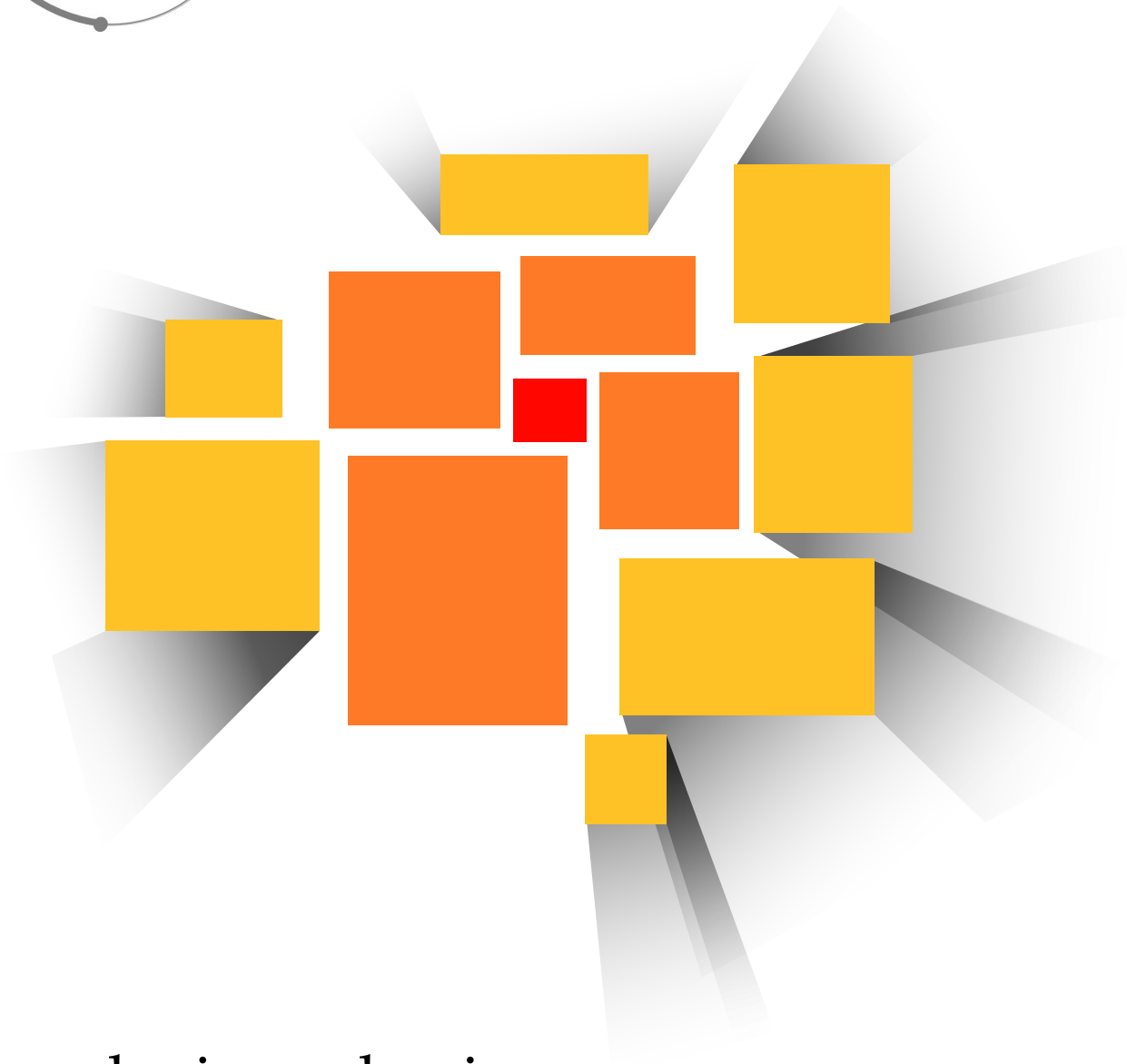
Numero XXIV
Anno 2024

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA
"Ennio De Giorgi"

UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Tecnologie nucleari

Ithaca: Viaggio nella Scienza

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica "*Ennio De Giorgi*" dell'Università del Salento

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013. e-ISSN: 2282-8079

Direttrice Responsabile
Loredana De Vitis

Ideatore
Giampaolo Co'

Comitato di redazione
Adriano Barra,
Rocco Chirivì,
Paolo Ciafaloni,
Maria Luisa De Giorgi,
Vincenzo Flaminio,
Luigi Martina,
Giuseppe Maruccio,
Marco Mazzeo,
Francesco Paparella,
Carlo Sempi.

Segreteria di Redazione
Daniela Dell'Anna

© 2023-2033 Dipartimento di Matematica e Fisica "*Ennio De Giorgi*"
© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori. Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza "Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 3.0 Italia" (CC BY-SA 3.0 IT).
Per il testo della licenza: **http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it**

Ithaca: Viaggio nella Scienza
è disponibile al sito
http://ithaca.unisalento.it

Scriveteci all'indirizzo
ithaca@unisalento.it

Ithaca
Viaggio nella Scienza

XXIV 2024

3 In questo numero

5 Quanto conosciamo il nucleo atomico?
Giampaolo Co', Luca Girlanda

27 Acceleratori di particelle per i beni culturali, la scienza dei materiali e le scienze forensi
Lucio Calcagnile

43 Come può essere utile un piccolo acceleratore di particelle per lo studio del particolato atmosferico
Franco Lucarelli, Giulia Calzolai, Silvia Nava

61 Il curativo potenziale della teoria nucleare
Luciano Canton, Francesca Barbaro

71 Il trasporto di materiale radioattivo
Franco Cioce

83 **Rifiuti radioattivi: parliamone, senza pregiudizi nè guerre di religione**
Paolo Finocchiaro

111 **Prevenzione e protezione dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.**
Francesca Duchi, Rosabianca Trevisi, Federica Leonardi, Annapaola Caricato

121 **La teoria di Enrico Fermi del decadimento β**
Giampaolo Co'

131 **"Una mentalità semplificatrice" Lo stile scientifico di Enrico Fermi** [1]
Vincenzo Barone

[1] Questo articolo è tratto dall'introduzione del volume di Ref. [1]. Ringraziamo la casa editrice Bollati Boringhieri per aver gentilmente concesso l'uso del testo.

In questo numero

> "Fa più rumore un albero che cade
> che una foresta che cresce."

Questo aforisma, attribuito a Lao-tse, filosofo cinese del 300 a.C., riassume bene l'impatto della fisica nucleare sulla società.

La fisica nucleare esce dai laboratori di ricerca, e dalle accademie, irrompendo nella società il 6 Agosto 1945, con il bombardamento di Hiroshima, seguito tre giorni dopo da quello di Nagasaki. Da quel giorno la parola "nucleare" nel sentire comune istiga sentimenti di paura. "Nucleare" è stato il *leitmotiv* dell'equilibrio del terrore durante il periodo della guerra fredda, e lo è tutt'oggi nelle minacce reciproche che le grandi potenze si scambiano.

Gli incidenti alle centrali nucleari di Chernobyl, nel 1986, e di Fukushima, nel 2011, hanno alimentato l'idea che qualsiasi "nucleare" sia qualche cosa di malvagio.

Questo isterismo di massa e comunicativo trascura il fatto che "nucleare" è una tecnologia che quotidianamente viene utilizzata nella nostra società per scopi di differente tipologia e tutt'altro che distruttivi. Con il "nucleare" ci si confronta quotidianamente, molto spesso senza rendersene conto.

In questo numero di **Ithaca** presentiamo degli articoli che parlano "della foresta che cresce", il cui suono è impercettibile ma che è, quantitativamente, e qualitativamente, molto più rilevante per la società dell'"albero che cade".

Questo numero si apre con l'articolo di Giampaolo Co' e Luca Girlanda nel quale si presenta quella che è la conoscenza attuale, sperimentale e teorica, di quel complesso sistema fisico che è il nucleo atomico.

Segue l'articolo di Lucio Calcagnile che indica come usare le tecnologie legate ad acceleratori di particelle per studiare la composizione di materiali e quindi come applicare queste tecniche non distruttive in vari ambiti e per scopi differenti: dalla datazione di beni culturali allo studio dell'inquinamento atmosferico, fino all'utilizzo nell'ambito di questioni forensi. Questa presentazione molto generale è completata dall'articolo di Franco Lucarelli, Giulia Calzolai e Silvia Nava, in cui si descrive l'uso di acceleratori per lo studio del particolato atmosferico.

L'articolo di Luciano Canton e Francesca Barbaro parla della produzione di radioisotopi da utilizzare nella teranostica, una nuova branca della medicina di precisione in cui si uniscono terapia e diagnostica.

I pericoli per la salute dovuti alla presenza di sostanze radioattive sono oggi ben noti e controllati. Sul problema della protezione dalle sostanze radioattive sono focalizzati i tre articoli successivi.

Franco Cioce presenta i problemi legati al trasporto di sostanze radioattive e Paolo Finocchiaro affronta il problema del trattamento dei rifiuti radioattivi. L'articolo di Francesca Duchi, Rosabianca Trevisi, Federica Leonardi e Annapaola Caricato affronta il problema della protezione e prevenzione rispetto ad un elemento radioattivo naturale, il radon.

Ormai **Ithaca** ha un notevole repertorio di articoli, e ne segnaliamo qui sotto alcuni apparsi nei numeri precedenti e legati all'argomento delle tecnologie nucleari.

Questo numero **Ithaca** si conclude con due contributi dedicati ad Enrico Fermi di cui ricorre quest'anno il 70-esimo anniversario della scomparsa. L'articolo di Giampaolo Co' si focalizza sul contributo teorico di cui Fermi era particolarmente orgoglioso: la teoria del decadimen-

to beta. Enzo Barone si sofferma su un aspetto particolare che ha caratterizzato l'opera di Enrico Fermi, sia dal punto di vista della ricerca sia dal punto di vista della presentazione delle proprie idee e scoperte anche in forma divulgativa: si tratta di quella che viene definita "Mentalità semplificatrice".

Buona lettura,
il Comitato di Redazione.

[1] D. Dongiovanni, L. Gabellieri, P. Martin, A. A. Tuccillo, G. Vlad, F. Zonca: *La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico*, Ithaca, XV (2020) 105.

[2] G. Co': *Effetti biologici delle radiazioni*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 5.

[3] A. Del Guerra: *La scoperta dei raggi X e del fenomeno della radioattività e le loro ricadute sul mondo medico*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 13.

[4] N. Belcari, V. Rosso, G. Sportelli: *Immagini dall'antimateria: la tomografia ad emissione di positroni*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 41.

[5] G. Pascali: *... dacci oggi la nostra dose quotidiana e liberaci dai mali ...* (*Sull'utilizzo di radioisotopi e radiofamaci in medicina*), Ithaca, XXVIII-B (2021) 49.

[6] M. Anguiano, A. M. Lallena: *Una breve storia dell'adroterapia*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 85.

[7] M. G. Bisogni, F. Di Martino: *Le moderne tecniche di radioterapia*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 123.

[8] M. Dosanjh, M. Necchi, A. Degiovanni, E. Benedetto: *Nuovi approcci per la adroterapia basati su 100 anni di radioterapia e collaborazione*, Ithaca, XXVIII-B (2021) 139.

[9] G. Pascali: *Il futuro in decadimento*, Ithaca, XXI (2023) 35.

Quanto conosciamo il nucleo atomico?

Giampaolo Co' *Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento*
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy

Luca Girlanda *Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento*
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy

Da più di cento anni è noto che oltre il 99.95% della massa di un atomo è concentrata in un nucleo dal volume 10^{-15} volte inferiore a quello dell'atomo stesso. Le osservazioni raccolte in oltre un secolo di studi permettono, oggi, di avere una conoscenza profonda della struttura e del comportamento del nucleo atomico. In questo articolo riassumiamo i punti essenziali e ben consolidati di questa conoscenza.

Introduzione

Il nucleo atomico, che chiameremo semplicemente **nucleo** d'ora in poi, è un sistema estremamente complesso dai comportamenti sorprendenti ed inaspettati. Questo è dovuto sia al fatto che il sistema è microscopico quindi descritto dall'antiintuitiva Meccanica Quantistica, sia al fatto che interazione nucleare forte, elettromagnetica, nucleare debole e gravità, nel caso della stelle di neutroni, agiscono insieme.

Da quello che viene oggi chiamato "l'esperimento di Rutherford" [1] ad oggi si sono accumulati numerosi dati osservativi, e, contemporaneamente, si sono sviluppati numerosi approcci teorici per poter descrivere, e prevedere il comportamento del nucleo.

Il nucleo non è un componente fondamentale della materia, ma ha una sua composizione interna. La presenza di protoni all'interno del nucleo fu accertata poco dopo la sua scoperta [2]. Nonostante il fenomeno del decadimento β indicasse l'esistenza di elettroni provenienti dal nucleo, fu chiaro che questi non esistevano nel nucleo, ma venivano prodotti dall'interazione debole [3, 4, 5]. Per comprendere la struttura del nucleo fu necessario ipotizzare l'esistenza del neutrone che fu identificato ed isolato nel 1932 [6]. Oggi descriviamo il nucleo come composto da protoni e neutroni, che sono indicati con il generico nome di **nucleoni**.

La descrizione del comportamento del nucleo è iniziata con lo sviluppo di modelli, in cui si ipotizza che il nucleo si comporti analogamente a come fanno sistemi fisici noti. In generale, i modelli possono essere classificati in due categorie. Nei **modelli collettivi** il nucleo è considerato un sistema unico, ad esempio come fosse una goccia di liquido. Nei **modelli a particelle indipendenti** si prendono in considerazione i nucleoni che si muovono indipendentemente uno dall'altro. Questi due modelli estremizzano i risultati delle osservazioni fatte che indicano come a volte il nucleo si comporti come un gas a bassa densità e altre volte come un sistema estremamente compatto. Questi due aspetti opposti appaiono utilizzando la stessa sonda (fotoni, elettroni, neutrini, protoni, particelle α, ...) e sopratutto

Unità di misura

Nel mondo dei nuclei atomici, le distanze sono misurate in femtometri. Il simbolo è fm e 1 fm corrisponde a 10^{-15}m. I fisici chiamano comunemente "Fermi" questa unità di misura. Questo nome si sposa bene con l'acronimo fm ed è più facile da pronunciare di femtometro.
Le energie tipiche della fisica nucleare sono di un milione di eV, il cui simbolo è MeV (1 MeV= 10^6 eV). Anche in questo caso si preferisce pronunciare MeV, o in inglese fare lo *spelling* dell'acronimo (em i vi) piuttosto che usare il lungo e pomposo "megaelettronvolt".
Queste sono le uniche unità di misura importanti perché tutte le quantità osservabili possono essere espresse in termini di fm e MeV. Ad esempio, le masse nucleari sono espresse come energie, usando la famosissima relazione di Einstein di equivalenza tra massa ed energia $E = mc^2$, dove c è il valore della velocità della luce nel vuoto. I valori delle masse sono quelle misurate nel sistema di riferimento in cui la particella in esame è ferma. Anche la carica elementare e può essere espressa in termini di fm e MeV: sfruttando la definizione della costante di struttura fine si ha che e^2=1.44 MeV fm.

nella stessa regione energetica. I manuali di Fisica Nucleare scritti fino a pochi anni fa [7, 8, 9] presentano entrambe le visioni. I progressi della teoria ci fanno superare la descrizione modellistica e consolidano sempre più la validità di una teoria alla base della descrizione del nucleo.

Dopo aver presentato la situazione osservativa riguardante il nucleo, ci soffermeremo sui concetti base della teoria che oggi è capace di descrivere il comportamento del nucleo nei due aspetti antitetici, quello collettivo e quello legato all'individualità di singola particella.

Le osservazioni

Esistenza e stabilità dei nuclei

Una delle caratteristiche più peculiari dei nuclei atomici è il fatto che non tutte le aggregazioni di protoni e neutroni generino un sistema legato. I sistemi nucleari legati si accumulano in una ristretta fascia, detta **valle di stabilità**, in cui i valori del numero di protoni Z e del numero di neutroni N sono simili, come si può vedere nella Figura 1.

Questo comportamento è del tutto differente rispetto a quello degli atomi che formano sistemi legati per qualsiasi valore di Z, fino a raggiungere un valore massimo che, al momento, è $Z_{\max} = 118$, elemento battezzato "oganesson" [10].

Nella Figura 1, i sistemi legati e stabili sono indicati dai punti neri, mentre tutti gli altri nuclei formano strutture legate ma non stabili che si trasformano in strutture più stabili.

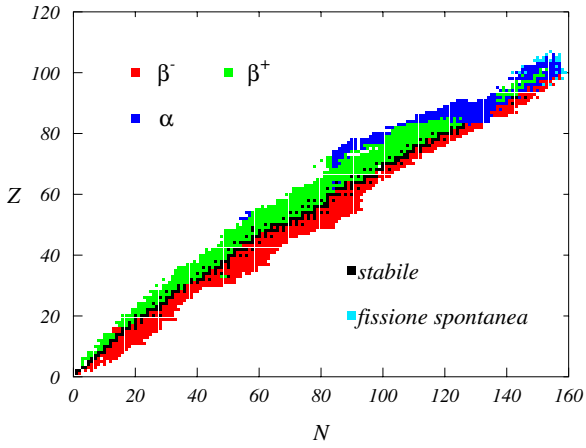


Figura 1: Tavola dei nuclei conosciuti in funzione del loro numero di protoni Z e neutroni N. I nuclei stabili sono indicati dai punti neri, gli altri colori sono relativi a nuclei che decadono $\beta^{\pm}$, α e per fissione spontanea, cioè si frantumano in nuclei più leggeri.

Questo processo è detto di decadimento, e comporta l'emissione di particelle che, all'inizio del secolo, furono catalogate come α, β e γ. Oggi sappiamo che le particelle α sono nuclei di ^{4}He, le particelle β sono elettroni o positroni, gli elettroni dell'antimateria, e le particelle γ sono fotoni.

I tempi di decadimento variano tantissimo, da 10^{-20} secondi a 10^{24} anni [11], e dipendono più

dalle caratteristiche del nucleo che decade che dal tipo di decadimento. Normalmente si considerano stabili quei nuclei la cui vita media è maggiore dell'età dell'universo, che oggi si stima essere di circa 1.5×10^{10} anni.

Attualmente sono noti oltre 3000 nuclei dei quali soltanto 274 sono stabili [12]. Un vasto campo di studi riguarda la ricerca di nuclei al limite della valle di stabilità. Si cercano nuclei con eccesso di protoni, ma sopratutto con grande eccesso di neutroni e si cercano nuclei sempre più massivi per studiare il limite superiore del numero di massa $A = N + Z$ [10].

Il fatto che non esistano nuclei composti da soli neutroni è oggetto di studio [13]. Le stelle di neutroni sono sistemi legati, ma questo avviene per effetto dell'azione dell'interazione gravitazionale che aggrega i neutroni. In assenza della gravità la sola interazione forte non riuscirebbe a formare un sistema legato di soli neutroni.

Sin dagli esordi della fisica nucleare fu chiaro che la prima quantità da misurare per conoscere il nucleo è la sua massa. Lo strumento più diffuso per lo studio delle masse nucleari è lo spettrometro di massa [14]. La moderna struttura di questo strumento è estremamente sofisticata, ma il principio su cui si basa è piuttosto semplice, ed è basato sull'elettromagnetismo classico. Si tratta di misurare la curvatura della traiettoria di uno ione che si muove in un campo magnetico. Il punto di impatto dello ione nel rivelatore è strettamente legato al rapporto tra la carica e la massa dello ione [15]. Poiché la carica dello ione è nota da altre misure, lo spettrometro misura la massa dello ione, quindi del nucleo. Le moderne misure delle masse nucleari sono estremamente accurate. Alcune masse sono note con una incertezza che cade sulla decima cifra significativa.

L'accuratezza delle misure della massa del nucleo ha spinto a considerare una importante quantità, l'**energia di legame**, definita come

$$B(A,Z) = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - M(A,Z)c^2 \quad , \quad (1)$$

dove m_p indica la massa del protone, m_n quella del neutrone e M quella del nucleo. Le masse sono moltiplicate per la velocità della luce, c, al quadrato in modo che $B(A,Z)$ abbia le dimensioni di una energia.

Se $B(A,Z) > 0$ la massa del nucleo composto da A protoni e N neutroni è inferiore alla somma delle loro masse misurate separatamente. Questo significa che l'aggregato, il nucleo, è energeticamente più favorevole della situazione in cui tutti i nucleoni sono separati. Si può interpretare $B(A,Z)$ come l'energia necessaria per separare tutti nucleoni.

Il concetto di energia di legame è universale e non riguarda solo il nucleo, ma tutti i sistemi legati formati da componenti più piccole, dai sistemi atomici ai pianeti. Nel caso di sistemi legati dalle interazioni gravitazionale ed elettromagnetica l'energia di legame è una frazione irrisoria rispetto alle masse dei componenti del sistema, normalmente al di sotto della soglia dell'accuratezza nella misura delle massa.

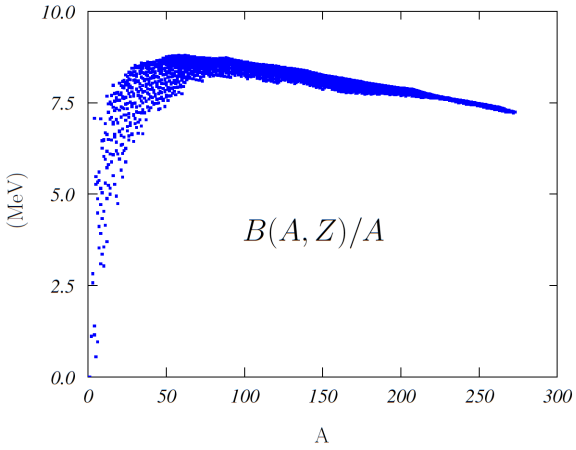


Figura 2: Energie legame per nucleone di 2931 nuclei. I dati provengono dalla compilazione di Ref. [16].

In fisica nucleare, la presenza dell'interazione nucleare forte, che genera il legame tra nucleoni, e la grande accuratezza nella misura delle masse nucleari ha permesso di identificare le energie di legame i cui valori si attestano mediamente attorno al 5% della massa del nucleo stesso.

Nella Figura 2 mostriamo le energie di legame per nucleone di 2931 nuclei [16] in funzione del numero di massa A. La caratteristica interessante di questa figura è che una volta raggiunto un certo valore del numero di nucleoni, attorno ad $A = 40$, l'energia di legame per nucleone ha un andamento quasi costante, attorno ai 7.5 MeV. Questo effetto è chiamato in gergo **saturazione**

perchè sembra che nei nuclei con dimensioni relativamente grandi, il singolo nucleone interagisca solo con i nucleoni che lo attorniano entro un certo raggio. Il nucleone che si aggiunge per aumentare la massa del nucleo non interagisce con quei nucleoni che hanno già saturato la loro capacità di interazione. Questa è una caratteristica tipica dell'interazione nucleare forte che ha un raggio d'azione finito. Oltre una certa distanza, dell'ordine di 2 fm, l'interazione tra nucleoni non è più attiva. Al contrario, le interazioni elettromagnetiche e gravitazionali hanno raggio d'azione infinito e tutte le cariche elettriche, e le masse, delle componenti di un sistema interagiscono tra loro.

Ci sono altri dati osservativi che sono ben spiegati dal raggio d'azione finito dell'interazione nucleare.

Stato fondamentale

Il processo fisico più utilizzato per lo studio del nucleo atomico è quello della diffusione di particelle. Un fascio di particelle la cui energia e direzione sono ben controllate dallo sperimentatore collide con un bersaglio nucleare e viene diffuso. I rivelatori misurano energia e angolo di deflessione delle particelle diffuse. Da questi dati si inferiscono informazioni sulla struttura del bersaglio, il nucleo atomico nel nostro caso.

I processi di diffusione sono regolati dalla conservazione di molte quantità. L'energia totale è conservata, così come il momento totale del sistema, e il momento angolare totale che comprende anche gli spin delle particelle coinvolte. Gli spin sono i momenti angolari intrinseci delle particelle. In unità della costante di Plank $h/2\pi \equiv \hbar$, il protone ed il neutrone hanno spin 1/2, così come l'elettrone ed il neutrino.

La misura dell'energia della particella diffusa e la conservazione totale dell'energia nel processo permettono di sapere se parte dell'energia è stata trasferita dal proiettile al bersaglio (processi anelastici) oppure no (processi elastici). In quest'ultimo caso il nucleo rimane nel suo stato fondamentale che viene sondato per diversi valori del momento trasferito dal proiettile al bersaglio.

Questo è il principio base utilizzato per studiare la distribuzione di carica dei nuclei per il tramite della diffusione elastica di elettroni.

Le sezioni d'urto di diffusione di elettroni sono circa 1000 volte più piccole di quelle di diffusione di protoni e particelle α. Per questo motivo questo tipo di esperimenti fu effettuato a partire dalla prima metà degli anni '50 del secolo scorso, circa 30 anni dopo il periodo pionieristico della fisica nucleare. Si dovette attendere l'evoluzione delle tecniche di rivelazione e accelerazione di elettroni prima di poter effettuare questi esperimenti per i quali fu assegnato a Robert Hofstadter il Premio Nobel per la Fisica nel 1961 [18].

Oggi i dati accumulati in esperimenti effettuati in differenti laboratori sono stati sistematizzati in modo tale fornire informazioni su sezioni d'urto relative ad una energia fissata degli elettroni incidenti sul bersaglio in funzione dell'angolo di diffusione definito rispetto alla direzione del fascio. Come esempio di questi dati, mostriamo nel pannello superiore della Figura 3 i valori della sezione d'urto di diffusione elastica di elettroni sul bersaglio di ^{40}Ca [17]. Le unità di misura sono mb (millibarn) che corrispondono a 0.1 fm^2.

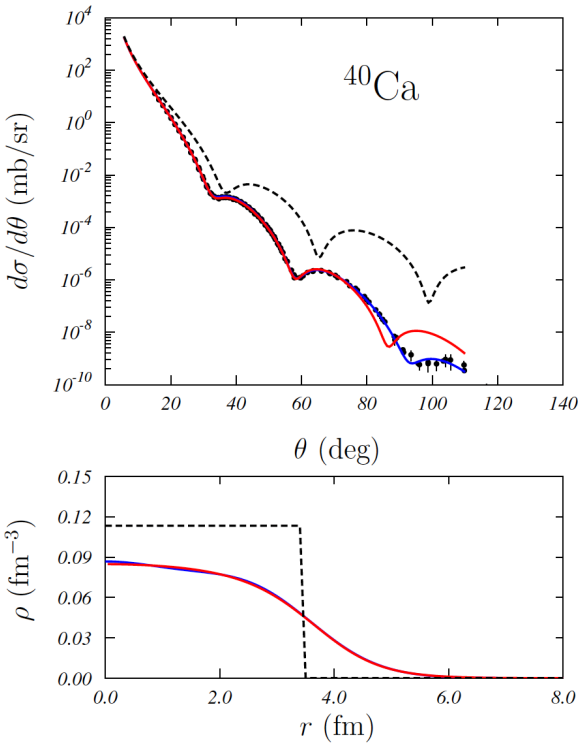


Figura 3: Nel pannello superiore mostriamo la sezione d'urto differenziale di diffusione elastica di elettroni di 400 MeV sul bersaglio di ^{40}Ca [17]. Le linee corrispondono alle distribuzioni di carica mostrate nel pannello inferiore.

È importante notare che questa quantità fisica è nota e misurata su ben 12 ordini di grandezza. Questa enorme estensione permette di acquisire un alto potere risolutivo, ovvero la capacità di distinguere il comportamento delle distribuzioni di carica su una griglia spaziale sempre più fine.

Le linee rappresentano il risultato che si ottiene calcolando la sezione d'urto utilizzando i modelli di densità di carica presentati nel pannello inferiore. La curva tratteggiata nera rappresenta una distribuzione di carica sferica ed omogenea e ha un solo parametro libero per descrivere i dati, il raggio della distribuzione. La curva rossa è una distribuzione di Fermi e ha due parametri liberi, mentre quella blu è una distribuzione generata da uno sviluppo su una base di Fourier-Bessel e ha ben 10 parametri liberi. La curva blu si sovrappone quasi esattamente ai dati sperimentali sopratutto ad alti valori dell'angolo di diffusione. La differenza con la curva rossa è molto piccola, ma al centro del nucleo si notano delle differenze. Se i dati fossero solo quelli fino a $\theta = 60^\circ$ non ci sarebbe stata possibilità di distinguere tra le due distribuzioni di carica. Solo la presenza di dati oltre quest'angolo mostra differenze tra le due distribuzioni.

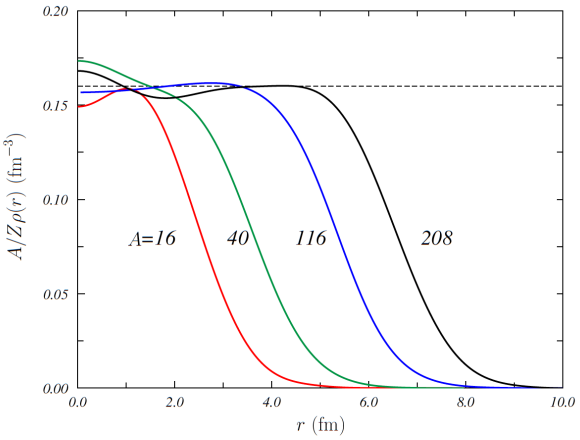


Figura 4: Distribuzioni di carica dei nuclei ^{16}O, ^{40}Ca, ^{116}Sn e ^{208}Pb estratte dai dati di diffusione elastica di elettroni da nuclei [19] moltiplicate per A/Z. La linea tratteggiata orizzontale indica il valore 0.16 fm^{-3}.

Oggi abbiamo informazioni sulle distribuzioni di carica di circa 130 nuclei [19]. La caratteristica peculiare di queste distribuzioni di carica è mostrata nella Figura 4. Se rinormalizziamo le distribuzioni di carica con un fattore A/Z che tiene conto dell'eccesso di neutroni, scopriamo che i valori delle densità al centro del nucleo sono molto simili. Anche questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che l'interazione forte ha un raggio di interazione finito, e quindi appare il fenomeno della saturazione. Una volta raggiunta una certa dimensione, i nucleoni al centro del nucleo non interagiscono con nucleoni aggiuntivi che si accumulano alla superficie del nucleo aumentandone il raggio, ma non modificando la densità centrale. Tutto il contrario di ciò che accade con l'interazione gravitazione che essendo a raggio infinito non ha limiti ai valori della densità centrale del sistema che può, in principio, diventare anche infinita (i buchi neri).

Un'altra quantità legata allo stato fondamentale del nucleo è il suo momento angolare totale, quello che in gergo è chiamato lo **spin del nucleo**. La determinazione dello spin del nucleo è fatta con esperimenti di vario tipo, dalla spettroscopia atomica (struttura iperfine), alla misura dei momenti di dipolo magnetico.

In linea di principio, ci si aspetterebbe una situazione estremante complicata. Il nucleo è composto da A fermioni e ognuno di questi fermioni si muove attorno al centro del sistema nucleare con un preciso momento angolare orbitale. Quindi il risultato è dato dalla somma quantizzata, in unità $\hbar$, di A spin semi-interi e di A momenti angolari orbitali interi.

I dati presentano una situazione estremamente semplice. I nuclei con un numero pari di protoni ed un numero pari di neutroni, **nuclei pari-pari** hanno spin nullo, senza alcuna eccezione. Questo fatto è stato spiegato ipotizzando che esista una interazione che accoppia nucleoni dello stesso tipo in modo da formare coppie a spin nullo, in analogia alle coppie di Cooper formate dagli elettroni nella teoria della superconduttività. Questa interazione di appaiamento, o di *pairing*, spiega anche il fatto che nuclei pari-pari hanno energie di legame maggiori degli altri nuclei.

La presenza dell'interazione di appaiamento si coniuga bene anche con la descrizione degli spin dei nuclei pari-dispari e dispari-dispari. In questi nuclei si ipotizza la presenza di un nocciolo pari-pari a spin nullo. Lo spin totale di un nucleo pari-dispari è dovuto al momento angolare totale, spin più momento angolare orbitale, del

nucleone spaiato. E nei nuclei dispari-dispari il momento angolare intero è dato dall'accoppiamento dei momenti angolari dei due nucleoni spaiati. Questo modello descrive in maniera eccellente i dati empirici.

La descrizione degli spin nucleari legata alle sole caratteristiche del nucleone spaiato si collega molto bene anche ad un'altra evidenza empirica. I nuclei che possiedono precisi valori del numero di protoni, o di neutroni, specificamente 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, detti **numeri magici**, presentano delle caratteristiche di particolare stabilità. Le loro energie di legame sono maggiori rispetto a quelle dei nuclei vicini. È più difficile eccitarli e modificare la loro struttura rispetto a quanto accade agli altri nuclei. Queste caratteristiche sono analoghe a quanto, in fisica atomica, si osserva per i gas nobili. Per questi motivi si è ipotizzato che anche i nuclei possano essere descritti come sistemi in cui i diversi nucleoni si muovono indipendentemente uno dall'altro all'interno di un potenziale attrattivo che li aggrega. Questo modello prende il nome di **modello a strati** o **modello a *shell***, e i numeri magici appaiano in corrispondenza alla piena occupazione dei livelli energetici di singola particella [8, 9].

Stati eccitati

Nei processi di diffusione l'identificazione dell'energia della particella diffusa permette di sapere se parte dell'energia del proiettile è stata trasferita al bersaglio. È quindi immediato sapere se si sta studiando uno stato eccitato del sistema.

Osservazioni fatte con diverse sonde, fotoni, elettroni, neutrini, adroni, indicano uno spettro di eccitazione dei nuclei che può essere suddiviso in varie parti, come schematicamente indicato nella Figura 5.

La prima parte dello spettro, quella che appare ad energie che vanno dal keV a circa una decina di MeV, è composta da livelli energetici discreti. Quando l'energia supera il valore minimo necessario per estrarre un nucleone dal nucleo, lo spettro diventa continuo. Questo è analogo a quanto avviene negli atomi una volta superata la soglia di ionizzazione.

Lo spettro discreto del nucleo è ben studiato analizzando l'emissione γ. Il nucleo, in uno stato eccitato nello spettro discreto decade in stati ad energia inferiore emettendo fotoni. Lo studio di questa emissione di fotoni, che analizza la loro energia e la distribuzione angolare, permette di identificare energia, momento angolare e parità dello stato eccitato. Queste sono caratteristiche che dipendono esclusivamente dalla struttura del nucleo bersaglio e non dalla sonda usata per eccitarlo. Oggi sono disponibili dei rivelatori di fotoni che coprono essenzialmente tutto il volume attorno al nucleo che decade [20, 21].

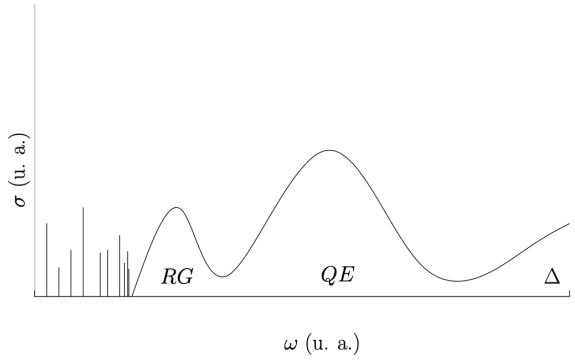


Figura 5: Schema dello spettro di eccitazione del nucleo dove si identificano le zone dello spettro discreto della risonanza gigante, RG, del picco quasi-elastico, QE e della risonanza Δ. Questo schema è valido qualsiasi sia la sonda che eccita il nucleo, fotoni, elettroni, protoni, particelle α, nuclei ...

Gli spettri di eccitazione dei nuclei sono ben studiati, si veda ad esempio la compilazione fornita on-line al sito dei laboratori di Brookhaven [22]. Ogni nucleo ha una sequenza di livelli energetici che lo caratterizza, come fosse un'impronta digitale.

Ci sono delle caratteristiche che accomunano alcuni tipi di nuclei. Ad esempio, nuclei che presentano una deformazione permanente nel loro stato fondamentale hanno spettri caratterizzati da una precisa sequenza di momenti angolari e parità, 2^+, 4^+ con differenze energetiche sempre maggiori. Un esempio di questo comportamento è lo spettro di eccitazione del nucleo di ^{238}U mostrato nella Figura 6. Questo tipo di spettri è ben descritto in termini di rotazione (quantizzata) di un elissoide.

Nuclei sferici presentano invece spettri in cui le differenze tra le energie degli stati eccitati sono

essenzialmente constanti, ad esempio lo spettro del nucleo di ^{114}Cd mostrato in Figura 6. Questa tipologia di spettri è ben descritta in termini di oscillazioni collettive, e armoniche, della superficie del nucleo, come se quest'ultimo fosse una goccia di liquido incomprimibile.

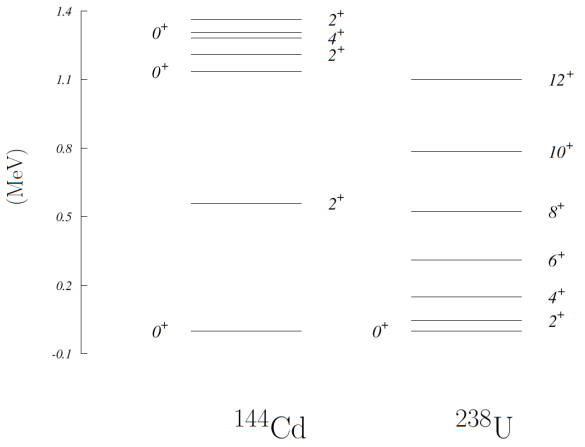


Figura 6: Spettri discreti di eccitazione dei nuclei di ^{114}Cd e ^{238}U.

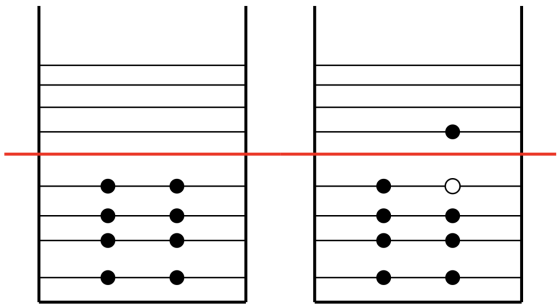


Figura 7: Schema di stato fondamentale e stato eccitato nel modello a particelle indipendenti.

Accanto a questi stati eccitati, che coinvolgono il nucleo come sistema collettivo, nella stessa regione energetica, appaiono anche stati descrivibili in termini di eccitazione di singola particella. Questo significa che ipotizzando valido il modello a shell in cui ogni particella è caratterizzata da un suo livello energetico, questi stati sono ben descritti dalla transizione di una sola particella tra due livelli energetici, come schematizzato nella Figura 7.

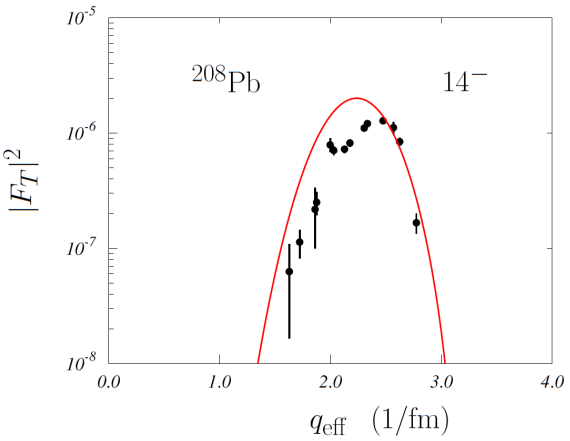


Figura 8: Fattore di forma per l'eccitazione dello stato 14^- del nucleo ^{208}Pb in funzione del momento trasferito [23]. La curva mostra le previsioni in modello in cui solo un neutrone è eccitato.

Un tipico esempio di questo tipo di eccitazioni è il livello 14^- del ^{208}Pb di cui mostriamo nella figura 8 i dati ottenuti eccitandolo con elettroni [23]. Gli elettroni diffusi rilasciano 6.745 MeV al nucleo di ^{208}Pb e sono misurati modificando l'angolo di diffusione in modo da sondare il nucleo con differenti valori del momento trasferito, nella figura indicato come q_{eff}. La curva presenta il risultato di un modello in cui questo stato eccitato è prodotto eccitando un solo neutrone. Più specificatamente promovendo sul livello $1j_{15/2}$ un solo neutrone che nello stato fondamentale si trova sul livello $1i_{13/2}$.

Come già indicato, una volta superata la soglia di emissione dei nucleoni lo spettro di eccitazione del nucleo è continuo. Il nucleo eccitato a queste energie può decadere emettendo fotoni, ma lo fa sopratutto emettendo nucleoni, o particelle α se energeticamente permesso.

La soglia del continuo varia da nucleo a nucleo, e si attesta mediamente attorno ai 15 MeV per i nuclei più leggeri, $A \sim 20$, e diminuisce nei nuclei più pesanti, ad esempio nel ^{208}Pb è d circa 8 MeV.

Tutti i nuclei con $A > 10$, nella regione tra i 15 MeV e i 30 MeV, presentano un notevole incremento dei valori delle sezioni d'urto misurate con varie sonde. Questa regione è detta delle **risonanze giganti**. Questo nome è stato assegnato nel 1947 quando questo incremento della sezione d'urto è stato notato in esperimenti di cattura di fotoni [24].

Questo tipo di esperimento è concettualmente piuttosto semplice. Si inviano fotoni sul bersaglio nucleare e si misura la differenza tra quanti ne sono stati inviati e quelli che il rivelatore identifica alle spalle del bersaglio. La difficoltà pragmatica consiste nel fatto che il fenomeno fisico da studiare produce un segnale molto più piccolo del rumore prodotto da fenomeni fisici spuri. Sottrarre il fondo per ottenere il segnale è un lavoro molto difficile e complicato. Nella Figura 9 mostriamo i dati degli esperimenti effettuati a Mainz negli anni '70 del secolo scorso [25] che, nonostante l'enorme sviluppo delle tecniche di rivelazione, rimangono il paradigma con cui confrontarsi.

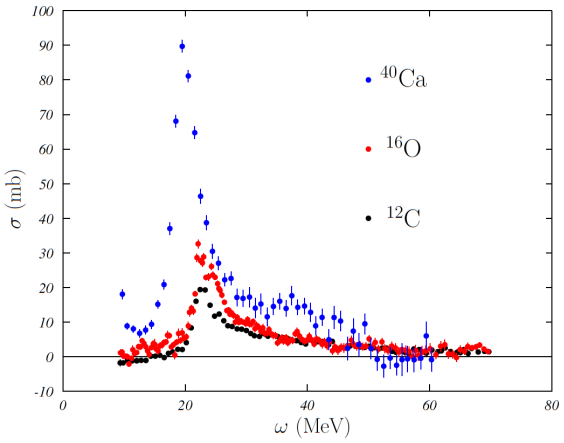


Figura 9: Sezioni d'urto totali di fotoassorbimento in funzione dell'energia del fotone per i nuclei di ^{12}C, ^{16}O e ^{40}Ca [25].

La risonanza gigante identificata dalla cattura fotonica, detta di dipolo elettrico perché caratterizzata da momento angolare 1 e parità negativa, è ben descritta da un modello nucleare a due fluidi, uno di protoni e l'altro di neutroni. I due fluidi oscillano uno contro l'altro attorno al comune centro massa.

Dopo la scoperta della risonanza gigante di dipolo elettrico, usando altre sonde, elettroni, protoni e particelle alfa, nella stessa regione energetica si sono scoperte risonanze giganti con diversi numeri quantici [26]. Tutti questi modi di eccitazione sono di tipo collettivo, ben descrivibili da modelli che considerano eccitazioni del nucleo come una unica entità.

La situazione cambia aumentando l'energia di eccitazione. In generale, il valore della sezione d'urto diminuisce dopo la regione della risonanza gigante per poi aumentare e raggiungere un nuovo massimo ad energie attorno ai 100 MeV. Questa zona è definita come quella dell'**eccitazione quasi-elastica**. Poiché i valori del momento trasferito sono relativamente alti, la sonda individua i singoli nucleoni e non il nucleo come sistema unico.

Il picco quasi-elastico è ben descritto da un modello a particelle indipendenti. Si considera addirittura un modello in cui il nucleo è descritto da un gas infinito di nucleoni non interagenti tra loro.

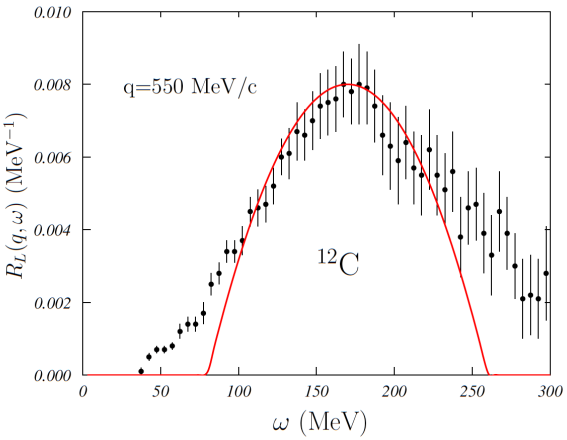


Figura 10: Risposta longitudinale dovuta all'eccitazione del nucleo di ^{12}C in funzione dell'energia di eccitazione per un valore del momento trasferito di 500 MeV/c [27]. La curva rappresenta la descrizione in termini di modello di particelle indipendenti.

Ad energie superiori appare un'altra risonanza legata alla produzione di mesoni π, pioni. In questo caso l'energia trasferita dal proiettile al bersaglio modifica la struttura interna del singolo nucleone che si trasforma in una cosidetta risonanza Δ che decade emettendo un pione. La modifica della struttura del nucleone implica una modifica dei parametri da usare per la descrizione del nucleo.

Anche se tracciare linee di confine nelle discipline scientifiche è un processo ambiguo e limitante, possiamo affermare che la tradizionale Fisica Nucleare termina alla soglia di produzione del pioni.

Reazioni nucleari

Finora cui abbiamo parlato di osservazioni mirate a comprendere la struttura del nucleo ed il suo comportamento quando sottoposto a sollecitazioni esterne. In Fisica Nucleare esiste un altro settore sperimentale altrettanto importante ed è legato allo studio delle collisioni tra due nuclei.

Dal punto di vista storico, si può far risalire questo tipo di studi, oggi detto delle **reazioni nucleari**, agli esperimenti del gruppo di via Panisperna diretto da Enrico Fermi, in cui si osservavano reazioni indotte dalla cattura neutronica [28]. Fermi ed il suo gruppo non si resero conto che stavano osservando per la prima volta processi di **fissione**, cioè processi in cui il nucleo colpito da un proiettile, un neutrone in quel caso, si frantuma in una o più parti. Il processo di fissione fu riconosciuto più tardi da Otto Hahn, F. Strassmann, Lise Meitner e Otto Frisch [29, 30]. Dopo la fissione di un nucleo si producono nuovi nuclei che in qualche caso hanno una vita media così breve, da non essere presenti sul nostro pianeta, in condizioni normali.

L'altro meccanismo di produzione di nuclei normalmente non presenti sulla Terra è il processo di **fusione** nucleare, identificato per la prima volta da Mark Oliphant [31]. In questo caso, due nuclei si uniscono per formarne un terzo, e questo è possibile se il nucleo prodotto ha una configurazione più stabile di quella formata dai due nuclei separati. Esprimendoci in maniera più quantitativa, il processo di fusione avviene se il valore della massa del nucleo prodotto è inferiore a quello della somma delle masse dei due nuclei interagenti. Questo è il meccanismo che produce energia nelle stelle.

Fusione e fissione sono due classificazioni che a grandi linee indicano il complesso mondo delle reazioni nucleari che vengono studiate e catalogate in vari modi.

La ricerca di nuovi nuclei ai margini della tavola degli isotopi di Figura 1 è uno dei settori di ricerca più vivi nella fisica nucleare. A questo si associano oggi gli studi di reazioni nucleari ai limiti estremi delle energie di collisione. Da una parte si fanno esperimenti a bassissime energie, dell'ordine dell'eV, per simulare in laboratorio le reazioni che avvengono nelle stelle [32]. Dall'altra parte si sfruttano gli acceleratori con le più alte energie disponibili per far collidere nuclei in modo da produrre situazioni di materia ad altissima densità con la speranza di produrre deconfinamento dei quark. In gergo questi studi sono indicati come la ricerca del **plasma di quark e gluoni** [33].

La descrizione dei processi di reazione nucleare è complicata dalla necessità di trattare allo stesso livello di accuratezza la struttura dei due nuclei che collidono e il processo di interazione. Qui si ricorre ad un'ampia modellistica che implica delle approssimazioni di cui spesso è difficile controllare la validità. Anche in questo settore i nuclei presentano comportamenti che possono essere descritti in termini collettivi e altri in termini di fenomeni legati alle proprietà dei singoli nucleoni.

La teoria

Le osservazioni indicano che il nucleo si comporta in maniera molto differente rispetto ai sistemi fisici che ci sono familiari. In alcune circostanze il suo comportamento è quello di un sistema compatto in cui il ruolo delle sue componenti è trascurabile. Queste proprietà sono ben descritte da modelli a goccia di liquido. In altre circostanze il nucleo si comporta come un gas ad alta temperatura e bassa densità. I nucleoni sono confinati in un volume ben definito, e ognuno di loro si muove indipendentemente dalla presenza degli altri, se non per il principio di esclusione di Pauli.

Questi aspetti modellisticamente inconciliabili del nucleo sono oggi ben descritti da una teoria ben consolidata che supera i limiti dell'approccio modellistico. La teoria è basata sulla Meccanica Quantistica non relativistica nella quale il nucleo è descritto come un sistema di nucleoni che interagiscono tra loro mediante l'interazione nucleare forte.

Presentiamo nei prossimi paragrafi lo stato della teoria del nucleo discutendo validità e limitazioni dovute alle ipotesi iniziali.

L'interazione tra nucleoni

Le informazioni fenomenologiche riguardo al carattere dell'interazione nucleare provengono dallo studio dei sistemi di due nucleoni. L'unico

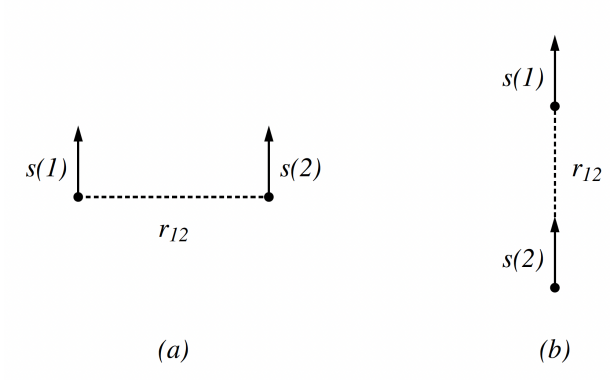


Figura 11: Rappresentazione schematica del termine tensoriale dell'interazione tra due nucleoni. Questo termine dipende dall'orientamento reciproco tra le direzioni degli spin dei due nucleoni e la loro posizione reciproca. Nei casi (a) e (b) la distanza tra i due nucleoni è la stessa, ma nel caso (a) il termine tensoriale è nullo, mentre nel caso (b) acquisisce il massimo valore.

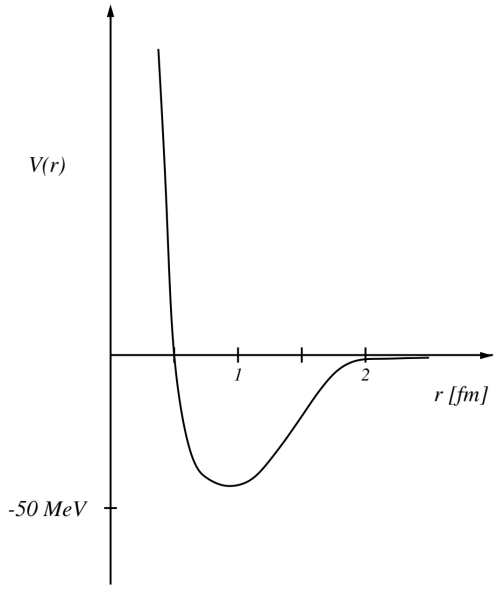


Figura 12: Schema della parte scalare dell'interazione tra due nucleoni.

stato legato di un sistema di due nucleoni è il deutone, ^{2}H, che non ha stati eccitati ed è formato da un protone e un neutrone, con spin totale uguale ad 1 e con un momento di quadrupolo elettrico.

Il fatto che non si osservino stati legati di due nucleoni uguali, come il di-protone o il di-neutrone, indica che l'interazione tra due nucleoni è più attrattiva quando i due nucleoni sono differenti. Questo indica che l'interazione nucleone-nucleone non dipende solo dalla distanza relativa tre le due particelle, come avviene per l'interazione elettromagnetica e quella gravitazionale, ma anche dall'isospin, il numero quantico che distingue protoni e neutroni.

Poiché si osservano solo deutoni con spin totale uguale a 1 e non con spin 0, l'altra possibilità di comporre i due spin 1/2 dei due nucleoni, è evidente che la forza nucleare dipenda anche dallo spin.

La presenza di un momento di quadrupolo elettrico non nullo indica che il deutone non è sferico e, di conseguenza, che la forza nucleare non è di tipo centrale, ma dipende anche dalla posizione reciproca delle particelle rispetto alla direzione degli spin (vedi Fig. 11).

Queste indicazioni fornite dallo studio del deutone sulla struttura dell'interazione tra due nucleoni, sono quantitativamente consolidate dall'analisi di circa 4000 dati di diffusione elastica tra nucleoni [34].

L'andamento qualitativo della parte scalare, quella dominante, del potenziale nucleone-nucleone che emerge dall'analisi di tutti questi dati è presentato in Fig. 12 in funzione della distanza tra i due nucleoni. Il potenziale è caratterizzato da una forte repulsione a corta distanza, un'attrazione a distanze intermedie, e tende a zero quando i due nucleoni si trovano a distanze maggiori di circa 2 fm.

L'approccio più immediato alla costruzione di un potenziale nucleone-nucleone è di tipo puramente fenomenologico. Si ipotizza una forma funzionale del potenziale, ad esempio somma di funzioni gaussiane, contenente dei parametri i cui valori sono scelti per riprodurre al meglio i dati empirici di deutone e quelli di diffusione. Oggi i più accurati potenziali fenomenologici utilizzano circa 40 parametri e riescono a descrivere i dati con grande accuratezza [35].

Sebbene molto efficaci nella descrizione dei sistemi di due nucleoni, la loro applicabilità in sistemi nucleari composti da più di due nucleoni è fallimentare. Per descrivere l'energia di legame di nuclei con più di due nucleoni, a partire dal nucleo di trizio, ^{3}H, è necessario introdurre una forza a tre corpi. Poichè i nucleoni hanno una struttura interna, sono composti da quark e gluoni, l'interazione tra due nucleoni può essere modificata dalla presenza di altri nucleoni

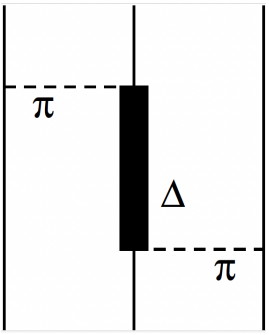


Figura 13: Schema di un termine di interazione a tre corpi. Il nucleone di destra, indicato dalla linea continua, scambia un pione con quello centrale che, possedendo una struttura interna, si trasforma in una particella Δ. Mentre si trova in questo stato, interagisce con un terzo nucleone, a sinistra, e si ritrasforma in nucleone.

che trasformano la struttura di uno dei nucleoni interagenti (vedi Fig. 13 per un esempio).

La modellizzazione di queste forze a tre corpi è molto più complicata rispetto a quella a due corpi per il gran numero di variabili in più da cui dipende. Inoltre, manca un criterio per limitare l'interazione solo a tre corpi. In principio si dovrebbero inserire forze a quattro o più corpi per descrivere nuclei sempre più pesanti.

Un modo per superare questi limiti è rappresentato da approcci di tipo più microscopico, basati su meccanismi di scambio di mesoni ispirati dall'elettrodinamica quantistica (QED). Fu proprio muovendo dall'analogia con l'elettrodinamica che il fisico giapponese Hideki Yukawa ipotizzò l'esistenza di particelle mediatrici dell'interazione forte, nello stesso senso in cui i fotoni sono i mediatori dell'interazione elettromagnetica [36].

Lo scambio di tali particelle dà origine ad un potenziale di interazione tra nucleoni che decade esponenzialmente a grande distanza con lunghezza caratteristica inversamente proporzionale alla massa delle particelle mediatrici. Dalla conoscenza del raggio d'azione dell'interazione nucleare, Yukawa predisse la massa delle particelle, poi identificate sperimentalmente [37] e chiamate "pioni" (mesoni π). Successivamente alla scoperta del pione veniva messa in luce l'esistenza di un sempre maggior numero di mesoni, più pesanti dei pioni, anch'essi coinvolti nei meccanismi dell'interazione tra due nucleoni.

Nella prima metà degli anni '80 del secolo scorso si intraprese un lavoro sistematico per costruire una interazione nucleone-nucleone che riproducesse i dati empirici dei sistemi a due nucleoni con una accuratezza analoga a quella dei potenziali fenomenologici, basandosi sullo scambio dei vari mesoni. Tranne che per il pione, è necessaria la presenza di parametri legati all'intensità dell'interazione che lega i vari mesoni ai nucleoni. Moderni potenziali a scambio mesonico utilizzano una quarantina di parametri circa [38].

Al di là del numero di parametri simile a quello dei potenziali fenomenologici, anche in questo caso le interazioni a tre, o più corpi, non sono previste consistentemente dalla teoria. È necessario ipotizzare una loro struttura in termini di scambio mesonico e la trasformazione del nucleone in altro sistema. Ad esempio, il diagramma di Fig. 13 presenta uno dei possibili contributi dei termini a tre corpi dell'interazione tra nucleoni.

Il terzo, e più recente, approccio alla costruzione dell'interazione tra nucleoni è basato sulla teoria, detta cromodinamica quantistica (QCD), che descrive l'interazione forte in termini di scambio di gluoni tra i quark che sono le entità fondamentali che formano tutti i sistemi adronici, tra i quali protone, neutrone e pione [39].

Sebbene la formulazione della QCD sia ispirata a quello che è stato fatto con la QED, le due teorie sono profondamente differenti. Per le caratteristiche dell'interazione forte non è possibile utilizzare le tecniche perturbative che permettono di risolvere le equazioni QED con approssimazioni controllate.

Una metodologia per risolvere le equazioni della QCD senza ricorrere ad approssimazioni non controllabili è stata suggerita da Wilson [40] e prende il nome di "QCD su reticolo" (lattice QCD). L'idea è quella di discretizzare lo spazio e il tempo in un reticolo, e risolvere numericamente le equazioni di QCD per ogni punto del reticolo. Considerando reticoli sempre più fitti si dovrebbe raggiungere un risultato indipendente da come la discretizzazione è stata effettuata.

Si tratta di un campo di ricerca molto attivo che produce risultati sempre più precisi, ad esempio riguardo alla previsione delle masse degli adroni, (vedi Fig. 14). Questi risultati consolidano l'idea che la QCD sia la teoria appropriata per la descrizione dell'interazione forte. Purtroppo

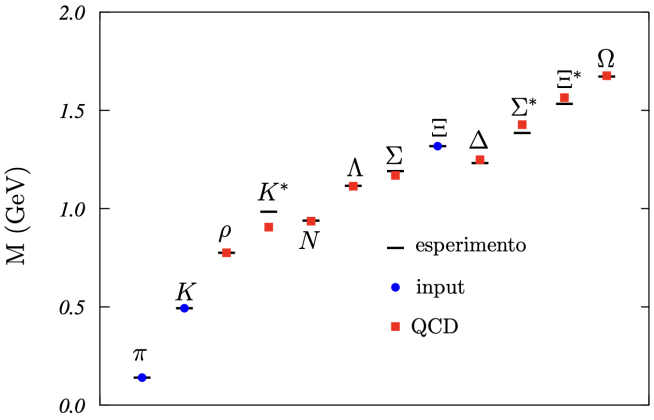


Figura 14: Masse degli adroni più leggeri calcolati usando la tecnica di QCD su reticolo [41]. Le linee indicano i valori sperimentali. I punti blu indicano le masse usate come input del calcolo, e i risultati sono indicati dai punti rossi. Non sono inserite le incertezze statistiche del calcolo.

una descrizione dei nuclei in termini di quark e gluoni è, al momento, troppo complicata per poter essere effettuata. Vi sono ricerche volte allo studio dei sistemi nucleari utilizzando tecniche di QCD su reticolo [42], ma anche gli esperti sono scettici riguardo alla diretta applicabilità di questo metodo a sistemi composti da un grande numero di nucleoni.

In questo quadro, l'interazione tra i nucleoni emerge come un'interazione tra aggregati di quark e gluoni, analogamente a ciò che sono le forze elettromagnetiche di van der Waals tra molecole.

Un approccio meno diretto al problema di un'interazione nucleare riconducibile alla QCD è stato proposto da Weinberg nell'ultima decade del secolo scorso [43, 44], e si inserisce nella più vasta tematica delle teorie di campo effettive.

