

LAS TECNOLOGÍAS DEL PLASMA Y DE LOS ACELERADORES PARA EL DESARROLLO PERSPECTIVAS DE FUTURO

POR THOMAS DOLAN, STJEPKO FAZINIC, C.U. ROSENGARD Y URSULA SCHNEIDER

La investigación básica y aplicada en esferas avanzadas de la ciencia y la tecnología nucleares ha permitido a muchos países obtener beneficios sociales, económicos y ambientales en campos de la industria, la medicina y la energía. La investigación científica ha dado paso, por ejemplo, a procesos industriales más eficaces para la eliminación de desechos; la producción de material cerámico, metales y revestimientos de alta calidad; así como al mejoramiento de la atención y el tratamiento médicos.

Mediante diversas actividades, el OIEA apoya y coordina la investigación científica y técnica que contribuye a satisfacer las necesidades del desarrollo sostenible en sus Estados Miembros. Los programas del Organismo abarcan aplicaciones en la esfera de la instrumentación nuclear, la física del plasma y la investigación de la fusión nuclear, así como la utilización de reactores de investigación y aceleradores. El presente artículo se centra específicamente en las aplicaciones de plasmas y haces de aceleradores, destacando las actividades que promueven la transferencia de tecnología y conocimientos especializados.

TECNOLOGÍAS DEL PLASMA

La mayoría de las personas se ha acostumbrado a la idea de que los estados fundamentales de la materia son el sólido, el líquido o el gaseoso. Sin embargo, los físicos suelen trabajar con otro estado de la materia que se conoce como plasma, un gas ionizado. Los procesos del

plasma --el brillo en luz de neón, por ejemplo, o, a escala gigante, la energía del sol-- forman parte de la vida cotidiana. Actualmente, las aplicaciones prácticas y útiles de las tecnologías del plasma en la medicina y la industria son muy amplias e incluyen:

- limpieza de superficies;
- revestimiento de superficies;
- ensayo de materiales;
- fabricación de ventanillas de diamante y zafiro mediante la síntesis química de plasma;
- maquinado a escala atómica y modificación de las pastillas de silicio;
- fuentes de luz con eficiencia energética;
- conservación de alimentos (barreras antidifusoras en los envases plásticos para retardar la oxidación);
- materiales e implantes biocompatibles;
- aplicaciones médicas (instrumentos quirúrgicos y odontológicos, implantes, válvulas cardíacas);
- destrucción de desechos peligrosos.

Esas y otras aplicaciones industriales tienen un potencial de mercado de decenas de miles de millones de dólares. Muchas tecnologías del plasma que se utilizan en las investigaciones de la fusión también encuentran uso en otras esferas. Actualmente, el calentamiento del plasma mediante microondas de gran potencia, por ejemplo, tiene amplias aplicaciones industriales. Las técnicas de diagnóstico del plasma se emplean en la industria y las pequeñas máquinas de plasma se utilizan como fuentes de neutrones y de rayos X.

Proyectos de Cooperación Técnica. En China, el OIEA

apoyó un proyecto de cooperación técnica que ayuda al país a desarrollar un reactor de plasma para el procesamiento de los desechos líquidos tóxicos de una papelería. En la actualidad, se construye una planta piloto para ensayar el concepto en mayor escala. Si se obtienen resultados satisfactorios, esta tecnología podría transferirse a miles de papelerías de China y de otros lugares.

Mediante otro proyecto, en Argentina se desarrolla una intensa fuente neutrónica por impulsos que podría tener diversas aplicaciones sobre el terreno, como la prospección de minerales y la detección de explosivos.

Proyectos Coordinados de Investigación. El OIEA también ha organizado un proyecto coordinado de investigación sobre las aplicaciones técnicas, industriales y ambientales de la física del plasma y las tecnologías de fusión. Se han obtenido notables logros en muchos de los países participantes, que a continuación se relacionan:

■ **Argentina.** Se estudió la modificación de superficies de aleaciones de aceros, de titanio y de otro tipo. Otros estudios en los que se utilizó la difracción de rayos X de un sincrotrón se centraron en el mejoramiento de la dureza de la superficie del acero.

