

Desarrollo de tecnología de aceleradores en CNEA



ANDRÉS J. KREINER

Gerencia de Investigaciones, GAIyANN, CNEA; Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM; CONICET.

Los aceleradores de partículas son máquinas que utilizan campos electromagnéticos para entregar energía cinética a iones (átomos a los que se le han quitado o agregado electrones) o a electrones. Los haces de estas partículas cargadas una vez aceleradas pueden ser usados para interactuar con diferentes materiales, estudiar sus propiedades y producir modificaciones en una gran variedad de sistemas tanto físicos como biológicos. El rango de energías disponibles hoy en día y de sistemas en estudio y procesamiento mediante este método es amplísimo. Cubre desde energías superiores al TeV¹ producidas en el gran colisionador de hadrones² del CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares), dedicado al estudio de las propiedades de las partículas elementales y a la reconstrucción de las condiciones prevalentes en el big bang, pasando por estudios y aplicaciones del núcleo atómico³ y de sistemas atómicos y moleculares, hasta energías del orden del keV o menos, utilizadas para estudiar y modificar las propiedades de las superficies de diversos materiales. El espectro de las aplicaciones de los aceleradores es muy abarcativo, contribuyendo a la solución de problemas multidisciplinarios en medicina (radioterapia y medicina nuclear), tecnología nuclear, microelectrónica, ciencia de materiales, ciencias del medio ambiente, prospección petrolífera, arte y arqueología y seguridad de fronteras entre muchas otras. El valor de las mercaderías que han sido producidas con alguna intervención de un acelerador se estima

conservadoramente en 500 billones (5×10^{11}) de U\$S por año actualmente a nivel mundial⁴.

La CNEA ha sido la única Institución del país que ha impulsado sistemáticamente y desde sus inicios actividades de I&D con aceleradores. Como algunos de los hitos relevantes se pueden mencionar la operación del Sincrociclotrón de 55 MeV de partículas alfa, la instalación y operación del acelerador electrostático Tándem TANDAR, uno de los más grandes del mundo en su tipo, cuyos 25 años de existencia se conmemoran este año y la instalación de un ciclotrón de producción de radioisótopos, en el Centro Atómico Ezeiza, entre varios otros.

APLICACIONES A LA SALUD HUMANA

Posiblemente una de las aplicaciones más relevantes socialmente se encuentra en el ámbito de la salud humana, específicamente en la lucha contra el cáncer. Los aceleradores de iones están en la base de metodologías de avanzada altamente eficientes para el control de tumores malignos con ventajas comparativas muy claras en relación a la radioterapia convencional con rayos gamma (que también se producen actualmente con aceleradores de electrones). Las diferentes formas de hadronterapia^{5,6} que comprenden desde la utilización directa de haces de hadrones (protones y iones más pesados como carbono) como, en menor grado, terapias de segunda generación como la terapia por captura neutrónica, son reconocidas internacionalmente como formas superiores de radioterapia. Las

razones físicas y radiobiológicas de esta superioridad están relacionadas con la forma radicalmente diferente que tienen los hadrones cargados de depositar su energía en materia comparada con la forma en que lo hace la radiación gamma, utilizada hoy día en radioterapia convencional. Los haces de fotones dejan su energía de manera exponencialmente decreciente desde la superficie del paciente hacia el interior y por ende dificultan la localización de la dosis en el tumor. En contraposición, los hadrones cargados dejan poca energía cuando son rápidos y a medida que se frenan en materia aumenta su pérdida de energía por unidad de camino recorrido alcanzando un máximo hacia el final de la trayectoria y por ende presentando una gran densidad de ionización que lleva a una importante eficacia biológica para inactivar las células malignas. El rango, es decir el alcance máximo de estas partículas, está bien definido y depende de la energía inicial del proyectil; mas allá del rango no hay dosis entregada mientras que para los rayos gamma siempre hay una cola que entrega dosis en zonas no deseadas de tejido sano y a veces muy radiosensible. Estos iones pueden ser enfocados y guiados y su energía modulada con gran precisión por campos electromagnéticos, y debido a su masa importante tienen trayectorias básicamente rectas. Estas grandes ventajas de la hadronterapia, que esencialmente se resumen diciendo que el nivel de localización de la dosis es muy superior y análogamente la efectividad biológica, comparadas a las que se logran con la radioterapia convencional, están impulsando su creciente utilización a nivel internacional. Sin embargo estos desarrollos están ocurriendo solo en los países industrialmente avanzados del hemisferio norte por el momento. No hay ninguna instalación de hadronterapia en toda Latinoamérica. Para paliar esta situación la CNEA ha incluido en su plan estratégico la profundización de un camino ya iniciado⁷ (que consistió en habilitar una línea de irradiación externa para estudios radiobiológicos en el TANDAR) en nuestro país para lograr implantar esta modalidad en la región poniendo a disposición de su población esta poderosa y superadora herramienta terapéutica. Estudios epidemiológicos demuestran claramente que la instalación de un centro de hadronterapia

estaría plenamente justificada si sirve a una población del tamaño de la del Mercosur y más aun si extiende su influencia a toda el área de la UNASUR.

