

[gli acceleratori]

anno 3 numero 6 / 4.08

asimmetrie

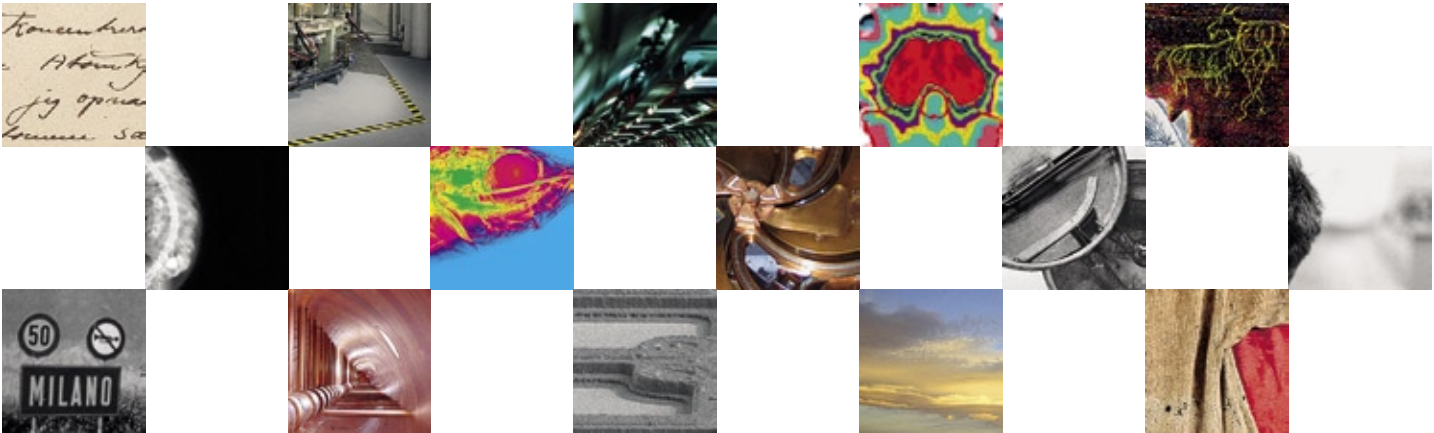
rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

È grande l'attesa tra i fisici per il giorno in cui il più grande acceleratore di particelle del mondo, l'europeo *Large Hadron Collider* (Lhc), verrà messo in opera e raggiungerà la massima potenza. Nel 1929 Robert Van de Graaff costruì una macchina per accelerare particelle. Poco dopo Ernest Lawrence inventò il ciclotrone, il primo acceleratore di particelle capace di raggiungere alte energie. Fu chiaro immediatamente che queste macchine acceleranti avevano un grande potenziale nello sviluppo di applicazioni mediche e industriali. Lawrence ne fu un pioniere impiegando le radiazioni per combattere il cancro. Oggi, quasi ottanta anni dopo, più di 15.000 acceleratori in uso nel mondo danno un contributo essenziale al nostro benessere e a tanti prodotti importanti nella vita quotidiana. Più del 97% di questi acceleratori sono impiegati in molti settori applicativi, mentre alcune centinaia vengono usati per la ricerca scientifica. Gli acceleratori possono essere così piccoli da stare su un tavolo ma anche lunghi decine

di chilometri. Possono essere lineari o circolari, produrre fasci continui o pulsati e utilizzano diverse tecnologie per accelerare i fasci di ioni. Un acceleratore di particelle permette di raggiungere energie utili ad analizzare la struttura intima della materia. In queste macchine le particelle elettricamente cariche come elettroni o protoni sono accelerate e acquistano una grande energia. Lanciate a una velocità prossima a quella della luce verso un bersaglio entrano in collisione. I fisici possono studiare nuove particelle e le leggi che ne regolano il comportamento ponendo ai propri strumenti e acceleratori obiettivi ambiziosi, di precisione e qualità delle misure. Se l'uso di tecnologie nuove, costantemente aggiornate e migliorate, è una necessità per i risultati immediati della ricerca, queste portano anche un'onda lunga di ricadute e applicazioni utili nei campi più diversi. Di acceleratori, di come funzionano e del loro uso vi parliamo qui, mentre al grande Lhc, ai suoi esperimenti e obiettivi dedicheremo un prossimo numero di Asimmetrie.

Andrea Vacchi



asimmetrie Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Trimestrale, anno 3, numero 6 aprile 2008 direttore responsabile Roberto Petronzio, <i>presidente Infn</i> direttore editoriale Andrea Vacchi comitato scientifico Danilo Babusci Piera Sapienza Crisostomo Sciacca Amedeo Staiano Andrea Vacchi redazione Vincenzo Napolano Catia Peduto Francesca Scianitti Antonella Varaschin hanno collaborato Ugo Amaldi, Bruno Arpaia, Carlo Bernardini, Mauro Bonardi, Emilio Burattini, Luciano Calabretta, Edoardo Castelli, Roberto Cherubini, Roberto Cirio, Giacomo Cuttone, Marco Donetti, Massimo Ferrario, Flavio Marchetto, Carlo De Martinis, Cristiana Peroni, Claudio Piemonte, Paolo Pierini, Amedeo Staiano, Vittorio Giorgio Vaccaro redazione Infn Presidenza piazza dei Caprettari 70 I-00186 Roma T +39 06 6868162 F +39 06 68307944 comunicazione@presid.infn.it www.infn.it	progetto grafico e impaginazione Marco Stulle / S lab coordinamento redazione grafica Sara Stulle / S lab sviluppo webzine S lab con Massimo Angelini stampa Graphart srl, Trieste su carta di pura cellulosa ecologica ECF Fedrigoni Symbol™ Tatami 250 - 135 g/m ² Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 dell'8 novembre 2005. Rivista pubblicata da Infn. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn, proprietario della pubblicazione. Finita di stampare nel mese di aprile 2008. Tiratura 20.000 copie. come abbonarsi L'abbonamento è gratuito. Tre modi per abbonarsi: Compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it Inviare una mail di richiesta a comunicazione@presid.infn.it Contattare la redazione webzine Asimmetrie 6 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche on line su www.asimmetrie.it	crediti iconografici Copertina ©Marco Stulle // fig. pp. 4-5 ©Marco Stulle; fig. a p. 6 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); foto b p. 6 ©Claudio Federici/Sis-Lnf/ Infn; fig. c p. 7 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); fig. d p. 7 © Eth - Bibliothek; fig. e p. 8 ©Fermilab Visual Media Services; figg. F, g pp. 8-9 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); foto h, i p. 10 ©Vasari/Sis-Lnf; foto l p. 11 ©Sis-Lnf; foto m p. 11 ©Cern // fig. a pp. 12-13 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); figg. b, c, d pp. 14 -15 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // foto a, b, c pp. 16-17 ©Lawrence Berkeley Nat'l Lab // fig. a,b pp. 18-19 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // fig. a, b p. 21 ©PSI, Villigen e ©Asimmetrie/ Infn (realizzato da Internosei); fig. c p. 21 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); foto 1 p. 22 © Inf n; fig. d p. 23 ©Fondazione Cnao e Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // foto p. 24 ©Claudio Federici, Laboratorio Nazionale di Frascati // foto p. 25 © Inf n , foto a p. 26 © Infn , foto 1 p. 27 ©Infn/Università degli Studi di Milano; foto p. 28 ©Icro Mattini; fig. p. 30 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // fig. b p. 31 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // foto a, b p. 33 ©Iba Group // foto a, b pp. 34-35 ©Fondazione Bruno Kessler // fig. a, b pp. 36-37 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei) // fig. a p. 38 ©Asimmetrie/ Infn (realizzato da Internosei); fig. b p. 39 Lnf/ Infn; fig. 1 p. 40 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); fig. 2 p. 40 ©Elettra; fig. 1, 2 p. 41 ©Elettra // fig. a p. 42 ©Asimmetrie/Infn (realizzato da Internosei); fig. p. 44 ©Asimmetrie/ Infn (realizzato da Internosei) // foto a p. 45 ©Paolo Bajardi; fig. b p. 45 ©Agnese Iannaccone // foto p. 46 ©Vincenzo Cottinelli // foto tonaca p. 48 ©Labec/Infn; foto Auger p. 48 ©Auger Collaboration; foto Galileium p. 48 ©Nicola Facciolini // foto p. 49 ©Marco Stulle. Per le immagini di copertina e di p. 4-5 si ringrazia Giorgio Roselli, della General Giochi Roselli di Trieste.
--	--	---

as

6 / 4.08

[gli acceleratori]

A tutta velocità di Vittorio Giorgio Vaccaro, <i>approfondimenti di</i> Carlo Bernardini	4	Acceleratori in farmacia di Mauro Bonardi	30
Acceleratori, non solo ricerca di Crisostomo Sciacca	12	[as] scienza e tecnologia Nata dalla ricerca al servizio della medicina di Francesca Scianitti	32
[as] radici Semplice come un’altalena di Carlo Bernardini	16	Proiettili nel silicio di Claudio Piemonte	34
Cellule e radiazioni di Roberto Cherubini	18	Elettroni in tuta blu di Amedeo Staiano	36
Acceleratori per la salute di Ugo Amaldi, <i>approfondimenti di</i> Roberto Cirio, Marco Donetti, Flavio Marchetto, Cristiana Peroni	20	E luce fu di Emilio Burattini, <i>approfondimenti di</i> Massimo Ferrario, Edoardo Castelli	38
[as] benvenuti a bordo Dalla fisica alla medicina di Vincenzo Napolano	24	Neutroni, sonde e alchimia di Paolo Pierini	42
Guarire con i protoni di Giacomo Cuttone, <i>approfondimenti di</i> Carlo De Martinis	25	[as] incontri Notte bianca della ricerca di Catia Peduto	45
Parola all’oncologo di Catia Peduto	28	[as] con altri occhi La fisica, più magica di Harry Potter di Bruno Arpaia	46
Un acceleratore “tascabile” per l’adroterapia di Luciano Calabretta	29	[as] news	48



A tutta velocità

Storie e tecnologie degli acceleratori di particelle.

di Vittorio Giorgio Vaccaro

“Caspita! – esclamò Rutherford compiaciuto, esaminando i risultati del bombardamento – Se avessi una batteria di cannoni più potenti!”, aggiunse con una punta di rammarico, immaginando quello che avrebbe potuto ottenere con mezzi ancora tutti da inventare.

Ernest Rutherford, da poco fatto (non per meriti militari ma scientifici) Lord Rutherford di Nelson, stava riflettendo sui risultati di un esperimento che consisteva nel bombardare un sottilissimo foglio d'oro con raggi α (che oggi sappiamo essere i nuclei dell'elio, cioè due protoni legati a due neutroni) emessi da sorgenti radioattive. Possiamo dire che da questo esperimento partì la fisica nucleare e si cominciarono a ideare cannoni sempre più potenti che saranno poi chiamati acceleratori. Grazie ad essi si producono particelle accelerate da usare come proiettili da sparare contro altre particelle per romperle e studiare che cosa viene prodotto durante questa interazione tra bersaglio e proiettile.

Correva l'anno 1910. Era ormai comune convincimento dei fisici che la materia fosse costituita da atomi e che questi fossero formati da cariche positive e da cariche negative, ma non si sapeva nulla circa la disposizione di queste cariche all'interno dell'atomo. Dopo numerosissimi colpi sparati sugli strati di atomi del foglietto d'oro, accuratamente rilevati uno per uno su di uno schermo, Rutherford aveva di che compiacersi perché era riuscito a osservare un numero significativo di deviazioni, tante da giustificare l'ipotesi che l'atomo avesse una struttura planetaria: al suo centro c'era un nucleo positivo circondato da elettroni orbitanti intorno ad esso.

La spinta propulsiva impressa da Rutherford diede i suoi frutti che maturarono dopo la pausa della Prima Guerra Mondiale. Innanzitutto la strada era già tracciata: come sonde per studiare la materia le particelle cariche si erano dimostrate all'altezza della situazione. Per di più le forze elettriche necessarie all'accelerazione sono facili da generare. Si puntò quindi sugli elettroni e sugli ioni (cioè atomi ai quali sono stati aggiunti o sottratti alcuni elettroni, rimanendo quindi con carica negativa o positiva) che si producono abbastanza facilmente per mezzo di scariche elettriche, per riscaldamento o facendoli passare attraverso un gas opportuno. Si pensò, inoltre, di farli viaggiare nel vuoto per ridurre le perdite dovute agli urti con le molecole di gas.

Allora, per creare forze elettriche sempre più intense, si fece ricorso a sistemi in grado di generare differenze di potenziale sempre più grandi, che furono detti “a caduta di potenziale”. Un oggetto di massa m , in caduta libera, acquista un'energia cinetica proporzionale alla massa m , all'altezza da cui è caduto h e alla accelerazione di gravità g . Quindi, riformulando quanto appena detto, abbiamo che l'energia cinetica acquisita è pari a $m(hg)$; parimenti una particella di carica e , che si muova tra due punti tra i quali vi è una differenza di potenziale V , acquista un'energia descritta da una formula simile (eV), in cui la carica prende il posto della massa, e il potenziale V prende il posto di hg .

Da allora è invalso l'uso di misurare l'energia in eV, cioè elettronvolt, e multipli o sottomultipli di mille in mille. Agli inizi degli anni '30 due ricercatori, John Douglas Cockcroft e Ernest Walton, appartenenti non a caso alla scuola di Rutherford, ottennero alta tensione continua a partire da un generatore alternato di bassa tensione, utilizzando un particolare circuito composto da diodi

a vuoto e condensatori. Ebbero così la differenza di potenziale necessaria per accelerare gli ioni proiettile. Questi congegni, al tempo rivoluzionari, erogavano fasci di nuclei non molto intensi e di energia limitata a qualche MeV. Tuttavia, il loro uso permise di far vincere il Premio Nobel ai due ricercatori per aver provocato nel 1932 la prima trasmutazione nucleare, bombardando atomi di litio con protoni tra 100 e 500 keV, trasformandoli in berillio. L'acceleratore di Cockcroft e Walton fece il suo tempo abbastanza rapidamente come strumento di ricerca, ma per moltissimi anni fu usato come pre-acceleratore per macchine più potenti. Oggi è presente in ambito industriale ed è il “cannone” dei microscopi elettronici. Più longevo nel mondo della ricerca è stato l'acceleratore ideato da Van de Graaff. È sempre un acceleratore a “caduta di potenziale” come il precedente, nel senso che genera una tensione continua tra una grossa sfera conduttrice e la terra. L'ingegnosità sta nel fatto che l'aumento di potenziale è effettuato trasportando “materialmente” le cariche elettriche. Oggi i Van de Graaff sono macchine commerciali con potenziali che variano da un milione a 25 milioni di Volt e sono spesso usati nell'analisi e nella modifica dei materiali e nella ricerca ambientale.

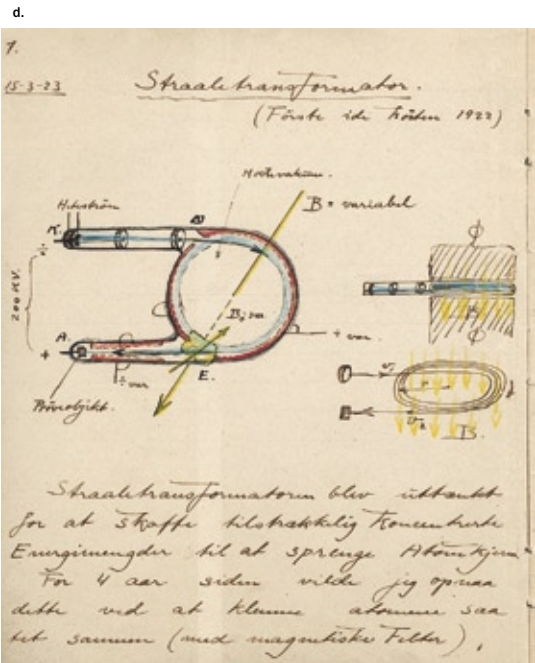
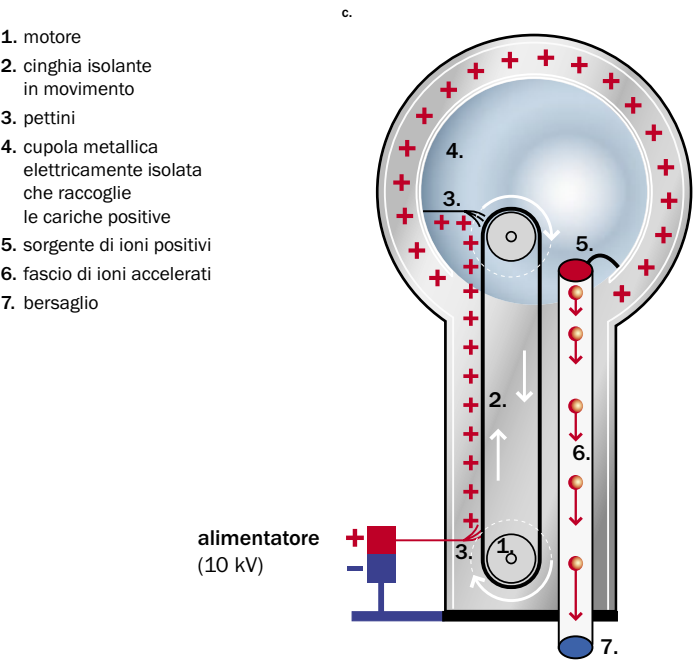
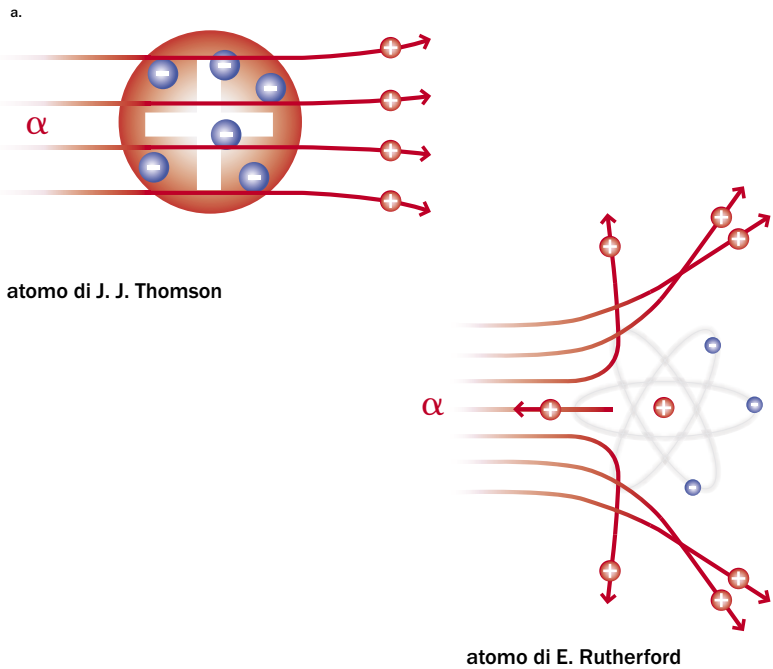
Nel frattempo, al di fuori degli ambienti scientifici, appare la figura del norvegese Rolf Wideroe che durante i suoi studi all'Università di Aquisgrana, all'età di soli 20 anni, aveva già sognato di realizzare un “trasformatore di radiazioni” che in seguito fu chiamato *betatrone*, ed ebbe grande importanza nella produzione di raggi X negli ospedali. La genialità di quest'idea sta nel fatto che il campo magnetico, oltre a piegare le particelle cariche tenendole su un'orbita circolare, ne aumenta anche l'energia, se varia nel tempo in maniera opportuna. Egli presentò questo progetto sotto forma di tesi di dottorato in ingegneria all'Università di Aachen. Il trasformatore fu costruito ma l'esperimento fallì per motivi tecnici. Anni dopo, nel 1940, il betatrone aveva trovato modo di essere reinventato da Donald Kerst negli Stati Uniti con larghe applicazioni. Nell'ambiente degli scienziati vige il *fair play* e quasi sempre, anche se non proprio sempre, chi reinventa riconosce il lavoro di chi li ha preceduti. Così è avvenuto nei confronti di Wideroe. Wideroe allora cominciò a costruire un acceleratore “diritto” o, come è attualmente chiamato, un acceleratore lineare, con cui riuscì ad accelerare nuclei atomici fino a energia cinetica di 50 keV. Questo è formato da tubi

a. All'epoca di Rutherford, due erano le ipotesi avanzate sulla struttura del nucleo: per Thomson, infatti, la carica positiva occupava una sfera al cui interno le cariche negative erano disposte in ordine sparso come l'uva sultanina nel panettone; per Rutherford, invece, l'atomo era un sistema planetario con un nucleo centrale di carica positiva e una nuvola di elettroni, ruotanti attorno ad esso. Nel primo caso i “proiettili”, attraversando una regione complessivamente neutra, sarebbero passati quasi indisturbati; nel secondo, invece, si sarebbero osservate alcune deviazioni, anche notevoli, perché la carica positiva era concentrata nel nucleo. Rutherford riuscì a osservare un numero significativo di deviazioni, tante da giustificare la correttezza della sua ipotesi: al centro dell'atomo c'era un nucleo che sembrava impenetrabile. Questa è una rappresentazione schematica e non in scala dell'atomo perché se mantenessimo le proporzioni gli elettroni non sarebbero rappresentabili in figura: la loro distanza dal nucleo sarebbe 10 mila volte il raggio del nucleo stesso.

detti “a scorrimento” o *drift tube*, di lunghezza variabile cui viene applicata una tensione variabile con frequenza opportuna. Rolf Wideroe fu una mente vulcanica: negli ambienti scientifici gli si riconosce di aver ideato il betatrone, il sincrotrone, l'acceleratore lineare, gli anelli di accumulazione per fasci collidenti. Quest'ultima intuizione precorse di circa 40 anni la sua realizzazione che, come vedremo, avvenne negli anni '60 in Italia ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. Esiste una legge fondamentale sia nell'ottica che nel mondo delle particelle: bisogna usare sonde caratterizzate da lunghezze d'onda confrontabili con le dimensioni degli oggetti da studiare. Le particelle, come scoperto nel 1923 da Luis de Broglie, si possono manifestare in forma ondulatoria, con lunghezza d'onda inversamente proporzionale all'energia. L'esigenza di indagare aspetti sempre più profondi del comportamento della materia impose, quindi, di ricercare acceleratori di energia sempre maggiore: questo ha portato a una corsa verso macchine acceleratrici sempre più potenti e di conseguenza più grandi. A Berkeley, Ernest Lawrence si era posto il problema di soddisfare le esigenze dei fisici con strumentazione semplice e relativamente

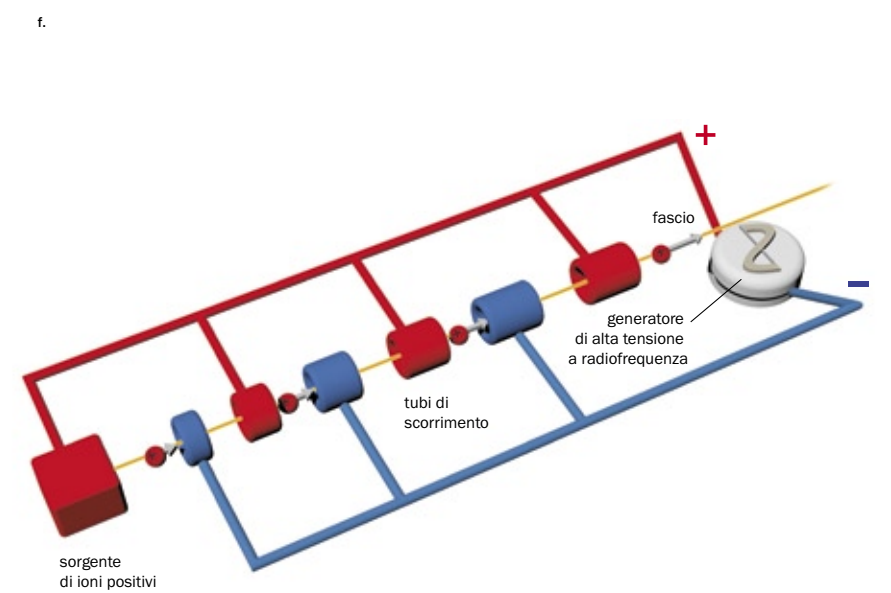
poco costosa. Wideroe, nella sua autobiografia, riferisce: “Lawrence, una volta, mi raccontò che, durante una conferenza a Berkeley, intorno al 1928, annoiato dalle presentazioni, andò in biblioteca e trovò la mia tesi nel periodico ‘Archiv für Elektrotechnik’. Guardò solo i disegni e le formule perché conosceva poco o nulla di tedesco. Dalle illustrazioni capì subito il principio dei miei drift tube. Per sua grande fortuna, l'ignoranza del tedesco non gli permise di comprendere nulla circa le mie riserve, riportate nel saggio, sulla stabilità delle orbite negli acceleratori circolari. Tornato al *Radiation Laboratory*, insieme al suo allievo David Sloan, costruì il suo primo acceleratore lineare per ioni di mercurio, con il quale raggiunse 1,26 MeV. Fu un'incredibile impresa!”. Si stava arrivando alle stesse energie dei proiettili prodotti da nuclei instabili usati da Rutherford ma con intensità enormemente più elevate, e fasci estremamente collimati. Gli obiettivi di Lawrence erano molto ambiziosi: voleva raggiungere molte decine di MeV con fasci intensi. Fare ricorso allo schema dell'acceleratore lineare avrebbe significato aggiungere altri drift tube e quindi altri costosi alimentatori. Solo in seguito, con lo sviluppo di potenti generatori di microonde, come quelli

b. L'acceleratore Cockcroft Walton che fu in uso dalla fine degli anni '30 all'Istituto Superiore di Sanità e che oggi è in esposizione ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. c. Schema di funzionamento di un acceleratore Van de Graaff. d. Lo schema originale, realizzato da Wideroe, del dispositivo da lui stesso ideato. Accuratamente disegnato a colori, quasi con senso artistico, lo schema illustra il principio di funzionamento del sistema: quest'idea, con poche varianti, è stata più tardi realizzata e ha avuto applicazioni nei più svariati campi.





