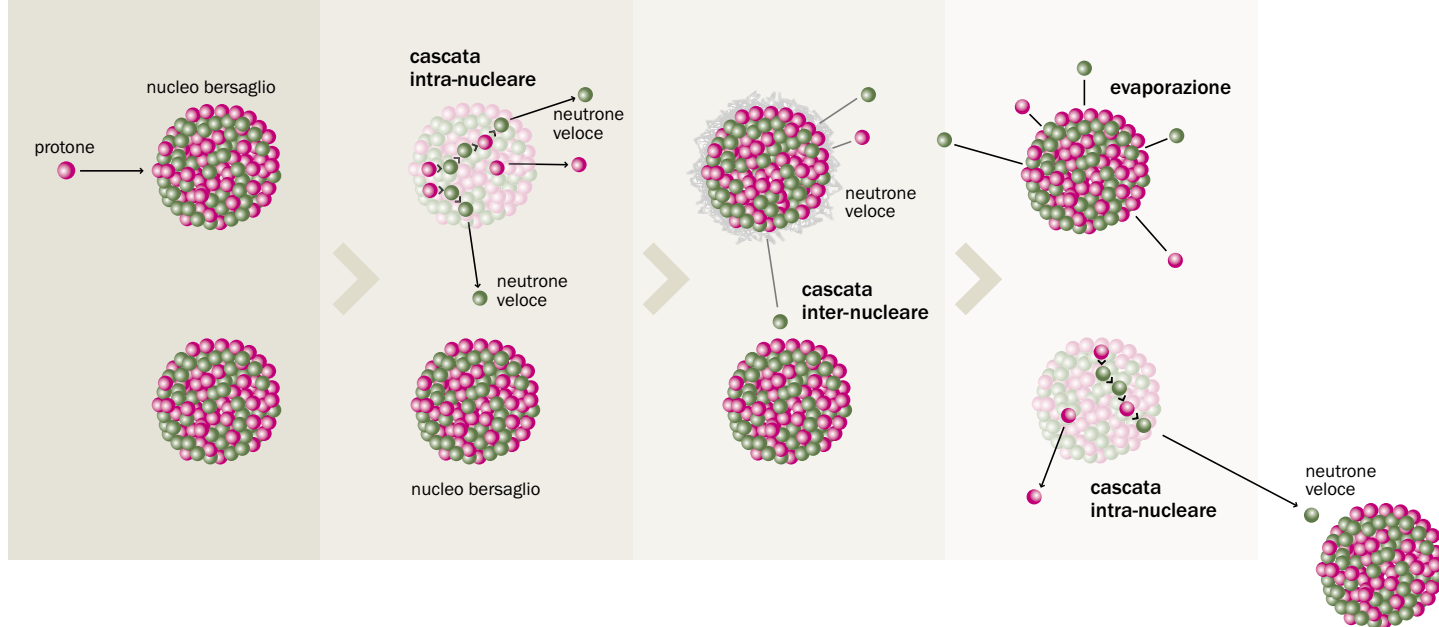


## [la spallazione]



# 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](http://www.sns.gov)

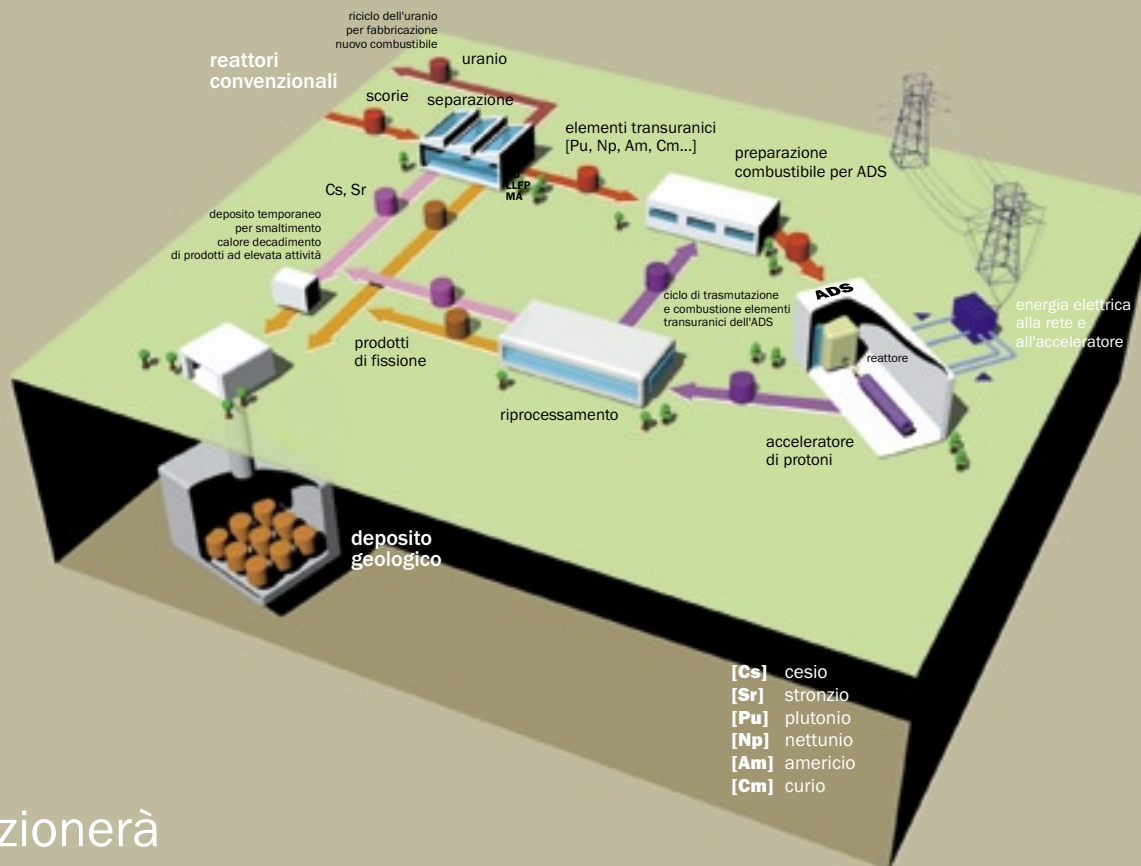
[www.isis.rl.ac.uk](http://www.isis.rl.ac.uk)

[neutron.neutron-eu.net/n\\_ess](http://neutron.neutron-eu.net/n_ess)

[nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1994/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1994/)

[www.sckcen.be/myrrha/home.php](http://www.sckcen.be/myrrha/home.php)

[www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html](http://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.