

José María Yturralde. Sèrie *Postludi*, 2006. Acrílic sobre llenç, 41x41 cm.

# UNA EINA PER A LA INVESTIGACIÓ CIENTIFICOTÈCNICA

## APLICACIONS DELS ACCELERADORS DE PARTÍCULES

Daniel Errandonea i José Luis Tañá

*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.

Els acceleradors de partícules, originàriament desenvolupats per a ser utilitzats en investigació bàsica i en aplicacions no relacionades amb la medicina, també han estat usats en aplicacions mèdiques des de fa més de cinquanta anys. En l'actualitat, es construeixen acceleradors dissenyats específicament per a la teràpia de pacients. No obstant això, els feixos generats per aquests acceleradors poden també ser utilitzats per estudiar els efectes de la radiació en éssers vius i en materials, per aplicar les tècniques nuclears a altres camps d'investigació i per caracteritzar les propietats de materials. El rang d'aplicacions dels feixos de protons comprèn camps tan dispars com la física nuclear, la ciència dels materials, les ciències biològiques, la tecnologia espacial, la geofísica, l'art i l'arqueologia, la indústria, a més de les activitats d'investigació i desenvolupament en el camp mateix de la teràpia amb partícules. A continuació descriurem algunes d'aquestes aplicacions.

### ■ VERIFICACIÓ I CARACTERITZACIÓ DE COMPONENTS ELECTRÒNICS

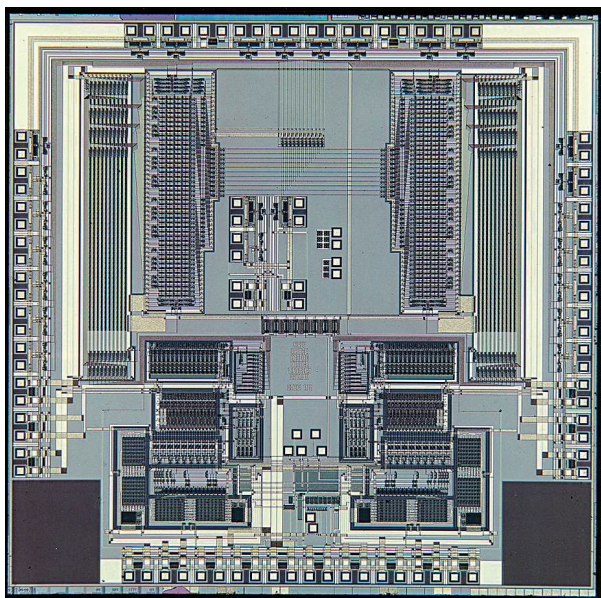
Els components electrònics estan sotmesos a una irradiació contínua provinent de diverses fonts que poden afectar el seu funcionament. En condicions especials d'alts nivells d'irradiació, com els que es troben en els acceleradors de partícules o reactors nuclears; o nivells més moderats, com els que es troben durant les missions

espacials. La radiació acumulada pot produir danys permanents, per la qual cosa és important desenvolupar components amb alts nivells de resistència a la radiació. Com que el dany depèn també de la forma i energia de la radiació, és necessari disposar d'instal·lacions per a verificar-lo que cobresquen un rang ampli de partícules i energies. La irradiació a molt baixos nivells és responsable d'un altre tipus d'efectes, en què la interacció d'una

sola partícula és capaç de produir un mal funcionament d'un equip electrònic. Un exemple típic seria el canvi d'estat d'un bit en la memòria RAM d'un ordinador que pot induir un bloqueig del sistema operatiu. Aquests efectes d'esdeveniments solitaris (SEE en anglès) són induïts pels raigs còsmics en l'equip electrònic que controla les naus espacials, però afecten igualment l'electrònica de consum. Els raigs còsmics que arriben a la Terra estan compostos majoritàriament per protons amb energies entre uns 100 MeV i 1 GeV, mentre que són els neutrons (produïts pels raigs

còsmics a l'atmosfera), amb energies inferiors a uns centenars de MeV, els responsables de SEE a altituds terrestres. Feixos de protons i neutrons (generats a partir dels primers) amb energies de fins a 250 MeV poden ser utilitzats per a investigar danys per irradiació i SEE de components electrònics. La indústria electrònica actual inverteix considerables recursos en aquesta mena d'investigacions.