Il programma di questo approccio si può riassumere nei seguenti passi.

1. Scelta dei gradi di libertà appropriati per descrivere l'interazione nucleare.
   Abbiamo già visto che è da escludere una descrizione del nucleo in termini di quark e gluoni perché troppo complessa per gli attuali standard di calcolo numerico. La domanda è quindi quali siano le entità di cui trascuriamo la struttura interna (in gergo "i gradi di libertà fondamentali") da cui partire per la descrizione dell'interazione nucleare. I dati empirici ci aiutano perché lo spettro adronico (Fig. 14) mostra una chiara separazione tra la massa del pione (~ 140 MeV) rispetto a quella del mesone ρ (~ 780 MeV) [1]. Questa separazione di scale energetiche suggerisce di trattare i fenomeni legati ad energie dell'ordine di pochi MeV considerando solo nucleoni e pioni. Tutto sommato si ritorna all'idea di Yukawa.

2. Identificazione delle simmetrie della QCD che devono essere rispettate.
   L'interazione che si vuole costruire deve soddisfare proprietà molto generali di ogni interazione come l'analiticità, l'unitarietà e l'inverianza per permutazione tra particelle. Inoltre è essenziale considerare una simmetria specifica della teoria QCD: l'invarianza chirale.

3. Costruzione dell'interazione nella formulazione più generale possibile e consistente con le simmetrie da soddisfare.
   L'interazione considera termini in cui i nucleoni interagiscono scambiandosi pioni. Ci sono altri termini in cui i nucleoni interagiscono direttamente (termini di contatto) e ancora altri termini di interazione tra i pioni.

4. Definizione di una schema ordinato dei vari termini dell'interazione.
   Le infinite possibili interazioni tra nucleoni e pioni, compatibili con tutte le simmetrie della QCD, inclusa la simmetria chirale possono essere ordinate in uno schema perturbativo. Il parametro dello sviluppo è dato dal rapporto tra Q, l'impulso che le particelle interagenti si scambiano, e Λ che è il parametro che fissa la scala degli adroni più pesanti, ad esempio la massa del mesone ρ. Ogni termine dello sviluppo è quindi caratterizzato da una potenza del rapporto Q/Λ. Lo sviluppo perturbativo in termini di potenze di Q/Λ è ben controllato, nel senso che è possibile identificare tutti i termini che posseggono la stessa potenza di Q/Λ. Analizzando i termini dello stesso ordine

[1] In Fig. 14 tra π e ρ appare il mesone K con una massa di circa 500 MeV. Questo mesone contiene quark s (strani) e quindi appartiene ad una differente categoria di adroni che non contribuisce all'interazione nucleare forte nel regime energetico di interesse per la struttura nucleare.

perturbativo emerge naturalmente che, oltre alle interazioni tra due nucleoni, ci sono interazioni a tre e più corpi. Queste interazioni a molticorpi appaiono ad ordini sempre maggiori di Q/Λ, (vedi Fig. 15).

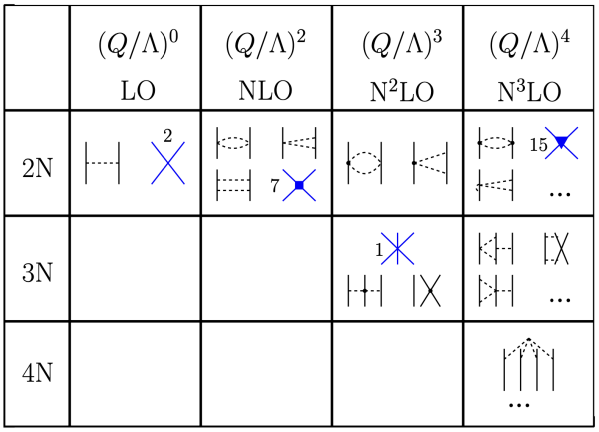


Figura 15: Diagrammi che illustrano i vari termini dello sviluppo chirale dell'interazione tra nucleoni. Le linee continue rappresentano i nucleoni e quelle tratteggiate i pioni. In azzurro sono presentati i termini di contatto e il numero di parametri liberi definiti come *Low Energy Constants* (LECs). Le interazioni a tre corpi (3N) appaiono a partire dai termini *Next Next Leading Order* (N^{2}LO) e quelle a quattro corpi (4N) solo a partire dal NNNLO.

Lo schema teorico di questo approccio è ben fondato, ma anche in questo caso ci sono dei parametri liberi i cui valori devono essere definiti dal confronto con l'esperimento. Abbiamo già accennato che, oltre ai termini di interazione prodotti dallo scambio di pioni, la teoria considera anche termini di contatto, che simulano lo scambio di di mesoni più pesanti del pione, e trattano la dinamica dell'interazione a distanze inferiori al fm. L'intensità di questi termini di contatto non è fornita dalla teoria ma caratterizzata da parametri, detti Low Energy Constants (LECs), i cui valori sono determinati dal *fit* ai dati empirici.

Oggi questi potenziali, che vengono definiti "chirali", raggiungono quasi lo stesso livello di accuratezza dei più celebrati potenziali fenomenologici, ma usano un numero di parametri pari a circa la metà [45, 46].

Il vantaggio dei potenziali chirali rispetto a quelli fenomenologici e di scambio mesonico non riguarda tanto l'uso di un minor numero di parametri ma, piuttosto, il fatto che i termini delle interazioni a molticorpi emergono naturalmente, e consistentemente, dalla teoria e non devono essere inseriti uno alla volta. Termini di interazione che coinvolgono un numero crescente di nucleoni appaiono ad ordini di Q/Λ sempre maggiori, e questo diminuisce, progressivamente, la loro rilevanza.

Bisogna anche considerare che i potenziali chirali, provenendo da uno sviluppo perturbativo, permettono di stimare il valore dei termini non considerati e, quindi, di assegnare un'incertezza teorica ai risultati ottenuti. In principio, è sempre possibile diminuire questa incertezza procedendo con il calcolo degli ordini successivi.

Teorie fondamentali

Come già accennato nella sezione precedente, le ipotesi su cui si basa la teoria usata per la descrizione del nucleo sono le seguenti.

- I nucleoni sono i gradi di libertà fondamentali. La descrizione del nucleo è fatta considerandolo un sistema composto dai nucleoni, come fossero particelle prive di struttura interna. Gradi di libertà di quark e gluoni non sono considerati.

- La dinamica del sistema è trattata nell'ambito della Meccanica Quantistica non relativistica.

Ovviamente, la validità di queste ipotesi è sempre sotto giudizio, ma è su queste ipotesi che si basa quella che possiamo definire come Teoria Standard del nucleo.

Tutto questo per affermare che lo scopo della teoria standard è quello di risolvere l'equazione di Schrödinger per un sistema di nucleoni interagenti. Questo è un compito estremamente difficile, e soltanto in pochi casi il problema è risolto senza fare approssimazioni.

Nel paragrafo precedente abbiamo considerato il caso di due nucleoni che interagiscono nel vuoto. Questo caso, è estremamente semplice da affrontare perchè il problema è riducibile a quello di un corpo con una massa effettiva che si muove in un potenziale.

Il problema a tre corpi è già più complicato. Ci sono differenti tecniche che permettono, oggi con l'aiuto di computer sempre più potenti,

di risolvere questo problema. Anche il problema a 4 corpi può essere affrontato con tecniche analoghe a quelle dei tre corpi, senza fare approssimazioni nella procedura di calcolo. Esiste un inportante articolo in cui sono confrontati i risultati ottenuti con ben sette tecniche differenti [47]. Fortunatamente, usando la stessa interazione, le 7 tecniche forniscono risultati che combaciano, all'interno delle incertezze numeriche.

La maggior parte di queste tecniche sono pensate in maniera specifica per sistemi che hanno un preciso numero di nucleoni e non possono essere generalizzate. In tempi relativamente recenti, grazie allo sviluppo delle tecnologie informatiche, è stato possibile utilizzare un metodo che, almeno in linea di principio, è assolutamente generale, e quindi applicabile ad ogni nucleo.

Questo metodo si basa su tecniche Montecarlo per calcolare integrali a molte dimensioni. Questi integrali sono quelli che appaiono nell'equazione di Schrödinger a molti corpi, quando si fanno interagire i nucleoni. Per un nucleo con A nucleoni appaiono integrali di $3A$ dimensioni che coinvolgono l'interazione tra coppie di nucleoni, e anche tripletti di nucleoni perché l'inserimento della forza a tre corpi è necessario.

Il metodo, chiamato Green's Function Montecarlo (GFMC) o, talvolta, Quantum Montecarlo, risolve questi integrali a molte dimensioni per tutte le possibili combinazioni di spin e isospin dei nucleoni per differenti valori del tempo (immaginario) fino a quando si raggiunge stabilità dei risultati. Questo significa, ad esempio, fare il calcolo in cui il primo nucleone è un protone con spin all'insù, il secondo è un neutrone e anche il suo spin è allineato all'insù e così via fino a quando sono considerati tutti i nucleoni. Poi si ripete cambiando la configurazione e sondando tutte quelle possibili. Tutto questo calcolo è effettuato per un valore di un parametro detto tempo immaginario. Nel valore iniziale di questo parametro la funzione d'onda, il cui modulo quadro indica la densità di probabilità di trovare un nucleone in una certa porzione di spazio, contiene molte componenti spurie. Facendo evolvere il tempo immaginario per valori molto grandi, teoricamente dovrebbe tendere all'infinito, rimane solo la componente dello stato ad energia minima.

Questo tipo di calcoli è computazionalmente estremamente oneroso. Non solo, ma ci sono anche dei limiti fisici alla sua applicazione. Nella Tabella 1 mostriamo il numero di configurazioni di spin e isospin per vari nuclei. Questo numero indica il numero di integrali a $3A$ dimensioni da calcolare per ogni valore del tempo immaginario. Siccome è dato da una situazione combinatoria del numero di protoni e neutroni, questo cresce come i fattoriali di questi numeri. Per il ^{40}Ca il numero di queste configurazioni raggiunge il numero di Avogadro. Anche se, in linea di principio, il metodo è applicabile per qualsiasi nucleo, è evidente che può essere usato solo per nuclei con valori relativamente piccoli di nucleoni.

Nucleo	Z	N=A-Z	N_{conf}
^{3}H	1	2	24
^{3}He	2	1	24
^{4}He	2	2	96
^{6}He	2	4	960
^{6}Li	3	3	1280
^{8}He	2	6	7168
^{12}C	6	6	3784704
^{16}O	8	8	$8.4 \cdot 10^{8}$
^{40}Ca	20	20	$1.5 \cdot 10^{23}$
^{48}Ca	20	28	$4.7 \cdot 10^{27}$

Tabella 1: Numero delle configurazioni di spin e isospin di alcuni nuclei.

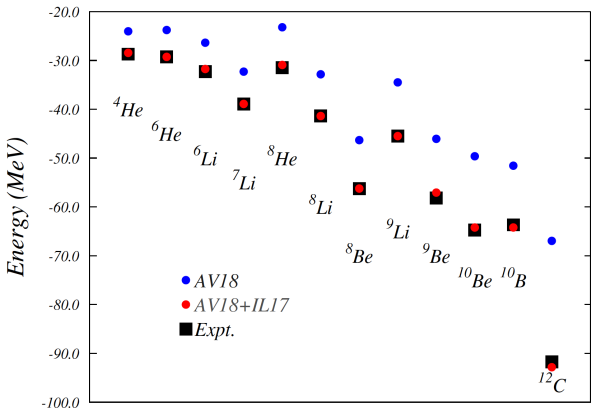


Figura 16: Confronto tra dati sperimentali, in nero, e risultati del GFMC ottenuti usando solo un'interazione fenomenologica a due corpi, punti blu, e includendo l'interazione a tre corpi, punti rossi. Risultati dalla Ref. [48].

I moderni calcoli sono riusciti a spingere il metodo fino al ^{12}C [48, 49]. Mostriamo nella Fi-

gura 16 un confronto tra i risultati del calcolo GFMC con i valori delle energie di legame degli stati fondamentali dei nuclei dall'^{4}He fino al ^{12}C. Deutone, trizio e ^{3}He non sono inseriti perché usati per definire l'interazione. I punti mostrano i risultati ottenuti utilizzando un'interazione fenomenologica che considera solo la parte a due corpi, punti blu, e una in cui ci sono anche termini a tre corpi, punti rossi.

Utilizzando l'interazione completa si ha un'ottima descrizione delle energie dello stato fondamentale di questi nuclei. Oggi calcoli GFMC sono usati per calcolare osservabili come momenti magnetici e risposte elettromagnetiche. Nonostante sembra sia difficile, al momento, applicare il metodo GFMC a nuclei più pesanti del ^{12}C, questi calcoli ricoprono un'importanza fondamentale certificando la validità delle ipotesi su cui si basa la teoria standard del nucleo.

Teorie microscopiche con approssimazioni

Purtroppo la possibilità di risolvere l'equazione di Schrödinger senza fare approssimazioni è, attualmente, limitata a nuclei più leggeri del ^{12}C, incluso. Anche se, in quest'ambito, fare estrapolazioni è un'operazione scientificamente mal posta, possiamo comunque affermare che, al momento, ci sono fondati motivi per credere che se potessimo applicare le metodologie usate per descrivere i nuclei leggeri anche a sistemi pesanti otterremmo un buon accordo con i dati sperimentali.

A questo punto il problema è quello di risolvere l'equazione di Schrödinger per sistemi più pesanti del ^{12}C facendo delle approssimazioni in modo da semplificare il calcolo. La situazione ideale è quella in cui le approssimazioni sono ben controllate in modo da poter continuamente migliorarne la validità.

Quanto descritto sopra è il paradigma delle teorie perturbative. Si risolve l'equazione di Schrödinger per un caso semplice e si corregge la soluzione migliorando l'approssimazione passo dopo passo. Per quanto riguarda il nucleo, il caso semplice da cui partire per fare teoria pertubativa, è quello in cui si considera il sistema come composto da nucleoni non interagenti tra loro e confinati da un potenziale. In questo modello, l'equazione di Schrödinger può essere espressa come

$$H_0|\Phi\rangle = \mathcal{E}|\Phi\rangle \quad , \tag{2}$$

dove H_0 è l'operatore hamiltoniano che descrive il moto di A nucleoni indipendenti

$$H_0 = \sum_{i=1}^{A} h_i = \sum_{i=1}^{A} \left(-\frac{\hbar^2}{2m_i}\nabla_i^2 + U(\mathbf{r}_i) \right) \quad , \tag{3}$$

dove abbiamo espresso l'operatore hamiltoniano di singola particella h_i nello spazio delle coordinate, indicando con m_i la massa dell'i-esimo nucleone, con $\mathbf{r}_i$ la sua posizione rispetto ad un sistema fisso di coordinate e con U il potenziale che lo tiene confinato. Per ogni nucleone si risolve l'equazione di Schrödinger di singola particella

$$h_i|\phi_i\rangle = \epsilon_i|\phi_i\rangle \quad , \tag{4}$$

e, la soluzione $|\Phi\rangle$ del problema totale, Eq. (2) è un prodotto antisimmetrizzato di funzioni d'onda di singola particella $|\phi_i\rangle$, detto determinante di Slater. In questo modello, detto di campo medio, o a particelle indipendenti, il problema ad A corpi è trasformato in A problemi ad un corpo, ognuno di questi ultimi facilmente risolvibile.

Nella teoria perturbativa il sistema interagente è descritto partendo da quello a particelle indipendenti e correggendolo man mano per ottenere risultati sempre più accurati. Se consideriamo l'energia E del sistema interagente questa può essere espressa in termini di quantità calcolate nel modello a campo medio come

$$E = \mathcal{E} + \langle\Phi|V\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{1}{\mathcal{E}-H_0}V\right)^n|\Phi\rangle_c \quad , \tag{5}$$

dove V è l'ingrediente fisico che corregge il modello a campo medio, l'interazione tra i nucleoni. Il simbolo di Dirac $\langle|$ operatore $|\rangle$ indica l'integrale a $3A$ dimensioni su tutte le coordinate spaziali che identificano i singoli nucleoni. Il pedice c è stato inserito per indicare che nella somma sono esclusi termini che possono provocare divergenze.

L'espressione (5) non contiene approssimazioni, ma la sua utilità consiste nella possibilità di troncare la sommatoria quando n raggiunge un valore massimo n_{max}. Il meccanismo funziona se il contributo dei termini per $n > n_{\text{max}}$ è inferiore

a quello dei termini con $n \leq n_{\max}$.

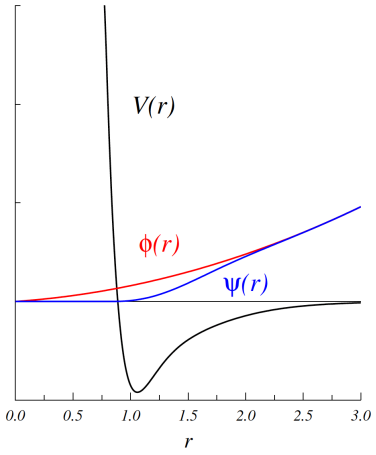


Figura 17: Rappresentazione schematica dell'interazione tra due nucleoni con la funzione d'onda relativa realistica ψ, e quella di campo medio ϕ. Le unità sono arbitrarie.

L'applicazione immediata, ed ingenua, dell'Eq. (5) al caso nucleare si scontra con una delle peculiarità dell'interazione tra due nucleoni: il nocciolo fortemente repulsivo a piccole distanze internucleoniche.

Per chiarire il punto, consideriamo il primo termine della (5), quello con $n = 0$,

$$< \Phi|V|\Phi >= \frac{1}{2}\sum_{ij}\Big(\int d\mathbf{r}_1 d^3\mathbf{r}_2 \phi_i^*(\mathbf{r}_1)\phi_j^*(\mathbf{r}_2) V(|\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2|)\phi_i(\mathbf{r}_1)\phi_j(\mathbf{r}_2) + \text{exch.}\Big) \ , \qquad (6)$$

dove abbiamo indicato con "exch." un termine analogo a quello scritto ma nel quale i ruoli di ϕ_i e ϕ_j sono scambiati.

Quando la distanza tra i due nucleoni, $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ è inferiore a circa 0.5 fm, il potenziale di interazione assume valori positivi molto grandi rispetto a quelli tipici della sacca attrattiva. Il valore del termine (6) è molto più grande di quello di $\mathcal{E}$ nell'Eq. 5. Quindi il calcolo di E avviene sommando e sottraendo termini i cui valori sono di gran lunga maggiori di quello che si vuole calcolare. Nel limite in cui il potenziale tende all'infinito per piccoli valori di $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$, il valore del termine (6) sarebbe infinito. In questo caso il valore di E sarebbe calcolato sommando e sottraendo infiniti.

È evidente che questa è una situazione da evitare in una visione perturbativa, la cui validità operativa è strettamente legata al fatto che i termini correttivi sono piccoli rispetto alla quantità da calcolare, e il loro contributo diminuisce aumentando la complessità del termine, il valore di n nella (5), nel nostro caso.

Questo problema non sussiste quando si affronta il calcolo con tecniche prive di approssimazioni, come il GFMC. In questo caso, si considera il fatto che due nucleoni non possono avvicinarsi nella regione dove il nocciolo repulsivo è attivo. Questo è indicato nella Fig. 17 dalla ψ che è zero nella regione del nocciolo repulsivo, in modo tale che il prodotto tra potenziale V e funzione d'onda relativa sia finito. Quando si fa teoria perturbativa si usano funzioni d'onda ottenute in assenza di interazione quindi diverse da zero nella regione del nocciolo repulsivo, come indicato dalla ϕ nella figura, quindi il prodotto $V\phi(r)$ è molto grande rispetto al valore di E.

Per superare questo problema è possibile riscrivere l'Eq. (5) in modo da utilizzare, al posto di funzioni d'onda di campo medio Φ, funzioni d'onda $F\Phi$ dove F è una funzione, detta di correlazione, costruita per impedire a due nucleoni di avvicinarsi troppo. Ad esempio il termine $n = 0$ dell'Eq. (6) diventerebbe

$$\langle\Phi|V|\Phi\rangle \ \rightarrow \ \langle\Phi|F^+VF|\Phi\rangle \ . \qquad (7)$$

L'interpretazione dell'espressione precedente fornisce la lettura delle due strade, alternative, che si sono intraprese per affrontare il problema.

La strada che dal punto di vista storico è stata praticata per prima è quella che interpreta F^+VF come una nuova interazione, effettiva, V_{eff}, che agisce su stati di modello a particelle indipendenti, ma che non ha il nocciolo fortemente repulsivo. Le tecniche usate per calcolare V_{eff} sono ispirate a quelle normalmente utilizzate in teoria dei campi [50].

L'interpretazione fisica dei risultati può essere riassunta in questo modo. C'è un'enorme differenza tra l'interazione tra due nucleoni nel vuoto e nel nucleo. In questo secondo caso, anche il sistema è globalmente coinvolto dalla coppia di nucleoni che interagisce, e le eccitazioni virtuali del sistema modificano, di fatto, l'interazione. È un fenomeno analogo a quello che succede a due cariche che interagiscono in un mezzo dielettrico, l'interazione viene modificata.



Figura 18: Foto dei partecipanti al workshop del 1977 ad Urbana. Da sinistra a destra.
Prima fila: Eugene Feenberg, Chuck Campbell, Geoff Ravenhall, Claude Mahaux, Hans Bethe.
Seconda fila: Alpo Kallio, Omar Benhar, Sergio Rosati, Stefano Fantoni, Sigurd Kohler, Vijay Pandharipande, Earle Lomon, John Negele.
In terza fila: Roger Smith, John Owen, John Zabolitzky, Robert Buchler, John Maxwell (Max) Irvine, Ramdas Ram-Mohan, James Vary, Alex Lande.
Quarta fila: Ben Day, Gerry Brown, David Sandler, Michael Johnson, Pui Man Lam, Eckhard Krotscheck, non identificato, Ernie Moniz, Oren V. Maxwell.
Quinta e sesta fila: C.K. Au, Chun Wa Wong, Bob Wiringa, (dietro) Bob Panoff, Kevin Schmidt, Fritz Coester, (dietro) Georges Ripka, Paul Ellis, Baird Brandow, (dietro) Lauri Lantto, Bruce Fryxell, Jerzy Borysowicz, T.-S. (Harry) Lee.
Ultima fila: Mal Kalos, Geoffrey Chester, Murray Peshkin, John Clark, Peter Axel, Phil Siemens, Larry McLerran, and Siu Chin.
Foto dal sito [55].

È più recente l'interpretazione dell'espressione (7) come l'azione del potenziale V su stati correlati $F|\Phi\rangle$ [51, 52]. Si tratta di teorie e tecniche di calcolo ispirate dalla Meccanica Statistica.

La parola correlazione indica genericamente tutto ciò che va oltre il modello a particelle indipendenti. In questo caso le correlazioni sono contenute nella funzione F e ci si riferisce a correlazioni dette a corto raggio perchè il ruolo di questa funzione è proprio quello di impedire che due nucleoni si avvicinino troppo. Normalmente si considera un'espressione della F del tipo

$$F(\mathbf{r}_1 \dots \mathbf{r}_A) = \prod_{i,j=1}^{A} f(r_{ij}) \ , \qquad (8)$$

dove f è una funzione che tende a zero quando la distanza tra i nucleoni i e j r_{ij} tende a 0, e tende a 1 per valori di r_{ij} maggiori del raggio

d'interazione.

Il punto essenziale è come ottenere le funzioni f. L'idea è quella di usare delle espressioni contenente dei parametri, ad esempio

$$f(r) = 1 - a\, e^{-br^2} \quad ,$$

dove a e b sono i parametri il cui valore è ottenuto utilizzando il principio variazionale

$$\delta E = \delta \left(\frac{\langle \Phi | F^+ (H_0 + V) F | \Phi \rangle}{\langle \Phi | F^+ F | \Phi \rangle} \right) = 0 \quad . \qquad (9)$$

La soluzione di questa equazione corrisponde a quella ottenuta risolvendo l'equazione di Schrödinger nell'ipotesi che le funzioni d'onda possano essere espresse come $F|\Phi\rangle$.

I due modi di affrontare il problema si sono scontrati per molto tempo anche con toni estremamente polemici perchè producevano risultati molto diversi. Il confronto tra i vari approcci utilizzati era molto complicato perchè si confrontavano risultati ottenuti usando differenti interazioni nucleone-nucleone e nuclei differenti.

In un workshop, nel 1977, presso il Dipartimento di Fisica di Champaign-Urbana (USA), (vedi la Figura 18), Hans Bethe propose ai partecipanti di lavorare tutti su un sistema nucleare ben definito, e relativamente semplice da studiare, la materia nucleare simmetrica. Si tratta di un sistema ideale composto da un numero infinito di nucleoni con lo stesso numero di protoni e neutroni in cui l'interazione elettromagnetica è spenta. Il confronto tra le varie metodologie si concentrò sulla descrizione di questo sistema, ma solo alla metà degli anni '90 si riuscì a trovare un accordo tra i risultati ottenuti con i diversi approcci. Un resoconto sull'attuale situazione riguardante le teorie che descrivono la materia nucleare si trova in [53].

Oggi le teorie ispirate alla Meccanica Statistica sono quelle più promettenti, ed utilizzate, per eseguire calcoli microscopici dei nuclei finiti. Con l'aggettivo "microscopici" si intende calcoli nei quali si usa l'interazione nucleone-nucleone che descrive i dati di due nucleoni. Ovviamente questa è implementata con una interazione a tre corpi.

Questi calcoli sono estremamente complessi, ma utilizzando differenti tecniche, si riesce a descrivere in maniera realistica nuclei sempre più pesanti. Oggi, una tecnica detta di Coupled Cluster è stata applicata alla descrizione dei nuclei di ^{40}Ca e ^{48}Ca [54]. Il confronto con i dati empirici è molto soddisfacente, e questo convalida, ulteriormente, lo schema teorico su cui si basa la descrizione standard del nucleo.

L'approccio basato sulla teoria dei campi con interazioni effettive è stato estremamente prolifico dal punto di vista teorico, perchè fornisce la base teorica delle teorie più usate per descrivere il nucleo: le teorie effettive.

Teorie effettive

L'idea che due nucleoni nel nucleo interagiscano in maniera differente rispetto a come interagiscono nel vuoto, è stata molto proficua ed è alla base del concetto di teoria effettiva. Il problema a molticorpi è affrontato usando funzioni d'onda e interazioni effettive in modo tale da semplificarlo. Di fatto, queste teorie effettive sono basate sul modello a particelle indipendenti. Questo avviene considerando la funzione d'onda che descrive il nucleo nella forma di determinante di Slater, ovvero la soluzione di campo medio, Eq. (2). Usando il principio variazionale (9) con $F = 1$ si ottengono le equazioni di Hartree-Fock, che descrivono lo stato del nucleo come un sistema in cui i nucleoni si trovavano in stati energetici di singola particella.

L'interazione effettiva è fissata in modo che calcoli Hartree-Fock possano riprodurre energie di legame e raggi di distribuzione di carica per il maggior numero di nuclei possibile. Oggi queste procedure di *fit* considerano più di mille nuclei in tutta la carta degli isotopi [56].

Possiamo catalogare questi calcoli in tre tipologie: calcoli con interazioni di contatto, calcoli con interazioni a rango finito, e calcoli relativistici. Al di là delle differenze tecniche, il punto essenziale è che tutte queste interazioni effettive includono un termine dipendente dalla densità del sistema. Senza questo termine il *fit* ai dati sperimentali non riesce. Quali siano i fenomeni fisici considerati da questo termine dipendente dalla densità non è affatto chiaro, e il problema è oggetto di studio.

Le funzioni d'onda ottenute da questi calcoli sono costruite per descrivere nel modo migliore possibile lo stato fondamentale dei nuclei. Le, po-

che, deviazioni tra previsione della teoria Hartee-Fock e osservazione sperimentale sono studiate per comprendere i limiti della teoria.

La teoria effettiva Hartree-Fock ha un enorme successo nella descrizione dello stato fondamentale, ma fallisce immediatamente nel momento in cui si tratta di descrivere gli stati eccitati.

Il caso da manuale di questa difficoltà è il primo stato eccitato del ^{208}Pb con una energia di eccitazione di 2.614 MeV, caratterizzato dal momento angolare e parità 3^-. Secondo il modello a particelle indipendenti (vedi lo schema di Fig. 7) il primo stato eccitato dovrebbe essere descritto dalla promozione dallo stato $3p_{1/2}$, detto stato buco al di sotto dell'energia di Fermi, allo stato $3g_{9/2}$, detto stato particella al di sopra dell'energia di Fermi. Non solo l'energia di eccitazione è sbagliata, 3.431 MeV, ma, sopratutto, questa transizione non è compatibile con il momento angolare $J = 3$.

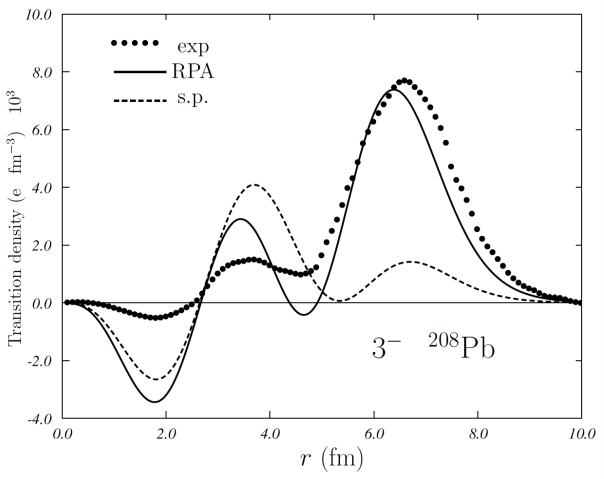


Figura 19: Densità di transizione in funzione della distanza dal centro del nucleo per lo stato 3^- a 2.61 MeV del ^{208}Pb ottenuta da processi di diffusione anelastica di elettroni. I punti neri rappresentano la curva empirica, la linea tratteggiata il risultato di un calcolo di campo medio e quella continua il risultato di un calcolo RPA.

Uno studio dell'eccitazione di questo stato con elettroni effettuato per differenti valori del momento trasferito, ha permesso di ricostruire la densità di transizione in funzione della distanza dal centro del nucleo (il modulo quadro di questa densità è legato alla probabilità di eccitazione). Questa informazione è presentata nella Figura 19 dalla linea a punti. Come si vede, il massimo della densità si trova alla superficie del nucleo, che indica che questo stato è una vibrazione superficiale del sistema, originariamente sferico. La linea tratteggiata, incapace di descrivere la vibrazione superficiale, è il risultato del modello a particelle indipendenti.

Questo modello è corretto utilizzando una teoria chiamata Random Phase Approximation (RPA) [57] originariamente formulata per descrivere eccitazioni armoniche del plasma. L'idea della RPA è quella di descrivere gli stati eccitati del sistema non come eccitazioni individuali particella-buca, ma come una combinazione lineare di queste eccitazioni. La teoria lega i coefficienti di questa combinazione lineare all'interazione, effettiva, tra i nucleoni.

La descrizione dello spettro di eccitazione dei nuclei migliora enormemente rispetto alle previsioni del modello a particelle indipendenti. Considerando il caso del 3^- del ^{208}Pb, che abbiamo preso come esempio paradigmatico, la teoria RPA prevede che questo sia il primo stato eccitato di questo nucleo, inoltre, anche la densità di transizione è ben descritta. La linea continua nella Figura 19, ottenuta usando la funzione d'onda collettiva prodotta da un calcolo RPA, riproduce bene l'eccitazione superficiale che contraddistingue questo modo di eccitazione.

I comportamenti collettivi e di singola particella del nucleo sono descritti contemporaneamente nell'ambito dello stesso quadro teorico, quello di HF + RPA, che con tutte le sue varianti e perfezionamenti è quello oggi più utilizzato per lo studio degli stati eccitati del nucleo.

Conclusioni

Il nucleo atomico è un complicato laboratorio nel quale, e sul quale, agiscono tutte le interazioni fondamentali. I più di cento anni di studio di questo sistema hanno prodotto una profonda conoscenza del comportamento di questo sistema dal punto di vista osservativo, un comportamento spesso molto differente rispetto a quello di altri sistemi ai noi più famigliari.

Dopo una fase in cui vari aspetti del nucleo erano descritti usando modelli anche fortemen-

te contrastanti tra loro, oggi la descrizione della struttura nucleare si basa su ipotesi ben fondate legate ad una teoria ben consolidata. Possiamo riassumere questi fatti affermando che il nucleo è un sistema ben descritto nell'ambito della Meccanica Quantistica non relativistica considerando i nucleoni come entità fondamentali.

Dal punto di vista tecnico queste ipotesi si condensano nel problema di risolvere l'equazione di Schrödinger per un sistema di A corpi interagenti. Partendo da una interazione nucleare costruita per riprodurre i dati di due nucleoni, e risolvendo l'equazione di Schrödinger senza fare approssimazioni, si ottiene un eccellente accordo con i dati sperimentali.

Purtroppo la complessità tecnica del problema è tale che oggi, nonostante l'enorme sviluppo delle capacità di calcolo, si possono descrivere, senza alcuna approssimazione, sistemi fino ad $A = 12$. Per questo motivo, è aperta una linea di studi teorici delle teorie a molti corpi il cui scopo è quello di costruire delle approssimazioni controllate del problema. Anche in questo campo i progressi sono stati enormi negli ultimi anni, e i risultati ottenuti confermano la validità delle ipotesi di partenza su cui si basa tutto l'apparato teorico.

La complessità dei calcoli che coinvolgono le teorie che utilizzano interazioni tra nucleoni nel vuoto ha spinto alla produzione di teorie effettive, in cui si usa una interazione tra nucleoni adeguata al fatto che questi non interagiscono nel vuoto ma all'interno del nucleo. Molti degli effetti del mezzo che le teorie microscopiche calcolano in dettaglio, sono in questo caso condensate in maniera effettiva nell'interazione, e questo permette una trattazione semplificata del problema. Queste teorie effettive sono oggi le più utilizzate per la descrizione di nuclei medio-pesanti, e nonostante le differenti parametrizzazioni dell'interazione effettiva, producono risultati molto simili.

Usando un'allegoria, possiamo affermare che la descrizione del nucleo atomico fino all'inizio degli anni '90 del secolo scorso era come in insieme di isole da ognuna delle quali era possibile osservare e descrivere un peculiare, e limitato, aspetto del panorama. Oggi queste isole sono collegate tra loro, e la visione è quella di un arcipelago bagnato dallo stesso mare. Non tutti i collegamenti tra le varie isole sono stati realizzati, ad esempio quello tra interazioni microscopiche ed effettive, ma il quadro generale è ben chiaro, così come il lavoro che si deve ancora fare.



[1] E. Rutherford: *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, Phil. Magazine, 21 (1911) 669.

[2] E. Rutherford: *Collision of α Particles with Light Atoms IV. An Anomalous Effect in Nitrogen*, Phil. Magazine, 37 (1919) 581.

[3] W. Pauli, Lettera inviata il 4 Dicembre 1930 ai partecipanti ad un congresso a Tubingen.

[4] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dei raggi β*, Nuovo Cimento, 11 (1934) 1.

[5] E. Fermi: *Versuch eine Teorie von β Stralen*, Zeit. Phys., 88 (1934) 161.

[6] J. Chadwick: *Possible existence of the neutron*, Nature, (Feb. 27,1932) 312.

[7] A. Bohr, B. Mottelson: *Nuclear structure*, Benjam, New York (1969).

[8] J. M. Eisenberg, W. Greiner: *Nuclear theory*, North-Holland, Amsterdam (1975).

[9] P. Ring, P. Schuck: *The nuclear many-body problem*, Springer, 1980 (New York).

[10] A. Di Nitto: *L'oganesson, last but not least.*, Asimmetrie, 26 (2019) 34.

[11] G. Bendiscioli: *Fenomeni radioattivi e dintorni*, La Goliardica pavese, Pavia (2000).

[12] M. Thoennensen: *The discovery of isotopes*, Springer, Berlino (2016).

[13] F. M. Marqés: *The extremes of the neutron richness*, Eur. Phys. J. Plus, 136 (2021) 594.

[14] G. Squires: *Francis Aston and the mass spectrograph*, J. Chem. Soc., Dalton Trans., (1998) 3893.

[15] E. Segrè: *Nuclei e particelle*, Zanichellli, Bologna (1982).

[16] G.Audi, A. H. Wapstra: *The 1995 update to the atomic mass evaluation*, Nucl. Phys. A, 595 (1995) 1.

[17] J. M. Cavedon: *Distribution de charge de quelques noyaux a couche fermee dans leur ètat fondamental.*, Thèse de Doctorat d'Ètat, Université de Paris-Sud, Parigi (1980).

[18] R. Hofstadter: *Nobel lecture Dec. 1961*. https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/hofstadter-lecture.pdf

[19] C. W. De Jager, C. De Vries: *Nuclear Charge-Density Distribution Parameters*, At. Data and Nucl. Data Tables, 36 (1987) 495.

[20] I-Y. Lee: *The GAMMASPHERE*, Nucl. Phys. A, 520 (1990) c641.

[21] G. De Angelis et al.: *The EUROBALL gamma ray detector array*, Europhysics News, 34 (2003) 181.

[22] NuDat 3.0, Brookhaven National Lab. https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/

[23] J.P. Connelly et al.: *High resolution electron scattering from high spin states in ^{208}Pb*, Phys. Rev. C, 45 (1992) 2711.

[24] G. C. Baldwin, G. S. Klaiber: *Photofission in heavy elements*, Phys. Rev., 71 (1947) 3.

[25] J. Ahrens et al.: *Total nuclear photon absorption cross sections for some light elements*, Nucl. Phys. A, 251 (1975) 479.

[26] J. Speth Ed.: *Electric and Magnetic Giant Resonances in Nuclei*, World Scientific, Singapore (1991).

[27] P. Barreau et al.: *Deep-inelastic electron scattering from carbon*, Nucl. Phys. A, 402 (1983) 515.

[28] E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, E. Segrè: *Artificial radioactivity produced by neutron bombardement*, Proc. Royal Soc. A, 146 (1934) 483.

[29] O. Hahn, F. Strassmann: *Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*, Naturwiss., 27 (1939) 11.

[30] L. Meitner, O. R. Frisch: *Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction*, Nature, 143 (1939) 239.

[31] M. L. E. Oliphant, A. R. Kempton, E. Rutherford: *The Accurate Determination of the Energy Released in Certain Nuclear Transformations*, Proc. of the Royal Soc. A, 149 (1935) 406.

[32] https://luna.lngs.infn.it/

[33] https://web.archive.org/web/20060228160030/http://aliceinfo.cern.ch/Public

[34] R. Navarro P/'erez, J. E. Amaro, E. Ruiz Arriola: *Partial-wave analysis of nucleon-nucleon scattering below the pion-production threshold*, Phys. Rev. C, 88 (2013) 024002.

[35] R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks, R. Schiavilla: *An Accurate nucleon-nucleon potential with charge independence breaking*, Phys. Rev. C, 51 (1995) 38.

[36] H. Yukawa: *On the interactions of elementary particles*, Proc. Phys. Math. Soc. Jap., 17 (1935) 48.

[37] C. M. G. Lattes et al.: *Processes involving charged mesons*, Nature, 159 (1947) 694.

[38] R. Machleidt: *The high-precision charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential (CD Bonn)*, Phys. Rev. C , 63 (2001) 024001.

[39] H. Fritzsch, M. Gell-Mann and H. Leutwyler: *Advantages of the Color Octet Gluon Picture*, Phys. Lett. B, 47 (1973) 365.

[40] K. Wilson: *Confinement of quarks*, Phys. Rev. D, 10 (1974) 2445.

[41] S. Dürr et al.: *Ab-Initio Determination of Light Hadron Masses*, Science, 322 (2008) 1224.

[42] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda: *The Nuclear Force from Lattice QCD*, Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 022001.

[43] S. Weinberg: *Nuclear forces from chiral Lagrangians*, Phys. Lett. B, 251 (1990) 288.

[44] S. Weinberg: *Effective chiral Lagrangians for nucleon - pion interactions and nuclear forces*, Nucl. Phys. B, 363 (1991) 3.

[45] D. R. Entem, R. Machleidt: *Accurate charge dependent nucleon nucleon potential at fourth order of chiral perturbation theory*, Phys. Rev. C, 68 (2003) 041001.

[46] E. Epelbaum, W. Glockle, U. G. Meissner: *The Two-nucleon system at next-to-next-to-next-to-leading order*, Nucl. Phys. A, 747 (2005) 362.

[47] H. Kamada et al.: *Benchmark Test Calculation of a Four-Nucleon Bound State*, Phys. Rev. C, 64 (2001) 044001.

[48] J. Carlson et al.: *Quantum Monte Carlo methods for nuclear physics*, Rev. Mod. Phys., 87 (2015) 1067.

[49] S. Gandolfi, D. Lonardoni, A. Lovato, M. Piarulli: (, 2, 0 (2) 0.) Atomic Nuclei From Quantum Monte Carlo Calculations With Chiral EFT Interactions Front. Phys. 8 2020 117

[50] B. D. Day: *Elements of the Brueckner-Goldstone theory of nuclear matter*, Rev. Mod. Phys., 39 (1967) 719.

[51] S. Fantoni, S. Rosati: *The hypernetted-chain approximation for a fermion system*, Nuov. Cim. A, 25 (1975) 593.

[52] V. R. Pandharipande, R. B. Wiringa: *Variations on a theme of nuclear matter*, Rev. Mod. Phys., 51 (1979) 821.

[53] O. Benhar, S. Fantoni: *Nuclear matter theory*, CRC Press, Boca Raton (2021).

[54] G. Hagen, T. Papenbrock, M. Hjorth-Jensen, D. J. Dean: *Coupled-cluster computations of atomic nuclei*, Rep. Prog. Phys., 77 (2014) 096302.

[55] https://rpmbt.physics.indiana.edu/wiki/index.php?title=File:Urbana-1977-resize.jpg

[56] S. Hilaire, M. Girod: *Hartree-Fock-Bogoliubov Results Based on the Gogny Force* AMEDEE Database. Available online: http://www-phynu.cea.fr/HFB-Gogny_eng.htm

[57] G. Co': *Introducing the Random Phase Approximation theory*, Universe, 9 (2023) 141.

Giampaolo Co': è Professore Associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi a molticorpi e della redazione di *Ithaca*.

Luca Girlanda: è Professore Associato di Fisica Teorica presso l'Università del Salento.

Acceleratori di particelle per i beni culturali, la scienza dei materiali e le scienze forensi

Lucio Calcagnile *Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento*

Gli acceleratori elettrostatici di particelle con tensioni di accelerazione dell'ordine del MV sono utilizzati in numerosi campi della ricerca scientifica, dalla Scienza dei materiali all'Archeologia, dalle Scienze forensi alle Scienze della vita, dalla Geologia all'Ambiente [1, 2, 3]. Alcuni acceleratori sono di fatto delle *facilities* multitecnica in grado di modificare i materiali, determinare la composizione degli elementi e la cronologia assoluta [4, 5].
L'acceleratore Tandetron del CEDAD, il CEntro di Fisica applicata, DAtazione e Diagnostica del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento, è diventato nel corso degli anni una *facility* multidisciplinare grazie alla disponibilità di varie linee di fascio connesse con l'acceleratore. Tali *beamlines* consentono l'impiantazione ionica dei materiali e l'analisi composizionale e isotopica mediante le tecniche PIXE (Particle Induced X-Ray Emission), PIGE (Particle Induced Gamma-Ray Emission), RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) e AMS (Accelerator Mass Spectrometry).
In questo articolo, dopo una breve descrizione del principali caratteristiche dell'acceleratore Tandetron, verranno illustrate alcune ricerche effettuate dal Gruppo di Fisica Applicata con le facilities disponibili al CEDAD.

Acceleratori di tipo Tandem

Il Tandetron del CEDAD è un acceleratore di tipo Tandem, costituito pertanto da due colonne in cui le particelle cariche vengono accelerate per effetto di un campo elettrico.

L'accelerazione degli ioni avviene in due fasi: nella prima colonna di accelerazione, quella di bassa energia, le particelle vengono iniettate come ioni negativi subendo una prima accelerazione per effetto della tensione positiva applicata al centro del sistema. Nella regione centrale, detta Terminale, è posizionato lo *stripper* costituito da un tubo di acciaio nel quale gli ioni negati-

vi cambiano stato di carica diventando positivi per collisione con un gas argon [6, 7, 8]. Il cambiamento dello stato di carica causa quindi una repulsione e quindi una seconda accelerazione nella colonna di alta energia (Fig. 1).



Figura 1: La *tank* dell'acceleratore Tandetron del CEDAD con le colonne di bassa e alta energia. La parte perpendicolare contiene il generatore di alta tensione.

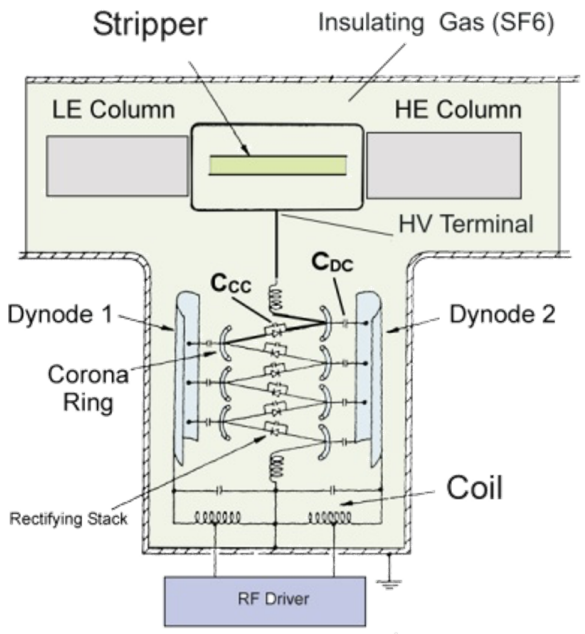


Figura 2: Schema dell'interno dell'acceleratore con lo *stripper* che separa le colonne di bassa e alta energia e il generatore di tensione del tipo Cockcroft-Walton.

L'acceleratore Tandetron del CEDAD è stato costruito dalla ditta olandese High Voltage Engineering Europa e ha la possibilità di variare la tensione da 400 kV a 3 MV.

Nel Tandetron la tensione di accelerazione si ottiene con un generatore a stato solido del tipo Cocroft-Walton posto perpendicolarmente alle colonne di accelerazione (Fig. 2). Il generatore è basato essenzialmente su un circuito risonante RLC, costituito da un generatore a radiofrequenza, connesso, tramite una induttanza, a due elettrodi capacitivamente accoppiati con una serie di diodi di alta potenza. Questi consentono di rettificare la tensione a radiofrequenza e di moltiplicare il segnale fino alla tensione massima.

Sia le colonne di accelerazione che il generatore di alta tensione sono sospesi all'interno di una *tank* in acciaio riempita con un gas isolante (SF6) per aumentare la rigidità dielettrica e ridurre la possibilità di scariche elettriche.

Gli ioni da accelerare sono prodotti nelle sorgenti dell'acceleratore poste prima della colonna di bassa energia. Il Tandetron ha sorgenti ioniche che consentono di produrre particelle leggere (H+ o He+, He++) o più pesanti a seconda delle applicazioni. Fasci di protoni o particelle alfa sono utilizzati come sonda per l'analisi dei materiali mentre per l'impiantazione ionica possono essere prodotti elementi più pesanti.

Esistono due tipologie di sorgenti ioniche: una del tipo `duoplasmatron` a gas, prevalentemente utilizzata per la produzione di particelle α, e un'altra sorgente a *sputtering* per tutti gli altri ioni. È evidente che le particelle per entrare nell'acceleratore devono avere uno stato di carica negativo, solitamente già presente per gli ioni generati per *sputtering*. Se invece, ioni positivi sono generati nella sorgente, come nella `duoplasmatron`, questi attraversano uno scambiatore di carica a vapori di litio nel quale acquistano elettroni, prima dell'ingresso nell'acceleratore.

L'acceleratore è il nucleo fondamentale di tutte le tecniche di analisi con fasci ionici **IBA** (*Ion Beam Analysis*) e delle tecniche di Spettrometria di Massa con Acceleratore **AMS** (*Accelerator Mass Spectrometry*). La possibilità di effettuare analisi IBA e AMS con lo stesso acceleratore consente un approccio integrato con varie tecniche in numerosi campi di ricerca quando, ad esempio, è richiesta la composizione dei materiali, l'analisi isotopica o la datazione assoluta. Questa è una peculiarità del sistema AMS-IBA del CEDAD [9, 10, 11].

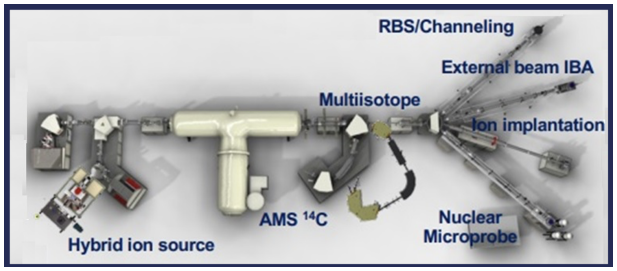


Figura 3: Le linee di fascio connesse con l'acceleratore Tandetron. Le sorgenti di ioni sono a sinistra. All'acceleratore sono connesse due linee di fascio AMS e quattro linee IBA.

La Fig. 3 mostra lo schema dell'acceleratore al quale sono connesse 4 sorgenti per la produzione dei fasci ionici e 6 linee di fascio: due linee per AMS e 4 per le tecniche IBA e impiantazione ionica. In particolare le linee o beamlines sono:

- AMS1: Spettrometria di massa con acceleratore dedicata alla misura del ^{14}C;
- AMS2: Spettrometria di massa per isotopi radioattivi ^{10}Be, ^{26}Al,^{129}I;
- RBS: *Rutherford Backscattering Spectrometry*;
- PIXE-PIGE: *Particle Induced X-Ray Emission*; *Particle Induced Gamma Ray-Emission* (in aria);
- II: linea di impiantazione ionica di alta energia;
- MB: linea di microfascio protonico.

Come si contano gli atomi radioattivi ad uno ad uno con la tecnica AMS

Una delle tecniche che hanno avuto una notevole diffusione grazie anche allo sviluppo tecnologico degli acceleratori di particelle negli ultimi anni è la Spettrometria di Massa con Acceleratore (**AMS**-*Accelerator Mass Spectrometry*). All'acceleratore Tandetron del CEDAD sono connesse due linee di fascio per AMS: una dedicata alla misura del radiocarbonio e l'altra in grado di misurare altri isotopi radioattivi con un maggiore tempo di dimezzamento [12, 13, 14] (Fig. 4).

La tecnica AMS consente la misura diretta del radiocarbonio e di altri isotopi radioattivi e si è



Figura 4: Le due linee per la misura diretta degli isotopi radioattivi. Una è dedicata alla misura del radiocarbonio e la seconda agli altri isotopi, dal ^{10}Be agli attinidi

sviluppata alla fine degli anni '70. La tecnica è nota anche al grande pubblico per aver consentito la datazione della Sindone nel 1989. Con la tecnica AMS si possono contare gli atomi di radiocarbonio ad uno ad uno e ha notevoli vantaggi rispetto alla tecnica radiometrica sviluppata da Libby negli anni '50. Per lo sviluppo del metodo di datazione con il radiocarbonio W.F. Libby, professore di Chimica all'Università di Chicago, fu insignito del premio Nobel per la Chimica nel 1960.

Il metodo di datazione con il radiocarbonio è diventato nel corso degli anni uno strumento fondamentale di indagine in numerosi campi di ricerca quali l'Archeologia, la Storia dell'arte, le Scienze forensi, l'Oceanografia e la Climatologia. Si basa sulla misura della concentrazione dell'isotopo cosmogenico radioattivo del carbonio, il ^{14}C, nel campione da analizzare.

Il radiocarbonio è prodotto nella troposfera, ad una altitudine di circa 15 km, per effetto dell'interazione con l'^{14}N dei neutroni termici prodotti dei raggi cosmici durante il loro rallentamento nell'atmosfera.

La reazione che ha la maggiore sezione d'urto per la produzione del radiocarbonio è:

$$^{14}\mathrm{N} + n \longrightarrow ^{14}\mathrm{C} + p \ .$$

Una volta prodotto il radiocarbonio si ossida, prima combinandosi con l'ossigeno atmosferico poi con il radicale OH^-, fino a formare la anidride carbonica $^{14}CO_2$. Questa con le altre

due forme stabili di anidride carbonica ($^{12}CO_2$ e $^{13}CO_2$) entra nelle diverse riserve di carbonio del nostro pianeta e nella biosfera. Il ^{14}C è radioattivo e decade continuamente secondo la legge del decadimento radioattivo con l'emissione di una particella β^-, cioè un elettrone e^-, e un antineutrino:

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + e^- + \overline{\nu} \ .$$

Il numero di nuclei di ^{14}C al tempo t è legato al numero di nuclei al tempo $t_0 < t$ da una legge di decadimento esponenziale

$$N(t) = N(t_0)\, e^{-\lambda t} \ ,$$

dove λ è la costante di decadimento legata al tempo di dimezzamento $T_{1/2}$, o emivita, dalla relazione

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \ .$$

Per il ^{14}C si ha $T_{1/2} = 5700 \pm 40$ anni.

In un organismo vivente, a causa della assimilazione e del decadimento, la concentrazione di radiocarbonio rimane quasi costante e pari al valore presente nell'atmosfera. Si instaura infatti una condizione di equilibrio dinamico grazie alla quale il ^{14}C che decade radioattivamente, o che viene rilasciato verso l'esterno per effetto dei processi biologici, è compensato dal ^{14}C assorbito attraverso la dieta o, per i vegetali, attraverso i processi di fotosintesi.

Alla morte dell'organismo, questa condizione di equilibrio dinamico viene a mancare e la concentrazione di radiocarbonio inizia a diminuire esponenzialmente. Misurando il radiocarbonio residuo in un materiale organico si può risalire all'epoca della morte. Questo è il principio della datazione con il metodo del radiocarbonio.

La misura del radiocarbonio può essere effettuata sperimentalmente con due tecniche: la tecnica radiometrica conta le particelle β^-, la spettrometria di massa con acceleratore misura invece direttamente il radiocarbonio. I vantaggi della tecnica AMS rispetto a quella radiometrica sviluppata da Libby sono notevoli:

- riduzione di oltre un fattore 1000 della quantità di materiale richiesta per l'analisi;
- riduzione di un fattore 100 del tempo di misura.

La possibilità di misurare con la tecnica AMS campioni contenenti fino a 0.3 mg di carbonio in tempi dell'ordine di 20-30 minuti e con precisioni del 2-3 ‰, ha rappresentato una vera rivoluzione nelle potenzialità applicative del metodo di datazione con il radiocarbonio, da numerosi punti di vista tra i quali la possibilità di datare materiali o oggetti di particolare valore archeologico o culturale. Basta citare a tale proposito la datazione della Sacra Sindone di Torino, della Lupa Capitolina e dei Bronzi di Riace.

La spettrometria di massa con acceleratore si basa sull'estrazione dal campione degli isotopi da analizzare, sulla loro accelerazione ad energie dell'ordine del MeV, sulla loro separazione in base al loro rapporto carica/massa ed energia/carica ed, infine, sulla loro rivelazione.

La parte fondamentale dello spettrometro AMS può essere schematizzata come formata da due spettrometri di bassa ed alta energia connessi tramite l'acceleratore Tandetron.

Nello spettrometro di bassa energia un fascio di ioni negativi, prodotto in una sorgente ionica a *sputtering* a partire dal *target* solido di grafite, subisce i primi processi di selezione in base al rapporto energia/carica in un analizzatore elettrostatico ed in base al rapporto carica/massa in un magnete, prima di essere iniettato nell'acceleratore.

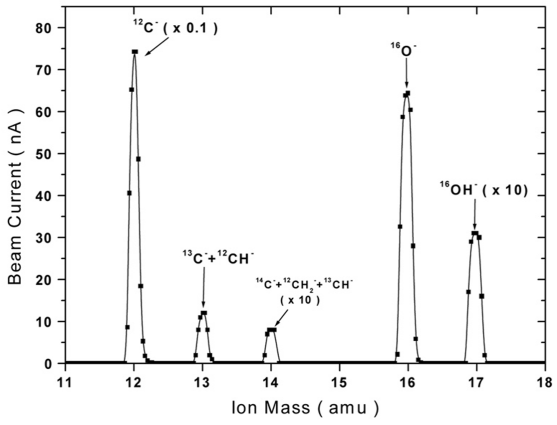


Figura 5: Spettro in massa dei fasci iniettati prima dell'ingresso nell'acceleratore. Le masse 13 e 14 sono sovrapposte a causa della presenza di molecole isobariche.

La Fig. 5 mostra lo spettro in massa del fascio ionico prodotto nella sorgente prima della sua iniezione nell'acceleratore. Le diverse masse sono ben separate ed identificate. Il pic-

co più intenso corrisponde alla massa 12 amu ($^{12}C^-$), mentre quello meno intenso alla massa 14 amu. I picchi in corrispondenza delle masse 16 e 17 corrispondono alle specie $^{16}O^-$ e $^{16}OH^-$, rispettivamente.

La risoluzione dello spettrometro di bassa energia non è in grado di separare i picchi corrispondenti alle masse 13 e 14 amu che sono la convoluzione dei picchi corrispondenti alle specie monoatomiche ($^{13}C^-$, $^{14}C^-$) e degli isobari molecolari $^{12}CH^-$, $^{13}CH^-$ e $^{12}CH_2^-$.

La soppressione degli isobari molecolari dalle specie atomiche corrispondenti richiede l'accelerazione degli ioni ad una energia elevate e la loro interazione con il gas argon dello *stripper*. Lo *stripping* di carica che si verifica nello *stripper* dell'acceleratore indebolisce il legame chimico delle specie molecolari causandone la dissociazione. La rottura degli isobari molecolari ($^{12}CH^-$, $^{13}CH^-$ e $^{12}CH_2^-$) nello *stripper*, porta alla formazione di frammenti molecolari con energia diversa da quella delle corrispondenti specie monoatomiche. La successiva analisi effettuata tramite lo spettrometro di massa di alta energia consente, quindi, di separare i contributi dei frammenti molecolari da quelli delle specie monoatomiche.

La tecnica AMS si è sviluppata quasi trent'anni dopo la tecnica radiometrica proprio quando si è compreso come si potevano dissociare gli isobari del radiocarbonio nello *stripper*.

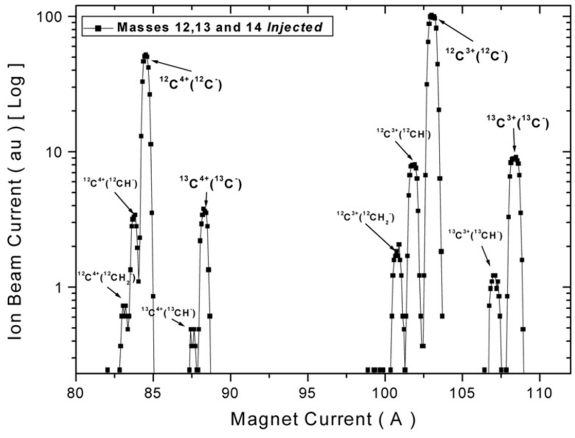


Figura 6: Spettro in massa misurato ad alta energia dopo la dissociazione degli isobari del carbonio 13 e 14.

La Fig. 6 mostra la separazione delle specie ioniche all'uscita dell'acceleratore: i frammenti molecolari sono chiaramente distinti dagli ioni iniettati come specie monoatomiche nell'acceleratore.

Lo spettrometro di alta energia consiste di un magnete analizzatore, due coppe di Faraday per la misura del ^{12}C e ^{13}C, un analizzatore elettrostatico, un magnete e un rivelatore a ionizzazione di isobutano per la misura del ^{14}C.

La misura del radiocarbonio con il metodo del *bomb peak*

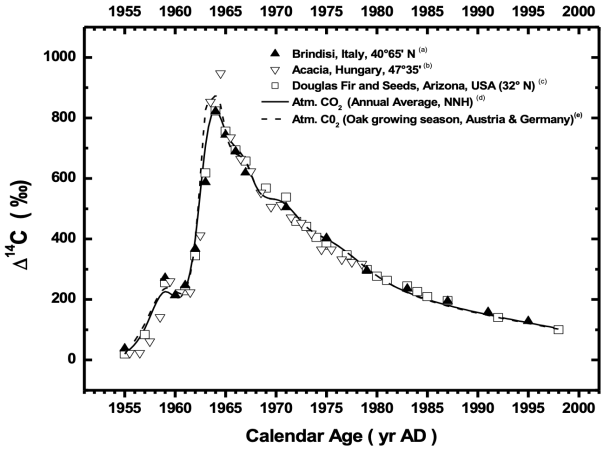


Figura 7: Determinazione del *bomb peak* effettuata sugli anelli di accrescimento di un albero di pino nella Cittadella della Ricerca di Brindisi.

Dopo la seconda guerra mondiale, tra i primi anni '50 e i primi anni '60 sono stati effettuati numerosi esperimenti per testare le armi nucleari. Ciò ha comportato una notevole produzione di neutroni, e quindi di radiocarbonio nell'atmosfera, tanto che nell'emisfero settentrionale la concentrazione atmosferica di ^{14}C nel periodo 1963-1964 ha raggiunto valori maggiori di quasi il 100% rispetto al valore prima dei test nucleari.

