

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

RADIACIONS: DE RÖNTGEN A LAWRENCE

Jesús Navarro

Radiations: From Röntgen to Lawrence.

Basic science, applied science and technologies are not just connected by a linear relationship; rather, the history of radioactivity shows us that they are richly and intricately interwoven. Applications to medicine are emphasized in this paper.

La història de la ciència ens mostra que les relacions entre ciència bàsica, ciència aplicada i tecnologia són de fet relacions tortuoses, de camins que es bifurquen i es retroben, i el cas de les radiacions n'és un bon exemple. A les darreries del segle XIX la naturalesa de l'electricitat era una qüestió important que va motivar una sèrie d'estudis basats en les descàrregues elèctriques produïdes en un tub amb gas a baixa pressió.

El novembre de 1895 W. C. Röntgen, a Würzburg, estudiava la radiació emesa pel càtode i va observar que a cada descàrrega en el tub s'il·luminava una pantalla fluorescent situada en una taula veïna. Després d'unes quantes setmanes d'observacions i experiments va concloure que el fenomen era produït per una radiació desconeguda –els raigs X– diferent a la llum i als raigs catòdics. Els raigs X poden ennegrir una placa fotogràfica i els cossos hi són més o menys transparents. La mà de Frau Röntgen, situada entre el tub i una placa, va permetre «veure» per primera vegada l'interior del cos humà; aquesta primera radiografia mostrava també que els raigs X són més o menys absorbits pels diferents teixits, en funció de la seua densitat. A finals de desembre, Röntgen va fer públiques les seues observacions. La notícia s'estengué ràpidament i els raigs X captaren l'atenció general: els físics s'interessaven per un fenomen del qual es desconeixia pràcticament tot, els metges van veure immediatament les possibilitats pràctiques dels raigs X. Al llarg de l'any 1896 es van publicar més de mil articles científics i uns cinquanta llibres sobre els raigs X i les seues aplicacions. La premsa va fer de caixa de ressonància i, a partir de gener de 1896, en moltes capitals europees

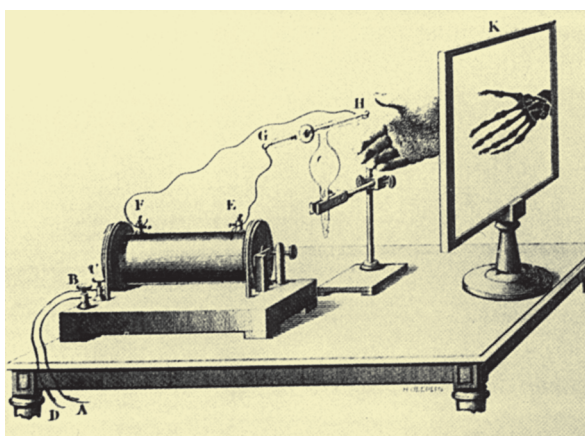
s'organitzaren demostracions públiques; en les fires populars, els raigs X compartien popularitat amb el recent invent dels germans Lumière.

La naturalesa dels raigs catòdics va ser elucidada el 1897 per J. J. Thomson, a Cambridge. Els experiments en presència de camps elèctrics i magnètics el van dur a la conclusió que els raigs catòdics són constituïts de corpuscles, que va anomenar electrons, la velocitat i la càrrega específica dels quals va mesurar. La naturalesa dels raigs X va tardar un poc més a ser aclarida. Una sèrie d'experiments realitzats entre 1905 i 1914 per diversos científics, i sobretot l'anàlisi feta per M. von Laue, van mostrar que els raigs X són ones electromagnètiques, de la mateixa naturalesa que la llum visible, però amb una longitud d'ona més curta. Els electrons produïts en el càtode són frenats pel mateix càtode o pel vidre del tub i, tal com diu la teoria electromagnètica, en ser frenats emeten la radiació electromagnètica que constitueix els raigs X. L'experiment conclouent va ser la producció d'imatges de difracció per una xarxa cristal·lina, amb la qual cosa va

aparèixer un nou instrument de recerca, de gran importància en moltes disciplines. A tall d'exemple, recordem que justament amb experiments de difracció de raigs X es pogué determinar, als anys 1950, l'estructura en doble hèlix del DNA.

