmente y, a modo de epílogo, presentaremos las conclusiones más destacadas de las aplicaciones de la Física Nuclear en otras ramas.

## 2. Física Nuclear Aplicada. Radionucleidos, radiaciones y detectores de radiación

### 2.1. Datación radiactiva

A pesar de la naturaleza al azar de la desintegración radiactiva, ésta nos puede ofrecer un “reloj” muy seguro y útil para poder registrar el paso del tiempo. El método consiste en la aplicación de la conocida ley exponencial de la desintegración radiactiva, o de algunas de sus ecuaciones derivadas, que dan la evolución temporal de la población de elementos radiactivos en una muestra. Si la población radiactiva acompaña a la muestra a lo largo del tiempo, la determinación de su actividad nos ofrece una estimación de su edad. Este método será más fiable cuanto mejor conozcamos la constante de desintegración radiactiva del radionucleido, que gobierna el ritmo de desintegración de los núcleos, y del método que empleemos para contabilizar el número de átomos presente en la muestra en los diversos tiempos considerados. En este sentido, el uso de detectores de radiación de muy bajo ruido de fondo para determinar la concentración de núcleos radiactivos en las muestras que queremos datar es clave. Y la experiencia en el diseño, desarrollo y utilización de los mismos debemos incluirla en el haber de la Física Nuclear.

La dificultad de utilización de este procedimiento surge cuando tratamos de aplicarlo a sucesos ocurridos a escala geológica ( $\sim 10^9$  años) para la cual, los radionucleidos útiles, los llamados primordiales o primigenios, tienen constante de desintegración muy pequeña. Tan pequeña que, en algunos casos, es muy difícil medir la radiactividad de una muestra, por ser muy débil. Afortunadamente, la ley exponencial, o

sus derivadas, también pueden expresarse en términos de número de núcleos. En estos casos, conviene a veces contabilizar núcleos en lugar de medir radiactividad. Eso se hace con espectrómetros de masas, de los que hablaremos en la Sección 3. Podemos citar, en este sentido, los métodos basados en la desintegración del  $^{87}\text{Rb}$ , formando  $^{87}\text{Sr}$ , utilizando  $^{86}\text{Sr}$  estable, o bien, la desintegración de  $^{40}\text{K}$  a  $^{40}\text{Ar}$ , o las de  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  a  $^{207}\text{Pb}$  y  $^{206}\text{Pb}$ , respectivamente [2]. Con este tipo de métodos, se ha llegado a determinar la edad de la Tierra (unos cuatro mil quinientos millones de años), o de diversas muestras geológicas tales como rocas, yacimientos, etc., e incluso la edad de otros cuerpos del sistema solar. En concreto se ha determinado que las rocas procedentes de la Luna en las diversas misiones Apolo tienen la misma antigüedad que las encontradas en la Tierra, manifestándose así que ambos cuerpos celestes se formaron en la misma época [3].

Para realizar la datación radiactiva de muestras más recientes se usa el conocido método del  $^{14}\text{C}$ , que consiste en la determinación del tiempo transcurrido desde la muerte de un ser vivo hasta nuestros días, por comparación con la cantidad de este radionúclido en la muestra estudiada. Este método es utilizable en muestras de animales o plantas que vivieron hasta hace unos cincuenta mil años. También aquí el uso de espectrómetros de masas basados en aceleradores de partículas ha superado en precisión al método de medida directa de la emisión radiactiva del  $^{14}\text{C}$ .

Y, para sucesos ocurridos en las últimas centenas de años, puede aplicarse la medida de radiación en muestras ambientales para la datación de procesos sedimentarios o de erosión. Para ello suelen determinarse las concentraciones de radionúclidos tales como  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , etc.

## 2.2. Aplicaciones industriales

El hecho de poder disponer de fuentes radiactivas naturales o artificiales ha permitido que existan aplicaciones en muy diversos campos. Trataremos de mencionar algunas de ellas.

La gammagrafía industrial es utilizada para estudiar si en la fabricación de determinadas piezas se han producido fisuras o defectos internos que podrían alterar la calidad de la pieza. Para este fin se utilizan fuentes radiactivas de  $^{60}\text{Co}$  fundamentalmente. Las radiaciones gamma se usan también para la realización de imágenes de tuberías, soldaduras o detección de grietas en piezas aerodinámicas de aviones, donde un defecto pequeño podría tener graves consecuencias. Los rayos X son utilizados en este mismo sentido, pero su energía es menor, aunque nos vamos acostumbrando, por desgracia, a los cada vez más frecuentes detectores de metales de los aeropuertos, despachos oficiales, dependencias administrativas, etc.

Existen además indicaciones de nivel de tanques que se basan en la detección de las radiaciones emitidas por una fuente y detectadas a través del líquido de llenado. También se utilizan fuentes radiactivas, en el mismo sentido, para la comprobación del llenado de botellas, cigarrillos, bombonas, uniformidad del espesor de láminas de papel, láminas de acero, grosor de aglomerados de madera, revestimiento de capas de materiales, capas de pintura, etc. Estos procedimientos suelen utilizar la transmisión de radiación gamma

a través de los materiales estudiados, si quiere estudiarse el grosor de los mismos, o bien, la dispersión de la radiación emitida por una fuente sobre una superficie, cuando lo que se desea es estudiar su homogeneidad.