usati nei radar della Seconda Guerra Mondiale, l'idea degli acceleratori lineari, sia per elettroni che per protoni, fu ripresa ed enormemente sviluppata, in particolare da Louis Alvarez a Berkeley. Questa soluzione è ancora attualissima e ha visto realizzazioni imponenti: l'acceleratore lineare di Stanford, lungo 3 chilometri, nel 1966 accelerò elettroni a 20 GeV ed elettroni e positroni a 50 GeV, nel 1989. Ma ritorniamo agli inizi degli anni '30. Lawrence, per superare i limiti degli acceleratori lineari, pensò di far ritornare indietro il fascio di particelle in modo da sottoporlo sempre all'accelerazione dello stesso alimentatore. C'era pertanto bisogno di un elettromagnete

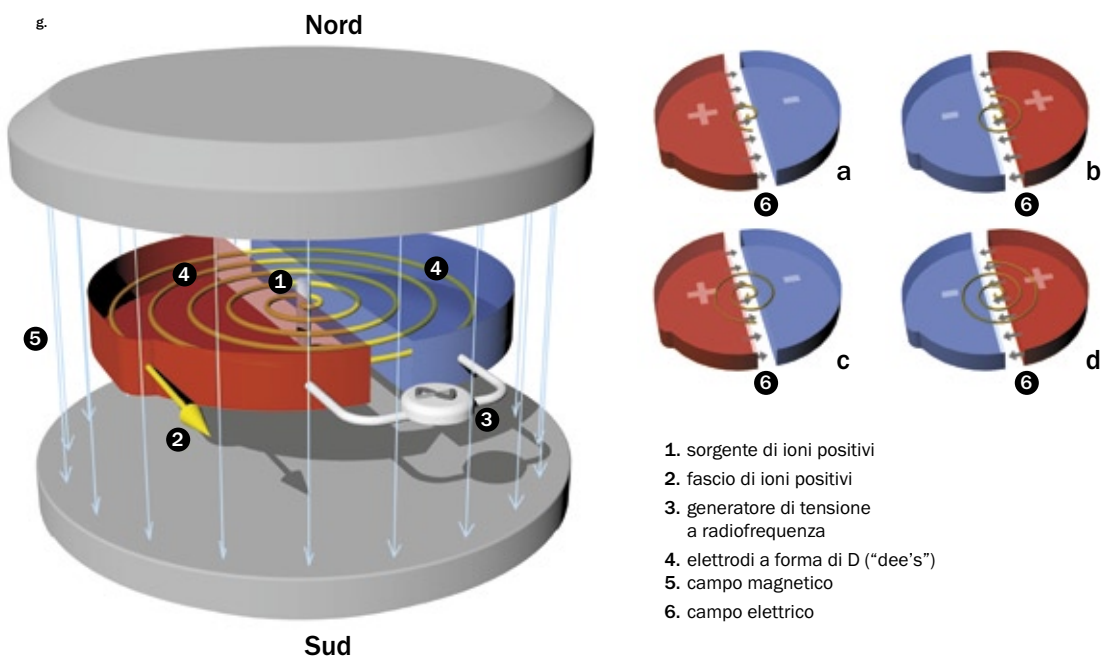


che curvasse la traiettoria del fascio. Come elettrodi acceleranti, ideò una struttura formata dalle due metà della superficie di un cilindro conduttore molto schiacciato (come una scatola di caramelline): una metà era collegata alla massa e l'altra a un generatore a radiofrequenza. Le particelle cariche, accelerando dopo ogni passaggio tra gli elettrodi, viaggiano lungo semicirconferenze sempre più grandi, che però percorrono sempre nello stesso tempo, perché la loro velocità aumenta. Il *ciclotrone*, costruito da Lawrence in collaborazione con il suo allievo Milton Stanley Livingston, accelerò i protoni all'energia prevista, anche se modesta, di 80 keV. Era il 1932 e

[as]

La frequenza di ciclotrone

Il fisico americano Ernest Orlando Lawrence, quand'era a Berkeley nel 1929, notò che la frequenza di rotazione di una carica elettrica non relativistica su un'orbita circolare in un campo magnetico uniforme è indipendente dall'energia della particella e dal raggio. Le formule (deducibili dalla "forza di Lorentz") per il raggio R e la frequenza di rotazione f di una particella di carica q, massa m e velocità u in un campo magnetico di induzione B sono: $\mu = qBR$, $2\pi f = qB/m$. Naturalmente, il piano dell'orbita circolare è ortogonale al vettore del campo magnetico e $2\pi fR = u$. La frequenza f si chiamerà, da allora in avanti *frequenza di ciclotrone*, dal nome dell'acceleratore che Lawrence inventò e costruì. [Carlo Bernardini]



Schema di funzionamento del ciclotrone. Partendo dalla sorgente posta al centro, un protone, che ha carica positiva, è attratto dal semidisco carico negativamente e viene invece respinto da quello carico positivamente. Entra così all'interno dell'elettrodo dove non vi è campo elettrico ma solo magnetico, e compie quindi una semicirconferenza. Il campo elettrico tra gli elettrodi nel frattempo evolve (essi sono alimentati da un generatore di tensione alternata che, in un semiperiodo, inverte la sua polarità): proprio nel momento in cui il protone ritorna nell'intercapedine, incontra un campo accelerante, subisce un'ulteriore accelerazione, e compie una seconda semicirconferenza con raggio maggiore; il processo si ripete finché il protone, dopo aver compiuto tutto il percorso a spirale, arriva in periferia e viene estratto con la massima energia.

il principio di funzionamento era stato quindi dimostrato. Livingston commentò l'invenzione del ciclotrone sostenendo, forse con un po' di civetteria, che molto probabilmente non avrebbero mai preso in considerazione questo progetto se avessero saputo delle riserve espresse da Wideroe in quel lavoro. E altrove ebbe a dire: "Quando io costruii il ciclotrone, Lawrence ebbe il Nobel e io il titolo di dottore di ricerca...". Si cominciarono a costruire ciclotroni sempre più grandi e dalle prestazioni sempre più spinte, ma il loro limite principale era dovuto alla perdita del sincronismo quando la velocità delle particelle si approssima a quella della luce. La velocità della luce nel vuoto, infatti, non può essere superata: l'aumento di energia delle particelle durante l'accelerazione si manifesta con un aumento sensibile di *massa relativistica* e impercettibile di velocità. Di conseguenza diminuisce la "frequenza di ciclotrone" (vd. "La frequenza di ciclotrone" p. 8, ndr). Ma non ci si arrese e si risolse il problema diminuendo progressivamente la frequenza del generatore (*sincrociclotrone*) o, ancor meglio, sagomando il campo magnetico in funzione del raggio, per compensare l'incremento di massa relativistica (*ciclotrone isocrono*). Il ciclotrone continua tuttora a essere utilizzato per la sua grande

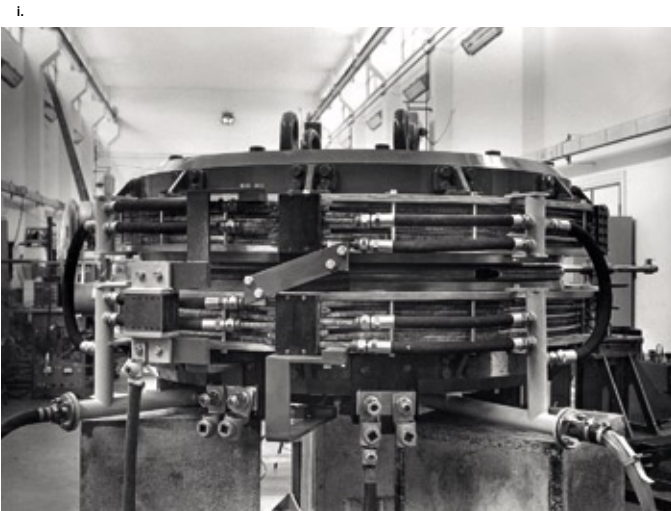
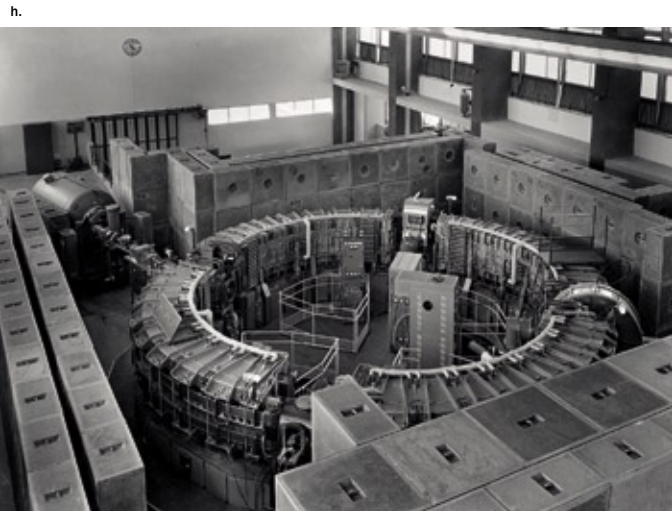
versatilità, semplicità e robustezza: non è una Ferrari ma uno strapotente bulldozer! Ha una larghissima applicazione in campi come la terapia oncologica e la produzione di atomi radioattivi usati nella diagnostica per immagini. Poiché, come detto prima, l'indagine nell'infinitamente piccolo richiede proiettili sempre più energetici, questa può essere condotta soltanto con particelle cariche che viaggiano a velocità sempre più prossime a quella della luce. Per soddisfare questa esigenza è nata una nuova generazione di acceleratori, i *sincrotroni*, che si basa sull'idea di separare spazialmente l'apparato che guida (magneti di vario tipo) da quello che accelera (cavità risonanti capaci di generare alti campi a frequenza variabile). Quest'ultimo apparato deve essere capace di inseguire in modo sincro le particelle. I fasci di particelle cariche viaggiano su traiettorie chiuse quasi circolari, curvati e collimati dalla forza dei campi magnetici e accelerati dalle forze dei campi elettrici. Siamo alla fine degli anni '40 e in Inghilterra viene dimostrato il principio di funzionamento del sincrotrone, da allora la macchina di maggior diffusione nella fisica delle alte energie e con applicazioni in molti altri campi. Macchine di sempre maggior energia furono costruite, sia per protoni che

per elettroni. L'Italia fece bene la sua parte: nel 1957 iniziava a funzionare il sincrotrone dei Laboratori di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, mantenendo in quegli anni il record mondiale in energia con elettroni, un miliardo di elettronvolt (1 GeV). Ad oggi, il sincrotrone di massima energia è il Tevatron, del Laboratorio Fermi in prossimità di Chicago: come dice il suo nome, raggiunge l'energia di 1 TeV, cioè ben mille miliardi di elettronvolt! Ma la corsa non era finita. Infatti, l'urto di particelle proiettile contro bersagli è assai inefficiente dal punto di vista dell'energia effettivamente disponibile per creare nuove particelle: sono assai più violenti gli urti frontali tra particelle di alta energia. Si pensò così di far collidere tra loro fasci di particelle. Iniziò una gara tra Princeton e i Laboratori di Frascati dell'Infn. Princeton scelse una struttura a forma di otto: due anelli circolari percorsi da elettroni ruotanti nello stesso senso, che si incontravano nel punto di collisione. Frascati fu ancora più audace: utilizzò una sola ciambella con all'interno i fasci "controruotanti" di materia (elettroni) e di antimateria (positroni, cioè antielettroni). Nonostante si fosse partiti per ultimi, si arrivò primi: era il 1961, iniziava l'era dei collisori (*collider*). Questo successo ebbe grande risalto a

livello internazionale. L'avventura era iniziata il 7 marzo 1960, giorno in cui Bruno Touschek tenne un seminario ai Laboratori di Frascati dell'Infn durante il quale propose di costruire un anello di accumulazione elettrone-positrone. Egli aveva lavorato con Wideroe nel 1943 ad Amburgo e in seguito aveva sempre manifestato una profonda ammirazione per questo inventore. Con il suo lavoro ora stava per dare concretezza a quelle idee riguardanti gli anelli di accumulazione. Una settimana dopo il seminario di Touschek, uno studio preliminare dimostrò che la proposta era realizzabile. Fu deciso di progettare e costruire Ada (Anello di Accumulazione) il cui costo ammontò a soli otto milioni di lire! Il progetto consisteva nell'accumulare in un campo magnetico fasci di elettroni e positroni, ciascuno di 250 MeV, che circolavano percorrendo in senso contrario quasi la stessa orbita, incontrandosi in quattro punti. L'esperimento, compiuto in appena un anno, nel quale Touschek svolse un ruolo essenziale, ebbe un grandissimo successo: dimostrò che era possibile sia l'accumulazione dei fasci negli anelli, sia la collisione frontale tra particelle. Non c'è dubbio che Ada sia stata la progenitrice di una lunga discendenza di collider elettroni-positroni costruiti nei vari laboratori di fisica di tutto il mondo. Il discendente più famoso

di Ada è stato il Lep (*Large Electron-Positron Collider*) del Cern di Ginevra che, inaugurato nel 1989, ha lavorato per 12 anni, con importanti risultati scientifici. Il Lep era un anello gigante con una circonferenza di ben 27 km (ben 7.000 volte quella di Ada) in un tunnel a 100 m di profondità, che abbastanza curiosamente attraversa i confini della Svizzera e della Francia. L'idea di far circolare nello stesso anello, ma in versi opposti, sia materia che antimateria, non riguardò solo elettroni e positroni: il Cern convertì nel 1981 il suo protosincrotrone (cioè l'acceleratore per protoni) da 400 GeV in un collisore protone-antiprotone, e gli esperimenti diedero risultati fondamentali, premiati col Nobel a Carlo Rubbia e a Simon Van der Meer. Il prossimo autunno entrerà in funzione al Cern, nello stesso tunnel del Lep, Lhc (*Large Hadron Collider*) che sarà la macchina più potente mai costruita, più potente anche del Tevatron di Chicago: al suo interno, due fasci di protoni da 7 TeV ciascuno si scontreranno tra loro. La comunità scientifica ha grandi aspettative sui risultati che verranno. Sono passati meno di 80 anni dai primi passi nel mondo degli acceleratori: la strada è stata difficile ma coronata da molti successi. Mi pare che l'“invito” di Rutherford sia stato ampiamente accolto!

- h. L'elettrosincrotrone dei Laboratori di Frascati dell'Infn nel 1959.
- i. L'anello di accumulazione Ada ai Laboratori di Frascati dell'Infn nel 1961.
- l. “Durante la costruzione di Ada, Bruno Touschek partecipò attivamente a tutte le fasi del progetto e certamente il suo entusiasmo e la sua conoscenza delle macchine acceleratrici acquisita durante e dopo la guerra furono determinanti per il suo successo”. [Da “Bruno Touschek e la nascita della fisica e” e: una storia europea”, Giulia Pancheri, *Analysis*, 2005].
- m. Nel tunnel del Lep.



Biografia

Vittorio Giorgio Vaccaro, professore universitario, collabora con molti laboratori di acceleratori in Europa e negli Usa. Ha dato contributi fondamentali nel campo della dinamica dei fasci di particelle e della loro stabilità.

Link sul web

- en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator
- sci-toys.com/scitoys/scitoys/electro/electro6.html
- nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/kullander/
- www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html
- www.lepp.cornell.edu/~dugan/USPAS/

Acceleratori, non solo ricerca

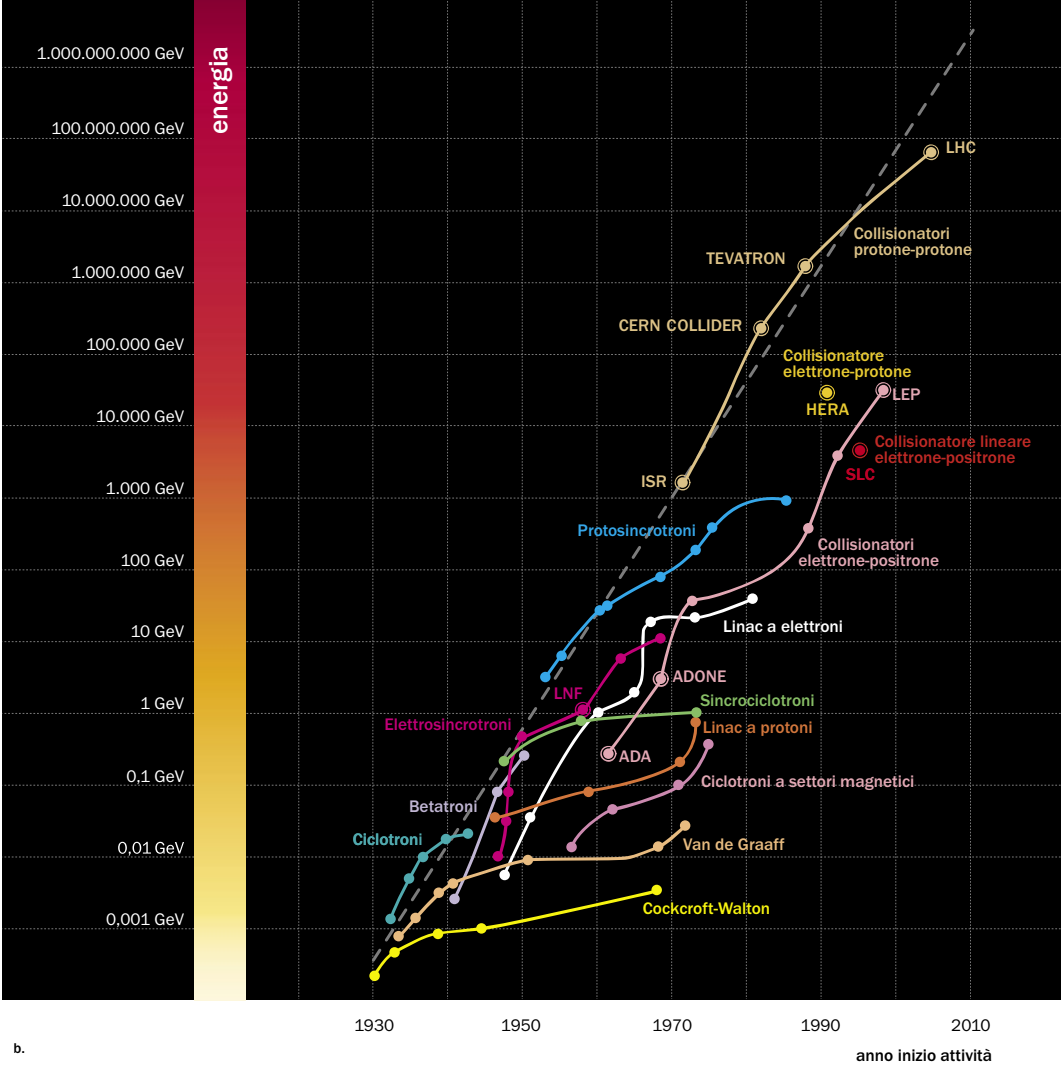
Sviluppi, scoperte e applicazioni.

di Crisostomo Sciacca

a.
Le scoperte e le macchine.
A ogni scoperta, l'energia
e le macchine giuste.
E anche il cielo aiuta, con raggi
cosmici di tutte le energie, anche
quelle alle quali gli acceleratori
più potenti non possono arrivare.