Nel 1963 il presidente J.F. Kennedy firmò il trattato di messa al bando degli esperimenti nucleari in atmosfera e da allora la concentrazione di ^{14}C è andata diminuendo a causa dello scambio con la biosfera e gli oceani. Attualmente si è raggiunto il livello prima del 1950 come riportato da numerosi studi sull'argomento. Il fenomeno ha interessato tutta la biosfera, anche a distanze di decine di migliaia di chilometri dai luoghi delle esplosioni, ed è stato determinato sperimentalmente misurando il ^{14}C nella CO_2 atmosferica

negli anelli degli alberi. Anche il gruppo di Fisica applicata del CEDAD ha misurato il *bomb peak* effettuando dei carotaggi in alberi di pino e misurando mediante AMS il radiocarbonio in ogni anello.

La Fig. 7 mostra l'andamento della concentrazione atmosferica di ^{14}C negli anni dal 1955 al 1995, a Brindisi, determinato misurando la concentrazione di radiocarbonio negli anelli annuali di Pinus Pinea 8 [15].

La curva del bomb peak fornisce anche un metodo per datare con estrema precisione materiali biologici formatisi dopo il 1950 d.C e trova numerose applicazioni in ambito forense [16].

Tecniche di analisi con fasci ionici disponibili al CEDAD

L'interazione di fasci di protoni, particelle o ioni più pesanti di energia dell'ordine dei MeV con un materiale induce una serie di fenomeni quali l'emissione di particelle cariche, raggi-X, raggi gamma la cui rivelazione è alla base di numerose tecniche spettroscopiche di analisi elementare dette di *Ion Beam Analysis* (o tecniche **IBA**). In particolare, l'interazione del fascio incidente con gli atomi del materiale che costituisce il bersaglio può avvenire con gli elettroni o con i nuclei atomici.

L'interazione con gli elettroni atomici può indurre l'espulsione di uno o più elettroni dalle *shell* atomiche. Se la ionizzazione interessa le *shell* più interne, l'atomo ritorna allo stato fondamentale mediante una transizione elettronica tra una shell più esterna ad una più interna emettendo fotoni X di energia caratteristica. Tuttavia questo non è l'unico fenomeno possibile essendo probabile anche l'emissione di un elettrone delle shell più esterne per effetto Auger. La tecnica spettroscopica basata sulla rivelazione di questa radiazione X caratteristica è la PIXE [3].

Nel caso di interazione colombiana elastica delle particelle del fascio incidente con i nuclei del materiale bersaglio si può verificare la retrodiffusione elastica delle particelle incidenti la cui misura è alla base della tecnica **RBS**, *Rutherford Backscattering Spectrometry* [17].

La tecnica **PIGE** invece consente di rivelare i raggi gamma emessi in seguito con l'interazione del fascio incidente con i nuclei del bersaglio. Questa interazione tuttavia è significativamente inferiore alla probabilità di avere ionizzazione delle shell atomiche interne. Comunque la tecnica ha numerose applicazioni essendo complementare alle tecniche PIXE ed RBS per la rivelazione di elementi leggeri.

Set-up strumentale per le misure RBS e PIXE-PIGE

Le tecniche di analisi utilizzano di fasci di protoni, particelle o di ioni più pesanti ad energie comprese tra 1 e 10 MeV, e richiedono apparati sperimentali basati su acceleratori di particelle con tensioni di accelerazione dell'ordine del MV.



Figura 8: Le line IBA connesse con l'acceleratore Tandetron del CEDAD. Da sinistra: RBS, PIXE-PIGE, II, Microfascio.

Il sistema di analisi IBA del CEDAD è costituito da una sorgente di ioni, un magnete per la selezione della specie ionica, un acceleratore, un sistema di selezione in massa e carica di alta energia e la camera sperimentale con all'interno di essa integrati i sistemi per la rivelazione dei prodotti dell'interazione ione-materia. La Fig. 8 mostra le *beamline* PIXE, PIGE, Impiantazione ionica e RBS disponibili al CEDAD.

Il sistema di iniezione del CEDAD è composto da due sorgenti ioniche, da un magnete di analisi, e dai sistemi di focalizzazione e trasporto del fascio di particelle. Una sorgente `duoplasmatron` (HVEE Mod. 358) viene impiegata per la produzione di fasci ionici di elementi leggeri e una sorgente a *sputtering* (HVEE Mod. 860A) per la produzione di fasci ionici di elementi pesanti. Nella sorgente di tipo `duoplasmatron` il fascio ionico viene estratto da un plasma generato tra-

mite una scarica elettrica prodotta dall'emissione termoionica di elettroni da parte di un filamento di platino mantenuto ad alta temperatura per effetto Joule e confinato tramite un intenso campo magnetico. La sorgente può essere utilizzata sia per la produzione di fasci di ioni H^- che di ioni positivi di He^+ con intensità fino a 100-150 μA.

Nel caso della produzione di fasci di particelle alfa, gli ioni positivi prodotti dalla sorgente attraversano prima uno scambiatore di carica che contiene vapori di Li che convertono lo stato di carica dal fascio da positivo a negativo. La sorgente a sputtering è impiegata invece per la produzione di fasci ionici di elementi pesanti o di H^- utilizzando come *target* TiH.

Le specie ioniche prodotte nelle sorgenti vengono iniettate nell'acceleratore, smistate da un magnete di switching e indirizzate sulle diverse linea di fascio IBA.

La tecnica RBS ha origine dall'esperimento di Rutherford. Si basa sull'interazione colombiana di tipo elastico tra una particella incidente di massa M_p ed un nucleo bersaglio di massa M_t del materiale da analizzare. La particella incidente viene diffusa ad un angolo θ ed il rapporto K (detto "fattore cinematico") tra l'energia E_S della particella retrodiffusa dalla superficie del materiale e l'energia E_0 della particela incidente può essere ricavato imponendo la conservazione dell'energia e della quantità di moto. Risulta:

$$K = \frac{E_s}{E_0} = \left[\frac{(M_t^2 - M_p^2 \sin^2\theta)^{1/2} + M_p \cos\theta}{M_p + M_t} \right]^2$$

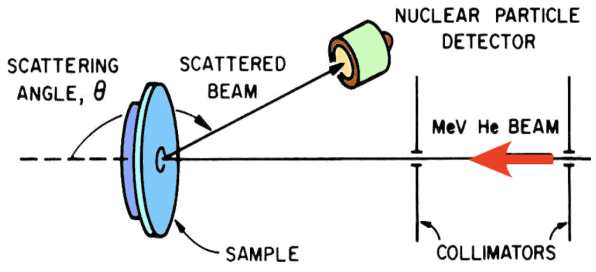


Figura 9: Schema di un esperimento RBS

Il fattore cinematico K consente allora di determinare la massa dell'atomo incognito nel campione dalla misura dell'energia delle particelle retrodiffuse.

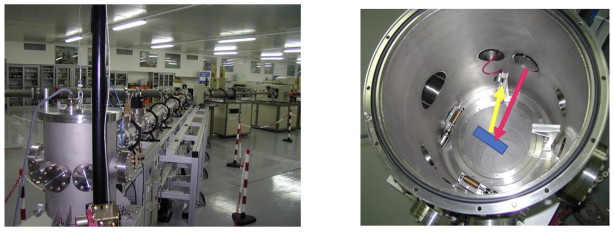


Figura 10: A sinistra la linea RBS e destra la camera di *scattering*.

Le Fig. 9 e 10 mostrano lo schema e la linea sperimentale per analisi RBS in funzione presso il CEDAD. La presenza di un particolare goniometro portacampioni consente di orientare il fascio di particelle incidenti lungo gli assi di un materiale cristallino e di effettuare esperimenti con la tecnica del `Channeling`.

La tecnica PIXE (*Particle Induced X-Ray emission*) è una tecnica di analisi composizionale multielementale che si basa sulla rivelazione dei raggi X caratteristici emessi da un materiale quando questo viene irraggiato con un fascio di particelle cariche con energia dell'ordine del MeV (tipicamente protoni). L'emissione di raggi X caratteristici è dovuta alla ionizzazione per effetto della particella incidente di una shell atomica interna. La vacanza creata nella *shell* viene riempita da un elettrone di una *shell* atomica più esterna e la differenza di energia tra i due livelli viene rilasciata sotto forma di fotoni X di energia caratteristica.

Caratteristiche fondamentali della tecnica PIXE sono quelle di essere multielementale e quantitativa, rapida e di poter essere effettuata anche in aria. Il principio di base della tecnica PIXE è simile a quello della microanalisi con sonda elettronica ma con una diversa sonda per indurre la ionizzazione: elettroni nel caso della microsonda, protoni nel caso della PIXE. La differenza del fascio incidente però ha però importanti conseguenze sulle potenzialità delle due tecniche in termini di limiti di rilevabilità e profondità di analisi. Sia nel caso della microsonda elettronica che della tecnica PIXE i fotoni X caratteristici devono essere distinti dalla radiazione X di *Bremsstrahlung* prodotta dalla particelle incidenti per effetto del loro frenamento nel materiale. L'intensità della radiazione di frenamento è proporzionale al quadrato della accelerazione subita dalla particella e quindi al reciproco del quadrato della massa. Essendo quindi la massa

del protone pari a 1836 volte la massa dell'elettrone ne consegue, nel caso della tecnica PIXE, una riduzione della radiazione di frenamento, in prima approssimazione, pari a $(1836)^2$ volte. La riduzione significativa del fondo di frenamento comporta una sensibilità di circa 2 ordini di grandezza migliore per la tecnica PIXE rispetto alla microsonda elettronica.

Un altro significativo vantaggio della tecnica PIXE consiste nella possibilità di estrarre il fascio sonda in aria in modo da effettuare analisi a pressione atmosferica. Tale possibilità riveste particolare importanza nel caso dell'analisi di campioni di grandi dimensioni o che contengono elementi volatili o che si degradano sotto vuoto. Esempi tipici di campioni di questo tipo sono quelli di interesse per i beni culturali in cui la possibilità di effettuare analisi in aria si traduce in una significativa riduzione dell'invasività e della distruttività dell'analisi.



Figura 11: I punti di prelievo delle terre di fusione nella Lupa Capitolina.

La datazione della lupa capitolina mediante AMS

La datazione della Lupa Capitolina è stata effettuata con la tecnica AMS su campioni organici inglobati nelle terre di fusione presenti della statua [18].

La Lupa capitolina è il simbolo della città di Roma e ha un enorme valore storico. La realizzazione della statua si faceva risalire alla leggenda della nascita di Roma e quindi al V secolo prima di Cristo anche se la sua attribuzione all'epoca etrusca, soltanto con metodologie stilistiche, aveva sollevato non pochi dubbi da tempo.

In anni recenti la datazione all'epoca degli etruschi è stata messa in dubbio anche in seguito al restauro effettuato in occasione del giubileo del 2000. Il CEDAD è stato chiamato a risolvere la diatriba che si era creata tra la restauratrice, la quale aveva attribuito la statua all'epoca carolingia, e la direzione dei Musei Capitolini. Numerosi sopralluoghi e prelievi effettuati prima su campioni prelevati dall'interno della Lupa in fase di restauro e, successivamente, direttamente dai ricercatori del CEDAD hanno consentito di stabilire l'origine medievale della Lupa, con uno spostamento in epoca più recente di circa 17 secoli.



Figura 12: Fasi del prelievo dei campioni per la datazione mediante AMS.

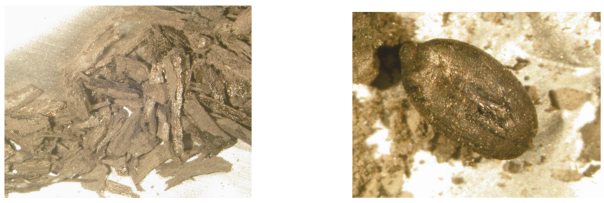


Figura 13: materiali organici ritrovati nella Lupa.

Le statue in bronzo non possono essere datate direttamente mediante il radiocarbonio ma è possibile datare i materiali organici che sono stati inseriti durante le fasi di realizzazione della statua. A partire da una struttura di legno o di metallo l'argilla veniva modellata inserendo anche resti vegetali, paglia, cariossidi per conferire compattezza all'impasto ed eliminare i fumi quando l'impasto veniva portato ad alta temperatura. Successivamente con la tecnica della fusio-

ne a cera persa la statua veniva completata con la colata del bronzo fuso.

Le Fig. 11 ,12 e 13 mostrano i punti da cui sono stati prelevati i campioni e alcune fasi del prelievo effettuato dal foro posto sotto la pancia della lupa. Riportano anche alcuni resti organici ritrovati nella Lupa capitolina che hanno consentito di datarla.

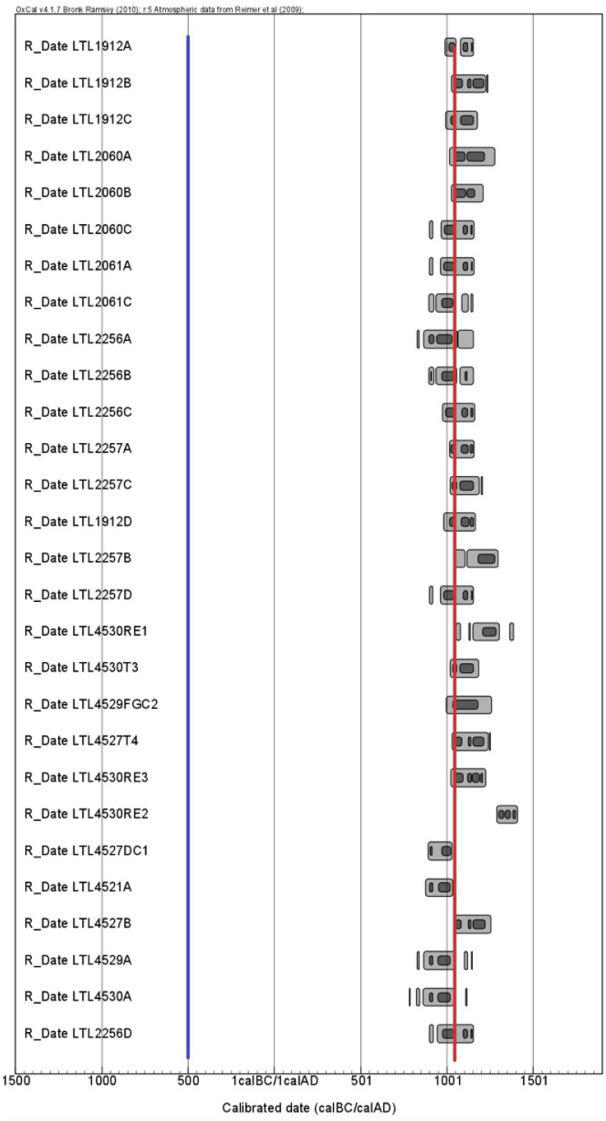


Figura 14: Risultati delle datazioni della Lupa capitolina. La Lupa è stata erroneamente attribuita all'epoca etrusca (linea blu) ma è risultata realizzata tra il XI e il XII secolo (linea rossa). Lo spostamento è di 17 secoli.

Sulla base di 28 datazioni lo studio ha dimostrato che , con un livello di confidenza superiore al 95% la lupa capitolina è stata realizzata tra il 1020 e il 1152 AD, tra l'XI e XII secolo. È quindi stata realizzata in epoca medioevale e non etrusca come erroneamente attribuita dagli storici dell'arte (Fig. 14).

Le tecniche PIXE per lo studio dei bronzi di Riace

Al CEDAD sono stati studiati i Bronzi di Riace che sono tra i capolavori meglio conservati dall'antichità [19]. Ritrovati al largo di Riace in Calabria i bronzi sono due statue di grandi dimensioni, denominate il giovane e il vecchio, che sono state ritrovate sui fondali probabilmente in seguito ad un naufragio durante il loro trasporto nel mar Mediterraneo (Fig. 15). Sono di notevole importanza per la storia dell'arte e la loro datazione con tecniche stilistiche è tra il 470-460 BC (*Before Christ*) per la statua A e tra il 440-430 BC per la statua B.



Figura 15: I Bronzi di Riace: A sinistra statua (A), il giovane, a destra statua (B) il vecchio.

Sin dal ritrovamento le statue sono state oggetto di intenso studio e restauro prima a Firenze e poi a Roma presso l'Istituto Centrale per il Restauro. Durante il restauro sono state estratte 72 kg di terre di fusione dalla statua A e 52 kg dalla statua B all'interno delle quali sono stati ritrovati pezzi di legno, capelli, peli di animali, resti vegetali, carboni che sono stati utilizzati per la datazione con la tecnica AMS.

La datazione con il radiocarbonio si effettua calcolando prima i rapporti isotopici nel campione e negli standard, considerando i fenomeni di frazionamento isotopico e per il fondo e determinando prima la *Radiocarbon Age*. Per convenzione la *Radiocarbon Age* viene espressa in "anni prima

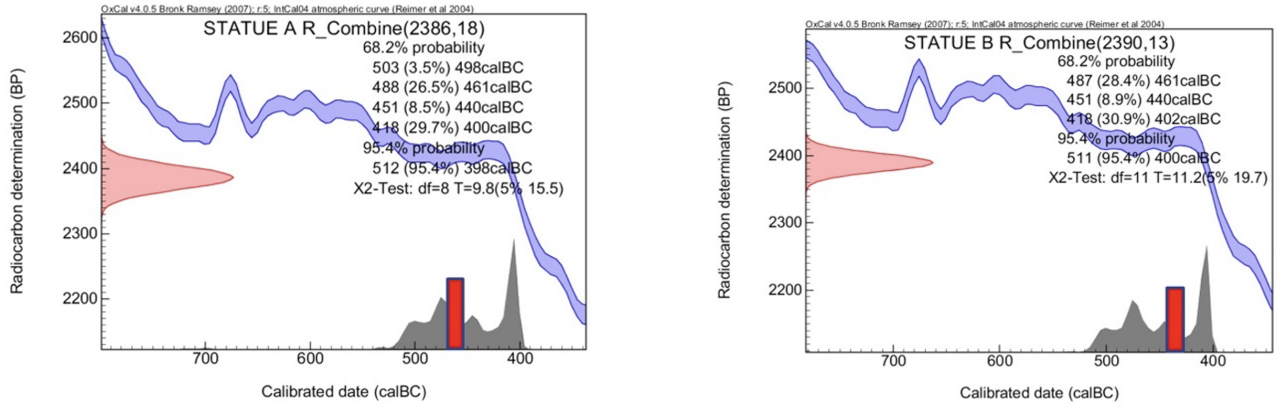


Figura 16: Datazione dei Bronzi di Riace: La *Radiocarbon Age* (gaussiana in rosso) è convertita in anni di calendario mediante la curva di calibrazione (curva blu) per tener conto delle variazioni nella produzione del radiocarbonio in atmosfera nel corso dei millenni.

del presente (*Before Present* - BP)" dove il presente è l'anno 1950. Per le due statue le datazioni sono risultate 2386±18 BP, 2390±13BP, dalla combinazione statistica di numerose misure.

La fase successiva della datazione si basa sull'utilizzo della curva di calibrazione per tener conto delle fluttuazioni nelle produzione di radiocarbonio avvenute nel corso dei millenni. Tale curva sperimentale è stata determinata misurando il radiocarbonio negli anelli di accrescimento degli alberi e consente di convertire la *Radiocarbon Age* in anni di calendario.

Le datazioni calibrate dei Bronzi di Riace per le due statue sono risultate tra il 511 e il 400 BC e il 512 e il 398 BC, consistenti con l'attribuzione archeologica (Fig. 16). Il *range* di incertezza maggiore per le datazioni calibrate è dovuto al *plateau* nella curva di calibrazione nonostante le misure con l'acceleratore siano estremamente precise. In questo periodo storico l'incertezza finale non diminuisce significativamente anche misurando molti più campioni.

Dai Bronzi di Riace sono stati anche prelevati 9 campioni dalla statua A e 13 dalla statua B che sono stati sottoposti ad analisi PIXE e PIGE. Gli elementi Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Pb sono stati misurati con PIXE mentre F, Na, Al e Si con PIGE [20].

I risultati, riportati in Fig. 17 dimostrano che il braccio destro della statua B ha una composizione significativamente differente dalla statua A e dalla statua B. Questo ha confermato l'ipotesi che il braccio destro della statua B è il risultato di un restauro probabilmente successivo alla

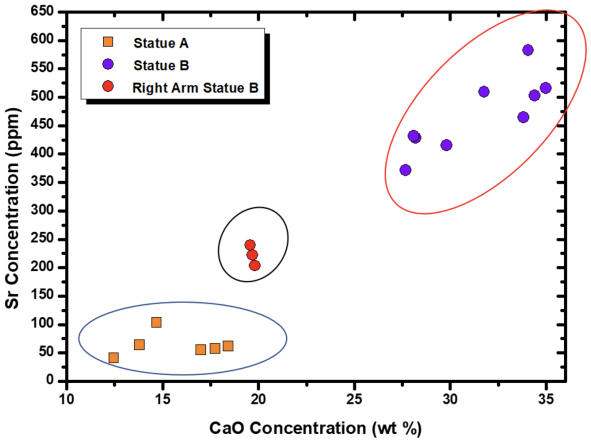


Figura 17: Concentrazione di Sr in funzione di CaO che evidenzia il restauro del braccio destro della statua B.

realizzazione dei capolavori.

Il *bomb peak* e le scienze forensi

Come descritto in precedenza, dopo la seconda guerra mondiale, si è verificato un aumento notevole di radiocarbonio causato dall'emissione di neutroni in seguito ai test nucleari. La curva del *bomb peak*, nota con una notevole precisione per le numerose misure sperimentali effettuate in vari laboratori che dispongono della tecnica AMS, consente di effettuare numerosi studi in ambito forense.

Il CEDAD effettua queste misure sia come attività di ricerca sia come servizio per tribunali, carabinieri, istituti di medicina legale, enti di controllo che hanno la necessità di determinare

traffici illeciti, sostanze adulterate o identificare individui scomparsi.

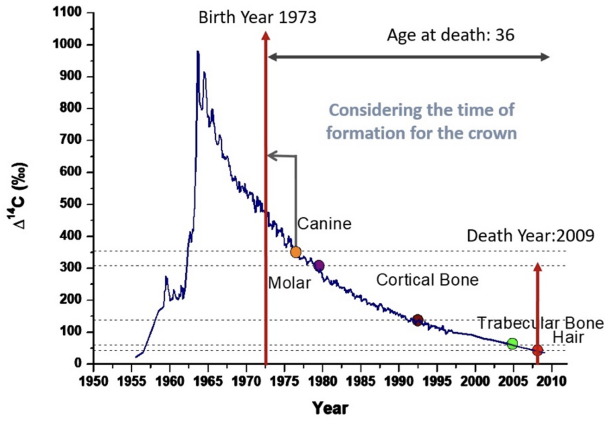


Figura 18: Determinazione mediante bomb peak delle date di nascita e di morte di un individuo ammazzato e ritrovato in un lago.

In collaborazione con il laboratorio LABANOF del Dipartimento di Biologia umana e Scienze biomediche dell'Università di Milano (Prof. C. Cattaneo) è stato possibile determinare la data di nascita e di morte di un individuo di sesso maschile colpito in faccia da una pallottola e ritrovato in un lago in Italia. La tecnica AMS ha consentito la datazione mediante la misura dei rapporti isotopici in vari resti prelevati dal corpo (denti canini, molari, capelli, ossa trabecolari e corticali). La presenza di diverse concentrazioni di radiocarbonio nei vari campioni riflette il diverso *turnover* dell'elemento radioattivo nei vari tessuti del corpo umano. Il radiocarbonio presente nei capelli evidentemente riflette la data della morte, essendo il *turnover* nei capelli molto rapido, mentre quello nei denti consente di determinare la data di nascita.

La Fig. 18 mostra come, escludendo la parte crescente della curva perché i canini si formano prima dei molari, le misure effettuate hanno consentito di stabilire che l'individuo ritrovato è nato nel 1973 e deceduto nel 2009 all'età di 36 anni. Tutti i campioni misurati sono posizionati sulla curva del bomb peak e riflettono i tempi di formazione dei tessuti [21].

In numerosi altri studi, anche in collaborazione con la IAEA di Vienna, il metodo del *bomb peak* è stato utilizzato al CEDAD per determinare il contenuto biogenico o fossile, di sostante inquinanti, di rifiuti bruciati per produrre energia elettrica, o per la datazione di vini o caffè [16].

Le tecniche IBA per la scienza dei materiali

Le tecniche IBA, e in particolare la *Rutherford Backscattering Spectrometry*, consentono di determinare, in modo praticamente non distruttivo lo spessore di strati sottili, la loro composizione e uniformità.

Uno studio effettuato al CEDAD ha riguardato lo sviluppo di *layers* di TiO_2 come superfici antibatteriche. La ricerca è di notevole interesse specialmente per le applicazioni di questi materiali in ospedali, nel trasporto pubblico e in tutti gli ambienti in cui è necessario ridurre gli organismi potenzialmente dannosi per la salute umana. Lo studio ha riguardato la deposizione di film sottili e di superfici con proprietà antibatteriche in grado di evitare l'adesione di microorganismi o la formazione di biofilm.

Il TiO_2 è biocompatibile, inerte, poco costoso ed è facile da produrre. È un eccellente materiale antibatterico ed è efficace contro i microorganismi quali funghi e batteri gram positivi e gram negativi. I film sottili di TiO_2 sono stati depositati per *spin coating* e caratterizzati con varie tecniche compresa la RBS. A partire da soluzioni liquide i film di TiO_2 sono stati depositati su vari substrati a temperatura ambiente e calcinati successivamente a 400° C.

Per la determinazione degli spessori, e per stabilire l'uniformità spaziale, sono state utilizzate particelle alfa da 2 MeV con *spot* di raggio 1 mm e correnti sul campione di 10 nA fino all'acquisizione di una carica complessiva di 5 μC.

Gli spettri sono stati acquisiti facendo incidere normalmente il fascio e rivelando le particelle retrodiffuse a 170°. Sono stati utilizzati rivelatori della Canberra, con una risoluzione energetica di 18 keV e un'area attiva di 25 mm^2. L'analisi dei dati è stata effettuata con il programma SIMNRA confrontando gli spettri sperimentali con quelli teorici e simulati.

La Fig. 19 evidenzia i picchi di Ti, O e il substrato di Si. I diversi spettri acquisiti da punti diversi

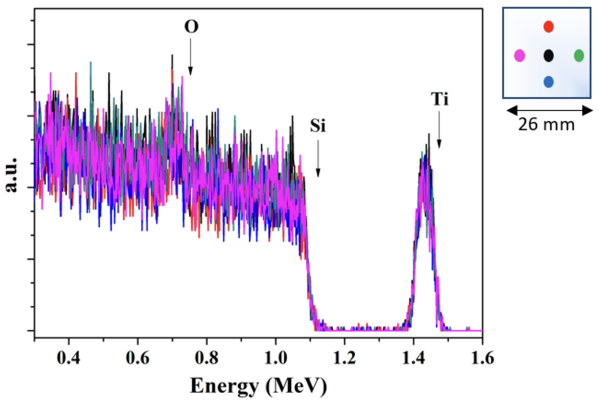


Figura 19: Spettri RBS per la determinazione dello spessore e dell'uniformità in *layers* di TiO_2 ottenuti per *spin-coating*.

sono perfettamente sovrapponibili e dimostrano l'uniformità dello strato depositato.

La Fig. 20 mostra gli spettri sperimentali e quelli simulati ottenuti su film di TiO_2 puri e drogati con Cu depositati per *spin coating* su substrati di vetro.

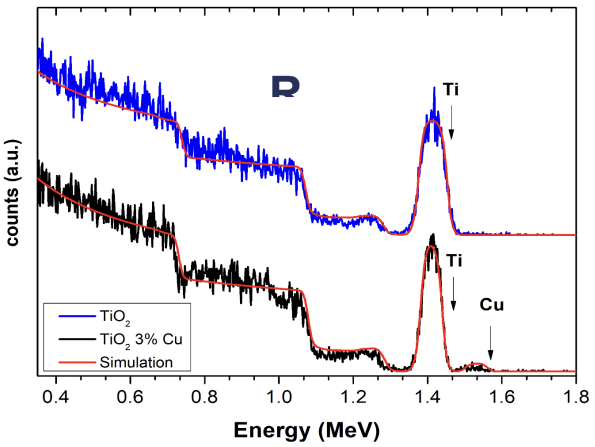


Figura 20: Spettri RBS di TiO_2 puro (linea blu) e drogato con Cu al 3% (linea nera). I *layers* di TiO_2 sono stati ottenuti per *spin-coating* su vetro trattato termicamente a 400° C.

Sulla superficie di questi film sono state depositate cellule di Strafilococtus Aureus (SA). La Fig. 21 mostra anche che la concentrazione di cellule vive e di cellule morte di SA è molto bassa e si riduce ulteriormente per i film depositati e drogati con Cu. Numerosi altri studi con differenti drogranti sono stati effettuati allo scopo di modificare e migliorare le proprietà fotocatalitiche del TiO_2 a lunghezze d'onda nella regione visibile dello spettro elettromagnetico [22].

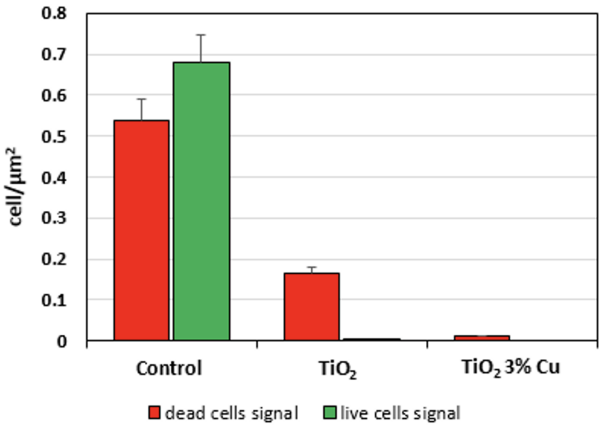


Figura 21: Cellule vive e morte di SA sulla superfcie di TiO_2 puro e TiO_2 drogato con Cu al 3%. Si osserva una significativa diminuzione sulla superficie TiO_2 (Cu).

Applicazioni alle scienze ambientali

Il ^{14}C può anche essere direttamente utilizzato come *marker* ambientale per il monitoraggio delle emissioni di anidride carbonica prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili negli insediamenti industriali [23, 24]. In combinazione con la tecnica PIXE consente anche di determinare elementi dannosi per l'ambiente [25].

La mostra l'andamento della concentrazione di

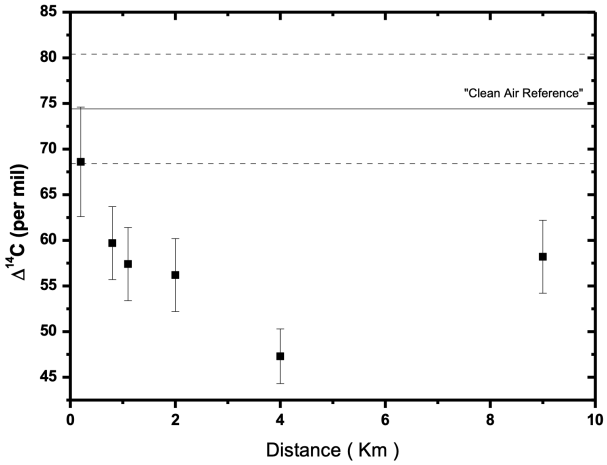


Figura 22: Andamento della concentrazione di ^{14}C in campioni di Agripyron Repens e Cynodon Dactylon a diverse distanze dalla zona industriale di Brindisi nella direzione SSE.

La figura riporta l'andamento della variazione di $\Delta^{14}C$, la concentrazione di radiocarbonio mi-

surata nelle due specie di piante della famiglia delle Graminacee (Agropyron Repens e Cynodon Dactylon), in funzione della distanza dalla zona industriale di Brindisi,

La Fig. 22 riporta l'andamento $\Delta^{14}C$ della variazione della concentrazione di radiocarbonio nei materiali campionati in funzione della distanza dalla zona industriale, rispetto al valore di riferimento in materiali campionati in una zona lontana da impianti industriali che emettono CO_2 di origine fossile. Per il valore di riferimento `pulito` pari a 74 ± 6 (clean air reference) è stato scelto come sito di campionamento una zona nei pressi di Castro Marina, che essendo lontana da emissioni di origine fossile non risente dell'effetto di diluizione della CO_2 atmosferica. Poiché le emissioni di origine fossile non immettono ^{14}C nell'atmosfera (perché decade completamente in circa 50.000 anni), ma immettono gli isotopi stabili ^{12}C e ^{13}C, il rapporto isotopico $^{14}C/^{12}C$, e quindi il $\Delta^{14}C$, diminuisce nella zona maggiormente interessata dalle emissioni, come evidenziato dal minimo nella Fig. 22.

Si nota come l'immissione di CO_2 fossile, e quindi impoverita di ^{14}C, induca la riduzione del rapporto isotopico del radiocarbonio rispetto all'isotopo stabile più abbondante con effetti misurabili nella biosfera circostante fino a distanze dell'ordine dei 9-10 km [21].

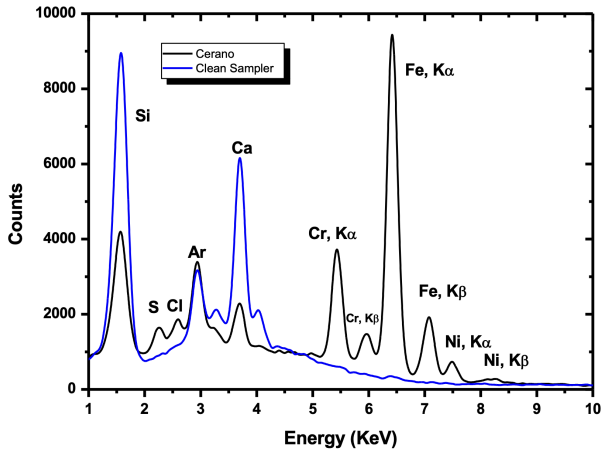


Figura 23: Confronto tra un filtro per il campionamento del particolato atmosferico nella zona industriale di Brindisi e uno pulito in quarzo come riferimento. Elementi inquinanti tra cui Cr, Fe, Ni sono evidenziati negli spettri PIXE.

La Fig. 23 mostra uno spettro PIXE ottenuto su filtri per il campionamento del particolato atmosferico che evidenzia la presenza di elementi, Cr, Fe, Ni immessi nell'ambiente circostante la zona industriale.

L'acquisizione dello spettro PIXE è stata effettuata focalizzando su un filtro contenente il particolato atmosferico un fascio di protoni del diametro di 1 mm ed energia di 3 MeV. I raggi X emessi sono stati rivelati con un rivelatori di Si(Li) raffreddato alla temperatura dell'azoto liquido per aumentare il rapporto segnale/rumore. L'esperimento è stato effettuato in aria con la linea PIXE-PIGE connessa con l'acceleratore Tandetron dopo che il fascio di protoni ha attraversato una finestra sottile di Mylar.

La presenza del picco dell'Ar infatti deriva dalla ionizzazione dell'aria da parte dei protoni incidenti prima dell'interazione con il materiale e tale elemento non è presente nel campione ma nell'ambiente circostante. Lo spettro PIXE evidenzia anche la presenza di Cr, Ni e Fe attribuibili ad effetti antropogenici.

Conclusioni

Gli acceleratori di particelle con tensioni di accelerazione di qualche MV trovano importanti applicazioni in numerosi campi di ricerca. In particolare la possibilità di integrare sullo stesso acceleratore sistemi per la spettrometria di massa con acceleratore AMS e per l'analisi con fasci di particelle IBA consente di disporre di facilities con un elevato grado di versatilità e per applicazioni a vari campi di ricerca.

Sono state in particolare descritte le potenzialità del sistema AMS/IBA in funzione presso il CEDAD dell'Università del Salento in campi di ricerca quali l'Archeologia, le Scienze ambientali, la Scienza dei materiali e le Scienze forensi.

Tutte queste *facilities* sono ora associate al consorzio europeo CERIC-ERIC e a disposizione di ricercatori di tutta Europa. Per effettuare misure, o richiedere il tempo macchina per esperimenti che richiedano misure AMS o IBA, si possono proporre progetti di ricerca partecipando a due *call* semestrali ogni anno.

Ringraziamenti

Il CEDAD dell'Università del Salento è stato realizzato nell'ambito dell'Iniziativa 24 del piano

coordinato delle Università di Catania e Lecce, finanziato dal MIUR e confinanziato dall'Unione Europea e con vari progetti di ricerca PON (S.I.D.Art., BLU-Archeosys, IT@cha, prp@ceric).

Un ringraziamento a tutto il gruppo di Fisica applicata del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento e allo staff del CEDAD, in particolare a Marisa D'Elia, Lucio Maruccio e Gianluca Quarta.

[1] R. C. Finkel, M. Suter: *AMS in the earth sciences: technique and applications,* Advances in analytical Geochemistry, 1 (1993) 1.

[2] A. E. Litherland: *Accelerator mass spectrometry,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 5 (1984) 100.

[3] S .A. E. Johansson, J. L. Campbell: *PIXE: A novel technique for elemental analysis,* John Wiley & Sons, New York (1988).

[4] L. Calcagnile, G. Quarta, M. D'Elia, d. Muscogiuri, L. Maruccio, K. Butalag, G. Gianfrate, C. Sanapo, U. Toma : *Instrumental developments at the IBA-AMS at the University of Lecce,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 240 (2005) 22.

[5] G. Demortier , G. Quarta, K. Butalag, M. D'Elia, L. Calcagnile: (, 2, 0 (0) 8.). Benefits of combined PIXE and AMS with new accelerators". X-ray Spectrometry 372008178

[6] L. Calcagnile, G. Quarta, M. d'Elia, A. Gottdang, M. Klein, D.J.W. Mous: *Radiocarbon precision tests at the Lecce AMS facility using a sequential injection system,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 215 (2004) 561.

[7] H. D. Betz: *Charge states and charge-changing cross sections of fast heavy ions penetrating through gaseous and solid media,* Review of Modern Physics, 44 (1972) 465.

[8] G. Bonani, P.Eberhardt, H.J. Hofmann, Th.R. Niklaus, M. Suter, H.A. Synal, W. Wolfli: *Efficiency improvements with a new stripper design,* Nucl. Instr. And Meth. B, 5 (1990) 338..

[9] L. Calcagnile, G. Quarta, M. D'Elia: *High resolution accelerator-based mass spectrometry: precision accuracy and background,* Applied Radiation and Isotopes, 62 (2005) 623.

[10] L. Calcagnile, G. Quarta, M. D'Elia, A. Rizzo, A. Gottdang, M. Klein, D.J.W. Mous: *A new accelerator mass spectrometry facility in Lecce, Italy,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 223-224 (2004) 16.

[11] L. Calcagnile, L. Maruccio, L. Scrimieri, D. delle Side, M. D'Elia, , E. Braione, G.. Quarta: *Development and application of facilities at the Centre for Applied Physics, Dating and Diagnostics (CEDAD) at the University of Salento during the last 15 years,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 456 (2019) 252.

[12] W. Kutschera , A. J. T. Jull, M. Paul, A. Wallner: *Atom counting with accelerator mass spectrometry,* Rev. Mod. Phys., 95 (2023) 035006.

[13] L. Calcagnile, G. Quarta, L.Maruccio, V. Gaballo, H.-A. Synal, A.M. Muller: ^{10}*Be detection at the new AMS beam line at CEDAD: Performance tests and first results,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 331 (2014) 215.

[14] L. Calcagnile, G. Quarta, L. Maruccio, H.-A. Synal, A. M. Müller The new AMS system at CEDAD for the analysis of ^{10}Be, ^{26}Al, ^{129}I and actinides: Set-up and performances Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 361 2015 100

[15] G. Quarta, M. D'Elia, D. Valzano, L.Calcagnile: *New bomb pulse radiocarbon records from annual tree rings in the northern hemisphere temperate region,* Radiocarbon, 47 (2005) 27.

[16] G. Quarta, I. Hajdas, M. Molnár, T. Varga, L. Calcagnile, M. D'Elia, A. Molnar, J. F. Dias, A. J. T. Jull: *The IAEA forensics program: results of the AMS ^{14}C intercomparison exercise on contemporary wines and coffees,* Radiocarbon, 64 (2022) 1513.

[17] Wei-Kan Chu, J. W. Mayer, M.-A. Nicolet: *Backscattering Spectrometry,* Academic Press, New York (1978).

[18] L. Calcagnile, M. D'Elia, L. Maruccio, E. Braione, A. Celant, G. Quarta: *Solving an historical puzzle: Radiocarbon dating the Capitoline she-wolf,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 455 (2019) 209.

[19] L. Calcagnile, M. D'Elia, G. Quarta, M. Vidale: *Radiocarbon dating of ancient bronzes statues: preliminary results from the Riace statues,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268 (2010) 1030.

[20] L. Calcagnile: *Nuclear techniques for analysis and dating of the cutural heritage with the tandetron acceerator at CEDAD,* Conservation Science in Cultural Heritage, 14 (2014) 99.

[21] L. Calcagnile, G. Quarta, C. Cattaneo, M. D'Elia: *Determining ^{14}C content in different human tissues: Implications for application of ^{14}C bomb-spike dating in forensic medicine,* Radiocarbon, 55 (2013) 1845.

[22] L. Scrimieri, A. Serra, D. Manno, P. Alifano, S. M. Tredici, M. Calcagnile, L. Calcagnile: *TiO_2 films by sol-gel spin-coating deposition with microbial antiadhesion properties,* Surface and Interface Analysis, 51 (2019) 1351.

[23] G. Quarta, M. D'Elia, G.A. Rizzo, L. Calcagnile: *Radiocarbon dilution effects induced by industrial settlements*

in Southern Italy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 240 (2005) 458.

[24] G. Piovesan, F. Biondi, M. Baliva, E. Presutti Saba, L. Calcagnile, G. Quarta, M. D'Elia, G. De Vivo, A. Schettino, A. Di Filippo: *The oldest dated tree of Europe lives in the wild Pollino massif: Italus, a strip-bark Heldreich's pine,* Ecology, 99 (2018) 682.

[25] S. Romano, S. Pichierri, M. Fragola, A. Buccolieri, G. Quarta, L. Calcagnile Characterization of the PM2.5 aerosol fraction monitored at a suburban site in southeastern Italy by integrating isotopic techniques and ion beam analysis (2022) Frontiers in Environmental Science102022971204

Lucio Calcagnile: è Professore ordinario di Fisica Applicata dal 2005. Nel 1999 ha realizzato il CEDAD - Centro di Fisica applicata, Datazione e diagnostica che attualmente dirige. È *group leader* del Gruppo di Fisica applicata del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento e docente di Fisica, Tecniche nucleari di analisi e datazione, Tecniche fisiche per il monitoraggio ambientale, anche presso l'Istituto Superiore Universitario di Formazione Interdisciplinare - ISUFI e la Scuola di specializzazione in Archeologia dell'Università del Salento.
È stato *guest scientist* al Fom Institute for Atomic and Molecular Physics di Amsterdam, il Centre di Fleble Radioactivitè del CNRS a Gif sur Yvette, il laboratorio AGLAE per analisi IBA a Parigi e il Leibniz Labor per analisi isotopiche dell'Università di Kiel. Ha coordinato numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali ed è Principal Investigator di progetti della Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica. Per la IAEA ha anche pubblicato due training courses sugli aspetti fondamentali e le applicazioni della tecnica AMS.
È autore di oltre 250 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionale e più di 50 *invited talk* a congressi nazionali internazionali. È membro dell'Advisory board dei congressi internazionali AMS, e Radiocarbon ed è stato co-chairman della "11th Accelerator Mass Spectrometry International Conference", Roma 2008 e della "4th Radiocarbon in the Environmental International Conference, Lecce 2024.
Coordina le attività dei laboratori Bio Open Lab e Aerosol e Clima del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento che sono facilities associate ai consorzi internazionali CERIC-ERIC e ACTRIS.

Come può essere utile un piccolo acceleratore di particelle per lo studio del particolato atmosferico

Franco Lucarelli *Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze*
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Firenze, Firenze, Italy
Giulia Calzolai *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Firenze, Firenze, Italy*
Silvia Nava *Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze*
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Firenze, Firenze, Italy

Introduzione

Fisica nucleare e ambiente. Due termini che fino a poco tempo fa (ma forse ancora oggi) nel sentire comune erano considerati in antitesi. E invece non è così. Parlare di "nucleare socialmente utile" non è un eresia: è una realtà concreta in molti laboratori dove si conducono studi riguardanti ad esempio la medicina, i beni culturali o l'inquinamento atmosferico. Proprio quest'ultimo è un problema di grande attualità, strettamente connesso ai cambiamenti climatici perché molti inquinanti sono anche sostanze climalteranti. A loro volta, i cambiamenti climatici influenzano la qualità dell'aria, per esempio modificando la meteorologia e quindi la dispersione e l'accumulo di inquinanti.

Molte sono le informazioni parziali o non corrette che circolano sui social media. Una corretta informazione scientificamente basata è fondamentale perché ogni persona possa essere in grado di discutere di questi temi in maniera consapevole.

Tra le sostanze inquinanti, il particolato atmosferico (PM, *Particulate Matter*) o **aerosol atmosferico** è una componente particolarmente complessa da studiare perché ha forma, dimensioni, proprietà ottiche variegate, concentrazione e composizione variabili nello spazio e nel tempo. Vi è una crescente preoccupazione tra i cittadini europei per i problemi legati agli elevati livelli di particolato nelle nostre città, che influiscono sulla salute umana. Il PM influisce anche sul cambiamento climatico, direttamente attraverso la diffusione e l'assorbimento della radiazione solare e indirettamente influenzando i processi di

formazione e le caratteristiche delle nuvole. Un gran numero di misure di mitigazione sono utili per ridurre entrambi gli impatti. Tuttavia ci sono alcune misure che potrebbero essere utili per mitigare il cambiamento climatico ma aumentano le emissioni dei principali inquinanti atmosferici urbani e viceversa. Una buona conoscenza della loro composizione aiuta gli studi epidemiologici, a vincolare i modelli climatici, a identificare le sorgenti del PM. Questo fornisce informazioni preziose per adottare politiche di riduzione dei problemi legati a questo tipo di inquinamento scientificamente basate. Ed è a questo punto che entrano in gioco le metodologie di analisi che hanno origine nella fisica nucleare.

Cos'è il particolato atmosferico?

Il particolato atmosferico è formato da una miscela complessa di particelle solide e liquide sospese nell'aria [1], che presenta concentrazione, composizione, proprietà granulometriche e morfologiche molto diverse a seconda del luogo e del momento [2]. Il particolato primario viene introdotto direttamente nell'atmosfera da processi naturali o antropici, come l'azione del vento, le emissioni dai vulcani e le emissioni dai tubi di scarico delle auto. Il particolato secondario, invece, viene prodotto da processi chimici e fisici all'interno dell'atmosfera, quali la condensazione di gas come anidride solforosa, ossidi di azoto e idrocarburi. La sua rimozione può avvenire tramite deposizione secca, cioè sedimentazione dovuta alla gravità e diffusione con successivo impatto su superfici (e anche fenomeni di aggregazione di particelle più piccole a formare particelle più grandi), o mediante deposizione umida dovuta al dilavamento delle gocce di pioggia.

La sua permanenza in atmosfera è breve in confronto a quella alcuni costituenti gassosi come l'anidride carbonica, il metano e i CFC (clorofluorocarburi, implicati nella formazione del buco nello strato ozono stratosferico), che può essere di decenni o secoli. Per questa ragione la concentrazione del particolato in atmosfera è determinata principalmente dalla distanza dalle sorgenti emissive e dai processi di circolazione atmosferica, rendendo la distribuzione del particolato a livello globale e regionale altamente variabile nel tempo e non uniforme nello spazio.

Il PM può essere trasportato fino a migliaia di km di distanza dal punto di emissione. Il particolato osservato nell'atmosfera è quindi il risultato del bilancio tra processi diversi e concorrenti: l'emissione dalle sorgenti, il trasporto e i meccanismi di rimozione.

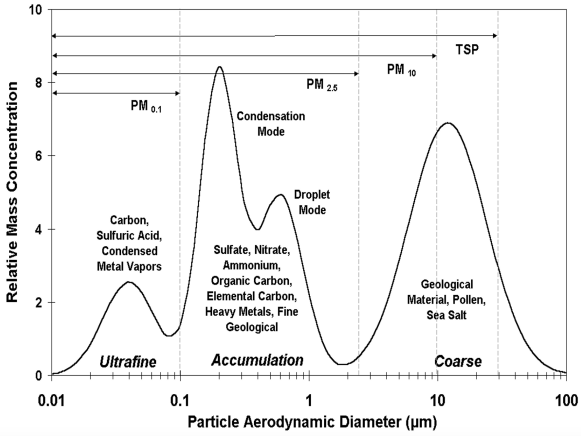


Figura 1: Rappresentazione schematica della distribuzione del particolato in atmosfera.

Le dimensioni delle particelle abbracciano diversi ordini di grandezza, tipicamente tra $\sim 10^{-3}$ e 10^2 μm. La distribuzione dimensionale delle particelle (Fig. 1) è il risultato della competizione tra i meccanismi di emissione dalle sorgenti e i meccanismi di rimozione dall'atmosfera.

Semplificando, in un'atmosfera secca, gli aerosol tendono a formare una distribuzione trimodale, con una moda ultrafine, una di accumulazione e una moda grossolana. Le particelle grossolane sono prodotte meccanicamente dalla rottura di corpi più grandi (erosione del suolo e delle rocce, spray marino, frammenti di vegetazione). Includono, tipicamente: la polvere trasportata dal vento, l'aerosol marino, la polvere stradale risospesa dal traffico, i granelli di polline, ecc. La quantità di energia necessaria per rompere le particelle aumenta al diminuire delle loro dimensioni e questo stabilisce un limite inferiore alle dimensioni delle particelle grossolane, stimata in 1 μm. Poiché queste particelle sono relativamente grandi, la deposizione secca è il principale meccanismo di rimozione.

Le particelle inferiori a 0.1 μm sono generalmente formate da condensazione di vapori formatesi ad alte temperature o da reazioni chimiche; è il cosiddetto processo di nucleazione, chiamato anche conversione da gas a particelle. Le

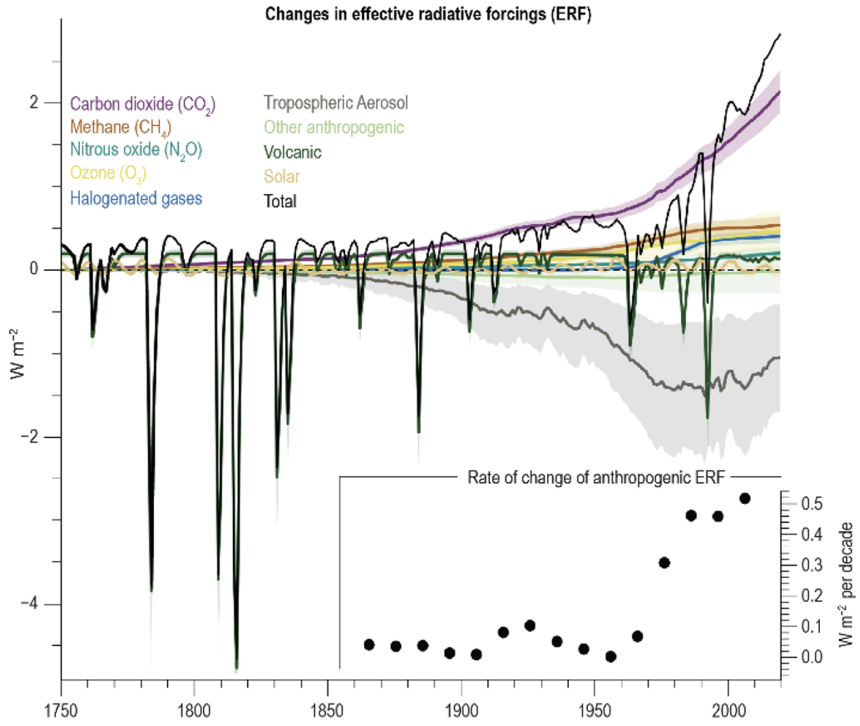


Figura 2: Evoluzione temporale del *forcing* radiativo (ERF) utilizzando modelli di simulazione climatica che tengono conto dei diversi contributi sia antropici che naturali (Figura 2.10 in IPCC, 2021: Chapter 2, [3]).

particelle nella moda ultrafine crescono rapidamente per coagulazione, cioè la collisione e aggregazione di due o più particelle per formare una particella più grande, o per condensazione di molecole gassose sulla loro superficie, andando ad alimentare la moda di accumulazione. L'efficienza di entrambi i processi è maggiore per le particelle più piccole e questa circostanza produce un limite superiore del diametro, dell'ordine di 2–3 μm. Particelle più piccole di 2.5 μm vengono definite particelle fini, particelle con diametro maggiore di 2.5 μm vengono definite grossolane.

Mentre le particelle ultrafini o nanoparticelle (diametro inferiore a 0.1 μm) sono rimosse efficacemente tramite diffusione e coagulazione, particelle nell'intervallo 0.1-1 μm non vengono rimosse in maniera efficace né dalla sedimentazione né dalla diffusione, per questo motivo questa regione è chiamata moda di accumulazione. L'unico meccanismo di rimozione efficiente è la deposizione umida. Queste particelle dominano gli effetti radiativi nello spettro del visibile, sia perché sono presenti in gran numero sia perché hanno una dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda della luce, e quindi hanno una grande efficienza di diffusione.

Gli aerosol rappresentano una piccola frazione dell'atmosfera perché sono tipicamente presenti in concentrazioni comprese tra pochi μg m^{-3} e $\sim$100 μg m^{-3}. Tuttavia, il particolato ha effetti importanti sull'ambiente: modifica le proprietà ottiche dell'atmosfera, favorisce la formazione delle nubi e della nebbia e quindi influenza il ciclo dell'acqua, causa una modifica della distribuzione del calore e quindi dei modelli (*pattern*) di circolazione, influenza la chimica atmosferica offrendo una superficie per reazioni eterogenee. Inoltre, l'aerosol può trasportare metalli tossici, acidi e nitrati e quindi può avere un effetto chimico diretto al momento della deposizione, producendo contaminazione del suolo e dell'acqua, corrosione dei materiali, erosione dei monumenti ed edifici e danni alla fotosintesi della vegetazione. Gioca un ruolo nei cambiamenti climatici globali, attraverso effetti diretti di riscaldamento (se assorbe la radiazione) o raffreddamento (se la diffonde) o indiretto per il ruolo che ha nell'influenzare i processi di formazione delle nubi e le loro caratteristiche. Questo secondo effetto, che è il più difficile da stimare, è dovuto al fatto che le particelle fungono da nuclei di condensazione nelle nubi (CCN), aumentando il numero di goccioline nella nuvola e diminuendo le loro dimensioni per un dato contenuto di acqua liquida, producendo sia un aumento della capacità di riflessione delle nuvole che la durata delle stesse; si pensa quindi che questi effetti producano un effetto di *forcing* radiativo negativo.

Esempi storici dove si cita il problema dell'inquinamento atmosferico

500 a.C. Lao Tzu afferma l'impatto dell'uomo sull'ambiente, compresa la qualità dell'aria.
300 d.C. Un magistrato locale romano approva leggi che regolano alcune fonti di inquinamento atmosferico a York, in Inghilterra. (birrifici, macellazione carne)
1180. Moses Maimonides - Descrive l'inquinamento atmosferico nelle città e i suoi effetti sull'uomo.
1272. Edoardo I: divieto dell'uso del "carbone marino". Il Parlamento ha ordinato la punizione mediante tortura e impiccagione delle persone che vendevano e bruciavano il carbone fuorilegge.
1390 (?) Riccardo II - Uso regolamentato e limitato del carbone a Londra.
1661. John Evelyn - Il primo trattato esistente sull'inquinamento atmosferico. "Fumifugium; o il disagio dell'aria e del fumo di Londra dissipati; insieme ad alcuni rimedi umilmente proposti".
1692. Robert Boyle - "Una storia generale dell'aria", menziona "nitros o spiriti salino-sulfurei".
1734. Linne (Svezia) - Studia gli effetti di una fonderia di ferro sull'aria locale.
1775. Sir Percival Pott - Intuisce che la fuliggine ha una componente cancerogena causando un'alta incidenza di cancro dello scroto negli spazzacamini.
1855. Austria, Germania – Promulgate leggi contro l'inquinamento con esenzioni specifiche per l'aria e l'acqua
1872. Robert Angus Smith - "Aria e pioggia acida: gli inizi di una climatologia chimica" - Primo utilizzo del termine "pioggia acida".
1895. La prima legge statunitense sull'inquinamento atmosferico che rende illegale la "produrre vapori visibili" come gas di scarico delle automobili a vapore.

Vista la complessità del particolato (composizione, forma, dimensioni variabili...) l'effetto netto degli aerosol sul clima è comprensibilmente difficile da quantificare. Questo è evidente nella Figura 2 riportata nell'ultimo report dell' International Panel on Climate Change (IPCC) [3], dove il contributo del PM al *forcing* radiativo è indicato dalla linea nera all'interno della grande banda grigia che indica l'incertezza con cui si conosce l'effetto sul clima. Al netto delle incertezze, sappiamo che l'effetto complessivo del PM è quello di produrre un raffreddamento del pianeta, quindi di segno opposto rispetto all'effetto dovuto all'aumento della concentrazione dei gas serra [4]. Di conseguenza, gli aerosol in parte mascherano la reale risposta del sistema climatico all'aumento dei gas serra [5].

Gli aerosol hanno effetti rilevanti anche sulla salute, in particolare sull'apparato respiratorio. La profondità di penetrazione delle particelle al suo interno dipende dalla dimensione delle particelle. Le particelle più grandi di 10 μm vengono bloccati nel sistema respiratorio più alto e sono rimosse velocemente. Le particelle con diametro inferiore a 2.5 μm (in particolare le più piccole) entrano più in profondità raggiungendo i polmoni, vengono trattenute negli alveoli e la loro rimozione tende ad avvenire attraverso il flusso sanguigno [6]. Le nanoparticelle ($< 0.1\mu$m), quindi, sono considerate quelle potenzialmente più pericolose. Ostacolano lo scambio di ossigeno e anidride carbonica con il sangue, e questo indipendentemente dalla loro tossicità chimica.

Il problema non è solo di oggi. Esistono fonti storiche (si veda il riquadro) che documentano la presenza di problemi di inquinamento atmosferico. Più recentemente, l'episodio più noto è il cosiddetto "grande smog di Londra" del 1952. Nel dicembre di quell'anno, masse di aria fredda si spostarono dal Canale della Manica e stazionarono su Londra, producendo condizioni termiche che intrappolarono l'inquinamento negli strati bassi dell'atmosfera e produsse una fitta coltre di nebbia. Per 5 giorni, lo smog, termine che deriva da smoke (fumo) + smog (nebbia), è stato così denso che le strade dovevano essere illuminate con lampade e gli eventi al chiuso furono cancellati perché non si poteva vedere il palco. Quando lo smog si diradò, 4000 persone erano morte per problemi respiratori e lo smog

causò altri 8000 decessi nei mesi successivi.

Proprio perché la salute umana è influenzata negativamente dall'esposizione agli inquinanti atmosferici presenti nell'aria, tra cui il particolato, l'Unione Europea ha sviluppato un ampio corpus legislativo, la Direttiva 2008/50/CE per la gestione della qualità dell'aria e per avere un'aria più pulita, introducendo valori standard per una serie di inquinanti presenti nell'aria. Ad esempio, il limite medio annuo consentito per PM2.5 (particelle con diametro inferiore a 2.5 μm) è 25 μg m^{-3}, e per il PM10 (particelle con un diametro inferiore a 10 μm), è 40 μg m^{-3} (con il limite di 50 μg m^{-3} al giorno, da non superare per più di 35 giorni). È in atto una discussione per ridurre ulteriormente questi valori limite.

È ragionevole, quindi, che vi sia una crescente preoccupazione tra i cittadini i per i problemi legati agli elevati livelli di particolato (PM) nelle nostre città. Quali i rimedi efficaci? Il dibattito è perennemente in corso e l'universo di informazioni, nell'era internet, è non di rado contraddittorio o dalla validità scientifica inconsistente o inattendibile. La qualità dell'aria per quel che riguarda il PM è migliore o peggiore rispetto a 50 anni fa? La risposta a questa domanda per la maggior parte delle persone è peggiore. In realtà non esiste una risposta univoca.

Nel nostro mondo occidentale i livelli di concentrazione del particolato sono diminuiti nel tempo dal 20 al 40% grazie alle politiche ambientali adottate in molti ambiti dai governi nazionali o locali, il che dimostra che se si agisce correttamente si può mitigare il problema. Per i paesi in via di sviluppo o di sviluppo recente, la situazione è all'opposto, i livelli di inquinamento sono molto più alti che in passato. In particolare, oggigiorno molte grandi città dei paesi in via di sviluppo (ad esempio, Pechino, Delhi, Giakarta), soffrono ancora di smog tipo Londra dovuto alla combustione di carbone e legna e alla mancanza di severi controlli dell'inquinamento atmosferico sulle emissioni industriali o sul traffico. Per fortuna, in grossi paesi come la Cina si sta iniziando ad attuare politiche di mitigazione del problema, almeno per quel che riguarda il PM.