Algunos equipos con fuentes radiactivas sirven para medir la densidad y humedad de los suelos en relación, por ejemplo, con la realización de obras civiles, tales como pantanos, puentes, carreteras o líneas de ferrocarril. También son utilizados, mezclados con el hormigón para la determinación de la calidad de las inyecciones de cemento que fijan grandes obras de ingeniería en el mar (bases de puentes, plataformas petrolíferas, etc.). En minería también son importantes estos estudios, que suelen completarse también con técnicas neutrónicas. Entre las aplicaciones analíticas de las fuentes gamma usadas en minería puede destacarse el control del azufre (impurezas) en los productos petrolíferos circulando por oleoductos, o en el de cenizas de hulla o lignito en cintas transportadoras. En cuanto a las aplicaciones de las fuentes neutrónicas, su uso más común es el del análisis de la composición de materiales que se encuentran en lugares inaccesibles, tales como los sondeos de prospección de hidrocarburos, de carbón o de diversos metales. Mediante estos recursos es posible evaluar los recursos de una cuenca minera y planificar su explotación.

Para la esterilización de material quirúrgico se utilizan hoy en día fuentes radiactivas de  $^{60}\text{Co}$ . Los productos (guantes, jeringuillas, gasas, sondas, cánulas, etc.), una vez envasados son sometidos a irradiación con objeto de eliminar todos los microorganismos que podrían causar posteriormente infecciones al utilizarlos. Este método de esterilización es completamente necesario cuando el material está compuesto por plásticos o gomas, en los que no podrían aplicarse tratamientos térmicos porque dañarían el material, o tratamientos de fumigación con determinados gases, que se han mostrado que pueden producir residuos cancerígenos que podrían afectar a los pacientes o al personal sanitario.

## 2.3. Agricultura y alimentación

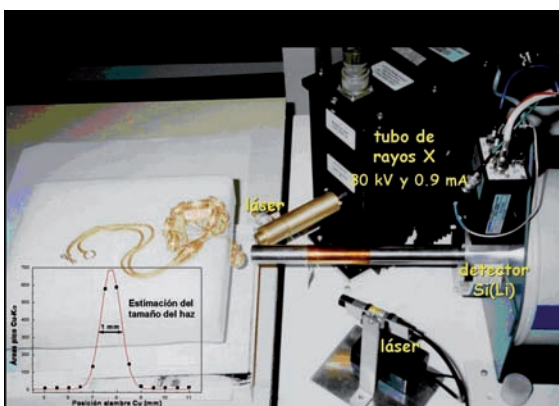
La población mundial está aumentando a pasos agigantados y se hace cada vez más necesaria la búsqueda de nuevas técnicas para poder mantener alimentos conservados que puedan ser transportados a diversos lugares y consumidos en diferentes ocasiones. A las técnicas de conservación "tradicionales" (congelación, refrigeración, liofilización, enlatado, adición de conservantes, etc.) se ha venido a proponer la de la esterilización y conservación de alimentos por irradiación [4]. Con una fuente de  $^{60}\text{Co}$  se irradian los alimentos y, no sólo se consigue eliminar insectos (mosca de la fruta, por ejemplo) durante su etapa de almacenamiento, sino también la inhibición de la brotación en bulbos, tubérculos (patatas, ajos, cebollas), deteniendo el proceso germinativo espontáneo de estos productos. Si la irradiación se aplica cuando los alimentos están herméticamente envasados, entonces se produce la muerte de los microorganismos que deterioran el producto, y el retardo enzimático de la maduración de fruta o la inhibición de germinación de semillas, entre otros efectos. La irradiación de alimentos es una técnica que se está utilizando en la actualidad en algunos países.

Se usan materiales radiactivos para estudiar la eficacia de fertilizantes, la absorción por las plantas y el nivel de degradación de insecticidas, las áreas de raíces activas en árboles, la eficiencia de sistemas de riego, etc. Se emplean materiales radiactivos para estudios relacionados con el abastecimiento de agua, intercomunicación de acuíferos, etc. Todas estas son algunas aplicaciones de los radionúclidos como trazadores.

Otro uso extendido en la agricultura es la irradiación con objeto de obtener modificaciones genéticas que resulten en la mejora en la producción de especies alimentarias nuevas o ya existentes. Además, también se utiliza la irradiación para la lucha contra determinadas plagas. Algunos insectos, como la mosca tsé-tsé, la mosca mediterránea de la fruta, la mosca de los establos, los mosquitos, o ciertas especies de gusanos, pueden provocar enfermedades o destruir cultivos alimentarios. La suelta, en las zonas afectadas, de grandes cantidades de machos criados en laboratorios y esterilizados con radiaciones ionizantes se usa para controlar la plaga y, en algunos casos, erradicarla.

## 2.4. Varios

Aparte de las aplicaciones ya mencionadas con el uso de radionúclidos, podemos añadir algunas más no clasificables en los apartados anteriores. Entre ellas podemos citar el uso de materiales y fuentes radiactivas en investigación en diversas ramas tales como Biología, Física, Química, Medicina o Ciencias Ambientales, por nombrar algunas.



**Figura 1.** Dispositivo de fluorescencia de rayos X portátil del Centro Nacional de Aceleradores, útil para el análisis *in situ* de muestras de interés artístico. En la foto se observa su aplicación al análisis de la composición de joyas de origen tartésico.

También se ha utilizado irradiación para el estudio y conservación de obras de arte, o descubrimiento de falsificaciones artísticas o históricas. En la conservación de obras de arte se ha logrado erradicar la presencia de insectos xilófagos, hongos y otros elementos destructivos, sometiendo las piezas (estatuas de madera, pergaminos, etc.) a una fuente radiactiva. Para el estudio de la pigmentación en cuadros y esculturas suele utilizarse, entre otras, la técnica de fluorescencia de rayos X, que consiste en la excitación de los átomos mediante un tubo de rayos X (Figura 1), estudiando posteriormente los fotones emitidos por el material que ha sido irradiado. De esta manera se ha conseguido establecer ciertas diferencias en los colores utilizados en diversas

obras, su composición, y ayudar así en la determinación de obras originales o copias posteriores.