El Sr. Dolan es Jefe de la Sección de Física de la División de Ciencias Físicas y Químicas, del Departamento de Ciencias y Aplicaciones Nucleares del OIEA, y los Sres. Fazinic y Rosengard, así como la Sra. Schneider son funcionarios de la Sección.



■ **Brasil.** Se estudió la microestructura de revestimientos basados en carbono duro, como el carburo de boro, para mejorar las propiedades mecánicas, incluida la resistencia al desgaste.

■ **China.** Un estudio sobre plasmas contaminados por el polvo ayudará al control de la calidad en el procesamiento de materiales. Asimismo, se estudia el empleo de un dispositivo del plasma como posible fuente de rayos X y haces iónicos.

■ **Egipto.** Se puso a prueba un dispositivo (conocido como dispositivo silente de descarga de barreras dieléctricas) como generador de gas de ozono para tratar las aguas negras, desulfurar el carbón y eliminar el vapor de agua del gas natural en el petróleo crudo.

■ **Alemania.** Las películas de carbono hidrogenado amorfo depositadas en polímeros redujeron la permeabilidad entre el 80% y el 95%. Esas reducciones son comparables a las que se obtienen utilizando otros revestimientos de barrera

permeables, como los óxidos de aluminio y silicio.

■ **Grecia.** Se creó una fuente de descarga luminosa de grupos de átomos de metal para la construcción de materiales de estructuras nanométricas, como sensores de gas semiconductor.

■ **India.** Se realizan ensayos sobre el terreno de un sistema prototipo de antorcha de plasma para la pirólisis plasmática de los desechos médicos. Se midieron los gases resultantes y se desarrollaron métodos para impedir la contaminación ambiental.

■ **Japón.** Se crearon instrumentos especiales para medir las funciones de distribución energética de plasmas en ondas de superficies y de plasmas acoplados inductivamente. Se estudiaron las concentraciones resultantes de hidrocarburo y de moléculas fluoradas, a fin de conocer cómo optimizar los parámetros relativos al procesamiento de semiconductores.

■ **Rumania.** Se creó un reactor de plasma para el tratamiento de materiales.

■ **Federación de Rusia.** Se demostró la factibilidad de inyectar pastillas en plasmas de fusión para medir los parámetros del plasma.

Esas aplicaciones de la física del plasma reportan importantes beneficios en materia de protección de materiales mediante las técnicas de tratamiento de superficie; el desarrollo de tecnologías de fabricación limpias; la producción de nuevos materiales para tecnologías futuras; y la descontaminación del medio ambiente.

APLICACIONES DE LOS ACCELERADORES

Mundialmente, se utilizan miles de aceleradores en diversas aplicaciones. (Véase el recuadro de la página 44.) El Organismo está desarrollando una base de datos sobre aceleradores hipoenergéticos y sus aplicaciones, que incluye:

Generadores de neutrones.

Los haces de deuterones de alta corriente con energías de 0,1 a 3 MeV se inyectan a objetivos de titanio tritiado, donde las reacciones de la fusión nuclear producen neutrones. Dichos

Fotos: Arriba, a la izquierda, el reactor de plasma para la disposición final y el reciclado de desechos de pulpa de papel en Chengdu, China. Arriba, a la derecha, el sistema concebido por la Universidad de Western Kentucky, de los Estados Unidos de América, para identificar objetos enterrados. El sistema se ensaya en la detección de minas terrestres enterradas.

“generadores de neutrones” se utilizan para analizar materiales mediante la absorción y dispersión neutrónicas. En las aplicaciones se incluyen experimentos físicos; detección de explosivos y drogas; operaciones humanitarias de desactivación de minas; análisis volumétrico del carbón, cementos, vidrio, metales y productos agrícolas; diagrfía de pozos de petróleo; prospección de minerales; examen no destructivo por radiografía neutrónica y terapia médica.