Els raigs X són el primer exemple, i potser l'únic, d'un descobriment científic que ha dut a aplicacions pràctiques immediates. Röntgen va rebre el 1901 el primer premi Nobel de física amb aquesta justificació: «El descobriment de Röntgen ha aportat ja tants beneficis a la humanitat que recompensar-lo amb el premi

**«A LES DARRERIES DEL
SEGLE XIX LA NATURALESA
DE L'ELECTRICITAT ERA
UNA QÜESTIÓ IMPORTANT
QUE VA MOTIVAR UNA SÈRIE
D'ESTUDIS BASATS
EN LES DESCÀRREGUES
ELÈCTRIQUES PRODUÏDES
EN UN TUB AMB GAS
A BAIXA PRESSIÓ»**



La primera radiografia té data precisa: 22 de desembre de 1895. És la mà de Frau Röntgen, on es poden distingir els ossos i l'anell que duia. Va ser publicada a *The New York Times* el 16 de gener de 1896. Una representació esquemàtica del dispositiu experimental de Röntgen es presenta a la imatge inferior.

Nobel respon en un grau extrem a les intencions del testamentari.» Ja des de gener de 1896, als hospitals més importants s'utilitzaven raigs X en traumatologia, per localitzar objectes estranys en el cos humà, però també com a eina de diagnosi de la tuberculosi. Encara s'ignoraven els efectes dels raigs X, de manera que tant els experiments científics com la presa de clixés es feien sense prendre les precaucions que són actualment de rigor (les primeres normes de radioprotecció foren elaborades el 1928) i experimentadors, manipuladors o pacients veien aparèixer rojors en les zones irradiades de la pell. Els metges van pensar de seguida a explorar-ne les possibilitats terapèutiques. A l'anunci fet el 1897 per L. Freund, a Viena, sobre la curació d'un

**«LA MÀ DE FRAU RÖNTGEN,
SITUADA ENTRE EL TUB
I UNA PLACA, VA PERMETRE
“VEURE” PER PRIMERA
VEGADA L'INTERIOR DEL
COS HUMÀ»**

nevus, van seguir altres, a França i a Suècia, sobre l'ús dels raigs X en diversos casos de càncer. El fonament biològic en favor de la utilització dels raigs X en el tractament del càncer va ser establert gràcies als estudis realitzats, entre 1904 i 1906, per J.-A. Bergonié i L. Tribondeau, que van mostrar que les cèl·lules canceroses són més sensibles als raigs X que les cèl·lules sanes.

L'estudi dels raigs X va tenir conseqüències inesperades en la ciència bàsica. El gener de 1896, H. Poincaré va presentar el treball de Röntgen a l'*Académie des Sciences* de París i hi va conjecturar que aquesta emissió podria estar lligada a la fluorescència del vidre que formava el tub. En la sessió es trobava justament un especialista de la fluorescència, H. Becquerel, qui va decidir verificar la hipòtesi. La idea era col·locar minerals fluorescents sobre una placa fotogràfica recoberta d'un paper negre i exposar el conjunt al Sol per estimular la fluorescència del mineral. La possible emissió de raigs X es detectaria per l'ennegritament de la placa. El resultat va ser negatiu, excepte amb les mostres que contenen urani. A més, durant uns dies de pluja, Becquerel va decidir revelar una placa que havia estat en contacte amb el mineral però que no havia estat exposada al Sol. Va trobar que estava més ennegrida que les precedents, de manera que el Sol no representava cap paper en aquest ennegritament, i tampoc devia tenir res a veure amb la fluorescència. Sovint hom parla d'un efecte de l'atzar: Becquerel estava avorrit durant uns dies sense observacions i va decidir de passar el temps revelant unes plaques. És possible que així fóra, però no s'han de subestimar les capacitats de Becquerel com a experimentador. En tot experiment s'ha de verificar l'efecte

de les diferents variables que entren en joc, i el Sol era una variable important en els experiments sobre la fluorescència. Podem imaginar que els dies amb pluja van avançar una mesura de control, el que ara diríem la mesura del soroll de fons, que segurament estava prevista fer en acabar els experiments amb Sol.

Els raigs de Becquerel no van captar massa l'atenció d'altres científics, perquè semblaven es-

tar relacionats amb una substància particular, contràriament als raigs X, que eren un fenomen més general. Però Marie Curie va decidir que els raigs urànics serien un bon tema de tesi doctoral. La primera qüestió que es va plantejar era si eren una propietat exclusiva de l'urani o si podien ser emeses també per altres substàncies. Però per fer experiments precisos cal determinar de forma



La publicitat d'un balneari a principis del segle xx destaca la temperatura i la forta radioactivitat de les seues aigües. La majoria de les aigües termals continuen sent tan radioactives ara com abans, però aquesta propietat tan natural s'omet en la publicitat.