Hace algunos años se utilizaron fuentes de  $^{241}\text{Am}$  en las puntas de pararrayos con objeto de ionizar el aire de alrededor y así atraer más eficazmente las descargas eléctricas. También se utilizaron fuentes radiactivas en detectores de humos, midiendo la diferencia entre la ionización del aire que rodea a la fuente cuando el aire está limpio, o bien, cuando contiene aerosoles gruesos producidos por humos. Aunque su peligrosidad era escasa, debido al tipo de radiación emitida, en caso de deterioro, el riesgo de irradiación para el público por manipulación se convertía en excesivamente alto, y por ello el uso de este tipo de aparatos ha sido restringido por el Consejo de Seguridad Nuclear en España.

Cuando se necesitan generadores pequeños de energía para alimentación de aparatos durante una larga duración pueden emplearse algunos radionúclidos de vida intermedia, como el  $^{238}\text{Pu}$ , capaces de generar la energía necesaria para el funcionamiento durante algunos años. En este sentido se han empleado pilas de combustible nuclear en satélites de comunicaciones y sondas espaciales [5]. También en boyas marinas. Este tipo de radionúclidos también se han utilizado como fuentes de energía en marcapasos, para evitar demasiadas intervenciones quirúrgicas en la recarga del aparato. En instalaciones tales como refinerías o plataformas petrolíferas o, en general, instalaciones donde una descarga eléctrica pueda provocar un incendio, los radionúclidos son utilizados en carteles luminosos indicadores, sustituyendo a los equipos tradicionales.

Hoy en día la utilización de los diversos radionúclidos está cada vez más extendida en nuestra sociedad, como puede comprobarse. Puede ampliarse la cobertura de este trabajo con la excelente puesta al día en este tema en el artículo recientemente publicado por Rueda [6].

## 3. Física Nuclear Aplicada con Aceleradores

El desarrollo de los aceleradores de partículas en todas sus versiones ha venido siempre pilotado por la búsqueda de los constituyentes de la materia y de las interacciones fundamentales entre ellos. No obstante, desde el principio de su historia, los aceleradores han contribuido a otras áreas científicas y su impacto en ellas ha sido claro. En la Figura 2 observamos cómo Betghe [7] ilustra esta idea. El llamado “árbol de aceleradores de Betghe” muestra como ya desde 1940 los aceleradores se han aplicado a problemas médicos, tecnológicos, de materiales, etc. Y curiosamente, esa ha sido una vocación mantenida a lo largo de la historia de los aceleradores.

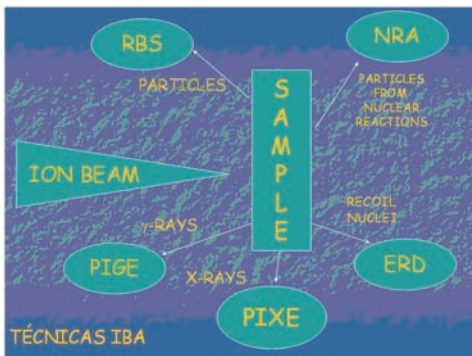
Más aún, a finales de los setenta del siglo pasado, muchos aceleradores imprescindibles en las primeras tres décadas de la Física Nuclear, comienzan a quedar obsoletos. Y ello porque las energías que eran capaces de proporcionar a los proyectiles acelerados resultaban pequeñas para aprender algo más del núcleo. Las infraestructuras experimentales creadas alrededor de aquellas instalaciones comienzan a buscar una nueva fuente de vida científica: las aplicaciones. Y lo que antes había sido una vocación generada colateralmente, pasa a ser el objetivo básico de algunos laboratorios. Consecuencia de ello fue la producción de una intensa acti-

vidad en el campo de las aplicaciones de los aceleradores. Tanto fue así que en un corto plazo de tiempo el diseño de aceleradores específicamente destinados a aplicaciones se convirtió en una disciplina autónoma que hoy día todavía sigue dando grandes beneficios económicos a las empresas constructoras, y excelentes retornos tecnológicos al mundo científico-técnico e industrial.



**Figura 2.** El “Bethge accelerator tree” mostrando como a lo largo de la historia del desarrollo de los aceleradores se han llevado a cabo aplicaciones de los mismos en infinidad de problemas científicos.

Razones de espacio no permiten una recopilación enciclopédica de las múltiples aplicaciones de los aceleradores. Conviene concentrar el relato en lo fundamental. Desde ese punto de vista, y excluyendo las aplicaciones médicas, la contribución más relevante de los aceleradores al mundo de las aplicaciones surge del uso de dos grupos de técnicas: las técnicas de Análisis con Haces de Iones (IBA) y la Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS).

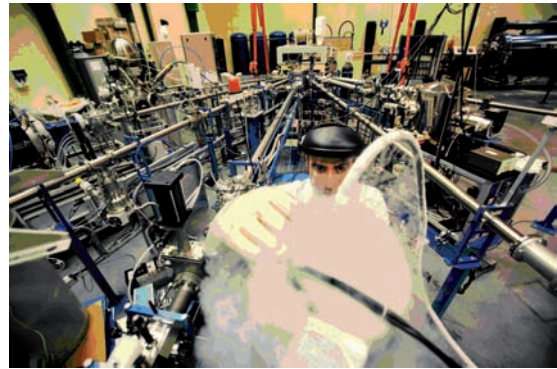


**Figura 3.** Representación esquemática de las Técnicas IBA. Un haz de partículas aceleradas incide sobre una muestra provocando reacciones nucleares o en el nivel atómico. Las radiaciones resultantes de la reacción informan sobre distintos aspectos de la muestra irradiada.