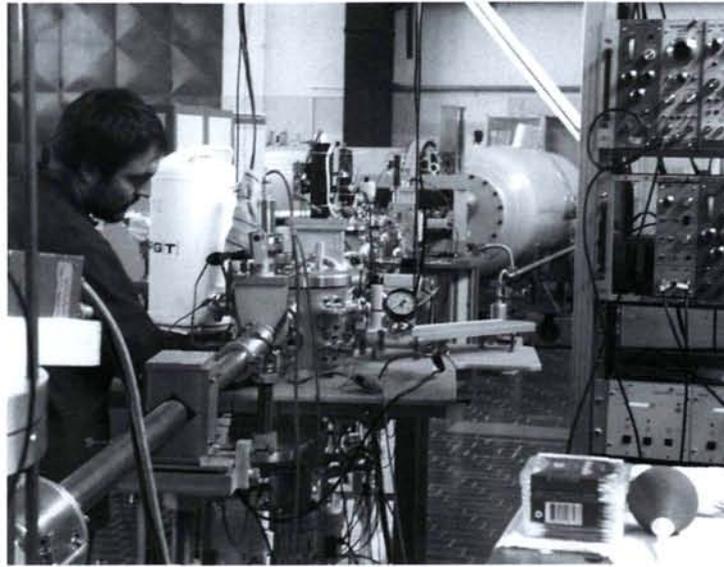
Las actividades del Organismo abarcan un proyecto coordinado de investigación sobre el análisis volumétrico del hidrógeno mediante neutrones. Asimismo, se publicó un documento técnico sobre el funcionamiento y mantenimiento de los generadores de neutrones. Mediante otro proyecto coordinado de investigación --sobre la aplicación de las técnicas nucleares para la identificación de minas terrestres antipersonal-- se crean instrumentos nucleares para localizar e identificar objetos enterrados. Se realizarán ensayos sobre el terreno de un sistema para detectar minas terrestres.

Implantación de iones.

El tratamiento por haces iónicos puede utilizarse para sintetizar y modificar materiales con gran precisión, incluidos metales, semiconductores, material cerámico y dieléctricos. Los implantadores de iones se utilizan en la fabricación de micropastillas de semiconductores avanzados para computadoras y sistemas de comunicación.

Unos 7000 aceleradores de implantación iónica se utilizan en la industria de semiconductores. La implantación de iones requiere aceleradores especiales capaces de implantar los iones de la mayoría de los elementos de la tabla periódica y explorar uniformemente el haz de una muestra.

Esta tecnología también se utiliza para depositar



revestimientos de películas delgadas, a fin de mejorar la resistencia al desgaste, la fricción y la corrosión de instrumentos especializados que se emplean en la industria y la medicina. Por ejemplo, la biocompatibilidad en las aleaciones de titanio, aluminio y vanadio es excelente, la consistencia y la resistencia a la corrosión son buenas, pero les falta dureza y resistencia al desgaste. Las implantaciones de nitrógeno aumentan la resistencia al desgaste de esas aleaciones en un factor de 1000, lo que permite utilizarlas como caderas artificiales por un período más prolongado.

Análisis de haces iónicos. Los métodos más comunes del análisis de haces iónicos (IBA) son PIXE (emisión de rayos X inducida por partículas), RBS (espectrometría de retrodispersión de Rutherford), ERDA (análisis de detección de retroceso elástico) y NRA (análisis de la reacción nuclear). Todos los elementos pueden detectarse con las técnicas IBA. El NRA y el ERDA son más apropiados para elementos ligeros y, en particular, el hidrógeno; la RBS y la PIXE pueden detectar elementos más pesados.