Riassumendo, la presenza del particolato nell'atmosfera ha un impatto sull'ambiente ed in particolare sul clima, nonché effetti dannosi sulla salute umana e sulla conservazione del patrimonio artistico-culturale.

Per lo sviluppo di strategie efficaci di abbattimento del PM è fondamentale identificare e quantificare le fonti di PM. Per ottenere queste informazioni il punto di partenza è la conoscenza della composizione del particolato atmosferico e non soltanto della sua concentrazione in atmosfera.

A differenza degli inquinanti gassosi, le particelle di aerosol durante il trasporto mantengono, entro certi limiti, la composizione chimica caratteristica della sorgente che le ha prodotte; quindi, la rivelazione degli elementi e dei composti che costituiscono il particolato, realizzata su lunghe serie temporali, permette di ottenere importanti informazioni sulle sorgenti sia naturali che antropiche.

Per ottenere questi risultati, i dati ricavati dal campionamento e dall'analisi della composizione di numerosi campioni di PM (raccolti in siti rappresentativi e su lunghi intervalli temporali) devono essere elaborati tramite opportune tecniche di analisi multivariata, dette "modelli a recettore" che determinano il contributo delle sorgenti a partire dalle concentrazioni delle componenti del particolato realmente misurate nel sito di campionamento (detto appunto sito "recettore"). La composizione del particolato campionato è considerata come una combinazione delle composizioni del particolato emesso dalle diverse sorgenti, con pesi che cambiano da campione a campione, per tener conto del diverso impatto che le sorgenti possono avere nel tempo. In altri termini, le concentrazioni misurate dei diversi elementi/composti sono interpretate come somma di diversi fattori, i cui pesi/contributi variano da campione a campione, mentre il loro profilo chimico viene mantenuto costante. Il modello fornisce in uscita i profili ed i pesi dei diversi fattori: i primi consentono di interpretare i fattori in termini di reali sorgenti presenti sul territorio, i secondi permettono di determinarne l'impatto. La Positive Matrix Factorisation(PMF) è il modello attualmente più accreditato ed utilizzato a livello internazionale (ad es. è utilizzato dall'EPA, l'agenzia per la protezione dell'ambiente degli Stati Uniti e dalla Comunità Europea [7]).

Ma come si ottiene la composizione del particolato atmosferico? Le misure da satellite danno informazioni sulla massa totale del particolato,

ma se si vogliono informazioni sulla composizione si parte dalla raccolta del particolato su appositi filtri.

L'aria viene aspirata attraverso un campionatore e le particelle vengono raccolte mediante impatto o filtrazione. Nel processo di **impattazione**, il flusso d'aria è costretto a compiere un brusco cambio di direzione: le particelle più pesanti, a causa della loro inerzia, non riescono a seguire il flusso d'aria e si depositano su un apposito supporto. Nella **filtrazione**, invece, l'aria viene fatta passare attraverso un substrato filtrante, dove vengono trattenute le particelle. In quest'ultimo caso, il limite inferiore dell'intervallo di dimensioni delle particelle campionate è una conseguenza delle proprietà del filtro, in particolare della sua porosità. Può anche essere scelta una soglia superiore per la dimensione delle particelle con una fase di pre-impatto, dove vengono trattenute le particelle di grandi dimensioni. Normalmente si utilizzano teste di campionamento che raccolgono solo particelle con diametro aerodinamico <10 μm, la frazione PM10, la frazione respirabile che è sottoposta a normativa europea. Ma è diventato comune l'uso di soglie più piccole: spesso si campionano anche le frazioni PM2.5 e PM1, ritenute rappresentative delle particelle fini. Esistono anche campionatori multimodali, che separano e raccolgono le particelle in diversi intervalli di dimensioni utilizzando più stadi di impatto posti in serie.

Un aspetto fondamentale in questo tipo di studi è la rappresentatività dei campionamenti effettuati; essi, infatti, devono cogliere la variabilità della composizione dell'aerosol - su tempi più lunghi - al cambiare delle stagioni, e - su tempi più brevi - delle condizioni atmosferiche e meteorologiche, nonché delle variazioni in termini di sorgenti emissive: possono quindi rendersi necessarie lunghe serie di campionamenti generalmente della durata di un'intera giornata ciascuno per raccogliere sufficiente quantità di materiale e potersi confrontare con le normative vigenti sulla qualità dell'aria, per seguire variabilità stagionali, e campionamenti con risoluzione temporale molto più fine, anche oraria, per correlare la composizione del particolato a parametri rapidamente variabili quali le condizioni meteorologiche o i cicli produttivi industriali. Ciò porta alla necessità di caratterizzare un grandissimo numero di campioni (serie temporali estese, e possibilmente raccolti in più siti: centinaia o migliaia di campioni) di piccola massa (per alcuni elementi, fino all'ordine del ng/cm^2 di particolato campionato sui supporti di raccolta).

Ed è a questo punto che entrano in gioco tecniche di origine nucleare, quali le tecniche di analisi con fasci di ioni (nel seguito indicate anche con l'acronimo **IBA**, dall'inglese *Ion Beam Analysis*).

Le tecniche di analisi con fasci di ioni

Le tecniche di analisi con fasci di ioni consentono di determinare la composizione di un qualunque materiale sfruttando l'emissione di radiazioni X e gamma e/o di particelle cariche prodotte da quel materiale quando viene usato come bersaglio per il fascio di particelle (generalmente protoni) prodotte da un acceleratore.

Si può infatti associare univocamente l'energia di una radiazione emessa a un dato elemento atomico, o addirittura isotopo; l'emissione di radiazione a una determinata energia rappresenta per così dire la firma della presenza del corrispondente elemento nel materiale bombardato dal fascio.

La rivelazione e l'analisi in energia delle radiazioni emesse sotto fascio, effettuate con le tecniche e le strumentazioni tipiche degli esperimenti di Fisica Nucleare, consentono perciò di conoscere quali atomi o isotopi sono presenti nel bersaglio e di determinarne la quantità. L'analisi è pressoché multielementale, quantitativa, sensibile fino agli elementi presenti in traccia, rapida e non arreca alcun danno al bersaglio. Fra questa famiglia di tecniche quella di maggiore interesse nel campo ambientale è la **PIXE** (*Particle-Induced X ray-Emission*).

Come suggerisce l'acronimo stesso, sfrutta l'emissione di raggi X di energie caratteristiche della specie atomica come caratterizzante della composizione del bersaglio bombardato. Il metodo consente di rilevare simultaneamente quasi l'intera gamma di elementi presenti nel campione analizzato, anche in presenza di quantità mol-

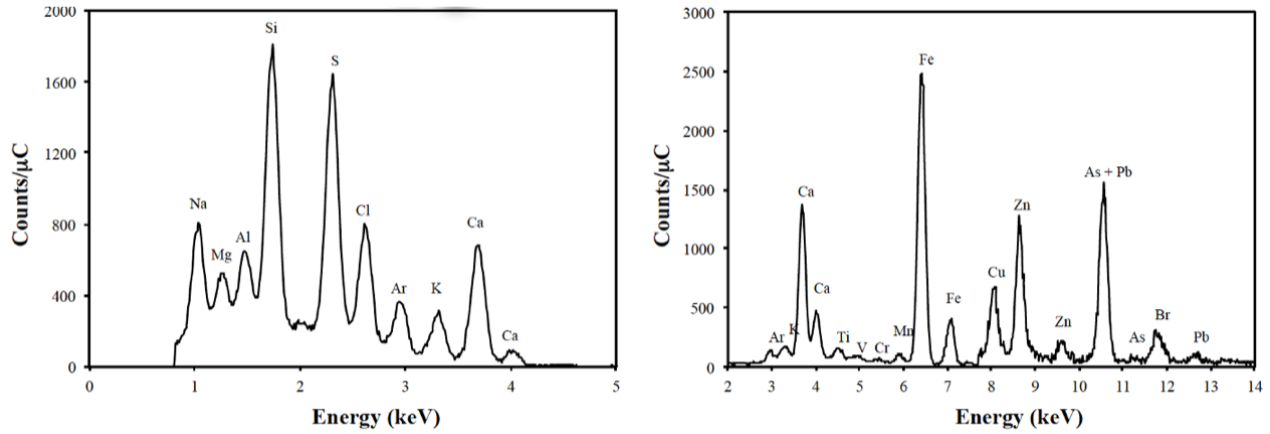


Figura 3: Spettri di raggi X ottenuti da una misura PIXE di un campione di PM10 campionato nell'area industriale di Montelupo Fiorentino.

to piccole. Nella pratica, alcune limitazioni restringono parzialmente il numero di elementi rilevabili, ma la capacità multi-elementale viene effettivamente mantenuta in larga misura.

Con buona approssimazione, si può affermare che in una singola misura, che in genere dura pochi minuti, tutti gli elementi con numero atomico $Z > 10$ vengono identificati con limiti minimi di rilevabilità (**MDL**) fino ai livelli di traccia. I raggi X emessi dagli elementi con un valore di Z inferiore a 10 hanno un'energia così bassa che vengono assorbiti sia nella finestra di ingresso del rilevatore sia all'interno dello stesso campione.

Utilizzando un acceleratore (solitamente elettrostatico), viene prodotto un fascio di particelle, tipicamente protoni con un'energia di 2 - 3 MeV. La rivelazione e la discriminazione dei raggi X emessi sotto bombardamento viene effettuata mediante l'utilizzo di rivelatori a stato solido di tipo Si(Li) o, più recentemente, di rivelatori **SDD** (*Silicon Drift Detector*), che discriminano i diversi raggi X in base alle loro diverse energie. Per dare un'idea del tipo di informazioni raccolte, la Figura 3 mostra due tipici spettri di raggi X ottenuti con rilevatori SDD in una misura PIXE di un campione di particolato atmosferico. La spettroscopia energetica dei raggi X fornisce un'analisi della sua composizione. Tale analisi è anche quantitativa, perché durante un irraggiamento il numero di raggi X emesso da una data specie è proporzionale all'abbondanza di atomi di quella specie nel bersaglio. L'analisi è inoltre totalmente non distruttiva, perché le interazioni tra la particella del fascio e il campione coinvolgono solo una piccola frazione degli atomi e non producono alterazioni significative nel campione. Quindi, per lo stesso campione è garantita la possibilità di ulteriori analisi (con la stessa tecnica o con tecniche diverse).

Una variante sempre più popolare della PIXE convenzionale è la PIXE "esterna". Questa può essere eseguita facendo passare il fascio di particelle attraverso una finestra sottile, colpendo così il campione in aria (Fig. 4). La dimensione del fascio può essere determinata da un'apertura nell'ultima sezione del percorso del fascio all'interno del canale in vuoto, mentre i rivelatori di raggi X sono esterni. Il campione viene posizionato a pochi millimetri dalla finestra e, mediante un sistema di posizionamento, può essere spostato nel piano perpendicolare al fascio per l'analisi dell'area di interesse.

I principali vantaggi di una tale configurazione sono la facilità di manipolazione e sostituzione dei campione, la riduzione di ogni possibile rischio di danno indotto dal riscaldamento sotto fascio, nessuna evaporazione selettiva di elementi volatili (come Cl o Br).

Un esempio di laboratorio dove si svolgono queste misure è il laboratorio congiunto Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) - Università di Firenze "LABEC" (Laboratorio per l'Ambiente e i BEni Culturali). Fino agli inizi degli anni '80 nei locali della sezione INFN nella storica sede di Arcetri un piccolo acceleratore elettrostatico Van de Graaff KN3000 veniva ancora utilizzato per esperimenti di fisica nucleare, e in particolare in un filone di ricerca fondamentale, la verifica degli effetti di violazione di parità nei nuclei.

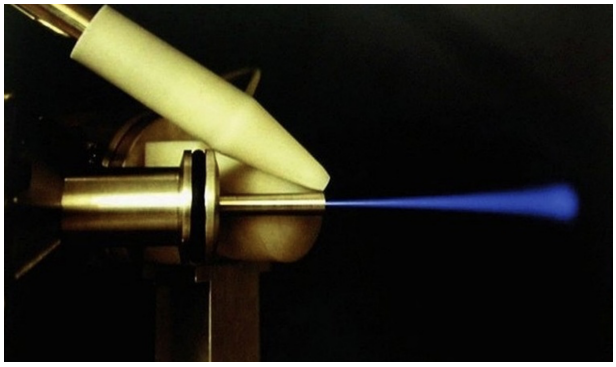


Figura 4: PIXE con fascio estratto in aria (si può osservare la fluorescenza indotta dal fascio di protoni nell'attraversare l'aria).

A partire dalla metà degli anni Ottanta, il laboratorio dell'acceleratore si è andato sempre più caratterizzando per l'impiego a scopo applicativo delle tecniche di *Ion Beam Analysis*. Con il trasferimento del Dipartimento di Fisica nel nuovo Polo Scientifico di Sesto Fiorentino nel 2003 è stato costituito il laboratorio LABEC, dotato di un moderno acceleratore elettrostatico Tandem da 3 MV di tensione di terminale, utilizzato principalmente per applicazioni delle tecniche di analisi nucleari con acceleratori nell'ambito dei beni culturali e dell'ambiente, come il nome stesso suggerisce.

L'interesse del laboratorio è comunque rivolto anche ad applicazioni di queste tecniche in altri settori, in particolare a test di rivelatori, a studi di geologia, di scienze dei materiali, di scienza forense e sul danneggiamento da radiazione. Il LABEC svolge così un'estesa attività di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie nucleari applicative (`https://web.infn.it/labec/`).

La tecnica PIXE per l'analisi del particolato atmosferico

Per sfruttare appieno le potenzialità della tecnica PIXE nell'analisi dei campioni di aerosol, è fondamentale utilizzare l'appropriata configurazione sperimentale. Come già riportato, l'uso di un fascio esterno evita il riscaldamento locale dovuto all'energia rilasciata dal fascio, permettendo l'uso di correnti di fascio più elevate e consente di posizionare i rivelatori più vicino al campione, riducendo notevolmente il tempo di misura.

La fisica dell'emissione di fotoni da atomi eccitati favorisce la produzione dei raggi X degli elementi a basso Z rispetto a quella degli elementi ad alto Z. Per compensare questo effetto, ed avere una buona sensibilità per tutti gli elementi, è utile usare un *set-up* a più rivelatori, opportunamente ottimizzati per rivelare regioni di elementi diversi. Importante quanto la scelta del corretto apparato sperimentale, è la scelta dei parametri di misura ottimali a seconda del tipo di campioni che si analizzano (campioni giornalieri, campioni con risoluzione di 1 ora, campioni separati per dimensione) e la scelta del supporto filtrante più opportuno per le misure PIXE.

Tenendo conto di queste considerazioni, presso il Laboratorio LABEC è stato messo a punto un set-up specificatamente dedicato a misure sul particolato atmosferico (Fig. 5) che permette l'analisi di centinaia di campioni in un giorno, con tempi di misura tipicamente di meno di 1 minuto a campione, con una buona sensibilità (le minime quantità rivelabili sono dell'ordine di pochi ng/m^3 per gli elementi a basso Z, fino ad un valore minimo di 0,2 ng/m^3 per elementi quali Cu o Zn). Un supporto multi-campione telecomandato viene utilizzato per rendere automatica l'analisi dei campioni per sfruttare la velocità intrinseca della tecnica. Questo pone la PIXE in una posizione eccezionale per l'analisi della composizione di campioni di aerosol in campagne in cui viene raccolto un numero elevato di campioni.

La tecnica PIXE è stata ampiamente utilizzata fin dalla sua nascita per lo studio della composizione degli aerosol. Per un lungo periodo, è stata la tecnica dominante per l'analisi elementare [4], poiché è in grado di rilevare gli elementi dal Na al Pb, inclusi importanti elementi antropogenici (S, V, Ni, Cu, Zn, As e Pb) e tutti gli elementi caratteristici dell'aerosol naturale (Na, Al, Si, K, Cl, Ca, Ti, Mn e Fe).

Tuttavia, oggi esistono altre tecniche competitive, come le già citate spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS) [8], la spettroscopia di emissione atomica al plasma accoppiato induttivamente (ICP-AES) [9], la fluorescenza a raggi X a dispersione di energia (ED-XRF) [10] e la fluorescenza a raggi X che utilizza la radiazione di sincrotrone (SR-XRF) [11]. Nonostante questo la tecnica PIXE continua a for-

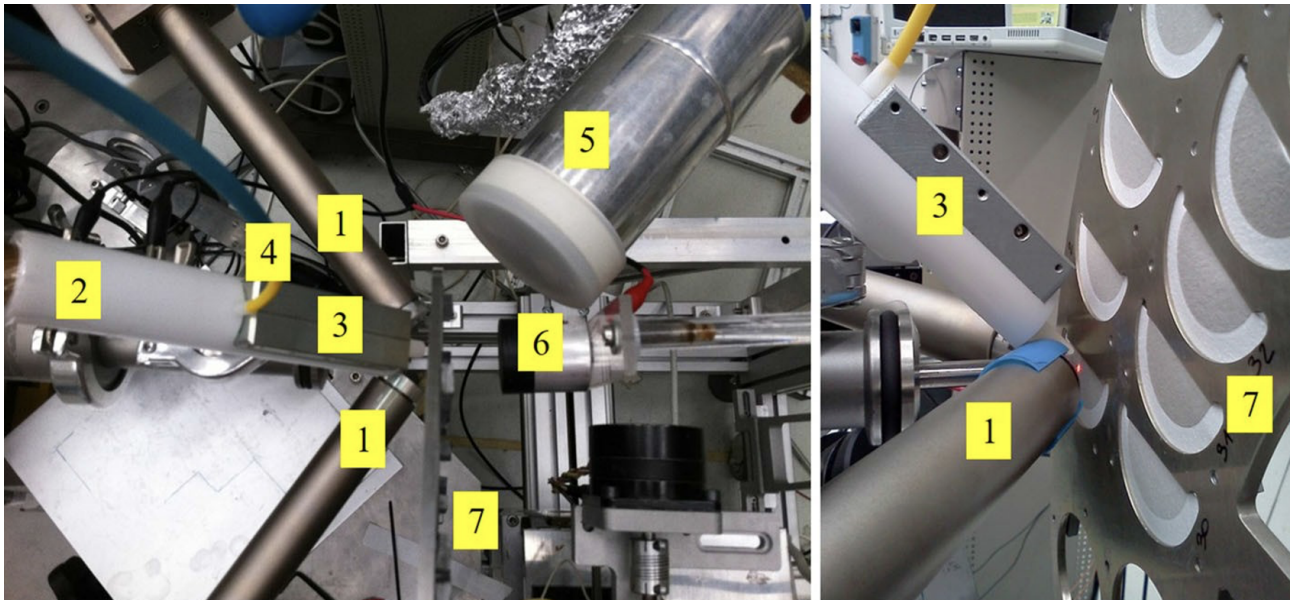


Figura 5: Apparato per misure IBA su campioni di particolato atmosferico al LABEC; 1) coppia di SDD gemelli per la rivelazione di raggi X di energia medio-alta, 2) rivelatore SDD con deflettore di protoni (3) e flusso di elio (4) per la rivelazione di raggi X di minore energia, 5) rivelatore al germanio per la rivelazione dei raggi gamma, 6) faraday cup per la misura della corrente del fascio, 7) ruota portacampioni con filtri di particolato (tagliati a metà).

nire un contributo inestimabile alla ricerca sugli aerosol atmosferici, poiché presenta numerosi vantaggi [12, 13].

1. Uno di questi è il tempo di misura molto breve, circa 60 secondi rispetto a 1 ora per l'analisi ED-XRF tipica. Le tecniche ICP hanno un tempo di analisi solo leggermente più lungo rispetto alla PIXE, ma i metodi ICP richiedono procedure molto lunghe per la preparazione del campione. Questo può essere un aspetto cruciale nell'analisi di migliaia o centinaia di campioni raccolti in grandi campagne di campionamento. La tecnica PIXE fornisce dati per elementi maggiori, minori e in tracce. I dati sugli elementi maggiori (S, Na, Cl, Al, Si e Fe) sono necessari per la determinazione dei contributi di importanti tipologie di aerosol (ad esempio, l'aerosol marino o la polvere naturale) e per la ricostruzione completa della composizione dell'aerosol raccolto. Inoltre, l'intero *set* di dati multi-elementali (che comprende le concentrazioni vari traccianti antropogenici) è utilizzato per distinguere i contributi provenienti da diverse categorie di sorgenti applicando tecniche di analisi multivariata.

2. È possibile analizzare campioni con massa molto piccola, come quelli raccolti con un'alta risoluzione temporale (ad esempio, 1 h) o con selezione dimensionale [9, 10]. Solitamente, il particolato (PM) viene raccolto con una risoluzione temporale di 24 ore. Tuttavia, molte emissioni di particolato cambiano nell'arco di poche ore (lavori di costruzione, emissioni industriali o del traffico, ecc.); inoltre, l'evoluzione dello strato limite (strato più basso della troposfera, che risponde più velocemente alle forzanti terrestri, e sul cui volume si può pensare siano diluiti gli inquinanti atmosferici) mostra forti schemi diurni e molti parametri meteorologici, come l'intensità e la direzione del vento, possono variare in un intervallo temporale di un'ora o anche inferiore. Di conseguenza, la composizione e la concentrazione del particolato possono cambiare significativamente nell'arco di poche ore e i campioni giornalieri non sono in grado di tracciare questi rapidi cambiamenti. Pertanto, la misura della composizione del PM con un'alta risoluzione temporale è importante per valutare gli effetti sulla salute e sull'ambiente, per comprendere i processi di trasporto e per determinare i contributi delle sorgenti.

3. Su scala globale, le polveri minerali (provenienti, ad esempio, dal deserto del Sahara) insieme alle particelle di sale marino sono dominanti. Influenzano il clima attraverso l'interazione con la radiazione solare e terrestre, il loro ruolo nella formazione delle nuvole e nella fertilizzazione degli oceani, che incide sull'assorbimento di CO_2 da parte degli stessi. Inoltre, possono aumentare episodicamente i livelli di PM in modo significativo nelle aree urbane, provocando il superamento dei limiti massimi consentiti. Pertanto, sono necessari buoni dati sulla composizione e concentrazione degli aerosol minerali. La tecnica PIXE rileva facilmente e con buona precisione tutti gli elementi costituenti questo tipo di particolato [15] a differenza di altre tecniche.

4. Non è necessaria alcuna preparazione o estrazione del campione; pertanto, si evitano sia la contaminazione da reagenti chimici che la possibile perdita di elementi volatili nel campione. Questo è fondamentale per campioni di massa molto ridotta (ad esempio, l'aerosol in siti "remoti" come l'Artide e l'Antartide) [16].

Infine, va considerato che la tecnica PIXE fornisce solo una parte delle informazioni desiderate sulla composizione chimica (gli elementi). Spesso è importante misurare specie ioniche (ad esempio, ammonio, nitrato) e componenti del carbonio (carbonio organico e carbonio elementare). Per l'identificazione delle sorgenti del particolato tramite l'applicazione di modelli multivariati a recettore è infatti necessaria una caratterizzazione completa della composizione del campione. Pertanto, al laboratorio LABEC utilizziamo un protocollo che combina più tecniche analitiche. Il fatto che alcuni elementi vengano misurati con tecniche diverse fra l'altro permette di effettuare un controllo di qualità sull'enorme quantità di dati ottenuti in molte campagne che altrimenti non sarebbe possibile.

Il livello di maturità delle tecniche di analisi nucleari per la caratterizzazione degli elementi che compongono il particolato atmosferico è testimoniato dal fatto che il LABEC ospita il centro di riferimento europeo per la caratterizzazione elementale del particolato atmosferico (*Elemental Mass Calibration Centre*, EMC2) all'interno di ACTRIS-ERIC, il consorzio dell'Infrastruttura di ricerca europea ACTRIS (*Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure*), la cui missione è fornire dati e servizi all'avanguardia per la ricerca sull'atmosfera e sul clima. I Paesi fondatori sono 17, e mettono in comune le proprie risorse per aprire l'accesso a un'ampia gamma di tecnologie, servizi e risorse nel campo delle scienze atmosferiche.

Alcuni esempi di applicazioni

L'Inquinamento Urbano: identificazione delle sorgenti e del loro contributo

L'inquinamento urbano è caratterizzato da una complessa miscela di sorgenti antropiche e naturali, quali traffico veicolare (sia emissioni dal tubo di scappamento che non, come l'usura dei freni e dei pneumatici e la risospensione della polvere del suolo), la combustione di biomassa (utilizzata per il riscaldamento residenziale), le attività industriali, e la polvere naturale (come la polvere sahariana o l'aerosol proveniente dal mare) o di origine antropica (lavori di costruzione/demolizione).

Un esempio di studio per l'identificazione delle sorgenti in cui la tecnica PIXE ha svolto un ruolo importante è il progetto europeo Life+ AIRUSE (`https://airuse.eu`). Il progetto ha prodotto il primo set di dati armonizzato per le città dell'Europa meridionale, riguardante i livelli e la composizione di PM10 e PM2.5, seguendo lo stesso protocollo di campionamento e analisi a Barcellona (Spagna), Porto (Portogallo), Atene (Grecia), Firenze e Milano (Italia).

Abbiamo utilizzato i dati PIXE insieme a quelli ottenuti con altre tecniche analitiche per ricostruire la composizione chimica media degli aerosol e l'analisi PMF (*Positive Matrix Factorization*) per determinare le sorgenti del particolato e il loro impatto sulla massa di PM10 e PM2.5. Un esempio dei risultati riguardanti l'impatto delle diverse sorgenti identificate è riportato nella Figura 6 per Firenze e Barcellona.

Una volta identificate le principali sorgenti, l'obiettivo strategico del progetto AIRUSE è stato

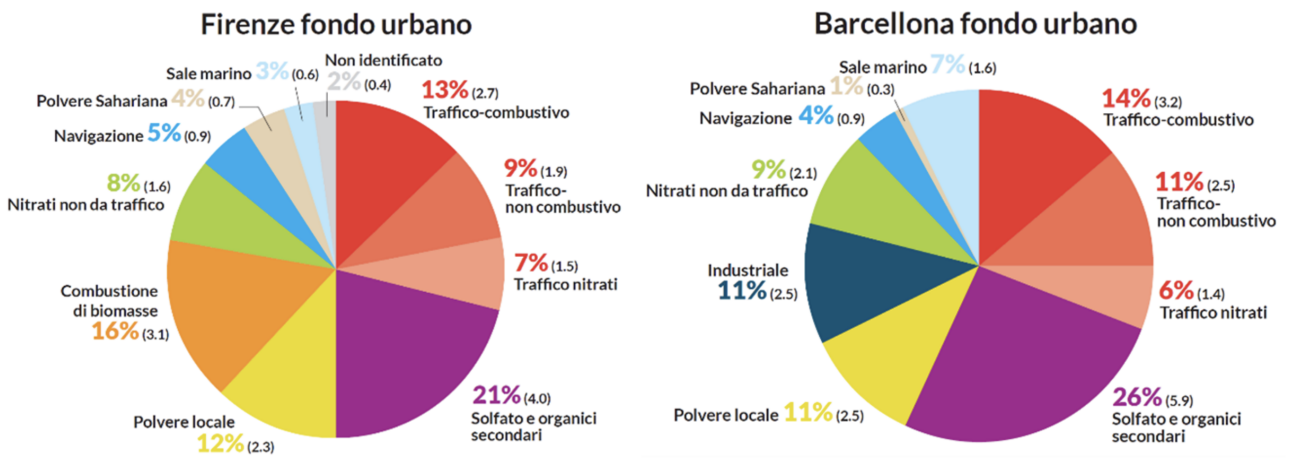


Figura 6: Contributo delle sorgenti al PM10, ottenuto tramite analisi PMF dei dati di composizione chimica del particolato a Firenze e Barcellona (media annua 2013-2014).

quello di testare e sviluppare misure specifiche per migliorare la qualità dell'aria nell'Europa meridionale, mirate a rispettare gli standard di qualità dell'aria e ad avvicinarsi il più possibile alle linee guida dell'OMS. Alcuni risultati interessanti sono i seguenti [17].

1. Siamo riusciti a identificare il contributo dei veicoli non legato alle emissioni dal tubo di scappamento (dovuto, ad esempio, alla risospensione della polvere del suolo causata dai veicoli e all'usura dei freni e degli pneumatici), grazie alla misura di tutti gli elementi caratteristici della polvere risollevata dal suolo tramite PIXE. In tutte le città, il traffico nel suo complesso rappresenta il contributo più significativo al PM10, ma è importante notare che il contributo delle due sotto-componenti è comparabile nel caso del PM10. Questo ha implicazioni per quel che riguarda il futuro, perché la componente non emessa direttamente non diminuisce con l'introduzione di veicoli meno inquinanti.

2. La combustione di biomassa, spesso considerata una fonte di energia verde, emette molti elementi tossici (come As e Pb) e fornisce un contributo significativo alla massa di particolato, particolarmente rilevante nei giorni più inquinati, con l'eccezione di Barcellona. Questa differenza è principalmente dovuta al grado di penetrazione della legna (e dei suoi derivati) come combustibile per il riscaldamento domestico. A Barcellona, il gas naturale è ben distribuito in tutta la città ed è utilizzato come combustibile nella quasi totalità delle abitazioni.

3. Grazie all'alta qualità dei dati PIXE, in alcune città (ad esempio, Firenze) è stato possibile separare il contributo della polvere sahariana da quello della polvere locale (dovuta principalmente ad attività antropiche come lavori di costruzione e demolizione).

Determinazione delle concentrazioni elementali con una risoluzione temporale di 1 ora

La determinazione delle concentrazioni elementali degli aerosol ad alta risoluzione temporale è fondamentale per comprendere le dinamiche delle sorgenti di inquinamento atmosferico e la variabilità di breve termine della composizione del particolato. Questa elevata risoluzione temporale permette di identificare rapidamente i picchi di inquinamento e di collegarli a specifiche attività umane o eventi naturali, come il traffico intenso, episodi di combustione di biomassa, emissioni industriali o eventi di trasporto di polveri desertiche. Occorre utilizzare campionatori appositamente sviluppati e la quantità totale di aerosol raccolta in un'ora è molto ridotta, tipicamente

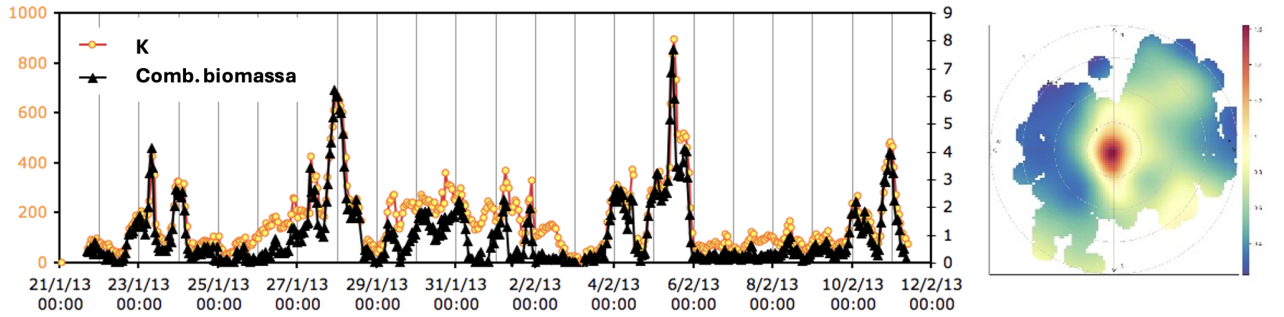


Figura 7: A sinistra, andamento temporale del potassio (tipico *marker* della combustione di biomassa) in ng/m^3 e delle sorgente di combustione di biomassa nel PM2.5 (in unità arbitrarie) a Firenze (Progetto AIRUSE). A destra, grafico polare della sorgente di combustione di biomassa nel PM2.5 in funzione della direzione e della velocità del vento. La coordinata angolare rappresenta la direzione del vento, la distanza dall'origine è la velocità del vento, il colore rappresenta l'intensità della sorgente (blu:bassa, rossa:alta).

dell'ordine di pochi μg. Di conseguenza, l'elevata sensibilità assoluta della tecnica PIXE viene sfruttata al massimo grado. Nessun'altra tecnica consente di ottenere una risoluzione temporale così elevata nella variazione della composizione degli aerosol, permettendo al contempo la rilevazione di un numero molto elevato di elementi in analisi che durano circa 1 minuto.

L'analisi PMF dei dati di concentrazione orari rafforza l'identificazione delle fonti ottenuta dai campioni giornalieri, poiché l'impatto di molte sorgenti, come le industrie, la combustione di biomassa o il traffico veicolare, risulta più evidente su base oraria. Inoltre, è possibile stabilire una correlazione più diretta con la direzione e la velocità del vento, poiché su scala giornaliera la direzione del vento può subire forti variazioni. I grafici polari delle sorgenti, che mostrano la dipendenza della concentrazione del particolato prodotto dalle sorgenti identificate in funzione della direzione e dell'intensità del vento, possono quindi essere facilmente ottenuti dai risultati dell'analisi PMF. Questi grafici aiutano a individuare la posizione delle sorgenti identificate.

In Figura 7 è riportato un esempio preso dal progetto AIRUSE relativo alla sorgente combustione di biomassa. L'andamento temporale della sorgente supporta l'identificazione della stessa come combustione di biomassa per il riscaldamento domestico (fig. 7 a sinistra), grazie al suo andamento periodico con picchi che iniziano la sera e durano diverse ore. L'assenza del picco serale-notturno in alcuni giorni è spiegabile con le condizioni meteorologiche. Alcuni picchi durante il giorno sono collegati a fuochi all'aperto dovuti alla potatura. Il grafico polare della sorgente mostra che, nel caso di Firenze, si tratta di una fonte locale (fig. 7 a destra), ma si evidenzia un contributo proveniente dalle colline nel settore nord-est.

Le concentrazioni elementali ottenute con una risoluzione di 1 ora possono fornire informazioni preziose per lo studio di eventi episodici, della durata di alcune ore, che possono comportare problemi di esposizione, come quelli che si verificano in siti industriali. Un esempio riguarda il complesso siderurgico di Taranto, dove un vasto polo industriale situato nei sobborghi settentrionali della città include una delle più grandi raffinerie italiane, una centrale elettrica, una grande industria del cemento e il più grande impianto siderurgico d'Europa [18].

Queste attività, sviluppate molto vicino alle aree residenziali, esercitano una forte pressione sull'ambiente della città. In questo caso il particolato è stato raccolto con risoluzione di una ora in parallelo in due diversi siti: un distretto urbano di Taranto adiacente all'area industriale e un piccolo comune situato a 7 km a nord-ovest di Taranto, lungo la direzione dei venti prevalenti provenienti dall'area industriale. I dati orari raccolti nei due siti hanno catturato le peculiarità delle diverse emissioni, risultando efficaci

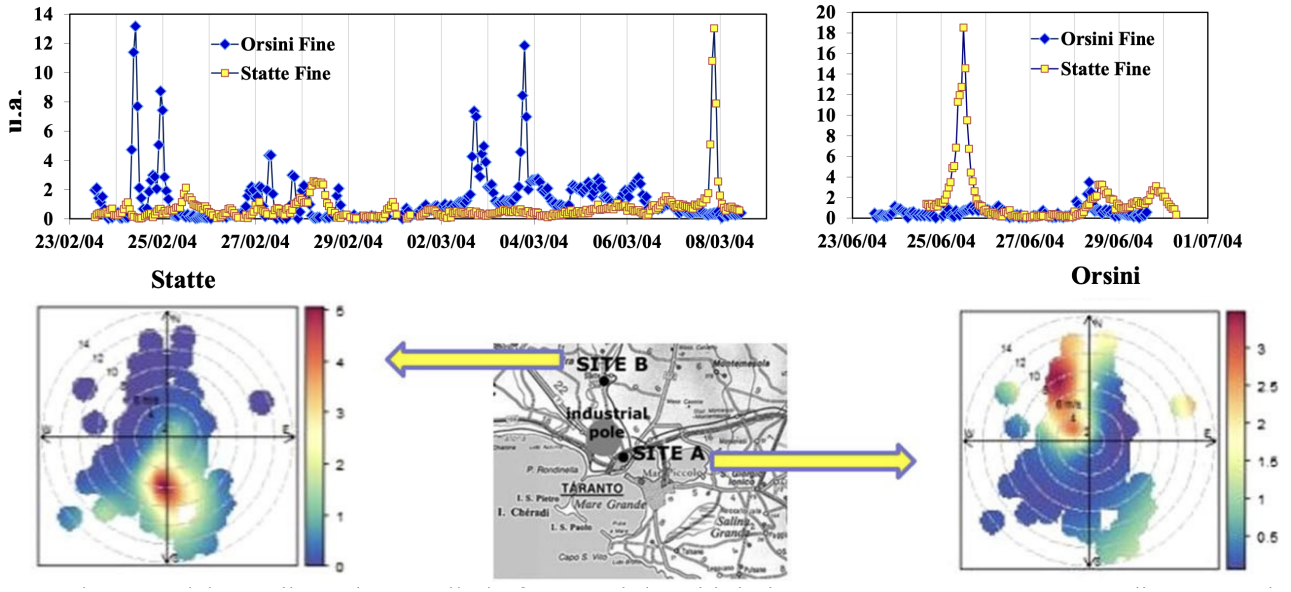


Figura 8: Sopra: Andamento del contributo dovuto all'altoforno nei due siti, in inverno e estate. Sotto: Mappa di Taranto al centro, che mostra la localizzazione dei due siti di campionamento, e il grafico polare della sorgente legata all'altoforno.

nell'individuare i contributi delle diverse unità siderurgiche, che i dati giornalieri non riuscivano sempre a rilevare a causa della brevità delle emissioni.

La posizione dei siti di campionamento, in posizioni opposte rispetto al sito industriale, ha permesso di seguire l'impatto della nube industriale in funzione della direzione del vento (fig. 8). Inoltre, la risoluzione oraria ha mostrato elevate concentrazioni di metalli durate alcune ore, che possono comportare problemi di esposizione in quest'area. È stata inoltre identificata la presenza di altre sorgenti antropiche e naturali.

Un caso molto particolare è costituito dagli eventi pirotecnici, come nella notte di Capodanno o nelle festività nazionali; provocano notevoli aumenti transitori (fino a diverse ore) dei livelli medi di particolato atmosferico urbano, che possono raggiungere anche centinaia di $\mu g/m^3$, in particolare per quanto riguarda le particelle metalliche (K, Mg, Ba, Cu, Sr, Al, Pb), le quali possono essere pericolose per la salute umana.

In Spagna durante i festival annuali in numerose città della regione valenciana hanno luogo eventi pirotecnici ad alta intensità, chiamati `mascletàs` [19]. A differenza dei fuochi d'artificio tradizionali, le `mascletàs` vengono utilizzate per stimolare il sistema uditivo e la vibrazione corporea attraverso una sequenza di forti rumori ritmici prodotta dalla combustione di un tipo di petardo noto come `masclet`. Il `masclet` è un potente petardo sonoro che può esplodere sia a livello del suolo che a bassa quota (1.5–2.0 m). Durante la combustione, si producono detonazioni di alta intensità, effetti di luce e abbondante generazione di fumi, a seconda della composizione del petardo. Durante le `mascletàs`, centinaia di *shell* di fuochi d'artificio vengono sparati in aria utilizzando cannoni verticali. Le persone che assistono a questi eventi sono direttamente avvolte dalle nuvole di aerosol che si formano.

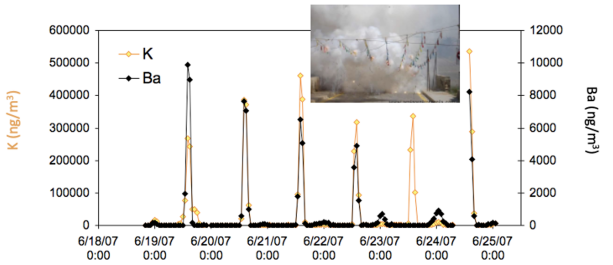


Figura 9: Concentrazione oraria di Cl e Ba (ng/m^3) nella frazione fine durante la settimana delle mascletas (esplose sempre alle 14) a Alicante (Spagna) [19].

Ad Alicante abbiamo campionato con risoluzione oraria la nube di particolato emessa in un punto molto vicino alla zona di lancio. Sono state trovate concentrazioni estremamente elevate

nella frazione fine, con valori massimi superiori a 500 μg/m^3 per il K, 100 μg/m^3 per il S e 300 μg/m^3 per il Cl, con fattori di incremento superiori a 1500 rispetto ai livelli di fondo (fig. 9). Altri elementi tipici associati agli spettacoli pirotecnici, come Al, Mg, Cu, Co, Zn e Pb, hanno anch'essi mostrato un notevole aumento, con fattori di incremento superiori a 100, principalmente nella frazione fine rispetto ai loro valori normali. Nel caso di Sr e Ba, sono stati osservati fattori fino a ~1000. Le concentrazioni rilevate nelle nubi di mascletà non erano costanti a causa della variabilità nella composizione della polvere da sparo e dei dispositivi pirotecnici utilizzati per ottenere effetti specifici. Alcuni dei metalli identificati sono elementi pericolosi a causa della loro tossicità, come As e Pb (con concentrazioni fino a 0,17 e 5 μg/m^3 rispettivamente). Tali concentrazioni molto elevate in un breve periodo in un luogo dove si trovano migliaia di persone possono rappresentare un pericolo, in particolare per coloro che soffrono di problemi respiratori cronici, malattie cardiovascolari, ecc. Inoltre, il Cl a tali concentrazioni elevate è pericoloso per l'ambiente.

Il particolato di origine naturale

L'interesse nello studio degli aerosol naturali è giustificato dal fatto che la polvere minerale e l'aerosol marino rappresentano una componente maggioritaria del particolato atmosferico su scala globale e le loro concentrazioni atmosferiche hanno effetti rilevanti sul clima. In particolare, nel sud Europa, la polvere sahariana dà un contributo non trascurabile al PM e può, in modo episodico, aumentare significativamente i livelli di PM10, superando il limite di 50 μg/m^3.

Le direttive europee sulla qualità dell'aria specificano che i valori limite non devono essere applicati a eventi definiti come naturali, i quali includono il "trasporto a lungo raggio da zone aride". I modelli di diffusione e l'osservazione mediante immagini satellitari possono rivelarsi molto efficaci nello studio del trasporto della polvere sahariana; tuttavia, l'avvezione di masse d'aria provenienti dal Sahara non implica necessariamente elevate concentrazioni di PM10 a livello del suolo. Pertanto, solo le campagne di monitoraggio sul campo, seguite da analisi della composizione del particolato, possono valutare l'impatto reale degli episodi di polvere sahariana sulla qualità dell'aria, conferendo così un ruolo chiave alla tecnica PIXE. La concentrazione della polvere minerale può infatti essere stimata come somma degli ossidi prevalenti degli elementi crostali (che come abbiamo detto possono essere misurati molto bene tramite PIXE). Inoltre, lo studio dei rapporti fra gli elementi crostali permette di distinguere tra polvere minerale locale e sahariana [15].

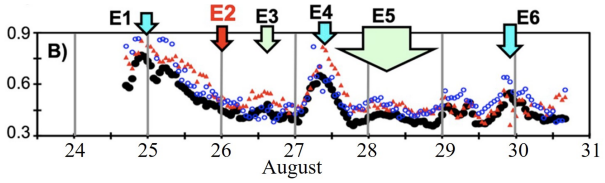


Figura 10: Andamento temporale del rapporto tra le concentrazioni orarie di Ca e Al nelle frazioni di particolato totale (senza taglio dimensionale), grossolana (2,5–10 μm) e fine($< 2{,}5$ μm) ottenuto all'Osservatorio di Izaña dal 23 al 30 agosto 17 [20]. Sono evidenziati i rapporti nel periodo in cui Izaña è stata interssata dal passaggio di aerosol proveniente dal Sahara.

Infine, la polvere minerale contiene ferro, un nutriente importante per gli ecosistemi marini; la deposizione di ferro nell'oceano influisce sul ciclo del carbonio (CO_2) e, a sua volta, può avere effetti sul clima. Anche per questo motivo è importante studiare il trasporto dell'aerosol sahariano attraverso l'Atlantico fino alle Americhe.

Come esempio presentiamo alcuni risultati derivati dalle prime misure ad alta risoluzione temporale effettuate presso l'Osservatorio di Izaña (Tenerife) [20]. L'obiettivo era rispondere a tre domande: quanto rapidamente cambia la composizione della polvere proveniente dal Sahara (Saharan Air Layer - SAL)? Qual è il collegamento con le aree sorgenti della polvere? Qual è il ruolo della meteorologia?

In Figura 10 è riportato il rapporto Ca/Al. È possibile notare un cambiamento di un fattore fino a 2 in sole 6 ore. Durante una settimana di presenza continua di polvere a Izaña (50 – 200 μg/m^3), sono stati osservati 7 impatti concatenati, tracciati dalla variabilità nei rapporti degli diversi elementi rispetto all'Al. Questa variabilità è stata indotta dagli impatti alternati di tre

delle grandi fonti di polvere del Nord Africa (NE Algeria, regione del Bechar in Sahara occidentale e SW Sahara - Sahel occidentale). Le aree sorgenti della polvere sono state identificate studiando le retro-traiettorie delle masse d'aria.

Abbiamo trovato una correlazione tra la composizione della polvere nel Sahara Air Layer (**SAL**) e il **NAFDI** (*North African Dipole Intensity*), che è il rapporto tra l'alta pressione tropicale sahariana - Marocco - e la bassa pressione tropicale monsonica - Nigeria.

Il NAFDI traccia la variabilità della meteorologia estiva. La fase positiva del NAFDI aumenta l'esportazione di polvere verso l'Atlantico del Nord, mentre la fase negativa del NAFDI incrementa l'esportazione di polvere verso il Mediterraneo occidentale. Il NAFDI spiega la variabilità osservata nella composizione della polvere. I valori di NAFDI compresi tra 0 e +2 sono stati associati a polvere ricca di Ca, K, Na, Mg e S, collegata a sorgenti nel NE Algeria. Al contrario, valori di NAFDI più elevati (da 2 a 4) sono stati correlati a polvere ricca di Fe (con concentrazioni più basse di Ca, Na e S), associata a fonti nel SW Sahara e nel Sahel occidentale. Questi risultati mostrano che la variabilità a lungo termine della meteorologia in Nord Africa può avere implicazioni sulla composizione della polvere esportata verso l'Atlantico del Nord (per esempio sul contenuto di Fe), evidenziando l'interconnessione tra la polvere desertica, la meteorologia e il clima.

Il particolato in aree polari e gli studi Paleoclimatici

Gli studi paleoclimatici studiano le variazioni climatiche della Terra nel corso dei millenni. Questi studi non solo forniscono informazioni sui cambiamenti climatici passati, ma anche sulle potenziali tendenze future. La ricerca continua in questo campo è fondamentale per sviluppare modelli climatici più accurati come aiuto per l'adozione di adeguate politiche ambientali e climatiche.

Gli aerosol minerali insolubili sollevati da superfici continentali giocano un ruolo significativo nel clima terrestre, influenzando il bilancio radiativo terrestre. Possono essere trasportati a lunghe distanze e depositarsi a per migliaia di chilometri dal luogo di origine. Ad esempio, nel caso dell'emisfero australe, durante i periodi glaciali l'America del Sud è la principale area di origine del particolato per l'Antartide e quindi l'analisi della stratigrafia del PM nelle carote di ghiaccio antartiche può fornire informazioni importanti sui cicli idrologici dell'America del Sud e sui cambiamenti climatici passati, aiutando a ricostruire le condizioni atmosferiche di epoche precedenti.

Tecniche analitiche avanzate, come la spettrometria di massa e l'analisi mediante PIXE, permettono di ottenere dati dettagliati sui vari elementi presenti negli aerosol e sulla loro concentrazione nel tempo.

L' analisi della composizione delle sezioni delle carote di ghiaccio è particolarmente impegnativa a causa delle concentrazioni estremamente basse delle particelle insolubili presenti delle carote di ghiaccio antartiche (da picogrammi a microgrammi per chilogrammo di ghiaccio).

La tecnica PIXE si è dimostrata un metodo affidabile. Le carote, strato per strato, vengono sciolte, e il liquido viene filtrato attraverso una membrana di piccola area per concentrare la polvere insolubile, ottenendo così concentrazioni rilevabili. Non è necessaria alcuna ulteriore preparazione del campione, il che minimizza qualsiasi possibile contaminazione rispetto a tecniche come l'ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). La quantità di polvere raccolta (circa 1–2 μg/cm^2 nei campioni più scarsi) è sufficiente per ottenere buone statistiche [16, 21].

Nell'ambito del progetto **EPICA** (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), è stata perforata una carota di ghiaccio a Dome C, nell'Altopiano Antartico orientale, che copre un periodo di 800 mila anni. I campioni analizzati riguardano i principali eventi freddi degli ultimi 220 mila anni, coprendo le fasi glaciali MIS4 e MIS6, e l' Ultimo Massimo Glaciale (LGM). La polvere minerale stimata come somma degli ossidi prevalenti degli elementi crostali, a partire da misure PIXE, concorda molto bene con la concentrazione misurata con altre tecniche (fig. 11, [21]) ed è evidente che le concentrazioni di polvere sono molto più elevate durante i periodi freddi (LGM, MIS4 e MIS6) rispetto ai periodi caldi.

Questa osservazione suggerisce un legame diretto tra le condizioni climatiche e la mobilità della polvere minerale nell'atmosfera. I risultati indicano quindi che durante le fasi glaciali le sorgenti di polvere possono essere più attive,

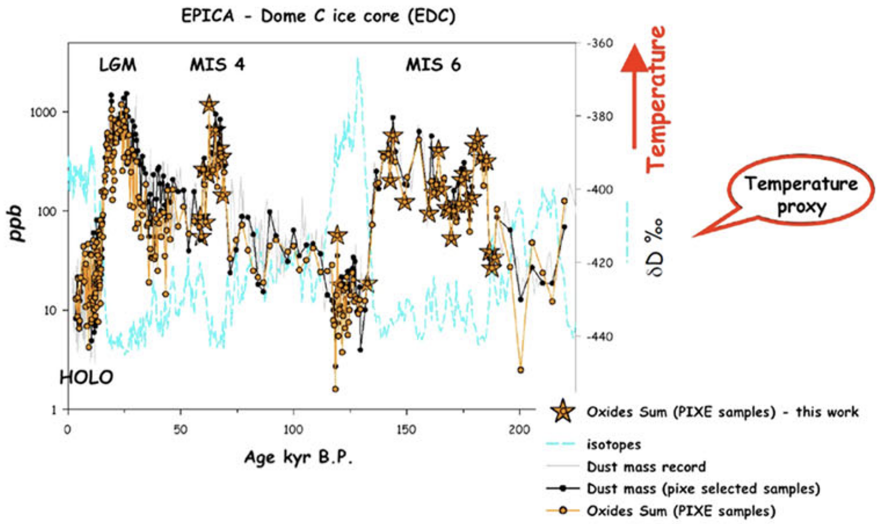


Figura 11: Concentrazione delle polveri minerali in atmosfera in Antartide durante gli ultimi duecentoventimila anni. In celeste è riportato l'andamento del deltaDeuterio (proxy della temperatura).

contribuendo in modo significativo alle concentrazioni atmosferiche di PM, che, a loro volta, influenzano il bilancio radiativo terrestre e i cicli climatici globali.

Nelle regioni polari gli studi riguardano anche il campionamento e l'analisi del particolato atmosferico attualmente presente in queste aree, considerate le più sensibili ai cambiamenti climatici. In particolare, l'Artico sta vivendo un cambiamento climatico senza precedenti, riscaldandosi a una velocità fino a quattro volte superiore rispetto alla media globale, un fenomeno noto come "Amplificazione Artica" (**AA**). Questo rapido riscaldamento stravolge l'ecosistema artico e ha effetti significativi sul clima globale, perturbando i parametri meteorologici e i cicli idrologici fino alle medie latitudini. In particolare, l'AA influisce sugli eventi meteorologici estremi, rendendo più complesso prevederli. Nonostante i progressi nella modellizzazione del cambiamento climatico, rimangono ancora grandi incertezze soprattutto riguardo al ruolo del particolato atmosferico. L'aerosol interagisce con la radiazione solare influenzando il clima in modi complessi e con meccanismi in grado di amplificarsi a vicenda. Inoltre, il cambiamento climatico sta generando nuove sorgenti di aerosol nell'Artico (per esempio, polveri da regioni precedentemente coperte da ghiacci, o emissioni dall'aumentato traffico navale), complicando ulteriormente la comprensione di questi processi.

Uno dei principali ostacoli alla comprensione dell'impatto dell'aerosol sull'AA è la mancanza di dati completi. Attualmente, le stazioni di monitoraggio nell'Artico sono poche e situate sulla terraferma, lasciando un vuoto di informazioni su vaste aree marine che coprono la maggior parte dell'Artico. Per affrontare queste sfide, il progetto GAIA (*New integrated experimental and modelling tools for Georeferenced source apportionment of Aerosol climate-relevant parameters from the Mediterranean area till the Arctic*), finanziato dall'Unione Europea - Next Generation EU ha sviluppato una nuova infrastruttura di ricerca, GAInfrA, che ospita strumentazione avanzata per la caratterizzazione dell'aerosol e altre misure atmosferiche. Questa infrastruttura è progettata per essere utilizzata su navi da ricerca, permettendo così la raccolta di dati in aree remote e difficilmente accessibili dell'Artico. Il progetto, coordinato dalla Sezione di Firenze dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) vede coinvolti: l'Università degli Studi di Milano, l'Università di Milano Bicocca, l'Istituto di Scienze Polari (ISP) e l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC) del CNR. Nell'estate del 2024 sono state effettuate due campagne di misura dalle medie latitudini all'Artico con lo scopo di raccogliere dati sulle proprietà chimiche, fisiche e ottiche dell'aerosol, sui bilanci di radiazione e sui profili verticali atmosferici.

La prima campagna si è svolta a bordo della rompighiaccio Polarstern, operata dall'Istituto Alfred Wegener di Bremerhaven (Germania), Helmotz Zentrum per la ricerca polare e marina. La Polarstern ha raggiunto 90° N equipaggiata

con GaInfrA. La seconda campagna si è svolta a bordo della nave Oceania, operata dall'Istituto di Oceanologia dell'Accademia Polacca delle Scienze (IOPAN) equipaggiata con alcuni strumenti analoghi a quelli presenti in GaInfrA. In entrambe le campagne sono stati utilizzati campionatori per raccogliere il particolato ad alta risoluzione temporale che verranno analizzati presso il laboratorio LABEC con la tecnica PIXE.

Conclusioni

Fra le tecniche analitiche che hanno le proprie radici nella fisica nucleare, la PIXE rappresenta uno strumento utile per l'analisi del particolato atmosferico, in maniera ancora maggiore se utilizzata in modo complementare e sinergico con altre tecniche analitiche. Per sfruttare appieno le sue potenzialità, è necessario utilizzare un apparato sperimentale e condizioni sperimentali adeguate.

La PIXE non ha rivali per lo studio degli aerosol naturali come la polvere minerale o gli aerosol marini. La rilevazione simultanea di numerosi elementi, tra cui diversi importanti traccianti di sorgenti sia naturali sia antropiche del PM è fondamentale per l'applicazione di modelli a recettore come la PMF. I tempi di misura per l'analisi di campioni giornalieri standard sono molto più brevi di quelli tipici di altre tecniche e non necessita di alcun pre-trattamento del campione.

La PIXE riveste un ruolo importante nello studio di campioni ad alta risoluzione temporale, che è molto utile per identificare le sorgenti di aerosol, per comprendere i processi fisico-chimici e per valutare la reale esposizione umana. Infine, la capacità di PIXE di analizzare campioni con massa molto bassa, insieme all'assenza di necessità di pretrattamento del campione (che potrebbe essere fonte di contaminazione), lo rende molto utile per l'analisi dell'aerosol raccolto in aree remote, quali, ad esempio, l'Artide e l'Antartide.

[1] C. Tomasi, S. Fuzzi, A.Kokhanovsky (eds.): *Atmospheric Aerosols, Lige Cycles and Effects on AirQualityand Climate*, Wiley, Hoboken, New York (2017).

[2] J. H. Seinfeld: *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, Wiley, New York (1986).

[3] Climate Change 2021: *The Physical Science Basis.* Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report

[4] J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson (eds.),: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge (2001).

[5] S.E. Schwartz, M.O. Andreae: *Uncertainty in climate change caused by aerosols*, Science, 272 (1996) 1121.

[6] World Health Organization. Regional Office for Europe. *Air quality guidelines for Europe*, 2nd ed. (2000). https://iris.who.int/handle/10665/107335

[7] Technical Specification CEN/TS 17458:2020: *Ambient air - Methodology to assess the performance of receptor oriented source apportionment modelling applications for particulate matter* (2020).

[8] X. Querol, A. Alastuey, S. Rodríguez, F. Plana, E. Mantilla, C.R. Ruiz: *Monitoring of PM10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources*, Atmos. Environ., 35 (2001) 845.

[9] R. Traversi, S. Becagli, F. Lucarelli, S. Nava, F. Rugi, M. Severi, R. Udisti: *A comparison between PIXE and ICP-AES measurements of metals in aerosol particulate collected in urban and marine sites in Italy*, Nucl. Instrum. Methods B, 318 (2014) 130.

[10] K.VanMeel, B. Horemans,A.Krata, L. Bencs, A.J. Buczyiiska, A.C.Dirtu,A.Worobiec, R.VanGrieken: *Elemental concentrations in aerosols at the Belgian coast versus seasons and air mass trajectories*, Environ. Chem. Lett., 8 (2010) 157.

[11] K.D. Perry, S.S. Cliff, P. Jimenez-Cruz, K.D. Perry, S.S. Cliff, P. Jimenez-Cruz: *Evidence for hygroscopic mineral dust particles from the Intercontinental Transport and Chemical Transformation Experiment*, J. Geophys. Res., 109(D23S) (2004) 28.

[12] S.A.E. Johansson, J.L. Campbell, K.G. Malmqvist: *Particle-Induced X-Ray Emission Spectroscopy*, Wiley, London (1995).

[13] W. Maenhaut, K.Malmqvist: , in Handbook of X-ray Spectrometry, ed. by R.E.VanGrieken, A.A. Markowicz, Marcel Dekker (Antwerp).2001

[14] A. D'Alessandro, F. Lucarelli, P.A. Mandò, G. Marcazzan, S. Nava, P. Prati, G. Valli, R. Vecchi, A.Zucchiatti: *Hourly elemental composition andsources identi!cation of fine and coarse PM10 particulate matter in four Italian towns*, J. Aerosol Sci., 34 (2003) 243.

[15] S. Nava, S. Becagli, G. Calzolai, M. Chiari, F. Lucarelli, P. Prati, R. Traversi, R.Udisti, G.Valli, R.Vecchi: *Saharan dust impact in central Italy: An overview on three years elemental data records*, Atmos. Environ., 60 (2012) 444.

[16] F. Marino, G. Calzolai, S. Caporali, E. Castellano, M. Chiari, F. Lucarelli, V. Maggi, S. Nava, M. Sala, R. Udisti: *PIXE and PIGE techniques for the analysis of Antarctic ice dust and continental sediments*, Nucl. Instrum. Methods B, 266 (2008) 2396.

[17] F. Amato,A.Alastuey,A.Karanasiou, F. Lucarelli, S. Nava,G.Calzolai, M. Severi, S.Becagli,V. Gianelle, C. Colombi, C. Alves, D. Custódio, T. Nunes, M. Cerqueira, C. Pio, K. Eleftheriadis, E. Diapouli, C. Reche, M.C. Minguillón, M. Manousakas, T. Maggos, S. Vratolis, R.M. Harrison, X. Querol: *AIRUSE-LIFEC: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities*, Atmos. Chem. Phys., 16 (2016) 3289.

[18] F. Lucarelli , G. Calzolai, M. Chiari, F. Giardi , C. Czelusniak, S. Nava: *Hourly Elemental Composition and Source Identification by Positive Matrix Factorization (PMF) of Fine and Coarse Particulate Matter in the High Polluted Industrial Area of Taranto (Italy)*, Atmosphere, 11 (2020) 419.

[19] J. Crespo, E. Yubero, J. F. Nicolás, F. Lucarelli, S. Nava, M. Chiari, G. Calzolai: *High-time resolution and size-segregated elemental composition inhigh-intensity pyrotechnic exposures*, Journal of Hazardous Materials, 241 - 242 (2012) 82.

[20] S. Rodríguez, G. Calzolai, M. Chiari, S. Nava,M.I. García, J. Lopez-Solano, C. Marrero, J. Lopez-Darias,E. Cuevas, S. Alonso-Perez, N. Prats, F. Amato, F. Lucarelli, X. Querol: *Rapid changes of dust geochemistry in the Saharan Air Layer linked to sources and meteorology*, Atmos. Environ., 223 (2020) 117186.