També la publicitat de cremes de bellesa assenyalava els efectes benèfics de la radioactivitat. Una miqueta de radi ajuda a netejar les cassoles i a eliminar les males olors.

quantitativa la intensitat de la radiació, i l'ennegriment d'una placa no és un mètode adient. Els germans Pierre i Jacques Curie havien treballat sobre la piezoelectricitat, una propietat que en l'actualitat utilitzem cada vegada que premem un encenedor de gas a la cuina: la compressió d'un cristall de quars genera als seus extrems càrregues elèctriques de signe oposat i l'espurna produïda encén el gas del foguer. Per construir un aparell capaç de mesurar quantitativament la intensitat dels raigs urànics, els Curie es basaren en la capacitat d'aquests d'ionitzar el medi que travessen. Si la mostra activa es col·loca en una de les plaques d'un condensador, la ionització generada crea una càrrega en l'altra placa, que es pot transformar en un corrent elèctric en un circuit. Aquest corrent es pot compensar amb el corrent d'un quars piezoelèctric, sotmès a pressió amb ajut d'un pes. El mèrit de l'aparell és que l'activitat d'una quantitat donada de substància emissora de radiacions es mesura, en última instància, amb una balança de precisió.

Armada d'aquest dispositiu, i d'una paciència i tenacitat esdevingudes llegendàries, Marie Curie va començar, el desembre de 1897, per passar en revista un gran nombre de substàncies diverses per veure si eren «actives» o no. Va trobar que tots els compostos amb urani o tori són actius, independentment del seu estat físic o químic. L'activitat és, per tant, una propietat relacionada únicament amb els àtoms d'urani i de tori, conclusió aleshores ben sorprenent. En un moment en què

«A FINALS DEL SEGLE XIX ENCARA S'IGNORAVEN ELS EFECTES DELS RAIGS X, DE MANERA QUE TANT ELS EXPERIMENTS CIENTÍFICS COM LA PRESA DE CLIXÉS ES FEIEN SENSE PRENDRE LES PRECAUCIONS QUE SÓN ACTUALMENT DE RIGOR»

la realitat dels àtoms no era encara acceptada per tots els científics, Marie Curie aportava l'evidència que no eren ni indivisibles ni immutables. També va trobar que dos minerals d'urani, la pechblenda i la calcolita, són molt més actius que el mateix urani. Això li va fer pensar que podrien contenir un element molt més actiu que l'urani, i es va proposar separar-lo. En col·laboració amb Pierre Curie va iniciar un llarg treball: utilitzaven els mètodes clàssics d'anàlisi química per separar la pechblenda en diferents fraccions, de les quals mesuraven l'activitat, seleccionaven aquelles més radioactives, i tornaven a començar. El juliol de 1898, van anunciar la presència d'un metall desconegut, que proposaren anomenar poloni, amb propietats químiques de la família del bismut. Uns mesos després van descobrir una segona substància molt més activa, que van anomenar radi, de la família del bari. Marie Curie va proposar el nom de radioactivitat a la capacitat d'emetre radiacions que tenen les substàncies amb urani, tori, poloni o radi, col·lectivament qualificades de substàncies radioactives. A partir de 1900, Marie Curie es va dedicar a la separació del radi per mètodes químics. Va haver d'adaptar els mètodes de laboratori a escala industrial, amb el seu col·laborador A. Debierne. El 1903, després de tractar tones i tones de pechblenda van arribar a obtenir 1 decigram de clorur de radi pur.

Amb els primers treballs dels Curie, un nombre creixent de científics, a Europa i a Amèrica del Nord, es van interessar per la radioactivitat. A partir de 1898, E.