Normalmente, se utilizan pequeños aceleradores electrostáticos de un voltaje terminal de 2 a 3 MV. En el

mundo existen alrededor de doscientas instalaciones, incluidas las que se utilizan en cerca de 20 países en desarrollo. La mayoría de los métodos IBA pueden emplearse para la obtención de imágenes de concentraciones de elementos mediante el uso de un haz de iones finamente enfocado. Los métodos de baja corriente pueden emplearse como sonda de fuente de radiación controlable para formar imágenes de la morfología, la estructura cristalina y la densidad de los materiales o para estudiar las propiedades de los dispositivos electrónicos.

Las aplicaciones más amplias corresponden a la elaboración de materiales, los estudios de contaminación ambiental, la investigación biomédica, la geología y la arqueometría. Por la información que proporcionan, la RBS, el ERDA y el NRA constituyen un complemento valioso de las técnicas analíticas de superficie más convencionales, y tienen características singulares que hacen que resulten indispensables para abordar determinados problemas.

Foto: El acelerador para el análisis de haces iónicos del Instituto Josef Stefan, en Eslovenia.

APLICACIONES DE LOS ACELERADORES

ACELERADORES ELECTRONICOS

■ **Aceleradores electrónicos de energía entre baja y media.** *Aplicación:* Hospitales, tratamiento por irradiación, tratamiento radiológico. Se aplican en la terapia del cáncer; el mejoramiento de materiales, la esterilización del equipo médico; la conservación de alimentos; la reducción de la contaminación. En el mundo existen alrededor de 7000 (6000 en hospitales, 1000 para el mejoramiento de materiales, la esterilización y la prevención de la contaminación).

■ **Fuentes de radiación sincrotrónicas.** *Aplicación:* Investigación. Se aplican en la investigación de materiales; ciencias biológicas. En el mundo existen menos de 50.

ACELERADORES DE IONES

■ **Generadores de neutrones.** *Aplicación:* Análisis de activación neutrónica. Se aplican en la diagrafiya de pozos; el control y análisis del proceso industrial; la detección de explosivos y drogas.

■ **Implantadores de iones.** *Aplicación:* Tratamiento de materiales por haces iónicos. Se aplican en la producción de micropastillas de computadora; el mejoramiento de la resistencia al desgaste y la corrosión; en los implantes de articulaciones de seres humanos. En el mundo existen alrededor de 7000 aceleradores de ese tipo.

■ **Aceleradores de iones de energía entre baja y media.** *Aplicación:* Análisis por haces iónicos y espectrometría de masas con aceleradores. Se aplican en la detección de oligoelementos; la producción de radisótopos para el diagnóstico y la terapia médicos; la terapia del cáncer por haces iónicos. En el mundo existen varios cientos de aceleradores de ese tipo.

■ **Fuentes de neutrones por espalación.** *Aplicación:* Investigación. Se aplican en la elaboración de materiales de alta tecnología; la transmutación de desechos nucleares. En el mundo existen aproximadamente diez aceleradores de ese tipo.

Asimismo, facilitan el análisis de una amplia variedad de muestras en esferas como la ciencia de los materiales, el arte, la arqueología y la biología.

El OIEA apoya diversos proyectos en los Estados Miembros.

■ **Eslovenia.** En virtud de un proyecto de cooperación técnica en el Instituto Josef Stefan de Liubiana, se creó una moderna instalación para la investigación y formación en materia de IBA. El Instituto se propone equipar el acelerador con cinco líneas de haces para aplicar las técnicas IBA, con miras a la ejecución de un programa de garantía de calidad de esas técnicas y la ulterior prestación de servicios analíticos para apoyar la investigación y la industria.

Dos líneas de haces están en explotación y se construye una línea de haces de microsondas nucleares para apoyar el análisis de diversas muestras que utilizan haces protónicos de dimensiones micrométricas y submicrométricas. Esos sistemas facilitarán las mediciones de la distribución

espacial de los oligoelementos, por ejemplo, en los materiales electrónicos y los dispositivos microelectrónicos. Se prepara otra línea de haces para las mediciones de la RBS y el ERDA que permitirá estudiar las capas delgadas, los revestimientos duros y otros materiales.

