

José María Yturralde. Serie *Postludio*, 2006. Acrílico sobre lienzo, 41x41 cm.

UNA HERRAMIENTA PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTIFICOTÉCNICA

APLICACIONES DE LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Daniel Errandonea y José Luis Taín

Particle Accelerators. A Tool for Scientific-technical Research.

Particle accelerators, originally developed for basic research, have long been used for medical and industrial applications. Therefore, an accelerator built for therapy, can also be used for other purposes. These include studies into how radiation affects biological systems, as well as into material research, space technology, and the fields of geophysics and archaeology. Some of these applications will be reviewed in this article.

Los aceleradores de partículas, originariamente desarrollados para ser utilizados en investigación básica y en aplicaciones no relacionadas con la medicina, también han sido usados en aplicaciones médicas desde hace más de cincuenta años. En la actualidad se construyen aceleradores diseñados específicamente para la terapia de pacientes. Sin embargo los haces generados por estos aceleradores pueden también ser utilizados para estudiar los efectos de la radiación en seres vivos y en materiales, para aplicar las técnicas nucleares a otros campos de investigación y para caracterizar las propiedades de materiales. El rango de aplicaciones de los haces de protones abarca campos tan dispares como la física nuclear, la ciencia de los materiales, las ciencias biológicas, la tecnología espacial, la geofísica, el arte y la arqueología, la industria, además de las actividades de investigación y desarrollo en el propio campo de la terapia con partículas. A continuación describiremos algunas de estas aplicaciones.

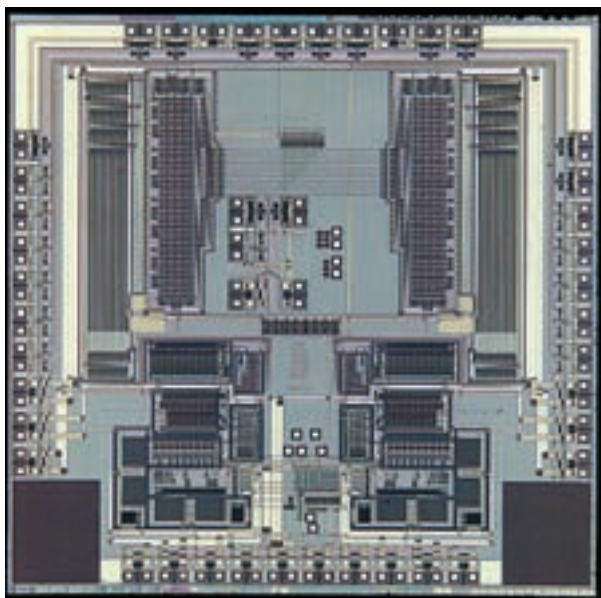
■ VERIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Los componentes electrónicos están sometidos a una irradiación continua procedente de diversas fuentes que pueden afectar a su funcionamiento. En condiciones es-

«EN CONDICIONES ESPECIALES DE ALTOS NIVELES DE IRRADIACIÓN, LA RADIACIÓN ACUMULADA PUEDE PRODUCIR DAÑOS PERMANENTES, POR LO QUE ES IMPORTANTE DESARROLLAR COMPONENTES CON ALTOS NIVELES DE RESISTENCIA A LA RADIACIÓN»

peciales de altos niveles de irradiación, como los que se encuentran en los aceleradores de partículas o reactores nucleares, o niveles más moderados como los que se encuentran durante las misiones espaciales, la radiación acumulada puede producir daños permanentes, por lo que es importante desarrollar componentes con altos niveles de resistencia a la radiación. Como el daño depende también de la forma y energía de la radiación, es necesario contar con instalaciones para su verificación que cubran un rango amplio de partículas

y energías. La irradiación a muy bajos niveles es responsable de otro tipo de efectos, en los que la interacción de una sola partícula es capaz de producir un mal funcionamiento de un equipo electrónico. Un ejemplo típico sería el cambio de estado de un bit en la memoria RAM de un ordenador que puede inducir un bloqueo del sistema operativo. Estos efectos de eventos solitarios (SEE en inglés) son inducidos por los rayos cósmicos en el equipo electrónico que controla las naves espaciales, pero afectan igualmente a la electrónica de consumo. Los rayos cósmicos que llegan a la Tierra están compuestos mayoritariamente por protones con energías entre unos 100 MeV y 1 GeV, mientras que son los neutrones (producidos por los rayos cósmicos en la atmósfera), con energías inferiores a unos centenares de MeV, los responsables de SEE a altitudes terrestres.