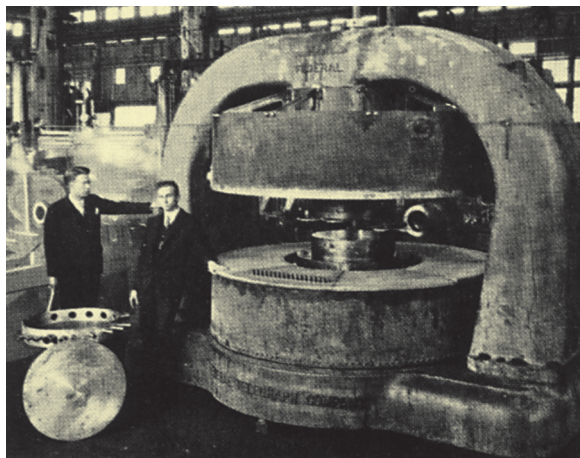
Rutherford hi va representar un paper considerable. Analitzant l'absorció de la radioactivitat per fulls de diversos materials va deduir l'existència de dos tipus de radiacions, que va designar amb les lletres gregues α i β . Els raigs α són molt fàcilment absorbits i produeixen una forta ionització, mentre que els β són molt més penetrants i menys ionitzants. En un camp magnètic els raigs β es comporten com els raigs catòdics: tots dos són electrons, però els dels raigs β tenen una energia major. Rutherford i Soddy van mostrar que els raigs α són àtoms d'heli completament ionitzats. L'abril de 1900, P. Villard, a París, hi va trobar una tercera radiació, molt més penetrant i no desviable en un camp magnètic, que va rebre el nom de raigs γ . Són ones electromagnètiques més energètiques que els raigs X o que la llum visible. La radioactivitat es presenta en forma d'aquests tres raigs, no tots tres emesos simultàniament per la mateixa substància. L'inici de la física nuclear va venir motivat per l'ús dels raigs α com a projectils sobre els àtoms.

El 1900, els alemanys O. Walkhoff i F. Giesel van observar que el radi actua sobre la pell de manera anàloga a com ho fan els raigs X. Molts dels científics que treballaven sobre la radioactivitat havien observat rojors i cremades en les parts de la pròpia pell que havien estat en contacte amb els tubs que contenien substàncies radioactives. Pierre Curie va decidir fer un experiment en ell mateix. Durant deu hores va portar al seu braç una sal de radi d'activitat relativament feble. En llevar-la va observar una forta rojor en la pell, que va evolucionar a una nafra. Becquerel va fer també de cobai, però involuntari. Havia de fer una conferència sobre la radioactivitat i per mostrar al seu auditori la llum blavencsa emanada pel radi va dur, en una butxaca de l'armilla, un tubet amb clorur de radi. Uns dies més tard, la pell al costat de la butxaca mostrava una taca roja amb la forma del tubet. Conjuntament, Curie i Becquerel van publicar un article amb la descripció i evolució de les nafres patides. El 1904 Pierre Curie i els seus col·laboradors van començar una recerca sistemàtica dels efectes de les radiacions. Els metges de l'equip van estudiar en particular els efectes fisiològics del radi. En aquells anys se sabia ben poc sobre el mecanisme de formació d'un càncer i els tractaments en ús tenien èxit en un 5% dels casos. L'aplicació de radi en els càncers de la pell i del coll de l'úter va donar un 50% de curacions: la curieteràpia havia nascut. De seguida va començar la producció industrial de radi, destinat a aplicacions mèdiques.

Però el radi va tenir també un èxit popular. L'equip de Pierre Curie va observar que la majoria de les aigües termals contenen radi. D'això a deduir que l'acció benèfica, suposada o real, de les aigües estava lligada al radi no hi havia més que un pas que molts productors d'aigües no



Ernest Lawrence el 1928, amb el seu prototipus de ciclotró en la mà.



Lawrence i Livingston, al davant del ciclotró de 27 polsades construït a Berkeley el 1930. Va ser el primer accelerador utilitzat per produir isòtops radioactius d'interès en medicina.

**«ELS RAIGS X SÓN EL PRIMER EXEMPLE,
I POTSER L'ÚNIC, D'UN DESCOBRIMENT
CIENTÍFIC QUE HA DUT A APLICACIONS
PRÀCTIQUES IMMEDIATES»**

dubtaren a fer sense més proves. El radi era un producte «natural» (adjectiu que, aleshores com ara, sembla augmentar les vendes), amb efectes benèfics que s'inclouïa en pomades, cremes, caramels... o en bolquers per mantenir calent el culet dels nadons. La publicitat d'una crema de bellesa prometia a les dones «una pell en estat de joventut constant» gràcies al radi. Vist el que sabem en l'actualitat, tot allò va ser una autèntica bogeria.