■ **Israel.** El Organismo ha ayudado a Israel a mejorar sus actuales instalaciones de aceleradores, a fin de incorporar las diversas aplicaciones. Se ampliaron las capacidades del acelerador de Van de Graaff de 3 MeV del Instituto Weizmann al destinar dos de las tres líneas de haces a las técnicas analíticas de haces iónicos para aplicarlas en el control del aire, el agua y los materiales peligrosos. Se trabaja para poner a funcionar una línea de haces con objeto de aplicar la PIXE, la PIGE (emisión de rayos gamma inducida por partículas) y la RBS.

■ **Irán.** El Organismo ayudó al Irán a mejorar las capacidades analíticas del Laboratorio Van de Graaf del Centro de Investigación Nuclear de la Organización de Energía Atómica de Teherán. Las

capacidades se mejoraron mediante la introducción de una microsonda nuclear.

Asimismo, el Organismo apoyó proyectos de cooperación técnica relacionados con la utilización del IBA en muchos otros países, a saber, Brasil, Croacia, Chile, Grecia, Líbano, México, Portugal, Rumania y Tailandia.

En los laboratorios del Organismo en Seibersdorf (Austria), se utiliza una línea de haces asignada en el acelerador de Van de Graaf del Instituto Rudjer Boskovic (Zagreb, Croacia) para el análisis de muestras ambientales; y con la ayuda de un proyecto, se creó allí una línea de haces de microsondas. Además, el OIEA apoya un proyecto de investigación coordinado sobre el análisis de materiales semiconductores que utilizan el IBA, y se publica un documento técnico sobre las técnicas PIXE y RBS.

Espectrometría de masas con aceleradores (AMS). Esta es la técnica de análisis de trazadores de carácter más delicado, con sensibilidad de los componentes por cada mil billones en algunos casos.

Los aceleradores que necesita la AMS son similares a los del IBA, aunque requieren mayor complejidad en la fuente iónica y en el punto extremo de energía máxima.

En el mundo existen alrededor de 50 laboratorios con sistemas AMS propios. La AMS tiene dos características interesantes: pueden analizarse volúmenes de muestras muy pequeños y pueden utilizarse nucleidos estables en lugar de radionucleidos.

La AMS es uno de los métodos más rápidos de ensayo del carbono (30 minutos frente a varias semanas en el caso de las técnicas convencionales de datación) y sólo requiere muestras de un miligramo (en comparación con varios gramos en el caso de las técnicas convencionales). La AMS también se utiliza con los nucleidos cosmogénicos (berilio 10, aluminio 26 y yodo 129) y se emplea cada vez más en estudios de oceanografía, paleoclimatología y geohidrología (recursos de aguas subterráneas).

El carbono 14 puede utilizarse como trazador en un sistema biológico con una sensibilidad aumentada por un factor de un millón, superior a la sensibilidad posible que se alcanza con los métodos convencionales de recuento de centelleo. En la fabricación de pastillas de silicio, las impurezas del hierro a partes por mil millones pueden crear problemas, de ahí que la AMS se utilice para diagnosticar el contenido de impurezas.

■ **Israel.** El OIEA ayudó al Instituto de Física Racah de la Universidad Hebrea de Jerusalén a establecer procedimientos para detectar el estroncio 90 en muestras ambientales mediante la AMS utilizando el acelerador del Instituto de Ciencias Weizmann. El Organismo aportó los conocimientos especializados, la capacitación y parte del equipo para mejorar las instalaciones existentes.

Un estudio de factibilidad demostró que con el método

AMS se mejoraba el límite de detección del estroncio 90 por un factor de dos, en comparación con el recuento beta. El perfeccionamiento de los procedimientos de preparación de muestras permitirá aumentar aún más la sensibilidad del método AMS. Gracias al proyecto, se mejoró la capacidad de detección local de los oligoelementos en las muestras ambientales.