[21] EPICA community members: *Eight glacial cycles from an Antarctic ice core*, Nature, 429 (2004) 623..

Franco Lucarelli: è professore ordinario di Fisica Applicata all'Università di Firenze, ateneo nel quale è anche docente di Fisica dell'ambiente. È stato fra i promotori dello sviluppo del laboratorio dell'acceleratore di Firenze come centro di riferimento internazionale per le analisi con fasci di ioni nei settori dei Beni Culturali e dell'ambiente. La sua attività scientifica si focalizza principalmente sullo studio dell' aerosol atmosferico e della qualità dell'aria in ambiente urbano, suburbano e remoto.

Giulia Calzolai: è ricercatrice presso l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Si occupa principalmente dell'applicazione di tecniche di analisi con fasci ionici ai campioni di interesse ambientale presso il laboratorio LABEC (Laboratorio di Tecniche Nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali) della Sezione INFN di Firenze. Ha svolto studi e campagne in molti luoghi dell'Europa e Asia, e in Artide.

Silvia Nava: è professoressa del Dipartimento di fisica dell'Università di Firenze. La sua attività di ricerca, svolta presso il laboratorio LABEC (Laboratorio di Tecniche Nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali) di Firenze, riguarda lo sviluppo e l'applicazione di tecniche di analisi con fasci ionici (Ion Beam Analysis) per la misura di campioni ambientali, principalmente campioni di particolato atmosferico raccolti in aree urbane, industriali e remote (fra cui aree polari). Ha partecipato alla stesura dell "European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models".

Il curativo potenziale della teoria nucleare

Grazie ChatGPT per le discussioni accese e illuminanti, per l'entusiasmo con cui ci hai accompagnato nella stesura di questo articolo, ... e per non esserti mai stancata delle nostre domande! 🙂

LC&FB

Luciano Canton *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sez. di Padova*
Francesca Barbaro *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sez. di Padova*
Dipartimento di Fisica e Astronomia G. Galilei, Università di Padova

In generale, il termine "nucleare" suscita un mix di speranza e paura, associato sia a promesse di progresso scientifico sia a potenziali catastrofi. Questo riflette la complessità delle sue implicazioni scientifiche, tecnologiche, politiche e sociali, e l'esistenza di opinioni fortemente polarizzate nei suoi confronti, al pari di altri termini polarizzanti quali "vaccini", "emergenza climatica", "immigrazione", "aborto", "eutanasia", "diritti LGBTQ+", e via discorrendo. Non abbiamo alcuna intenzione di entrare in quest'agone di dibattito: non dobbiamo e non vogliamo convincere nessuno. Piuttosto, abbiamo deciso di raccontare il nostro percorso di ricerca intrapreso, ormai da alcuni anni, in un contesto interdisciplinare volto allo studio della produzione di radionuclidi innovativi di interesse medicale.

Una medicina di precisione (radioattiva)

La nostra ricerca si concentra sull'esplorazione di nuove strade per produrre radionuclidi innovativi per applicazioni medicali, adatti sia alla terapia sia alla diagnosi, la cosiddetta teranostica. Questo lavoro si inserisce in un contesto multidisciplinare in cui diverse aree della scienza e della tecnologia si intrecciano strettamente. La fisica nucleare, sia teorica sia sperimentale, la dosimetria, la radiochimica, la radiofarmacia e l'*imaging* diagnostico lavorano insieme per creare soluzioni avanzate. Ogni disciplina contribuisce con la propria competenza, permettendo di sviluppare radiofarmaci sempre più efficaci e sicuri per le applicazioni cliniche.

Questo approccio integrato trova la sua massima espressione nei **radiofarmaci teranostici**, che combinano in un unico farmaco la capacità di diagnosticare e trattare una patologia. Questi possono essere paragonati ai soldati nascosti nel celebre cavallo di Troia: invisibili all'inizio, ma pronti a colpire con precisione letale una volta raggiunto il loro obiettivo. Progettati per aggira-

re il sistema immunitario e raggiungere in sordina recettori cellulari specifici, i radiofarmaci viaggiano nel corpo come abili spie. Una volta raggiunte le cellule tumorali sferrano un attacco micidiale, distruggendole dall'interno mediante le radiazioni emesse, proprio come i soldati greci fecero con Troia. E proprio come i

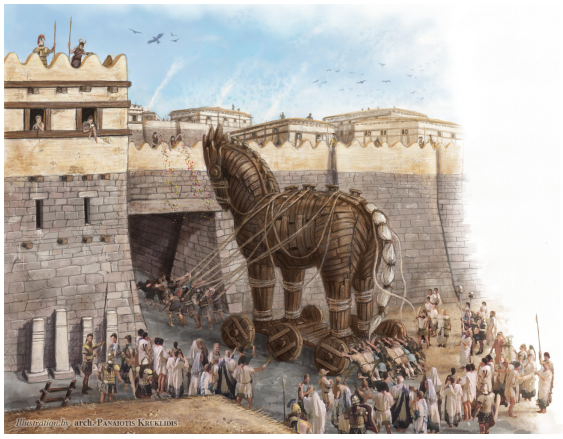


Figura 1: Un'immagine evocativa del cavallo di Troia per spiegare il meccanismo di azione dei radiofarmaci. Un elemento apparentemente innocuo (il vettore biologico) trasporta guerrieri invisibili (radionuclidi) fino al bersaglio designato, dove entrano in azione. Un radiofarmaco ideale è composto da un vettore biologico progettato per legarsi preferenzialmente al tessuto bersaglio, è facilmente trasportabile nel corpo ed è caratterizzato da una stabilità sufficiente a mantenere la propria integrità fino al raggiungimento del bersaglio. L'aspetto chiave è la specificità del radiofarmaco, sia da un punto di vista biologico che fisico. La scelta del radionuclide è calibrata per colpire esclusivamente il tessuto malato, preservando i tessuti sani circostanti. Inoltre il radiofarmaco deve avere un'emivita biologica adeguata, in modo da rimanere nel corpo abbastanza a lungo per essere efficace, e un'emivita fisica sufficiente a garantire il decadimento una volta raggiunto il tumore, ottimizzando così l'efficacia del trattamento.

soldati, addrestati a svolgere compiti diversi e tutti essenziali per l'attacco, anche qui lo stesso farmaco, con identica composizione chimica, viene utilizzato per veicolare radionuclidi idonei a sferrare un duplice attacco: individuare ed eliminare, ovvero diagnosticare e trattare. Nella fase diagnostica, il radiofarmaco si comporta come una spia. Qui entra in gioco la fisica: il decadimento del radionuclide produce fotoni rilevabili

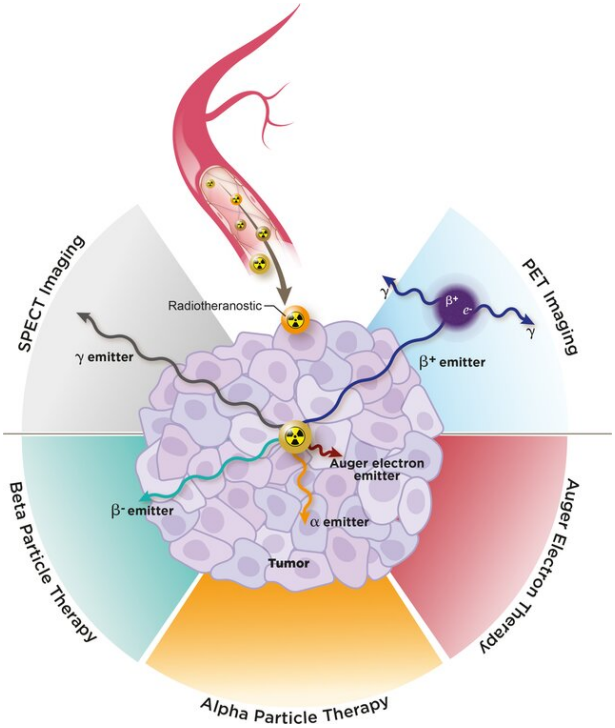


Figura 2: La figura mostra il concetto di radioteranostica, un approccio che sfrutta i radiofarmaci combinando diagnosi avanzata e terapie mirate [1].
DIAGNOSI: 1) ***SPECT*** (Single Photon Emission Computed Tomography) tecnica di *imaging* che rivela i fotoni (γ) emessi dal radionuclide, una radiazione altamente penetrante che attraversa il corpo del paziente e permette di creare immagini tridimensionali del tumore. 2) ***PET*** (Positron Emission Tomography) utilizza radionuclidi emettitori di β^+ (positroni), che annichilano e producono due raggi γ in direzioni opposte rilevabili in coincidenza dai *detector* posizionati intorno al corpo del paziente. La PET crea immagini dettagliate del metabolismo del tumore.
TERAPIA MIRATA: 1) ***Particelle*** β^-, relativamente penetranti (1-10 mm), danneggiano le cellule tumorali circostanti, distruggendone il DNA e inducendo la morte cellulare. È una tecnica utilizzata soprattutto per tumori profondi o diffusi. 2) ***Particelle*** α, con un raggio d'azione limitato (50-100 μm) sono efficaci nel distruggere le cellule tumorali senza danneggiare i tessuti sani circostanti. Adatte per il trattamento dei tumori localizzati. 3) ***Elettroni Auger***, agiscono in modo estremamete mirato con un range di pochi nm. Se internalizzati nella cellula causano danni subcellulari, caratteristica promettente per trattare le metastasi.

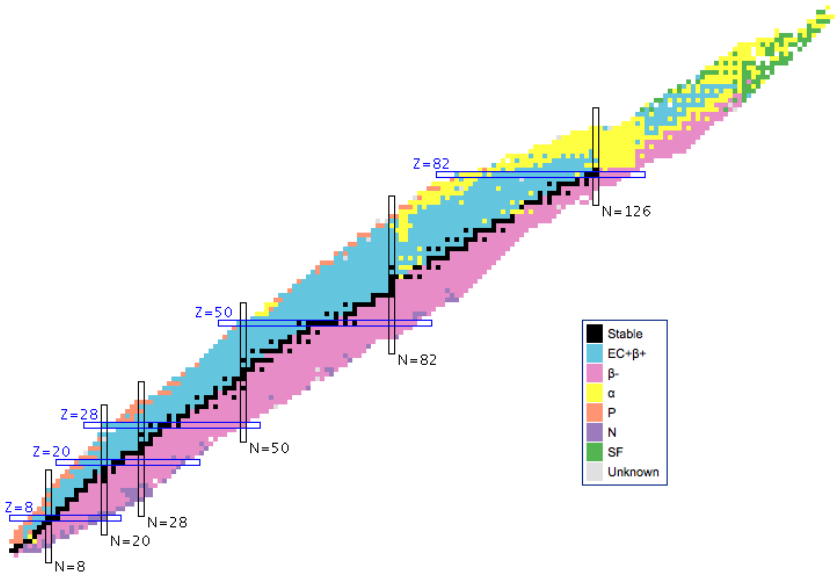


Figura 3: La tavola di Segrè, o carta dei nuclidi, rappresenta nuclidi stabili e instabili in base al numero di protoni (Z) e neutroni (N). Diversamente dalla tavola periodica, include i diversi isotopi di ciascun elemento chimico, offrendo una visione più dettagliata delle loro proprietà nucleari.

dalle tecnologie di *imaging* fornendo una mappa dettagliata del tumore, la posizione del nemico. Ma il colpo decisivo arriva nella fase terapeutica. Alcuni isotopi radioattivi emettono particelle altamente energetiche, come beta o alfa, che se in prossimità del bersaglio tumorale sono in grado di distruggere le cellule maligne. È come se il cavallo di Troia si aprisse una volta raggiunta la roccaforte del nemico, liberando la sua forza distruttiva. In questo contesto, i fisici studiano attentamente le proprietà delle radiazioni e la loro interazione con i tessuti, assicurando un attacco mirato diretto principalmente al tumore, salvaguardando le cellule sane.

Un'arma vincente che rende la teranostica così innovativa, è la capacità di personalizzare il farmaco per adattarlo al tipo di tumore e alle caratteristiche del paziente. Grazie alla fisica computazionale, è possibile simulare l'intero processo, dall'ingresso del farmaco nel corpo fino al suo effetto finale sulle cellule tumorali. Questo consente di ottimizzare la strategia, selezionando la chimica, l'isotopo e la dose più adatti per massimizzare l'efficacia del trattamento, creando così un'arma su misura per neutralizzare il nemico con la massima precisione.

La scelta del radionuclide per la medicina

Per individuare i radionuclidi più adatti alle diverse applicazioni mediche, la tavola di Segrè rappresenta uno strumento chiave [2]. Essa può essere paragonata a un sofisticato sistema di navigazione che guida gli scienziati nel vasto e intricato universo dei nuclei atomici. Con oltre 3.300 nuclidi mappati, questa tavola fornisce informazioni dettagliate su ogni isotopo, inclusi il numero di protoni e neutroni, il tempo di decadimento e il tipo di radiazione emessa.

Un aspetto fondamentale della tavola è la valle di stabilità, una sorta di "rotta sicura" lungo cui si collocano i nuclidi stabili. La maggior parte dei nuclidi che si trovano al di fuori di questa valle, caratterizzati da squilibri nel rapporto tra protoni e neutroni, tende a cercare la stabilità attraverso processi di decadimento radioattivo. Con la sua precisione la tavola di Segrè consente di prevedere il percorso che ogni nuclide seguirà nel suo viaggio verso la stabilità, anticipando come si trasformerà e quali radiazioni rilascerà.

Ad esempio, se un nuclide ha un eccesso di protoni rispetto ai neutroni, può andare incontro al decadimento β^+, emettendo un positrone e trasformandosi in un altro elemento. Al contrario, un nuclide con eccesso di neutroni subisce il decadimento β^-, in cui un neutrone si trasforma in un protone con l'emissione di un elettrone.

I nuclidi più pesanti, distanti dalla valle di stabilità, possono invece subire il decadimento α, emettendo particelle di elio per perdere massa e avvicinarsi a uno stato più stabile. Questi percorsi di decadimento sono chiaramente delineati nella tavola, che funge da vera e propria mappa per guidare attraverso i processi di trasformazione nucleare.

Ogni passaggio, ogni trasformazione, è chiaramente indicata, aiutando gli scienziati a prevedere il destino dei nuclidi instabili e a identificare il loro potenziale utilizzo. La tavola di Segrè si rivela essenziale non solo per la fisica nucleare, ma anche per la medicina nucleare. Tra le migliaia di nuclidi mappati, circa 200 sono potenzialmente interessanti per la medicina, ma solo 40 trovano un'applicazione clinica diretta. In questo contesto si inserisce PRISMAP [3], un'iniziativa europea che mira a costruire una rete dedicata ai radionuclidi medicali. L'obiettivo è superare la difficoltà di accesso ai radionuclidi non ancora disponibili commercialmente, fornendo un ampio catalogo di radionuclidi per la ricerca medica e promuovendo lo sviluppo di nuove tecnologie di produzione.

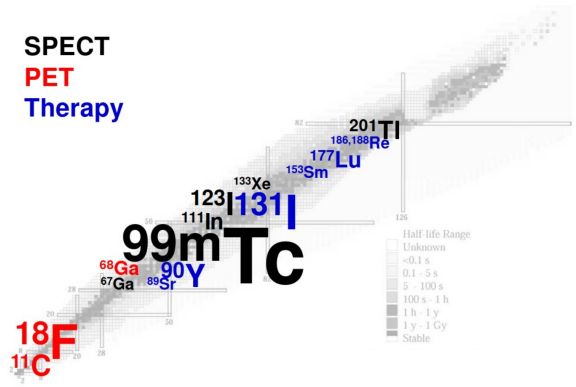


Figura 4: L'immagine mette in evidenza i pochi radioisotopi di utilizzo comune nella medicina rispetto alla quantità di nuclidi rappresentati nella tavola di Segrè. La dimensione dei simboli riflette la frequenza di utilizzo di ogni radioisotopo.

Nel campo della fisica medica, della ricerca nucleare o della radioterapia, la tavola di Segrè è molto più di un semplice strumento teorico, è un alleato pratico indispensabile. È un manuale che permette di individuare con precisione quali isotopi siano idonei per specifiche applicazioni, favorendo una prima valutazione dell'efficacia dei trattamenti radioterapici o diagnostici.

Nella pratica diagnostica, la somministrazione del radiofarmaco è dosata al minimo, poiché l'obiettivo primario è ottenere una mappatura accurata, minimizzando al contempo l'esposizione dei tessuti alle radiazioni. Diversamente, la medicina nucleare terapeutica si focalizza sul trattamento e il controllo della malattia, indirizzando dosi specifiche di radiazioni ionizzanti direttamente ai siti di interesse per agire in modo mirato e distruttivo sulla patologia [4].

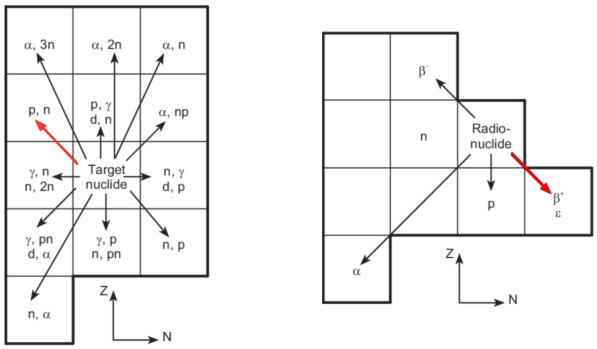


Figura 5: Gli schemi illustrati mostrano la chiave di lettura della tavola di Segrè. Ad ogni quadrato corrisponde un nuclide con un certo numero di protoni e neutroni. Sull'asse delle ascisse è rappresentato il numero di neutroni (N) e su quello delle ordinate il numero di protoni (Z). Lo schema di sinistra rappresenta le possibili reazioni nucleari che coinvolgono un *target* nuclide nella sua trasformazione in un altro nuclide. Le frecce indicano le reazioni e in ogni quadrato di arrivo, che corrisponde al nuclide prodotto, sono indicate le particelle coinvolte. Ad esempio, la reazione p, n evidenziata comporta la cattura di un protone dal nuclide bersaglio e l'emissione di un neutrone. A destra il diagramma che descrive come un radionuclide instabile può decadere attraverso i vari processi: decadimento α, β^- e β^+, emissione di protoni o neutroni. Ad esempio, quando un nucleo ha un eccesso di protoni rispetto ai neutroni può decadere tramite il processo di decadimento β^+, secondo cui un protone si trasforma in neutrone (emettendo un positrone e un neutrino). L'effetto sulla tavola è evidenziato, Z diminuisce di 1 e N aumenta di 1.

L'intento è danneggiare in modo irreversibile il DNA delle cellule tumorali, interrompendone la proliferazione attraverso la radiazione. I radionuclidi utilizzati in terapia emettono radiazioni con un raggio d'azione altamente circoscritto, permettendo di concentrare l'energia principalemente nelle cellule malate e proteggendo i tessuti sani circostanti.

Ogni tipo di radiazione ha un potere penetrante distintivo, che rappresenta la capacità di attraversare i tessuti e depositare energia in profondità prima di fermarsi. Questa caratteristica unica conferisce a ciascuna radiazione un ruolo specifi-

co all'interno di un piano terapeutico mirato. La diversificazione nel potere penetrante consente di sviluppare strategie terapeutiche personalizzate, adattabili in base al tipo, alla posizione e alla dimensione del tumore, riducendo al minimo gli effetti collaterali indesiderati. Selezionando la radiazione più appropriata si ottimizza l'efficacia complessiva del trattamento.

Le particelle α sono composte da due protoni e due neutroni, il che le rende particolarmente pesanti e poco penetranti. Il raggio di azione di queste particelle è molto limitato, 50-100 μm, che corrispondono a circa 2-10 diametri cellulari (una cellula ha un diametro di circa 10-30 μm). Questo significa che le particelle alfa possono intaccare le cellule adiacenti al punto di emissione, ma non si spingono oltre, riducendo i danni ai tessuti sani.

Le particelle β sono elettroni (o positroni) che hanno una massa e un potere di penetrazione intermedi rispetto alle particelle α. Lo spazio da loro percorso è dell'ordine di 1-10 mm, il che corrisponde a 30-1000 volte il diametro di una cellula. Le particelle beta possono quindi colpire un maggior numero di cellule generando un effetto di fuoco incrociato, irradiando non solo le cellule tumorali direttamente esposte al radionuclide, ma anche quelle vicine, migliorando così la copertura del volume tumorale. Tuttavia, questo effetto può rappresentare un limite: le particelle β, diffondendosi su un'area più ampia, rischiano di danneggiare i tessuti sani circostanti, aumentando il rischio di effetti collaterali. Rispetto ai radionuclidi che emettono particelle meno penetranti, come le α, il trattamento con elettroni può risultare meno specifico.

Oltre alle sopra menzionate α e β, un tipo di radiazione che sta suscitando crescente interesse nella terapia oncologica è rappresentato dagli **elettroni Auger**. Questi elettroni sono il risultato di un riarrangiamento elettronico di un atomo dopo che uno dei suoi elettroni interni è stato espulso. Con energie estremamente basse, nell'ordine di poche decine di elettronvolt (eV), gli elettroni Auger hanno un raggio di azione ridotto a pochi nanometri, ovvero pari ad una frazione del diametro di una cellula. Questa limitata capacità di penetrazione rende gli elettroni Auger particolarmente interessanti per applicazioni in cui è necessario un danno altamente localizzato, senza alcun impatto sui tessuti adiacenti. È chiaro che per sfruttare al massimo il potere terapeutico degli elettroni Auger, è necessario che il radionuclide emettitore sia internalizzato nella cellula bersaglio. Questo approccio rappresenta una prospettiva innovativa e promettente nella terapia personalizzata dei tumori, offrendo nuove possibilità per il trattamento delle metastasi.

Il Ruolo della Fisica Nucleare Teorica nella Produzione di Radionuclidi

I radionuclidi sono prodotti attraverso varie reazioni nucleari in ciclotroni, acceleratori di particelle e reattori nucleari. Nei ciclotroni, fasci di particelle cariche come protoni o deuteroni vengono accelerati e fatti collidere con bersagli composti da elementi specifici. Queste collisioni inducono reazioni nucleari che portano alla formazione dei radionuclidi desiderati. La selezione delle condizioni ottimali per tali reazioni, come l'energia del fascio e il materiale del bersaglio, si basa su modelli teorici che prevedono le sezioni d'urto, che rappresentano le probabilità con cui avvengono le reazioni nucleari, e i rendimenti di produzione o *yields*. I dati nucleari, invece, forniscono i parametri empirici necessari per convalidare questi modelli e per valutare con precisione l'efficienza e la purezza del processo di produzione.

L'evoluzione delle tecniche di produzione di radionuclidi è legata agli avanzamenti della fisica nucleare teorica, che utilizza sofisticati modelli matematici per descrivere le interazioni tra particelle subatomiche e per prevedere l'andamento delle reazioni nucleari. Oggi, la ricerca si concentra non solo sulla produzione di radionuclidi esistenti in modo più efficiente, ma anche sulla scoperta e produzione di nuovi radionuclidi che potrebbero essere utilizzati per applicazioni terapeutiche e diagnostiche innovative. L'integrazione di modelli teorici sofisticati e di dati sperimentali consente di esplorare nuovi percorsi di produzione e di identificare radioisotopi con caratteristiche ottimali per applicazioni specifiche.

Ad esempio, l'utilizzo di radionuclidi con proprietà sia paramagnetiche sia di emissione β^+,

come ^{52g}Mn, potrebbe rivoluzionare l'*imaging* multimodale, combinando PET e MRI (Imaging tramite Risonanza Magnetica Nucleare) in un'unica procedura senza necessità di sostanze contrastanti separate. La fisica nucleare teorica, in questo contesto, permette di progettare e ottimizzare le reazioni necessarie per produrre tali radionuclidi, valutando le sezioni d'urto e le energie ottimali.

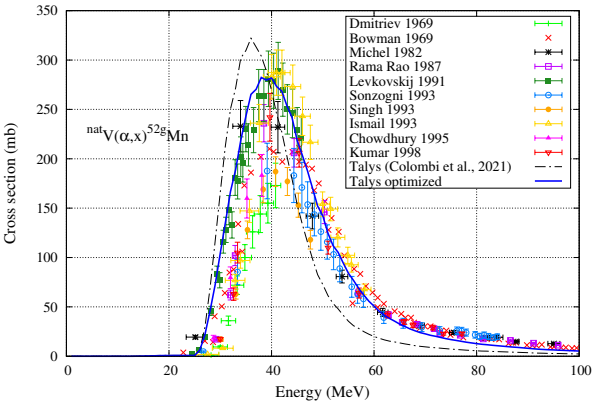


Figura 6: Sezione d'urto di produzione del radionuclide innovativo ^{52g}Mn attraverso collisioni di particelle α su bersaglio di Vanadio naturale ^{nat}V [5]. La lettera "g" nel simbolo indica che ci si riferisce allo stato fondamentale dell'isotopo, essendo presenti anche altri stati metastabili. La curva continua rappresenta un miglioramento significativo nella descrizione teorica dei meccanismi di reazione rispetto ad un'analisi precedente. Si noti che i dati empirici hanno una dispersione notevole e richiederebbero una revisione da parte di gruppi specializzati in *Nuclear-Data analysis* come ad esempio quello della IAEA [6].

In Figura 6, nella produzione del radionuclide ^{52g}Mn tramite la reazione V(α,x)^{52g}Mn, la teoria delle reazioni nucleari aiuta a calcolare la sezione d'urto ottimale in funzione dell'energia del fascio di protoni. Tali calcoli teorici sono poi confrontati con i dati empirici, ottenuti da esperimenti, per migliorare ulteriormente la precisione e l'affidabilità delle previsioni.

L'efficacia della produzione di radionuclidi dipende in gran parte dalla qualità e dalla precisione dei dati nucleari disponibili. I `nuclear data` includono informazioni dettagliate sulle sezioni d'urto delle reazioni nucleari, le energie di decadimento, i tempi di dimezzamento e altre proprietà fisiche dei nuclei. Questi dati sono fondamentali per ottimizzare i metodi di produzione e garantire che i radionuclidi siano prodotti con un'elevata specificità e purezza, minimizzando al contempo le impurità radioattive indesiderate.

Un esempio chiave è rappresentato dalla produzione di radionuclidi per applicazioni teranostiche (che combinano terapia e diagnosi). La combinazione di un radionuclide per *imaging* con uno per la terapia, noto come "coppia teranostica", richiede una produzione precisa di radionuclidi puri per evitare effetti collaterali indesiderati. I dati nucleari, come le sezioni d'urto e le energie di decadimento, sono essenziali per selezionare la coppia di radionuclidi ideale e per ottimizzare le condizioni di produzione nei ciclotroni e negli acceleratori.

Utilizzo dei Modelli Teorici e *Nuclear Data*

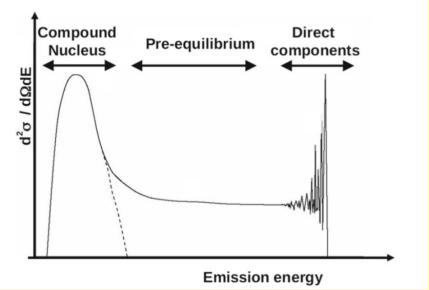
Se consideriamo che la fisica nucleare nasce nel 1911, con la scoperta del nucleo atomico da parte di E. Rutherford, stiamo parlando di più di 110 anni di progressi scientifici. Nel caso delle reazioni nucleari, giocano un ruolo fondamentale i meccanismi di reazione che vengono attivati nei processi di collisione, come discusso nel riquadro. È dagli anni '40 dello scorso secolo che si sono sviluppati i modelli teorici atti a descrivere questi meccanismi di reazione, e nel corso degli anni questi modelli teorici si sono fatti via via sempre più accurati, consistenti, e infine ispirati dalle moderne teorie nucleari cosiddette "microscopiche", ovvero a molticorpi.

Questa mole di conoscenze sui modelli nucleari è stata integrata nei moderni codici di calcolo delle reazioni nucleari assieme alla vastità delle informazioni sui dati nucleari. Fra i codici più noti, annoveriamo TALYS [8], EMPIRE [9], e FLUKA [10].

Uno degli strumenti teorici più utilizzati nelle applicazioni nucleari è il codice di calcolo TALYS, che permette di simulare le reazioni nucleari e prevedere le sezioni d'urto per diverse combinazioni di bersagli e particelle incidenti. Utilizzando i dati nucleari raccolti da esperimenti, TALYS è in grado di fornire previsioni accurate sui rendimenti di produzione dei radionuclidi e di identificare le condizioni sperimentali ottimali per massimizzare la resa e minimizzare le impurità.

Meccanismi di reazione nucleare

Se rappresentiamo la probabilità di accadimento di una reazione nucleare in funzione dell'energia dei nucleoni emessi dalla collisione, emergono tre diversi meccanismi di reazione [7].



Nucleo Composto (Compound Nucleus) Il meccanismo del nucleo composto implica che il nucleo bersaglio e il proiettile si combinino temporaneamente in un nuovo sistema che raggiunge un equilibrio statistico. Questo processo è relativamente lento e richiede un tempo di circa 10^{-18}s affinché tutte le particelle interne al nucleo interagiscano tra loro. Dopo questo equilibrio, il nucleo composto può decadere emettendo particelle come neutroni, protoni, o altre particelle. Poiché l'energia e lo stato del nucleo composto sono completamente equilibrati, l'uscita della particella emessa non è correlata alla direzione di ingresso del proiettile. Questo meccanismo presenta una distribuzione angolare isotropa (uniforme in tutte le direzioni).

Pre-equilibrio (Pre-Equilibrium) Il processo di pre-equilibrio avviene tra i processi diretti e il nucleo composto. Ha una scala temporale intermedia, in cui alcuni nucleoni del nucleo bersaglio iniziano a interagire con il proiettile entrante, ma senza che il sistema raggiunga un vero e proprio equilibrio statistico. Durante il pre-equilibrio, solo una parte dei nucleoni partecipa al processo, trasferendo energia e momento dal proiettile a un numero limitato di particelle. Questo comporta una distribuzione angolare anisotropa (ma meno pronunciata rispetto ai processi diretti). Il meccanismo di pre-equilibrio contribuisce in modo significativo alle sezioni d'urto (cross sections) a energie da 10 MeV fino a centinaia di MeV.

Processi Diretti (Direct Reactions) I processi diretti si verificano in tempi molto brevi, dell'ordine di 10^{-22} secondi, che è il tempo necessario al proiettile per attraversare il nucleo bersaglio. In questi processi, l'interazione avviene tra il proiettile e uno o pochi nucleoni del nucleo bersaglio, portando a una forte correlazione tra le condizioni di ingresso e di uscita. I processi diretti producono distribuzioni angolari fortemente orientate in avanti con caratteristiche oscillatorie. Sono tipicamente descritti usando l'approssimazione di Born dell'onda distorta (DWBA) e i formalismi di canale accoppiato.

Un esempio specifico è la produzione di ^{186}Re, che decade in ^{186}Os stabile con un'emivita di 3.78 giorni tramite l'emissione di particelle β^-. Emette anche un raggio gamma di 137.2 keV, rendendolo un radionuclide interessante per la teranostica del cancro. Inoltre, le chimiche di coordinazione simili di tecnezio e renio hanno reso il ^{186}Re un candidato molto promettente nello sviluppo di agenti terapeutici [11].

Per produrre ^{186}Re ad alta purezza, è possibile utilizzare la reazione ^{186}W(d,2n)^{186}Re. I dati nucleari [12] raccolti da esperimenti precedenti hanno mostrato che questa reazione ha una sezione d'urto significativamente più alta rispetto ad altre reazioni potenziali, come ^{186}W(p,n)^{186}Re. Di conseguenza, questa informazione è stata utilizzata per ottimizzare la produzione di ^{186}Re nei ciclotroni, riducendo la quantità di materiale bersaglio necessario e facilitando la separazione radiochimica del prodotto finale.

Un altro esempio riguarda l'ottimizzazione della produzione dei radionuclidi ^{123}I e ^{124}I, utilizzabili separatamente per due diversi tipi di *imaging* diagnostico. Attraverso le simulazioni teoriche e i dati nucleari sulle funzioni di eccitazione delle reazioni ^{124}Te(p,xn)^{123,124}I, i ricercatori[12] sono stati in grado di determinare la finestra di energia ottimale per produrre ^{123}I in forma quasi pura, minimizzando la contaminazione da ^{124}I, e al contempo hanno individuato una seconda finestra energetica questa volta per la produzione di ^{124}I ad elevata purezza. Questo

dimostra l'importanza di combinare modelli teorici e dati nucleari per ottenere radionuclidi ad alta purezza, essenziali per applicazioni cliniche sicure ed efficaci.

La qualità e la sicurezza dei radiofarmaci dipendono fortemente dalla purezza dei radionuclidi utilizzati. I dati nucleari dettagliati sulle energie di decadimento, i tempi di dimezzamento e le sezioni d'urto delle reazioni nucleari sono fondamentali per calcolare le dosi di radiazione somministrate ai pazienti e per garantire che i radionuclidi utilizzati siano privi di contaminanti radioattivi. La mancanza di dati accurati può portare a errori nella stima delle dosi e a effetti collaterali potenzialmente dannosi per i pazienti.

È evidente la necessità di dati nucleari aggiornati e standardizzati per la produzione di radionuclidi tramite reazioni indotte da particelle cariche in acceleratori. La raccolta di dati su sezioni d'urto, funzioni di eccitazione e impurità prodotte è essenziale per sviluppare nuovi radionuclidi per applicazioni teranostiche, come lo ^{47}Sc e il già citato ^{186}Re. Questi radionuclidi, particolarmente promettenti per le loro proprietà sia diagnostiche sia terapeutiche, richiedono un'accurata caratterizzazione per essere utilizzati in modo efficace in clinica. Lo ^{47}Sc è un eccellente agente teranostico che ha superato ampiamente i test preclinici, ma la sua traduzione nella pratica clinica è stata ostacolata dalla disponibilità limitata di ^{47}Sc sul mercato, poiché non ci sono ancora efficaci metodi di produzione per soddisfare l'elevata domanda.

Abbiamo studiato varie vie di produzione per lo ^{47}Sc in un contesto multidisciplinare che ha coinvolto ricercatori dei Laboratori INFN di Legnaro, dell'Università di Padova, Pavia, Ferrara, Milano, delle associate sezioni INFN, nonchè di IRCCS quali l'Istituto Oncologico Veneto e l'ospedale Sacro Cuore don Calabria di Negrar (Verona), concentrandoci in particolare su bersagli di Vanadio naturale e Titanio arricchito [13, 14, 15]. Questi studi hanno portato a un nuovo brevetto depositato dal Trasferimento Tecnologico dell'INFN [16], che potrebbe rappresentare una svolta per le applicazioni precliniche e cliniche dello ^{47}Sc. L'energia ottimale del fascio in ingresso sullo spesso bersaglio multistrato si colloca nell'intervallo tra 35 e 30 MeV e si adatta molto bene alle caratteristiche del nuovo ciclotrone SPES installato a Legnaro.

E infine c'è il Terbio: la grande promessa teranostica

Il terbio offre un'ampia gamma di opportunità nel campo della medicina nucleare grazie a quattro radionuclidi di grande interesse clinico: ^{149}Tb, ^{152}Tb, ^{155}Tb e ^{161}Tb. Questi radionuclidi si distinguono per la loro versatilità, rendendoli particolarmente adatti alle applicazioni diagnostiche e terapeutiche. La loro caratteristica chiave risiede nel fatto di avere proprietà chimiche identiche tra loro. Ciò permette la sintesi di radiofarmaci con lo stesso comportamento farmacocinetico, semplificando il processo di ricerca e sviluppo farmacologico.

Dal lato terapeutico, ^{149}Tb è utilizzato nella terapia α mirata, grazie all'emissione di particelle α altamente energetiche e letali per cellule tumorali vicine, mentre ^{161}Tb si distingue per l'emissione di particelle β^- e di elettroni Auger, ideali per una terapia altamente localizzata delle cellule tumorali. In aggiunta, ^{152}Tb e ^{155}Tb si presentano come candidati promettenti per l'*imaging* diagnostico PET e SPECT, rispettivamente. Questo poker di radionuclidi rende la famiglia del terbio particolarmente adatta al principio dell'abbinamento teranostico. Numerosi studi preclinici e clinici hanno evidenziato il potenziale strategico del terbio nella lotta contro il cancro, offrendo nuove possibilità per trattamenti più efficaci e personalizzati [17].

D'altro canto, la produzione dei radionuclidi del terbio richiede tecnologie avanzate e l'uso di ciclotroni o reattori nucleari, e rappresenta una sfida logistica e tecnologica. In questo ambito, recentemente ci siamo concentrati sulla produzione di ^{155}Tb utilizzando fasci di protoni a bassa energia ottenibili con ciclotroni che si trovano frequentemente nei reparti di medicina nucleare degli ospedali. Il nostro lavoro si è mosso nell'ambito dei progetti di ricerca interdisciplinare REMIX (INFN) e APHRODITE-155 (PRIN-PNRR) e si è concentrato sulla caratterizzazione del bersaglio di ^{155}Gd per ottenere una qualità di ^{155}Tb adatta alle applicazioni mediche [18]. Attraverso accurate simulazioni degli effetti sul corpo umano della radioattività del terbio, abbiamo stabilito il livello di purezza minimo del

bersaglio di ^{155}Gd necessario per applicazioni mediche sicure e, sfortunatamente, tale limite è superiore alla purezza isotopica attualmente disponibile in commercio attraverso i fornitori specializzati. Questo risultato ha subito stimolato lo sviluppo di nuove tecnologie [19] per una produzione di bersagli di ^{155}Gd adatti per fornire il ^{155}Tb per la medicina nucleare, oltrettutto con una produzione realizzabile direttamente negli ospedali dotati di ciclotroni medicali.

Conclusioni

La combinazione della fisica nucleare teorica e dei dati nucleari è cruciale per ottimizzare la produzione di radionuclidi per applicazioni mediche. I modelli teorici permettono di prevedere le reazioni nucleari più promettenti, mentre i dati nucleari forniscono le informazioni empiriche necessarie per convalidare e perfezionare queste previsioni. La continua collaborazione tra teorici, sperimentatori e sviluppatori di tecnologie nucleari è fondamentale per migliorare la qualità e l'efficacia dei radionuclidi prodotti, aprendo la strada a nuove possibilità terapeutiche e diagnostiche nella medicina nucleare. L'uso sinergico di modelli e dati garantisce che le modalità di produzione forniscano radionuclidi di alta purezza e specificità, contribuendo significativamente all'avanzamento della medicina personalizzata e delle terapie mirate.

[1] N. Herrero Álvarez, D. Bauer, J. Hernández-Gil, J.S. Lewis: *Recent Advances in Radiometals for Combined Imaging and Therapy in Cancer.*, ChemMedChem, 16 (2021) 2909.

[2] *Live Chart of Nuclides* https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html

[3] PRISMAP https://www.prismap.eu/

[4] F. F. (Russ) Knapp, A. Dash: *Radiopharmaceuticals for Therapy*, Springer (India), New Delhi (2016).

[5] F. Barbaro, L. Canton, M.P. Carante, A. Colombi, L. De Nardo, A. Fontana, L. Meléndez-Alafort: *The innovative ^{52g}Mn for positron emission tomography (PET) imaging: Production cross section modeling and dosimetric evaluation.*, Med. Phys., 50 (2023) 1843.

[6] *IAEA medical radioisotope production* https://www-nds.iaea.org/medical/

[7] L. Canton, A. Fontana: *Nuclear physics applied to the production of innovative radiopharmaceuticals*, Eur. Phys. J. Plus, 135 (2020) 770.

[8] A. J. Koning, S. Hilaire, S. Goriely: *TALYS: modeling of nuclear reactions.*, Eur. Phys. J. A, 59 (2023) 131. https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-01034-3

[9] M. Herman, R. Capote, B.V. Carlson, P. Obložinsk'y, M. Sin, A. Trkov, H. Wienke, V. Zerkin: *EMPIRE: nuclear reaction model code system for data evaluation.*, Nucl. Data Sheets, 108 (2007) 2655. https://doi.org/10.1016/j.nds.2007.11.003

[10] T. T. Böhlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin, A. Fassò, A. Ferrari, P. G. Ortega, A. Mairani, P. R. Sala, G. Smirnov, V. Vlachoudis: *The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications.*, Nucl. Data Sheets, 120 (2014) 211. https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049

[11] J. Kleynhans, A. Duatti, C. Bolzati: *Fundamentals of Rhenium Radiopharmaceutical Chemistry*, Molecules, 28 (2023) 20.

[12] M. U. Khandaker, D. A. Bradley, H. Osman, M.I. Sayyed, A. Sulieman, M.R.I. Faruque, K.A. Naseer, A. M. Idris: *The significance of nuclear data in the production of radionuclides for theranostic/therapeutic applications.*, Radiation Physics and Chemistry, 200 (2022) 110342. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110342.

[13] G. Pupillo et al.: *Research on Emerging Medical radionuclides from the X-sections (REMIX): The Accelerator-based Production of ^{47}Sc, ^{149}Tb, ^{152}Tb, ^{155}Tb and ^{161}Tb*, J. Phys.: Conf. Ser., 2586 (2023) 012118. https://doi.org/10.1016/10.1088/1742-6596/2586/1/012118

[14] L. Mou, L. De Dominicis, S. Cisternino, F. Haddad, M. Campostrini, V. Rigato, J. Esposito and G. Pupillo: *Preliminary results of the theranostic ^{47}Sc cyclotron proton-induced production with enriched ^{48}Ti, ^{49}Ti and ^{50}Ti targets*, EPJ Web Conf., 292 (2024) 11001.

[15] F. Barbaro, L. Canton, Y. Lashko, L. Zangrando: *Optimized simulations of ^{50}Ti(p,α) and ^{49}Ti(d,α) reactions for hospital-cyclotron production of ^{47}Sc*, EPJ Web of Conferences, 292 (2024) 11002.

[16] L. Canton, F. Barbaro, L. De Dominicis, L. Mou, and G. Pupillo: *Metodo per produzione di Sc-47 ad alta purezza con ciclotroni ad energie intermedie (35 MeV) attraverso un bersaglio multistrato.* INFN Office for Technological Transfer, Patent application No.102023000018477, deposited 08/09/2023.

[17] C. Van Laere et al.: *Terbium radionuclides for theranostic applications in nuclear medicine: from atom to bedside.*, Theranostics, 14 (2024) 1720. https://doi.org/10.7150/thno.92775

[18] F. Barbaro, L. Canton, N. Uzunov, L. De Nardo, L. Meléndez-Alafort: *^{155}Tb production by cyclotrons: what level of ^{155}Gd enrichment allows clinical applications?*, EJNMMI Phys., 11 (2024) 26. https://doi.org/10.1186/s40658-024-00630-6

[19] M. Bouteculet et al.: *First production of pure ^{155}Gd targets and $^{155}Gd(p,x)^{155}Tb$, ^{156}Tb cross-section measurements*, Applied Radiation and Isotopes, 213 (2024) 111485.

Francesca Barbaro: si è specializzata nel campo della fisica applicata alla medicina nucleare, con un'attenzione particolare allo sviluppo di nuovi radionuclidi per terapie innovative. Dopo essersi laureata in Fisica Biosanitaria presso l'Università di Pavia, ha proseguito il suo percorso accademico come assegnista presso l'INFN, sezione di Padova, dove ha sviluppato simulazioni avanzate per ottimizzare la produzione e l'efficacia dei radiofarmaci. Ha conseguito un dottorato di ricerca presso l'Università di Pavia nel gennaio 2024, dedicandosi allo studio e all'ottimizzazione della produzione di radionuclidi come ^{47}Sc, ^{52g}Mn e ^{155}Tb, essenziali per la diagnostica e la terapia oncologica con un approccio teranostico. Attualmente, Francesca è assegnista di ricerca presso l'Università di Padova, dove si occupa della modellazione di reazioni nucleari e della dosimetria per radionuclidi emergenti. Ha all'attivo numerose pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali e un brevetto per la produzione di ^{47}Sc ad alta purezza tramite ciclotroni. Parallelamente alla ricerca, Francesca è fortemente impegnata nell'attività didattica. Ha tenuto corsi e seminari presso l'Università di Pavia in collaborazione con il Dipartimento di Fisica, insegnando sia a livello di laurea che di dottorato. Le sue materie spaziano dalla radiobiologia alla fisica applicata alla medicina. Ha inoltre partecipato a eventi di formazione scientifica e scuole internazionali, sia come discente sia come docente, arricchendo il suo percorso educativo attraverso esperienze di scambio e confronto.

Luciano Canton: è ricercatore senior presso la Sezione INFN di Padova. Ha iniziato la sua carriera di ricerca nel 1986 come borsista INFN, occupandosi di diffusione (scattering) quantistica e teoria delle reazioni nucleari. In seguito ha approfondito i suoi studi sui sistemi a pochi nucleoni alle basse energie. Successivamente, ha sviluppato la teoria e i modelli per i meccanismi produzione e assorbimento di pioni nei sistemi nucleari leggeri. Ha inoltre contribuito alle ricerche in fisica nucleare applicata. In particolare, nel campo dell'energia nucleare, con simulazioni teoriche dei flussi neutronici in acqua pesante, per la progettazione dei reattori CANDU avanzati, e nell'astrofisica nucleare, concentrandosi sulla nucleosintesi del litio nell'universo primordiale. Negli ultimi anni, Luciano si è concentrato sulla produzione di radionuclidi medicali, con particolare attenzione a radionuclidi innovativi teranostici e per la diagnostica multimodale, come ^{47}Sc, ^{155}Tb, ^{67}Cu e ^{52g}Mn. Il suo lavoro mira a migliorare i metodi di produzione di questi radioisotopi, fondamentali per le future applicazioni diagnostiche e terapeutiche in medicina nucleare. Ha ricoperto ruoli di professore a contratto presso l'Università di Padova e l'Università Ca' Foscari di Venezia, e di professore aggiunto dell'Università del Manitoba, Canada. Ha avuto incarichi di ricerca internazionali presso le Università del Connecticut, Maryland, Manitoba, Melbourne, e di collaborazione con l'Università di Graz (Austria) e il KIPT (Kharkiv Institute of Physics and Technology, Ucraina). Autore di più di 190 lavori a stampa fra articoli, monografie, atti di congressi, etc., ha coordinato progetti di ricerca a livello nazionale e locale. È stato valutatore di progetti di ricerca per Università e organismi di ricerca nazionali e internazionali, anche all'interno del Gruppo di Valutazione dell'INFN. Ha sempre dato molta importanza alla terza missione dei ricercatori e degli enti di ricerca, ovvero all'interazione degli stessi con la società e il mondo esterno, trasferendo conoscenze, tecnologie e cultura al di fuori dell'ambito strettamente accademico. Ha coordinato le attività di formazione professionale dell'INFN nel Veneto collaborando con gli enti del mondo produttivo e con la Regione Veneto. Ha partecipato in qualità di relatore a dibattiti pubblici e a conferenze nelle scuole superiori sulla fisica moderna e sulle tecnologie nucleari. Attualmente è impegnato anche nel trasferimento tecnologico delle conoscenze scientifiche acquisite, per amplificare l'impatto del proprio lavoro nella società.

Il trasporto di materiale radioattivo

Franco Cioce *TRITIUM s.r.l., san Giuliano Milanese (MI)*

Introduzione

Il trasporto è una attività che prevede lo spostamento di prodotti tra due luoghi e per questo motivo non è una attività compresa nei processi produttivi ma è considerata fine a sé stessa. D'altra parte è chiaro a tutti che trasportare un libro non ha le medesime implicazioni del trasporto ad esempio di un flacone di cianuro (prodotto molto pericoloso). Ed essendo sempre presenti nel mondo operativo di qualsiasi lavoro, merita la giusta protezione e considerazione proprio perché questa attività si svolge anche all'interno dei centri abitati o comunque su strade utilizzate dai comuni cittadini che nulla sanno di ciò che viene trasportato.

Anche il materiale radioattivo rientra nella casistica dei trasporti: ogni anno nel mondo si effettuano oltre 20 milioni di spedizioni di sorgenti radioattive all'interno dei paesi e oltre confine. Materiali che sono utilizzati quotidianamente nell'industria, nell'agricoltura e nella medicina, nonché nell'istruzione.

La radioattività, al pari della esplosività, è considerata come pericolosità di elevato livello e che prescinde dalle quantità da trasportare o presenti in una singola confezione. Ad esempio, i fumatori usano un accendino che contiene GPL (gas di petrolio liquefatto) e che in virtù del minimo quantitativo presente nell'accendino, può essere venduto e trasportato liberamente e senza alcun vincolo.

Per il materiale radioattivo non è così e la sua pericolosità non è proporzionale alla quantità: anzi! Spesso, nel caso del materiale radioattivo e dipendentemente dalle sue caratteristiche, i rapporti di massa tra la sorgente e il contenitore di trasporto sono superiori di 1:3000. Da qui, risulta intuitivo che i trasportatori devono a loro volta soddisfare tutti i requisiti richiesti dalla normativa vigente. E questa non è semplice né intuitiva, né di immediata comprensione, tanto da doversi ricercare in diversi ambiti legislativi:

- un decreto legislativo n. 101 del 2020 che regolamenta gli aspetti di radioprotezione a tutela dei lavoratori, dell'ambiente e della popolazione nel suo insieme;
- il regolamento ADR (vedi sotto) che appunto dispone nel merito delle condizioni di spedizione e trasporto delle merci pericolose comprese le sorgenti radioattive;
- il codice della strada che non ha necessità di chiarimenti;
- la legge 1860 del 1962 (impiego pacifico della energia nucleare);
- tutte le norme sotto forma di circolari, decreti-legge, linee guida, che vanno a saturare la già ampia disponibilità legislativa nel settore.

Storicamente, le prime disposizioni di legge le ritroviamo tra il 1959 e il 1960 ma gli aggiornamenti si susseguono sino ai giorni nostri. Benché il mondo non abbia mai conosciuto incidenti che

abbiano coinvolto il materiale radioattivo in fase di trasporto, e conseguentemente anche la popolazione ne è rimasta integra, la IAEA (Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica), ha pubblicato già nel 1960 il primo regolamento per il trasporto di materiale radioattivo. Un regolamento volto a uniformare in tutti i paesi le modalità di confezionamento, di imballaggio, di etichettatura ecc. dei colli prima della loro spedizione proprio con lo scopo di evitare anarchia operativa a fronte dell'elevato potenziale pericolo offerto da questo materiale radioattivo.

Tuttavia, il regolamento IAEA offre indicazioni di sicurezza esplicita per il trasporto in tutte le modalità conosciute: stradale, ferroviaria, marittima, aerea, navigazione interna. L'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite), che già dal 1957 ha proposto regolamenti di trasporto, ha raccolto le indicazioni della IAEA inserendole nei regolamenti modali redatti appunto dall'ONU:

- DGR (Dangerous Good Regulation) per il trasporto aereo;
- ADR (Agreement for transport of Dangerous goods by Road) per il trasporto stradale;
- RID (Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses) per il trasporto ferroviario;
- IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code ed è redatto dall'IMO - International Maritime Organization) per il trasporto navale e
- ADN (Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Voies de Navigation Intérieures) per il trasporto in Navigazione Interna.

In questo modo, ritroviamo nei cinque diversi regolamenti il denominatore comune a tutte le modalità di trasporto rappresentato dalla classificazione, imballaggio, etichettatura, documentazione di supporto, mentre è lasciato ad ogni singolo regolamento l'indirizzo da seguire per un corretto trasporto.

E dovendosi attenere e adeguare ai progressi scientifici, tecnologici, sociali e di sicurezza, i cinque diversi regolamenti si aggiornano secondo un proprio specifico programma (ad esempio ogni due anni per ADR) ma anche seguendo le modifiche, a volte di forma e a volte di contenuto, proposte da IAEA che invece si aggiorna secondo le necessità del panorama tecnologico e di mercato mondiale.

Ma ci sono anche sorgenti radioattive che devono essere smaltite e che devono essere trasportate in centri specializzati. In una struttura delimitata come può essere un ospedale o una azienda produttiva, il deposito e la conservazione in sicurezza di sorgenti radioattive è decisamente più facile da approntare attraverso i sistemi e le misure di sicurezza della struttura, nonché i suoi livelli di difesa.

Durante il trasporto, soprattutto su gomma (modalità stradale) le variabili operative si moltiplicano e coinvolgono necessariamente anche le persone del pubblico e le vetture che transitano accanto al veicolo che trasporta il materiale radioattivo: anche un minimo incidente come può essere un semplice tamponamento potrebbe comportare un blocco del traffico proprio per il timore generato dai cartelli (obbligatori) che il veicolo deve mostrare durante il trasporto.

Proprio per affrontare e risolvere questi aspetti, la IAEA ha pubblicato un regolamento [1] che indica i criteri di sicurezza da porre in essere partendo dalla classificazione di ciò che deve essere inviato al trasporto fino alla scelta del contenitore ideale e sul modo di segnalarlo.

Le Nazioni Unite hanno fatto proprie le indicazioni tecniche e scientifiche proposte da IAEA e hanno inserito nel regolamento ADR [2] (regolamento per il trasporto stradale in sicurezza di merci pericolose) i criteri di sicurezza modellandoli ed ampliandoli sulle realtà "urbane" (sosta del veicolo, equipaggiamento di sicurezza, informazioni alle autorità competenti, ecc.).

Siamo tutti ben consci che esistono trasporti che in funzione della natura o delle dimensioni o della pericolosità del materiale, vengono effettuati (soprattutto per il materiale radioattivo) con la scorta tecnica o delle forze dell'ordine proprio per garantire la sicurezza della delicata fase del trasporto: sicurezza rivolta anche agli avventori presenti sulla strada. Ma questo viene svolto in minima percentuale rispetto al mercato mondiale e non avviene, invece, per le piccole sorgenti radioattive che costituiscono la maggior parte dei trasporti e che vengono svolti con normali furgo-

ni. Sorgenti destinate all'industria, alla sanità e in misura minore, alla ricerca.

Quindi, le principali imposizioni rivolte a chi spedisce questa tipologia di materiale, sono quelle di utilizzare esclusivamente dei contenitori che devono rispondere ai requisiti di sicurezza o addirittura che devono essere omologati dalle Autorità che attestano la capacità di resistere alle maggiori condizioni accidentali. Contenitori [3] (chiamati "di tipo B") che possono contenere solo specifici elementi radioattivi e con attività (quantità) ben definite; contenitori che hanno una validità temporale limitata a 7 anni e che successivamente deve essere rinnovata per poter continuare ad utilizzarli.



Figura 1: Tipologie di contenitori di trasporto di tipo B

Questi contenitori hanno preliminarmente subìto prove di resistenza, immersione nell'acqua, esposizione al fuoco, caduta da diverse altezze, caduta di un oggetto appuntito e di peso definito sul contenitore in prova, ecc. Tutto questo per certificare che il contenitore è resistente anche alle sollecitazioni incidentali.

Possiamo così scoprire che dalla prima edizione del regolamento IAEA (1961) che stabiliva i criteri di sicurezza dei contenitori, sino a questa ultima edizione del 2018, aggiornata al progresso tecnico delle tipologie di attività svolte con i diversi radionuclidi conosciuti, l'applicazione della Regolamentazione IAEA ha consentito che le attività di trasporto delle materie radioattive siano state effettuate e continuino ad essere svolte con elevati livelli di sicurezza e di protezione dalle radiazioni.

Ne sia prova che in oltre sessanta anni di trasporti nel mondo non sono stati mai registrati eventi significativi in termini di esposizione dei lavoratori o della popolazione o di danni all'ambiente Ma per dare una dimensione ai criteri di sicurezza adottati si consideri che per traportare una piccola sorgente di iridio 192 utilizzata in ambito sanitario per la brachiterapia (Fig. 2) e che ha un peso complessivo di pochissimi grammi, si impiega un contenitore del peso di quasi 30 kg, proprio allo scopo di limitare quanto più possibile l'esposizione alle radiazioni del personale che movimenta questi contenitori [4].



Figura 2: Rapporto dimensionale tra una sorgente di ^{192}Ir per brachiterapia e una moneta.

Ma nel caso di materiale radioattivo più importante in termini di pericolosità, come può essere il cobalto (^{60}Co), normalmente impiegato nei centri di irraggiamento industriale per assicurare la sterilizzazione o la drastica riduzione della carica batterica su molti oggetti di uso sanitario ma anche quotidiano nella nostra vita, si impiegano invece contenitori che pesano dai 4500 ai 6000 kg e che possono contenere al massimo una decina di kg di cobalto.

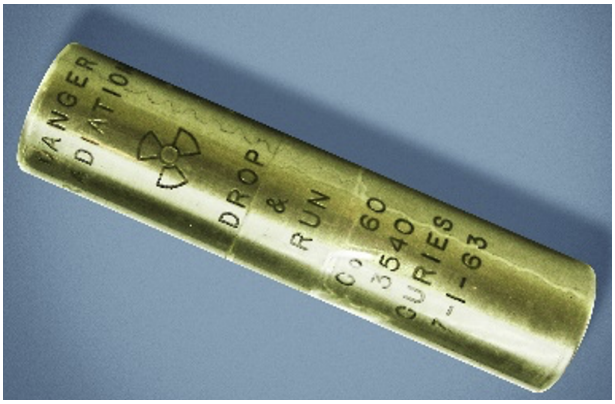


Figura 3: Barra di ^{60}Co. Il diametro della base del cilindro misura 3.05 mm.

La radiazione, si sa, ha la capacità di attraversare ampi spessori di materiale compreso il piombo e il cemento. Ma ovviamente questo non vale per

qualsiasi materiale radioattivo ma solo per alcuni radionuclidi che sono di particolare interesse per l'industria e la medicina. Le radiazioni di alcuni nuclidi possono essere fermate da un semplice foglio di carta (radiazione alfa) mentre altre sono in grado di attraversare anche 100 cm di cemento (radiazione X o gamma). Pertanto, maggiore è la capacità e intensità di attraversamento e maggiori saranno gli spessori necessari per ottenere un contenitore protettivo. Ma per quanto proteggano, non saranno quasi mai in grado di fermare completamente le radiazioni prodotte. O meglio, si potrebbe aumentare lo spessore e quindi il peso del contenitore, ma questo influirebbe poi sulla capacità di trasporto e di movimentazione. In poche parole, non si riuscirebbe a trasportare un simile imballaggio.

Quindi i regolamenti internazionali si fondano su criteri di accettabilità dei minimi valori di dose emergente dai contenitori e dei pericoli determinati dalle radiazioni, che con misure di sicurezza attive e passive, ma anche con comportamenti responsabili e adeguati, contribuiscono a garantire la sicurezza del trasporto sia per i lavoratori ma soprattutto per la popolazione [7].

La sicurezza dei trasporti viene affrontata non solo con adeguati contenitori di trasporto ma anche con specifica formazione che il personale di guida deve possedere. Molti paesi nel mondo che aderiscono applicando il regolamento ADR prevedono che gli autisti di veicoli trasportanti merci pericolose, seguano un corso di 15 giorni e si sottopongano ad un esame scritto a dimostrazione della conoscenza del regolamento stesso. Per trasportare materiale radioattivo occorre sostenere un esame addizionale proprio per la specificità dei pericoli di questa merce. Il Certificato di Formazione Professionale (meglio conosciuto come "patente ADR") così ottenuto dopo il superamento dell'esame deve essere rinnovato ogni cinque anni a dimostrazione della continua conoscenza del regolamento ADR (che viene a sua volta rinnovato ogni due anni) attraverso la ripetizione del corso di 15 giorni e dell'esame finale comprensivo della specialità del materiale radioattivo.

Ovviamente i documenti tecnici e legislativi che regolamentano la sicurezza dei trasporti delle sorgenti radioattive tengono anche conto delle molteplici realtà esistenti, spesso da molte persone non conosciute o non valutate. Ne siano di esempio tutti quegli oggetti o alimenti che contengono radioattività naturale proprio per la loro natura, senza che l'uomo abbia fatto nulla per introdurre questa radioattività. E con questi oggetti ci convive da sempre senza che questi abbiamo mai apportato problemi alla sua salute.

Si pensi alle banane o alle noci o a molti legumi che contengono il nuclide potassio 40 (^{40}K) che è naturalmente radioattivo. E si pensi anche alla bevanda per eccellenza, l'acqua che sgorga sorgiva dal terreno e dalle rocce e porta con sé invisibili e microscopiche quantità di elementi compreso l'uranio e il torio, radioattivi. Abbiamo sempre bevuto e continueremo a bere queste acque senza che questo comporti alcun danno alla nostra salute. Eppure i giornali e le cronache ci riportano diversi casi di furti di contenitore con le sorgenti al loro interno. In questi casi è doveroso analizzare, anche con l'aiuto di esperti, la veridicità delle notizie riportate sui media.

Sul sito web della IAEA vengono ripresi e descritti gli episodi di furto che possono comportare danni o pericoli alle persone: ad esempio tra il 2013 e il 2017 il Messico ha raggiunto il triste primato dei furti che hanno coinvolto le sorgenti radioattive. Queste sottrazioni non erano rivolte direttamente alla materia radioattiva (che abbiamo visto essere di minima dimensione e peso) ma al contenitore metallico: infatti, in tutti i casi descritti, i ladri non sapevano nulla del contenuto ma erano attratti dalla considerevole massa del contenitore che veniva sempre ritrovato presso commercianti di materiali e rottami metallici.