**«EN CONDICIONS ESPECIALS D'ALTS NIVELLS D'IRRADIACIÓ, LA RADIACIÓ ACUMULADA POT PRODUIR DANYS PERMANENTS, PER AIXÒ ÉS IMPORTANT DESENVOLUPAR COMPONENTS AMB ALTS NIVELLS DE RESISTÈNCIA A LA RADIACIÓ»**



Els feixos de neutrons i positrons poden ser utilitzats per estudiar els efectes de la radiació en components electrònics emprats en estacions espacials, satèl·lits, etc.

#### ■ EFECTES DE LA RADIACIÓ EN ELS ÉSSERS VIUS

A més d'afectar el funcionament dels dispositius electrònics de satèl·lits i naus espacials, la radiació ionitzant present en l'espai significa un risc important per als éssers humans que hi viuen i treballen. En particular, un problema de vigència actual és el desenvolupament de blindatges davant la radiació còsmica per als astronautes de les futures missions tripulades a Mart. En general, la NASA i altres agències espacials estan preocupades per conèixer amb precisió la quantitat de radiació a què són exposats els astronautes en els seus viatges rutinaris i els efectes d'aquestes. El coneixement que tenim actualment sobre els efectes de la radiació còsmica sobre els éssers vius és escàs. Com ja hem dit, els raigs còsmics estan compostos majoritàriament per protons i són aquests i altres ions pesants els principals responsables de les dosis rebudes. Els feixos de protons, com els produïts en un ciclotró d'aplicacions mèdiques, poden ser utilitzats per simular els efectes de la radiació còsmica en els éssers vius.

#### ■ INSPECCIÓ NO DESTRUCTIVA D'OBJECTES

La gran profunditat de penetració en la matèria de les partícules carregades amb alta energia, com els protons, és