Producción de radioisótopos. Los métodos de producción de radioisótopos con aceleradores constituyen una valiosa opción para la producción de radioisótopos mediante reactores de fisión. Normalmente, los aceleradores que se utilizan para producir esos isótopos son ciclotrones que producen haces protónicos de 15 a 60 MeV. Los radioisótopos de período corto producidos con aceleradores se utilizan ampliamente en la medicina nuclear por las reducidas dosis al paciente. Entre ellos se incluyen los isótopos de la tomografía por emisión de positrones (PET), como el flúor 18 y el sodio 22 (útiles para el diagnóstico y la investigación médicos), el galio 67 en citrato, generadores de rubidio 81/criptón 81m (para la obtención de imágenes de los pulmones) y diversos isótopos de yodo, especialmente el yodo 123. Los radiofármacos que emplean esos isótopos de período corto proporcionan el máximo de información sobre el diagnóstico, al tiempo que producen un mínimo de desechos radiactivos. El Organismo apoya varias actividades de investigación y proyectos de cooperación técnica en esta esfera.

■ **Israel.** En ese país, se creó una instalación de ciclotrón para producir radioisótopos en la Organización Médica Hadassah y los laboratorios de radioquímica. El Organismo ayuda a establecer instalaciones para producir radiofármacos marcados con flúor 18, con objeto de diagnosticar las enfermedades cardiológicas,

oncológicas, neurológicas y psiquiátricas.

■ **Argentina.** El Organismo ayuda a la Argentina a desarrollar la producción ciclotrónica de radiofármacos que contienen yodo 123 de gran pureza para los servicios de medicina nuclear del país.

■ **Irán.** En ese país, los proyectos de cooperación técnica abordan la producción ciclotrónica de radioisótopos de período corto: titanio 201, galio 67, criptón 81 e indio 111. La próxima línea de productos, basados en el flúor 18 y el yodo 123 se empleará en las instalaciones PET.

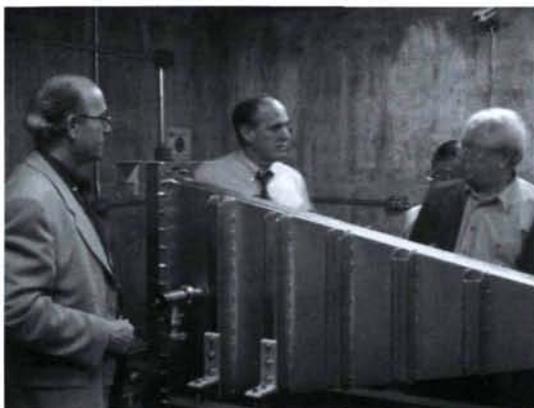
Terapia del cáncer. En el mundo se han instalado alrededor de 6000 aceleradores lineales de electrones para la terapia del cáncer y también se utilizan en la terapia algunos aceleradores de protones. (*Véase el artículo conexo de la página 33.*) Como parte de sus actividades, el Organismo celebró en días recientes una reunión de grupo asesor sobre la terapia protónica.

Fuentes neutrónicas por espalación. Cuando los haces protónicos de potentes aceleradores alcanzan objetivos metálicos pesados, como el plomo, muchos neutrones son expulsados (por "espalación"). El flujo de neutrones existente limita la calidad de los experimentos de dispersión neutrónica.

Se requieren elevados flujos de neutrones en una serie de aplicaciones:

Dispersión neutrónica para el análisis de materiales. Como los neutrones pueden penetrar la materia en profundidad, la dispersión neutrónica se utiliza ampliamente para determinar la estructura interna de material cerámico, aleaciones metálicas, materiales magnéticos, superconductores y especímenes biológicos.

Prueba de irradiación de materiales. Se requieren elevados flujos de neutrones para ensayar la vida útil de los materiales que



se utilizan en los núcleos de los reactores de fisión y en las paredes de los reactores de fusión.