### 3.1 Técnicas de Análisis con Haces de iones (IBA)

Las técnicas IBA (Ion Beam Analysis) consisten básicamente en el bombardeo de muestras con haces de iones con objeto de producir reacciones en el nivel atómico y nuclear. La Figura 3 recoge la base de las técnicas IBA y la Figura 4 muestra la instalación del Centro Nacional de Aceleradores (CNA) para la realización de experimentos IBA. El espectro de las radiaciones obtenidas tras las reacciones se recoge con los detectores adecuados, lo que nos ayuda a identificar la composición elemental o isotópica de la muestra bombardeada.

Y no sólo a identificar, sino a cuantificar la composición también en la mayoría de los casos.



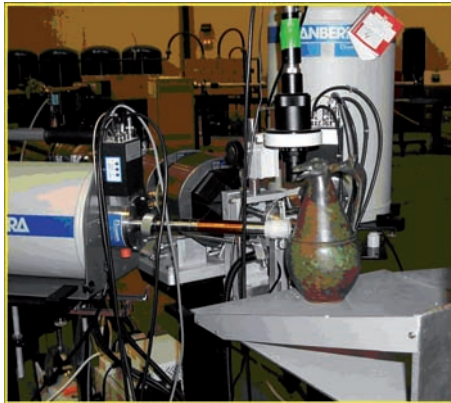
**Figura 4.** Sala del acelerador tandem van de Graaff de 3 MV (al fondo en azul) instalado en el Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Son siete las líneas de haz o de experimentación que tiene, incluyendo una para Física Nuclear Básica. El resto se dedican a Técnicas IBA en sus distintas versiones. Se observa en primer plano el proceso de cambio de nitrógeno líquido en uno de los detectores de radiación.

Son varias las técnicas IBA [8]. Una de las más ampliamente utilizadas es la *espectrometría de retrodispersión Rutherford (R.B.S.)*. RBS es una técnica de alta sensibilidad y carácter no destructivo, basada en la detección de proyectiles, normalmente partículas  $\alpha$  a varios MeV, retrodispersados en la muestra. El espectro de energías tras la retrodispersión identifica el núcleo contra el que colisionó la partícula  $\alpha$  y la profundidad (hasta algunas decenas de  $\mu\text{m}$ ) en que tuvo lugar la colisión. De esta forma pueden obtenerse, por ejemplo, perfiles de concentración de impurezas implantadas en diferentes matrices, pueden medirse espesores de películas finas e interfases, así como la estequiometría de compuestos, etc. Además, el estudio de las partículas retrodispersadas sobre las direcciones de máxima simetría de monocristales puede poner de manifiesto el fenómeno de la canalización iónica (Channeling). Esta técnica permite la localización de impurezas en redes cristalinas, cuantificación de la calidad cristalina de un monocristal, determinación de concentración de defectos, determinación de la composición y espesor de capas amorfas superficiales, etc.

El *Análisis mediante Reacciones Nucleares (N.R.A.)* es otra técnica que posee un enorme potencial para la detección de trazas de elementos ligeros en matrices de elementos pesados. Con las energías típicas proporcionadas por aceleradores de tamaño medio o pequeño, las reacciones nucleares tienen lugar principalmente mediante colisiones con núcleos ligeros. Podemos citar algunos ejemplos:  $^{14}\text{N}(d,\alpha)^{12}\text{C}$  a 1400 keV,  $^{16}\text{O}(d,\gamma)^{17}\text{O}^*$  a 860 keV, o  $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}$  a 950 keV, aunque existe todo un abanico de posibilidades que pueden ajustarse a las necesidades de cada problema. En el caso de que detectemos radiación  $\gamma$ , hablamos de *P.I.G.E. (Particle Induced  $\gamma$ -Ray Emission)*.

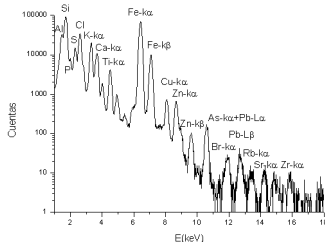
Otra técnica muy utilizada, probablemente la más popular, es la denominada *P.I.X.E. (Particle Induced X-Ray Emission)*, que consiste en la producción de rayos X característicos mediante el bombardeo de la muestra con un haz de partículas cargadas. De esta forma puede llevarse a cabo un análisis muy sensible (del orden de la ppm), no destructivo

y multielemental. En la Figura 5 vemos un experimento de PIXE realizado en la llamada línea de haz externo del CNA. Una pieza de interés arqueológico es irradiada con protones para analizar su composición. El análisis es no destructivo.



**Figura 5.** Experimento PIXE (ver texto) en una muestra de interés arqueológico. Se irradia el jarrón con un haz de protones en la línea de haz externo del CNA. Los rayos X obtenidos se recogen con el detector. El espectro de los mismos (ver siguiente Figura) informa sobre la composición de la muestra. En este caso, el citado espectro puede ayudar a identificar el origen de la pieza, su proceso de fabricación y, quizás, su edad aproximada.

La información que se obtiene de un experimento de este tipo la observamos en la Figura 6, donde tenemos un espectro de rayos X obtenido mediante PIXE.



**Figura 6.** Espectro PIXE de un sedimento lacustre obtenido con un detector de Germanio. Los centroides de los picos identifican el elemento que forma parte de la muestra. Las integrales de cada pico los cuantifica.