Los haces de protones y neutrones pueden ser utilizados para estudiar los efectos de la radiación en componentes electrónicos empleados en estaciones espaciales, satélites, etc.

Haces de protones y neutrones (generados a partir de los primeros) con energías de hasta 250 MeV pueden ser utilizados para investigar daños por irradiación y SEE de componentes electrónicos. La industria electrónica actual invierte considerables recursos en este tipo de investigaciones.

■ EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN LOS SERES VIVOS

Además de afectar al funcionamiento de los dispositivos electrónicos de satélites y naves espaciales, la radiación ionizante presente en el espacio significa un riesgo importante para los seres humanos que viven y trabajan en él. En particular, un problema de vigencia actual es el desarrollo de blindajes ante la radiación cósmica para los astronautas de las futuras misiones tripuladas a Marte. En general, la NASA y otras agencias espaciales están preocupadas por conocer con precisión la cantidad de radiación a la que son expuestos los astronautas en sus viajes rutinarios y los efectos de estas. El conocimiento que tenemos actualmente sobre los efectos de la radiación cósmica sobre los seres vivos es escaso. Como ya mencionamos, los rayos cósmicos están compuestos mayoritariamente por protones y son éstos y otros iones pesados los principales responsables de las dosis recibidas. El uso de haces de protones, como los producidos en un ciclotrón de aplicaciones médicas, puede ser utilizado para simular los efectos de la radiación cósmica en los seres vivos.

■ INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE OBJETOS

La gran profundidad de penetración en la materia de las partículas cargadas con alta energía, como los protones, es el factor clave para su aplicación en diversas técnicas para la investigación no destructiva de objetos de tamaño moderado. En el caso de los protones, el rango de penetración alcanza unos 7 cm en hierro y 20 cm en aluminio para una energía de 250 MeV, característica que permite la realización de radiografías por transmisión con haces de protones. Esta técnica se ha aplicado recientemente con gran éxito en el Laboratorio Nacional de Los Álamos (EE UU) para protones de 800 MeV de energía. Las ventajas inherentes de esta técnica, en comparación con la radiografía convencional con rayos X, son una mayor resolución en posición y un mayor contraste para discriminar cambios de densidad. La posibilidad de inspeccionar el interior de objetos complejos sin tener que destruirlos es lo que confiere interés a esta técnica. Otra técnica radiográfica con protones se basa en la medida de las diferencias de energía perdida al atravesar distintas cantidades de materia, y está siendo investigada en conexión precisamente con la terapia de protones.

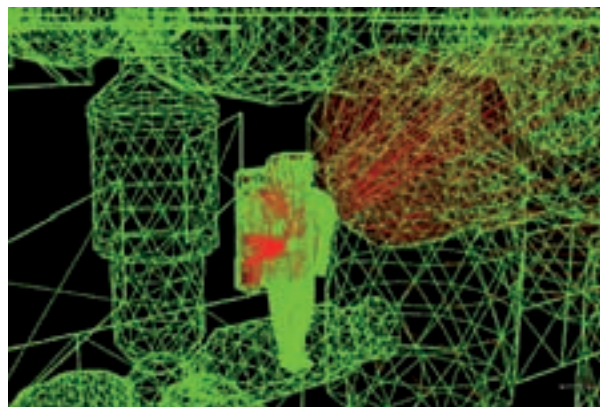
Los protones de alta energía pueden ser utilizados también como una sonda analítica para investigar la composición química de los objetos. La emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE en inglés) con protones es una técnica no destructiva que actualmente es utilizada para analizar la composición de objetos de arte y arqueológicos. La alta energía de los protones aumenta la probabilidad de emisión penetrante de rayos X proveniente de capas atómicas profundas en elementos de alto número atómico. Estas técnicas, aparte de ser utilizadas en los campos ya mencionados del arte y la arqueología y el estudio de meteoritos, pueden tener aplicación en el estudio de manufacturas industriales o en cualquier otro caso donde la técnica de análisis deba preservar la integridad del objeto estudiado. También pueden utilizarse en medicina y biología para detectar trazas de elementos pesados en el material orgánico, y en geofísica para estudiar las inclusiones en los minerales que nos dan información sobre la historia geológica de nuestro planeta. El desarrollo de un microhaz de protones, es decir, de un haz enfocado hasta dimensiones de unas cuantas micras, es especialmente valioso en varios de estos campos de aplicación.

■ INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE LA TIERRA Y PLANETARIAS

El examen de los meteoritos que impactan sobre la Tierra puede darnos información importante sobre la es-



estructura cristalina y la composición química de las rocas que forman la corteza de la Luna, Marte y otros objetos celestes. Sin embargo, todas las rocas meteoríticas recogidas en la Tierra han estado sometidas previamente a la irradiación de protones muy energéticos durante su viaje por el espacio en dirección a la Tierra. Además, durante el impacto los meteoritos están sujetos a condiciones de muy alta presión y temperatura. Como consecuencia de estos dos hechos, normalmente los meteoritos encontrados en la Tierra tienen estructuras cristalinas diferentes de las de los minerales terrestres análogos y, en algunos casos, los restos encontrados son producto de la descomposición de los componentes originales del meteorito. Por ello, los científicos tienen que ser muy cuidadosos a la hora de extraer conclusiones del análisis de meteoritos. Es posible simular condiciones similares a las sufridas por los meteoritos combinando la irradiación con protones de diferentes minerales con técnicas de alta presión y temperatura, las cuales, en la actualidad, permiten generar en el laboratorio de forma controlada condiciones de presión y temperatura de varios millones de atmósferas y varios miles de grados. Las muestras irradiadas bajo estas condiciones se analizan luego con técnicas de caracterización como la espectroscopia Raman, difracción de rayos X o microscopía electrónica por transmisión. Un experimento de este tipo se ha realizado recientemente en el circón ($ZrSiO_4$). Este mineral es uno de los más abundantes en los restos de meteoritos y en la parte superior de la corteza terrestre. Los estudios realizados muestran que cuando se irradia el circón con protones y se lo somete a altas presiones, transforma su estructura cristalina en mineral reidita, lo que implica una reducción de la simetría cristalina y un cambio importante en las propiedades físicas y químicas. Este tipo de estudios está siendo de gran ayuda para



Simulación de los efectos de la radiación cósmica sobre un astronauta. El conocimiento que tenemos actualmente de los efectos de esta radiación sobre los seres vivos es escaso.

avanzar en la solución de los numerosos problemas abiertos en las ciencias de la tierra y del espacio.

■ LITOGRAFÍA CON HACES DE PROTONES

Los haces de protones pueden utilizarse para dibujar estructuras tridimensionales con muy alta resolución o para la construcción de nano o microestructuras en semiconductores como el silicio o el arseniuro de galio. Los daños causados en la estructura cristalina del semiconductor por la irradiación de protones aumentan la resistividad del semiconductor. Irradiando áreas seleccionadas de un semiconductor con un microhaz de protones se pueden construir nanoestructuras mediante un ataque químico posterior que solamente afectará a las zonas no irradiadas. En este campo se han hecho grandes avances durante los últimos años. Esta técnica puede ser relevante para el desarrollo de nuevas tecnologías y está compitiendo con otras técnicas, en especial para el desarrollo de estructuras con dimensiones del orden de los 50 nanómetros. La posibilidad de desarrollar tales estructuras es muy importante para la industria electrónica.