[scoperte]

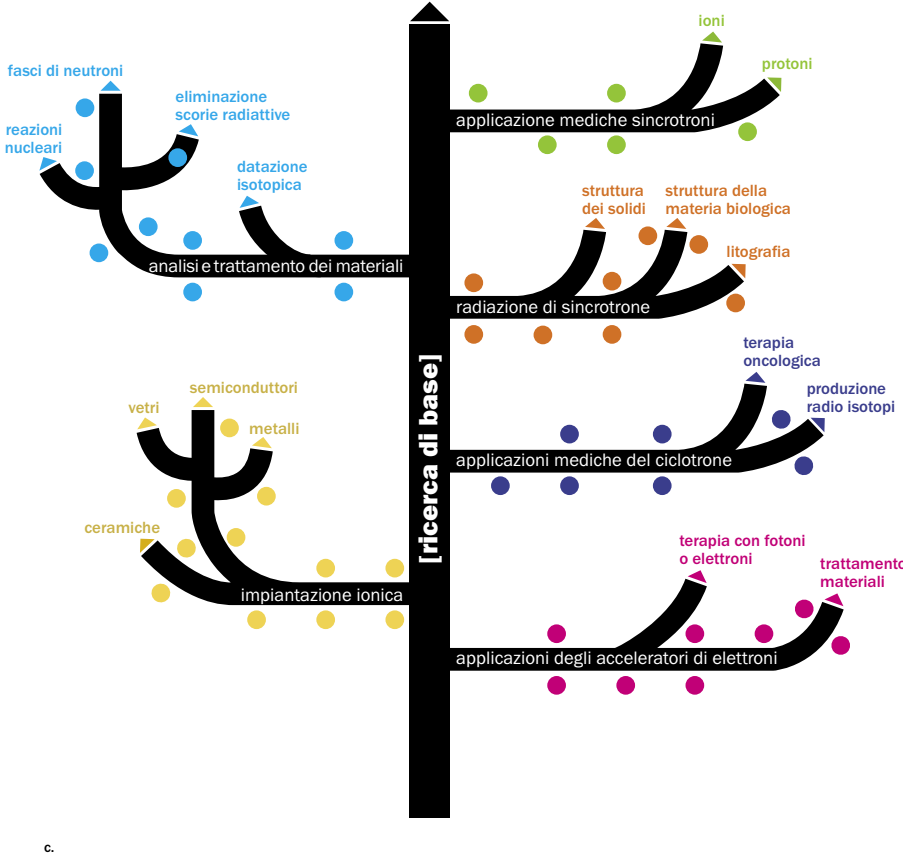
[acceleratori]



Acceleratori lineari e circolari, piccoli o grandissimi, per materia o per antimateria... ma per fare che cosa? Innanzitutto ricerca di base sulla struttura del mondo che ci circonda, a scala via via più elementare e quindi a energie sempre più elevate. Basta guardare la storia raccontata dalla figura b per rendersi conto dei progressi fatti in meno di ottant'anni: l'energia disponibile si è moltiplicata per mille miliardi! Idee geniali, tecnologie innovative e duro lavoro hanno prodotto una moltitudine di soluzioni diverse. A un osservatore attento non sfuggerà che, sempre in questa figura, tra le macchine acceleratrici d'avanguardia, appaiono anche macchine italiane costruite nei Laboratori di Frascati dell'Infn, come Ada, Adone e il sincrotrone. E non sono le uniche: anche altre macchine sono state costruite nel nostro Paese, ad esempio Dafne sempre ai Laboratori di Frascati dell'Infn, che però non è presente nel grafico perché “corre” in un altro campionato, quello dell'abbondanza di eventi prodotti e non quello dell'energia massima. I fisici, inoltre, hanno imparato ad accelerare anche ioni leggeri

o pesanti, e in tal caso l'energia che ciascuno di essi può raggiungere nella collisione è multipla di quella di un protone singolo: anche in questo campo l'Italia è competitiva. Quali sono i tipi di acceleratori costruiti e quali energie hanno reso possibili ricerche e scoperte sulla costituzione della materia? Nella figura a è presentato il rapporto tra acceleratori, energia e scoperte: i progressi nella comprensione della natura a livello fondamentale sono stati imponenti ma mancano ancora molte risposte, per non parlare delle domande ancora da inventare! Alcuni campi di ricerca richiedono esperimenti che coprono intervalli di energia molto ampi, e sono distribuiti indicativamente lungo l'asse orizzontale della figura. Per la scoperta di nuove particelle (alcune delle quali sono indicate, come J/psi, Y, i mediatori della forza debole W e Z⁰ e l'Higgs, la particella che si pensa responsabile della massa) è necessaria un'energia almeno corrispondente alla loro massa. Ma può essere necessaria anche un'energia molto maggiore, richiesta quando esse emergono dall'urto in velocità oppure sono accompagnate da altre particelle, anch'esse

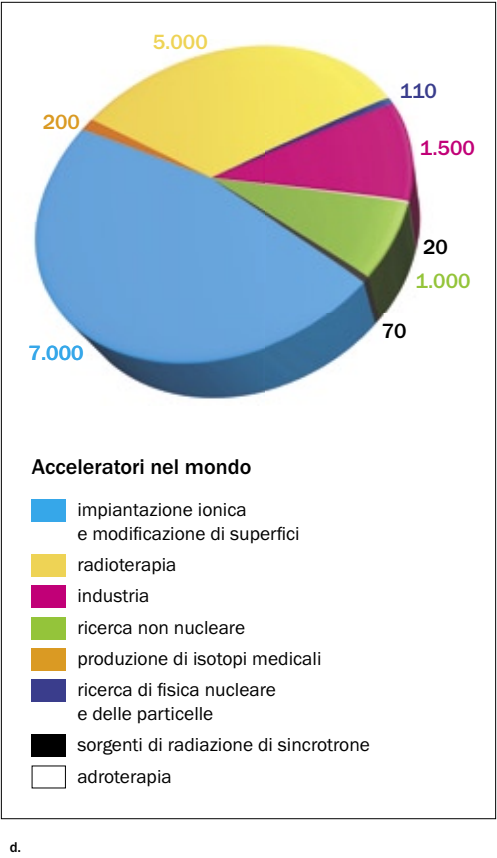
b.
La corsa alle energie sempre più alte.
Il grafico di Livingston, dal nome di chi lo inventò cinquant'anni fa, prevedendo l'andamento esponenziale indicato dalla curva tratteggiata. Linee di diverso colore connettono tra loro alcuni singoli acceleratori della stessa famiglia, identificati dall'anno di inizio attività e dall'energia del loro fascio. Nel caso dei collisori, però, il valore dell'energia che si legge sull'asse verticale non è quello dei loro fasci, bensì l'energia che dovrebbe avere una macchina tradizionale (fascio contro protoni fermi) per disporre della stessa energia del corrispondente collisore: con questa scelta, i due tipi di macchine hanno la stessa energia nel centro di massa, l'energia cioè che misurerebbe, in ambedue i casi, un osservatore “seduto” sul baricentro del sistema proiettile-bersaglio.



veloci. Ad esempio, per produrre una Z⁰ (di massa pari a circa 91 GeV/c²), in un collisore in cui si scontrano elettroni e antielettroni è necessario che ciascun fascio possieda, almeno, un'energia pari alla metà della massa M moltiplicata per il quadrato della velocità della luce c, mentre su protone fermo (la situazione sperimentale a cui abbiamo scelto di riferire tutte le energie) serve come minimo un proiettile con energia di circa 4 TeV. Nella figura, la posizione delle varie particelle lungo l'asse dell'energia vuole ricordare indicativamente quali energie minime sono richieste: nei casi più “energici” i collisori sono l'unica risposta. Ma qui non vogliamo parlare di ricerca di base ma delle innumerevoli applicazioni che gli acceleratori hanno reso possibili: esse raggiungono i settori più lontani, dalla medicina all'elettronica, dallo studio della struttura delle proteine allo sviluppo di materiali innovativi. L'albero rappresentato nella figura c indica schematicamente i rami che sono germogliati dal tronco della ricerca di base in fisica nucleare e subnucleare, e quale impatto hanno avuto i loro frutti su altri settori di ricerca e sulla nostra vita

quotidiana. Solo alcune applicazioni saranno qui presentate, mentre altre di grande interesse (come lo studio dei beni culturali e le analisi ambientali) saranno trattate in futuro. Ma dove si trovano gli acceleratori di particelle? Probabile risposta: nei laboratori di fisica nucleare e subnucleare, naturalmente. Niente di più lontano dal vero. Sono *anche* lì, ma soprattutto sono “al lavoro” negli ospedali, nelle industrie, tra chi si occupa di beni culturali, in altri settori di ricerca come sorgenti di luce di sincrotrone o di neutroni. La figura d risponde, infine, alla domanda iniziale: gli acceleratori nel mondo sono oltre 15.000, ma nei laboratori di ricerca ce ne sono appena un centinaio!

Biografia
Crisostomo Sciacca insegna all'Università di Napoli e ha svolto attività di ricerca nel campo della fisica sperimentale delle particelle elementari ai Laboratori di Frascati, di Stanford e al Cern.



c.
L'albero degli acceleratori, un albero con tanti frutti.

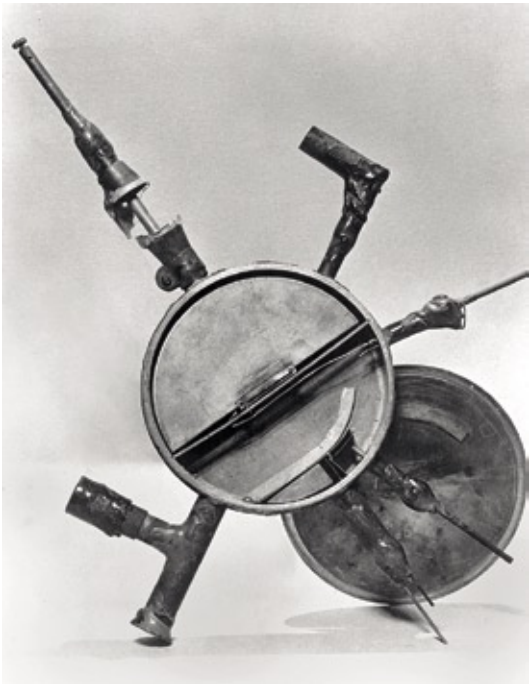
d.
I principali settori applicativi.
I circa 15.000 acceleratori nel mondo, suddivisi in base al settore di applicazione.

[as] radici

Semplice come un’altalena.

di Carlo Bernardini

Fisico e professore emerito
presso l’Università
La Sapienza di Roma



a.

Come si fa per rompere qualcosa? Bisogna colpirla con l’energia necessaria. Naturale allora che i fisici, per rompere i nuclei atomici e capire come sono fatti dentro, abbiano pensato a un “cannone elettrico”, una specie di macchina per fare fulmini (scariche elettriche) con cui impartire grande energia a “proiettili” elettrizzati da sparare su un bersaglio atomico. Nasce così il *tubo acceleratore*, un lungo tubo sotto vuoto ai cui estremi c’è una sorgente di ioni (atomi ionizzati, generalmente di idrogeno, quindi protoni) e dall’altra parte il bersaglio. Tra questi due estremi un *generatore di tensione* fa una differenza di potenziale dell’ordine del milione di Volt. Una tra le prime di queste macchine elettriche per fisici la costruiscono, in Gran Bretagna, Sir John Douglas Cockcroft (1897-1967) e Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1994), usando un generatore (*moltiplicatore di tensione in cascata*, una sorta di trasformatore) ideato da un ingegnere tedesco, tale Heinrich Greinacher (attivo tra gli anni 1915 e 1945). Sono impianti lunghi molti metri, verticali. I problemi delle scariche elettriche e dell’isolamento sono notevoli. Anche in Italia c’è un forte interesse per

questi primi acceleratori e se ne occupano in particolare Edoardo Amaldi e Franco Rasetti, entrambi nel gruppo di Enrico Fermi ospitato da Orso Mario Corbino presso l’Istituto di via Panisperna (*I ragazzi di via Panisperna*). Poi di acceleratori elettrostatici ne avremo uno, presso l’Istituto Superiore di Sanità, alla fine degli anni ’30 del ’900, quando ormai Fermi sta andando via per colpa delle leggi razziali che potrebbero colpire la moglie Laura. Ma Fermi, e con lui Amaldi ed Emilio Segrè, avrebbero voluto un acceleratore più “energico”: non 1 milione di Volt ma decine di milioni di Volt. Segrè era stato in California, a Berkeley, nel 1936, e aveva visto una cosa nuova e, per quell’epoca, straordinaria. Il grande passo lo aveva fatto un giovane americano, Ernest Orlando Lawrence che, nel 1929, ispirato dalle idee originali di un brillante ingegnere-inventore norvegese, Rolf Wideroe, aveva avuto l’idea di usare un trucco molto semplice per impartire l’energia gradualmente ai proiettili in moto, a piccole “sberle” come nel caso di un’altalena: costruisce così un nuovo acceleratore, un modellino con un magnete di appena 4 pollici di diametro (1 pollice = 2,54 cm), che funzionerà nel 1931.



b.



c.

Il trucco si chiama “accelerazione risonante” e consiste nel far passare a intervalli di tempo fissi le particelle cariche che ruotano in un magnete e passano perciò più volte in una differenza di potenziale alternata, piccola ma sincronizzata, in modo da accelerare a ogni passaggio. Il modellino crebbe rapidamente fino a raggiungere i 6 MeV (milioni di Volt applicati alla carica unitaria pari a quella dell’elettrone). Lawrence regala a Segrè una barretta di molibdeno irradiato nel ciclotrone, Segrè se lo porta a Palermo, dove ha ancora (per poco: le leggi razziali lo rispediranno in California) la cattedra. A Palermo, lui e il geochimico Perrier scoprono con pazienti prove che parte della radioattività prodotta dal campione irradiato nel ciclotrone con nuclei accelerati di deuterio (l’isotopo dell’idrogeno di numero di massa $A = 2$) viene dall’elemento con numero atomico $Z = 43$, che corrisponde a una casella vuota della tabella di Mendeleev. È un trionfo! La scoperta è sicura, a differenza di quella dei coniugi Noddack che avevano creduto di trovarlo e lo avevano persino chiamato masurio. L’elemento nuovo si chiamerà tecnezio (Tc) e, molto tempo dopo, avrà una importante applicazione nella

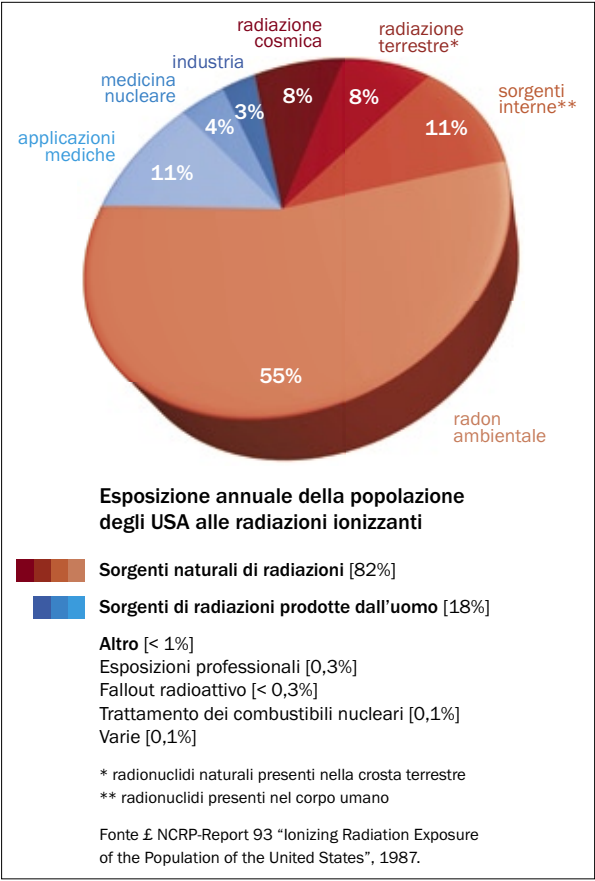
medicina, con il nome di *scintigrafia*. Poco prima della Seconda Guerra Mondiale, Fermi e Amaldi sognano un ciclotrone perché la fisica nucleare si sviluppi anche in Italia, al passo con quello che accade altrove, specie negli Stati Uniti. Anche i francesi, Frederic Joliot e Irene Curie (figlia di Marie) vorrebbero macchine così. Ma per questi paesi costano troppo: in Italia, a quell’epoca, un investimento in ricerca si aggirava, quando tutto andava bene, sulle 500.000 lire dell’epoca (il costo di una buona automobile era dell’ordine di poche migliaia di lire). Amaldi, l’unico rimasto, getta la spugna. Il primo ciclotrone che finalmente vedrà è quello del Cern di Ginevra, da 600 MeV, con cui nei primi anni ’50 del ’900 incomincerà la nuova stagione della fisica in tutta Europa. Ma dai tempi di Lawrence, un altro passo è stato fatto: il ciclotrone di Ginevra sarà in realtà un sincrociclotrone, una enorme macchina in cui la difficoltà della variazione della *massa relativistica* dei protoni accelerati sarà compensata da una modulazione della frequenza del potenziale acceleratore. I sovietici, per non essere da meno, avranno un sincrociclotrone quasi identico a Dubna, il laboratorio vicino a Mosca.

- a. Primo ciclotrone costruito da E. O. Lawrence nel 1931.
- b. Ernest Orlando Lawrence nel 1939 a Berkeley.
- c. Emilio Segrè nel 1959 a Berkeley.

Cellule e radiazioni

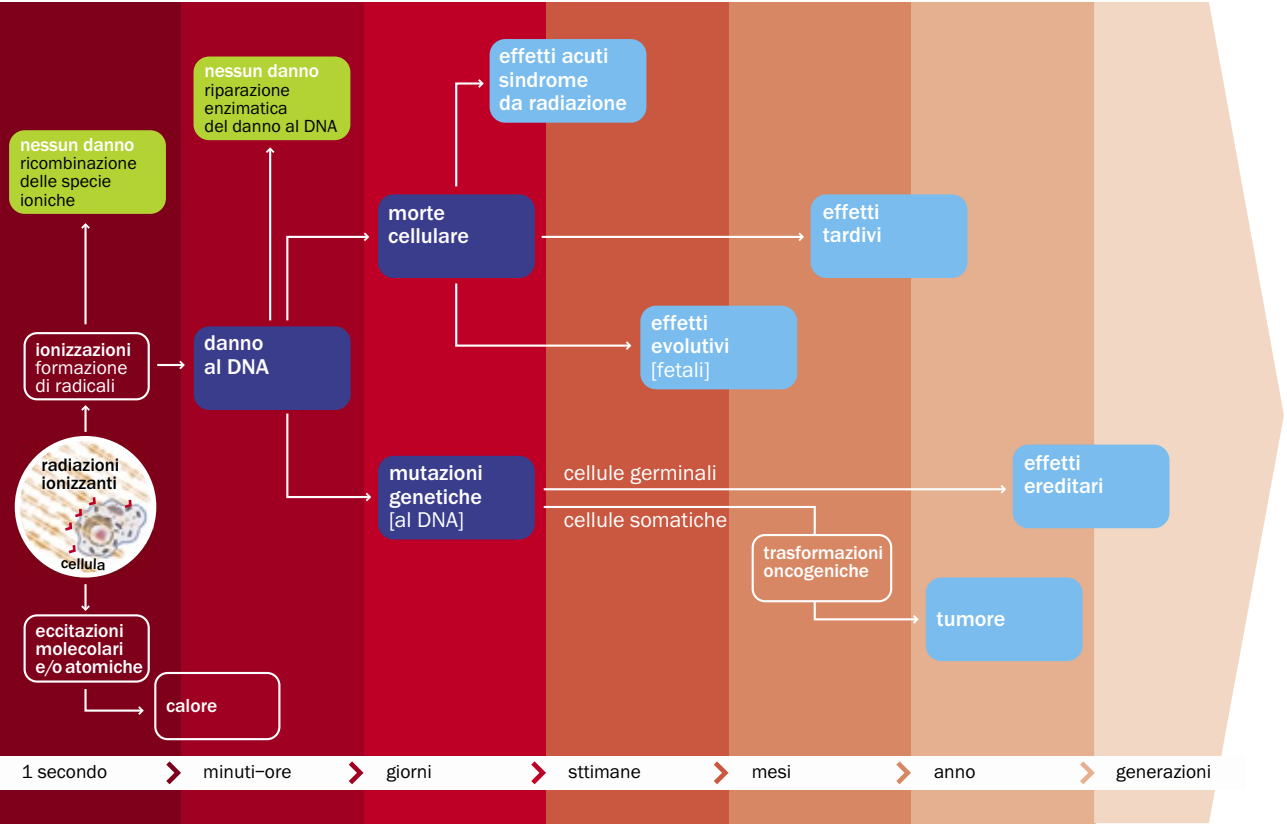
Comprendere i danni provocati dalle radiazioni sulle cellule umane permette di sviluppare precauzioni e terapie.

di Roberto Cherubini



L'uomo, come qualunque corpo nell'Universo, è continuamente "attraversato" da radiazioni provenienti da sorgenti "esterne" o "interne". Sono sorgenti esterne, ad esempio, i raggi cosmici, gli elementi radioattivi terrestri o le apparecchiature che generano radiazioni per la medicina e l'industria. Sorgenti interne sono invece gli elementi radioattivi presenti nei tessuti biologici. A queste esposizioni alle radiazioni si aggiungono quelle derivanti dalle attività professionali (trattamento di materiali radioattivi per metodiche di medicina nucleare o industriali, indagini di diagnostica e/o terapia medica, voli aerei e missioni spaziali) o dagli incidenti cosiddetti "nucleari" ("fughe di materiale radioattivo"). Spesso si pone il quesito sul livello al quale le radiazioni diventano nocive. Per capire gli effetti delle radiazioni sull'uomo è importante studiarne i meccanismi di interazione con la materia biologica. Uno strumento molto potente per simulare l'esposizione ai vari tipi di radiazioni è costituito dagli acceleratori di particelle, capaci di fornire elettroni, ioni e, a seguito di reazioni nucleari, neutroni in un ampio intervallo di energie, nonché dai tubi a raggi X e dalle sorgenti radioattive che emettono raggi gamma e X.

Un modello biologico sperimentale largamente impiegato in questi tipi di studi è costituito da cellule (di mammifero) coltivate "in vitro". Si chiama *radiobiologia* (dall'inglese *radiation biology* o *radiobiology*) la disciplina che si interessa a questo tipo di studi e, considerata la complessità dei fenomeni investigati, coinvolge aspetti e conoscenze interdisciplinari (in fisica, biologia, chimica ecc.). Bombardando le cellule coltivate "in vitro" con fotoni (raggi X o gamma) o radiazioni "corpuscolari" (elettroni, ioni ecc.) si può studiare l'entità del danno che queste radiazioni provocano. Quando una cellula viene irradiata, gli atomi delle molecole che la costituiscono vengono eccitati o ionizzati. In particolare, si ritiene che quando il Dna è colpito la cellula subisca un danno. Questo avviene sia nel caso in cui la radiazione agisca direttamente che quando la radiazione agisce attraverso i radicali liberi prodotti dall'interazione con le molecole d'acqua, di cui per circa l'80% è costituita la cellula. L'interazione tra la radiazione e le cellule provoca dunque una cascata di eventi, che, in tempi brevi, medi e lunghi (anche di anni), dipendentemente dalle dosi assorbite, possono portare a vari tipi di danno nella cellula



a.

stessa, nel tessuto e nell'organismo (morte cellulare, mutazioni, aberrazioni cromosomiche, trasformazioni oncogeniche ecc.). Ma grazie alle capacità riparatrici proprie di ogni cellula, molte o parte delle alterazioni indotte dalle radiazioni vengono riparate senza conseguente danno alle sue strutture e funzioni. Si è osservato che, pur somministrando una stessa dose (ovvero quantità di energia) a uno stesso tipo di cellula, il danno indotto dipende dal tipo di radiazione. Le radiazioni "corpuscolari" di diverso tipo (di diversa carica elettrica e/o massa), infatti, a parità di dose somministrata, inducono livelli di danno diversi. La comprensione del complesso dei fenomeni

causati dall'esposizione alle radiazioni permette di valutare il "rischio" professionale o accidentale, e quindi di mettere in atto tutte le precauzioni (*radioprotezione*) per ridurre al minimo le conseguenze. D'altra parte, comprendere questi meccanismi permette di sfruttare "l'efficacia" delle radiazioni nel produrre un danno nelle cellule che è necessario eliminare, come accade nel trattamento terapeutico dei tumori (*radioterapia*). Nel caso di radiazioni "corpuscolari", si sfruttano anche le loro proprietà balistiche che permettono di indirizzare con estrema precisione le particelle e trattare un tumore con maggiore efficacia.

a.
Rappresentazione schematica della cascata dei principali eventi che portano all'espressione dei vari tipi di danno biologico nell'uomo a seguito di esposizione a radiazioni ionizzanti.

Biografia

Roberto Cherubini è ricercatore dell'Infn presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl). È stato coordinatore e project-leader di progetti europei nel campo della radiobiologia ed è responsabile del Gruppo di Radiobiologia dei Lnl.