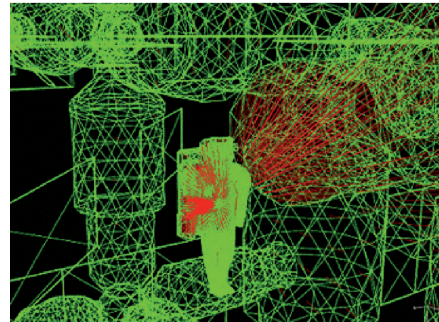
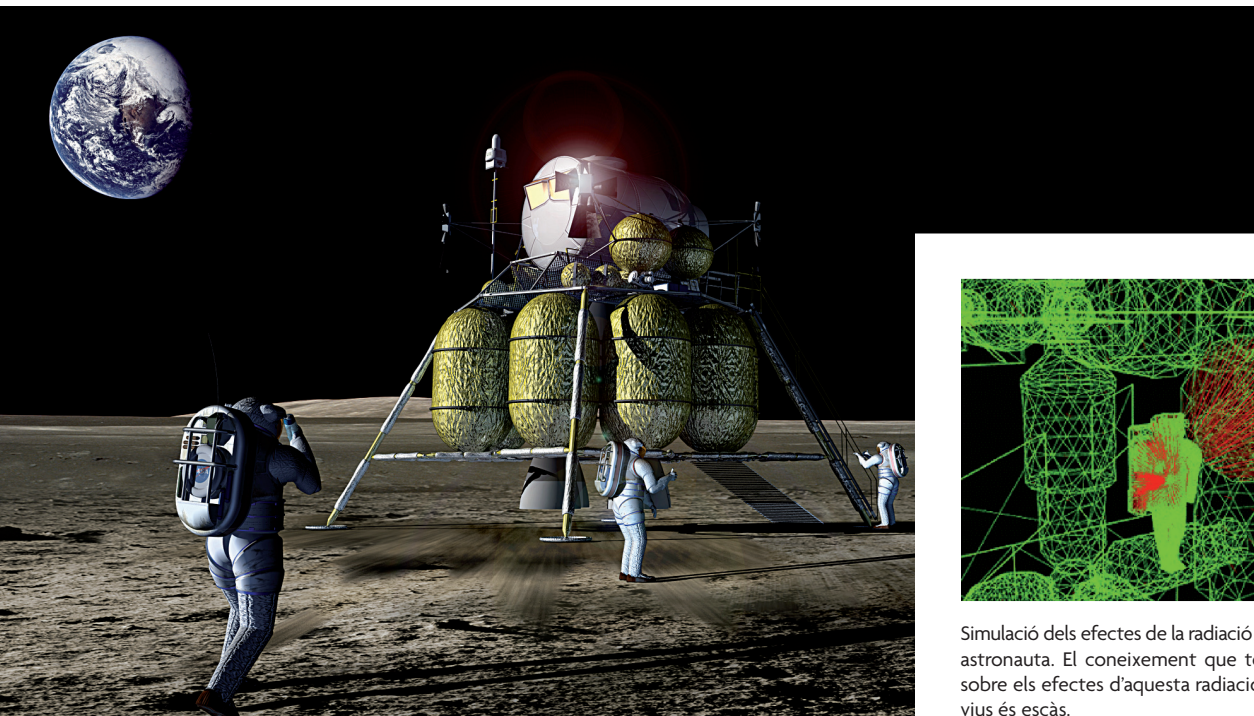
el factor clau per a aplicar-les en diverses tècniques per a la investigació no-destructiva d'objectes de grandària moderada. En el cas dels protons, el rang de penetració assoleix uns 7 cm en ferro i 20 cm en alumini per a una energia de 250 MeV, característica que permet realitzar radiografies per transmissió amb feixos de protons. Aquesta tècnica s'ha aplicat recentment amb gran èxit al Laboratori Nacional de Los Alamos (EUA) per a protons de 800 MeV d'energia. Els avantatges inherents d'aquesta tècnica, en comparació amb la radiografia convencional amb raigs X, són una major resolució en posició i un major contrast per a discriminar canvis de densitat. La possibilitat d'inspeccionar l'interior d'objectes complexos sense haver de destruir-los és la qualitat que confereix interès a aquesta tècnica. Una altra tècnica radiogràfica amb protons es basa en la mesura de les diferències d'energia perduda en travessar distintes quantitats de matèria, i està sent investigada en connexió precisament amb la teràpia de protons.

Els protons d'alta energia poden ser utilitzats també com una sonda analítica per a investigar la composició química dels objectes. L'emissió de raigs X induïda per partícules (PIXE en anglès) amb protons és una tècnica no destructiva que actualment és utilitzada per analitzar les composició d'objectes d'art i arqueològics. L'alta energia dels protons augmenta la probabilitat d'emissió penetrant de raigs X provinent de capes atòmiques profundes en elements d'alt nombre atòmic. Aquestes tècniques, a banda de ser utilitzades als camps ja esmentats de l'art i l'arqueologia i l'estudi de meteorits, poden tenir aplicació en l'estudi de manufactures industrials o en qualsevol altre cas on la tècnica d'anàlisi haja de preservar la integritat de l'objecte estudiat. També es poden utilitzar en medicina i biologia per detectar traces d'elements pesants en el material orgànic, i en geofísica per a estudiar les inclusions en els minerals que ens donen informació sobre la història geològica del nostre planeta. El desenvolupament d'un microfeix de protons, és a dir, d'un feix enfocat fins a dimensions d'uns quants microns, és especialment valuós en diversos d'aquests camps d'aplicació.