Transmutación de desechos radiactivos. Las fuentes neutrónicas por espalación pueden utilizarse para quemar los elementos actínidos sobrantes del combustible gastado de los reactores de fisión o para la disposición final del plutonio apto para la fabricación de armas.

Terapia médica. Una fuente neutrónica de gran resistencia permitiría reducir el tiempo de irradiación que requiere el paciente en la terapia por captura neutrónica del boro. Como las potentes fuentes neutrónicas por espalación son costosas, muchos usuarios de varios países suelen compartir los haces neutrónicos, de ahí la importancia de la cooperación internacional.

Aceleradores electrónicos y radiaciones sincrotrónicas. El tratamiento por haces electrónicos es un método versátil y económico para mejorar las características físicas, químicas o biológicas de muchos materiales. La energía típica de los haces es de 0,3 a 10 MeV y la potencia típica es de 1 a 100 kW. Los electrones ionizan los átomos, rompen los enlaces químicos y causan reacciones químicas,

Foto: Diseño de un acelerador de haces electrónicos en el Centro médico Jackson Memorial de la Universidad de Miami para desinfectar desechos hospitalarios.

dislocación de los átomos o esterilización.

Entre la variedad de aplicaciones figura, por ejemplo, la reticulación para el aislamiento de alambres y cables; la reticulación de películas de plástico, espuma

y tuberías; la desinfección de lodos cloacales y aguas residuales; la modificación volumétrica de polímeros; la vulcanización del caucho; la despolimerización celulosa; la conservación de alimentos; la curación de revestimientos; las modificaciones textiles; la polimerización de injertos en películas, fibras y papel; la modificación de semiconductores y la esterilización de suministros médicos.

Se han empleado sistemas de haces electrónicos especialmente diseñados para eliminar los contaminantes de los gases de escape. La mayoría de las centrales nucleares queman los combustibles fósiles que emiten gases de combustión que contienen óxidos de nitrógeno y azufre y causan enfisema y lluvia ácida. Polonia ensaya haces electrónicos para eliminar esos contaminantes de los gases de combustión. Mediante un proyecto, se creará en el Irán una instalación nacional de aceleradores electrónicos, a fin de introducir las aplicaciones del tratamiento por haces electrónicos y promover la tecnología para la producción industrial de materiales de polímeros.

Los aceleradores electrónicos también se emplean para el análisis de materiales. Los haces electrónicos de máquinas, como microtrones o aceleradores lineales con energías que superan

los 25 MeV, pueden utilizarse para producir rayos gamma de alta energía para la activación fotónica de diversas muestras, que posteriormente pueden analizarse para determinar las concentraciones de elementos.

Los aceleradores de sincrotrones electrónicos de alta energía (varios GeV) sirven de brillantes fuentes de luz sincrotrónica que se utiliza para analizar la estructura de muchos materiales, orgánicos e inorgánicos. El Organismo colabora con el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia, para ofrecer capacitación en materia de aplicaciones de las radiaciones sincrotrónicas a científicos de los países en desarrollo.

SOSTENIENDO EL PROGRESO

Mediante diversos mecanismos, el OIEA ayuda a sus Estados Miembros a aplicar las tecnologías del plasma y de los aceleradores en diversas esferas. Esas aplicaciones reportan beneficios prácticos para la industria, la investigación, la vigilancia del medio ambiente, la educación y la atención sanitaria, contribuyendo así a los planes y estrategias nacionales orientadas al desarrollo sostenible.

Además de ayudar a los Estados Miembros a crear sus propias instalaciones para la tecnología del plasma y la utilización de los aceleradores, el Organismo puede promover la cooperación internacional en el uso de importantes instalaciones, cuya construcción resulta muy costosa para muchos países, como las instalaciones de las radiaciones sincrotrónicas y de la espalación neutrónica. Las expectativas indican que el uso de las tecnologías del plasma y de los aceleradores se ampliará en el próximo decenio y se necesitará una mayor cooperación para que más países se beneficien de las diversas aplicaciones. □