También desde hace ya varios años que se está impulsando en CNEA la introducción de la Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT), una novedosa terapia en dos pasos apropiada para tumores difusos e infiltrantes. Se trata de cargar selectivamente un tumor con un captador neutrónico (en este caso el isótopo de masa 10 del boro, una de las pocas sustancias inocuas que tienen una gran "avidez" por neutrones) y luego irradiar con neutrones que al reaccionar con el boro liberan fragmentos cargados altamente ionizantes cuyo daño está confinado a la célula que acumuló boro. Esta metodología

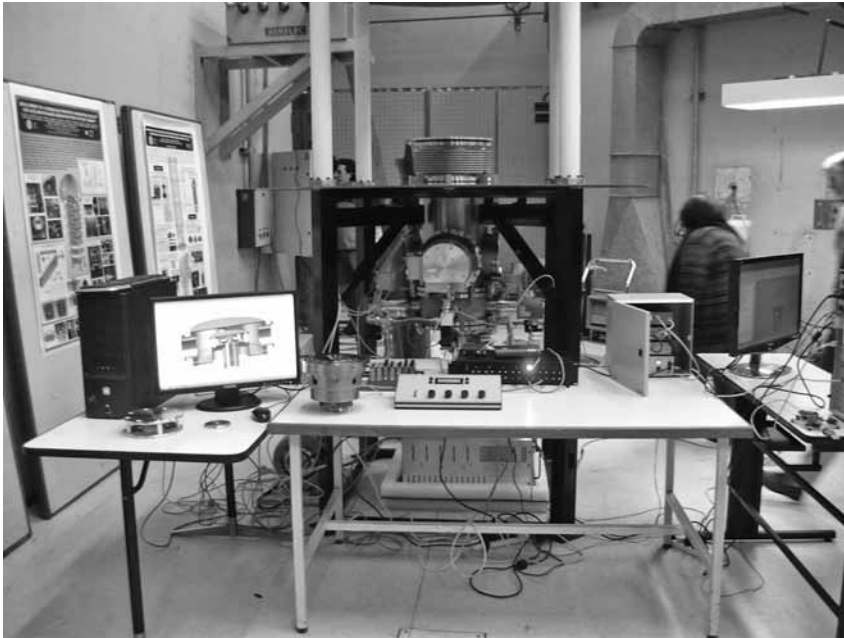
nos pondría, idealmente, en posición de eliminar solo las células cancerosas minimizando el daño al tejido sano. En los últimos años se ha comenzado a desarrollar en CNEA un acelerador productor de neutrones instalable en un hospital para poner a disposición de los oncólogos una fuente de neutrones dedicada. En la *Imágen N° 1* se muestra el estado actual del prototipo de acelerador electrostático en desarrollo.

APLICACIONES NUCLEARES

Además de las aplicaciones a la salud humana los aceleradores jugarán un papel importante en el futuro en temas específicamente nucleares, a saber, en el problema de los residuos radiactivos, en la generación de energía nuclear y en la inducción acelerada de daño por radiación.



IMÁGEN 1. PROTOTIPO DE ACCELERADOR PARA BNCT EN PROCESO DE MONTAJE



IMÁGEN 2. PROTOTIPO DE ACCELERADOR PRODUCTOR DE NEUTRONES EN DESARROLLO

La física y tecnología nucleares reconocen dos vertientes en lo que a máquinas (y procesos) se refiere: 1) Los Reactores Nucleares (con la fisión nuclear inducida por neutrones). 2) Los Aceleradores de partículas (a través de reacciones nucleares inducidas con partículas cargadas). Estas dos vertientes han comenzado a converger en los últimos años en los así llamados sistemas híbridos o ADS (*Accelerator Driven Systems*) en los cuales un haz de protones de alta energía incidiendo sobre un blanco adecuado produce flujos muy importantes de neutrones que son inyectados en un reactor subcrítico, adecuado para transmutar elementos transuránicos de alta radiotoxicidad. La transmutación de residuos radiactivos

basada en ADS es uno de los conceptos más promisorios para reducir la radiotoxicidad. Existen en el mundo actualmente una serie de proyectos e iniciativas, acompañadas decididamente por el Organismo Internacional de Energía Atómica –OIEA– para encaminar el desarrollo de estas máquinas. También aquí hemos comenzado a incursionar en el desarrollo de aceleradores productores de flujos importantes de neutrones. En la *Imágen N° 2* se muestra un prototipo de acelerador de baja energía en desarrollo.