■ INVESTIGACIÓ EN CIÈNCIES DE LA TERRA I PLANETÀRIES

L'examen dels meteorits que impacten sobre la Terra pot donar-nos informació important sobre l'estructura cristal·lina i la composició química de les roques que formen

### «LA RADIACIÓ IONITZANT PRESENT EN L'ESPAI SIGNIFICA UN RISC IMPORTANT PER ALS ÉSSERS HUMANS QUE HI VIUEN I TREBALLEN»



Simulació dels efectes de la radiació còsmica sobre un astronauta. El coneixement que tenim actualment sobre els efectes d'aquesta radiació sobre els éssers vius és escàs.

l'escorça de la Lluna, Mart i altres objectes celestes. No obstant això, totes les roques meteorítiques recollides a la Terra han estat sotmeses prèviament a la irradiació de protons molt energètics durant el seu viatge per l'espai en direcció a la Terra. A més, durant l'impacte els meteorits estan subjectes a condicions de molt alta pressió i temperatura. Com a conseqüència d'aquests dos fets, normalment els meteorits trobats a la Terra tenen estructures cristal·lines diferents de les dels minerals terrestres anàlegs i, en alguns casos, les restes trobades són producte de la descomposició dels components originals del meteorit. Per això, els científics han de ser molt prudents a l'hora d'extraure conclusions de l'anàlisi de meteorits. És possible simular condicions semblants a les patides pels meteorits combinant la irradiació amb protons de diferents minerals amb tècniques d'alta pressió i temperatura, les quals, en l'actualitat, permeten generar al laboratori de forma controlada condicions de pressió i temperatura d'uns quants milions d'atmosferes i milers de graus. Les mostres irradiades sota aquestes condicions s'analitzen després amb tècniques de caracterització com l'espectroscòpia Raman, la difracció de raigs X o la microscòpia electrònica per transmissió. Un experiment d'aquest tipus s'ha realitzat recentment en el zircó ( $ZrSiO_4$ ). Aquest mineral és un dels més abundants en les restes de meteorits i en la part superior de l'escorça terrestre. Els estudis realitzats mostren que quan s'irradia el zircó amb protons i se'l sotmet a altes pressions, transforma la seua estructura cristal·lina en mineral reidita, la qual cosa implica una reducció de la simetria cristal·lina i un canvi important en les propietats físiques i químiques. Aquesta mena d'estudis estan sent de gran

ajuda per a avançar en la solució dels nombrosos problemes oberts en les ciències de la terra i l'espai.

#### ■ LITOGRAFIA AMB FEIXOS DE PROTONS

Els feixos de protons poden utilitzar-se per a dibuixar estructures tridimensionals amb molt alta resolució o per a la construcció de nano o microestructures en semiconductors com el silici o l'arseniür de gal·li. Els danys causats en l'estructura cristal·lina del semiconductor per la irradiació de protons augmenten la resistivitat del semiconductor. Irradiant àrees seleccionades d'un semiconductor amb un microfeix de protons es poden construir nanoestructures mitjançant un atac químic posterior que només afectarà les zones no irradiades. Grans avenços en aquest camp s'han fet durant els últims anys. Aquesta tècnica pot ser rellevant per al desenvolupament de noves tecnologies i competeix amb altres tècniques, en especial per al desenvolupament d'estructures amb dimensions de l'ordre dels 50 nanòmetres. La possibilitat de desenvolupar aquestes estructures és molt important per a la indústria electrònica.

#### ■ DADES NUCLEARS PER A LA CIÈNCIA I LA TECNOLOGIA

Les dades nuclears troben un ampli rang d'aplicacions en ciència i tecnologia. En particular, les seccions eficaçes totals i de producció en reaccions nuclears són necessàries per al disseny de sistemes d'apantallament de la radiació en acceleradors de partícules i en l'avaluació dels procediments de desmantellament d'aquests,

així com en l'estimació dels riscos radiològics i en la dosimetria del personal exposat en instal·lacions amb acceleradors i en missions espacials. Aquestes mateixes dades també són d'interès en l'avaluació prèvia dels danys per radiació i dels efectes produïts per un únic ió en els components electrònics, tant en aplicacions convencionals com espacials, i en l'estudi a escala microscòpica dels efectes biològics de la radiació en els teixits vius. Finalment, les dades nuclears també són rellevants per al disseny de sistemes de transmutació dels residus radioactius d'alta activitat basats en acceleradors i per a millorar el nostre coneixement dels mecanismes bàsics de les reaccions nuclears