Purtroppo la radioattività, nelle persone che non hanno dimestichezza con questo argomento, genera diffidenza e timore non solo per le origini della sua conoscenza (bombe atomiche, incidenti nucleari, ecc.) ma anche per la peculiare invisibilità delle radiazioni: non si vedono, non si sentono, non odorano e non si possono avvertire se non attraverso specifica strumentazione. Fortunatamente, gli sforzi dei professionisti e delle Istituzioni di settore sono interamente proiettati alla sicurezza della popolazione, dei lavoratori e dell'ambiente.

Come per molte attività umane, soprattutto quando sono presenti pericoli e rischi per la salute e sicurezza delle persone, gli aspetti che possono creare condizioni che procurino danno alle

persone vengono affrontati in anticipo: nel caso del trasporto di apparecchi o sostanze che producono radiazioni ionizzanti, nessun aspetto viene nominalmente lasciato al caso e le condizioni di sicurezza considerano spesso:

- i percorsi stradali (si favoriscono in assoluto le strade di grande percorrenza cercando di evitare le gallerie stradali e limitando allo stretto indispensabile l'attraversamento delle strade cittadine),
- gli orari di transito del veicolo,
- le condizioni metereologiche previste durante il percorso,
- le condizioni di traffico in funzione degli orari di percorrenza,
- le ore di guida del personale (per evitare per quanto possibile che gli autisti debbano dormire a bordo del veicolo stesso quando viene trasportato carico),
- la pericolosità del materiale trasportato.



Figura 4: Autoarticolato (sopra) e furgone (sotto) per trasporto sorgenti radioattive.

Potrà quindi capitare a molti di noi di percorrere una strada pubblica e di incrociare un veicolo (furgone o autoarticolato) che espone un pannello rettangolare arancione frontalmente e posteriormente al veicolo e ulteriori pannelli posteriormente e sui lati del veicolo, col conosciuto simbolo delle radiazioni:

Il messaggio trasmesso attraverso i cartelli, obbligatorio in tutti i paesi secondo le indicazioni IAEA, è che il veicolo trasporta materiale radioattivo che presenta valori di attività (quantità) e di rateo di dose, che non possono essere trascurati ai fini della sicurezza della popolazione e dei lavoratori. Di regola, i contenitori ancorati al piano di carico del veicolo vengono collocati verso il fondo dello stesso pianale e quindi a considerevoli distanze dagli autisti in modo che la dose emergente che può raggiungere la cabina di guida sia più bassa per quanto ragionevolmente ottenibile. Anche se il rateo di dose (ossia valore di dose valutata su un'ora di esposizione) sulle pareti posteriori del veicolo può presentare valori superiori a quelle che si possono trovare nella cabina di guida, occorre considerare che i tempi di esposizione delle persone che transitano in prossimità del veicolo sono assolutamente differenti: gli autisti rimangono in cabina per tutto il tempo del viaggio (e a volte anche durante la sosta che dopo un certo periodo di guida devono obbligatoriamente osservare) mentre gli automobilisti che transitano in prossimità del veicolo (comunque a distanze di alcuni metri) passano a fianco in pochissimi secondi.

Dunque esistono e devono essere applicate molte regole per il trasporto del materiale radioattivo: ma abbiamo anche detto che la radioattività è riscontrabile ovunque; e quindi qualsiasi cosa debba essere trasportata è soggetta alle regole del trasporto in sicurezza? Ovviamente no: ma il problema nasce dal fatto che ogni volta che si associa il termine "radioattivo" a qualsivoglia attività od oggetto, il primo pensiero emozionale è legato al pericolo verso la propria ed altrui salute ed è quindi normale immaginare che la contrapposizione a qualcosa di radioattivo sia appunto la totale assenza di radioattività.

Ma come abbiamo già sostenuto, non è così. La radioattività uguale a zero è pressoché inesistente e valori seppur minimi e assolutamente non pericolosi, si trovano nella nostra quotidia-

nità, dall'acqua ai piatti in terracotta alla frutta. Lo stesso Paracelso (1493-1541), medico ed alchimista accusato di aver somministrato sostanze velenose ai propri pazienti, rispose alle calunnie sostenendo che:

> "Omnia venenum sunt: nec sine veneno quicquam existit. Dosis sola facit, ut venenum non fit."
> (Tutto è veleno, e nulla esiste senza veleno. Solo la dose fa in modo che il veleno non faccia effetto).

Un docente del Centro Studi Nucleari Enrico Fermi di Milano (CESNEF) asseriva e insegnava che se fosse vietato trasportare qualsiasi materiale radioattivo senza esserne autorizzati, allora sarebbe anche un reato portare un passeggero sulla propria vettura. Il motivo di questa paradossale affermazione è determinato dal fatto che le ossa degli esseri viventi contengono naturalmente il radionuclide ^{40}K: un individuo di circa 70 kg presenta una attività di circa 8000 Becquerel (Bq - unità di misura della attività del materiale radioattivo) di cui 5000 Bq costituiti appunto da ^{40}K.

Ma la radioattività quotidiana non si ferma alle ossa: un litro di latte presenta una attività di circa 100 Bq e un blocco di marmo da 10 kg ne presenta 10000 e un litro di acqua presenta valori che possono arrivare a 50 Bq mentre una banana può arrivare a 20 Bq e così via. Insomma, la radioattività uguale a zero non esiste!

Lo sanno benissimo le norme nazionali e internazionali che dispongono dei valori limite in termini assoluti (Bq) e di concentrazione (Bq/g) al di sotto dei quali "la radioattività può essere trascurata". Ma anche il regolamento ADR per il trasporto stradale di Merci Pericolose dispone delle esenzioni di merito per il materiale radioattivo, indicando anche in questo caso dei limiti di attività specifica (in Bq/g) e di attività totale (in Bq) che non devono essere superati per poter trasportare liberamente un oggetto o sostanza. Al di sotto di questi valori la radioattività non è considerata come tale e quindi la fase del trasporto non è in alcun modo regolamentata e le condizioni di pericolo non sono neppure considerabili. In questo caso, infatti, non vi sono obblighi di etichettatura o di tipologia di contenitore di trasporto da adottare o di equipaggiamento o di permessi di alcun tipo. Il trasporto in queste condizioni è assolutamente libero.

Ma il regolamento ADR elenca ulteriori casi particolari, a prescindere dai valori di attività e di concentrazione, in cui non si applicano le disposizioni dello stesso regolamento: queste sono così delineate:
a) materiale radioattivo che fa parte integrante dei mezzi di trasporto;
b) materiale radioattivo movimentato all'interno di uno stabilimento nel quale siano operanti altri appropriati regolamenti di sicurezza e dove la movimentazione non coinvolge strade o ferrovie pubbliche;
c) materiale radioattivo impiantato o incorporato in una persona o animale vivo a scopo diagnostico o terapeutico;
d) materiale radioattivo che si trova nell'organismo o sul corpo di una persona che deve essere trasportata per un trattamento medico dopo aver assorbito accidentalmente o deliberatamente materiale radioattivo o dopo essere stata contaminata;
e) materiale radioattivo contenuto in generi di consumo che hanno ricevuto un'approvazione da un ente regolatorio, a seguito della loro vendita al consumatore finale;
f) materie naturali e minerali contenenti radionuclidi presenti in natura (es. i mattoni di tufo o il granito e il marmo);
g) oggetti solidi non radioattivi per i quali le quantità di materiali radioattivi presenti su una qualunque superficie non superano il limite indicato nella definizione di "contaminazione".

Un identico discorso di estremo criterio di sicurezza viene espresso per i rifiuti radioattivi: a differenza dei rifiuti costituiti da merci pericolose diverse dal materiale radioattivo, e per le quali esistono condizioni di agevolazione ai fini dello smaltimento e vengono chiaramente identificati dalle materie prime, nel caso dei rifiuti contenenti elementi radioattivi, questi non vengono in alcun modo differenziati ai fini del trasporto, dalle sorgenti radioattive in uso.

Indubbiamente per questi ultimi residui, devono essere osservati ed applicati i criteri di sicurezza per la popolazione, i lavoratori e l'ambiente, indicati nei disposti legislativi di ogni paese, ma ai fini della loro spedizione e trasporto si deve far riferimento solo ai criteri propri del regolamento

ADR. La IAEA, che rappresenta una delle tante organizzazioni gestite dall'ONU, richiede in modo sempre più dettagliato e pressante che la garanzia della sicurezza venga sviluppata da tutti gli operatori interessati, con assoluta priorità.

Curiosamente, nella prima edizione di questo regolamento tecnico, la parola "*waste*" compariva una sola volta e a titolo di esempio, mentre nell'ultima edizione del 2018 la ritroviamo 9 volte ma principalmente associata a comitati o ai generici criteri di sicurezza da operare allorché venga trasportato materiale radioattivo o rifiuti.

Questa procedura che si discosta dal comune approccio (comunque non semplice) per lo smaltimento dei rifiuti speciali pericolosi e non, è ben consapevole che la gestione dei rifiuti radioattivi richiede impianti di elevata sicurezza e professionalità espressamente riconosciute. Se per i rifiuti convenzionali, un certificato analitico può aiutare a stabilire contaminanti e loro concentrazioni e conseguentemente i codici di pericolo da riportare sui documento di trasporto, coi rifiuti radioattivi si dovrà modificare il metodo di classificazione.

La definizione di rifiuto radioattivo è la seguente [5]:

> "rifiuti radioattivi: qualsiasi materia radioattiva in forma gassosa, liquida o solida, ancorché contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, per la quale nessun riciclo o utilizzo ulteriore è previsto o preso in considerazione dall'autorità di regolamentazione competente o da una persona giuridica o fisica la cui decisione sia accettata dall'autorità di regolamentazione competente e che sia regolamentata come rifiuto radioattivo dall'autorità di regolamentazione competente"

mentre lo smaltimento è definito come [6]:

> "la collocazione di rifiuti radioattivi o di combustibile esaurito, secondo modalità idonee, in un impianto autorizzato senza intenzione di recuperarli successivamente"

Il "glossario IAEA" [8] del 2022 è poco meno generico in quanto richiama un minimo concetto di "esenzione":

> "For legal and regulatory purposes, material for which no further use is foreseen that contains, or is contaminated with, radionuclides at activity concentrations greater than clearance levels as established by the regulatory body.." (Per scopi legali e normativi, il materiale per il quale non è previsto un ulteriore utilizzo che contenga, o sia contaminato da, radionuclidi a concentrazioni di attività superiori ai livelli di esenzione stabiliti dall'ente regolatore.)

È molto importante, nell'osservanza dei disposti legislativi ed autorizzativi stabilire se si tratta di un vero e proprio smaltimento piuttosto che di un conferimento a diverso titolo.

Consideriamo l'esempio di una sorgente di ^{63}Ni da 555 MBq contenuta in un ECD (electron Capture Detector) di un comune gascromatografo: la necessità di procedere alla sua sostituzione o alienazione deve essere valutata anche dalla condizione giuridica del "ricevente". Se si intende procedere allo "smaltimento", allora occorre accertarsi attraverso acquisizione documentale che la Società ricevente a cui è destinata la sorgente sia soggetto autorizzato ad operare appunto il ricevimento e lo smaltimento di rifiuti radioattivi. In questo caso la documentazione che accompagnerà il rifiuto così definito dovrà essere conforme alle necessità della stessa Società che riceverà il rifiuto oltre ad essere integrata dalle informazioni richieste dal regolamento ADR. Diversamente si potrà optare per la "restituzione" (sempre previsto da un accordo contrattuale stabilito in precedenza già in fase di fornitura – è ovvio che la "restituzione" non potrà essere operata ad una Società diversa) in quanto per alcune sorgenti radioattive è previsto un possibile riutilizzo anche determinato dalla lunga vita media del radionuclide. In quest'ultimo caso, la documentazione accompagnatoria sarà solo quella espressamente prevista dal regolamento ADR e dalla legge del paese ove avviene il trasporto (documento di trasporto). In ambito comunitario occorre possedere il documento conosciuto come "modulo EURATOM 1493/93" [9] sul quale sono riportate asseverazioni delle Autorità competenti circa la possibilità di ricevere quella sorgente radioattiva o quel rifiuto.

È dunque abbastanza intuitivo che per il regolamento ADR è indifferente spedire rifiuti o materiale diverso dai rifiuti. Addirittura, non occorre neppure indicarne la natura sul documento di trasporto. Se per i rifiuti speciali grazie a quanto indicato in precedenza è possibile limitare l'indagine valutativa alla, o alle, classi di pericolo di appartenenza attribuendo il grado di pericolo peggiore (molto pericoloso) con i rifiuti radioattivi questo non è possibile. È indispensabile conoscere a priori:

- il radionuclide,
- la sua attività ad una data certa di riferimento,
- la sua forma fisica,
- l'eventuale stato di forma speciale o meno,
- la condizione di radionuclide fissile,
- la categoria di trasporto.

Il solo fatto di attivare il contatore Geiger non è condizione sufficiente per considerare e spedire un rifiuto come radioattivo. Nel caso, non poco probabile, di una miscela di radionuclidi, nel calcolo dei valori limite si deve dunque tenere conto della formulazione proposta dallo stesso regolamento ADR. Nella pratica quotidiana si tratta di valutare la frazione di ogni radionuclide che compone la miscela e rapportarla ai limiti che dovranno essere calcolati *ex novo*.

Un collo contenente materiali radioattivi può essere classificato come collo esente (ossia il trasportatore è esentato da poche e minori condizioni di obblighi amministrativi) a condizione che l'intensità d'irraggiamento in ogni punto della superficie esterna non superi 5 μSv/h. Il collo trattenga il suo contenuto nelle condizioni regolari di trasporto. Il collo rechi l'indicazione "RADIOATTIVO" su una superficie interna, in modo tale che sia segnalata la presenza di materiale radioattivo all'apertura del collo; oppure sulla superficie esterna, qualora sia impossibile marcare una superficie interna.

Oppure per oggetti troppo piccoli per recare la marcatura "RADIOATTIVO", a condizione che essi vengano trasportati in un collo recante l'indicazione "RADIOATTIVO" sulla sua superficie interna, in modo che l'avvertimento della presenza di materiale radioattivo sia visibile all'apertura del collo; in definitiva, per trasportare qualsiasi oggetto o sostanza che presenti il fenomeno della radioattività occorre uniformarsi e rispettare integralmente le condizioni di assoluta sicurezza dettate dai regolamenti di esercizio, allo scopo di garantire la salute dei lavoratori e della popolazione [10].

La normativa applicabile

Dunque il regolamento IAEA viene integrato nei 5 regolamenti modali dell'ONU e alcuni di questi (ADR, ADN, RID) sono riconosciuti in Italia come disposti legislativi ai quali devono uniformarsi e rispettare chiunque spedisce, trasporta e riceve materiale radioattivo. Già la prima importante legge italiana numero 1860 del 1962 disponeva l'obbligo di effettuare il trasporto del materiale radioattivo a fronte del possesso di un decreto di "Vettore Autorizzato" rilasciato dal Ministero competente previa presentazione di documentata istanza. Ma la legge citata consentiva la possibilità di effettuare trasporti "Singoli ed Occasionali" in assenza del possesso del decreto di Vettore autorizzato e nel rispetto di precisi limiti quantitativi secondo il radionuclide che si voleva trasportare. Con la pubblicazione del Decreto Legislativo 101/20, questa possibilità è stata interamente cancellata. Analizziamo allora nel dettaglio quanto richiesto dalla normativa vigente al 2024.

Regolamento ADR

Occorre presentare istanza per ottenere decreto di vettore autorizzato al Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica - Dipartimento energia (ex MISE, ex MITE, ex MICA...) e in copia a Ministero dell'interno e a ISIN (Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare) precisando da subito se il trasporto è da intendersi "conto proprio" (per il trasporto delle proprie sorgenti per le quali occorre anche possedere specifico nulla osta prefettizio o autorizzazione ministeriale) oppure "conto terzi".

La IAEA, attraverso i regolamenti pubblicati ed aggiornati sin dal 1960, ha proposto la classificazione del materiale radioattivo sulla base della capacità protettiva dei contenitori in termini di

esposizione radiologica e di resistenza alle diverse e sempre più gravi sollecitazioni fisiche (fino a simulare la caduta di un collo da un aereo in fase di decollo o atterraggio. Le classificazioni sono codificate in forma numerica (Numero ONU) e possono identificare, con crescente livello di pericolosità fisica e biologica del contenuto:

- colli esenti,
- materiali radioattivi di debole attività specifica,
- oggetti contaminati superficialmente,
- collo di tipo A,
- collo di tipo B(U),
- collo di tipo B(M),
- collo di tipo C,
- accordo speciale,
- esafluoruro di uranio.

I veicoli che si vogliono impiegare per trasportare il materiale radioattivo devono possedere requisiti di sicurezza che garantiscano l'inviolabilità del materiale vincolato a bordo e assicurare nel contempo la protezione del personale viaggiante e soprattutto della popolazione.

Dovrà inoltre essere notificata la disponibilità di un locale di decontaminazione ovvero di un accordo contrattuale con un soggetto in possesso di un simile locale che garantisca la sua disponibilità in caso di necessità ossia nel caso in cui il veicolo risulti contaminato da radioattività.

È palese che deve anche essere prodotto un documento che descriva le modalità di decontaminazione che devono essere svolte e da chi. A tal proposito è importante indicare la capacità professionale degli attori coinvolti in questa procedura operativa.

È necessario quindi far valutare una stima dei nuclidi trasportabili con un valore massimo di attività (in Bq o multipli) e di indice di trasporto (corrispondente al massimo rateo di dose misurato ad un metro di distanza da qualsiasi punto della superficie del collo). È bene ricordare che nel caso del confezionamento del materiale radioattivo, a differenza delle altre merci pericolose, la quantità (attività espressa in Bq o suoi multipli) e il radionuclide da avviare al trasporto, fanno la differenza.

Per chiarire: spedire 20 litri di metanolo (merce pericolosa della classe ADR 3) o 40 litri, non modifica la tipologia (Codifica di omologazione) di contenitore ed etichettature necessaria all'imballaggio. Non è così per il materiale radioattivo poiché ogni radionuclide emette radiazioni corpuscolari e/o elettromagnetiche differenti e queste posseggono energie che possono arrivare a valori di milioni di elettronvolt. Un esempio:
1) 1 GBq di ^{251}Cf (californio 251), che decade emettendo particelle α di 6.17 MeV, richiede un contenitore di tipo B (U) o B(M);
2) 1 GBq di ^{26}Al (Alluminio-26), che decade β^+ emettendo positroni di circa 5 MeV, richiede un contenitore di tipo A;
3) 1 GBq di ^{3}H (Trizio), che decade β^- emettendo elettroni di 18 keV, richiede un contenitore di tipo "esente".
Quindi non esiste una diretta corrispondenza tra nuclide e contenitore ma ogni volta deve essere valutato sulla base delle limitazioni imposte dai regolamenti tecnici, limitazioni che riguardano ogni singolo radionuclide.

Ma anche il valore di indice di trasporto può sensibilmente modificare la tipologia di imballaggio necessario. Tutte considerazioni che il soggetto richiedente, e per lui il consulente ADR e l'Esperto di Radioprotezione, deve inglobare nelle relazioni tecniche da presentare a corredo dell'istanza autorizzativa. Nelle stesse relazioni tecniche richieste ai due professionisti citati, dovranno essere proposti anche le valutazioni di incidente coinvolgente il materiale radioattivo e il possibile danno alla popolazione, all'ambiente e ai possibili lavoratori coinvolti.

Va da sè che, maggiore è la pericolosità in termini di attività e radiazione e maggiore è la protezione che si deve ottenere e quindi anche le masse dei contenitori diventano tali da non poter essere trasportati se non con l'ausilio di gru e di veicoli con elevate capacità di portata.

Nel caso di trasporto conto terzi non avendo conoscenza preliminare di ciò e quanto che potrebbe essere trasportato e bene porsi nelle condizioni peggiori, ma realistiche, del trasportabile. Ad esempio un contenitore di tipo B(U) o B(M) con una massa di 6000 kg non potrà certamente essere caricato su un furgone! Diversamente,

la medesima tipologia di contenitore usato per irraggiamenti industriali (CND - controlli non distruttivi) possono sicuramente essere caricati in pezzi multipli (massa compresa tra 10 e 150 kg cadauno) sullo stesso furgone ma l'attività in gioco è decisamente ridotta di un fattore 2 rispetto al primo esempio. Sulla base di queste valutazioni si dovrà decidere l'equipaggiamento di bordo oltre a quello di base previsto dal regolamento ADR.

Circolare del Ministero dei Trasporti n. 162/1996

Infatti, anche la (molto vecchia) circolare 162 del 1996 dispone in tal senso indicando gli attrezzi che devono risultare a bordo del veicolo per affrontare i diversi possibili casi incidentali.

Uno strumento che non troviamo negli elenchi dell'equipaggiamento richiesto è un rilevatore di radiazioni che può essere anche un semplice ed economico Geiger-Muller. Il compito dell'autista del veicolo non è certo quello di verificare i dati di rateo di dose espressi dalla etichetta applicata al collo o dell'indice di trasporto eventualmente riportato sulla stessa, ma dovrà sicuramente avviare le azioni che devono portare alla messa in sicurezza del collo contenente il materiale radioattivo che è stato coinvolto nell'incidente: la capacità di valutare in prima istanza se c'è contaminazione diffusa ovvero il cordone sanitario da creare per impedire l'avvicinamento di curiosi o di persone non addette ai lavori, non può avere luogo senza uno strumento che sia almeno in grado di confermare la presenza o meno di un campo di radiazioni. La formazione del lavoratore (autista) deve quindi comprendere anche il corretto utilizzo (e valutazione dei risultati) di un simile strumento che sarebbe opportuno facesse parte dell'equipaggiamento di servizio.

Lo scopo iniziale della circolare citata era di definire le prescrizioni di sicurezza relative al trasporto nazionale ed internazionale su strada delle materie radioattive. Purtroppo, la circolare è ancora oggi affetta dall'errore di essere vincolata ad una edizione dei regolamenti di trasporto (ADR e IAEA), che non esistono più proprio perché periodicamente aggiornati.

Anche la normativa italiana è stata ulteriormente aggiornata e gli articoli della Legge 1860/62 e del Decreto Legislativo 230/95 sono stati abrogati e riproposti (in diversa forma e contenuto) nel Decreto Legislativo 101/20. Tuttavia, la circolare 162/96 conserva ancora la sua validità applicativa ed è un valido riferimento per tutti coloro che intendono svolgere attività di trasporto delle merci pericolose della classe ADR 7, potendo così riassumere in sintesi i comportamenti da assumere sia durante le fasi di trasporto, sia nei casi incidentali.

Nella circolare sono anche indicati i requisiti che deve possedere un veicolo per essere adibito al trasporto stradale di materiale radioattivo:
a) la cabina di guida deve essere separata dal vano di carico con una parete rigida e continua
b) il vano di carico deve essere costituito da carrozzeria chiusa o di tipo equivalente (es. cassone con centinatura di sufficiente robustezza e telone ignifugo) sufficientemente areata
c) non è consentito l'uso di carrozzerie ribaltabili e o scarrabili.

Anche i veicoli utilizzati per il trasporto di materie radioattive in quantità non superiori ai limiti di esenzione previsti dal regolamento ADR dovranno corrispondere anche essi ai requisiti sopra specificati ed alla tipologia indicata negli specifici punti della circolare, tuttavia, dover essere sottoposti a visita e prova per accertarne l'idoneità al trasporto.

È auspicio dei diretti interessati, degli Esperti di Radioprotezione e dei Consulenti ADR che la circolare 162/96 venga rivista e aggiornata alle esigenze in continua evoluzione dei regolamenti modali, senza vincolarsi nuovamente a leggi e regolamenti che per loro natura subiscono periodiche modifiche e in modo che diventi uno strumento di costante consultazione ove trovare risposte adeguate per rispettare i dettami di una normativa di non facile comprensione ed attuazione.

[1] IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1): *Specific Safety Requirements - Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, edition 2018 - STI/PUB/1798 ¦ 978-92-0-107917-6.

[2] *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road* (ADR 2023) - ECE/TRANS/326 - ISBN: 978-92-1-139211-1 (English)

[3] IAEA Safety Standards Series No. SSG-66 - Specific Safety Guide - *Format and Content of the Package Design Safety Report for the Transport of Radioactive Material* STI/PUB/1980 ¦ 978-92-0-141321-5 - Date published: 2022

[4] Franco Cioce: *Classificazione, spedizione e trasporto su strada di materiale radioattivo,* Ars Edizioni Informatiche - EAN: 9788889260890 - ISBN: 8889260890, Milano (2021).

[5] Decreto Legislativo 101/2020, art. 7 nota 124.

[6] Decreto Legislativo 4 marzo 2014, n. 45.

[7] IAEA Safety Standards Series No. SSG-26 (Rev. 1) - Specific Safety Guide *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* (2018 Edition) - STI/PUB/1953 - 978-92-0-119021-5 - Date published: 2022.

[8] IAEA Nuclear Safety and Security Glossary *Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response* (Interim) Edition (2022).

[9] Regolamento (Euratom) n. 1493/93 del Consiglio, dell'8 giugno 1993, sulle spedizioni di sostanze radioattive tra gli Stati membri (OJ L 148 19.06.1993, p. 1, ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/1993/1493/oj).

[10] IAEA Safety Standards Series No. SSG-65 - Specific Safety Guides: *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency Involving the Transport of Radioactive Material* English STI/PUB/1960 ¦ 978-92-0-127521-9 (2022).

Franco Cioce: è esperto di Radioprotezione; Consulente ADR/RID/ADN; Membro del "Comitato Materie Fissili e Radioattive" - Centro Comune di Ricerca JRC di Ispra – Commissione Europea; Curatore del Museo della Radioattività; Docente ai master di Radioprotezione Università di Pavia, Università La Sapienza, Università di Tor Vergata.

Rifiuti radioattivi: parliamone, senza pregiudizi nè guerre di religione

Safety: proteggere le persone dal radwaste.
Security: proteggere il radwaste dalle persone.
Safeguards: prevenire la proliferazione di armi nucleari

Paolo Finocchiaro *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy*

Quando in Italia si parla di rifiuti radioattivi emergono tante paure e pregiudizi, quasi sempre per insufficiente conoscenza di concetti di base e di informazioni puntuali, a volte purtroppo anche per malafede. Molto spesso le argomentazioni scientifiche sono ignorate o vengono travisate, sull'onda di paure mai sopite e puntualmente evocate dalla parola "nucleare". In questo contributo proverò ad esporre una serie di concetti che spero possano essere utili ai meno esperti per chiarire alcuni capisaldi, indispensabili per la comprensione della problematica legata all'esistenza, produzione, gestione e smaltimento dei rifiuti radioattivi, che con un anglicismo divenuto di uso comune vengono spesso denominati come *radwaste*. In alcuni casi, per amor di chiarezza sarò costretto a ricorrere a delle semplificazioni, sacrificando un po' il rigore all'efficacia della comunicazione. Mostrerò infine alcuni recenti sviluppi della ricerca sui sistemi di monitoraggio radiologico di tali rifiuti, condotti nell'ambito di progetti europei e volti alla modernizzazione delle tecnologie ed all'informatizzazione dei processi.

Nuclei atomici

Per poter affrontare il tema oggetto di questo articolo è necessario chiarire alcuni concetti e definizioni ad esso propedeutici legati alla radioattività. Il nucleo atomico è costituito da protoni e neutroni legati assieme da una forza attrattiva

detta interazione nucleare forte [1]. I protoni sono dotati di carica elettrica positiva, i neutroni, come dice la parola stessa, sono elettricamente neutri. La forza nucleare forte a breve distanza supera in intensità la forza elettrica (detta di Coulomb o coulombiana) che tra cariche dello stesso segno è repulsiva e che tenderebbe a disgregare il nucleo a causa della repulsione tra i protoni. Il nucleo è quindi dotato di carica elettrica positiva e naturalmente attira attorno a sè un numero di elettroni pari al numero di protoni, e come conseguenza l'atomo nel suo complesso risulta neutro. Difatti la carica elettrica dell'elettrone è negativa, uguale ed opposta a quella del protone.

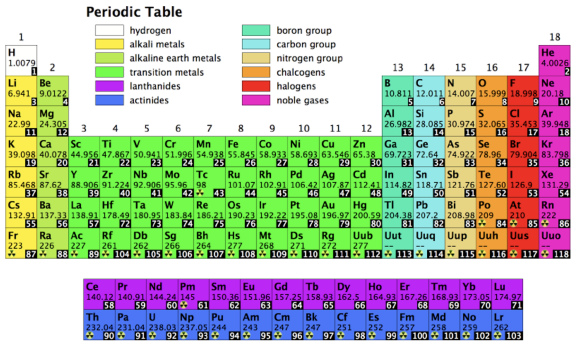


Figura 1: Tavola periodica degli elementi

Per ragioni nelle quali non mi addentro, gli elettroni si dispongono a notevole distanza dal nucleo, basti pensare al caso dell'idrogeno, l'elemento più semplice in natura costituito semplicemente da un protone ed un elettrone. In tale caso il protone ha un raggio di circa 1×10^{-15} metri (0.000000000000001) mentre l'elettrone si dispone in una regione a distanza di 0.5×10^{-10} metri. Sebbene si tratti di numeri piccolissimi vale la pena di osservare che tale distanza è $\approx$ 45000 volte il raggio del protone, come dire che se il protone fosse un pallone da calcio l'elettrone si troverebbe ad oltre 5 km.

Esistono in natura molte specie nucleari, che vengono catalogate tramite due numeri:

- Z, il numero di protoni che determina le proprietà chimiche;
- A, il numero di nucleoni, cioè il totale di neutroni più protoni detto anche numero di massa;

[1] Esiste un'altra forza nucleare, detta debole perché molto meno intensa di quella forte e responsabile del decadimento radioattivo β.

e si usa scrivere ${}^{A}_{Z}X$ dove X è il simbolo della specie chimica (ridondante, in quanto essa è già determinata dal numero Z). Ad esempio, ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ indica il nucleo di elio, che ha quattro nucleoni e cioè due protoni e due neutroni, mentre ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ indica un nucleo dell'uranio con 238 nucleoni di cui 92 sono protoni. Spesso il numero Z viene omesso, in quanto corrispondente al simbolo dell'elemento chimico. Ad esempio si trova scritto ${}^{16}\mathrm{O}$ dove il numero 8 dello Z viene omesso in quanto $Z = 8$ implica univocamente l'ossigeno.

Sulla terra, in natura, esistono 92 specie chimiche (elementi), cioè con Z che va da 1 (idrogeno) a 92 (uranio) e che sono notoriamente riportate sulla tavola degli elementi (Figura 1). Ciascuna combinazione dei numeri A e Z determina una diversa specie nucleare, ma non tutte le combinazioni sono fisicamente possibili. A parità di Z ciascuno dei 92 elementi chimici può presentarsi con differente numero di neutroni, e quindi numero di massa. In tal caso si parla di isotopi. L'idrogeno, ad esempio, ha due isotopi: il deuterio ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ ed il trizio ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, che vengono anche denominati D e T con un loro simbolo specifico. Così non è per tutti gli altri isotopi per i quali si utilizza la notazione poc'anzi descritta.



Figura 2: Oggetti in una scatola, che si possono riarrangiare in una configurazione più conveniente.

Radioattività

Le specie nucleari note sono circa 1700, delle quali circa 300 sono stabili mentre le rimanenti 1400 sono radioattive. Ma cosa significa stabili o radioattive? Per chiarire questo importante con-

cetto ricorriamo ad un esempio metaforico. Immaginiamo di aver riposto degli oggetti in una scatola (Figura 2) in una certa configurazione, e poi trovare che disponendoli diversamente si ottiene una configurazione più conveniente. Bene, questo è quel che accade con i nuclei atomici, per i quali la convenienza di una configurazione dipende dall'energia. In natura tutti i sistemi tendono all'equilibrio in configurazioni di minima energia (e non sempre ci riescono).

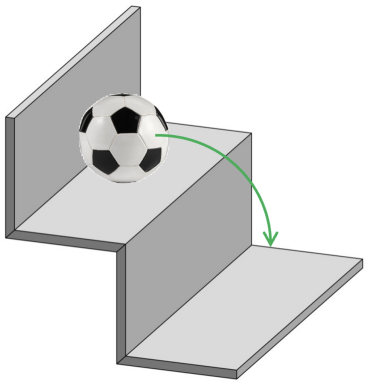


Figura 3: Una palla su uno scalino può trovare una configurazione più conveniente sullo scalino inferiore.

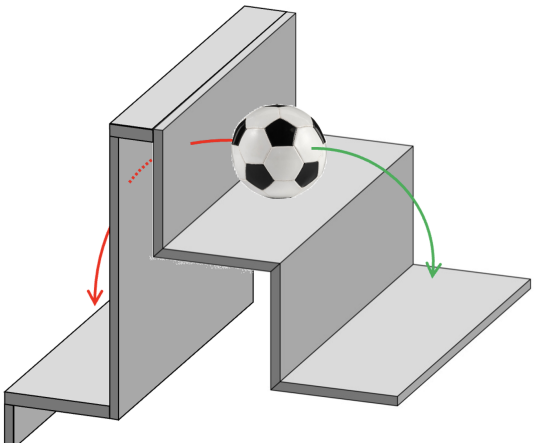


Figura 4: Esempio di una configurazione più conveniente ma non raggiungibile (freccia in rosso) per l'esistenza di una barriera. Nel mondo microscopico tali transizioni, in certe condizioni, sono possibili.

Come valutare la maggiore o minore convenienza energetica di una configurazione? Basta esaminare la massa. La celebre relazione massa-energia di Einstein, $E = mc^2$, permette di calcolare l'energia totale di un nucleo conoscendone la massa e moltiplicandola per il quadrato della velocità della luce c (3×10^8 m/s). Tale uguaglianza ci permette di esprimere la massa sia in chilogrammi che in unità di energia. In fisica nucleare risulta assai più comoda la seconda, e quindi la massa delle particelle viene usualmente espressa in MeV (mega-elettron-volt). Il numero di massa A, moltiplicato per la massa di un protone (938.3 MeV) o di un neutrone (939.6 MeV), fornisce la massa di un nucleo con una discreta approssimazione. Non entro nel dettaglio di come misurare sperimentalmente la massa dei nuclei, ma qui basti sapere che la massa di un nucleo è minore della somma delle masse dei suoi costituenti liberi. La differenza tra la massa dei costituenti e quella del nucleo legato è detta difetto di massa e rappresenta la cosiddetta energia di legame. Quindi la configurazione del nucleo legato è più conveniente rispetto a quella di tutti i suoi costituenti liberi, in virtù di una energia totale inferiore.

Una palla lasciata su uno scalino è in configurazione di equilibrio, ma una perturbazione dell'equilibrio può far sì che la palla trovi una configurazione più conveniente sullo scalino inferiore (Figura 3). In molti casi una configurazione più conveniente esiste ma non è raggiungibile, come si vede in Figura 4. Alle dimensioni microscopiche, regolate dalla meccanica quantistica, però accade qualcosa di molto particolare: configurazioni apparentemente non raggiungibili possono essere ugualmente raggiunte tramite un effetto noto come effetto tunnel. È come se la palla di Figura 4 passasse attraverso un tunnel nella barriera che la separa dal gradino di sinistra e lo raggiungesse. Per oggetti macroscopici la probabilità di un tale evento è incredibilmente bassa (a tutti gli effetti pratici zero), mentre alle dimensioni dei nuclei ciò può accadere ma in funzione dell'altezza e dello spessore della barriera.

I nuclei atomici stabili si trovano nella configurazione più conveniente alla luce di barriere troppo ardue da superare. I nuclei instabili, di contro, sono in configurazioni tali che la barriera da superare per andare a una configurazione più conveniente non è proibitiva. Tale transizione è detta decadimento, e a differenza del caso della palla per essa non è necessaria alcuna perturbazione esterna: i nuclei instabili decadono spontaneamente per pure ragioni statistiche.

La stabilità di una configurazione dipende dalla consistenza della barriera, e di conseguenza

più una configurazione è instabile e più il suo decadimento statistico sarà probabile. Dunque,

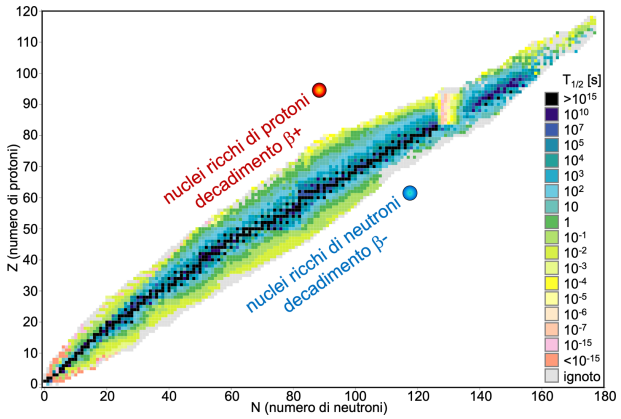


Figura 5: Tempo di dimezzamento (in secondi) in funzione del numero di protoni e del numero di neutroni, per tutte le specie nucleari note. In nero le specie stabili.

data una popolazione di nuclei instabili, la frequenza di decadimento (cioè il numero medio di decadimenti nell'unità di tempo) sarà grande. L'inverso di tale frequenza è il tempo medio per un decadimento, denominato **vita media**. Dalla vita media è facile calcolare (ma non lo faremo qui) il tempo di dimezzamento, che è il tempo necessario perchè data una popolazione di una specie instabile ne decada la metà. Tale tempo non dipende dal numero di nuclei presenti ma è una costante della specie nucleare in questione. Il grafico di Figura 5 riporta il tempo di dimezzamento (in secondi) in funzione del numero di protoni e del numero di neutroni per tutte le specie nucleari note. Le caselle nere rappresentano nuclei stabili o con tempi di dimezzamento superiori a 10^{15} secondi (circa 31.7 milioni di anni).

Ma cosa accade quando un nucleo instabile decade? Il nucleo instabile si dispone in una configurazione energeticamente più conveniente (maggior stabilità) liberandosi al contempo di una piccola parte della sua energia. Come? Emettendo particelle e/o radiazione elettromagnetica.

Ma esaminiamo più in dettaglio queste emissioni che conseguono ad una ottimizzazione della configurazione energetica dei nuclei (Figura 6). I nuclei, in particolare quelli molto massicci (A $\geq$180), possono emettere una **particella alfa**, che altro non è che un nucleo di elio ($^4_2$He), che porta via quattro nucleoni (due protoni e

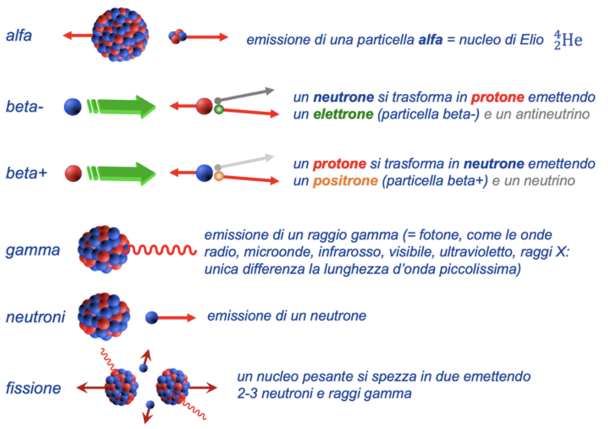


Figura 6: Le principali tipologie di decadimento radioattivo.

due neutroni) ed una quantità di energia cinetica (cioè energia di movimento). Parte della massa del sistema si trasforma dunque in energia cinetica, e la somma delle masse del nucleo residuo e della particella alfa è inferiore a quella del nucleo iniziale, cosa che rende la configurazione finale energeticamente più conveniente.

Un altro decadimento è il cosiddetto **beta**, che può essere di tipo negativo o positivo. Nel primo caso, β^- , per raggiungere una configurazione di maggior stabilità il nucleo trasforma un suo neutrone in un protone tramite l'emissione di un elettrone (e di un antineutrino, del quale non tratterò in quanto ininfluente per questa trattazione). Nel caso del decadimento β^+ si ha invece la trasformazione di un protone del nucleo in un neutrone, con l'emissione di un positrone (che è l'antiparticella dell'elettrone, cioè un elettrone con carica positiva) e di un neutrino.

Il decadimento gamma consiste nell'emissione di un pacchetto di radiazione elettromagnetica, in tutto e per tutto simile alle microonde, alla luce visibile o ai raggi X, ma di frequenza, e quindi di energia, molto più elevata. Si noti che l'energia di un pacchetto di radiazione elettromagnetica è proporzionale alla sua frequenza, ed è data da $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck (6.626×10^{34} J·s) e ν è la frequenza della radiazione. Il pacchetto, pur essendo un'onda, è allo stesso tempo anche una particella che viene denominata **fotone** (la dualità onda-particella, mistero affascinante della meccanica quantistica!)

Il decadimento per **emissione di neutroni** è in verità molto raro, ma nel caso del decadimento per fissione, che consiste nella divisione di un

nucleo tipicamente molto pesante in due grossi frammenti, in genere vengono anche emessi due o tre neutroni.

Tutti i tipi di decadimento radioattivo avvengono generalmente in sequenza. Ad esempio, un nucleo può andare incontro a un decadimento alfa, seguito da un decadimento beta, poi da un gamma, e da un altro alfa, e così via fino a raggiungere uno stato finale stabile, dando luogo a delle cosiddette catene di decadimento.

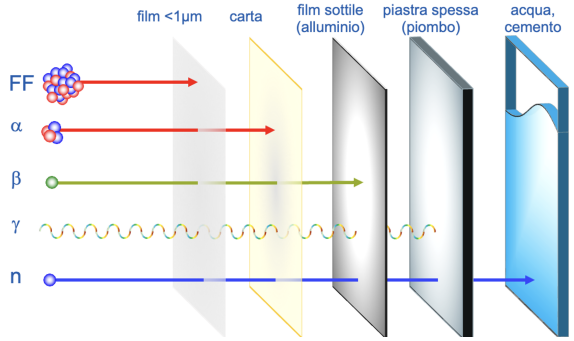


Figura 7: Esempio qualitativo della penetrazione delle varie tipologie di radiazione nella materia.

Essendo dotati di notevole energia cinetica i prodotti del decadimento radioattivo sono penetranti, ma non tutti alla stessa maniera. La capacità della radiazione di penetrare nella materia dipende principalmente dalla carica elettrica, e poi dall'energia cinetica e dalla massa. Senza addentrarci in dettagli sul frenamento della radiazione nella materia si può però fare riferimento qualitativo alla Figura 7.

I frammenti di fissione, pur essendo prodotti con grande energia cinetica, si arrestano facilmente in spessori di materia dell'ordine di 1 μm a causa della loro notevole carica e massa. La radiazione alfa si arresta facilmente nello spessore di un foglio di carta, e in genere non riesce ad attraversare lo strato esterno della pelle umana. Per arrestare la radiazione beta basta un normale foglio di alluminio da cucina. Ben diverso è il caso della radiazione gamma e dei neutroni che, essendo neutri, non risentono del frenamento elettrico (coulombiano) da parte della moltitudine di elettroni presenti nella materia e sono pertanto molto penetranti. Per arrestare la radiazione gamma occorrono dunque spessori consistenti di materiali pesanti come il piombo, mentre per i neutroni sono più efficaci spessori di acqua e/o cemento. La misura degli spessori da adottare per arrestare gamma e neutroni dipende dalla loro energia, e quindi per valutare la sicurezza di eventuali schermature è necessario conoscere più in dettaglio le energie in gioco caso per caso.

A queste bisogna aggiungere la cosiddetta radiazione cosmica, che consiste principalmente di protoni, nuclei di elio, ed elettroni, di altissima energia provenienti dallo spazio, che collidendo con i nuclei dell'atmosfera producono sciami di particelle elementari secondarie. Tali prodotti sono principalmente muoni (il muone è un gemello dell'elettrone con massa circa 200 volte maggiore), che risultano essere estremamente penetranti in quanto in grado di oltrepassare anche diversi chilometri di roccia.

Gli isotopi instabili

A questo punto la domanda che sorge spontanea è: dove, e come, vengono prodotti gli isotopi radioattivi (detti anche radioisotopi)? Per rispondere alla domanda è bene puntualizzare che vari isotopi radioattivi sono naturalmente presenti sul nostro pianeta, e sono denominati **NORM** (*Normally Occurring Radioactive Material*). I NORM appartengono principalmente a due categorie:

- quelli risalenti alla formazione del sistema solare e dotati di vita media molto lunga, una cui frazione residua è ancora presente, inclusi gli eventuali prodotti delle relative catene di decadimento;

- quelli che vengono prodotti continuamente da reazioni nucleari nell'interazione della radiazione cosmica con la materia, in particolare negli strati alti dell'atmosfera.

Tra i numerosi nuclei della prima categoria citiamo a titolo di esempio un paio di isotopi dell'uranio, ^{238}U e ^{235}U, uno del torio , ^{232}Th, e uno del potassio, ^{40}K, che hanno tempi di dimezzamento rispettivamente di 4.47, 0.70, 14.1 e 1.25 miliardi di anni.

Alla seconda categoria di nuclei radioattivi appartengono un isotopo del carbonio, ^{14}C ben noto perchè utilizzato per la datazione di reperti organici, uno dell'idrogeno, ^{3}H (trizio), ed uno del

berillio, ^{7}Be, con tempi di dimezzamento rispettivamente di 5730 anni, 12.3 anni e 53.28 giorni.

Isotopo	Simbolo	$T_{1/2}$	Produz.
Trizio	^{3}H	12.3 a	A, R
Iodio 131	^{131}I	8.04 g	A, R
Iodio 129	^{129}I	1.57×10^{7} a	A, R
Cesio 137	^{137}Cs	30.17 a	A,R,M,I
Cobalto 60	^{60}Co	1925.28 g	A,R,M,I
Stronzio 90	^{90}Sr	28.78 a	A, R
Iridio 192	^{192}Ir	73.83 g	I
Selenio 75	^{75}Se	119.78 g	I
Fluoro 18	^{18}F	109.77 m	M
Tecnezio 99	^{99}Tc	2.11×10^{5} a	M
Plutonio 239	^{239}Pu	2.41×10^{4} a	R

Figura 8: Principali radioisotopi prodotti da attività umane. Legenda: a=anni, g=giorni, m=minuti; A=armi, R=reattori a fissione, M=medicina, I=industria.

Molti altri radioisotopi sono (stati) invece prodotti da attività umane per scopi industriali, di ricerca scientifica, di diagnostica e terapia medica, come sottoprodotto della produzione di energia nei reattori nucleari a fissione, e purtroppo anche a seguito di produzione e test di armi nucleari. Alcuni hanno tempo di dimezzamento molto breve e scompaiono rapidamente, altri con grandi tempi di dimezzamento possono persistere nell'ambiente anche molto a lungo, in qualche caso per decine o centinaia di migliaia di anni. Nella tabella mostrata in Fig. 8 sono riportati i principali radioisotopi prodotti da attività dell'uomo.

Le radiazioni di cui abbiamo sin qui discusso sono dette ionizzanti, e cioè che nell'attraversare la materia possono liberare elettroni in essa inizialmente legati creando così degli **ioni** (atomi non più neutri). Se la materia in questione è organica (tessuti viventi) la ionizzazione dà luogo a rottura di legami chimici e conseguente produzione di sottoprodotti spesso incompatibili con la normale attività biochimica o addirittura tossici. In particolare le radiazioni possono danneggiare il DNA provocando delle mutazioni genetiche casuali spesso innocue, ma che in qualche caso possono dar luogo all'insorgenza di tumori. Dosi massicce di radiazioni, che comportano il rilascio di notevole energia, possono produrre gravi ustioni, la cosiddetta malattia da radiazioni e persino la morte.

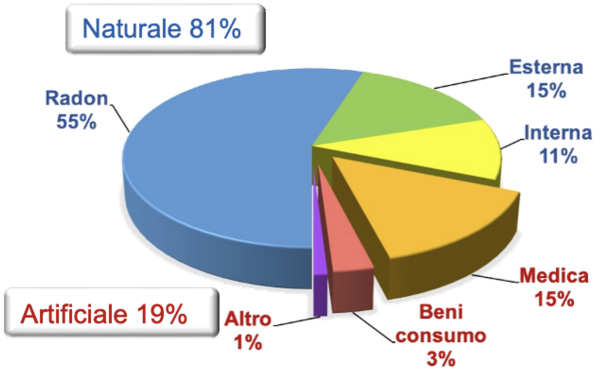


Figura 9: Suddivisione percentuale delle tipiche dosi di radiazione a cui siamo soggetti.

Ma da sempre le radiazioni fanno parte della nostra vita sul pianeta Terra, ne siamo letteralmente circondati:

- circa 30 neutroni e 120 raggi cosmici provenienti dal cielo attraversano il nostro corpo ogni secondo;
- nell'aria che respiriamo circa 10 nuclei pesanti si disintegrano ogni secondo nei nostri polmoni, rilasciando radiazione alfa, beta e gamma;
- il cibo che ingeriamo fa sì che 4500 nuclei di potassio-40 (^{40}K) producano radiazione beta e gamma nel nostro corpo ogni secondo, e che due di uranio rilascino radiazione alfa; il ^{40}K è un radioisotopo naturale, presente assieme al ^{39}K e al ^{41}K che sono stabili, e che rappresentano un elemento indispensabile per il funzionamento dei muscoli e del cuore;
- provenienti dal suolo e dagli edifici circa 56000 raggi gamma al secondo colpiscono il nostro corpo; di particolare rilievo è il radon, gas radioattivo pesante che emerge dal sottosuolo e che tende ad accumularsi nelle parti basse non sufficientemente ventilate degli edifici.

Le dosi di radiazioni alle quali siamo usualmente esposti sono mediamente di origine naturale per l'81% ed artificiale per il rimanente 19% (Figura 9).

Viene dunque definita una grandezza per fornire una prima caratterizzazione di riferimento



Figura 10: L'acqua di mare a seconda della sua salinità produce da 6000 a 10000 disintegrazioni di ^{40}K al secondo per metro cubo.

per i decadimenti di sostanze radioattive, e cioè l'attività che indica il numero (medio) di decadimenti al secondo e si esprime in Bequerel (Bq). A titolo di esempio è interessante far notare che l'acqua di mare, ricca di potassio, è anch'essa radioattiva, ed a seconda della salinità ogni metro cubo produce da 6000 a 10000 disintegrazioni di 40K al secondo, quindi 6000-10000 Bq (Figura 10).

Effetti biologici

La valutazione degli effetti biologici delle radiazioni è una disciplina complessa che non può certo esaurirsi in poche righe. Mi limiterò qui a pochi enunciati ed esempi molto generali esclusivamente a titolo illustrativo e senza alcuna pretesa di esaustività e rigore.

La dose rilasciata dalla radiazione nella materia è definita come energia depositata per unità di massa e si misura in Gray (Gy) cioè Joule/kg. Ma i vari tipi di radiazione depositano energia, e quindi producono il danno biologico, con modalità diverse. Per tenere conto di ciò si ricorre alla definizione di dose equivalente che consente di assegnare un peso diverso alle diverse radiazioni in funzione della loro energia. Si definisce poi la dose efficace, che assegna ulteriori pesi in funzione della radiosensibilità degli organi colpiti dalla radiazione, ma ulteriori dettagli esulano da questa trattazione. Dose equivalente e dose efficace si misurano in Sievert (Sv), che ha le stesse dimensioni, Joule/kg, del Gray.

Per le dosi con le quali abitualmente si ha a che fare si utilizza il sottomultiplo μSv (microsievert), e per valutare i rischi di esposizioni prolungate a radiazioni si utilizza il rateo di dose generalmente misurato in μSv/h (microsievert/ora).

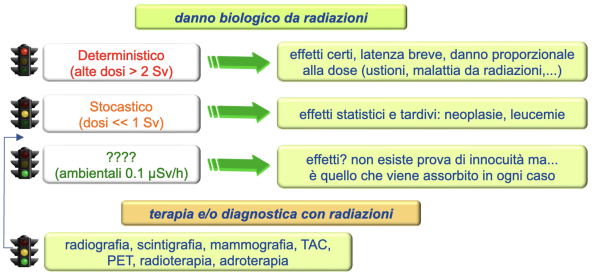


Figura 11: Schema illustrativo semplificato del danno biologico prodotto dalle radiazioni ionizzanti.

Il danno biologico da radiazioni può essere deterministico ad alte dosi assorbite (>2 Sv) oppure stocastico per dosi inferiori. Per dosi molto basse, giù fino alle dosi ambientali, non ci sono prove di innocuità in quanto dimostrare la correlazione causa-effetto è cosa ardua. Le radiazioni vengono diffusamente utilizzate anche per diagnostica medica e per terapia (Figura 11).

Per la protezione dalle radiazioni si utilizza quindi il principio di cautela **ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable*, il minimo ragionevolmente ottenibile) e diverse soglie di riferimento a seconda della tipologia di attività che le persone svolgono: lavoratori professionalmente esposti, di varie categorie, e la popolazione.

Elenco nella tabella della Fig. 12 alcuni esempi pratici, che possono essere utili per avere un'idea degli ordini di grandezza e confrontare le dosi prodotte dall'esposizione a diversi eventi o attività.

La reazione a catena e il reattore nucleare

Per comprendere in cosa consistono e come vengono prodotti i rifiuti radioattivi è necessaria una descrizione semplificata, sommaria ma spero efficace, del processo di fissione nucleare, della reazione a catena e quindi del funzionamento di base di un reattore a fissione.

L'uranio presente oggi in natura, circa 600 volte più abbondante dell'oro, è composto per il 99.27% dall'isotopo ^{238}U e per lo 0.72% dal ^{235}U.

Attività / evento	Dose [μSv]
Dormire accanto a qualcuno	0.05
1 anno entro 80 km da una centrale nucleare	0.09
Mangiare una banana (contiene potassio)	0.1
1 anno entro 80 km da centrale a carbone	0.3
1 giorno sul Plateau del Colorado	1.2
1 giorno a Fukushima dopo l'incidente	3.5
Radiografia denti o mano	5
1 giorno normale di una persona media	10
Radiografia al torace	20
Rilascio annuo centrale nucleare	30
Volo Palermo Copenaghen e ritorno	40
Limite di rilascio annuo di centrale nucleare	< 250
Dose annua da potassio nel corpo	390
Dose massima annua per il pubblico	1000
Dose massima incidente Three Miles Island	1000
Mammografia	3000
1 anno normale di una persona media	3650
TAC al torace	5800
1 ora a Chernobyl nel 2010	6000
Dose massima annua lavoratori esposti IT	20000
Dose massima annua lavoratori esposti USA	50000

Figura 12: Alcuni esempi pratici di dosi equivalenti a seguito di attività od eventi che comportano esposizione a radiazioni ionizzanti.

Le sue principali caratteristiche fisico-chimiche sono schematizzate in Figura 13.



Figura 13: Principali caratteristiche fisico-chimiche dell'uranio.

All'origine, qualche miliardo di anni addietro, il 235 era più abbondante di oggi, ma i decadimenti naturalmente occorsi ne hanno ridotto la quantità. Entrambi gli isotopi sono soggetti a decadimento alfa ma il 235 può anche decadere per fissione spontanea, sebbene con probabilità bassissima, spezzandosi in due frammenti statisticamente di varie dimensioni e liberando al contempo 2 o 3 neutroni di alta energia cinetica. I due frammenti prodotti non sono stabili e quindi per ciascuno si innesca una catena di decadimenti fino a raggiungere la stabilità. Tali decadimenti possono avere tempi di dimezzamento molto brevi ma anche lunghi centinaia di anni. La peculiarità del ^{235}U però è che la fissione può essere stimolata colpendolo con neutroni, e la probabilità che ciò accada è tanto più grande quanto più lenti sono i neutroni (Figura 14).

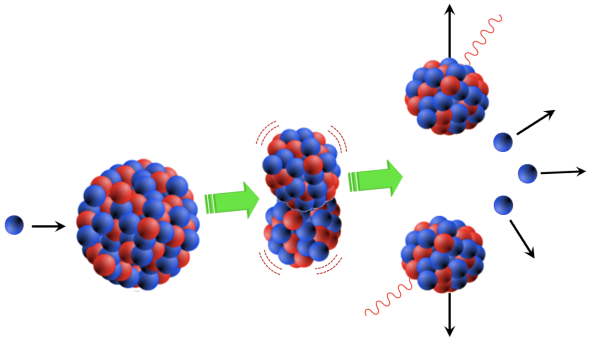


Figura 14: La fissione nucleare indotta da neutroni.

E poichè la fissione produce anche neutroni, è possibile innescare una reazione a catena autosostenuta se si riesce a impaccare una certa quantità di ^{235}U a distanza ravvicinata unitamente a qualche materiale, detto moderatore, in grado di rallentare i neutroni emessi in ciascuna fissione. L'energia cinetica dei frammenti, e parte di quella da questi rilasciata sotto forma di radiazione gamma e beta, viene immediatamente convertita in energia termica nei materiali costituenti e nel moderatore. In altre parole, il sistema comincia a scaldarsi, e se non si interviene opportunamente la reazione a catena diverge e le altissime temperature lo distruggono. In maniera estremamente semplificata abbiamo appena definito il principio operativo di base di un reattore nucleare a fissione.

È interessante notare che l'energia liberata in una fissione del ^{235}U è di circa 210 MeV (milioni di elettronvolt; per fornire un termine di confronto si osservi che un fotone di luce visibile trasporta un'energia dell'ordine di 1 eV). Confrontando tale valore con i circa 10 eV rilasciati dalla decomposizione di una molecola di TNT,

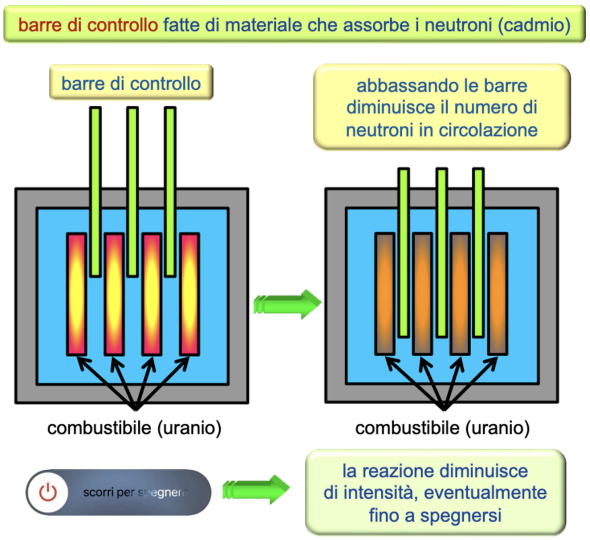


Figura 15: Schema di principio del funzionamento delle barre di controllo di un reattore nucleare.

che casualmente ha una massa molto vicina a quella di un nucleo di uranio, si vede che la densità energetica dell'uranio è circa 20 milioni di volte superiore a quella del tritolo.

L'impaccamento del combustibile ^{235}U si ottiene tramite un complesso processo detto arricchimento, che permette di aumentare la proporzione di tale isotopo nella composizione dell'uranio. Il calore prodotto viene smaltito tramite uno o più fluidi in opportuni circuiti di raffreddamento, e viene utilizzato per mettere in movimento delle turbine per la produzione di energia elettrica.

Ma come controllare il reattore, ed evitare che la reazione a catena diverga? Elemento fondamentale sono le barre di controllo, costituite di un materiale capace di assorbire drasticamente neutroni (tipicamente cadmio), che possono essere movimentate su e giù tra le barre di combustibile. Posizionandole opportunamente si può regolare la potenza del reattore mantenendo la reazione a catena in equilibrio ed eventualmente spegnerlo (Figura 15).



Figura 16: Una tipica pastiglia di ossido di uranio.

Esistono numerosi modelli di reattore, con una notevole varietà di geometrie del combustibile

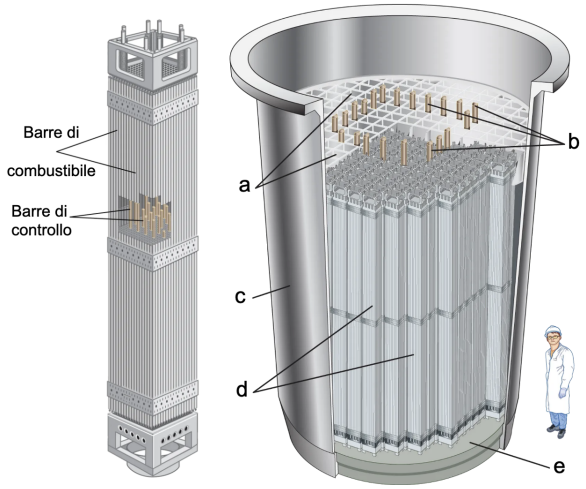


Figura 17: A sinistra: schema di un elemento di combustibile. A destra: Il core del reattore. (a) Griglia superiore per allineamento degli elementi di combustibile. (b) Barre di controllo. (c) Involucro del reattore. (d) Elementi di combustibile. (e) Griglia inferiore. Da Enciclopedia Britannica [1, 2].