La llamada técnica micro-PIXE es una variante de la anterior, que permite el análisis de muestras con resoluciones espaciales del orden de 1 ó 2  $\mu\text{m}$ . Ello es posible con las llamadas líneas de microsonda, en las que el haz de protones se estrecha mediante una combinación adecuada de cuadrupolos hasta tamaños de ese orden. Esto permite caracterizar la composición de una muestra midiendo directamente sobre ella (zonas de una roca, partículas calientes, zonas de acumulación de contaminantes en una planta, etc) con una gran precisión espacial. Haciendo un barrido del microhaz sobre la muestra, podemos incluso obtener la distribución espacial de los distintos elementos que la componen (“mapeos” multielementales) en áreas preseleccionadas.

Por último, en el *Análisis por E.R.D.A. (Elastic Recoil Detection Analysis)* basado también en la dispersión elástica, se detectan las partículas que salen de la superficie de una muestra al ser bombardeada. Se usa por lo general para estu-

diar perfiles de concentración superficiales de elementos ligeros usando como proyectil iones de mayor masa atómica.

En términos globales las técnicas IBA son poderosas herramientas de caracterización de materiales. Son sensibles, rápidas e insustituibles en algunos casos, sobre todo cuando se requiere no destruir la muestra que se analiza. Su versatilidad permite abordar muy competitivamente problemas en áreas tan diversas como Ciencias de Materiales, Arqueología, Biomedicina, Medio Ambiente, etc.

No es extraño que en los laboratorios donde se realizan análisis IBA se lleven a cabo experimentos de implantación iónica o irradiación de materiales. Ese es el caso, por ejemplo, del CNA. La posibilidad con ello de modificar las propiedades de los materiales, en su más amplia acepción, es utilísima en los laboratorios donde de se realiza Física Nuclear Aplicada. Los aceleradores, de nuevo, son imprescindibles para llevar a cabo dichos experimentos.

### 3.2 Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS)

La otra técnica clave es la llamada AMS, de gran sensibilidad, que permite la detección de radionucleidos presentes en muestras con muy bajas concentraciones, o con muy alto periodo de semidesintegración [9]. En ambos casos, es mejor medir el número de núcleos de una determinada masa que la actividad a la que dan lugar. Y eso se consigue con técnicas de espectrometría de masas.

En relación a la espectrometría de masas tradicional, AMS consiste en el acoplamiento de un espectrómetro de masas convencional a un acelerador, de tipo tandem, lo que conduce a una mejora muy importante en la sensibilidad de la técnica.



**Figura 7.** Instalación de Espectrometría de Masas con Acelerador (AMS) del CNA. Consta de una fuente de iones con intercambiador con capacidad para 200 muestras y de un acelerador tandem de tipo Cockroft-Walton de 1 MV.

La Figura 7 muestra el espectrómetro de masas con acelerador del CNA. En este caso, los núcleos que se quieren analizar se extraen de una fuente de iones. En la línea de baja energía se realiza un primer análisis de masa mediante un deflector magnético. Posteriormente, el haz de iones se inyecta en un acelerador tandem Cockroft-Walton de 1 MV. El análisis final de la masa de los componentes del haz iónico se hace con un deflector magnético de  $90^\circ$  y uno electrostático de  $120^\circ$ . Los núcleos problema se detectan con un telescopio  $\Delta E$ -E de tipo cámara de ionización.

Como dato de interés podemos decir que para núcleos específicos se pueden conseguir detectar cocientes isotópi-

cos entre el isótopo radiactivo y el isótopo estable de hasta  $10^{-12}$  e incluso  $10^{-15}$ . Esta sensibilidad ha permitido la aplicación de AMS a numerosos campos científicos. Así, hay una muy amplia documentación en la literatura científica acerca de cómo la Física Nuclear Básica, la Astrofísica, las Ciencias de Materiales, la Arqueología, la Biomedicina, la Geología y, por supuesto, todas las Ciencias relacionadas con estudios ambientales y paleoambientales, se benefician de la potencia analítica de AMS.

La técnica AMS fue propuesta, y usada, en 1938 por Alvarez y Cornog para discriminar  $^3\text{He}$  de  $^3\text{H}$  [10]. Curiosamente, a pesar del éxito obtenido, AMS se olvidó durante unos 40 años, hasta que en 1977, coincidiendo con el declive de algunos viejos aceleradores usados para la Física Nuclear Básica, fue retomada por un buen número de grupos. Tras unos 30 años de existencia, AMS se ha convertido en una técnica imprescindible en la detección de radionúclidos como  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  y algunos otros, aunque con menos intensidad y para aplicaciones más específicas. Y ha contribuido enormemente al desarrollo de las Ciencias de la Tierra: geocronología, petrogénesis, sedimentología, hidrología, vulcanología, glaciología, oceanografía, paleoambientalismo, etc. e incluso para resolver algunos problemas en Física Nuclear, Astrofísica, Física de Partículas, Cosmología y Física de Estado Sólido o, en otro orden de cosas, en Medicina.

Igualmente la Arqueología debe mucho a AMS. De hecho, puede decirse que AMS nació en 1977 para resolver los problemas de sensibilidad que plantean los métodos radiométricos de datación por  $^{14}\text{C}$  [11]. La técnica radiométrica es altamente destructiva (necesita gramos de carbón para datar), consume mucho tiempo de trabajo (una semana de detector por muestra) y es poco productiva (por las razones anteriores). Ya que con AMS se mide la cantidad de núcleos de  $^{14}\text{C}$  en una muestra y no la radiactividad de la misma, su uso permite reducir la cantidad de muestra necesaria para producir una fecha hasta fracciones de miligramo (casi no destructiva, muy importante para objetos de interés especial), realizar la medición en fracciones de hora por muestra y, consecuentemente, es capaz de producir una mayor cantidad de fechas por unidad de tiempo que el método tradicional. Se puede decir que el gran desarrollo técnico experimentado por AMS en los últimos 20 años ha recibido un fuerte impulso de los requerimientos analíticos de esta técnica de datación. En la Figura 8 vemos ejemplares de los fondos bibliográficos de la Universidad de Sevilla datados por radiocarbono en el CNA mediante AMS. El carácter único de las obras requiere una técnica tan poco destructiva como AMS.