Les dades nuclears per a aquestes aplicacions són recollides a partir d'una sèrie d'experiments, són avaluades i finalment compilades en les bases de dades nuclears. Les dades experimentals per a protons i neutrons en el rang de 50 a 250 MeV són, en general, incompletes quan considerem simultàniament rang d'energies, nucli blanc, canal de reacció i magnitud mesura. Encara més, una bona part de les dades existents són molt antigues i estan subjectes a incerteses considerables. En els últims anys la necessitat d'actualitzar les bases de dades ha estat ressaltada ben sovint i diversos comitès d'especialistes nacionals i internacionals, com OECD/NEA (Organització per a la Cooperació i el Desenvolupament Econòmic/Agència d'Energia Nuclear), IAEA (Agència Internacional d'Energia Atòmica), JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute), etc., han establert llistes prioritzades de necessitats experimentals. Avui dia els feixos de protons i neutrons amb energies ben definides en el rang de 50 a 250 MeV i intensitat adequada estan sent utilitzats per a cobrir part d'aquestes necessitats.

El desenvolupament d'instrumentació nuclear avançada és important òbviament en els camps de la física nuclear i de partícules, encara que també en altres camps, com és el mateix camp de la medicina. Diversos grups espanyols participen en projectes punters en instal·lacions internacionals, com FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) a Alemanya o el LHC (Large Hadron Collider) en el CERN, o planegen

de participar en futures instal·lacions, com l'ILC (Internacional Linear Collider) o l'ESS (European Spallation Source). Un aspecte essencial d'aquesta participació és el desenvolupament de detectors amb prestacions millorades per als distints experiments. En el procés de desenvolupament s'usen perquè poden accedir fàcilment a fonts radioactives per a la verificació dels prototips, però aquestes només permeten fer comprovacions limitades. La possibilitat de comptar amb feixos ben caracteritzats de protons i neutrons d'altres energies permetrien en molts casos acostar-se més a les vertaderes condicions experimentals. El desenvolupament de detectors de partícules amb alta resolució en posició i/o energia, robustos i fiables, representa un repte tecnològic que pot ser afrontat en aquesta instal·lació.

#### ■ PERSPECTIVES

Les aplicacions desenvolupades pels científics entorn de l'ús d'acceleradors de partícules en els últims anys han tingut gran influència en diversos camps tecnològics i científics i per tant un impacte econòmic i social important. Cal pensar, per exemple, en el desenvolupament de nous materials, en l'augment de la fiabilitat dels equips informàtics, en el millor coneixement de les condicions climàtiques o en el mateix desenvolupament de tècniques terapèutiques contra el càncer. Però, en cap d'aquests camps pot considerar-se que l'avenç esperat haja estat esgotat, tal com hem intentat esbossar en aquest article. Per no parlar d'altres camps que no han estat esmentats o que ni tan sols han estat imaginats. Sempre existeix necessàriament un retard entre una troballa científica i la repercussió que té en la nostra vida ordinària, però és evident que les aplicacions que s'estan desenvolupant avui dia per als acceleradors de partícules seran beneficioses, no sols com a recerca del coneixement, sinó també com a aplicació pràctica. ☉

«LA POSSIBILITAT  
D'INSPECCIONAR L'INTERIOR  
DELS OBJECTES  
COMPLEXOS SENSE HAVER  
DE DESTRUIR-LOS ÉS EL  
QUE CONFEREIX INTERÈS  
A AQUESTA TÈCNICA»



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

**José Luis Tain.** Institut de Física Corpuscular (IFIC), Centre mixt CSIC – Universitat de València.