(tipicamente pastiglie di ossido di uranio inserite in barre opportune, Figura 16), del moderatore (liquidi, solidi, gassosi), del fluido di raffreddamento (che può essere anche lo stesso moderatore). Ovviamente la geometria e la composizione di tutti questi elementi vanno accuratamente calcolate, progettate e realizzate per ottenere dispositivi che rispettino gli stringenti criteri di sicurezza richiesti dalle opportune agenzie nazionali ed internazionali. La Figura 17 mostra lo schema di massima di un elemento di combustibile e del core del reattore contenente un certo numero di tali elementi. In Figura 18 viene riportato lo schema semplicato di massima di una generica centrale elettronucleare a fissione. Vale la pena di sottolineare che un reattore a fis-

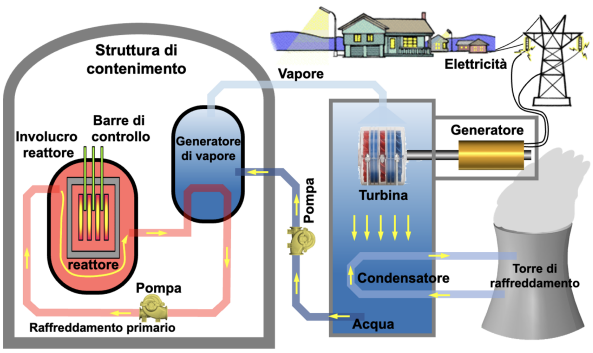


Figura 18: Schema semplificato di una centrale elettronucleare a fissione.

sione NON PUÒ dar luogo ad una esplosione nucleare: per incontrovertibili ragioni fisiche le esplosioni nucleari possono avvenire soltanto in ordigni nei quali il grado di arricchimento del combustibile è superiore al 90%. Le esplosioni avvenute a Fukushima, ad esempio, sono state di natura chimica, causate cioè dal calore non più controllato del *core* del reattore che ha dissociato l'acqua in idrogeno ed ossigeno con conseguente esplosione dell'idrogeno.

Ciò non toglie che considerevoli quantitativi di radioisotopi sono stati dispersi nell'ambiente, ma che spesso le conseguenze, certamente gravi, sono state impropriamente ingigantite dai media, corroborate da insufficiente conoscenza delle tematiche da parte dell'opinione pubblica ed amplificate dalla diffusione di notizie non veritiere (*fake news*). È interessante consultare al riguardo il saggio di Piergiorgio Pescali, protagonista e narratore del disastro giapponese [3].

Va anche ricordato che al crescere della distanza da un sito di incidente nucleare diminuisce la concentrazione dei radioisotopi (a meno di variazioni prodotte dai venti). Infine va considerato che gli incidenti più gravi nella storia non sono stati di tipo nucleare bensì biologici (pandemie, mentre i radioisotopi sono pericolosi ma non contagiosi), chimici (esplosione di un impianto a Bhopal, India, nel 1984 con circa 4000 vittime in pochi minuti, 15-20000 successivamente e mezzo milione con danni medicalmente rilevabili), meccanico-ambientali (crollo di dighe, etc.).

Produzione di rifiuti radioattivi

Adesso abbiamo gli elementi essenziali per esaminare più in dettaglio la produzione di rifiuti radioattivi. Le attività/processi principali che danno origine a specie radioattive sono i seguenti:
a) materiali NORM, come già visto;
b) materiali TENORM (*Technologically Enhanced* NORM), cioè materiali naturali che a seguito di procedimenti industriali presentano una composizione più ricca di elementi radioattivi (tipicamente attività minerarie e/o di purificazione o arricchimento);
c) produzione di radiofarmaci tramite acceleratori di particelle o reattori nucleari;
d) produzione di sorgenti gamma intense per terapie oncologiche;
e) produzione di particolari isotopi per uso industriale (ad es. radiografia industriale di saldature su paratie spesse, ricerche petrolifere);
f) ricerca;
g) produzione energetica in reattori nucleari a fissione;
h) smantellamento di installazioni nucleari (*decommissioning*).
Tutti i rifiuti prodotti dalle suddette attività vanno soggetti ad isolamento per evitare che entrino in contatto con persone o in generale vadano dispersi nella biosfera. Le barriere a tale scopo preposte dipendono dalla tipologia di rifiuti e quindi dalla loro pericolosità e durata. Le attività che danno luogo ai maggiori quantitativi di radioisotopi sono la (g) e la (h), fermo restando che comunque anche piccole quantità necessitano ugualmente di segregazione.

L'agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) stabilisce criteri per la catalogazione, segregazione e gestione dei rifiuti, con una copiosa messe di documenti, direttive e guide operative [4, 5, 6]. Purtroppo spesso i criteri delle agenzie di ciascuna nazione non sono in stretta corrispondenza con quelli IAEA, generando in taluni casi delle ambiguità. Ad ogni modo una catalogazione più o meno universalmente riconosciuta prevede:

- rifiuti di alto livello (HLW, *high level waste*), principalmente ma non esclusivamente combustibile nucleare esaurito (SF, *spent fuel*);
- rifiuti di livello intermedio (ILW, *intermediate level waste*);
- rifiuti di basso livello (LLW, *low level waste*);
- rifiuti di livello bassissimo (VLLW, *very low level waste*);
- materiali esenti (*exempt*).

A parte per il combustibile esaurito, l'appartenenza ad una categoria dipende dall'attività e dalla presenza e quantità di alcune particolari specie nucleari, e in particolare degli attinidi, che occupano l'ultima riga della tavola periodica degli elementi. Gli attinidi, che decadono alfa, includono anche l'uranio e i cosiddetti elementi transuranici come nettunio, plutonio e americio

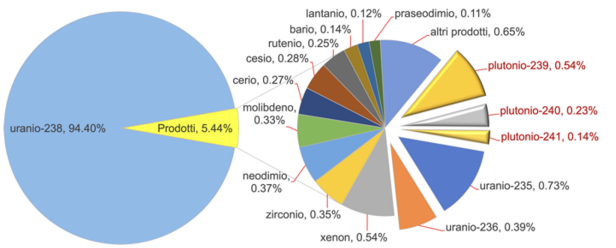


Figura 19: Esempio di composizione del combustibile dopo tre anni di funzionamento per un reattore ad acqua pressurizzata.

(Z=93, 94, 95 rispettivamente) che non esistono in natura ma si formano proprio nel combustibile nucleare a causa di reazioni secondarie (ripetute catture neutroniche e decadimenti beta). A titolo di esempio in Figura 19 è mostrato un calcolo della composizione del combustibile dopo tre anni di funzionamento per un reattore ad acqua pressurizzata, partendo da una composizione iniziale di ^{238}U al 97% e ^{235}U al 3%.

Le specie nucleari rappresentate dai settori in evidenza più a destra sono appunto attinidi, in particolare il plutonio che è un transuranico. Tali specie sono particolarmente tossiche sia per via chimica che radiologica. Le particelle alfa che emettono, come già detto, non oltrepassano la pelle umana. Ma se ingerite e/o respirate le polveri di attinidi si localizzano in vari organi (polmoni, ossa,...) dove sono in grado di produrre danni biologici gravi. E poichè i loro tempi di dimezzamento sono lunghi, ad esempio ^{239}Pu dimezza in circa 24000 anni, lo *spent fuel* necessita di essere isolato dalla biosfera per tempi molto lunghi, dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni. Per rendere l'idea, in mezzo milione di anni, che corrispondono a quasi ventuno volte il suo tempo di dimezzamento, l'attività (e quindi la quantità) del ^{239}Pu si riduce a circa un duemilionesimo di quella iniziale ($\approx 1/2^{21} \approx 1/2000000$).

Le altre specie nucleari di Figura 19 sono i prodotti di fissione, che emettono radiazione beta e gamma con tempi di dimezzamento molto più brevi ma attività particolarmente elevate perchè presenti in quantità. Per tali specie, se separate dagli attinidi, il confinamento potrebbe essere limitato a diverse centinaia di anni. Come si opera oggi? La Francia, pressochè unica al mondo, possiede degli impianti per il ricondizionamento dello *spent fuel*, estraendone il plutonio e l'uranio



Figura 20: Piscina per la decantazione iniziale delle barre di combustibile esauste.



Figura 21: Decantazione secondaria (50-100 anni) di *spent fuel* in un deposito di Zwilag [7] (Würenlingen, Zurigo, Svizzera).

per produrre nuovo combustibile. Difatti, cosa forse poco nota, il ^{239}Pu sottoprodotto della fissione è un ottimo combustibile nucleare (e un modello di reattore cosiddetto autofertilizzante è in grado di produrre più combustibile di quello che si immette!). A livello internazionale però la scelta è invece quella di non ricondizionare lo *spent fuel* e di metterlo a decantare in piscina per alcuni anni, poiché appena estratto dal reattore continua a scaldare parecchio a causa delle intense emissioni da parte dei prodotti di fissione.

Una volta estratto dalla piscina viene poi inserito e sigillato in opportuni contenitori, detti ***cask***, e lasciato ulteriormente a decantare per 50-100 anni in depositi al chiuso ma ben ventilati (Figura 21) o anche all'aria aperta (Figura 22) per una ulteriore decantazione detta interim storage. I *cask* sono soggetti a normative molto stringenti, inclusa la resistenza a urti e penetrazioni verificata anche tramite caduta da diversi metri di altezza.

Al termine della decantazione i cask andranno



Figura 22: Decantazione secondaria (50-100 anni) di spent fuel in deposito all'aperto [8].

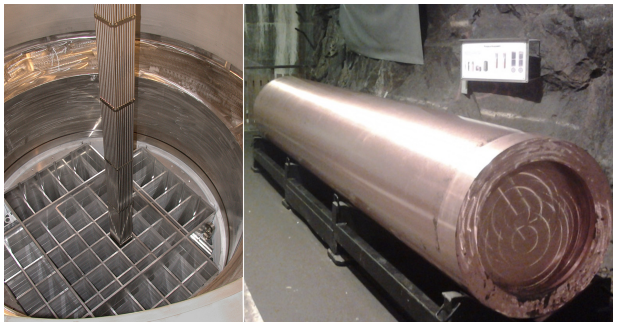


Figura 23: Le barre di spent fuel vengono inserite in speciali contenitori in rame e acciaio detti *canister* [10].

riaperti, e le barre di combustibile dovranno essere inserite in speciali contenitori in rame e acciaio, detti canister (Figura 23). Questi andranno sigillati ermeticamente con speciali saldature e poi opportunamente posizionati in nicchie orizzontali o verticali realizzate all'uopo in depositi geologici dentro caverne a 500 m di profondità con numerosi accorgimenti tecnici protettivi (Figura 24).

Il sito per un tale deposito va scelto a seguito di complessi studi di natura sia geologica che economica e sociale. Va anche studiata l'evoluzione di siti analoghi per vari aspetti (morfologia, orografia, composizione,...) nel corso di varie ere geologiche, per verificarne la supposta stabilità nei millenni a venire. La linea guida è che le specie nucleari in questione debbano rimanere segregate dalla biosfera per almeno diverse centinaia di migliaia di anni.

Senza entrare qui nell'annoso dibattito sull'efficacia o meno e sull'accettabilità etica dei depositi geologici, mi limito ad osservare che lo *spent fuel* esiste ed in qualche modo bisognerà prima o poi metterlo in sicurezza per le generazioni a venire. Aggiungo inoltre che i pochi metri cubi di *spent fuel* italiano, cioè quello prodotto dalle

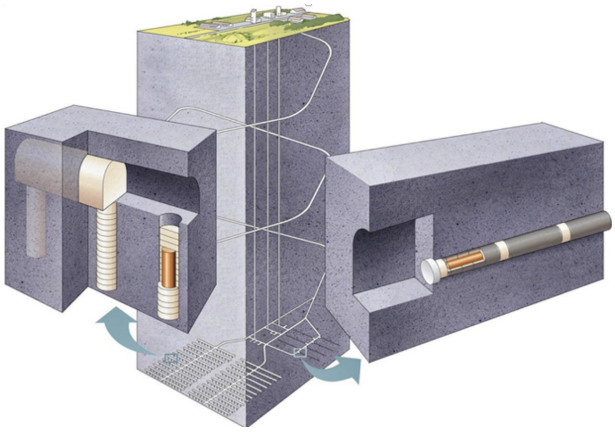


Figura 24: Schema di un deposito geologico a 500 m di profondità, con possibilità di posizionare i *canister* in nicchie sia orizzontali che verticali [10].

nostre quattro centrali nucleari nei pochi anni di operatività, da diverse decine d'anni ed a più riprese sono stati temporaneamente trasferiti in Francia ed in Inghilterra per un riprocessamento che ne diminuisca il volume. Quanto prima il nostro *spent fuel* dovrà comunque rientrare ed essere immagazzinato in un deposito interim che è purtroppo in grave ritardo (ed anche per tale rientro siamo già in ritardo pluriennale). Al momento l'unico deposito geologico al mondo, specificamente costruito per lo *spent fuel* e prossimo all'operatività, è Onkalo nei pressi di Olkiluoto (Finlandia), realizzato da POSIVA [9] in collaborazione con l'azienda svedese SKB [10] che ne sta realizzando uno a Forsmark in Svezia. Per Onkalo si attende solo il rilascio della licenza finale per l'entrata in funzione a regime, verosimilmente entro il 2024.

I rifiuti di livello intermedio (ILW) possono essere in forma solida o liquida, e contenere o meno delle moderate quantità di attinidi. A differenza di quelli ad alta attività (HLW) non producono abbastanza calore da necessitare il raffreddamento. Vengono inseriti in speciali fusti metallici (Figura 23) e/o incapsulati in matrici di cemento o di cosiddetti geopolimeri.

In passato in alcuni casi gli ILW sono stati direttamente cementati, ma al giorno d'oggi tale pratica è sconsigliata. Lo studio di tecniche avanzate per il loro trattamento ed incapsulamento è sempre in corso, poiché nuove tecnologie possono permettere l'ottimizzazione dei processi ed il miglioramento delle sicurezze. Per quanto ri-



Figura 25: Fusti da 120 litri contenenti rifiuti di livello intermedio ILW in un deposito superficiale temporaneo. Il rateo di dose a contatto è di circa 100 μSv/h [11].

guarda la destinazione finale degli ILW, in vari paesi si fanno scelte differenti: da miniere dismesse a depositi di media profondità od anche depositi geologici. Ove queste risorse non siano ancora disponibili gli ILW sono attualmente parcheggiati in depositi temporanei di superficie o subsuperficiali.



Figura 26: Un fusto da 220 litri contenente rifiuti di basso livello LLW. Il rateo di dose a contatto è di circa 1 μSv/h [12].

I rifiuti di bassa (LLW) e bassissima (VLLW) attività consistono generalmente di oggetti e materiali contaminati perché sono stati a contatto con materiali attivi, e quindi ne contengono dei residui, e/o che sono stati utilizzati durante operazioni di *decommissioning*: calcinacci, indumenti, camici, guanti, scarpe, utensili, raccorderia metallica (Figura 26). Anche interi dispositivi possono configurarsi come rifiuti nucleari, un esempio sono le scatole a guanti (glove box) che, a seconda dell'utilizzo che ne è stato fatto e delle specie nucleari con cui sono venute in contatto, possono configurarsi come ILW o come LLW. Anche i LLW ed i VLLW vengono confezionati in speciali fusti metallici, ma questi vengono immagazzinati in depositi di superficie per tempi previsti dell'ordine dei 50-100 anni, sufficienti per il decadimento pressoché totale (Figura 27).

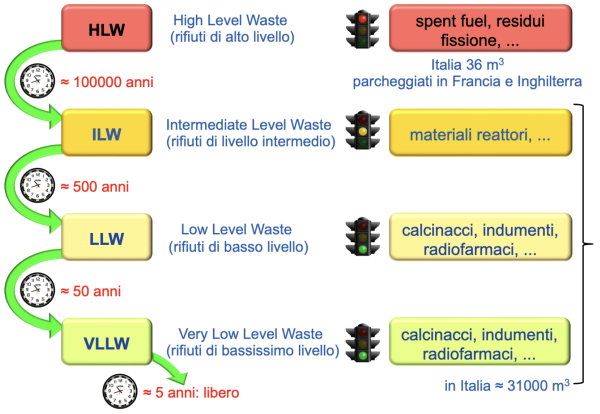


Figura 27: Schema riassuntivo semplificato della classificazione IAEA dei rifiuti nucleari.

Gestione dei rifiuti radioattivi

Quando si gestisce materiale nucleare un concetto importante è quello delle tre S: *safety*, *security* (in italiano entrambi tradotti come sicurezza), *safeguards* (salvaguardia). *Safety* riguarda la protezione delle persone dall'esposizione a pericolose radiazioni ionizzanti. In ciascun paese è disciplinata da rigorose norme di radioprotezione emanate dalle rispettive autorità nazionali. *Security* tratta della protezione del materiale e delle installazioni nucleari da azioni criminali. A tal riguardo il 26 Ottobre 1979 a Vienna presso la IAEA è stata adottata la convenzione sulla protezione fisica del materiale nucleare, che successivamente è stata firmata da 160 paesi. Nel 2017 la IAEA ha organizzato, ancora a Vienna, una conferenza internazionale sulla protezione fisica del materiale e delle installazioni nucleari, e ciò dimostra la crescente importanza di tale tematica alla luce della situazione mondiale di criminalità e terrorismo in continua evoluzione. *Safeguards* assicura che materiali e tecnologie nucleari siano utilizzati soltanto per scopi pacifici e non per lo sviluppo di armamenti. A tale scopo è stato messo a punto uno specifico trattato di non proliferazione, entrato in vigore nel 1970, che a oggi è stato firmato da 190 paesi.

La protezione del materiale e delle installazioni nucleari entra in gioco in svariate attività quali stoccaggio, manipolazione, trasporto, ispezione, verifiche, con molteplici implicazioni sulla sicurezza. In molti casi l'assenza o lo smarrimento di documentazione cartacea relativa a contenitori di vecchia data, crea il problema del cosiddetto *legacy waste* (rifiuti ereditati). A complicare le cose, tanti specialisti della vecchia generazione vanno in pensione, con una possibile perdita di competenze per ovviare alla quale è indispensabile mantenere la cosiddetta continuità della conoscenza. E resta comunque aperto il dibattito sui depositi geologici e sulla loro presunta affidabilità nel mantenersi intatti per centinaia di migliaia di anni. Ciononostante, l'attività di ricerca in tal senso procede, come è giusto che sia, anche se a parte la soluzione finlandese gli eventuali nuovi depositi sono ancora lontani dalla realizzazione.

Ad ogni modo, quale che sia la soluzione nel lungo termine, prima di chiudere e sigillare tali depositi sarà certamente necessaria una intensa attività di stoccaggio temporaneo. Nell'arco di circa 50-100 anni per tutte le categorie di rifiuti sarà necessario prevenire, individuare e reagire ad eventuali incidenti, furti, sabotaggi, accessi non autorizzati e trasferimenti illegali, ferme restando le misure per la protezione dalle radiazioni. Uno dei principali strumenti richiesti per tali scopi è il monitoraggio, per verificare l'integrità di ciascun fusto dalla produzione fino alla sua destinazione finale, sia che si tratti del deposito geologico (HLW, ILW) che del rilascio a causa del decadimento pressoché totale dei radionuclidi contenuti. Il monitoraggio dei rifiuti radioattivi finora è stato realizzato con metodi tradizionali, vale a dire tramite sensori di radioattività ambientale fissi installati all'interno ed all'esterno dei depositi e sensori portatili per controlli da parte di operatori specializzati. Nuove tecnologie oggi disponibili permettono di integrare, se non di rimpiazzare, tali metodi di monitoraggio convenzionale, e di fornire diversi benefici addizionali quali una misurazione continua e puntuale dei dati da ciascun fusto, la registrazione in forma digitale, una procedura più completa per la caratterizzazione e la valutazione del materiale nucleare e in particolare dei rifiuti. Questi ed altri obiettivi sono stati perseguiti dal progetto Euratom H2020 MICADO [13], conclusosi con successo nel 2023, mentre ulteriori affinamenti di alcune tecniche sviluppate in tale progetto sono state portate a termine nel Work Package 7 del progetto Euratom H2020 PREDIS [14], concluso nel 2024, dedicato proprio ai sistemi di monitoraggio di *radwaste*.

Sistemi avanzati di monitoraggio Radwaste

Un sistema di monitoraggio automatico, individuale e continuo renderebbe possibile mantenere la cronistoria completa e dettagliata di ciascun fusto o *cask*, con notevoli benefici in termini di sicurezza (radiologica e da azioni criminali) e di trasparenza. La necessità di intervento umano diretto verrebbe così sensibilmente ridotta, minimizzando al contempo errori e possibili azioni illegali intenzionali. Sensori di radiazione di nuova generazione, da applicare direttamente sui fusti, sono oggi in grado di monitorare i materiali nucleari sia durante lo stazionamento che durante il trasporto, individuando possibili anomalie strutturali o tentativi di diversione e prevenendo dei traffici illeciti (Figura 28).

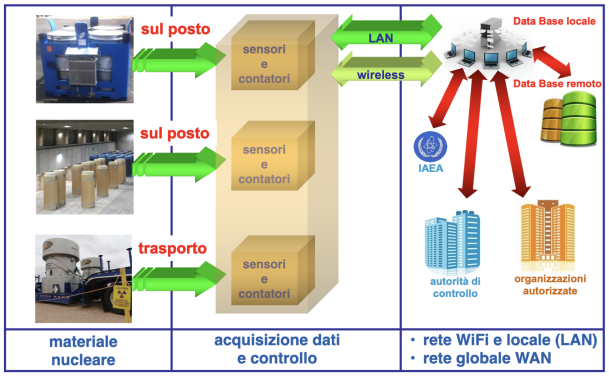


Figura 28: Schema di un possibile sistema di monitoraggio in tempo reale, connesso ad un database accessibile alle organizzazioni legalmente autorizzate. In alto e al centro: monitoraggio locale di depositi ILW ed HLW. In basso: monitoraggio durante il trasporto.

Un tale sistema potrebbe essere utilizzato sia per i siti di stoccaggio di *radwaste* che nei vari passi della filiera del combustibile nucleare, sia che questo una volta esaurito vada infine a smaltimento che nel caso di riprocessamento per la produzione di nuovo combustibile (Figura 29).

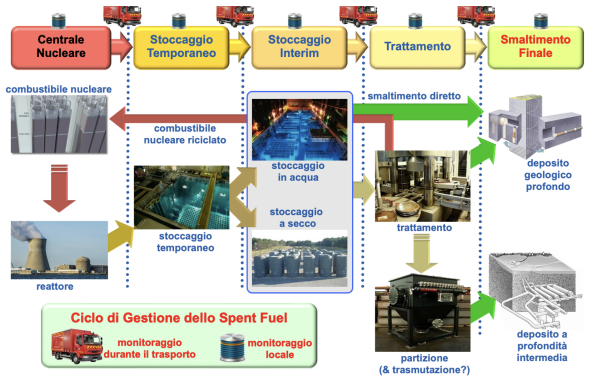


Figura 29: Il ciclo del combustibile nucleare, con possibile eventuale trattamento e riciclo, fino allo smaltimento dei rifiuti finali. In tutte le fasi il monitoraggio, indicato in alto con i simboli dell'autocarro e del fusto, può giocare un ruolo rilevante.



Figura 30: Schema delle emissioni radioattive da un fusto di materiale.

Ma cosa monitorare in particolare? Sono tanti i parametri fisico-chimici che è possibile tenere sotto controllo: pressione, temperatura, umidità, acidità, deformazione, etc., ma come visto in PREDIS [14], molti di questi parametri richiedono l'inserimento di speciali sensori all'interno dei fusti. Tale operazione, non semplice, rischia di alterare lo stato del fusto nel medio/lungo periodo, ed infatti al momento non è prevista dalle regolamentazioni in vigore. Un monitoraggio facilmente accessibile è invece quello radiologico. Come visto in precedenza (Figura 7), la radiazione gamma ed i neutroni sono molto penetranti, e quindi una frazione non trascurabile fuoriesce dal fusto e può essere utilizzata per ricavare informazioni relative al contenuto dello stesso (Figura 30).

Nell'ambito del Work Package 7 del progetto MICADO [13] sono stati sviluppati dei sensori a basso costo per gamma e per neutroni, che sono quindi stati integrati con un sistema di acquisizione dati ed un database. Tali sensori, da applicare all'esterno dei fusti, possono misurare la radiazione a intervalli di tempo predefiniti o con continuità, e un cambiamento inatteso dei tassi di conteggio sarebbe indice di un'anomalia da investigare.

Rivelatori per radiazione gamma e neutroni

Per la rivelazione della radiazione gamma è stata messa a punto una tecnica basata su due tecnologie: le fibre ottiche scintillanti in plastica (**SciFi**) ed i fotomoltiplicatori al silicio (**SiPM**) [15]. Il principio operativo del sensore, denominato SciFi, è molto semplice: una fibra scintillante, quando viene colpita da un pacchetto di radiazione gamma, produce un rapidissimo lampo di luce nel visibile della durata di pochi nanosecondi (1 ns = 10^{-9} s = un miliardesimo di secondo) e di intensità estremamente bassa (qualche centinaio di fotoni al più). Una frazione di tale luce, circa il

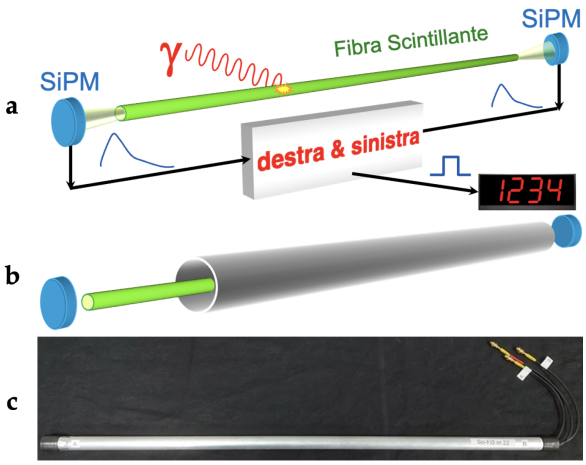


Figura 31: (a) Schema di funzionamento del sensore SciFi per la radiazione gamma. (b) Il sensore viene incapsulato in un tubo di alluminio a tenute di luce. (c) Foto di un sensore SciFi reale.

6.5%, si propaga in entrambe le direzioni lungo la fibra e raggiunge due SiPM posti alle estremità che trasformano la luce in due segnali elettrici amplificandoli di un fattore un milione. I due segnali diventano così macroscopici e possono essere trattati da una elettronica logicamente e componentisticamente elementare dai costi estremamente contenuti. Quando il segnale è presente su entrambi i SiPM l'evento viene considerato come rivelazione di un gamma e viene quindi incrementato un contatore. Segnali presenti su

un solo SiPM vengono considerati spuri (rumore elettronico) e rigettati. Lo schema di funzionamento è sinteticamente illustrato in Figura 31a. La Figura 31b mostra come fibra e SiPM siano incapsulati in un tubo di alluminio a tenuta di luce, ad evitare l'accecamento dei sensori da parte della luce ambientale esterna. In Figura 31c si vede un sensore SciFi reale, di lunghezza 80 cm. Da notare che, se necessario, il sensore può essere incapsulato in un tubo plastico flessibile anziché in alluminio, così da essere installato in geometria curva.

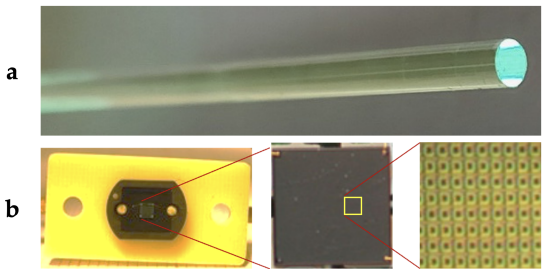


Figura 32: (a) Fibra scintillante da 3 mm di diametro. (b) Un SiPM da 3×3 mm2 costituito da 4774 fotodiodi.

È interessante spendere qualche parola sul fotomoltiplicatore SiPM, che rappresenta uno sviluppo relativamente recente degli ultimi vent'anni. Si tratta si una matrice integrata di migliaia o decine di migliaia di fotodiodi (detti anche microcelle), con dimensioni totali che nelle tecnologie attuali vanno da 1×1 a 6×6 mm^2, operanti nel cosiddetto **regime geiger**. Ciò significa che quando uno dei fotodiodi è colpito da uno o più fotoni visibili esso produce un segnale sempre uguale, molto grande, costituito da circa 10^6 elettroni. Tutti i microscopici fotodiodi sono connessi in parallelo, cosicché il segnale totale prodotto dal SiPM quando un numero n dei suoi fotodiodi è colpito sarà n volte più grande del segnale prodotto da un singolo. Questa modalità di funzionamento è detta **quasi digitale** e permette di rivelare e contare anche singoli fotoni. In Figura 32 sono riportati una foto ravvicinata di una fibra scintillante e di un SiPM 3×3 mm^2 costituito da 4774 microcelle a tre diversi ingrandimenti. Per sua natura il SiPM produce del rumore spurio, dovuto a singole microcelle che occasionalmente producono segnale anche se non colpite da fotoni, e questo è il motivo per cui il sensore SciFi richiede la coincidenza tra i due SiPM agli estremi della fibra per dichiarare la rivelazione di un gamma.

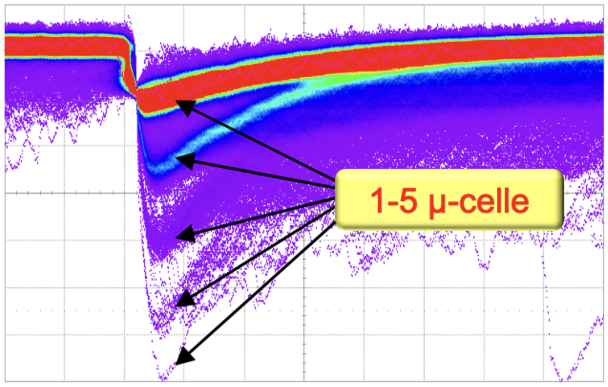


Figura 33: Segnali di buio di un SiPM analizzati all'oscilloscopio in modalità a persistenza di immagine. Si osservano chiaramente cinque bande corrispondenti all'accensione di 1-5 microcelle.

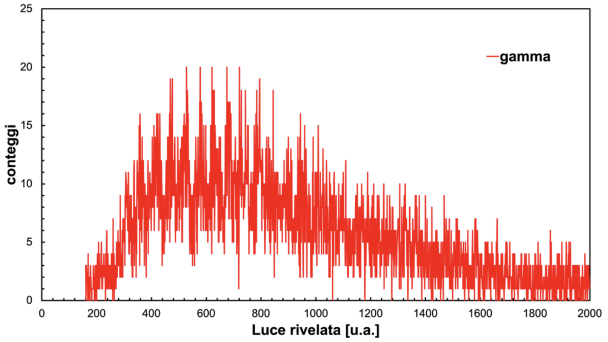


Figura 34: Istogramma della distribuzione delle ampiezze dei segnali di un SiPM quando il sensore SciFi è esposto ad una sorgente gamma.

Analizzando all'oscilloscopio, in modalità a persistenza di immagine, i segnali di buio di un SiPM, si possono facilmente osservare alcune bande corrispondenti all'accensione di 1-5 ed anche più microcelle (Figura 33). Sottoponendo un sensore SciFi a radiazione gamma, ad esempio esponendolo ad una sorgente di ^{137}Cs, si osserva un certo tasso di conteggio in coincidenza tra i due SiPM. Se si costruisce l'istogramma della distribuzione delle ampiezze di segnale (altrimenti detto spettro) di uno dei due SiPM si ottiene il grafico di Figura 34.

La curva è grosso modo una distribuzione di Poisson, ben nota in statistica, le numerose strutture strette e piccate corrispondono a numeri discreti di microcelle che hanno rivelato fotoni di scintillazione, e il numero più probabile di fotoni

rivelati è circa 11 (corrispondente al picco con il massimo numero di conteggi).

La radiazione gamma ionizza i materiali direttamente, essendo una radiazione elettromagnetica che può strappare elettroni dagli atomi, ed il processo di scintillazione nella fibra ottica è dovuto all'eccitazione e diseccitazione di stati elettronici nel materiale. Per la rivelazione dei neutroni le cose sono invece un po' più complesse, visto che il neutrone non risente del campo elettrico e quindi non interagisce per via elettromagnetica con gli elettroni atomici dei materiali.

L'unica interazione del neutrone con la materia è per via nucleare, e ciò implica che tali interazioni siano assai poco probabili poichè l'interazione nucleare è sostanzialmente di contatto. Ricordo l'esempio del pallone da calcio nella sezione sui nuclei atomici: mentre gli elettroni sono presenti a grandi distanze dal nucleo e distribuiti come delle enormi nuvole, il neutrone per interagire deve andare proprio a colpire il pallone. Se si vuole rivelare dei neutroni, quindi, si deve ricorrere a dei processi indiretti: si utilizzano dei materiali che hanno la strana proprietà di avere una predilezione per l'interazione con i neutroni (convertitori di neutroni), e che a seguito di tale interazione decadano emettendo particelle elettricamente cariche (nuclei leggeri) che possono quindi essere rivelate con sensori tradizionali.

Nel corso del Progetto Manhattan (che portò alla fabbricazione della bomba atomica), nello studiare le proprietà del ^{235}U si scoprì che la sua area efficace (la denominazione formale in fisica è **sezione d'urto**, e caratterizza la probabilità di interazione) quando bersagliato con **neutroni lenti** diventava enorme, molto più grande dell'area geometrica attesa. Qualcuno disse che diventava grande come la parete di un granaio (che in inglese si chiama *barn*). Ecco perché l'unità di misura della sezione d'urto da allora è il **barn**, che corrisponde a 10^{-24} cm^2, si indica con b, e che in sostanza rappresenta una probabilità di interazione.

La strana proprietà sopra menzionata altro non è che una grande sezione d'urto rispetto alla collisione con neutroni. In generale quando si dice "lenti" ci si riferisce a neutroni termici, cioè che hanno energia cinetica analoga a quella media delle molecole dell'aria a temperatura ambiente, corrispondente a 0.025 eV ($\langle E \rangle = k_B T$ con $T = 300$ K e $k_B = 8.617333 \times 10^{-5}$ eV / K costante di Boltzmann).

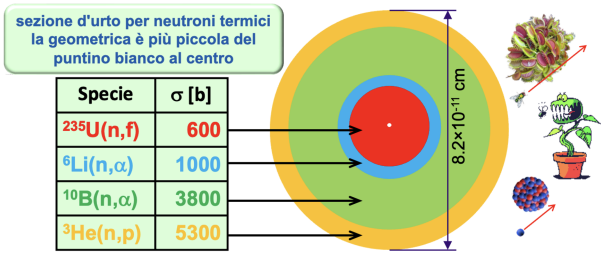


Figura 35: Sezioni d'urto di cattura per neutroni lenti dei materiali più comunemente utilizzati come convertitori. Sulla destra l'illustrazione metaforica semplificativa della cattura (si veda il testo).

Per rivelare neutroni dunque si utilizzano come convertitori dei materiali con grande sezione d'urto per neutroni che poi producano particelle cariche. Sono pochi i materiali adatti a tale scopo, principalmente ^{3}He, ^{6}Li, ^{10}B, ^{235}U. La rivelazione di neutroni è richiesta sia nel campo della ricerca fondamentale ed applicata che in diverse applicazioni industriali, mentre è sempre più importante il suo ruolo nel campo delle sicurezze e della salvaguardia nucleare. Un rivelatore di neutroni affidabile deve anche garantire una notevole insensibilità alla radiazione gamma, visto che generalmente dove ci sono neutroni sono presenti anche gamma in notevole quantità.

Il fulcro della rivelazione di neutroni è stato per parecchi anni ^{3}He, un gas prodotto artificialmente come sottoprodotto in certi reattori nucleari che, colpito da neutroni, produce un protone ed un nucleo di trizio (^{3}H) facilmente rivelabili che indicano l'avvenuta interazione di un neutrone. La sezione d'urto di tale processo è di circa 5300 b, mentre l'area geometrica del nucleo di ^{3}He sarebbe solo ≈ 0.1 b. Fintanto che ^{3}He è stato facilmente disponibile non si avvertiva la necessità di escogitare altre tecniche di rivelazione. Nel corso degli ultimi vent'anni il declino della produzione e il conseguente aumento del prezzo del ^{3}He hanno stimolato un grande sforzo internazionale alla ricerca di materiali e tecniche alternativi. Sono quindi stati esplorati metodi che sfruttano ^{6}Li, ^{10}B o ^{235}U, che hanno sezioni d'urto rispettivamente di circa 1000, 3800 e 600 b (Figura 35).

La sezione d'urto di ciascuna specie nucleare non è costante ma varia con l'energia cinetica

del neutrone incidente, essendo tanto maggiore quanto più questo è lento. Ricorro ad una metafora semplificativa per dar conto di tale effetto: immaginiamo un insetto che passi accanto ad una pianta carnivora, la probabilità di essere catturato è tanto più alta quanto maggiore è il tempo che l'insetto spende nelle vicinanze della pianta (Figura 35).

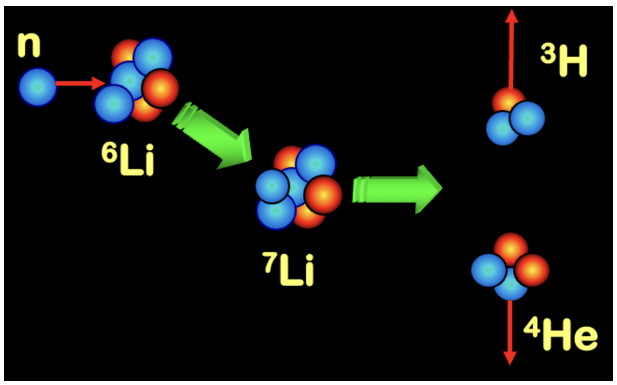


Figura 36: La reazione di cattura neutronica sul ^{6}Li.

Sebbene ^{235}U venga utilizzato in alcuni ambiti come convertitore per la rivelazione di neutroni, il suo impiego non è generalmente consentito poiché si tratta di materiale strategico potenzialmente pericoloso e dunque sottoposto a notevoli restrizioni regolate da trattati internazionali. L'attenzione si è quindi spostata sul ^{10}B e sul ^{6}Li, che presentano varie caratteristiche che rendono l'uno o l'altro più o meno vantaggioso a seconda delle applicazioni.

Non mi soffermerò sugli impieghi del ^{10}B e descriverò nel seguito la tecnica denominata SiLiF basata sul ^{6}Li che risulta più adatto per realizzare rivelatori di dimensioni medio-piccole con bassissima sensibilità alla radiazione gamma [16]. Quando il ^{6}Li cattura un neutrone il successivo decadimento, pressochè istantaneo, dà luogo all'emissione di un nucleo di trizio (^{3}H) ed uno di elio (^{4}He, anche detto particella alfa) a 180° l'uno dall'altro, entrambi di alta energia cinetica, tramite la seguente reazione (Figura 36):

$$^6\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow ^3\mathrm{H}(2.73\,\mathrm{MeV}) + \alpha(2.05\,\mathrm{MeV}) \ .$$

La tecnica SiLiF per la rivelazione di neutroni utilizza un diodo piano al silicio, tipico rivelatore per particelle cariche, sul quale si affaccia uno strato di ^{6}LiF (fluoruro di litio-6). Il LiF è molto conveniente in quanto è un sale molto stabile, contrariamente al litio puro che è altamente igroscopico si ossida molto rapidamente ed è infiammabile. In particolare, se si utilizza un diodo doppia faccia, cioè sensibile su entrambe le facce, è possibile installare due strati di convertitore e così facendo si raddoppia l'efficienza (Figura 37).

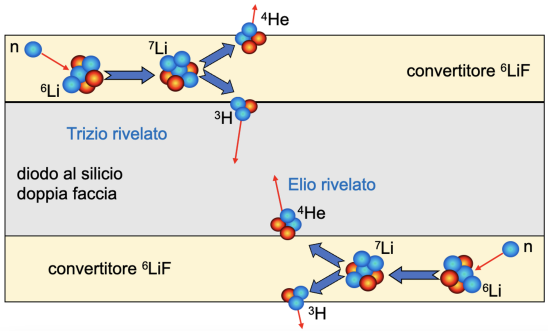


Figura 37: Schema di un rivelatore di neutroni SiLiF.

Le due particelle prodotte a seguito della cattura di un neutrone perdono parte della loro energia cinetica (cioè rallentano) attraversando il materiale convertitore, e questo limita il massimo spessore del convertitore utilizzabile: se le due particelle si fermano al suo interno non potranno poi raggiungere il silicio ed essere rivelate.

Una notevole mole di calcoli e test sperimentali ha permesso di determinare lo spessore ottimale del ^{6}LiF per ottenere il miglior compromesso tra efficienza intrinseca di rivelazione di neutroni (frazione dei neutroni incidenti che vengono rivelati) e immunità alla radiazione gamma (probabilità che un gamma venga rivelato ed interpretato come neutrone). Tale spessore è risultato essere circa 17 μm e dà luogo ad una efficienza intrinseca del 5% con una immunità ai gamma di circa 10^{-9}. In concreto: su 100 neutroni incidenti, in media 5 vengono rivelati e 95 passano indisturbati. Su un miliardo di gamma incidenti, uno viene rivelato ed erroneamente considerato neutrone.

Il sandwich ^{6}LiF-Si-^{6}LiF risulta quindi essere un buon rivelatore di neutroni ma solo per neutroni lenti, così come gli altri eventualmente basati su altri materiali convertitori. Per far sì che anche neutroni più energetici possano essere rivelati con discreta efficienza si fa ricorso a materiali moderatori (esattamente come nel caso della reazione a catena vista in precedenza), che hanno lo scopo di rallentare i neutroni incidenti in maniera che interagiscano più facilmente con

il convertitore e diventino quindi più facilmente rivelabili. La moderazione avviene per successivi rimbalzi elastici dei neutroni sui nuclei, quindi i materiali più efficienti a tale scopo sono quelli costituiti da nuclei leggeri, come evidenziato in Figura 38.

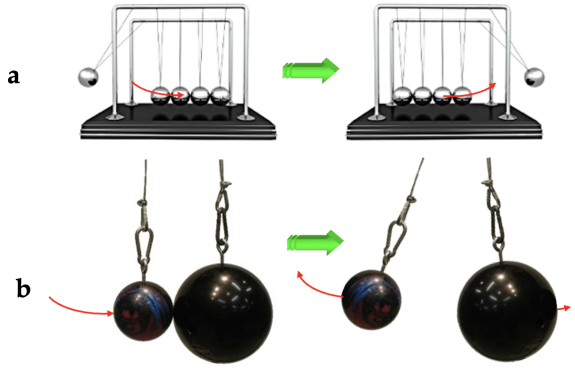


Figura 38: Moderazione. (a) La collisione con un corpo di uguale massa produce il massimo rallentamento medio, e financo l'arresto in caso di collisione frontale. (b) Collidendo con un corpo di massa molto maggiore si ottiene solo un piccolo rallentamento.

La collisione del neutrone con un nucleo di massa pressochè uguale (il protone) produce il massimo rallentamento medio e può addirittura arrestarlo in caso di collisione frontale (a), mentre collidendo con un nucleo molto pesante esso rimbalza perdendo pochissima energia cinetica (b). Poichè l'idrogeno (protoni) è gassoso, e quindi di densità bassissima, per far sì che il neutrone abbia un numero ragionevole di collisioni rallentanti se ne dovrebbero impiegare grandi volumi. Dunque è di gran lunga preferibile un moderatore solido (la densità di un gas è approssimativamente mille volte inferiore a quella di un solido). Il moderatore più comunemente utilizzato è il polietilene (PET), formula chimica $(C_2H_4)_n$, polimero costituito da idrogeno e carbonio. Calcoli analitici e simulazioni numeriche permettono di stabilire che per avere una moderazione efficace (termalizzazione) di neutroni con energia cinetica iniziale dell'ordine di diversi MeV è sufficiente un involucro in PET delle dimensioni dell'ordine di 10 cm.

In Figura 39 è illustrato lo schema di realizzazione di un rivelatore SiLiF. Il convertitore ^{6}LiF, depositato per evaporazione su un substrato in fibra di carbonio, è applicato sulle due facce di

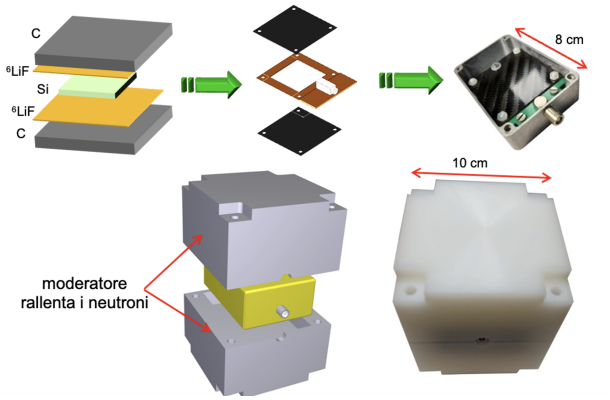


Figura 39: Schema di realizzazione di un rivelatore SiLiF.

un diodo al silicio di area 3×3 cm^2. Il sandwich è quindi assemblato all'interno di una scatoletta di alluminio che viene rachiusa dentro un moderatore cubico in PET di 10 cm di lato.

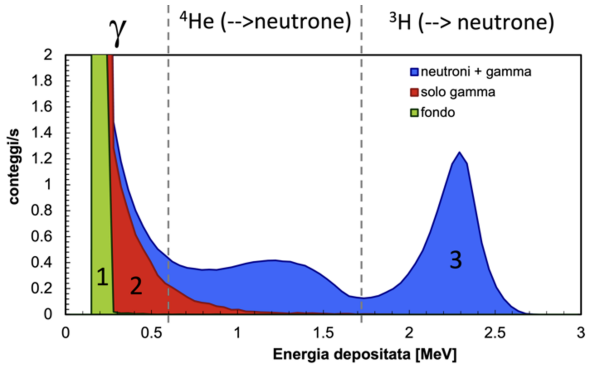


Figura 40: Spettro dei segnali prodotti dal rivelatore in tre diverse condizioni sperimentali. Si veda il testo per i dettagli.

I rivelatori SiLiF sono stati ampiamente caratterizzati utilizzando una sorgente di neutroni AmBe, cioè una miscela di ^{241}Am e ^{9}Be che tramite una particolare reazione nucleare detta $(\alpha$,n) produce sia neutroni che gamma energetici di diversi MeV. In particolare in Figura 40 si mostra lo spettro dei segnali prodotti dal rivelatore in tre diverse condizioni sperimentali:

1. acquisizione del fondo ambientale, nessuna sorgente presente;
2. acquisizione senza convertitore ma con la sorgente, che produce solo segnali dovuti a radiazione gamma;
3. acquisizione con convertitore, segnali prodotti sia da neutroni che da gamma.

A partire da 1.5 MeV in su, il contributo dei gamma diventa trascurabile, dunque si contano come neutroni solo i segnali più grandi di tale valore.

Test del sistema di monitoraggio radwaste

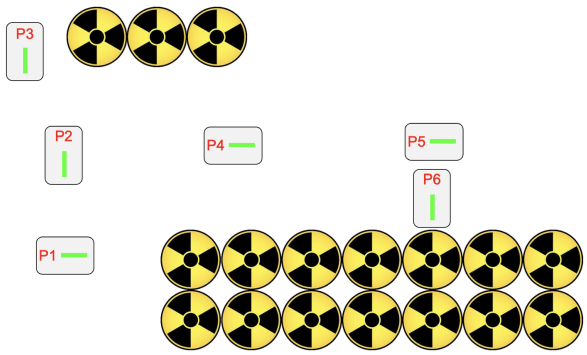


Figura 41: Test di un sensore SciFi in un deposito di ILW di SOGIN (Sessa Aurunca, Caserta).

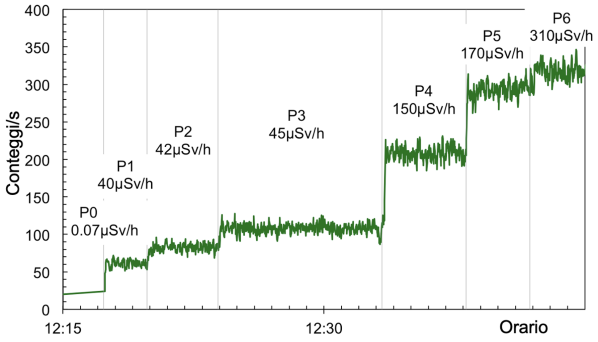


Figura 42: Tassi di conteggio e rateo di dose misurati nelle posizioni P1-P6 di Figura 41. La posizione P0 si riferisce alla misura all'esterno.

Nel corso degli ultimi anni i sensori appena descritti sono stati testati a più riprese sia con sorgenti radioattive di laboratorio che sul campo in varie configurazioni e con tutte le categorie di *radwaste*, da VLLW ad HLW e su *cask* di combustibile esaurito. In Figura 41 è riportato lo schema di una serie di misure effettuate con un sensore SciFi in un deposito di fusti di ILW. Il sensore è stato posizionato su un carrello che via via veniva spostato nelle posizioni da P1 a P6. La misura del fondo ambientale (P0) è stata effettuata all'esterno del deposito. I dati corrispondenti sono riportati nel grafico di Figura 42, assieme

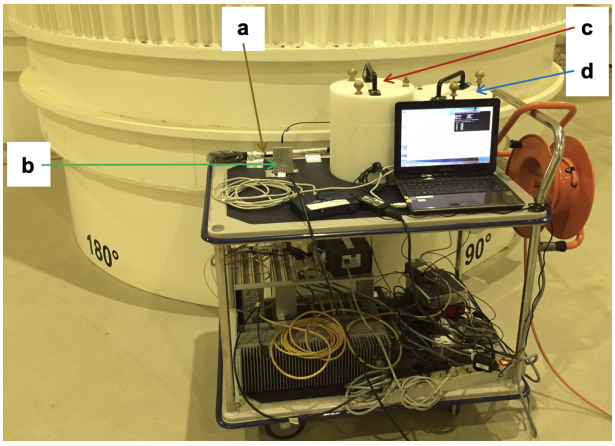


Figura 43: Configurazione dei sensori per il test su cinque *cask* di *spent fuel* nel sito di Figura 21 [7]. (a) Sensore SciFi. (b) Sensore SiLiF nudo. (c) Sensore SiLiF con moderatore di spessore 8 cm. (d) Sensore SiLiF con moderatore di spessore 4 cm.

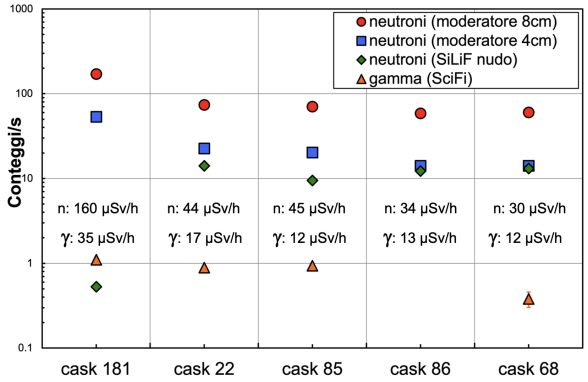


Figura 44: Tassi di conteggio misurati dai sensori di Figura 43 su cinque *cask*. Sono indicati anche i corrispondenti valori di rateo di dose di gamma e neutroni misurati con due dispositivi di riferimento.

al rateo di dose misurato con un dispositivo di riferimento.

Nel sito di stoccaggio *interim* mostrato in Figura 21 sono stati effettuati dei test su cinque *cask* di *spent fuel* con tre sensori SiLiF ed uno SciFi posizionati su un carrello. Uno dei SiLiF era nudo, gli altri due erano racchiusi in moderatori cilindrici di spessore 4 ed 8 cm (Figura 43). Sul grafico di Figura 44 sono mostrati i tassi di conteggio misurati dai sensori su ciascun *cask* e i corrispondenti valori di rateo di dose di gamma e neutroni misurati con due dispositivi di riferimento.

Nel corso del progetto MICADO [13] sono stati effettuati diversi importanti test sia con sorgenti inserite in un fusto di studio che su fusti reali di *radwaste* ILW e LLW. La configurazione prescelta

e studiata per i test è stata di 4 SciFi e 4 SiLiF attorno a ciascun fusto (Figura 45), per verificare anche eventuali asimmetrie di emissione della radiazione.

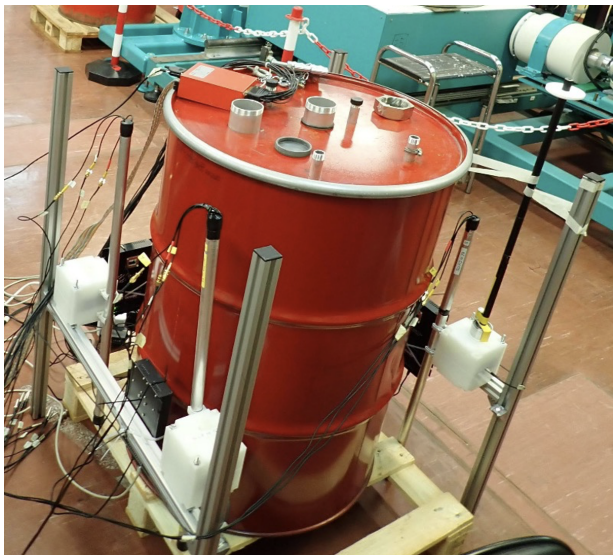


Figura 45: Il fusto di studio per il progetto MICADO nel laboratorio C43 presso ENEA Casaccia (Roma) [17]. La configurazione prescelta per i test prevedeva 4 sensori SciFi e 4 sensori SiLiF attorno a ciascun fusto.

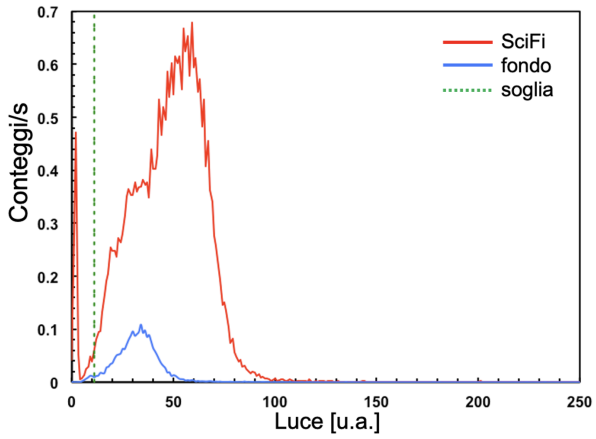


Figura 46: Spettro misurato da un sensore SciFi con una sorgente gamma di ^{137}Cs da 2 .3 MBq nel fusto di studio. In blu la misura del fondo ambientale.

In Figura 46 è riportato lo spettro misurato da uno dei sensori SciFi con una sorgente gamma di ^{137}Cs da 2 .3 MBq inserita in un alloggiamento verticale del fusto di studio. La differenza con la misura di fondo è palese. Nelle stesse condizioni, ma con una sorgente debole di neutroni da fissione spontanea (^{240}Pu, 4000 neutroni/s), si è misurato lo spettro di energia depositata in uno

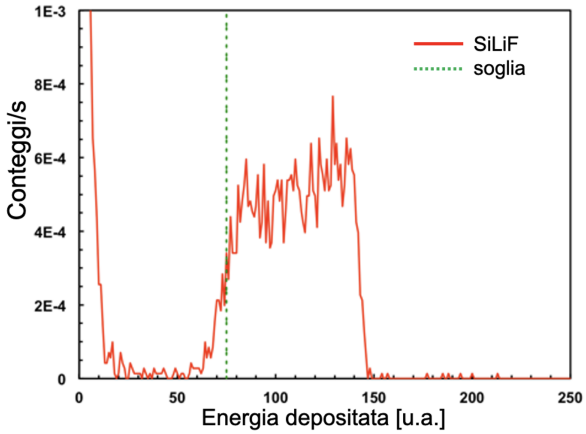


Figura 47: Spettro di energia depositata in un sensore SiLiF con sorgente debole di neutroni da fissione spontanea (^{240}Pu, 4000 neutroni/s).

dei sensori SiLiF (Figura 47). Il fondo in questo caso non era nemmeno apprezzabile. In un test

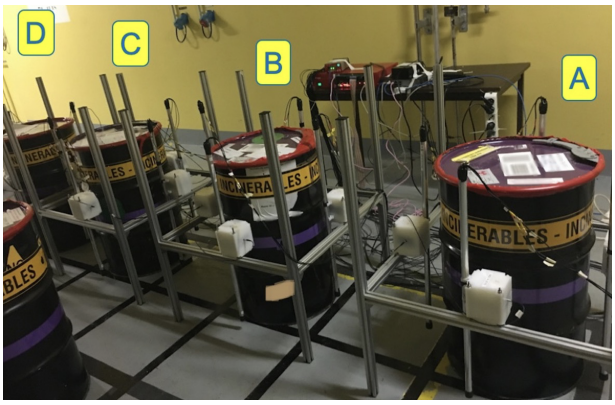


Figura 48: I 16+16 sensori SciFi e SiLiF installati intorno a quattro fusti di ILW, contenenti sia emettitori gamma che attinidi, presso un deposito di ORANO (La Hague, Francia) [11].

successivo i sensori sono stati installati intorno a quattro fusti di ILW, contenenti sia emettitori gamma che piccoli quantitativi di attinidi, soggetti a fissione spontanea e che quindi emettono neutroni (Figura 48). I risultati del test, della durata di alcuni giorni, sono riportati nei grafici di tipo radar plot di Figura 49. I sensori erano disposti in orientazione N-E-S-W (nord, est, sud, ovest). È interessante osservare che il *radwaste* nei fusti non era disposto in maniera omogenea, e questo traspare chiaramente dai grafici. In Figura 50 e Figura 51 sono riportati gli stessi dati di Figura 49 in un formato più convenzionale.

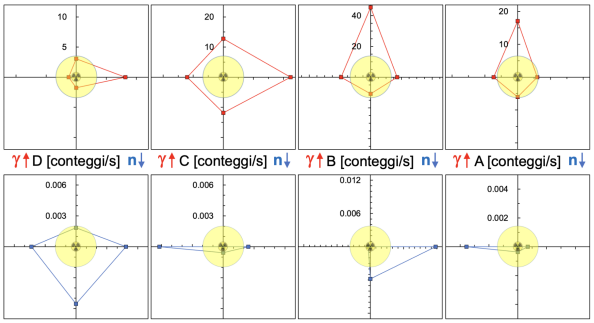


Figura 49: Radar plot con i risultati del test sui quattro fusti ILW di Figura 48. In alto i tassi di conteggio gamma, in basso i neutroni.

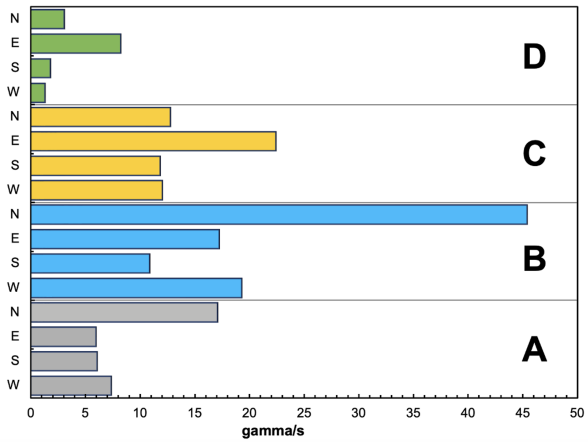


Figura 50: I dati di Figura 49 in alto, relativi ai tassi di conteggio gamma.

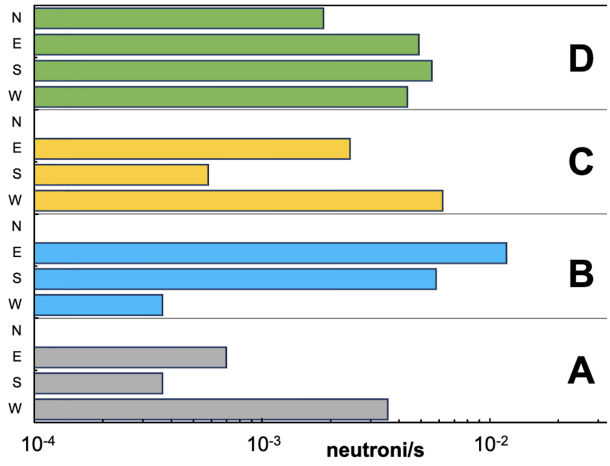


Figura 51: I dati di Figura 49 in basso, relativi ai tassi di conteggio di neutroni.



Figura 52: Il sistema di monitoraggio installato intorno a quattro fusti di LLW in un deposito di NUCLECO Casaccia (Roma) [18].

Lo stesso sistema di monitoraggio è stato poi installato intorno a quattro fusti di LLW (Figura 52) in un deposito di NUCLECO Casaccia (Roma) [18], per una acquisizione dati della durata di un mese. La Figura 53 rappresenta i radar plot relativi ai quattro fusti, i gamma a sinistra e i neutroni a destra. Come atteso i tassi di conteggio sono notevolmente inferiori a quelli relativi ai fusti di ILW. Anche in questo caso, gli stessi dati sono riportati in forma più convenzionale in Figura 54 (gamma) e Figura 55 (neutroni). La Figura 56 riassume l'andamento dei tassi di conteggio gamma per il fusto D durante il mese di misura.