Link sul web

www.lowdose.energy.gov/links_educator_weblinks.hthtm

www.lowdose.energy.gov/radiobio_faq.htm

www.bnl.gov/medical/nasa/LTSF.asp

www.afrr.i.usuhs.mil

web.princeton.edu/sites/ehs/osradtraining/ogicaleffects/page.htm

Acceleratori per la salute

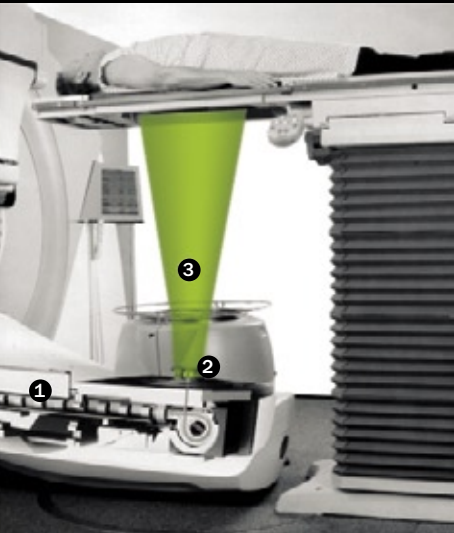
Particelle per la cura dei tumori.

di Ugo Amaldi

Gli acceleratori di particelle sono il prodotto della fisica detta talvolta “dura” mentre noi uomini, specie se malati, siamo deboli, siamo – potremmo dire – “molli”. Eppure, e pochissimi lo sanno, la fisica dura corre in aiuto della nostra debolezza più grande, la pervadente malattia del cancro. E i numeri sono impressionanti. In Italia ogni anno sono sottoposti a radioterapia con raggi X quasi la metà dei 240mila malati a cui è diagnosticato un tumore. I raggi X sono prodotti dagli elettroni che, accelerati fino a 10-20 milioni di elettronvolt (MeV) da un acceleratore lineare come quello mostrato nella figura a, colpiscono un bersaglio di tungsteno. Questa terapia dei tumori solidi è poco costosa ed efficace: hanno infatti subito un trattamento radioterapico – spesso insieme a chirurgia e chemioterapia – il 40% dei circa 120mila pazienti italiani che dopo cinque anni non mostrano più sintomi di malattia. Negli ultimi dieci anni la radioterapia ha fatto passi da gigante con la possibilità di incrociare molti fasci di raggi X (*Intensity Modulated Radiation Therapy*). Nella figura b, a sinistra, è mostrata, in una opportuna scala di colori, la distribuzione della dose (energia per unità di massa) data a un tumore encefalico con nove fasci di raggi X incrociati. Il tasso di cura dei tumori irradiati crescerebbe ulteriormente se si potesse aumentare la dose al tumore senza aumentare quella data ai tessuti sani vicini. Qui interviene l'adroterapia. Gli adroni sono particelle composte da quark. Esistono migliaia di adroni: i più noti sono i protoni e i neutroni. Anche i nuclei degli atomi

sono adroni, in quanto sistemi composti di neutroni e protoni. In particolare sono adroni i nuclei di carbonio – detti anche *ioni carbonio* – che sono costituiti da sei neutroni e sei protoni. In adroterapia i più utilizzati sono i protoni e gli ioni carbonio. Per penetrare fino a 26 centimetri di profondità i protoni devono avere un'energia di 200 MeV e gli ioni carbonio di 4.800 MeV, molto maggiori dell'energia degli elettroni accelerati da un linac per raggi X (vd. figura a). Per questo gli acceleratori necessari all'adroterapia – ciclotroni e sincrotroni – sono molto più grandi e costosi dei linac ospedalieri. Tuttavia gli investimenti sono giustificati perché, come mostrato nella figura c, gli adroni carichi depositano la maggior densità di energia alla fine del percorso nel corpo del paziente, proprio lì dove si trova il tumore, a differenza dei fotoni che danneggiano inutilmente il tessuto sano, prima di raggiungere la lesione. Confrontando nella figura b l'immagine di sinistra con quella di destra, è evidente che – proprio per questa proprietà – i tessuti sani sono molto meno irradiati che non nel caso dei raggi X. L'efficacia clinica dei protoni è identica a quella dei raggi X ma risparmiano meglio i tessuti sani. Se si potessero costruire oggi acceleratori di protoni da 200 MeV piccoli e poco costosi quanto i linac per elettroni, potremmo utilizzare la protonterapia al posto della radioterapia con raggi X. Purtroppo però il più piccolo ciclotrone per protoni è superconduttore e ha un diametro di tre metri e pesa più di cinquanta tonnellate. Per utilizzare bene l'acceleratore, nei centri

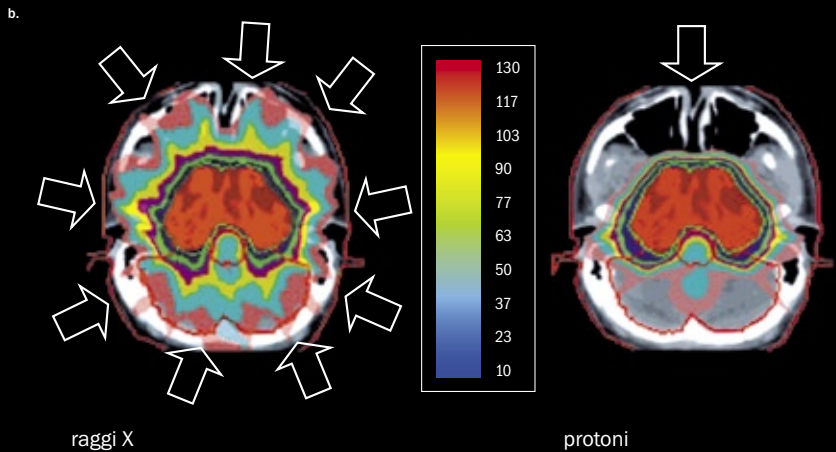
di protonterapia (che sono da qualche anno prodotti commerciali) un ciclotrone o un sincrotrone invia fasci a 3-4 sale di trattamento. Vi sono quattro ditte che offrono “chiavi in mano” centri ospedalieri di protonterapia. Il paziente è preparato e allineato con precisione millimetrica sul lettino. L'allineamento e i controlli richiedono un quarto d'ora mentre l'irradiazione è completata in due o tre minuti. Come per la radioterapia convenzionale, il paziente deve essere irradiato per 20-30 giorni. Attualmente nel mondo funzionano o sono in costruzione una trentina di centri di protonterapia. I paesi che ne sono più dotati sono il Giappone, che ne ha quattro, e gli Stati Uniti, che ne avranno tra un paio di anni ben otto. In Italia è attivo dal 2002, presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn a Catania, il primo centro clinico di protonterapia, Catana (vd. “Guarire con i protoni” p. 25, ndr), mentre la Provincia di Trento sta per firmare il contratto per la realizzazione di un centro dotato di due testate. Se i protoni sono più adatti dei raggi X e i relativi centri sono disponibili, perché ricorrere agli ioni carbonio? Perché uno ione ha una maggiore efficacia biologica dei protoni e dei raggi X in quanto inizia il suo percorso con un'energia che è 24 volte maggiore di quella di un protone che arriva alla stessa profondità. Uno ione carbonio, quindi, strappa al Dna dei nuclei cellulari attraversati, un numero di elettroni atomici, che è più di venti volte maggiore di quelli strappati da un protone. Per questo i danni prodotti sono rotture doppie delle due eliche del Dna, danni non riparabili dai



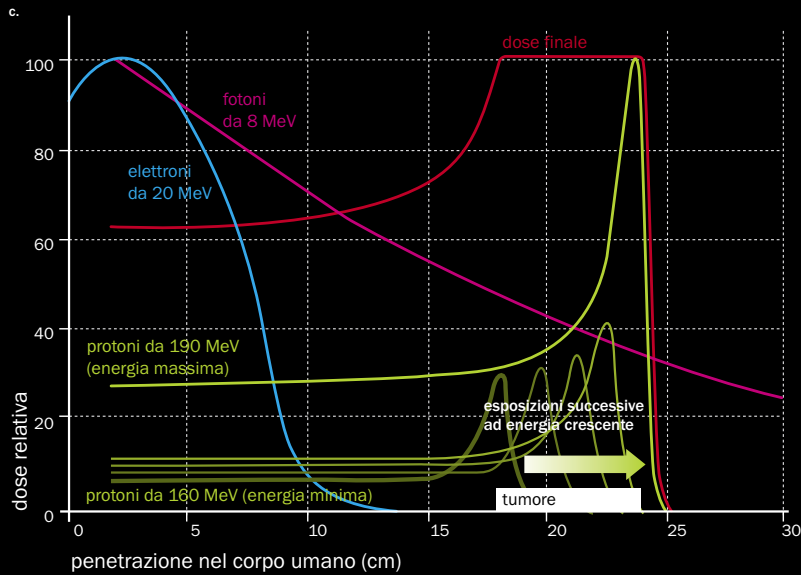
a.



a. 1. Fascio di elettroni; 2. convertitore; 3. fotoni. Un acceleratore lineare di elettroni – detto anche linac – è lungo 1-2 metri. Il linac è contenuto nella scatola bianca e ruota intorno al lettino del paziente, di modo che il radioterapista può scegliere le direzioni migliori in maniera da evitare al massimo l'irradiazione degli organi sani.



b. Distribuzione della dose, cioè dell'energia data per unità di massa, in un trattamento di un tumore con nove fasci di raggi X incrociati (a sinistra) o con un fascio di protoni proveniente da una sola direzione (a destra).



c. Distribuzione in profondità della dose assorbita, nei casi di elettroni da 20 MeV, fotoni da 8 MeV e protoni da 190 MeV. Elettroni e fotoni interessano soprattutto i primi strati del tessuto, mentre con i protoni si può rilasciare gran parte dell'energia a una profondità precisa, variabile con l'energia del fascio. La linea rossa mostra la distribuzione della dose ricevuta dal paziente nel caso di trattamento di un tumore posto tra 18 e 24 cm di profondità, irradiato con fasci di protoni a energie controllate: la dose è concentrata lungo la lesione, con danno limitato ai tessuti circostanti.

[as]
MatriXX:
un altro strumento
della ricerca
al servizio
della medicina



1.
Il dosimetro MatriXX, posizionato sul lettino del paziente per validare i parametri di un piano di trattamento.

Si chiama MatriXX e, pur evocando nel suo nome suggestioni fantascientifiche, nella realtà è un apparecchio che oggi viene correntemente usato in più di 300 ospedali nel mondo. È un perfetto esempio di “trasferimento tecnologico” ovvero di quel processo di rapida transizione di conoscenze, metodi e competenze tipici della ricerca fondamentale (quella che è propria dell’Infn) alla realizzazione su scala industriale di uno strumento nuovo e tecnologicamente innovativo. A Torino agli inizi degli anni ’90 un gruppo di ricercatori dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ha investito le proprie competenze nel settore della fisica dei rivelatori di particelle, realizzati fino a quel momento per gli esperimenti di fisica delle alte energie, nello studio di un nuovo tipo di *dosimetro clinico*, nell’ambito del “progetto adroterapia” promosso da Ugo Amaldi. Un dosimetro clinico è un particolare rivelatore di particelle collocato sul fascio radioterapico. Il suo compito è quello di verificare con precisione, prima della terapia, che la “dose” di energia rilasciata al paziente durante un trattamento sia esattamente quella richiesta dal radioterapista e calcolata dal fisico medico. Lo sviluppo di acceleratori terapeutici e di piani di trattamento sempre più sofisticati ed efficaci

richiede grande precisione anche nella misura della dose, e quindi grande accuratezza del dosimetro. Il dosimetro 3D (ovvero con la capacità di ricostruire il profilo tridimensionale della dose) sviluppato a Torino per fasci di adroni è stato successivamente modificato in un dosimetro 2D utilizzabile anche per fasci con fotoni (come i raggi X), ossia per un tipo di trattamento radiologico molto più diffuso nel mondo. Per farlo è stato necessario sviluppare non solo il rivelatore, ma anche un innovativo circuito integrato (un “chip”), completamente dedicato a questa applicazione, e tutta la catena di acquisizione dati e controllo necessaria all’impiego clinico. A questo punto si è passati all’industrializzazione del prodotto, che è avvenuta grazie a una convenzione tra una ditta belga, la Iba (*Ion Beam Applications*), leader del settore, e l’Infn. Di fatto si è così “trasferita” nelle mani dell’industria la capacità di produrre con grande diffusione un oggetto che consente oggi, ad ogni ospedale che lo utilizzi, un costante, rapido e accurato monitoraggio dei fasci radioterapici con fotoni, insieme alla possibilità di utilizzo di piani di trattamento più efficaci e meno invasivi. [Roberto Cirio, Marco Donetti, Flavio Marchetto, Cristiana Peroni]

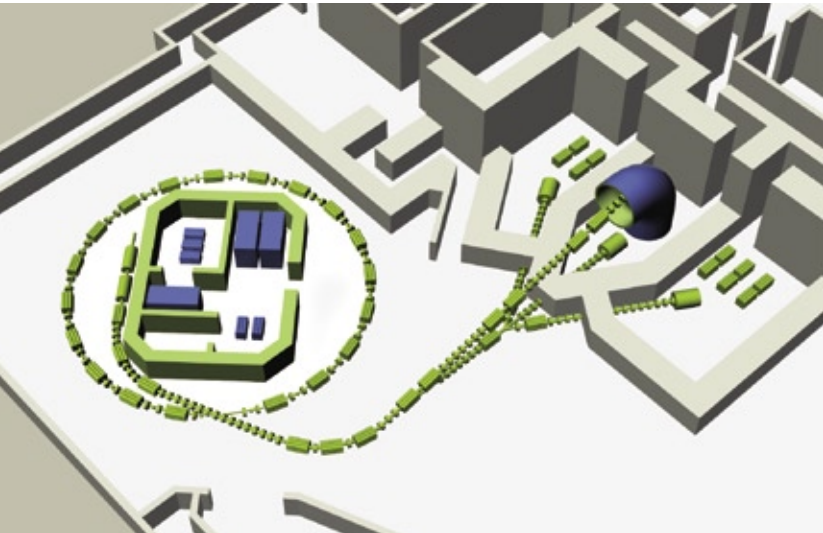
Biografie
Roberto Cirio è ricercatore dell’Infn e dal 1993 lavora su applicazioni della fisica in medicina. Dal 2007 è docente di Fisica alla Facoltà di Medicina e Chirurgia di Torino.
Flavio Marchetto è dipendente dell’Infn presso la sezione di Torino e dal 1992 si occupa anche di strumentazione per la fisica medica.
Marco Donetti dal 2000 è ricercatore della Fondazione Tera e dal 2004 della Fondazione Cnao.
Cristiana Peroni è ricercatrice dell’Infn e dal 1995 docente di Fisica Medica all’Università di Torino.

Link sul web

iba-dosimetry.com/fileadmin/pdf/radiotherapy/IMRT/I_mRT_MatriXX.pdf

www.asp.torino.it/MatriXX.swf

www.infn.it/csb5/docs/presentazioni/febbraio06/MatriXX_cirio.pdf



d.

meccanismi che le cellule hanno sviluppato per difendersi dai danni usualmente prodotti dai raggi ultravioletti, dai raggi X e anche dai protoni. Effetti biologici diversi danno agli ioni carbonio una maggiore efficacia clinica e quindi offrono la possibilità di controllare i tumori solidi *radioresistenti* (ossia altamente resistenti ai raggi X). In un documento del 2004 l’Associazione Italiana di Radioterapia Oncologica (Airo) analizzò i risultati ottenuti nel mondo con l’adroterapia concludendo che, dei 120mila italiani sottoposti alla radioterapia convenzionale ogni anno, circa 13mila pazienti avrebbero tratto giovamento dalla protonterapia e circa 3.500 dall’irradiazione con ioni carbonio. Questo conferma la lungimiranza della scelta fatta sin dal 1992 dalla Fondazione Tera che si è posta lo scopo di realizzare il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Cnao), un centro “duale” in grado di accelerare sia ioni carbonio che protoni e di trattare i malati inizialmente in tre sale e, in una seconda fase, in cinque sale. A regime si potranno curare con ioni carbonio, nel quadro del servizio sanitario nazionale, circa 3.000 pazienti all’anno.

Su richiesta di Tera, nel 2001 è stata creata dal Ministero della Salute la Fondazione Cnao per la realizzazione e la gestione del Centro. Ne fanno parte, come fondatori, l’Ospedale Maggiore di Milano e il San Matteo di Pavia, l’Istituto dei Tumori e quello Europeo di Oncologia, l’Istituto Besta e Tera. L’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, che è partecipante istituzionale, assicura la co-direzione tecnica e ha assunto importanti responsabilità nella costruzione del Centro, che è praticamente terminato a Pavia, subito fuori delle mura del San Matteo. Altri partecipanti istituzionali sono le Università di Milano e Pavia, il Politecnico di Milano, il Comune di Pavia e la fondazione Cariplo. Il sincrotrone sarà completato nell’estate del 2008 e il primo trattamento è previsto per la fine dell’anno o, al più tardi, all’inizio del 2009. Con questa realizzazione l’Italia, insieme ai colleghi tedeschi del Gsi e dell’Università di Heidelberg, che hanno appena completato il centro Hit, si colloca all’avanguardia nelle nuove radioterapie di grande precisione e accresciuta efficacia.

d.
Il sincrotrone del Cnao di Pavia ha un diametro di 25 metri e accelera ioni carbonio fino a un’energia massima di 4.800 MeV. Nell’attuale fase di costruzione sono disponibili tre sale di trattamento. A regime lavoreranno al Centro più di cento persone.

Biografia

Ugo Amaldi, fino al 2006 docente di Fisica Medica all’Università di Milano Bicocca, ha svolto un’intensa attività di ricerca e ottenuto importanti risultati in vari settori della fisica. Ha creato la Fondazione Tera, di cui tuttora è presidente.

Link sul web

www.tera.it

www.cnao.it

www.nirs.go.jp/ENG/research/charged_particle

www.gsi.de/beschleuniger/groups/tbh/

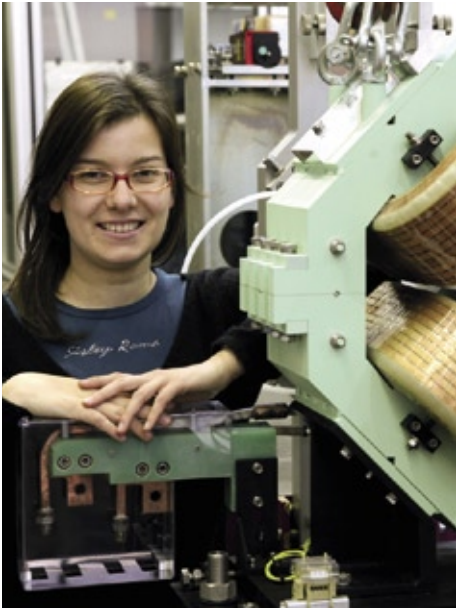
[as] benvenuti a bordo

Dalla fisica alla medicina.

di Vincenzo Napolano

È soddisfatta della sua professione Giulia Bazzano, giovane fisica sperimentale, che lavora nei Laboratori Nazionali di Frascati per conto della Fondazione Cnao, di cui l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn) è uno dei principali attori istituzionali. Soddisfatta e fortunata – ci dice – poiché oltre a fare un lavoro che le piace e per cui ha studiato a lungo, ha una posizione stabile e una prospettiva più serena di molti ricercatori suoi coetanei. “Fare ricerca – ci assicura – è un mestiere entusiasmante. Significa trovarsi di fronte a problemi sempre nuovi, che devi affrontare usando la tua testa e avendo, in definitiva, l’opportunità di pensare”. E proprio la voglia di ragionare e di trovare risposte originali ai problemi è stata, da ragazza, la molla della sua passione per la matematica e soprattutto per la fisica. E dopo la laurea, la motivazione maggiore a cercare una strada per continuare a fare ricerca. “La via più comune – continua la giovane fisica – è quella del dottorato, che sfocia poi in una serie talvolta infinita, di borse di studio e assegni di ricerca in giro per il mondo. Fino al fatidico concorso per una posizione come ricercatore, che però quasi sempre è assegnata a chi ‘aspetta’ da più tempo, secondo un criterio che a volte fa passare in secondo piano il merito”. L’alternativa è stata allontanarsi dal campo della ricerca fondamentale, in cui aveva svolto la tesi di laurea, e guardare a settori più applicativi. “Non credo infatti si debba chiedere a una persona di sacrificare ogni aspetto della propria vita, come purtroppo spesso accade, per un lavoro, che pure ama e la appassiona”. Dopo un master in applicazioni delle

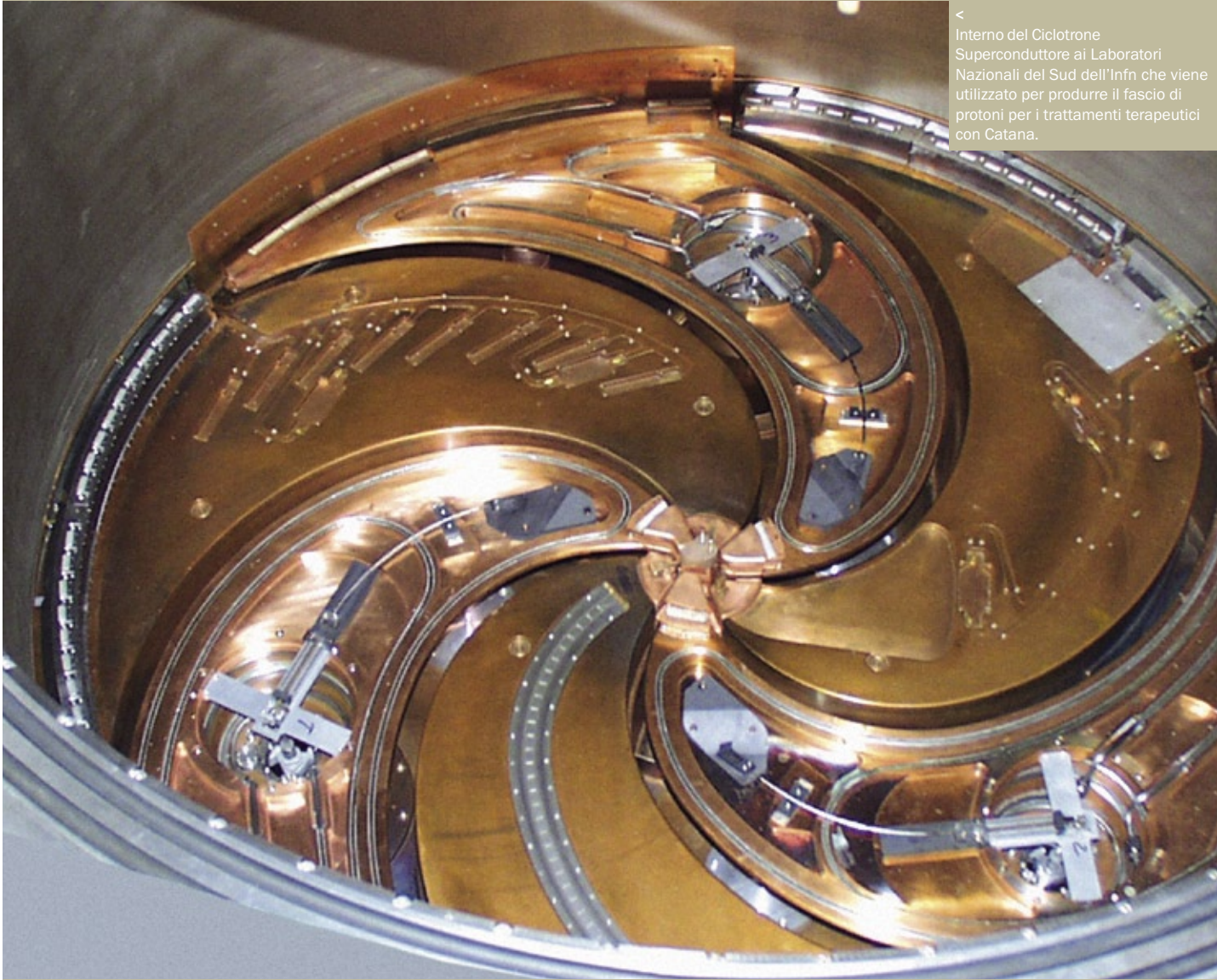
tecnologie nucleari, Giulia viene assunta dalla fondazione Cnao (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, vd. p. 23, ndr), per cui lavora ancora, con un contratto a tempo indeterminato. Un vero e proprio miraggio per chiunque oggi a ventinove anni nel nostro paese abbia un impiego. “Il fatto che la fondazione Cnao sia un ente sostanzialmente privato – riprende Giulia – svincolato dalle logiche e dalle regole che spesso non aiutano i più giovani ad affermarsi, per me è stata in effetti una grossa fortuna”. E ha consentito di premiare i suoi meriti. “D’altra parte il nostro lavoro spesso è guardato con ammirazione, ma allo stesso tempo è poco compreso e non solo dalla gente comune, ma anche da chi governa e gestisce le risorse. Nel caso di un’applicazione letteralmente vitale, come nel caso delle terapie tumorali, è più semplice spiegare l’importanza e il valore di ciò che fai”. In questa fase Giulia Bazzano si occupa di misure magnetiche per il sincrotrone del Cnao, ma una volta che l’acceleratore sarà avviato, prevede di interessarsi ad altri aspetti del suo funzionamento. “Lavorare con un obiettivo così utile per tutti, come la costruzione di una macchina per l’adroterapia, costituisce naturalmente una motivazione in più”. Probabilmente mette al riparo anche dagli entusiasmi e dalle frustrazioni della ricerca fondamentale. “Forse sì, ma non bisogna dimenticarsi mai – conclude la ricercatrice – che senza la ricerca pura e ‘disinteressata’ della fisica delle particelle, come quella che si fa al Cern di Ginevra o in molti altri laboratori italiani, un acceleratore come quello di Pavia non sarebbe stato nemmeno concepibile”.



Guarire con i protoni

Ai piedi dell’Etna il primo centro di adroterapia in Italia.

di Giacomo Cuttone



< Interno del Ciclotrone Superconduttore ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn che viene utilizzato per produrre il fascio di protoni per i trattamenti terapeutici con Catana.