■ DATOS NUCLEARES PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Los datos nucleares encuentran un amplio rango de aplicaciones en ciencia y tecnología. En particular, las secciones eficaces totales y de producción en reacciones nucleares son necesarias para el diseño de sistemas de apantallamiento de la radiación en aceleradores de partículas y en la evaluación de los procedimientos de dismantelamiento de los mismos, así como en la estimación de los riesgos radiológicos y en la dosimetría del perso-

nal expuesto en instalaciones con aceleradores y en misiones espaciales. Estos mismos datos también son de interés en la evaluación previa de los daños por radiación y de los efectos producidos por un único ión en los componentes electrónicos, tanto en aplicaciones convencionales como espaciales, y en el estudio a nivel microscópico de los efectos biológicos de la radiación en los tejidos vivos. Finalmente, los datos nucleares también son relevantes para el diseño de sistemas de transmutación de los residuos radiactivos de alta actividad basados en aceleradores y para mejorar nuestro conocimiento de los mecanismos básicos de las reacciones nucleares.

Los datos nucleares para tales aplicaciones son recogidos a partir de una serie de experimentos, son evaluados y finalmente compilados en las bases de datos nucleares. Los datos experimentales para protones y neutrones en el rango de 50 a 250 MeV son, en general, incompletos cuando consideramos simultáneamente rango de energías, núcleo blanco, canal de reacción y magnitud medida. Aún más, se encuentra que una buena parte de los datos existentes son muy antiguos y están sujetos a incertidumbres considerables. En los últimos años la necesidad de actualizar las bases de datos ha sido resaltada con frecuencia y diversos comités de especialistas nacionales e internacionales, como OECD/NEA (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico/Agencia de Energía Nuclear), IAEA (siglas en inglés de la Agencia Internacional de Energía Atómica), JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute), etc., han establecido listas priorizadas de necesidades experimentales. Hoy en día los haces de protones y neutrones con energías bien definidas en el rango de 50 a 250 MeV e intensidad adecuada están siendo utilizados para cubrir parte de estas necesidades.

El desarrollo de instrumentación nuclear avanzada, es importante obviamente en los campos de la física nuclear y de partículas, aunque también en otros campos, como es el propio campo de la medicina. Diversos grupos españoles están participando en proyectos punteros en instalaciones internacionales, como FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) en Alemania o el

LHC (Large Hadron Collider) en el CERN, o planean su participación en futuras instalaciones, como el ILC (Internacional Linear Collider) o la ESS (European Spallation Source). Un aspecto esencial de esta participación es el desarrollo de detectores con prestaciones mejoradas para los distintos experimentos. En el proceso de desarrollo se usan fuentes radiactivas para la verificación de los prototipos, pero éstas, aunque sean muy accesibles, tan sólo permiten hacer comprobaciones limitadas. La posibilidad de contar con haces bien caracterizados de protones y neutrones de altas energías permitirían en muchos casos acercarse más a las verdaderas condiciones experimentales. El desarrollo de detectores de partículas con alta resolución en posición y/o energía, robustos y fiables, representa un reto tecnológico que puede ser atacado en esta instalación.

■ PERSPECTIVAS

Las aplicaciones desarrolladas por los científicos en torno al uso de aceleradores de partículas en los últimos años han tenido gran influencia en diversos campos tecnológicos y científicos y por tanto un impacto económico y social importante. Piénsese, por ejemplo, en el desarrollo de nuevos materiales, en el aumento de la fiabilidad de los equipos informáticos, en el mejor conocimiento de las condiciones climáticas o en el propio desarrollo de técnicas terapéuticas contra el cáncer. Pero, en ninguno de estos campos puede considerarse que el avance esperado haya sido agotado, tal como hemos intentado esbozar en este artículo. Por no hablar de otros campos que no han sido mencionados o que ni siquiera han sido imaginados. Siempre existe necesariamente un retraso entre un hallazgo científico y su repercusión en nuestra vida ordinaria, pero es evidente que las aplicaciones que se están desarrollando hoy en día para los aceleradores de partículas serán beneficiosas, no sólo como búsqueda del conocimiento, sino también como aplicación práctica. ⊕

«LA POSIBILIDAD
DE INSPECCIONAR
EL INTERIOR DE LOS
OBJETOS COMPLEJOS SIN
TENER QUE DESTRUIRLOS
ES LO QUE CONFIERE
INTERÉS A ESTA TÉCNICA»



Daniel Errandonea. Institut de Ciències dels Materials, Universitat de València.

José Luis Taín. Institut de Física Corpuscular (IFIC), Centro mixto CSIC – Universitat de València.