Por otra parte, la necesidad de extender el AMS, con la datación por  $^{14}\text{C}$  como principal aplicación, a más grupos de investigación, ha hecho que en los últimos años se haya desarrollado una variante del AMS, la de bajas energías. Los aceleradores convencionales, con terminales de entre 3 y 14 MV, dan paso a terminales de más reducido voltaje (0.5-1MV), como el del CNA, con costes mucho menores. Los resultados obtenidos para algunos isótopos ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{10}\text{Be}$ , isótopos de Pu) tradicionales en AMS con estos nuevos sistemas son muy competitivos.



**Figura 8.** Ejemplo de la importancia de la técnica de AMS para la datación por  $^{14}\text{C}$  de muestras de interés arqueológico, preservándolas adecuadamente, dada la pequeñísima masa necesaria para una datación precisa. En la Figura se ven dos ejemplares de manuscritos pertenecientes a los fondos históricos de la Universidad de Sevilla. Son un Tratado sobre los Agustinos y uno sobre Teología fechados ambos en el s. XV mediante radiocarbono en el CNA. Una técnica más destructiva hubiera imposibilitado su datación dado el valor de los ejemplares. En este caso la datación por  $^{14}\text{C}$  ha precisado las estimaciones paleográficas.

## 4. Física Nuclear Aplicada con Reactores Nucleares

Los reactores nucleares de fisión proporcionan una fuente de neutrones intensa y estable con la que llevar a cabo una muy amplia variedad de experimentos. Desde el punto de vista de la Física Nuclear Aplicada pueden destacarse dos aplicaciones fundamentales: la activación neutrónica y la difracción de neutrones.

### 4.1 Activación neutrónica

La llamada activación neutrónica (NAA, de Neutron Activation Analysis) es una técnica de análisis que permite describir y cuantificar el contenido isotópico y elemental de una muestra. NAA permite determinar los elementos mayoritarios, minoritarios y los elementos traza de una muestra con una sensibilidad cercana a las ppb para muchos casos. Es interesante decir también que puede hacerlo con virtualmente cualquier tipo de muestra.

Fueron Hevesy y Levi quienes en 1936 [12] la descubrieron. Desde entonces hasta ahora, NAA se ha convertido en una técnica de referencia con la que se comparan las distintas técnicas analíticas desarrolladas posteriormente.

Básicamente, consiste en el bombardeo de una muestra con neutrones, con objeto de producir reacciones de captura de tipo  $^AX(n,\gamma)^{A+1}X$ . La detección de la radiación  $\gamma$  emitida inmediatamente tras la captura (Prompt Gamma NAA) o la de las radiaciones que siguen la desintegración del núcleo  $^{A+1}X$  (Delayed NAA) ayudan a identificar y cuantificar la presencia de  $^AX$  en la muestra. La conexión entre la información experimental obtenida y las concentraciones en la muestra no es fácil pero sí posible [13]. Es el problema que ha de resolverse o, en muchos casos, la instalación experimental disponible, quien aconseja el uso de PGNAA o DNAA.

Como se sabe, hay varias formas de conseguir neutrones. Hay fuentes transportables, como las de Am-Be o Ra-Be,

capaces de producir neutrones mediante reacciones nucleares del tipo  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ . Las partículas  $\alpha$  en estos casos provienen de la desintegración del  ${}^{241}\text{Am}$  o del  ${}^{226}\text{Ra}$ . Las fuentes de fisión espontánea, como las de  ${}^{252}\text{Cf}$ , producen neutrones de fisión, y al igual que las anteriores son transportables. Pueden obtenerse neutrones también a partir de reacciones nucleares producidas en aceleradores. Por ejemplo, en el CNA es frecuente la reacción  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  ó  ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ . Los citados neutrones pueden usarse para experimentos varios, aunque para activación no es tan frecuente, dado que el flujo de neutrones obtenido es pequeño.

Para NAA se obtienen mejores sensibilidades o límites de detección mediante el uso de los altos flujos de neutrones que se obtienen en un reactor nuclear. Lo más útil en NAA, por tanto, y lo más usual, por otra parte, son los reactores nucleares de fisión.

Los flujos de neutrones en reactores nucleares varían de uno a otro. Los flujos útiles para realizar los experimentos también, dado que el dispositivo experimental puede estar dentro o cerca del núcleo del reactor, o no. En términos generales podemos hablar de flujos de aproximadamente  $10^{12}$  a  $10^{14}$  neutrones  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Ese flujo contiene neutrones de diversa energía; de hecho, se habla de un espectro de energía continuo.

Los neutrones realmente útiles para NAA son los llamados térmicos, por debajo de 0.5 eV, y, en menor magnitud, los epitérmicos, de 0.5 eV a 0.5 MeV [14]. La razón es que la sección eficaz de activación para los neutrones térmicos es muy grande, especialmente si la masa atómica del núcleo blanco es grande también. En muchas ocasiones, el 90-95% de los neutrones del flujo total cae en el rango térmico.