La prima sperimentazione italiana di adroterapia è attiva già dal 2002 presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn, a Catania. Il centro clinico si chiama Catana (Centro di Adroterapia e Applicazioni Nucleari Avanzate) e si avvale di un ciclotrone superconduttore, altrimenti attivo nella fisica di base, per curare pazienti affetti da tumore maligno dell'occhio, il melanoma oculare. Nel mondo, i primi trattamenti con adroni sono stati effettuati a Berkeley nel 1954 con i protoni e nel 1957 con gli ioni dell'elio. Successivamente, numerosi centri, nati prevalentemente per la ricerca in fisica, hanno iniziato a trattare pazienti con particelle cariche (protoni, mesoni, ioni carbonio, elio, neon) o neutre (neutroni), dedicandovi parte della loro attività, in collaborazione con varie prestigiose istituzioni mediche. Lo sviluppo della terapia con protoni ha visto nell'ultimo decennio una rapida e progressiva accelerazione grazie sia all'esperienza accumulata negli anni precedenti, sia allo sviluppo tecnologico che ha ormai reso possibile la costruzione di acceleratori di particelle esclusivamente dedicati alle attività in campo medico. In ogni paese in cui si è affermato l'utilizzo degli adroni a scopo radioncologico, l'avvio della sperimentazione clinica è avvenuto all'interno di laboratori di fisica nucleare ove erano disponibili gli acceleratori necessari all'applicazione medica. In Italia, il centro clinico Catana si basa sulla collaborazione fra i Laboratori Nazionali del Sud, il Dipartimento di Fisica e Astronomia e l'Azienda Policlinico dell'Università degli Studi di Catania, e il Centro Siciliano di Fisica Nucleare e Struttura della Materia. Presso l'Azienda Policlinico sono operanti la Divisione di Oftalmologia e la sezione di Radioterapia, che sono incaricate di effettuare i trattamenti con fasci di protoni. Tali trattamenti si basano su fasci di protoni da 62 MeV prodotti dal Ciclotrone Superconduttore dei Laboratori del Sud, operativo nel campo della fisica nucleare

già dal 1994. I fasci di protoni accelerati nel ciclotrone hanno una energia tale che in acqua possono penetrare per circa 3 cm e quindi permettono di curare tumori localizzati fino a questa profondità, come tutti i tumori della regione oculare, il più aggressivo dei quali è il melanoma oculare. Per 4-5 volte l'anno il fascio di protoni dei laboratori è disponibile agli oculisti e radioterapisti dell'Azienda Policlinico, che assieme ai fisici dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare eseguono i trattamenti dei pazienti affetti da tumori oculari. All'interno dei Laboratori del Sud è stata realizzata una sala con una linea di fascio opportunamente progettata per fornire fasci di protoni con caratteristiche fisiche idonee al trattamento di tali malattie. Il sistema è completato da una sedia motorizzata e computerizzata, regolabile secondo la corporatura del paziente. Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo finanziate dall'Infn e dal Ministero dell'Università e della Ricerca, i ricercatori hanno anche sviluppato un sofisticato sistema di controllo delle caratteristiche fisiche e dosimetriche del fascio di protoni. I trattamenti avvengono in quattro sedute giornaliere consecutive, effettuate nell'arco di una settimana. Dal febbraio del 2002 ad oggi ci sono state 18 settimane di trattamento durante le quali sono stati curati 150 pazienti. Di questi, 138 erano affetti da melanoma oculare e 12 da altre forme tumorali della regione oculare particolarmente aggressive. Il 98% dei pazienti affetti da melanoma oculare trattati con Catana sono sopravvissuti e nel 96% dei casi la malattia viene tenuta sotto controllo, con il vantaggio di non dover asportare l'occhio del paziente, come sarebbe stato necessario in assenza di radioterapia. Questi risultati sono estremamente positivi per una malattia particolarmente aggressiva quale è il melanoma. Nei pazienti affetti da altre patologie sono stati ottenuti risultati analoghi.

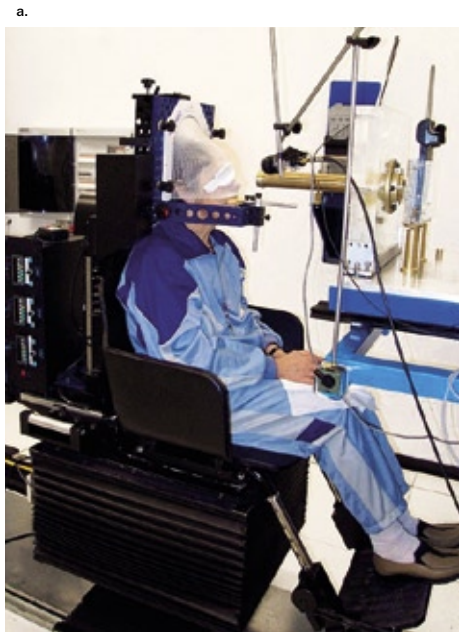
Biografia

Giacomo Cuttone è dirigente di ricerca Infn ai Laboratori Nazionali del Sud (Lns) di Catania e responsabile del progetto Catana. È inoltre responsabile nazionale del progetto speciale Excyt e membro della collaborazione Scent.

Link sul web

www.lns.infn.it/CATANA/CATANA

a. Un paziente durante il trattamento di un melanoma oculare con Catana.



1.

[as] Accelerare nel freddo: storia di un ciclotrone italiano molto longevo

Milano anni '60. Presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi viene realizzato un ciclotrone per l'accelerazione di protoni con energia da 18 a 45 MeV. È il primo ciclotrone realizzato in Italia e sarà per diverso tempo un punto di riferimento per esperimenti di fisica nucleare delle basse energie. Del nucleo originario di ricercatori che realizzarono il ciclotrone faceva parte Francesco Resmini. Nella seconda metà degli anni '70 egli fu l'ideatore e il promotore del Ciclotrone Superconduttore, la cui realizzazione iniziò nel 1981. La novità principale è stata l'utilizzo della superconduttività, quel fenomeno per cui alcuni materiali a temperature molto basse assumono resistenza nulla al passaggio di corrente elettrica. Le bobine del Ciclotrone Superconduttore, formate da niobio-titanio, si trovano alla temperatura di -268,96 °C (quella dell'elio liquido che serve per raffreddarle, rendendole così superconduttive), quindi prossime allo zero assoluto (-273,15 °C). Grazie alla superconduttività si ottengono campi magnetici elevati e di conseguenza macchine compatte. Il ciclotrone ha un diametro di 4 m, un'altezza di 3 m e un peso di 200 tonnellate. Un ciclotrone non superconduttivo di pari prestazioni avrebbe un diametro di circa 12 m e un peso di 2000 tonnellate. Il Ciclotrone Superconduttore è stato progettato per accelerare tutte le specie di ioni, dall'elio all'uranio, con energie sino a 100 MeV per nucleone per gli ioni leggeri e 20 MeV per nucleone per i più pesanti. La scomparsa prematura di Francesco Resmini creò molte difficoltà

1. Trasporto del cavo di rame per l'avvolgimento delle bobine del primo ciclotrone di Milano nei primi anni '60.

al progetto che fu comunque portato a compimento dai suoi collaboratori. Dopo il completamento delle misure magnetiche a Milano, il ciclotrone fu trasportato ai Laboratori Nazionali del Sud, dove accelerò con successo il primo fascio nel 1994. Ancora oggi è in uso per la fisica nucleare, ma anche per la terapia di alcune forme tumorali dell'occhio (il progetto Catana). La realizzazione di una macchina di questo tipo rappresentò una sfida scientifica e tecnologica impegnativa. Il Ciclotrone Superconduttore è stato il primo in Europa e il terzo nel mondo. Il coinvolgimento e il contributo di aziende italiane è stato importante: l'Ansaldo per l'avvolgimento delle bobine, la Zanon per la costruzione del criostato, la Metalli Industriali per la fornitura del cavo. Per la sua costruzione fu realizzato un nuovo laboratorio, il Lasa (Milano), che ha senza dubbio favorito la crescita in ambito Infn di competenze avanzate nel campo degli acceleratori e della superconduttività applicata. [Carlo De Martinis]

Biografia

Carlo De Martinis, docente presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, ha partecipato a tutte le fasi della realizzazione del Ciclotrone Superconduttore. La sua attività attuale è rivolta allo sviluppo di acceleratori per applicazioni in adroterapia.

Parola all’oncologo

Gianpaolo Biti, specialista in Radiologia Medica e Oncologia Radioterapica.

intervista di Catia Peduto

[as] Prof. Giampaolo Biti, perché Catana è più efficace di altri trattamenti, come la radioterapia convenzionale con raggi X?

Il vantaggio della radioterapia con protoni, rispetto a quella convenzionale che utilizza i raggi X, consiste nella modalità con cui i protoni rilasciano l'energia nella materia. I fotoni, infatti, rilasciano la maggior parte della loro energia (il 100% della dose) in prossimità dei punti in cui il fascio entra nel tessuto malato (chiamati in gergo *porte di ingresso*) e a varie profondità, in relazione all'energia del fascio. È quindi necessario utilizzare più fasci, con diverse porte di ingresso allo scopo di portare la dose richiesta sul tumore. I fasci di protoni, invece, rilasciano il massimo della dose alla fine del loro percorso nel tessuto. La profondità che il fascio raggiunge può essere variata opportunamente, a seconda della profondità del tumore, agendo sull'energia del fascio stesso. Ciò permette di ottimizzare la distribuzione della dose e garantire allo stesso tempo il risparmio dei tessuti sani che sono vicini al tumore.

[as] Che cosa è il melanoma oculare, come viene diagnosticato?

Il melanoma oculare rappresenta il tumore oculare più frequente dell'età adulta, con un'incidenza stimata in 350 nuovi casi l'anno in Italia. Si tratta di un tumore altamente aggressivo, che deriva dalle cellule melanocitarie della coroide oculare. La malattia tende a infiltrare il bulbo oculare e tutti i tessuti circostanti. Inoltre tende a dare metastasi a distanza, soprattutto al fegato. I melanomi oculari sono spesso asintomatici e determinano disturbi

aspecifici dell'acuità visiva solamente quando raggiungono dimensioni notevoli o arrivano a interessare l'area maculare, ossia quell'area dell'occhio che si trova al centro della retina e che controlla la capacità di discriminazione fine (come riconoscere gli oggetti e/o distinguere i colori) e che consente di leggere e di scrivere. La diagnosi è dunque sostanzialmente clinica e si basa sulla valutazione oftalmoscopica.

[as] L'adroterapia potrebbe essere utilizzata anche per curare altri tipi di tumore?

L'adroterapia viene già utilizzata nel trattamento di molte neoplasie maligne. Oltre al melanoma oculare, annovera tra le patologie con indicazioni elettive alcuni tumori altrimenti difficilmente trattabili con la chirurgia, con la radioterapia convenzionale e, tanto meno, con la chemioterapia. È il caso dei cordomi della base cranica, tumori che crescono nelle vicinanze della colonna vertebrale: in questo caso l'adroterapia permette di salvaguardare organi critici molto vicini al tumore, come il midollo spinale. Lo stesso vale per i condrosarcomi delle estremità e del tronco, per i meningiomi della base cranica, i tumori paraspinali e gli adenomi ipofisari. Vi è poi tutta una serie di tumori per i quali l'adroterapia potrebbe garantire un miglior controllo di malattia e una maggiore possibilità di guarigione con contenuti effetti collaterali. Tra questi ricordiamo i tumori che originano dalla tonsilla, dalla laringe, dalla faringe e dalla cavità orale, i tumori della vescica, della prostata ecc.



[as] L'esperienza maturata a Catania con Catana è stata importante anche per la crescita della radioterapia italiana?

Non c'è dubbio che sia stata un'esperienza di assoluto valore. Essa ha dimostrato la fattibilità della terapia con protoni, stimolando la sua diffusione sull'intero territorio nazionale, permettendo di mettere in pratica una terapia a disposizione in pochi altri centri al mondo, tra i quali ricordiamo l'Istituto Curie (Orsay, Francia), quello di Nizza, quello di Boston e di Loma Linda (California, Usa). È ovvio che l'esperienza di Catania ha messo insieme varie professionalità nella progettazione, realizzazione e poi nell'attività clinica: è stata un lievito molto importante e stimolante per la crescita di questo particolare settore e della radioterapia in genere. Le esperienze mondiali, nonché la mia esperienza personale, hanno dimostrato quanto siano fondamentali le competenze relative agli acceleratori di particelle, campo che vede istituzionalmente impegnato l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Continua e necessaria è l'evoluzione degli acceleratori, che devono rispondere sempre più a esigenze non solo di tipo scientifico.

Biografia

Giampaolo Biti è specialista in Radiologia Medica e Oncologia Radioterapica e professore ordinario presso la facoltà di Medicina e Chirurgia dell'Università di Firenze. Dal 1994 è direttore dell'unità di radioterapia presso l'Azienda Ospedaliero - Universitaria Careggi di Firenze.

Un acceleratore “tascabile” per l’adroterapia

Infn e industria per la cura dei tumori.

di Luciano Calabretta

Si chiamerà Scent e sarà in grado di curare quasi la totalità dei tumori localizzati nella regione della testa, del collo e del polmone. L'innovativo ciclotrone produrrà sia protoni che ioni carbonio e permetterà così ai medici di poter scegliere, a seconda del tumore da trattare, quale tipo di adrone utilizzare, con uno strumento compatto e facilmente gestibile. Scent è stato progettato dai ricercatori dei Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn e sarà realizzato in collaborazione con l'industria leader mondiale nel campo dei ciclotroni per terapia e produzione di radioisotopi, la belga Iba (*Ion Beam Applications*), che si occuperà della sua commercializzazione. Quando è nato il progetto Scent nel 2003, i vantaggi dei ciclotroni per il trattamento dei tumori erano già accertati. Attualmente in tutto il mondo ci sono ben 11 ciclotroni specificatamente progettati per la protonterapia e operanti o prossimi a entrare in funzione, mentre, fino a poco tempo fa, gli unici strumenti in grado di produrre sia protoni che ioni per adroterapia erano i sincrotroni: macchine acceleratrici molto più complesse, ingombranti e costose dei ciclotroni. Un sincrotrone infatti è costituito da un anello dal diametro di almeno 25 metri. Scent sarà un ciclotrone superconduttivo di un diametro di circa 5 m, non

molto più grande del Ciclotrone Superconduttore che viene utilizzato nel progetto Catana. Accelerando sia gli ioni carbonio sia atomi di idrogeno ionizzati, da cui si ottengono i protoni, fino all'energia di 300 MeV per nucleone, raggiungerà un'energia quasi 5 volte maggiore di quella del ciclotrone di Catana. Con questa energia gli ioni carbonio sono in grado di penetrare all'interno dei tessuti umani fino a una profondità di circa 17 cm, permettendo di trattare quindi quasi la totalità dei tumori localizzati nella regione della testa e del collo, del polmone e tutti i tumori cerebrali altamente resistenti ai raggi X. I protoni accelerati da Scent, invece, verranno estratti mediante una tecnica detta di *stripping* e avranno un'energia di circa 250 MeV: consentiranno così di curare anche i tumori localizzati fino a 35 cm all'interno del corpo umano. Scent rappresenta oggi un'alternativa commerciale alle grandi macchine acceleratrici (come ad esempio i sincrotroni) per l'utilizzo di protoni e anche ioni nella cura dei tumori. Esso è il frutto dell'esperienza pluridecennale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare nel campo della fisica degli acceleratori, unita a quella più recentemente sviluppata nel campo delle applicazioni della fisica al mondo della medicina.

Biografia

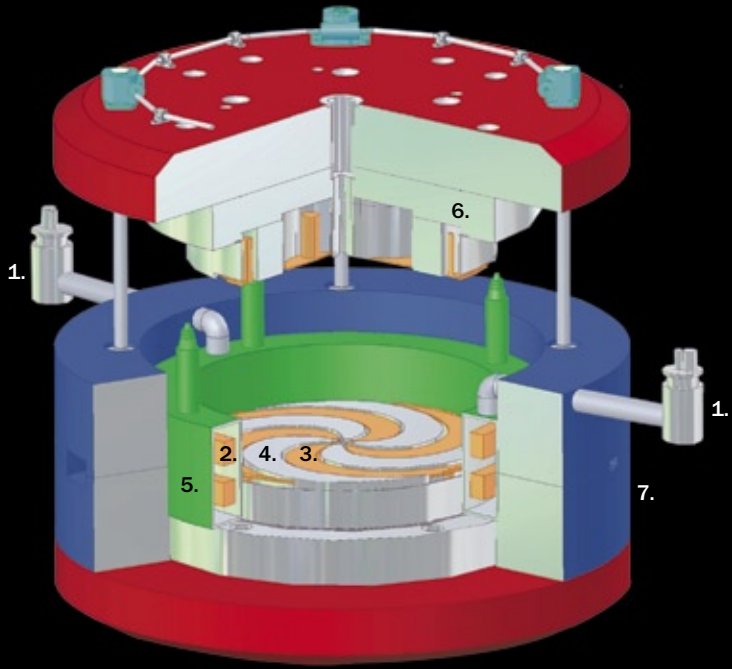
Luciano Calabretta è dirigente di ricerca Infn presso i Laboratori Nazionali del Sud (Lns) di Catania. Dal 2003 guida il gruppo di ricercatori che progetta il ciclotrone Scent.

Link sul web

www.lns.infn.it/accelerator/RDGroup/scent.html

[as]
Schema
del ciclotrone
superconduttore
Scent

- 1. ricondensatori di elio
- 2. bobine superconduttive
- 3. valli o valleys
- 4. creste o hills
- 5. criostato
- 6. polo superiore del ciclotrone
- 7. giogo di ritorno



Scent ha un diametro di 5 metri e pesa 350 tonnellate. Il campo magnetico massimo è di 4,2 Tesla, cioè circa 80.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre. Per mantenere le bobine (2) nello stato superconduttivo è necessario raffreddarle mediante elio liquido alla temperatura di -269 °C circa. Il criostato (5), che contiene le bobine, viene

inizialmente riempito con elio. Nelle condizioni operative l'elio viene mantenuto nello stato liquido dai ricondensatori (1). Per ottenere un fascio con dimensioni e intensità ottimali è necessaria un'azione di focalizzazione che viene generata dalla variazione dell'intensità dei campi magnetici lungo la traiettoria delle particelle: più elevata nelle creste

o hills (4) e più bassa nelle valli o valleys (3). Il campo magnetico generato tra le espansioni polari del ciclotrone (6) attraversa il piano su cui giacciono gli elettrodi. Le particelle accelerate si muovono su traiettorie ortogonali al campo magnetico. Infine, il giogo del ciclotrone (7) agisce in modo da non far disperdere le linee di campo magnetico.

Acceleratori in farmacia

Radiofarmaci per
vedere e curare.

di Mauro Bonardi

Fin dalla scoperta della radioattività, fu chiaro che gli isotopi radioattivi, ovvero i nuclei instabili che emettono particelle cariche e neutre, avrebbero trovato largo impiego in medicina sia a scopo di diagnosi che per la terapia. Questi, chiamati più propriamente *radionuclidi*, vengono infatti utilizzati oggi per marcare composti chimici, denominati *radiofarmaci*, che somministrati al paziente consentono di visualizzare con immagini bidimensionali o tridimensionali diverse parti del corpo, organi e tessuti. È possibile così identificare e diagnosticare precocemente patologie come tumori e sindromi degenerative del sistema nervoso centrale (morbi di Alzheimer e di Parkinson). Organi e cellule infatti sono dotati di recettori

estremamente specifici per determinate forme molecolari, che vengono “catturate” (*captate*) anche se presenti nella cellula in concentrazioni molto basse. Negli anni più recenti l'ideazione di radiofarmaci, in grado di legarsi specificamente e selettivamente a tali recettori, ha consentito di studiare questo meccanismo di captazione e di visualizzare il funzionamento (*metabolismo*) della cellula a livello molecolare e talvolta anche in tempo reale. D'altra parte anche dopo l'individuazione delle patologie, può essere di grande efficacia la somministrazione al paziente di composti marcati con radionuclidi, che emettono particelle cariche energetiche (elettroni, positroni, alfa). Queste irradiano in modo specifico e selettivo le cellule tumorali, risparmiando il tessuto sano circostante (*radioterapia metabolica*). Solo nel Nord America, con un'utenza di 300 milioni di abitanti, vengono eseguite ogni anno 20 milioni di indagini radiodiagnostiche mediante radiofarmaci (escluse radiografie e Tac), mentre sono centinaia di migliaia all'anno i trattamenti di radioterapia metabolica. Una caratteristica cruciale di un radiofarmaco è che in esso il radionuclide è presente in concentrazioni così basse

da non avere alcun effetto chimico o farmacologico sulla cellula pur conservando la necessaria capacità di irraggiamento. Una separazione radiochimica così sofisticata dei radionuclidi è possibile anche grazie agli acceleratori di ioni leggeri, che producono i radiotraccianti, irraggiando gli elementi naturali. I fasci di ioni leggeri (protoni, deuteroni e alfa) di energia opportuna sono ottenibili con acceleratori compatti installati con costi relativamente contenuti presso ambienti ospedalieri e di ricerca applicata. I più noti radionuclidi per la Pet (Tomografia ad Emissione di Positroni), una delle tecniche di diagnosi che produce immagini tridimensionali o mappe dei processi funzionali del corpo, vengono prodotti mediante irraggiamento in ciclotrone. A questi ne va aggiunto un numero elevato, tuttora in fase di studio o sperimentazione. Un'altra significativa classe di radionuclidi per radioterapia metabolica combinata con tecniche di *imaging*, come Spet e Pet, viene prodotta in un ciclotrone con metodi alternativi a quelli tradizionali basati sull'impiego di un reattore nucleare. Tali radionuclidi sono normalmente emettitori di particelle cariche e sono

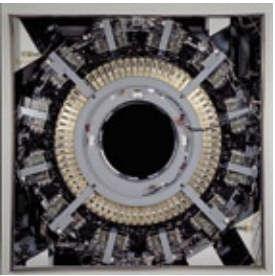
progettati per attribuire una dose da radiazioni elevata alle cellule patologiche del paziente, risparmiando al contempo le cellule sane. Essi trovano avanzate applicazioni in radioterapia metabolica, se utilizzati per marcare radiofarmaci in grado di penetrare nel nucleo cellulare per danneggiare irreversibilmente il Dna delle cellule neoplastiche. Negli ultimi decenni l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ha finanziato ricerche di punta, che utilizzano metodiche innovative e avanzate di produzione di tali radionuclidi, processamento radiochimico e controllo analitico e radioanalitico di qualità.

Biografia

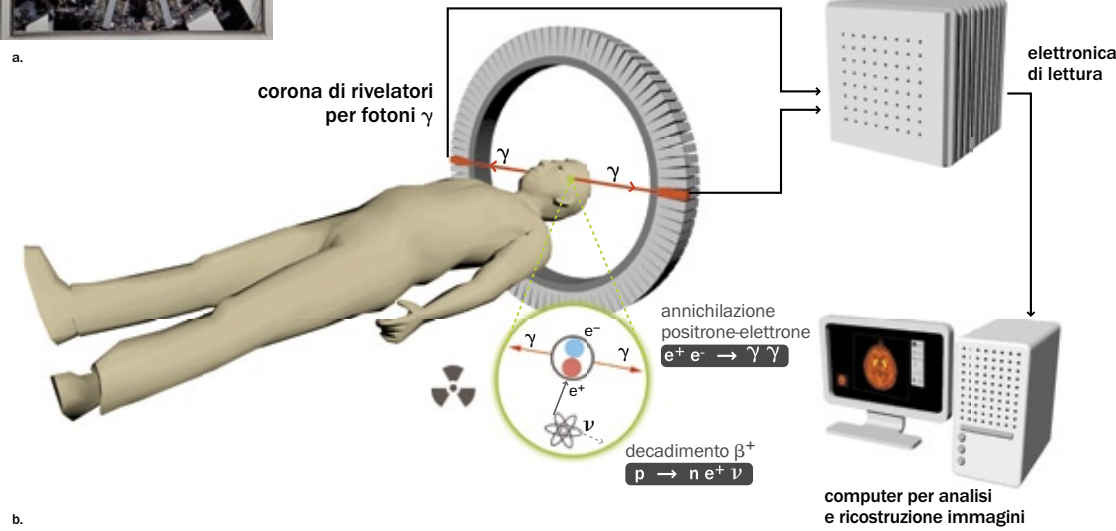
Mauro L. Bonardi è professore di Chimica e Radiochimica dell'Università di Milano e coordinatore di Gruppo V della sezione Infn di Milano. È stato responsabile di esperimenti Infn nel settore della produzione di radionuclidi con metodiche non convenzionali, per impieghi in tossicologia e biomedicina.

Link sul web

lasa.mi.infn.it



a.



b.

a. Corona di cristalli scintillatori che rivelano i fotoni di annichilazione nella Pet.
b. L'annichilazione dei positroni emessi dal radioisotopo produce due fotoni sulla stessa linea, rivelati da sistemi di rivelatori a scintillazione. L'analisi delle linee prodotte da tante annichilazioni, con software molto avanzati, permette la ricostruzione dell'immagine dell'organo in cui si trova il radioisotopo, di visualizzarne la funzionalità e fare diagnosi accurate.

[as] tecnologia e ricerca

Nata dalla ricerca, al servizio della medicina. Intervista a Yves Jongen, fondatore di Iba.