ALGUNAS OTRAS APLICACIONES

Como ejemplos finales de lo realizado en los últimos años por nuestro grupo en el área de aplicaciones de

aceleradores queremos mencionar la instalación de un microhaz de iones pesados en una de las líneas de irradiación del TANDAR (un dispositivo que permite producir y enfocar con gran precisión un haz de dimensiones micrométricas y barrer y modificar una muestra), con el cual se han concretado trabajos de microanálisis multielemental que han permitido determinar microdistribuciones en tejidos cancerosos de drogas de potencial interés⁸ para BNCT, contaminantes medioambientales en el sistema de subterráneos de Buenos Aires⁹ y micromaquinado de piezas como guías de onda para satélites¹⁰. También se han realizado estudios de modificación de propiedades por irradiación con iones, de polímeros para aplicaciones biomédicas¹¹.

COMENTARIOS FINALES

Se ha dado un pantallazo parcial de las muy relevantes aplicaciones de los aceleradores a problemas médicos, nucleares, medioambientales y en modificación de propiedades de materiales, quedando solo a nivel de mención otras muy numerosas aplicaciones en diferentes ramas de la industria. El Estado Argentino a través de la CNEA, una Institución con una tradición exitosa en el área de la tecnología nuclear, y de otras Instituciones en menor medida, ha comenzado a apostar en los últimos años al desarrollo local de tecnología de aceleradores. Creemos que las condiciones están dadas, tanto a nivel de nuestros recursos humanos como del nivel de desarrollo tecnológico y de demanda del país y de la región, como para profundizar estas acciones. ■

1. Un tera electrón volt, es decir 10^{12} eV, un millón de millones de voltios, donde 1 eV es la energía que gana una carga elemental –la de un electrón o de un protón– cuando atraviesa una diferencia de potencial de 1 volt.
2. El término hadrón designa una partícula pesada que interactúa mediante la fuerza nuclear, típicamente un protón o ion más pesado, pero no un electrón. Ver www.cern.ch
3. En el rango de los GeV a MeV, $1\text{GeV} = 10^9$ eV, $1\text{MeV} = 10^6$ eV, $1\text{keV} = 10^3$ eV.
4. R. W. Hamm y M. E. Hamm (2011), "The Beam Business: Accelerators in Industry", *Physics Today*, v. 64, N° 6, p. 46.
5. www.psi.ch/protontherapy
6. A. J. Kreiner, W. Castell, H. Di Paolo, M. Baldo, J. Bergueiro, A. A. Burlon, D. Cartelli, V. Thatar Vento, J. M. Kesque, J. Erhardt, J. C. Ilardo, A. A. Valda, M. E. Debray, H. R. Somacal, J. C. Suarez Sandin, M. Igarzabal, H. Huck, L. Estrada, M. Repetto, M. Obligado, J. Padulo, D. M. Minsky, M. Herrera, S. J. Gonzalez y M. E. Capoulat (2011), "Development of a Tandem-Electrostatic-Quadrupole Facility for Accelerator-Based Boron Neutron Capture Therapy", *Appl. Radiat. Isotopes*, doi:10.1016/j.apradiso.2011.01.040 y www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/espectro.html.
7. J. A. Schuff, L. Policastro, H. Duran, A. J. Kreiner, A. Mazal, B. L. Molinari et al. (2002), "Relative Biological Effectiveness Measurements of Low-Energy Proton and Lithium Beams on Tumor Cells", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, v. 187 (3), pp. 345-353.
8. P. Stoliar, A. J. Kreiner, et al. (2044), "Microdistributions of Prospective BNCT-Compound CuTCPH in Tissue Sections with a Heavy Ion Microbeam", *Applied Radiation and Isotopes*, 61, p. 771.
9. L. G. Murrini, V. Solanes, M. Debray, A. J. Kreiner, J. Davidson, M. Davidson, M. Vázquez y M. Ozafrán (2009), "Concentrations and Elemental Composition of Particulate Matter in the Buenos Aires Underground System", *Atmospheric Environment*, 43, pp. 4577-4583 y referencias.
10. F. Nesprías, M. Venturino, M. E. Debray, J. Davidson, M. Davidson, D. Minsky, A. J. Kreiner, M. Fischer, A. Lamagna (2009), "Heavy Ion Beam Micromachining on LiNbO₃", *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, B267, pp. 69-73.
11. V. C. Chappa, C. Pastorino, M. F. Del Grosso, C. R. Arbeitman, M. Müller, G. García Bermúdez (2010), "Monte Carlo Study of Molecular Weight Distribution Changes Induced by Degradation of Ion Beam Irradiated Polymers", *Nucl. Instr. and Meth.*, B268, 19, pp. 3235-3238.