A veces se utilizan los neutrones rápidos. Éstos tienen energías superiores a 0.5 MeV. Los neutrones rápidos contribuyen muy poco a las reacciones de tipo  $(n, \gamma)$ . De hecho, las reacciones nucleares que producen son esencialmente del tipo  $(n, p)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$  y otras. No es lo más común como se ha dicho antes.

El equipo experimental convencional de NAA se completa con un detector de radiación  $\gamma$  de alta resolución en energía, como, por ejemplo, uno de Germanio. Un montaje de este tipo es aplicable a PGNAA o a DNAA, cuando se detecta radiación  $\gamma$  emitida tras la desintegración de  ${}^{A+1}\text{X}$ . Y, como se ha dicho, esto es lo más convencional. En ocasiones se prefiere detectar otro tipo de radiaciones emitidas por el núcleo producto de la reacción y entonces han de usarse otros detectores.

La versión más general, versátil y cómoda de NAA es la que utiliza este esquema experimental, en el que no es necesario ningún tipo de separación radioquímica. Ello es posible porque la radiación  $\gamma$  es muy penetrante y sale de la muestra casi sin ningún impedimento. Conviene recordar que, a veces, es necesaria la separación química de los productos de la reacción. Eso complica mucho el montaje experimental. Téngase en cuenta que la muestra tiene alta actividad. No es frecuente, hoy día, tener que optar por este procedimiento, ya que un buen detector de Ge permite el análisis multielemental, rápido y sensible de las muestras dada la magnífica resolución en energías que tienen. Y eso resuelve la mayoría de los problemas. En los comienzos de la técnica, sin embargo, lo frecuente era lo contrario y así

se generaron muchos procedimientos de extracción química rápidos al calor del desarrollo de la técnica. Ello no vencía la imposibilidad de llevar a cabo análisis de isótopos de vida media muy corta, lo que mermaba en aquellos momentos las posibilidades analíticas de NAA. Por las mismas razones es obvio que los análisis mediante PGNAA sólo son posibles de llevar a cabo hoy día.

Como se dijo antes, NAA es un método que proporciona bajos límites de detección. Por ejemplo, utilizando radiación  $\gamma$  proveniente de la desintegración de los núcleos producidos, y con un flujo de neutrones de  $\sim 10^{13}$  neutrones  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , se obtienen límites de detección que van de 1 ppb a 1 ppm en un rango de Z comprendido entre 14 y 92 para neutrones térmicos. Obsérvese que incluimos un rango de Z medio-alto, lo que se corresponde con el hecho comentado anteriormente acerca del comportamiento de la sección eficaz de activación con la masa atómica del núcleo blanco.

En todo caso, la tan extremadamente buena sensibilidad que se obtiene hace que NAA sea aplicable a un amplísimo rango de problemas. NAA está presente en análisis útiles en Biología, Geología, Medio Ambiente, Ciencias Forenses, Mineralogía, Arqueología, Edafología, Ciencias de Materiales, etc.

## 4.2 Difracción de neutrones

Un uso cada vez más frecuente, aunque no reciente, de los neutrones producidos en un reactor nuclear es el que conduce a estudios de estructuras cristalinas mediante difracción de neutrones. Desde 1912 se conoce la posibilidad de usar la difracción de rayos X para estudiar la estructura de sólidos. Y ya en 1927 se desarrolló una técnica similar basada en la difracción de electrones. La contribución fundamental de esta última técnica radica en su capacidad para estudiar capas delgadas y superficies.

En lo que se refiere a neutrones, se pudieron obtener patrones de difracción en materiales desde prácticamente 1936, poco después del descubrimiento del neutrón. Ello constituyó, de hecho, una nueva prueba de la dualidad onda-partícula de la materia [15]. En efecto, si bien las longitudes de onda asociada a los neutrones de fisión, que son rápidos, son excesivamente pequeñas comparadas con los tamaños atómicos, no ocurre así con los neutrones térmicos. Puede verse que para estos neutrones las longitudes de onda asociadas son del orden del Angström, es decir del orden del tamaño atómico y de las distancias interatómicas en redes cristalinas. Ello permite su uso para analizar este tipo de estructuras.

Respecto de las bien conocidas técnicas de difracción de rayos X y electrones, la difracción de neutrones ofrece varias ventajas. Dado que no tienen carga, los neutrones pueden explorar regiones más profundas de los materiales. Y como experimentan interacción nuclear, pueden proporcionar información sobre la estructura isotópica del cristal analizado. Una consecuencia de ello, no trivial de deducir, es que la resolución entre elementos cercanos en el Sistema Periódico es mejor con neutrones que con rayos X o electrones.

En otro orden de cosas, los cambios de energía que experimentan los neutrones térmicos al interactuar inelásticamente con la red permiten estudiar el espectro de excitaciones de

la misma. Es bien sabido que, en este ámbito, los neutrones son una herramienta muy poderosa en el estudio de la dinámica de sistemas a escala atómica. Por otra parte, los neutrones tienen momento magnético. Esto se puede usar para estudiar la estructura de espines electrónicos y la distribución de electrones no emparejados en los materiales magnéticos.