Intervista di Francesca Scianitti

Iba, Ion Beam Application, è un’azienda belga con una lunga tradizione di collaborazione con l’Infn nello sviluppo di nuove tecnologie per la diagnosi e la terapia dei tumori. Iba nasce dall’esperienza di un ricercatore, e da un sogno: quello di fare di un campo di ricerca affascinante, una risorsa e una fonte di scoperta a sostegno di una delle più grandi sfide della medicina moderna. Abbiamo chiesto al suo fondatore, Yves Jongen, di raccontarci la genesi di un’azienda che oggi vanta un primato mondiale.

[as] La sua carriera ha inizio in un laboratorio di fisica nucleare. Com’è nato il sogno di costruire strumenti per la medicina?

Il laboratorio di cui sono stato responsabile all’inizio della mia carriera, il Cyclotron Research Centre dell’Università Cattolica di Louvain-la-Neuve, era un laboratorio di fisica nucleare; il ciclotrone del laboratorio, però, era usato anche per applicazioni mediche. Mio padre, inoltre, era medico radiologo e da studente ebbi l’opportunità di occuparmi della manutenzione della sua strumentazione a raggi X: fu questo il mio primo contatto con i sistemi di presa d’immagini per la medicina. In seguito,

lavorando a Berkeley, ebbi l’occasione di riflettere sugli usi possibili dei ciclotroni e mi convinsi che il loro futuro doveva essere più nelle applicazioni in medicina che nella fisica nucleare. Tornato in Belgio, cominciai così a progettare un ciclotrone per la produzione di radioisotopi e dopo averlo brevettato nacque l’idea di creare una società per industrializzare e produrre ciclotroni: ecco com’è nata Iba. Fu il professor André Wambersie, responsabile del reparto di oncologia radioterapica dell’Università di Louvain, a invitarmi a fare il passo successivo, suggerendomi ciò di cui la medicina aveva davvero bisogno in quel momento: macchine per la terapia oncologica con i protoni.

[as] Com’è cresciuta Iba da allora?
Oggi Iba è una multinazionale con circa 1.400 dipendenti e un fatturato di circa 200 milioni di euro l’anno. Siamo leader mondiali nella produzione di strumenti per la protonterapia e fino a oggi abbiamo distribuito sul mercato 12 apparecchiature. Ma non è la nostra unica attività. Siamo impegnati anche nell’imaging molecolare e costruiamo ciclotroni per la produzione di beta isotopi; distribuiamo inoltre

agli ospedali molecole marcate per la tomografia a emissione di positroni e realizziamo apparecchiature per la dosimetria della radiazione (vd. “MatriXX: un altro strumento della ricerca al servizio della medicina” p. 22, ndr). Una divisione, poi, si occupa della produzione di fasci di elettroni molto potenti e di apparecchiature a raggi X per applicazioni industriali. Delle quattro aree di attività di Iba, la protonterapia costituisce circa il 25% del nostro mercato, una parte certamente rilevante. E anche se l’alto costo della strumentazione rimane oggi una forte limitazione alla sua diffusione, sempre più ospedali stanno decidendo di rivolgersi alla protonterapia. Un solo sistema, infatti, può trattare tra i 1.000 e i 2.000 pazienti l’anno ed è quindi molto efficiente.

[as] Gli strumenti per accelerare particelle sono progettati per investigare più a fondo nella materia; il loro primo obiettivo è quindi un contributo alla conoscenza. Che caratteristiche deve avere un ciclotrone per trovare applicazione in medicina?
La radioterapia fa una sorta di ritratto del tumore, come uno scanner, all’interno del corpo del paziente. Il fascio di particelle è utilizzato quindi come un pennello,

a.
Il ciclotrone installato nel 2005 al Proton Therapy Institute dell’Università della Florida, a Jacksonville, negli Stati Uniti. È operativo dal 2006 e oggi tratta 85 pazienti al giorno.

b.
Il ciclotrone per la protonterapia, installato nel febbraio del 2005 al National Cancer Center di Ilsan, in Korea. Ha trattato il primo paziente nel 2007.



a.



b.

modulandone l’intensità per conformare esattamente la dose di radiazione al bersaglio, alla massa tumorale. La capacità di fornire realmente al paziente la dose più corretta dipende dalla capacità di regolare molto rapidamente e con grande accuratezza il fascio di protoni o di ioni. E i ciclotroni sono decisamente gli acceleratori di particelle più adatti a questo scopo. I principi su cui si basano i ciclotroni per applicazioni mediche, poi, non sono diversi da quelli su cui si basano i ciclotroni per la ricerca. Cambiano solo alcune specifiche. Una macchina per la radioterapia lavora con uno spettro di particelle molto ristretto, quindi non è necessario che abbia prestazioni particolarmente flessibili. D’altra parte, deve essere molto semplice da usare in modo da poter essere utilizzata da personale meno qualificato: non vogliamo che il suo utilizzo richieda la presenza di fisici con il dottorato di ricerca, e per questo deve essere anche una macchina molto affidabile e sicura.

[as] Quale vantaggio può offrire a una compagnia solida e avviata come Iba la collaborazione con università e centri di ricerca come l’Infn?
A un’azienda non conviene mai pretendere

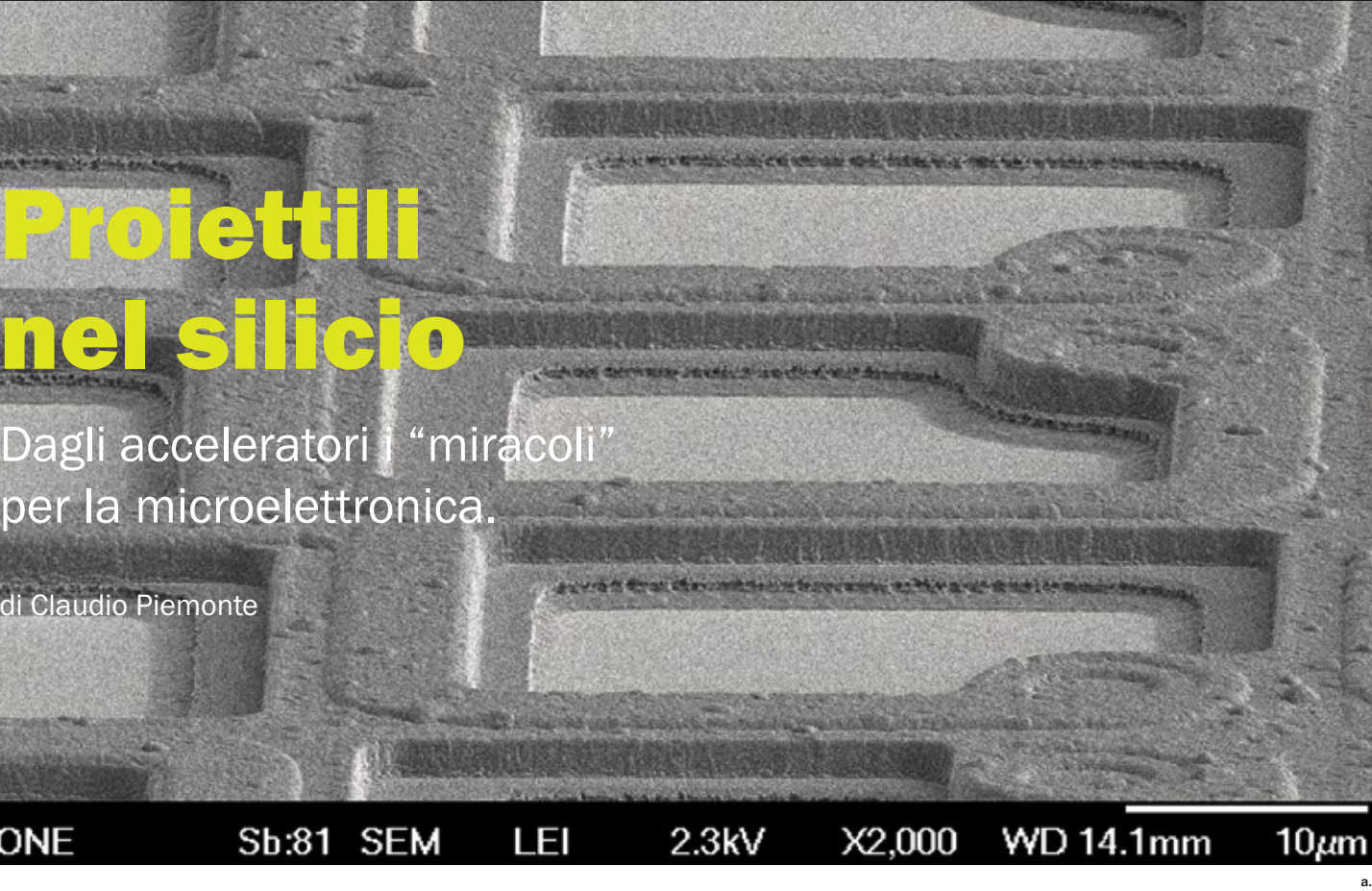
di sviluppare tutto internamente, conviene piuttosto collaborare con la ricerca di base: nelle università e nei centri di ricerca ci sono molte persone con idee nuove e interessanti. Ed entrambe le parti possono trarre giovamento dal lavoro di squadra: l’azienda beneficia delle buone idee dei ricercatori, i quali a loro volta guadagnano dall’esperienza dell’azienda nel risolvere problemi di natura tecnica e manageriale. Iba, poi, sta crescendo così rapidamente che abbiamo da sviluppare più progetti di quanti ne possiamo gestire; i ricercatori, d’altra parte, hanno spesso le idee ma non i soldi per sperimentarle e in questi casi l’azienda può contribuire a finanziare un prototipo. Per lo sviluppo di acceleratori, una collaborazione tra i ricercatori di un laboratorio come i Laboratori Nazionali del Sud dell’Infn, capaci di contribuire con nuove idee e conoscenze, e un’azienda affidabile con esperienza nella realizzazione di acceleratori, beh, credo sia davvero una bella squadra. Grazie alla collaborazione con l’Infn e a quella con altri laboratori nel mondo, oggi stiamo sviluppando un nuovo sistema per l’adroterapia con fasci di carbonio (vd. “Dall’Infn un ciclotrone ‘tascabile’ per l’adroterapia” p. 28, ndr).

[as] Guardando al passato, deve essere piuttosto soddisfatto di quello che ha realizzato...
Nel mondo moderno, creare una società è un’avventura possibile. Ma si può anche fallire. Adesso ho 60 anni e si approssima in qualche modo la fine della mia vita professionale; sono portato a guardare più verso il passato che verso il futuro, ma posso dire che creare un’impresa è una bellissima avventura. E non solo tecnica. È una sfida caratterizzata da molti aspetti umani: bisogna motivare le persone verso un obiettivo comune e creare un’equipe nella quale tutti si riconoscano. In paesi come il Belgio, ma anche in Italia, non è molto diffuso l’istinto che porta ad affrontare se stessi dicendo con convinzione: “prendo il futuro nelle mie mani e provo a creare qualcosa di nuovo”. Penso invece che sia qualcosa che vale la pena di fare e che può agire da forte stimolo nella vita. Se generalmente, poi, il progresso della fisica avviene in seno alla ricerca fondamentale, subito dopo i progressi ottenuti nella ricerca di base ricadono su applicazioni utili per l’umanità. E per un fisico è davvero esaltante poter dire: “sto lottando per debellare il cancro”.

Proiettili nel silicio

Dagli acceleratori i “miracoli” per la microelettronica.

di Claudio Piemonte



La svolta epocale inizia negli anni '50: è verso la metà dello scorso secolo infatti che, grazie all'evoluzione della microelettronica, si è attuato il passaggio dalle valvole termoioniche (delle dimensioni di una lampadina) ai transistor (oggi di dimensioni inferiori al millesimo di millimetro), cuore di tutte le tecnologie più avanzate. Queste, infatti, si basano essenzialmente su due fattori: sui transistor, appunto, e sull'integrazione sempre più spinta, cioè sulla produzione di dispositivi con un numero sempre maggiore di componenti in uno spazio sempre più ridotto. Ed è grazie agli acceleratori che è stato possibile il formidabile sviluppo della microelettronica moderna: grazie ad essi infatti si realizza l'impiantazione ionica. Ma che cos'è l'impiantazione ionica? È il processo per cui si innestano ioni di un certo elemento chimico in un solido, chiamato substrato, per modificarne le proprietà fisiche. L'impiantatore è essenzialmente un raffinatissimo acceleratore di particelle. È composto da una “sorgente”, che contiene un plasma di ioni della specie chimica di interesse, da una serie di elettrodi polarizzati ad alta tensione, che formano un pre-acceleratore lineare, i quali hanno la funzione di estrarre gli ioni dalla sorgente formando un fascio che viene immesso nello stadio successivo: il magnete analizzatore. Quest'ultimo ha il compito di selezionare le specie di interesse e respingere le altre. Le prime quindi passano attraverso una fenditura e vengono iniettate nella colonna di accelerazione. Qui gli ioni acquistano l'energia desiderata e il fascio viene focalizzato. L'ultimo stadio è rappresentato da una camera in cui è situato il bersaglio, ossia il campione da impiantare, nel nostro caso il silicio. A causa delle continue collisioni con gli atomi che costituiscono il materiale, lo ione perde gradualmente velocità fino a fermarsi in una certa posizione. Ogni ione, penetrando nel materiale, segue un percorso leggermente diverso: così la profondità di arresto fluttua leggermente. In ogni caso, maggiore è l'energia impartita dall'acceleratore e maggiore sarà la penetrazione dello ione nel solido. Qual è l'utilizzo dell'impiantazione ionica nella microelettronica?

I dispositivi microelettronici sono realizzati su particolari materiali chiamati semiconduttori (il più usato è il silicio) nei quali è possibile modificare localmente le proprietà elettriche introducendo opportuni elementi chimici, detti *droganti*. Fino agli anni '70 dello scorso secolo la principale tecnica di drogaggio era la diffusione termica. Essa consiste nel portare gli atomi di drogante vicino alla superficie del semiconduttore a elevate temperature (attorno ai 1.000 °C) in modo che una certa quantità passi dall'ambiente al semiconduttore stesso. Con questo metodo si possono realizzare dispositivi semplici che non richiedono una particolare collocazione degli atomi introdotti. Fu William Shockley (che nel 1948 inventò il transistor) ad avere l'idea di utilizzare un acceleratore per innestare il drogante. Ma essa,

a. Immagine di un fotomoltiplicatore al silicio realizzato all'Fbk-irst ottenuta al microscopio a scansione elettronica. Le celle quadrate che compongono il dispositivo hanno un lato di 50 micron. Il processo di fabbricazione di questo particolare sensore richiede 4 impiantazioni ioniche con elevata precisione nella quantità di ioni impiantati.



b. Facciata anteriore dell'impiantatore a media corrente, installato nella camera pulita della Fondazione Bruno Kessler di Trento. Si intravedono i due portelloni di caricamento dei substrati di silicio e il computer di controllo.

appunto, si concretizza solo a partire dagli anni '70. In questo periodo, infatti, l'acceleratore diventa uno strumento affidabile e relativamente compatto (richiede una superficie di circa 20-30 m²) grazie alla ricerca effettuata sugli acceleratori. In pochi anni questa tecnica soppianta la diffusione termica grazie ad alcuni fondamentali vantaggi: la possibilità di controllare precisamente la quantità di drogante introdotto, di collocare il drogante alla profondità voluta agendo sull'energia di impiantazione, di introdurre il drogante a basse temperature e l'ottima riproducibilità del processo. Sono tutte queste proprietà che hanno reso possibile lo sviluppo e il continuo perfezionamento di tutti quei dispositivi alla base della microelettronica moderna. I processi di fabbricazione odierni sono diventati così complessi da richiedere anche trenta impiantazioni successive di svariati elementi chimici. Le esigenze in termini di velocità di lavorazione e di energie di impianto sono estremamente pressanti. Per soddisfare tutte le necessità sono state sviluppate tre categorie di impiantatori: ad alta corrente, che permettono una elevatissima velocità di impiantazione a scapito di una riproducibilità non ottima; a media corrente, che garantiscono ottima risoluzione di tutti i parametri di impiantazione a scapito della velocità; ad alta energia che permettono di creare fasci di ioni ad altissima energia per impiantazioni profonde. Un altro traguardo importante raggiunto da queste macchine è quello di garantire altissima uniformità di drogaggio su aree molto grandi: si pensi che i substrati di silicio arrivano oggi a un diametro di ben 30 cm e possono contenere milioni di circuiti elettronici. Un punto ancora critico è la velocità del processo di impiantazione a bassissima energia. Questa caratteristica è fortemente richiesta nella fabbricazione di dispositivi con livelli di miniaturizzazione molto spinti, come ad esempio i più recenti microprocessori. Quindi, sebbene le prestazioni raggiunte da questi acceleratori siano elevatissime, c'è ancora spazio per ulteriori avanzamenti: staremo a vedere dove riusciremo ad arrivare in questa rincorsa tra ricerca e tecnologia.

Biografia

Claudio Piemonte lavora alla Fondazione Bruno Kessler di Trento dove si occupa dello sviluppo di sensori di radiazione a semiconduttore.

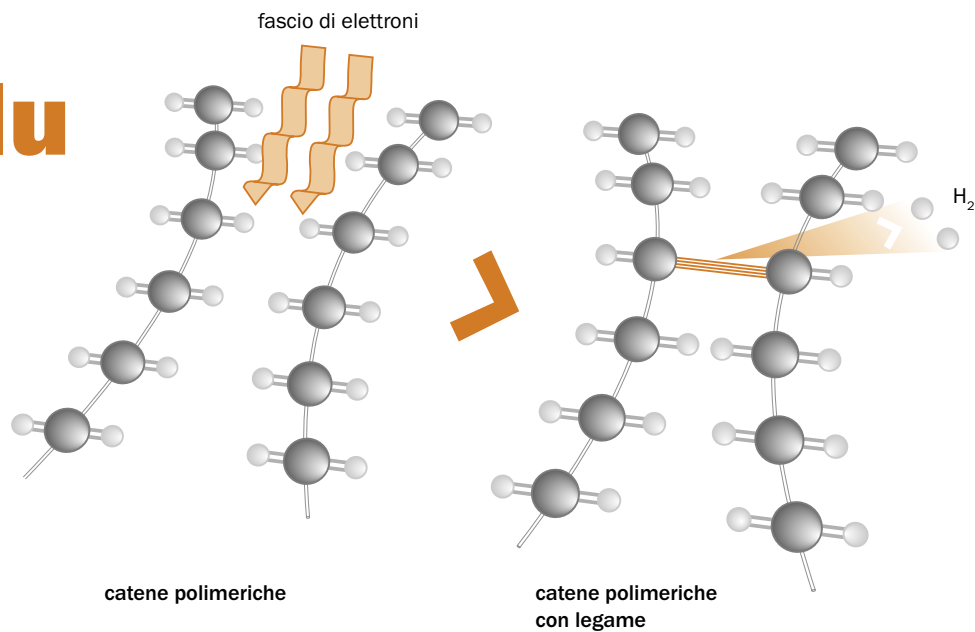
Link sul web

www.casetechnology.com/implanter/implanter.html

Elettroni in tuta blu

Acceleratori anche per l’industria.

di Amedeo Staiano

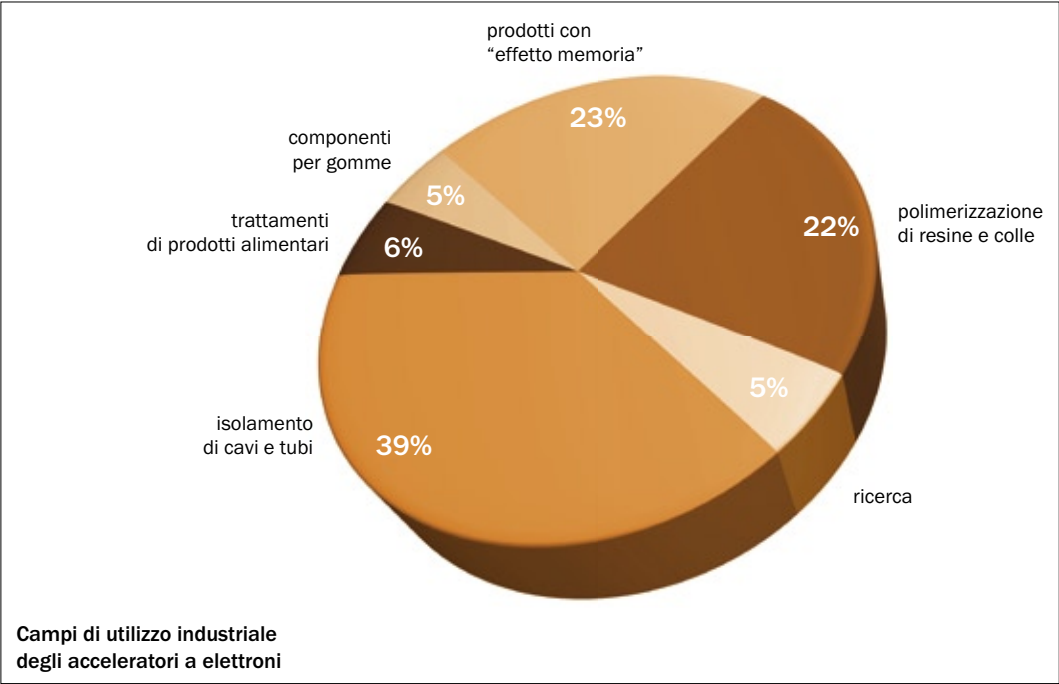


a.

Sterilizzare i contenitori per alimenti, abbattere i fumi dannosi delle centrali termoelettriche e trattare le acque di scolo: sono solo alcune delle più disparate attività che gli acceleratori di particelle ci permettono di realizzare. Una classe particolare di macchine acceleratrici, che ha avuto e ha tutt’oggi un florilegio di applicazioni industriali in una vasta gamma di settori, è quella degli acceleratori di elettroni (chiamati anche *e-beam* in ambito industriale), con energie di fascio che vanno da qualche centinaio di kiloelettronvolt (keV) a energie massime di 10 megaelettronvolt (MeV). Queste macchine possono essere utilizzate sia per il trattamento dei materiali, come vedremo tra poco, sia come strumento per la ricostruzione di immagini tridimensionali di strutture interne, e anche per l’analisi di difetti delle superfici metalliche. Nel caso di fasci di elettroni (e di fotoni, che si ottengono da questi ultimi a energie minime di qualche MeV, facendoli rallentare), i meccanismi di interazione della radiazione con la materia consentono lo sviluppo di due principali aree di applicazione, negli ambiti della biologia e della chimica. Nel primo caso, il trattamento con elettroni produce un’alterazione delle caratteristiche biologiche del campione trattato: è utilizzato per la sterilizzazione dei presidi medico-chirurgici e per trattare alcuni prodotti agroalimentari, per disinfeettare, degermogliare e

debutterizzare. In questi settori, soprattutto in quelli legati al trattamento degli alimenti, ogni paese impone i propri vincoli legislativi rendendo molto eterogenea la modalità di utilizzo di questa tecnologia. Nel secondo caso, la radiazione alla quale il materiale è sottoposto induce in esso delle reazioni chimiche che producono un’alterazione strutturale. Il materiale può così acquisire caratteristiche chimico-fisiche nuove. Il trattamento con *e-beam* si propone perciò in ambito industriale come alternativa ai trattamenti chimici e termici dei materiali che hanno spesso delle importanti limitazioni di applicabilità per le più svariate ragioni (tossicità dei prodotti, dimensioni dei campioni da trattare, efficienza e costo del processo, per fare alcuni esempi). Anche se esistono importanti applicazioni nel settore della vulcanizzazione della gomma, nella produzione di materiali compositi e, in generale, nel settore tessile, è l’industria dei polimeri a essere privilegiata. I processi chimici che avvengono all’interno di un polimero irradiato (per esempio il polietilene, che ha delle proprietà particolarmente adatte a questo tipo di trattamento) consistono in alterazioni delle catene molecolari in grado di amplificare o degradare la qualità e la quantità delle interconnessioni di queste lunghe molecole responsabili delle caratteristiche macroscopiche del materiale. È una complessa alchimia, che

a.
I processi chimici che avvengono all’interno di un polimero irradiato hanno nomi sofisticati come co-polimerizzazione, *grafting*, *curing*, degradazione, *cross-linking*. Questa è una rappresentazione schematica di un esempio di *cross-linking*, ovvero di giunzione trasversale di due catene polimeriche come risultato della ionizzazione indotta dagli elettroni che attraversano il materiale.