A partir de 1928, dos noms van començar a prendre una importància creixent entre els investigadors sobre la radioactivitat: el matrimoni format per Irene Curie i Frederic Joliot. Entre 1933 i 1934 es van interessar per una qüestió aparentment secundària: el poloni emet raigs α , però emet també raigs β ? Per frenar els raigs α es va col·locar una làmina grossa d'alumini entre la font intensa de poloni i el detector. Aquest era una cambra de Wilson (o cambra de boira) amb un potent electroimant, per corbar i visualitzar la trajectòria dels possibles electrons. El resultat va ser inesperat: no solament hi havia electrons (els raigs β), sinó també protons i positrons. La presència de protons es podia explicar per una reacció ja coneguda: la transmutació de l'alumini en silici ($^{27}\text{Al} + \alpha \rightarrow ^{30}\text{Si} + p$). La vertadera sorpresa era la presència dels positrons, les antipartícules dels electrons. Els Joliot-Curie van necessitar uns mesos de diversos tests per tal d'explicar-la. L'absorció de les α per l'alumini pot transmutar-lo també en fòsfor més un neutró ($^{30}\text{P} + n$). Aquest isòtop del fòsfor era desconegut fins aleshores per la bona raó que és radioactiu, amb un període de tres minuts i quinze segons, i es desintegra en ^{30}Si emetent un positró, que és el que van detectar. Els Joliot-Curie havien mostrat que es poden produir àtoms radioactius inexistents en la naturalesa, perquè tenen períodes molt curts a escala geològica. Havia nascut la radioactivitat artificial, i una química «ràpida» va ser necessària per aïllar els isòtops radioactius de períodes molt curts.

El 1911, G. Hevesy es trobava a Manchester, fent una estada postdoctoral al laboratori de Rutherford. Aquest li va encomanar que separés el «radi D» del «radi G», tots dos productes de la desintegració del radi. Aleshores ningú no ho sabia, però es tracta de dos isòtops del plom: el radi D és l'isòtop radioactiu ^{210}Pb mentre que

el radi G és l'isòtop estable ^{206}Pb . Naturalment, Hevesy no hi va reeixir perquè la separació és impossible amb mitjans químics. Però va pensar que tampoc les plantes podrien separar-los si les regava amb una solució d'aquestes sals radioactives. Podria, doncs, conèixer on i com eren absorbides mesurant la radioactivitat al llarg de la planta. Aquest va ser el primer traçador radioactiu, però d'un ús prou limitat a causa de la toxicitat del plom.

La possibilitat de fabricar isòtops radioactius específics d'interès en biologia i medicina va començar a realitzar-se gràcies a la construcció d'acceleradors de partícules carregades, sobretot als Estats Units i Anglaterra. A Berkeley, Ernest Lawrence va inventar el ciclotró, veritable progrés tècnic respecte dels altres acceleradors coetanis. En un ciclotró s'acceleren partícules carregades sota l'acció conjunta d'un camp magnètic intens i un camp elèctric variable d'alta freqüència. El primer ciclotró va ser construït el 1929, i semblava més aviat una joguina: una capsula circular que cabia en la mà de Lawrence. El prototipus va servir per verificar els principis d'acceleració i construir-ne un de 60 cm de diàmetre en 1932, seguit d'altres ciclotrons més grans, el que significa acceleracions a majors energies. Els ciclotrons van ser utilitzats inicialment per fer estudis bàsics de física nuclear, però de seguida es van dedicar també a aplicacions mèdiques, per produir nous isòtops d'interès biològic i feixos de partícules susceptibles de tractar casos de càncer.

La història dels primers trenta o quaranta anys de les radiacions mostra que les relacions entre ciència bàsica, ciència aplicada i tecnologia no segueixen una relació lineal, en aquest ordre ingènua-ment lògic. Ací hem destacat sobretot les aplicacions de les radiacions en la medicina. També n'hi ha d'altres, socialment més controvertides, però això seria tema per a un altre monogràfic. Tot aquest embolic entre teories, experiments, ciència bàsica, ciència aplicada, tecnologies i aplicacions pràctiques pot ser un dels aspectes més atractius i gratificants del quefer científic. ☺

Jesús Navarro. Institut de Física Corpuscular (IFIC), Centre mixt CSIC – Universitat de València.

«EL RADI VA TENIR UN ÈXIT POPULAR. L'EQUIP DE PIERRE CURIE VA OBSERVAR QUE LA MAJORIA DE LES AIGÜES TERMALS CONTENEN RADI. D'AIXÒ A DEDUIR QUE L'ACCIÓ BENÈFICA, SUPOSADA O NO, DE LES AIGÜES ESTAVA LLIGADA AL RADI NO HI HAVIA MÉS QUE UN PAS, QUE ALGUNS NO DUBTAREN A FER SENSE MÉS PROVES»