Si bien las ventajas son evidentes e invitan a usar la difracción de neutrones como una técnica potente en este campo, no se puede olvidar que existe una desventaja clara: el sistema experimental necesario para realizar experimentos de difracción de neutrones es más complicado que para electrones y rayos X. En primer lugar, es necesario tener acceso a un reactor nuclear de fisión, único sistema que puede proporcionar un flujo de neutrones razonablemente alto como para realizar los experimentos de difracción. Los neutrones deben ser térmicos. Ello requiere, moderar los neutrones de fisión cosa que, en la mayoría de los casos se realiza directamente en el reactor. Además, es necesario seleccionar una energía de neutrones dentro del rango de los térmicos proporcionado por el reactor. Ello se realiza con un monocromador que, basado en la ley de Bragg, es capaz de seleccionar un estrecho rango de longitudes de onda de los neutrones que pasan por un cristal. Éste puede rotar respecto a la dirección de incidencia de los neutrones mediante un goniómetro. Tras colimar este haz seleccionado, los neutrones inciden sobre la muestra que se quiere analizar. Los neutrones dispersados deben detectarse en función de su ángulo de dispersión. El detector de neutrones debe disponerse de forma que pueda medirse con exactitud su ángulo con respecto a la dirección de incidencia de los neutrones.

Detectar neutrones no es fácil, dado que deben usarse técnicas indirectas de detección. En efecto, los neutrones no ionizan ni excitan la materia por donde viajan. Ello impide el uso directo de los detectores de las familias conocidas: los de ionización gaseosa, los de centelleo o de semiconductor. No obstante, es posible usar reacciones nucleares como medio de detección indirecto. Por ejemplo, la reacción  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  con neutrones térmicos ocurre en detectores proporcionales que usan  $\text{BF}_3$ , enriquecido con  $^{10}\text{B}$  como gas de recuento [16]. Los núcleos producidos tras la reacción nuclear,  $\alpha$  y  $^7\text{Li}$ , ionizan el gas de relleno del detector lo que, en presencia del campo eléctrico aplicado, da lugar a la formación de un pulso eléctrico testigo del paso de los neutrones.

## 5. Conclusiones

Aceleradores de partículas, detectores de radiación, reactores nucleares, elementos radiactivos, etc. están cada vez más presentes en muchas ramas de la Ciencia y la Tecnología, de las Humanidades y la Salud, etc., como herramientas poderosas de investigación y de resolución de problemas, incluso de los más inmediatos y socialmente más urgentes. El desarrollo de instrumentación típicamente nuclear para su aplicación a problemas concretos es ya casi una disciplina independiente o, al menos, veterana y en continuo progreso.

Y es que el amplísimo mundo de la Física Nuclear Aplicada ensancha cada vez más sus fronteras.

En España existen varios grupos de investigación que llevan a cabo trabajos de los recogidos en este artículo. En

lo que se refiere a medida de radiactividad, con aplicación fundamental en el campo del medio ambiente, cabe citar a los grupos de las Universidades de Barcelona, Autónoma de Barcelona, Politécnica de Cataluña, Extremadura, Politécnica de Valencia, Salamanca, Cantabria, País Vasco, Huelva, Málaga, Granada, Zaragoza, Sevilla y a varios grupos del CIEMAT que, por su tamaño, acoge otro tipo de aplicaciones además de la citada. En el campo de las aplicaciones de aceleradores, los grupos más potentes y de tradición son los de la Universidad de Sevilla y la Autónoma de Madrid.

## Agradecimientos

A.M.S. agradece al Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto FIS2004-03155) la ayuda económica prestada.

## Bibliografía

- [1] J.L. BASDEBANT, J. RICH, M. SPIRO, *Fundamentals of Nuclear Physics. From Nuclear Structure to Cosmology* (Springer, New York, 2004).
- [2] K.S. KRANE, *Introductory Nuclear Physics* (Wiley, New York, 1988).
- [3] M. BARRACHINA GÓMEZ, J.A. CERROLAZA ASENJO, J.M. GARCÍA ALONSO, J.E. IRANZO MARTÍN, B. LÓPEZ PÉREZ, E. MÍNGUEZ TORRES, M.T. PASCUALENA CAMBRA, A. DE LA POZA GALIANO, I. SECADES ARIZ, *222 Cuestiones sobre la energía* (Fórum Atómico Español, Madrid, 1993).
- [4] CSN, *La protección radiológica en la industria, la agricultura, la docencia o la investigación* (CSN, Madrid, 1991).
- [5] P. SAUNDERS, *Nos e as radiações* (Comissão das Comunidades Europeias, Lisboa, 1991).
- [6] C. RUEDA, *Seguridad Nuclear* **38**, 23-35 (2006).
- [7] K. BETGHE, *Advances of Accelerator Physics and Technology*, H. Schopper (Edit.), (World Scientific Pub. Co., Singapore, 1992)
- [8] J.R. BIRD, J. S. WILLIAMS (Eds.), *Ion beam for material analysis* (Academic Press, New York, 1989).
- [9] C. TUNIZ, J. R. BIRD, D. FINK, G. F. HERZOG, *Accelerator Mass Spectrometry, Ultrasensitive Analysis for Global Science* (CRC Press LLC, Boca Raton, 1998).
- [10] L. W. ALVAREZ Y R. CORNOG, *3He in helium*, *Phys. Rev.* **56**, 379 (1939).
- [11] H. E. GOVE (Edit.), *Radiocarbon dating with accelerators* (University of Rochester, 1978).
- [12] GY. HEVESY, H. LEVI, *Nature* **137**, 185 (1936).
- [13] P. KRUGER, *Principles of activation analysis* (Wiley, New York, 1971)
- [14] D. BLANC, *Physique Nucleaire* (Masson, Paris, 1974).
- [15] P. LINDNER, TH. ZEMB, *Neutron, X-ray and Light Scattering* (North Holland, Amsterdam, 1991).
- [16] G. F. KNOLL, *Radiation Detection Measurement* (Wiley, New York, 1989).

**Manuel García León**

está en el Centro Nacional de Aceleradores  
(Universidad de Sevilla, Junta de Andalucía, CSIC).

**Alejandro Martín Sánchez**

está en el Departamento de Física de la  
Universidad de Extremadura.