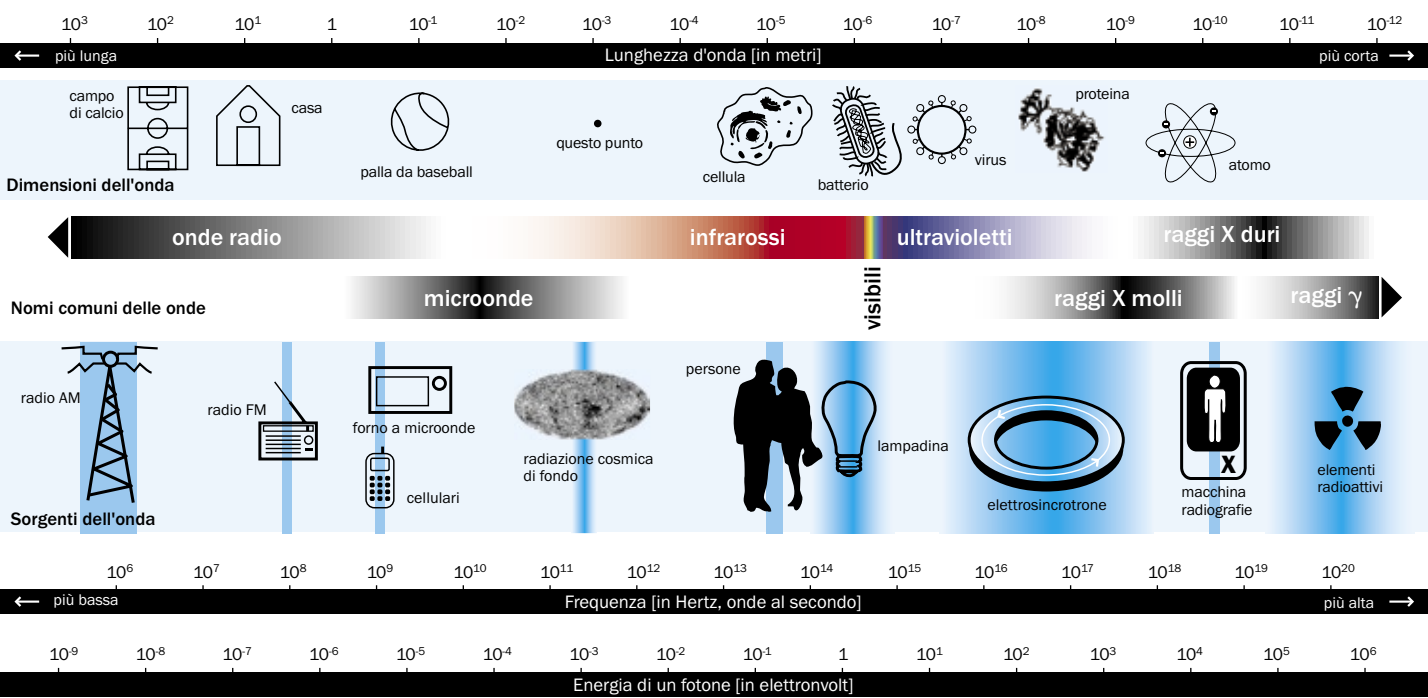


richiede la definizione di molti aspetti: dalla scelta dei polimeri e dei loro additivi, a quella dell’ambiente di irraggiamento (temperatura, presenza o meno dell’aria), dal rateo di dose (cioè la quantità della dose nell’unità di tempo), alla quantità integrata di dose rilasciata al campione. L’ottimizzazione del processo di trattamento porta alla realizzazione di prodotti ad alto contenuto di innovazione che si possono ottenere solo con questa tecnologia. È il caso, per esempio, dei cavi resistenti alle alte temperature o dei materiali dotati di “effetto memoria”, che sono cioè in grado di modificare la loro forma a seconda della temperatura, ritornando poi alla forma originaria. Esiste anche un terzo campo di applicazione del trattamento con *e-beam*, che al momento è in fase di sviluppo in alcune parti del mondo, come gli Stati Uniti, la Russia, il Giappone, la Cina e la Germania: è il settore ambientale. Impianti di *e-beam* ad alta potenza possono essere utilizzati per il trattamento delle acque e dei fanghi di scarico degli impianti industriali od ospedalieri, e per l’abbattimento di gas che vengono immessi nell’atmosfera a seguito di processi di combustione. In quest’ultimo caso l’abbattimento delle sostanze inquinanti, come l’anidride solforosa e gli ossidi di azoto, porta infatti alla produzione di solfati e nitrati di ammonio, che possono essere utilizzati come fertilizzanti in agricoltura. Oggi esistono

al mondo più di 1.250 acceleratori di elettroni dedicati ad applicazioni industriali, e si trovano soprattutto negli Stati Uniti, in Canada, in Russia e in Giappone. È sicuramente una tecnologia in espansione ma con caratteristiche che ne rallentano la crescita. Richiede, infatti, un alto livello di *know how* e di sperimentazione industriale, ma può rimanere in competizione con tecnologie più convenzionali, più inquinanti e invasive dal punto di vista ambientale ma, quando la legislazione ne consenta l’utilizzo, più economiche e accessibili.

Biografia
Amedeo Staiano è ricercatore Infn presso la sezione di Torino. Ha svolto attività di ricerca in fisica delle alte energie al Cern, allo Slac e al Desy. Attualmente coordina il gruppo Università e Infn di Torino impegnato nell’esperimento Cms al Cern.

Link sul web
www.to.infn.it/activities/misc/e-beam/home/_private/index.htm
www.ebeamservices.com/default.htm
www.metallurgicabresciana.it



a.

E luce fu

Elettroni accelerati per illuminare la materia.

di Emilio Burattini

Una carica elettrica accelerata emette radiazione elettromagnetica: questo fenomeno era noto fin dal 1887 quando fu studiato da Joseph Larmor e, successivamente, da Alfred Lienard che affrontò, in particolare, il caso della radiazione emessa da un elettrone in moto su una traiettoria circolare per effetto di un'accelerazione centripeta. Ma fu solo nel 1947 che un gruppo di ricercatori del *General Electric Research Laboratory*, coordinati da Frank Elder, osservò per la prima volta la parte visibile della radiazione emessa da un fascio di elettroni accelerati nel piccolo sincrotrone da 70 MeV del Laboratorio di Schenectady, a New York. Da quel momento in poi, la radiazione elettromagnetica emessa da particelle cariche in moto in un campo magnetico, ha preso il nome di *radiazione di sincrotrone* o *luce di sincrotrone*, indipendentemente dal tipo di acceleratore che la produce.

La potenza emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica da parte di elettroni accelerati, già oggetto di accurate ricerche teoriche negli anni '20 e '30, fu oggetto di studi sistematici solo dopo il 1947 e fu lo stesso gruppo di Elder che determinò, per la prima volta, la distribuzione spettrale, ossia la potenza trasportata dal fascio di radiazione in funzione della lunghezza d'onda. Nella seconda metà degli anni '50, la radiazione di sincrotrone era utilizzata in un piccolo numero di laboratori nel mondo per condurre esperimenti pionieristici, quasi esclusivamente nel campo della spettroscopia di assorbimento nella regione dei raggi X “molli”, che hanno lunghezze d'onda comprese tra i 20 e i 60 nanometri (un nanometro è un milionesimo di millimetro). Si utilizzava, però, la radiazione emessa da acceleratori la cui attività era dedicata quasi esclusivamente a esperimenti nel campo della fisica delle alte energie. Oggi la situazione è radicalmente mutata: migliaia di ricercatori, infatti, lavorano in circa 40 laboratori dove operano acceleratori progettati, costruiti e ottimizzati per produrre luce di sincrotrone. La luce di sincrotrone possiede delle caratteristiche che la rendono una sorgente di radiazione elettromagnetica unica e, per alcuni versi, insostituibile: alcune di queste sono la distribuzione spettrale continua e senza strutture, che si estende dal lontano

infrarosso ai raggi X, l'elevata intensità che, nella regione dei raggi X, può essere anche diversi ordini di grandezza più alta di quella di una sorgente convenzionale e l'elevata collimazione sul piano verticale. Osservando, infine, la radiazione lungo una direzione complanare al piano dell'orbita degli elettroni essa risulta polarizzata linearmente. Si può concludere che nessuna altra sorgente di radiazione elettromagnetica presenta, tutte insieme, le molteplici e straordinarie caratteristiche della luce di sincrotrone. Solo con essa è possibile, per esempio, ottenere intense righe monocromatiche di raggi X. Data la richiesta crescente di fasci di raggi X sempre più intensi, iniziò nel 1976, sulla base di una collaborazione internazionale, la realizzazione di strutture magnetiche multipolari a campo alterno installate sugli acceleratori che consentissero di ottenere o fasci di fotoni di energia e intensità più alta, come accade nel caso dei *wiggler*, o fasci di fotoni quasi monocromatici, come accade negli ondulatori (vd. “Fel, la luce del futuro” p. 40, ndr). Le linee di ricerca in cui si fa uso della luce di sincrotrone sono diventate davvero numerose: dalla scienza dei materiali alla biofisica, dalla cristallografia alla microingegneria, dalla radiologia alla biomedicina, campo questo in cui l'uso della luce di sincrotrone ha consentito, nell'ultimo decennio, di

raccogliere risultati di grande interesse scientifico. Un esempio è dato dal programma di ricerche nel campo della mammografia con luce di sincrotrone, appunto, partito agli inizi degli anni '90 ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. Qui, per la prima volta, usando un fascio di raggi X monocromatico si è dimostrato che la mammografia con luce di sincrotrone consente di ottenere immagini con elevato contrasto e grande risoluzione dove è possibile osservare, all'interno di una lesione neoplastica, strutture di dimensioni inferiori al millimetro permettendo in tal modo di arrivare a diagnosi precoci della eventuale patologia presente (vd. “Il meglio della fisica per la mammografia” p. 41, ndr). Il poter disporre, infine, di intensi fasci monocromatici di raggi X molli permette la realizzazione di strutture di dimensioni inferiori al micron, ossia al millesimo di millimetro, mediante processi litografici a raggi X. La moderna microingegneria realizza, infatti, con questa tecnica apparati funzionanti, come per esempio sensori, attuatori meccanici e motori.

Biografia
Emilio Burattini insegna fisica all'Università di Verona. Ha svolto la maggior parte della sua carriera scientifica ai Laboratori di Frascati nello studio e nelle applicazioni della radiazione di sincrotrone.

b.



a.
La radiazione elettromagnetica.

b.
Grazie alla luce di sincrotrone è possibile ottenere immagini di qualità migliore, utilizzando dosi di radiazione simili o inferiori a quelle utilizzate nella radiografia convenzionale. Il confronto tra le due immagini della lucertola parla chiaro: quella ottenuta da radiazione monocromatica di luce di sincrotrone con energia pari a 17 KeV permette di vedere perfino ciò di cui la lucertola si era nutrita.

[as] Fel, la luce del futuro

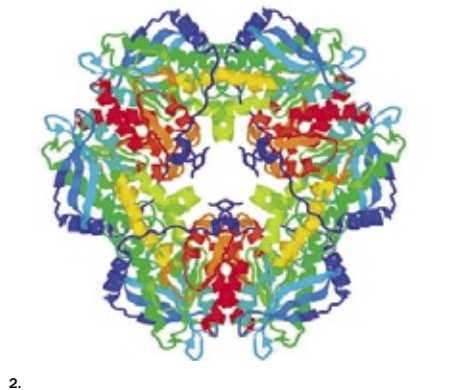
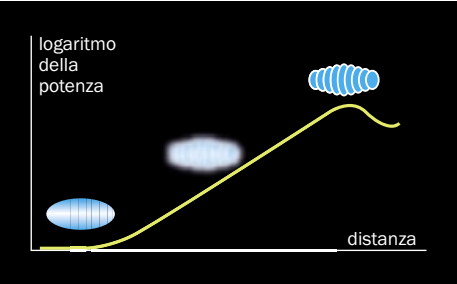
1.
Schema di funzionamento di un Fel. A sinistra, propagazione del fascio di elettroni all'interno di un ondulator. A destra, è riportato l'andamento della potenza emessa lungo l'ondulatore ed è, inoltre, rappresentato l'effetto di progressivo "impacchettamento" del fascio di elettroni.
2.
Immagine di una proteina "vista" con la luce di sincrotrone. Grazie a questo tipo di radiazione è stato possibile svolgere studi che hanno portato all'assegnazione di ben tre premi Nobel per la chimica. Le molecole per essere viste però devono essere prima cristallizzate e quindi non si trovano più nel loro stato naturale. Con il laser a elettroni liberi, invece, la cristallizzazione non sarà più necessaria grazie all'alto flusso di fotoni che questo dispositivo è in grado di fornire.

Sarà il super microscopio del futuro. Si chiama Fel (*Free Electron Laser*), è un fascio di luce di sincrotrone molto intenso che, per le sue particolari caratteristiche, consentirà di fotografare molecole e proteine durante la loro attività, cosa finora impossibile. Questo strumento favorirà dunque un grande avanzamento nella ricerca in diverse discipline, tra cui le nanotecnologie e la medicina. Il Fel è una sorgente di luce di sincrotrone in grado di produrre radiazione elettromagnetica monocromatica di lunghezza d'onda inferiore a un milionesimo di millimetro, ovvero raggi X. Questi dispositivi consistono essenzialmente in un lungo magnete, detto "ondulatore", caratterizzato da un campo magnetico sinusoidale prodotto da una serie di piccoli magneti ("calamite" lunghe circa 1 cm, piccole ma potentissime) con polarità alternata, in cui viene iniettato un fascio di elettroni di alta densità di carica. All'interno di questa struttura magnetica, gli elettroni emettono radiazione di lunghezza d'onda,

detta di *risonanza*, direttamente proporzionale al periodo dell'ondulatore e inversamente proporzionale al quadrato dell'energia degli elettroni (che in genere è maggiore di 1 GeV). Proprio quest'ultima dipendenza consente di variare la lunghezza d'onda cambiando l'energia del fascio iniettato nell'ondulatore. In una prima fase, detta di *letargia*, l'interazione tra il fascio di elettroni e la radiazione emessa dal fascio stesso mentre viaggia all'interno dell'ondulatore produce una ridistribuzione spaziale degli elettroni in tanti piccoli pacchetti, di lunghezza esattamente pari alla lunghezza d'onda di risonanza. In questo modo miliardi di elettroni si auto-organizzano per partecipare all'emissione di radiazione in fase tra loro, con una crescita esponenziale della potenza emessa. Il processo si arresta quando viene raggiunta la fase di saturazione, quando cioè gli elettroni hanno convertito in energia elettromagnetica una frazione (circa il 10%) della loro energia cinetica iniziale per cui non risulta

Biografia
Massimo Ferrario si occupa della fisica dei fasci di elettroni ad alta brillantezza. È responsabile per i Lnf del progetto Fel Sparx e coordina il gruppo di fisica di macchina del progetto Fel Sparx.

Link sul web
www.lnf.infn.it/acceleratori/sparx
www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls
xfel.desy.de
flash.desy.de
www.elettra.trieste.it/FERMI/



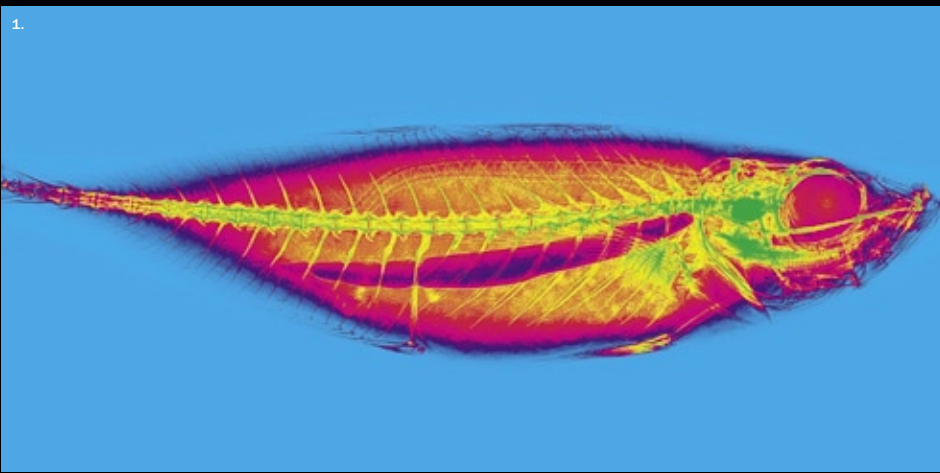
più soddisfatta la condizione di risonanza. Il flusso di fotoni emesso da un Fel è di parecchi ordini di grandezza maggiore di quello prodotto dalle attuali sorgenti di luce di sincrotrone a raggi X. In Italia si sta lavorando per realizzare due Fel, dotati di differenti caratteristiche e che quindi copriranno differenti regioni dello spettro di radiazione: il progetto Sparx, che produrrà radiazione tra 10 e 1 nm, risultato della collaborazione tra Infn, Cnr, Enea e Università di Roma "Tor Vergata" e finanziato in parte dal Miur, dalla Regione Lazio e dalla Comunità Europea. E il progetto Fermi, presso l'acceleratore Elettra di Trieste, che produrrà radiazione tra 100 e 10 nm, finanziato dal Miur, dalla Regione Friuli, dal consorzio Sincrotrone Trieste e dalla Comunità Europea. In futuro il nostro Paese, quindi, potrebbe essere uno dei pochi dotati di tutti i tipi più avanzati di sorgenti Fel, con notevoli vantaggi per la ricerca e per la tecnologia industriale. [Massimo Ferrario]

[as] Il meglio della fisica per la mammografia

La diagnosi precoce del cancro al seno salva la vita: per questo motivo si lanciano programmi di *screening* mammografico. A Trieste, negli ultimi due anni, le donne tra i 50 e i 70 anni sono state reclutate per una mammografia di controllo: su 10.000 esami, sono circa 100 i casi di tumore maligno. Per arrivare a questi 100 è, però, necessario un passo intermedio. Dopo il primo esame, infatti, sono circa 500 i casi in cui si manifestano anomalie sospette nelle immagini mammografiche: queste pazienti sono allora richiamate per successivi approfondimenti che, nella maggior parte dei casi, si concludono con la biopsia, un esame molto invasivo. Per evitarlo si cerca di migliorare la mammografia, agendo sia sulla sorgente dei raggi X che sul rivelatore (dal sistema schermo-pellicola a un rivelatore digitale d'alta risoluzione spaziale). Abbiamo costruito, al Laboratorio Elettra, la linea di luce Syrmep (*Synchrotron Radiation for Medical Physics*). Questa sorgente di raggi X è particolarmente adatta per i tessuti molto trasparenti, come quelli del seno. Rispetto alla mammografia tradizionale, la radiazione è molto più intensa e si può selezionare

l'energia del fascio più adatta al singolo esame, ottenendo così una riduzione della dose assorbita. Questa sorgente ha inoltre un alto grado di "coerenza": tutti i punti del fronte d'onda sono cioè "in fase". La rivelazione della lesione non si basa, perciò, solamente sul diverso grado d'assorbimento dei raggi X da parte dei tessuti, come nella mammografia convenzionale, ma anche sul fatto che la radiazione impiega tempi diversi ad attraversare tessuti diversi. I vari punti del fronte d'onda non sono più in fase e si ha una distorsione del fronte dell'onda emergente. Si produce così il cosiddetto *contrasto di fase*, che può essere osservato ponendo un rivelatore ad alta risoluzione spaziale in un'opportuna posizione dopo l'oggetto da radiografare. I dettagli sono più definiti ed i contorni della lesione meglio evidenziati, fornendo una migliore immagine per la diagnosi. Oggi, questo tipo di mammografia non si avvia a sostituire la mammografia convenzionale, ma viene proposto come approfondimento in casi d'incertezza: utilizzarlo come primo esame non è possibile per i limiti posti dalle strutture disponibili in relazione all'alto numero delle potenziali utenti. [Edoardo Castelli]

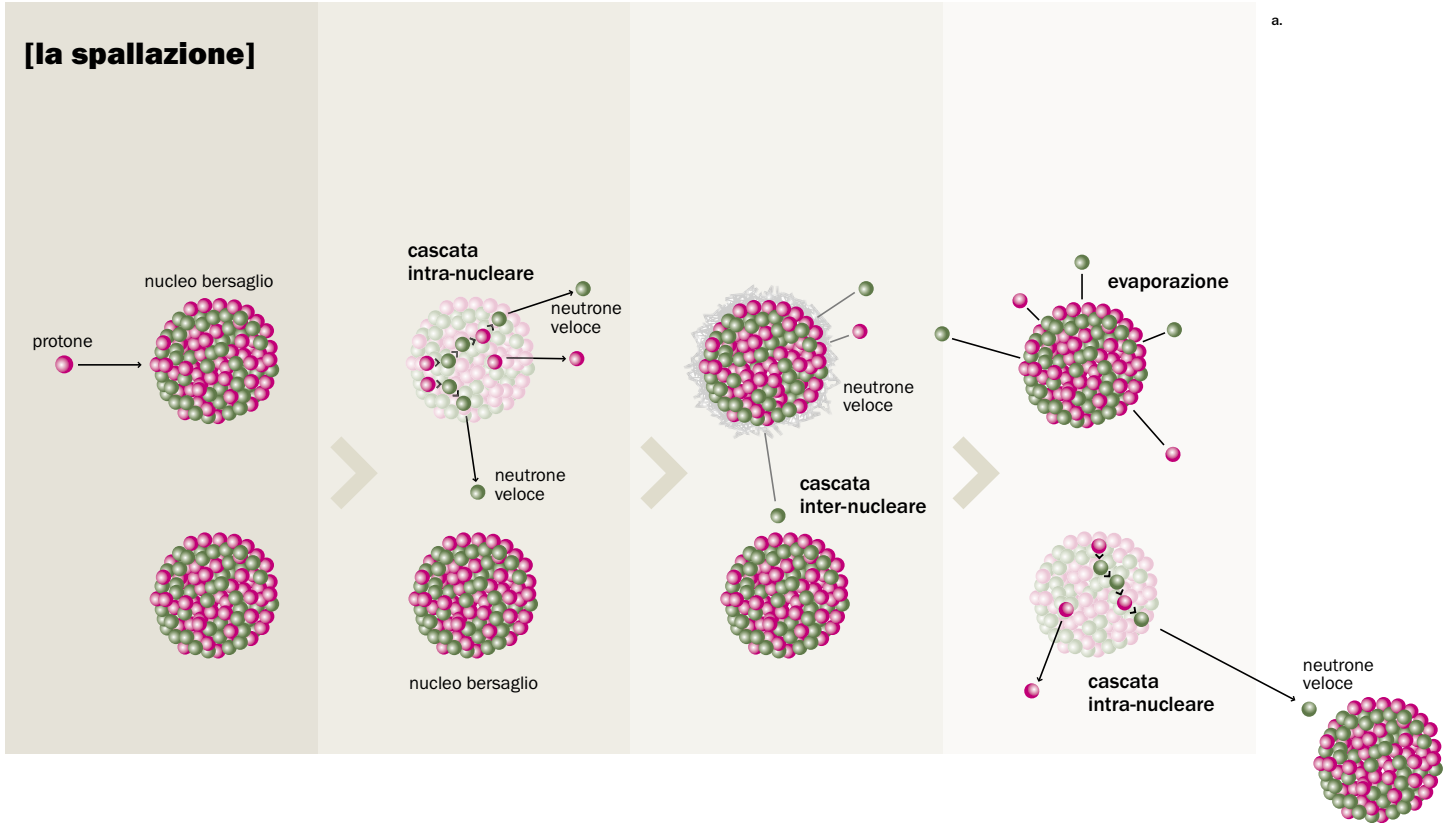
1.
Radiografia di un pesce con luce di sincrotrone in contrasto di fase realizzata dall'esperimento Syrmep della Sezione Infn di Trieste.
2.
Radiografie con raggi X di una spiga, in contrasto di fase (immagine di sinistra) e in assorbimento (immagine di destra). Le radiografie sono state raccolte presso la linea di luce di sincrotrone Syrmep di Trieste, grazie al rivelatore digitale Picasso, sviluppato dall'Infn. È evidente come nel primo caso l'immagine sia molto più nitida e dettagliata.



Biografia
Edoardo Castelli svolge attività di ricerca in fisica medica, dedicandosi all'imaging in mammografia digitale con radiazione di sincrotrone.

Link sul web
www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso.html
www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso/la-collaborazione-picasso.html
www.ts.infn.it/physics/esperimenti/picasso/alcune-immagini.html
www.elettra.trieste.it





Neutroni, sonde e alchimia

Dai componenti dei nuclei atomici strumenti per radiografare la materia e trasmutare scorie radioattive.

di Paolo Pierini

Trasformare le scorie nucleari in rifiuti meno radioattivi? Ovvero, trasformare un elemento chimico in un altro? Grazie agli acceleratori di particelle, e ai neutroni da essi prodotti, ciò oggi è possibile, anche se l'antico sogno degli alchimisti (di trasformare i metalli in oro) purtroppo non è praticabile! Il processo fisico alla base di questa *trasmutazione* di elementi è quello della *spallazione* (frantumazione di nuclei pesanti colpiti da protoni o neutroni). Come spesso accade, è una delle possibili applicazioni di ricerche che scaturiscono invece dalla sete di conoscenza degli scienziati, volti a indagare le proprietà dei materiali e dei composti chimici. Per spiegare queste proprietà è necessario stabilire la natura, la posizione e i movimenti degli atomi che costituiscono la struttura cristallina o molecolare dei materiali. Per fare ciò si usano opportune

sonde che, in virtù delle leggi che regolano la loro interazione con il campione da analizzare, consentono la deduzione di queste informazioni. Possibili sonde sono i raggi X (sia quelli prodotti da sorgenti convenzionali che quelli della luce di sincrotrone) e i neutroni, i quali assieme ai protoni compongono il nucleo degli atomi dei vari elementi. L'investigazione della materia con sonde neutroniche è complementare a quella possibile con i raggi X. Infatti, i raggi X interagiscono con gli elettroni che orbitano attorno al nucleo dell'atomo, quindi rendono difficile l'identificazione di atomi leggeri, con pochi elettroni, presenti in strutture complesse (come ad esempio gli atomi di idrogeno presenti nei materiali biologici). Inoltre, la loro penetrazione all'interno del campione da analizzare è limitata e non è possibile esplorare il materiale in profondità. I neutroni, invece, interagiscono con gli atomi tramite forze nucleari a cortissimo raggio e danno quindi informazioni sulla distribuzione nello spazio dei nuclei e non degli elettroni (come avviene con i raggi X). In questo modo consentono lo studio del materiale in maniera non distruttiva. Dirigendo un fascio di neutroni sul campione da analizzare, molti di questi lo attraversano inalterati, ma alcuni subiscono delle deflessioni (*scattering*) nelle interazioni con i nuclei atomici del materiale, anche in profondità. Tramite opportuni rivelatori, i neutroni deflessi vengono contati, misurandone energia e distribuzione spaziale. È l'analisi di queste informazioni che consente agli scienziati di ricostruire la struttura molecolare o cristallina dei campioni. Inoltre il neutrone è dotato di un "momento magnetico", si comporta cioè come un microscopico ago di bussola: fasci opportunamente "polarizzati" (formati cioè da neutroni con momenti magnetici allineati tra loro) costituiscono una sonda efficace per studiare le proprietà microscopiche dei materiali magnetici. Ad esempio, se i moderni hard disk sono in grado di registrare enormi quantità di informazione, lo si deve anche agli studi dei film sottili magnetizzabili che li ricoprono, eseguiti con neutroni. Le applicazioni dei neutroni come sonda raggiungono molti campi assai diversi tra loro, dalla biologia alla fisica, dalla sintesi di materiali innovativi

alla farmacologia: per il loro lavoro pionieristico nell'uso dei neutroni nello studio della materia condensata, nel 1994 C.G. Shull e B.N. Brockhouse venivano insigniti del Premio Nobel. Ma come si ottengono fasci intensi di neutroni? Esistono due possibilità: tramite fissione in reattori nucleari o per mezzo di acceleratori di particelle. In un acceleratore di particelle, i neutroni vengono generati bombardando con un fascio di protoni di alta energia un metallo a elevato numero atomico. Quando uno dei protoni incidenti penetra nel nucleo, avvia una serie di collisioni tra i neutroni e i protoni che lo costituiscono, cioè una cosiddetta *cascata intra-nucleare*. Alcuni di questi neutroni e protoni con energie sufficientemente alte possono uscire dal nucleo ed eventualmente colpire altri nuclei (*cascata inter-nucleare*). Il nucleo originale può rimanere in uno stato eccitato ed effettuare la transizione a uno stato stabile "evaporando" altri neutroni o protoni. Questo processo è detto di spallazione (vedi figura a). Se i protoni hanno un'energia di circa 1 GeV la spallazione è estremamente efficiente, poiché genera 20-30 neutroni per ogni protone incidente. Sebbene questo sia un modo di produrre neutroni più costoso rispetto a una reazione a catena di fissione in un reattore nucleare, si ha il vantaggio che il fascio arriva al campione solo durante brevissimi intervalli temporali anziché "in continua", e ciò permette una accurata misura dell'energia del singolo neutrone proiettile. I neutroni così prodotti hanno energie fino a centinaia di MeV. Ma una particella è anche un'onda di "de Broglie", con lunghezza d'onda che cresce al diminuire dell'energia: a queste energie, il loro comportamento ondulatorio corrisponde a lunghezze d'onda troppo corte per lo studio della materia, essi quindi devono essere fortemente rallentati tramite opportuni elementi moderatori (acqua o idrogeno liquido a temperature criogeniche), fino a raggiungere energie comprese tra i 5 e 25 millesimi di eV. Questa regione d'energia corrisponde a lunghezze d'onda particolarmente adatte a esplorare le strutture cristalline o le oscillazioni degli atomi e delle molecole che costituiscono i campioni da analizzare. Nel mondo, ci sono vari laboratori

che producono fasci di neutroni con acceleratori. Le maggiori intensità di neutroni prodotti si hanno negli Stati Uniti a Oak Ridge, dove dal 2006 si trova la *Spallation Neutron Source* (Sns), pilotata da un acceleratore lineare superconduttivo da 1 GeV. In Inghilterra, invece, nel laboratorio *Rutherford Appleton Laboratory* (nei pressi di Oxford), dove in onore della dea egiziana della fertilità (Iside) la sorgente di neutroni è stata denominata *Isis*, il fascio viene prodotto grazie a un sincrotrone da 800 MeV. Vari progetti sono al vaglio, in Giappone e nel nostro continente a livello comunitario. Oltre a dare la possibilità di capire la struttura della materia, il processo di spallazione può essere sfruttato anche per applicazioni nel campo dell'energia nucleare, settore essenziale per l'economia mondiale. In particolare, è al centro di una moderna rivisitazione del vecchio sogno degli alchimisti di trasmutare gli elementi. Questa volta però non si tratta di trasformare gli elementi nel nobile metallo, ma di cercare di risolvere il problema dello stoccaggio geologico delle scorie nucleari, attive per milioni di anni, senza contaminare la biosfera. Se si bombarda, infatti, un elemento con un fascio di neutroni, si può produrre un cambiamento all'interno del nucleo atomico tale da farlo "trasformare" in un altro elemento (la trasmutazione). Un elevato flusso di neutroni è quindi in grado di "trasmutare" le scorie a lunga vita media prodotte dai reattori convenzionali in materiali ancora radioattivi, ma con vita media assai più breve. Inoltre, queste scorie possono essere riciclate, ossia utilizzate come combustibile in speciali reattori nucleari a fissione, gli *Accelerator Driven Systems* (Ads). A differenza dei reattori convenzionali, in un Ads la reazione a catena, che produce l'energia nucleare, non procede autonomamente, ma necessita della sorgente neutronica esterna fornita dall'acceleratore tramite spallazione. La sicurezza deriva dunque dal fatto che, se la sorgente neutronica viene interrotta, la reazione nucleare non è in grado di proseguire autonomamente e il reattore si arresta immediatamente (vd. "Come funzionerà la trasmutazione delle scorie radioattive e la produzione di energia elettrica in un Ads?" p. 44, ndr). L'industria nucleare e i paesi europei, in

programmi finanziati da Euratom e con la significativa presenza dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare conducono studi di fattibilità di tali progetti, anche con la costruzione di prototipi, per sviluppare una nuova modalità di produzione di energia nucleare, affidabile e rispettosa dell'ambiente. Questo consentirebbe di non delegare alle generazioni future la problematica di convivere con scorie potenzialmente nocive per milioni di anni.

Biografia

Paolo Pierini è ricercatore Infn della sezione di Milano e svolge la sua attività presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (Lasa). La sua attività è rivolta allo sviluppo degli acceleratori superconduttivi per elettroni e protoni nell'ambito di vari progetti e collaborazioni internazionali.

Link sul web

www.sns.gov
www.isis.rl.ac.uk
neutron.neutron-eu.net/n_ess
nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1994/
www.sckcen.be/myrrha/home.php
www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html



[as]
Come funzionerà
la trasmutazione
delle scorie
radioattive e la
produzione di
energia elettrica
in un Ads?

Le scorie nucleari, provenienti da reattori convenzionali, inizialmente subiscono un processo di separazione chimica: dalle barre esauste di combustibile viene recuperato l'uranio (che verrà riutilizzato per produrre nuovo combustibile nei reattori convenzionali) e vengono separati i prodotti di fissione (che, direttamente o dopo una fase di "raffreddamento", vanno nel deposito geologico sotterraneo in contenitori sigillati) dagli elementi transuranici. Questi ultimi vengono ulteriormente trattati e trasferiti nel cuore dell'Ads, dove verranno utilizzati come combustibile

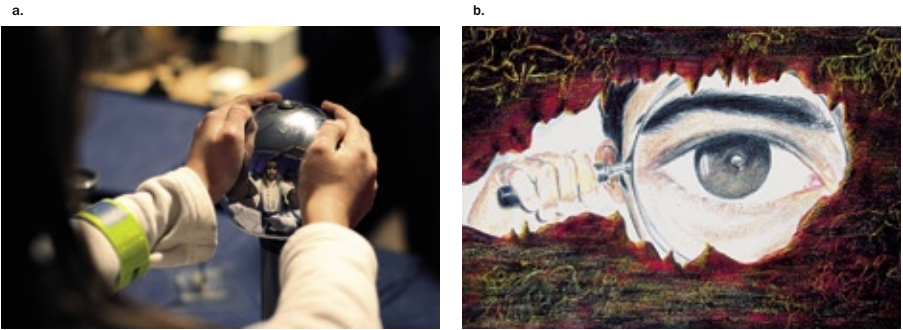
e trasmutati mediante fissione. I prodotti in uscita dall'Ads vengono parzialmente riciclati. Ciò che resta viene sigillato in speciali contenitori che, direttamente o dopo una fase di raffreddamento in superficie, vengono depositati nel sottosuolo. L'acceleratore lineare, che per spallazione produce i neutroni necessari alla fissione degli elementi in questo reattore intrinsecamente più "sicuro", viene alimentato da una porzione dell'energia elettrica prodotta dal sistema stesso, e il resto dell'energia va sulla rete elettrica generale.

[as] incontri

Notte bianca della ricerca.

di Catia Peduto

Ritrovarsi con i capelli dritti, non per la rabbia, ma per colpa di un flusso di elettroni, è possibile, almeno quanto correre su un liquido. Non ci sono trucchi: si tratta di alcune semplici esperienze scientifiche che tutti hanno potuto sperimentare durante la seconda "Notte Europea della Ricerca", promossa dalla Commissione Europea e organizzata il 28 settembre scorso in contemporanea in 40 città di tutta Europa. In Italia si è svolta a Torino (con Alessandria, Biella e Vercelli), Frascati – dove l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è stato l'organizzatore, trasformando la città alle porte di Roma in una grande "piazza della ricerca" – a Napoli e in cinque città della Puglia. Visite ai laboratori e nei musei, convegni e concerti, mostre interattive e spettacoli teatrali: questo e tanto altro è stata la notte dedicata alla ricerca, grazie alla partecipazione di ricercatori di università ed enti scientifici, mossi dall'obiettivo comune di far conoscere la propria attività di ricerca al grande pubblico e ai più piccini. A Torino il cuore dell'iniziativa si trovava in Piazza Vittorio Veneto, che sin dal primo pomeriggio è stata affollata da persone di tutte le età fino a raggiungere un numero di 8.000 visitatori. L'Infn vi ha proposto per i grandi "Dai Quark alla particella di Higgs: un viaggio nell'infinitamente piccolo", un affascinante percorso nel cuore di Lhc (*Large Hadron Collider*), l'acceleratore in costruzione al Cern a Ginevra. Si potevano toccare con mano alcuni pezzi, realizzati dai ricercatori torinesi per gli esperimenti Alice e Cms, che si trovano nel lungo tunnel sotto la città svizzera. E poi giocare con un modello di "acceleratore" per capirne il funzionamento. Nello stand dell'Infn dedicato ai più piccoli, invece, i ragazzi hanno potuto sperimentare sulla propria pelle "Le magie della Fisica", in particolare il "rizzacapelli" elettrico (un generatore di Van de Graaff) e altre macchine (come i motori di Stirling), realizzate con materiali poveri per esemplificarne i principi di funzionamento. Anche le altre realtà attive in campo scientifico nell'area piemontese, tra cui soprattutto l'Università di Torino, hanno organizzato divertenti attività per grandi e piccini. Una caccia al tesoro, incentrata sulla scoperta dei grandi scienziati del passato, ha tenuto impegnati i più piccoli per tutto il pomeriggio. Grande successo ha riscosso la competizione "Disegna un ricercatore", che ha mobilitato 228 "artisti" provenienti dalle scuole elementari e superiori del Piemonte, le cui opere successivamente sono state esposte per un paio di settimane presso il Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino. Tutti hanno potuto gustare il "gelato all'azoto" e chi non aveva timore di tornare a casa imbiancato ha potuto lanciarsi nella vasca con acqua e amido di mais messa a disposizione dal Dipartimento di Fisica Generale dell'università: un composto bianco e denso con strane proprietà, che se colpito con forza e velocità tiene a galla. Bisognava quindi camminare velocemente sul liquido, altrimenti vi si sprofondava dentro come nelle sabbie mobili!



a.
Una bambina si fa rizzare i capelli dal generatore di Van de Graaff nello stand dell'Infn: tenendo le mani sul generatore elettrico, l'elettricità si propaga in tutto il corpo e fa venire i capelli dritti!

b.
Disegno della prima classificata nella competizione "Disegna un ricercatore", Agnese Iannaccone. Agnese rappresenta storia e scienza attraverso il tempo, con una tecnica che unisce antichi graffiti all'immagine moderna.



[as] con altri occhi

La fisica, più magica di Harry Potter.

di Bruno Arpaia, scrittore

L'avevo quasi giurato a me stesso. Dopo aver impiegato sei anni, tra lavoro di documentazione e scrittura vera e propria, per mettere giù le cinquecento pagine del mio ultimo romanzo, mi ero solennemente ripromesso di cercare di rendermi la vita più facile. Giurin giurello: da quel momento in poi, avrei scritto libri più brevi, con storie più “facili” e soprattutto che non avessero bisogno di tante estenuanti ricerche e di tanta documentazione. Ma i romanzi si scrivono per passione, inseguendo una storia o un'idea travolgente, un'ossessione. E se c'era una cosa che negli ultimi anni era riuscita ad appassionarmi, a ossessionarmi davvero (più della letteratura, più della storia, più della politica), be', quella era la fisica. Solo la fisica era riuscita a tenermi sveglio la notte cercando di farmi una vaga idea di cosa fossero i gruppi di Lie o saccheggiando il sito di ArXiv per leggerne avidamente gli articoli, ovviamente saltando le equazioni complicate. E così,

contravvenendo a ogni promessa, a settembre dell'anno scorso mi sono ritrovato a Ginevra, in una stanzetta del foyer del Cern, senza sapere ancora bene cosa fare, senza una storia o una trama in testa, ma con la ferrea volontà di scrivere un romanzo che avesse al centro la fisica. La fisica di oggi, quella dei grandi misteri da risolvere. La fisica che cerca di capire perché la materia di cui siamo fatti costituisca solo il quattro per cento dell'universo e sia, in definitiva, solo “un'impurità poco diffusa nel cosmo”. La fisica che cerca di sviscerare il meccanismo che fornisce la massa alle cose e agli esseri viventi. La fisica che ricrea spezzoni dell'universo di quattordici miliardi di anni fa e prova a spingersi oltre il Modello Standard e i suoi problemi. La fisica, più magica di Harry Potter, del mondo quantistico. La fisica che ascolta e decifra i deboli segnali che arrivano da galassie lontanissime. La fisica che immagina cosa succede a scale enormi o minuscole, la fisica che vuole scoprire cosa siano davvero lo spazio e il tempo. La fisica che si spinge alle frontiere ultime delle nostre conoscenze e dei nostri limiti. E così, caschetto in testa e scarpe chiuse ai piedi, accompagnato da persone meravigliose, sono sceso a cento metri sotto terra, nelle viscere dei quattro esperimenti principali di Lhc. Inutile dire che sono rimasto a bocca aperta di fronte a quelle macchine alte come palazzi di sei piani, formate da centinaia di migliaia di pezzi che devono incastrarsi tra loro con la precisione di pochi micron, collegate da migliaia di chilometri di cavi a una rete di computer sparsa in tutto il mondo, necessaria a processare quell'immensa quantità di dati. E tuttavia, se devo dire la verità, altre cose mi hanno colpito con più forza, lì al Cern. Prima di tutto, la trasparenza e la democrazia della scienza, grazie alle quali anche l'ultimo arrivato, anche uno stupido qualunque come me, può ficcare il naso dappertutto e vedere i ritrovati tecnologici più avanzati, che normalmente sarebbero oggetto di contese a suon di milioni di euro tra agguerrite aziende multinazionali. È una boccata d'aria pura, un evento meraviglioso, in tempi in cui si brevetta perfino il genoma umano e in cui finanche l'acqua da bere può diventare un affare nelle mani dei privati. Non basta: in tempi freddi e disincantati come quelli che ci troviamo a vivere, mi hanno colpito anche la passione con cui quegli scienziati e quelle scienziate si dedicano al proprio lavoro, la sete di conoscenza allo stato puro che li muove, il trasporto con cui parlano del bosone di Higgs o della luminosità della macchina che si augurano di raggiungere,

l'ostinazione con cui sperano di contribuire a rischiare, almeno in piccola parte, il buio che ancora avvolge le nostre conoscenze sulla realtà, la disponibilità, la curiosità e l'interesse nei confronti di chi, come me, viene forse da un mondo completamente diverso dal loro. Come diceva Isidor Isaac Rabi, “è un vero peccato che il grande pubblico non abbia alcuna possibilità di farsi un'idea della grande eccitazione, intellettuale ed emotiva, che accompagna le ricerche nei campi più avanzati della fisica”. Be', adesso, specie dopo quella settimana trascorsa al Cern, il mio scopo (ambizioso quanto difficile) è proprio questo: scrivere un romanzo che restituisca al “grande pubblico” almeno un assaggio di quell'eccitazione e di quella passione. Non è assolutamente detto che ci riesca. Ma mi piacerebbe almeno trasmettere l'idea che non sono poi forse tanto diversi gli occhi con cui i fisici e i romanzieri guardano il mondo: se uno scrittore usa ingenti dosi di immaginazione, un fisico non è da meno. Anzi. Un qualunque teorico, oggi, ha forse molta più immaginazione dei migliori narratori. Se così non fosse, sarebbe stato impossibile elaborare le arditissime ipotesi che sono alla base di molta della fisica del XXI secolo, quella che viene prefigurata oltre il Modello Standard, e che, solo una decina d'anni fa, sembravano confinate nel regno della fantascienza. E del resto, come è accaduto ai tempi di Galileo e Keplero, e poi in quelli di Einstein o di Schrödinger, l'indagine scientifica sulla realtà ha spesso completamente sovvertito anche l'immaginario degli uomini comuni nella loro vita di tutti i giorni; viceversa, l'immaginario letterario e artistico ha fornito molti spunti ai fisici per comprendere più a fondo la realtà. Certo, a differenza dei miei amici e delle mie amiche che lavorano a Lhc, io non riuscirò mai a “vedere” un evento sullo schermo di un computer sapendo decifrare quella specie di complicato fuoco d'artificio di processi, tracce, decadimenti, *jet* ed energie mancanti; io non saprò mai capire fino in fondo, dopo una collisione di protoni sparati quasi alla velocità della luce, ciò che è accaduto davvero nel mondo minuscolo e segreto delle particelle elementari, così simile a quello che ha dato inizio all'universo. Ma la passione e l'immaginazione che spingono me a scrivere romanzi e un fisico a esplorare gli angoli più remoti della materia, dello spazio e del tempo, mi sembrano intessute della stessa sostanza, dello stesso desiderio di conoscenza, delle stesse profondissime domande sulla nostra vita in questo sperduto pianeta di una piccola stella di una galassia periferica del cosmo.

La fisica fa luce sulle reliquie_La tonaca attribuita a San Francesco d'Assisi custodita nella chiesa di S. Francesco a Cortona (Arezzo) risale a un periodo compatibile con la vita del Santo. Mentre quella conservata a Santa Croce a Firenze risulterebbe di almeno 80 anni successiva alla morte del Santo e quindi non potrebbe essergli appartenuta. Questa scoperta è stata possibile grazie ad analisi realizzate con l'acceleratore Tandem del Labec, il laboratorio di Firenze dedicato agli studi sui beni culturali, realizzato con il supporto importante dell'Infn. La tecnica usata per la datazione è quella del carbonio 14. Alcuni campioni di tessuto di minime dimensioni sono stati prelevati da varie parti delle due tonache, per evitare dubbi dovuti a rattoppi eseguiti in epoche successive. Da ciascun campione è stato estratto solo il carbonio, ottenendo una pastiglia di grafite del peso di 0,8 milligrammi circa. Ogni pastiglia è stata trattata con l'acceleratore di particelle per ricavarne, separandoli, i vari isotopi del carbonio, ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C : è dal rapporto delle loro quantità che si riesce a risalire all'epoca del reperto. Sono misure delicatissime: il rapporto fra gli isotopi ^{14}C e ^{12}C , infatti, è dell'ordine di uno ogni 1.000 miliardi, o anche meno. [a. v.]



Piove dai buchi neri_I fisici dell'Osservatorio Pierre Auger hanno scoperto i messaggeri che arrivano dai buchi neri nel cuore di galassie vicine: si tratta di raggi cosmici che colpiscono la Terra a un'energia oltre 10 milioni di volte maggiore di quella che si riesce a raggiungere negli acceleratori di particelle esistenti. I ricercatori hanno capito dalle loro osservazioni che le galassie con nuclei attivi, dove agiscono giganteschi buchi neri, sono molto probabilmente le sorgenti della pioggia di raggi cosmici di altissima energia che colpisce il nostro pianeta. Questi buchi neri si comportano come dei giganteschi e potentissimi acceleratori di particelle naturali, situati a circa 200-300 milioni di anni luce dalla nostra galassia. Viene risolto così un mistero cosmico che durava da decenni. L'Osservatorio Auger, finanziato anche dall'Infn, si trova nella pampa argentina ed è il più esteso strumento per lo studio della radiazione cosmica che sia mai stato costruito: i suoi circa 1.600 rivelatori coprono un'area di ben 3 mila km²! [a. v.]



Apri a Teramo Galileium, museo della scienza interattivo_*Galileium*, il nuovo museo interattivo della fisica e dell'astronomia sarà inaugurato a maggio a Teramo: è stata, infatti, siglata lo scorso 26 febbraio la convenzione tra il Comune di Teramo e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare per la gestione della struttura espositiva. Ormai tutto è pronto, quindi: nel museo troveranno spazio mostre permanenti e temporanee con *exhibit* interattivi per far "sperimentare con mano" la fisica ai ragazzi, e una ludoteca che proporrà loro vari laboratori e percorsi didattici. Il museo sarà il primo ad essere gestito da un ente di ricerca e collaborerà per iniziative di diffusione della conoscenza scientifica coi Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn, per favorire anche il dialogo tra scienziati e cittadini. "L'ambizione del museo è mettere in risalto il legame che esiste tra le cose più piccole e più grandi dell'universo, tra le particelle elementari che studiamo nei nostri acceleratori e sotto il Gran Sasso, e i grandi oggetti del cosmo, stelle, galassie, pianeti... - ha illustrato Aurelio Grillo, direttore del museo - speriamo di riuscire a trasmettere questo messaggio ai giovani: che l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande si influenzano reciprocamente in modo profondo". [a. v.]



I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.

I laboratori organizzano, su richiesta e previo appuntamento, visite gratuite per scuole e vasto pubblico. La visita, della durata di tre ore circa, prevede un seminario introduttivo delle attività dell'Infn e del laboratorio e una visita alle attività sperimentali.

Per visitare i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina www.infn.it/educational



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it