Successivamente gli stessi sensori sono stati impiegati nel progetto PREDIS [14] sui rifiuti cementati, nell'ambito del quale è stato realizzato un sistema elettronico alimentato a batterie in grado di gestire una coppia SciFi+SiLiF [19]. Il sistema, comandato via connessione wireless, fornisce l'alimentazione ai sensori e provvede alla formazione dei segnali, alla loro digitalizzazione ed alla memorizzazione dei dati in una memoria locale. I dati, sfruttando la connessione wireless, vengono anche trasferiti localmente ad un computer che funge da stazione di comando e che a sua volta ne effettua una copia su un database allocato su un server remoto.

In tale configurazione i sensori possono essere programmati per effettuare una misura ad intervalli programmati, per poi passare ad uno stato di quiescenza che permette di preservare la carica delle batterie. In qualunque momento comunque i sensori possono essere risvegliati da un comando esterno tramite una connessione Bluetooth a basso consumo. La coppia di sensori e la relativa elettronica sono alloggiati su un supporto munito di ganci, che può essere installato molto rapidamente (alcuni secondi) su un fusto, riducendo i rischi radiologici per gli operatori (Figura 57).

È stato realizzato un fusto cementato di test

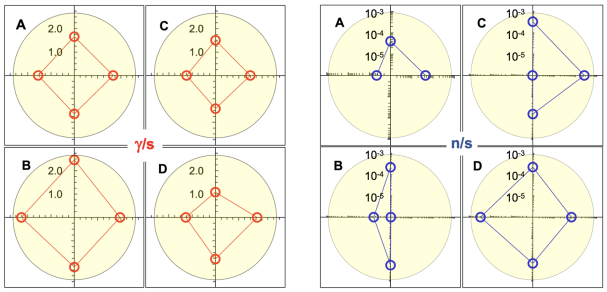


Figura 53: Radar plot con i tassi di conteggio relativi ai quattro fusti di Figura 52. I gamma a sinistra, i neutroni a destra.

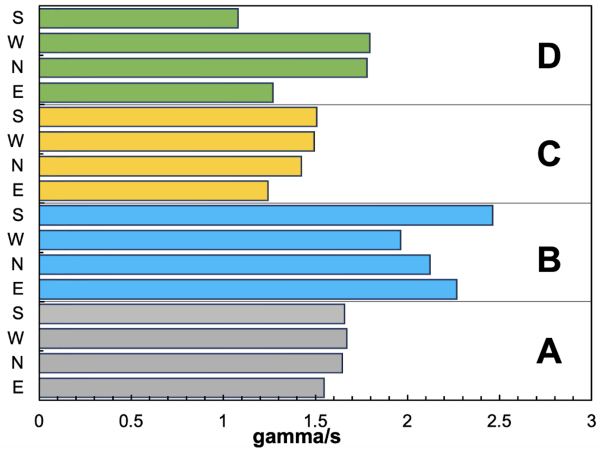


Figura 54: I dati di Figura 53 sinistra, relativi ai tassi di conteggio gamma.

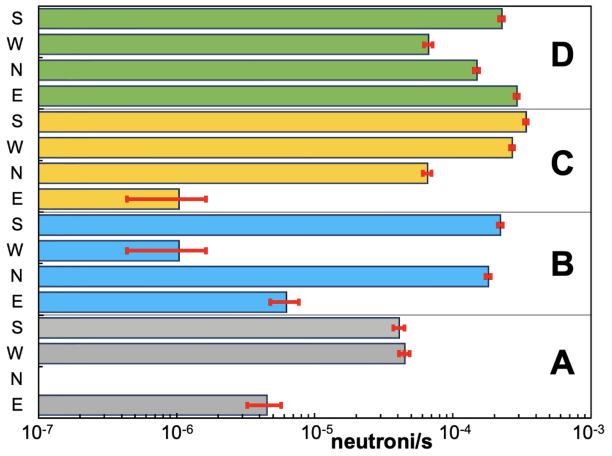


Figura 55: I dati di Figura 53 destra, relativi ai tassi di conteggio di neutroni.

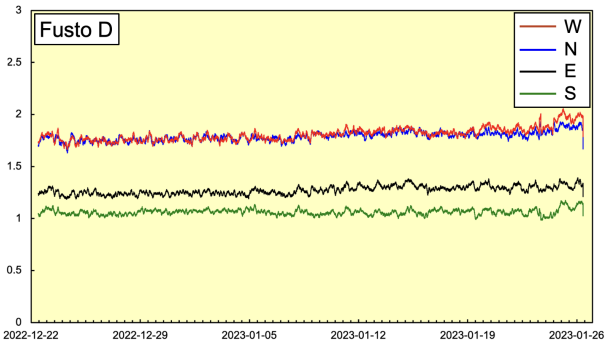


Figura 56: Andamento dei tassi di conteggio gamma per il fusto D durante il mese di misura.

con dei fori verticali, secondo lo schema di Figura 58, per poter inserire delle sorgenti di alta intensità ed ottenere delle distribuzioni non uniformi di radiazioni intorno al fusto stesso. Il fusto è stato posizionato su una piattaforma presso un deposito a UJV REZ (Praga, Repubblica Ceca) [20], equipaggiato con quattro unità wireless di sensori (Figura 59) e circondato di altri fusti cementati (Figura 60). Altri fusti, non mostrati in figura, sono poi stati disposti davanti realizzando una schermatura completa.

Nel foro centrale del fusto è stata inserita una sorgente gamma intensa di ^{137}Cs (165 MBq), ed il sistema è stato posto in acquisizione per oltre due mesi, effettuando una misura ogni 6 ore, e tutte le funzioni di controllo sono state effettuate via rete internet da 1500 chilometri di distanza. La Figura 61 mostra il plot relativo ai tassi di conteggio gamma nel corso del test, mentre la misura di neutroni, come atteso, non ha dato risultati. Il test dei sensori di neutroni è stato effettuato successivamente utilizzando una sorgente di PuBe, ed ha prodotto i risultati mostrati in Figura 62.

I sensori SciFi e SiLiF che sono stati anche testati e calibrati con successo presso laboratori internazionali come il CERN di Ginevra (Svizzera) [21] ed il PTB di Braunschweig (Germania) [22], hanno dimostrato di essere adatti per monitorare i materiali nucleari. Tale tipologia di monitoraggio presenta diversi vantaggi: riduce i rischi dell'esposizione alle radiazioni per il personale che opera nei depositi; aumenta il livello di sicurezza dei materiali nucleari, in quanto qualsiasi tentativo di manomissione, sia dei fusti che dei dispositivi, provoca un cambiamento nella risposta dei sensori; migliora la ripetibilità ed uniformità delle procedure periodiche di misura sui fusti, diversamente da quanto si ottiene con misure manuali effettuate in posizioni e distanze non definite con precisione; permette di avere una cronistoria dettagliata delle misure radiologiche sui fusti direttamente in forma digitale; i dati sul database, direttamente accessibili alle istituzioni

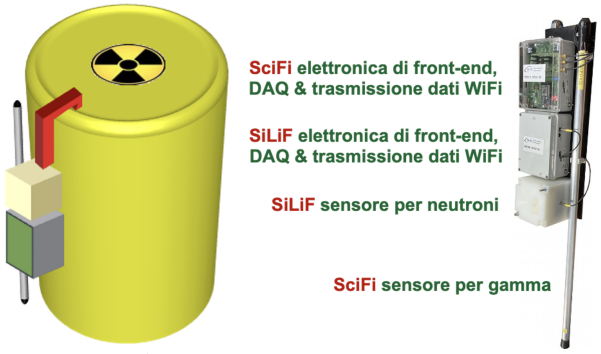


Figura 57: Schema di aggancio sul fusto (a sinistra) del sistema WiFi SciFi+SiLiF+elettronica alimentato a batteria (a destra).

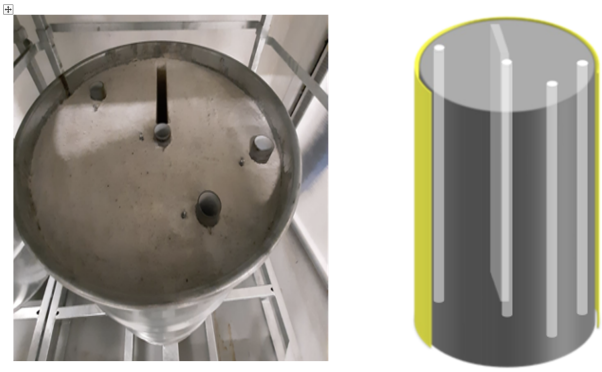


Figura 58: Fusto cementato di test con dei fori verticali per l'inserimento di sorgenti di alta intensità.

responsabili e/o debitamente autorizzate, incrementano il livello di trasparenza e permettono di effettuare agevolmente ed automaticamente delle analisi numeriche comparate.

Il deposito nazionale italiano

Da molti anni ormai si discute in Italia del Deposito Nazionale [23], infrastruttura nella quale dovrebbero essere convogliati tutti i rifiuti attualmente sparsi in varie località della penisola, all'interno di siti a volte non perfettamente idonei allo scopo (Fig. 63).

Per una descrizione completa del progetto del deposito e del Parco Tecnologico annesso si rimanda alla referenza [23], un disegno di massima recuperato sul sito web di Sogin qualche anno addietro è riportato in Figura 64. Mi preme però riportare qui alcune considerazioni che ritengo importanti. I primi passi per il deposito nazionale risalgono al 2003, ma i primi passi concreti si fecero nel 2014 con l'emissione della Guida



Figura 59: Il fusto posizionato su una piattaforma ed equipaggiato con quattro unità wireless di sensori.



Figura 60: Il fusto sulla piattaforma circondato di altri fusti cementati. Altri fusti, non mostrati, sono poi stati disposti davanti per una schermatura completa [20].

Tecnica n.29 di ISPRA [25]. Sogin pubblicò un grafico, che riporto in Figura 65 con l'aggiunta di alcune mie indicazioni, che sintetizza la procedura per giungere alla realizzazione. Il grafico ci dice che per avanzare di 10 mesi sono stati necessari 8 anni! I passi successivi, più rapidi, hanno portato ad un avanzamento complessivo di 18 mesi in 10 anni, e sempre stando al grafico di Figura 65 la realizzazione del deposito sarebbe dovuta iniziare nel 2018.

Purtroppo ad oggi in Italia pronunciare la parola "nucleare" suscita paure mai sopite, che ai piani alti della politica evocano scenari di perdita

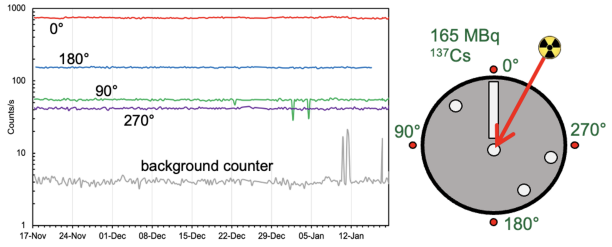


Figura 61: Tassi di conteggio gamma misurati ogni sei ore nel corso dei due mesi di test.

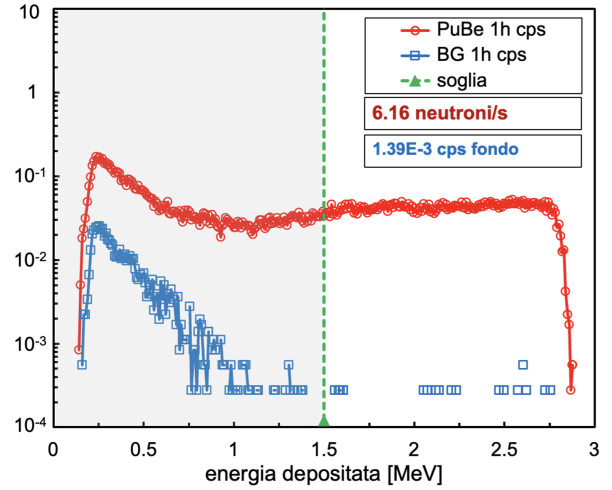


Figura 62: Test di un sensore wireless di neutroni esposto ad una sorgente di PuBe.

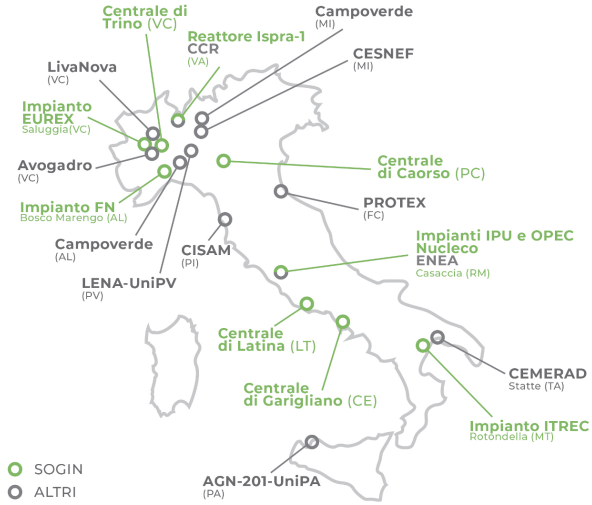


Figura 63: Centri italiani che producono e/o detengono rifiuti radioattivi (fonte [24]).



Figura 64: Disegno di massima del Deposito Nazionale e del Parco Tecnologico annesso, come riportato alcuni anni addietro sul sito web di Sogin.

di consenso. Questo sfortunatamente si traduce in inammissibili rallentamenti su un'opera di notevole urgenza e necessità, un'opera che sarebbe di grande impatto positivo per il paese e per la località destinata ad ospitarla. Infatti: gestire, sorvegliare e monitorare radiologicamente tutto il *radwaste* in un'unica infrastruttura tecnologicamente avanzata è certamente preferibile ad averli dispersi su una ventina di siti notevolmente differenti tra loro, con modalità di sicurezza differenti, con personale di esperienza e formazione diversa, con tecnologie diverse (o magari senza tecnologie); il parco tecnologico che dovrà sorgere assieme al deposito nazionale sarà necessariamente una struttura ad alto contenuto tecnologico e di ricerca, con ampie ricadute in termini di occupazione e di indotto tecnico-economico; la pericolosità dei rifiuti radioattivi è per molti versi sovrastimata, e comunque utilizzando tecniche e tecnologie avanzate oggi disponibili è possibile gestirli in maniera sicura ed affidabile.

Mi fermo qui, osservando che alla luce dei pesanti ritardi nella procedura per la realizzazione del deposito nazionale, che peraltro accordi internazionali ci obbligano a costruire, la messa in sicurezza dei nostri rifiuti di alto livello HLW in un deposito geologico rischia di avere tempi di realizzazione anch'essi geologici.

Ringraziamenti

Qui di seguito un elenco di persone che devo certamente ringraziare per il supporto e la collaborazione negli ultimi quindici anni sui temi esposti in questo saggio. Spero di non aver omesso qualcuno, se così non fosse me ne scuso anticipatamente. Gianni Ricco, Emilio Migneco, Marcello Lattuada, Marco Ripani, Eugenio Nappi, Luigi Cosentino, Alfio Pappalardo, Gianfranco Vecchio, Sergio Scirè, Massimo Barbagallo, Carlotta Scirè, Carmela Greco, Stefania Grillo,



Figura 65: Schema della procedura per giungere alla realizzazione del deposito nazionale di rifiuti radioattivi, come riportato alcuni anni addietro sul sito web di Sogin.

Martina Giuffrida, Carmelo Marchetta, Antonio Massara, Pietro Litrico, Giuseppe Passaro, Fabio Longhitano, Gaetano Elio Poma, Simone Amaducci, Gabriel Frei, Stefano Caruso, Federica Pancotti, Monica Sisti, Nadia Cherubini, Giuseppe Marzo, Luigi Lepore, Giada Gandolfo, Nicolò Ratto, Sergio Lo Meo, Matias Simonetto, Quentin Ducasse, Mauro Romoli, Michele Di Giovanni, Paolo Di Meo, Antonio Pandalone, Claudio Principe, Ernst Niederleithinger, Sabah Ben Lagha, Karel Prchal, Jakub Zaruba, Coralie Chapuzet, Thibaut Hemedinger, Eric Breuil, Maugan Michel, Camille Theroine, Anna Paola Caricato, Gianluca Quarta, Marcella Marra, Chiara Provenzano, Chiara Failla.

[1] https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Fuel-types

[2] https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Thermal-intermediate-and-fast-reactors

[3] P. Pescali: *Capire Fukushima: la lotta del Giappone, il nucleare oltre gli stereotipi.*, Lekton, Acireale (CT) (2021).

[4] https://www.oecd-nea.org/brief/brief-06.html

[5] https://www.isinucleare.it/en/radioactive-waste-management

[6] https://www.iaea.org/publications/15478/radioactive-

[7] https://www.zwilag.ch/en

[8] https://holtecinternational.com/waste-management

[9] https://www.posiva.fi/en/index.html

[10] https://skb.com/

[11] https://www.orano.group/en

[12] https://www.sogin.it/it

[13] MICADO Project. Available online: https://www.micado-project.eu/ (accessed on 23 February 2024).

[14] PREDIS Project, Euratom H2020, GA No. 945098. Available online: https://predis-h2020.eu/ (accessed on 23 February 2024).

[15] L. Cosentino, M. Giuffrida, S. Lo Meo, F. Longhitano, A. Pappalardo, G. Passaro, P. Finocchiaro: *Gamma - Ray Counters to Monitor Radioactive Waste Packages in the MICADO Project*, Instruments, 5 (2021) 19. https://doi.org/10.3390/instruments5020019

[16] L. Cosentino et al.: *SiLiF Neutron Counters to Monitor Nuclear Materials in the MICADO Project.*, Sensors, 21 (2021) 2630. https://doi.org/10.3390/s21082630

[17] https://www.casaccia.enea.it/

[18] https://www.nucleco.it/it/

[19] M. Romoli at al.: *A Wireless Gamma-Ray Monitoring System for Cemented Radwaste Drums*, Sensors, 24 (2024) 2332. https://doi.org/10.3390/s24072332

[20] https://www.ujv.cz/en

[21] https://home.cern/

[22] https://www.ptb.de/cms/en.html

[23] https://www.depositonazionale.it/

[24] https://www.depositonazionale.it/rifiuti-radioattivi/pagine/quanti-sono-i-centri-italiani-che-producono-rifiuti-radi aspx

[25] https://www.isprambiente.gov.it/it

Paolo Finocchiaro: dirigente tecnologo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania. Ha condotto per alcuni decenni esperimenti di fisica nucleare con ioni pesanti, e la sua attività, oltre che ai LNS, si è svolta al laboratorio GANIL presso Caen (Francia) ed al GSI di Darmstadt (Germania) dove ha coordinato la realizzazione di un grande multirivelatore a scintillazione per la misura di tempi di volo di particelle emesse in reazioni tra ioni pesanti. Da sempre dedito allo sviluppo di sistemi di rivelazione di radiazione, con circa 350 articoli pubblicati su riviste internazionali ed altrettante presentazioni a conferenze e scuole internazionali, da circa quindici anni si occupa di monitoraggio di rifiuti radioattivi, ed in tale ambito ha sviluppato rivelatori di radiazione gamma e neutroni a basso costo. Alcuni di tali rivelatori

vengono anche utilizzati nell'ambito del progetto NUMEN, altri sono anche possibili candidati per diagnostica medica. Parallelamente è membro della collaborazione n_TOF nella quale si occupa della misura di sezioni d'urto con fasci di neutroni al CERN di Ginevra (Svizzera).

Prevenzione e protezione dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

Francesca Duchi — *Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale INAIL*

Rosabianca Trevisi — *Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale INAIL*

Federica Leonardi — *Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro e Ambientale INAIL*

Annapaola Caricato — *Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy*

Il radon è un gas nobile radioattivo che non è avvertito dai sensi. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha classificato il radon tra le sostanze per le quali vi è evidenza di cancerogenicità sull'uomo. Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche questo gas può diffondere liberamente; tipicamente negli ambienti *indoor* la sorgente primaria è il suolo. Per questo motivo gli ambienti sotterranei, quelli situati al seminterrato e/o pianterreno possono essere maggiormente interessati dal problema.

Con l'entrata in vigore della nuova normativa di radioprotezione (D. Lgs.101/2020 s.m.i.) sono state revisionate ed estese le disposizioni sulla protezione dal gas radon nei luoghi di lavoro e sono state date per la prima volta delle indicazioni sulla protezione dal radon nelle abitazioni. In questo articolo si affrontano le principali caratteristiche e gli aspetti normativi relativi al radon.

Premessa

È noto che il radon è la sorgente che fornisce alla popolazione il maggior contributo alla dose da radiazioni ionizzanti [1]. Il radon è un gas radioattivo, che si genera nelle rocce o nei suoli per effetto del decadimento radioattivo degli elementi appartenenti alle serie dell'uranio e del torio. In questo documento si fa riferimento solo all'isotopo 222 del radon (^{222}Rn), appartenente alla serie dell'uranio-238 (^{238}U).

Dalle rocce o dai suoli, il radon può fuoriuscire all'aria aperta, ove solitamente i livelli si mantengono bassi. Diversamente, la penetrazione all'interno degli edifici fa sì che il radon possa accumularsi e raggiungere concentrazioni in aria anche molto elevate. Per tale ragione, il radon è considerato come fattore di rischio presente negli ambienti confinati (*indoor*).

Il radon può essere presente in qualunque ambiente confinato: di vita, di svago o di lavoro. In Italia la concentrazione media di radon *indoor* è di circa 70 Bq/m^3 [2], quasi il doppio del valore

medio mondiale di 40 Bq/m^3 [1] [1].

Sulla base dei dati attualmente disponibili [4] si stima che in Italia:
- le abitazioni con concentrazione di radon superiori a 200 Bq/m^3 siano circa 800.000;
- i luoghi di lavoro con livelli di radon maggiori di 300 Bq/m^3 siano circa 200.000, anche se non si ha un quadro esaustivo dell'intero territorio nazionale. Dal punto di vista degli effetti sanitari, il

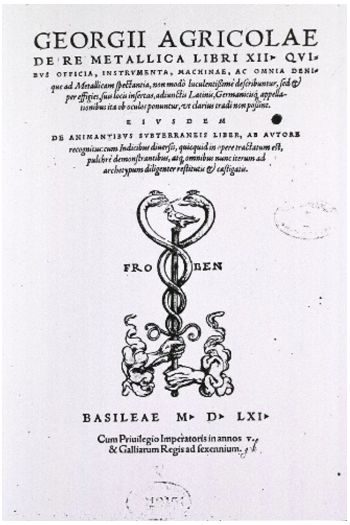

GEORGII AGRICOLAE
DE RE METALLICA LIBRI XII. QVI-
BVS OFFICIA, INSTRVMENTA, MACHINAE, AC OMNIA DENI-
que ad Metallicam spectantia, non modò luculentissimè describuntur, sed & per effigies suis locis insertas, adiectis Latinis, Germanicis, & appellationibus ita ob oculos ponuntur, vt clarius tradi non possint.
EIVSDEM
DE ANIMANTIBVS SVBTERRANEIS LIBER, AB AVTORE
recognitus cum Indicibus duobus, quicquid in operibus istarum est, pulcherrimè demonstrantibus, ac omnibus nunc iterum ad archetypum diligenter reflectus & castigatus.
FRO DEN
BASILEAE M. D. LXI.
Cum Priuilegio Imperatoris in annos v. & Galliarum Regis ad sexennium.

Figura 1: Frontespizio del *De re metallica* di Georg Agricola.

radon rappresenta il secondo agente di rischio di sviluppo di cancro ai polmoni, dopo il fumo di tabacco: gli studi epidemiologici attribuiscono al radon circa il 10% di tutti i casi di cancro polmonare (con un range di 3% - 14%), evidenziando un rischio sanitario molto più alto nei fumatori a causa di un effetto sinergico radon-fumo di tabacco che moltiplica gli effetti di ciascun singolo agente [5, 6]. L'Istituto Superiore di Sanità, ISS, ha valutato che, dei 31 mila casi di cancro ai polmoni che si registrano in Italia ogni anno, tra i 1000 e i 5500 siano attribuibili all'esposizione al radon [7].

Gli studi epidemiologici internazionali hanno evidenziato un aumento del rischio relativo di cancro al polmone statisticamente significativo al crescere del valore di esposizione al radon (dove per "esposizione al radon" si intende il prodotto della concentrazione di attività di radon in aria per il tempo di esposizione). È un dato internazionalmente condiviso che su un periodo di osservazione di 25-35 anni, si abbia un aumento del rischio relativo del 10-16% per ogni incremento di 100 Bq/m^3 della concentrazione di attività di radon in aria [8, 9]. Poiché il rischio relativo cresce linearmente al crescere dei livelli di radon, è opportuno che questi ultimi siano i più bassi ragionevolmente ottenibili [2].

La storia del radon

Il fenomeno della radioattività è stato scoperto nel 1896 da Henri Becquerel, il quale osservò che i sali di uranio avevano la capacità di impressionare una lastra fotografica pur essendo essa ricoperta con uno strato di materiale opaco alla luce.

Due anni dopo, nel 1898, i coniugi Pierre e Marie Curie scoprirono che se l'uranio era puro emetteva radiazioni in misura minore e conclusero che le impurità dovevano contenere elementi ancora più radioattivi: erano stati scoperti e isolati altri due elementi radioattivi, il polonio e il radio. Nel 1900 il fisico Dorn scoprì, infine, che i sali di radio esalavano un gas radioattivo: il radon.

Tuttavia, se risaliamo indietro nel tempo, le prime evidenze di un pericolo connesso ad un gas emesso dalle rocce, che probabilmente è il radon, sono state riscontrate in una particolare categoria di lavoratori: i minatori. Già nel I secolo a.C. Tito Lucrezio Caro scriveva [10]:

> *"Quidve mali fit ut exalent aurata metalla!! Quas hominum reddunt facies qualisque colores! Nonne vides audisve perire in tempore parvo quam soleant et quam vitaue copia desit, quos opere in tali cohiber vis magna necessis? Hos igitur tellus omnus exaestuat aestus expiratque foras in apertum promptaque caeli."*
>
> "E quali miasmi talora esalano le miniere d'oro! Come riducono le facce e gli uomini e pure i colori! Non vedi o non senti dire come sono soliti morire in breve tempo e manchino di forza vitale quelli che la grande forza costringe

[1] Una breve presentazione delle unità di misura usate per descrivere i fenomeni radioattivi e i loro effetti sui sistemi biologici si trova in Ref. [3].

[2] Principio ALARA, acronimo di As Low As Reasonably Acheivable

a tale fatica? La terra dunque sprigiona tutte queste esalazioni e le emana fuori all'aperto e nei liberi spazi del cielo."

Nel 1500 Paracelso aveva notato l'alta mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere d'argento nella regione di Schneeberg in Sassonia (Germania). L'incidenza di questa malattia, in seguito conosciuta come "malattia di Schneeberg", aumentò nei secoli diciassettesimo e diciottesimo, quando l'attività estrattiva nelle miniere di argento, rame e cobalto si intensificò.

Nello stesso periodo anche Georg Agricola ci lascia nel "De re metallica" (1556) una frase molto significativa:

> *"the dust has corrosive qualities, it eats away the lungs, and implants consumption in the body; hence in the mines of the Carpathian Mountains women are found who have married seven husbands, all of whom this terrible consumption has carried off to a premature death."*

> "la polvere ha qualità corrosive, corrode i polmoni e consuma il corpo; per questo nelle miniere dei Carpazi si trovano donne che hanno sposato sette mariti, tutti portati a morte prematura da questa terribile consunzione."

Georg Agricola infatti interrogò le vedove, diventate ormai osservatrici e testimoni delle morti dei precedenti mariti: questo è il primo esempio di epidemiologia applicata al radon. Tale malattia fu riconosciuta come cancro ai polmoni solo nel 1879 da Hearting e Hesse [11] e nel 1924 Ludewig e Lorenzer [12] e identificarono l'esposizione al radon tra le sue principali cause.

Caratteristiche chimiche e fisiche

Il radon è un gas nobile radioattivo, di numero atomico Z pari a 86, chimicamente ed elettricamente neutro. Si presenta come un gas incolore, insapore e inodore, non è avvertito dai sensi e, in condizioni atmosferiche standard, pressione di 1 atm e temperatura di 20° C, ha una densità pari a 7.5 volte quella dell'aria atmosferica. Grazie alle sue proprietà chimico-fisiche può diffondere liberamente da un materiale all'altro.

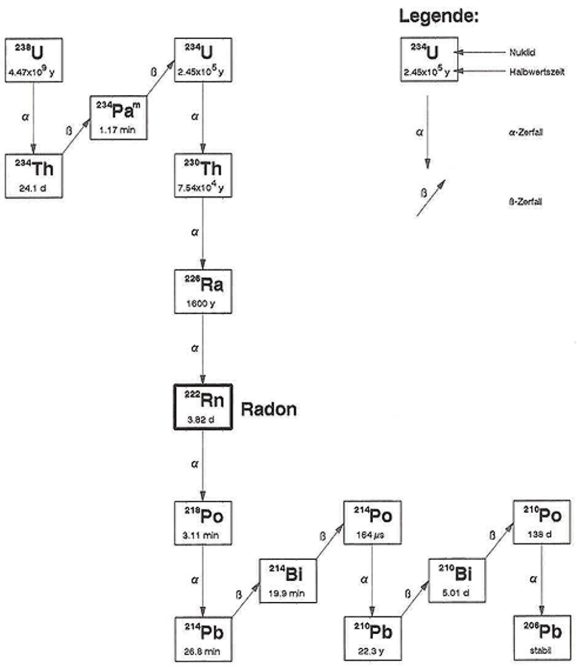


Figura 2: Catena di decadimento dell'^{238}U.

Si conoscono 26 isotopi del radon ma in natura sono presenti principalmente il ^{219}Rn , il ^{220}Rn ed il ^{222}Rn. Il ^{222}Rn è il più abbondante ed prodotto per decadimento α del ^{226}Ra, elemento appartenente alla catena (o famiglia) dell' ^{238}U (Fig. 2), un elemento definito anche "radionuclide primordiale".

Il punto di fusione del radon è -71°C, motivo per cui in tutte le applicazioni di interesse umano è presente solamente in stato gassoso.

Peso Atomico A	222
Numero atomico Z	86
Temperatura di fusione a 1 atm	-71° C
Temperatura di ebollizione	-62° C
Densità del liquido alla fusione	4.4 g/cm^3
Solubilità in acqua alla pressione di 1 atm	cm^3/kg H_2O
A 0° C	510
A 20° C	230
A 30° C	169
Viscosità alla pressione di 1 atm	g/cm s
A 20° C	229
A 25° C	233

Tabella 1: Proprietà fisiche del radon.

Il radon è moderatamente solubile in acqua e a causa di questa sua caratteristica è possibile che sia presente nelle acque che scorrono tra le rocce

e tra le sabbie. La sua solubilità dipende dalla temperatura dell'acqua e aumenta al diminuire della temperatura stessa. Ciò implica che a temperatura ambiente il radon preferisce distribuirsi in aria piuttosto che in acqua.

Gli effetti sanitari del radon

L'esposizione al radon *indoor*, ossia al gas presente in aria negli ambienti chiusi, rappresenta uno dei principali fattori di rischio di sviluppo di tumore polmonare, dopo il fumo da sigaretta. L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, già nel 1988, ha classificato il radon tra i cancerogeni accertati del gruppo 1 (gruppo che contiene 126 agenti di cui si hanno evidenze di effetti carcinogeni sugli umani – cancerogeni certi [13].

Nel 2009, a seguito di studi epidemiologici condotti in 13 paesi europei [5, 6] ed analizzati insieme ai dati di indagini in Cina e in Canada (metanalisi) è risultato che una percentuale che va dal 3 al 14% sul totale di casi di cancro polmonare è attribuibile all'esposizione al radon *indoor*. Una stima più aggiornata (2018) è fornita da Gaskin [14], al riguardo delle sole esposizioni residenziali (no luoghi di lavoro), e ci dà un valore più preciso tra il 13.6% e il 16.5%.

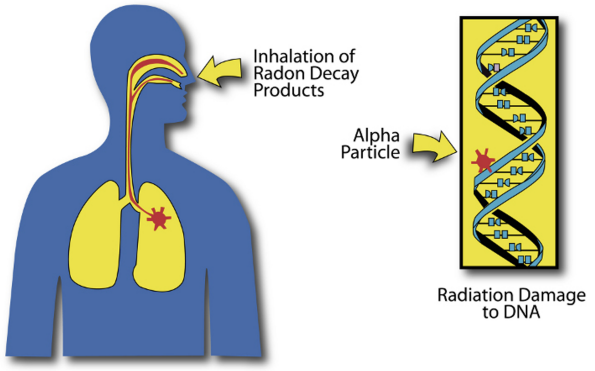


Figura 3: Schema del meccanismo di danneggiamento del DNA provocato dall'inalazione di Rn.

Per comprendere il pericolo legato al radon si deve osservare la sua catena di decadimento (si veda la Fig. 2): il ^{222}Rn decade emettendo una particella α con un tempo di dimezzamento di 3.82 giorni e genera una catena di nuclei instabili in atomi solidi pesanti e chimicamente attivi (presenti in aria come ioni 2+) fino al nucleo stabile del ^{206}Pb, denominati prodotti di decadimento o progenie.

Il radon è un gas nobile e per questo non è reattivo dal punto di vista chimico, per cui la maggior parte del gas inalato durante la fase di respirazione viene espulsa nella fase di espirazione, al contrario dei suoi prodotti di decadimento che rimangono in aria liberi o attaccati all'aerosol e una volta inalati tendono a depositarsi sulle cellule dell'epitelio bronchiale. Anche alcuni prodotti di decadimento sono α-emettitori (in particolare, il ^{218}Po e il ^{214}Po) e le particelle α emesse hanno un'elevata energia (circa 6-7 MeV/atomo) tale da poter danneggiare le catene di DNA cellulare. La maggior parte dei danni al DNA viene riparata da appositi meccanismi cellulari, ma quando i danni sono numerosi e non sono riparati correttamente, la situazione può evolvere dando origine ad un processo cancerogeno, in questo caso in tumore polmonare.

In generale, si può affermare che maggiore è la quantità di radon e dei suoi prodotti inalata, maggiore è la probabilità che qualche danno non venga riparato, soprattutto se le cellule sono esposte ad altre sostanze cancerogene. È particolarmente significativo è il contributo delle sostanze contenute nel fumo di sigaretta, primo agente di rischio per il tumore al polmone, che con il radon ha effetti sinergici quindi gli effetti dell'uno sono amplificati in presenza dell'altro; ad esempio per i fumatori attivi l'aumento di rischio associato al radon è aumentato di un fattore 25.

Il radon nei luoghi di lavoro: valutazione del rischio

Il radon è potenzialmente presente in concentrazioni variabili in ogni ambiente confinato (casa, lavoro, luogo di svago, ecc.), indipendentemente dal tipo di attività in esso svolta. L'abbondanza di questo gas infatti è legata principalmente alle caratteristiche geo-morfologiche del sito ove l'edificio è collocato e alla tipologia costruttiva dell'edificio stesso: negli ultimi decenni, le politiche sanitarie hanno dovuto lavorare all'identificazione delle situazioni "più a rischio" e per queste richiedere l'adozione di misure di prevenzione e di protezione dei lavoratori (nel caso

degli ambienti di lavoro) e della popolazione (per gli ambienti di vita).

Dal punto di vista regolatorio, l'esposizione dei lavoratori al radon è gestita come una situazione di "esposizione esistente" [3] e lo strumento decisionale è il livello di riferimento (LdR). La normativa del settore (D. Lgs. n.101/2020) ha identificato le situazioni ove è più probabile riscontrare un rischio di esposizione al radon, chiedendo per queste la valutazione del rischio come misurazione della concentrazione media annua in aria e prescrivendo l'adozione di misure correttive (interventi di risanamento) laddove i livelli riscontrati siano superiori al LdR.

Nel caso dei luoghi di lavoro, il LdR corrisponde ad una concentrazione media annua di radon in aria pari a 300 Bq/m^3. È bene rammentare che il LdR è quel valore di concentrazione oltre il quale "non è appropriato consentire le esposizioni, derivanti dalle suddette situazioni" e che "l'ottimizzazione della protezione continua a essere messa in atto al di sotto di detto livello" (D.lgs. 101/2020, art.6). Ciò vuol dire che in presenza di valori di concentrazione di radon superiori al LdR è obbligo del datore di lavoro/esercente adottare misure correttive per ridurre le concentrazioni al livello più basso ragionevolmente ottenibile, sulla base delle indicazioni tecniche degli esperti in interventi di risanamento. Tuttavia, anche laddove i livelli di radon non superino il LdR, se le condizioni lo consentono, sarebbe opportuno misurare e, se necessario, ridurre la presenza del radon a valori più bassi possibile per tutelare la salute dei lavoratori. La riduzione delle concentrazioni di radon *indoor*, infatti, è una misura di protezione di tutti gli occupanti (lavoratori e membri del pubblico).

Poiché tipicamente il suolo è la sorgente di radon che fornisce il contributo maggiore ai livelli di radon *indoor*, le attività lavorative svolte in luoghi sotterranei (miniere, gallerie, tunnel, ecc.) e quelle al seminterrato e/o pianoterra possono essere maggiormente interessate dal problema, così come le attività lavorative in cui è prevista la movimentazione di grandi volumi di acqua.

[3] Definizione 134) "situazione di esposizione esistente": una situazione di esposizione che è già presente quando deve essere adottata una decisione sul controllo della stessa e per la quale non è necessaria o non è più necessaria l'adozione di misure urgenti [15].

Specifiche tipologie di luoghi di lavoro

Ai sensi dell'articolo 16, c.1, lettera c queste sono identificate come:
- locali con impianti di trattamento per la potabilizzazione dell'acqua in vasca aperta
- impianti di imbottigliamento delle acque minerali (naturali e di sorgente)
- centrali idroelettriche

La normativa vigente [15] identifica le situazioni lavorative ove questo rischio non può essere ignorato dal punto di vista della radioprotezione e rispetto ad esse definisce degli obblighi per il datore di lavoro (Fig. 4). I luoghi di lavoro identificati dalla norma sono:

- luoghi di lavoro interrati [4];
- luoghi di lavoro situati al piano terra e al seminterrato, localizzati nelle aree prioritarie identificate dalle Regioni e dalle Provincie Autonome di Trento e Bolzano (ex art.11 D.Lgs. 101/2020 e s.m.i.);
- speciali attività lavorative identificate nell'ambito delle azioni previste dal Piano Nazionale d'Azione per il Radon (PNAR): vedi tabella 2; ;
- stabilimenti termali.

Oltre alle situazioni sopra descritte, è bene tener presente che esistono categorie di lavoratori che lavorano per un tempo limitato in una moltitudine di luoghi (*temporary workers*) come, ad esempio, gli addetti ad attività di ispezione/manutenzione di impianti posti in locali sotterranei, i lavoratori impegnati in attività di restauro o di manutenzione di siti archeologici ipogei, le guide turistiche, ecc. Per queste categorie di lavoratori è più opportuno adottare un approccio radioprotezionistico basato sulla stima individuale dell'esposizione cumulativa al radon

[4] Definizione 86-bis "luogo di lavoro sotterraneo": ai fini dell'applicazione del Capo I del Titolo IV, locale o ambiente con almeno tre pareti sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno (D. Lgs. 203/2022)

(o della dose efficace) che deve tener conto dei livelli di radon e del tempo trascorso nei diversi ambienti in cui hanno lavorato. Nella realizzazione delle azioni previste dal PNAR saranno pubblicate linee guida con indicazioni tecniche per la stima dell'esposizione cumulativa al radon e della relativa dose efficace. A tal proposito, si rammenta che un'esposizione cumulativa (2000 ore/anno) ad una concentrazione media annua di radon di 300 Bq/m^3 corrisponde ad una esposizione integrata al radon pari a 600 kBq h/m^3 e alla stima della dose da radon si applica un fattore convenzionale di conversione di 6,7 x10-9 Sv m^3/Bq h) [16].

La misurazione della concentrazione media annua di radon in aria

Secondo la normativa vigente, per valutare il rischio connesso al radon occorre che un servizio di dosimetria riconosciuto o da un organismo in possesso dei requisiti previsti dalla legge determini la concentrazione media annua di radon in aria, con le modalità riportate nell'Allegato II del D.Lgs 101/2020, il quale fornisce inoltre indicazioni circa il contenuto della relazione tecnica con la quale sono rilasciati i risultati della misurazione.

Ulteriori criteri per l'individuazione dei punti di misura sono contenuti nel PNAR [4], in particolare per quanto concerne i luoghi che possono essere esentati dalla misurazione (vedi Tab. 2)

- locali di servizio
- spogliatoi
- bagni
- vani tecnici
- sottoscala
- corridoi
- locali a basso fattore di occupazione (minore di 100 ore/anno)

Tabella 2: Luoghi di lavoro esentati dalla misurazione di radioattività.

Misure di protezione dal radon

Laddove i livelli di radon indoor superano il LdR, quale misura di protezione collettiva, è necessario introdurre accorgimenti tecnici volti ad ostacolare l'ingresso del radon nell'edificio e quindi a ridurre i valori di concentrazione negli ambienti interni. Questi accorgimenti tecnici, denominati "misure correttive", "interventi di risanamento" o "azioni di rimedio", possono basarsi su diversi approcci, la cui efficacia è documentata in letteratura. La scelta dell'intervento più idoneo per la situazione specifica è compito di una figura professionale introdotta dalla normativa vigente: **l'Esperto In Interventi di Risanamento** (EIIR), ex art.15 del D.Lgs. 101/2020. L' EIIR deve essere un professionista, con abilitazione professionale per lo svolgimento di attività di progettazione di opere edili, iscritto all'albo professionale e che abbia frequentato un corso di formazione della durata di 60 ore con verifica finale dell'apprendimento, su progettazione, attuazione, gestione e controllo degli interventi correttivi per la riduzione della concentrazione di attività di radon negli edifici.

Qualora non sia possibile adottare interventi di risanamento o quelli adottati non siano stati abbastanza efficaci da ridurre i livelli di radon al di sotto del LdR, è necessario mettere in atto misure di protezione individuale, a partire dalla valutazione della dose ricevuta da ciascun lavoratore da parte dell'**esperto di radioprotezione** (EdR). In questi casi, le stime di dose vanno confrontate con un livello di dose efficace pari a 6 mSv/anno: laddove un lavoratore è suscettibile di ricevere una dose superiore si devono adottare i provvedimenti tipici delle situazioni pianificate di cui al Titolo XI del D.Lgs. 101/2020. Qualora le dosi stimate siano inferiori a 6 mSv/anno, è previsto che l'esercente/datore di lavoro tenga sotto controllo le dosi efficaci o le esposizioni dei lavoratori, fino a che ulteriori misure correttive non riducono la concentrazione media annua di attività di radon in aria al di sotto del LdR.

Misure di prevenzione dal radon

Data l'ampia diffusione di radon, anche abitazioni e i luoghi di lavoro al di fuori del campo di applicazione della legge possono avere elevati li-

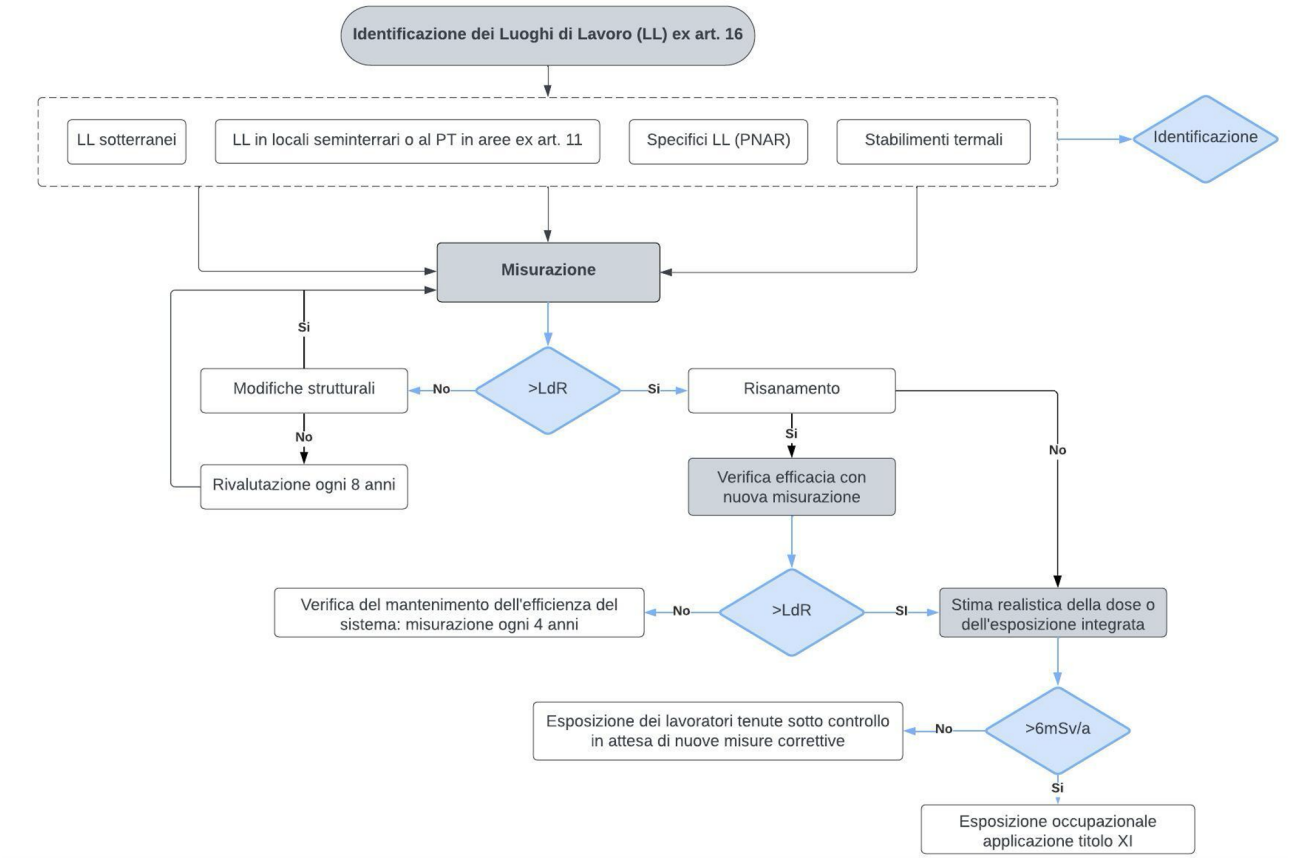


Figura 4: Schema degli adempimenti previsti dal D.Lgs. 101/2020 e smi per la protezione dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

Riferimenti normativi

- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101
- Decreto legislativo 25 novembre 2022, n. 203
- Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri 11 gennaio 2024. Adozione del piano nazionale d'azione per il radon 2023-2032. (G.U. Serie generale n. 43 del 21/02/2024)

velli di radon: ad esempio ambienti posti ai piani superiori al piano terra, così come edifici situati in aree non classificate come prioritarie. Eseguire la misurazione della concentrazione di radon, e, se necessario, adottare interventi di risanamento è una misura di prevenzione raccomandata per ogni edificio. [4]

Il rischio di esposizione al radon nel quadro della valutazione dei rischi (D.Lgs. 81/08 e s.m.i.)

L'art. 244 del D.Lgs. 101/2020 modifica il comma 3 dell'art. 180 del D.Lgs. 81/08 rendendo più chiara ed evidente la relazione tra la normativa di radioprotezione e quella più generale di salute e sicurezza sul lavoro, richiedendo esplicitamente che i documenti inerenti la valutazione del rischio di esposizione al radon siano parte integrante del documento di valutazione del rischio (DVR), ex art.17 D.Lgs. 81/08. In particolare, il DVR dovrà includere:

- la relazione tecnica delle misurazioni di radon (a cura del servizio di dosimetria);
- il documento contenente l'esito delle misurazioni (a cura dell'esercente), che laddove i livelli medi annui di radon non superano i 300 Bq/m^3 include anche la valutazione delle misure correttive attuabili;

- laddove i livelli medi annui di radon superano i 300 Bq/m^3
  - la descrizione delle misure correttive attuate, sulla base delle indicazioni dell'EIIR (a cura dell'esercente)
  - la relazione tecnica delle misurazioni di radon post-risanamento (a cura del servizio di dosimetria)
- la relazione con la stima delle dosi individuali, laddove i livelli medi annui di radon post risanamento sono ancora superiori a 300 Bq/m^3 (a cura dell'EdR).

Dalla lettura delle due norme si evince che il datore di lavoro di lavoratori esterni deve poter valutare i possibili rischi ossia il fatto che in alcuni locali era stato verificato il superamento del LdR, che delle misure correttive sono state adottate e se queste ultime hanno avuto sufficiente efficacia (art.18 c. 4 del D.Lgs. 101/2020 e art. 26 del D.Lgs. 81/08). Specie se i livelli di radon post-risanamento fossero ancora superiori ai 300 Bq/m^3, il datore di lavoro di lavoratori esterni deve, avvalendosi dell' EdR, effettuare per detti lavoratori la valutazione delle dosi efficaci annue, tenendo conto degli eventuali contributi dovuti all'esposizione in altri luoghi di lavoro.

Infine, si rammenta che, nel caso di superamento del LdR per il radon in alcuni luoghi di lavoro, l'esercente ha l'obbligo di informare gli organi di vigilanza territoriali (ASL, ARPA/APPA e INL) e il Ministero del lavoro e delle Politiche Sociali mediante l'invio di una comunicazione recante anche la relazione tecnica inerente i risultati della misurazione. Analoga comunicazione va inviata al termine della verifica di efficacia dell'intervento di risanamento (art.18 D.Lgs. 101/2020).

[1] UNSCEAR 2008 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. United Nations 2010, New York. ISBN 978-92-1-142274-0

[2] Iss 2010. *Rischio di tumore polmonare attribuibile all'esposizione al radon nelle abitazioni delle Regioni italiane* Primo rapporto sintetico (2010).

[3] G. Co': *Effetti biologici delle radiazioni,* Ithaca, XVIII - B (2021) 5.

[4] Piano Nazionale d'Azione per il Radon 2023-2032. https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/normativa/PNAR_2023_2032.pdf

[5] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, et al.: *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies.* BMJ 2005;330:223. https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63.

[6] S. Darby, D. Hill, H. Deo, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, et al.: *Residential radon and lung cancer–detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe.* Scand. J. Work Environ.

[7] https://www.epicentro.iss.it/radon/epidemiologia

[8] *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies* BMJ 2005;330:223 doi:https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63

[9] World Health Organization: *WHO Handbook on Indoor Radon a Public Health Perspective.* Int. J. Environ. Stud. (2009) https://doi.org/10.1080/00207230903556771

[10] Tito Lucrezio Caro, De Rerum Natura, Libro VI.

[11] F. H. Hearting, W. Hesse: *Der Lungenkrebs,* die Bergkrankheitin den, (1879) .

[12] P. Ludewig, E. Lorenser: *Untersuchung der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt an Radiumemanation,* Zeitschrift für Physik, 22 (1924) 178.

[13] IARC: *Man-Made Mineral Fibres and Radon; IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans* (1988) Vol. 43. 978-92-832-1243-0.

[14] J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewksi: *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon*, Environmental Health Perspectives126(2018)

[15] D.Lgs. 101/2020

[16] ICRP 2017: *Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3.,* ICRP Publication Ann. ICRP, 137 (2017) 46.

Francesca Duchi: si è laureata in Ingegneria Energetica e Nucleare all'Università "La Sapienza" di Roma con una tesi sugli effetti dell'autoassorbimento dei fotoni nelle misure di spettrometria gamma, dopo aver svolto un tirocinio presso l'Ispettorato per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione. Attualmente sta svolgendo un dottorato di ricerca presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale (DiMEILA) di INAIL Settore Ricerca e certificazione, lavorando prettamente sulla radioattività ambientale. In particolare,

fa parte del gruppo di lavoro per lo sviluppo di protocolli operativi per supportare gli esercenti del settore Oil&Gas nell'applicazione delle disposizioni previste della normativa nazionale (D.lgs. 101/2020 s.m.i.). In quest'ottica sta lavorando all'ottimizzazione del nuovo laboratorio di spettrometria gamma del Laboratorio Rischi Agenti Cancerogeni e Mutageni del "DiMEILA" (INAIL).

Rosabianca Trevisi: è Primo ricercatore presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale di INAIL Settore Ricerca e certificazione. Si occupa di sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti sia dal punto di vista della misurazione che dal punto di vista radioprotezionistico. Membro dell'Executive Board della European NORM Association (ENA) e di Technical Group "NORM" della International Radiological Protection Association (IRPA). Autrice di oltre 150 pubblicazioni su riviste nazionali ed internazionali.

Federica Leonardi: è è ricercatore presso il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale di INAIL Settore Ricerca e certificazione. Laureata in chimica, ha un dottorato di ricerca in ingegneria dei materiali ma ormai da tempo ormai si occupa di radioprotezione nell'ambito della radiazioni ionizzati di origine naturale. È docente del master di II livello in "Protezione dalle radiazioni ionizzanti" organizzato dall'Università di Roma "la Sapienza" in collaborazione con INAIL. È membro della European NORM Association (ENA) e di Technical Group "NORM" e autrice di diverse pubblicazioni scientifiche e su riviste nazionali ed internazionali.

Annapaola Caricato: è professore associato presso il Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento. Si occupa dello studio dell'interazione laser-materia per la deposizione di film sottili (organici e inorganici) e nanostrutture mediante ablazione laser per applicazioni in sensori, dispositivi optoelettronici e rivelatori nucleari. È autrice di oltre 160 pubblicazioni su riviste internazionali peer-reviewed, 6 capitoli di libri e 2 brevetti. È stata coordinatrice locale di Gruppo 5° dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). È membro di comitati di conferenze internazionali che si occupano di processi di interazione laser-materia oltre che Editor di riviste scientifiche. È esperto di radioprotezione di 3° grado. È responsabile del "laboratorio di ricerca, consulenza e servizi per radiazioni ionizzanti e non ionizzanti" del Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi".

La teoria di Enrico Fermi del decadimento β

Giampaolo Co' *Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento*
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy

In questo articolo presento il contributo di Enrico Fermi alla comprensione del processo di decadimento β del nucleo atomico. Le novità presenti nell'approccio di Fermi, rispetto alle idee del tempo, sono spesso sottovalutate. Questa presentazione ha un taglio divulgativo, il lettore interessato può trovare una presentazione ben più accurata e dettagliata dell'argomento nel recente articolo di Francesco Vissani [1].

La descrizione dei fenomeni radioattivi attorno al 1930

La scoperta della radioattività viene fatta risalire all'anno 1896 quando Antoine Henri Becquerel scoprì che delle lastre fotografiche, conservate in un cassetto, erano rimaste impressionate anche senza essere esposte alla luce.

Questo nuovo fenomeno fu oggetto immediato di molti studi. Nella seconda metà degli anni '20 del 1900, le conoscenze riguardanti i decadimenti radioattivi avevano assodato i seguenti fatti.

- Esistono tre tipologie di decadimenti radioattivi, classificati come α, β e γ in funzione della loro capacità di penetrazione nella materia. I raggi α sono i meno penetranti e così via.
- I raggi α sono nuclei di ^{4}He.
- I raggi β sono elettroni.
- La radiazione γ è di tipo elettromagnetico. È luce con energia milioni di volte maggiore rispetto a quella visibile. In termini quantistici, si tratta di fotoni aventi energia di qualche MeV.
- La radioattività è un fenomeno nucleare. L'idea dell'atomo nucleare era stata proposta nel 1911 da Rutherford, ed era stata ormai accettata dalla comunità scientifica.

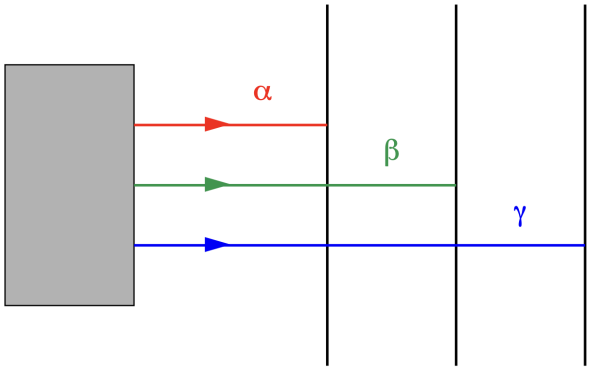


Figura 1: Classificazione dei decadimenti radioattivi in base al potere di penetrazione nella materia.

L'interpretazione dei decadimenti radioattivi consisteva, ed è ancora oggi così, nell'ipotizzare che il nucleo passi da uno stato instabile ad uno più stabile emettendo radiazione.

Problemi connessi con il decadimento β

Le quantità fisiche utili, perché misurabili, per la descrizione dei decadimenti radioattivi sono l'energia e il momento angolare, lo spin. Lo stato del nucleo genitore, il nucleo che decade, è caratterizzato da energia E_i e spin S_i. Anche lo stato del nucleo figlio possiede valori di energia E_f e spin S_f misurabili. Nel decadimento radioattivo, l'energia della radiazione è esattamente uguale alla differenza tra le energie dello stato iniziale e finale [1]

$$\omega_{if} = E_i - E_f \quad . \tag{1}$$

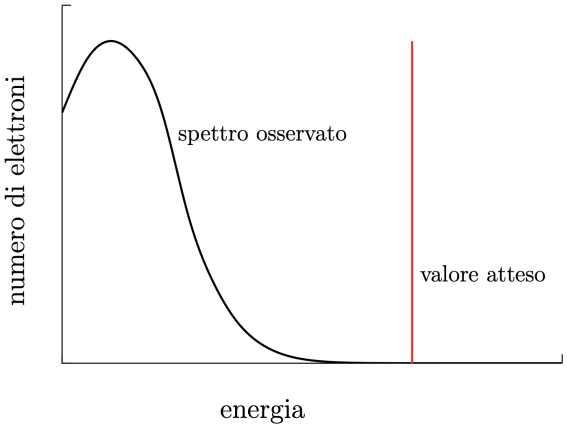


Figura 2: Spettro energetico degli elettroni emessi nel decadimento β.

Questa relazione è verificata per i decadimenti α e γ ma per gli elettroni del decadimento β la situazione è molto diversa, come illustrato nella Figura 2. Per ogni tipo di decadimento, anziché osservare un unico valore dell'energia, come previsto dall'Eq. (1), si osserva una distribuzione continua di energie, tutte inferiori al valore atteso.

Al problema di non conservazione dell'energia se ne aggiunge un altro legato alla conservazione dello spin. Nel mondo microscopico, ogni particella possiede uno spin, quantità che non ha analogo nel mondo macroscopico. Lo spin delle particelle si comporta come un momento angolare. Nel mondo microscopico i momenti angolari possono assumere solo valori interi o semi-interi di una quantità $\hbar = h/2\pi$, dove h è la costante di Planck.

I momenti angolari sono (pseudo)vettori e la loro composizione rispetta le regole di composizione dei vettori con, in aggiunta, il vincolo che anche i valori della composizione dei momenti angolari deve assumere valori interi o semi-interi di $\hbar$. Le regole di composizione dei momenti angolari in Meccanica Quantistica, sono più complicate di quelle che si usano in fisica classica. Rimane il fatto che anche i momenti angolari sono conservati. Questo significa che la composizione di un numero dispari di spin semi-interi produce un risultato che deve avere un valore semi-intero in unità $\hbar$, e una composizione di un numero intero di spin semi-interi produce un risultato intero, sempre in unità di $\hbar$. Questo risultato era contraddetto dal decadimento β.

Consideriamo, ad esempio, il decadimento β del neutrone, che nel vuoto ha una vita media di circa 15 minuti,

$$n \longrightarrow p + e^- \quad .$$

Il neutrone, n, il protone, p e l'elettrone, e^-, sono particelle che hanno spin $1/2$. Quindi lo spin della particella che decade è semi-intero, mentre la somma degli spin dei prodotti del decadimento, in qualsiasi modo si compongano, risulta avere valore intero.

Queste difficoltà spinsero Niels Bohr, premio Nobel in Fisica nel 1922, a mettere in discussione addirittura il principio di conservazione dell'energia che, secondo lui, nel mondo microscopico aveva un valore puramente statistico e non assoluto, cioè valido per ogni singolo evento. D'altra parte, gli esperimenti sui decadimenti α e γ indicavano chiaramente che l'energia era conservata in ogni singolo evento.

La prima testimonianza scritta di come si potesse superare il problema è una buffa lettera che, nel dicembre 1930, Wofgang Pauli inviò ai partecipanti di un congresso a Tübingen, al quale non poteva essere presente perché invitato ad un ballo a Zurigo.[2]

In questa lettera, Pauli fa l'ipotesi che durante il decadimento β, insieme all'elettrone, venga

[1] Nell'espressione (1) si dovrebbe anche considerare l'energia di rinculo del nucleo figlio. Quest'ultima è almeno tre ordini di grandezza inferiore a ω_{ij} e viene normalmente trascurata.

[2] Il testo della lettera, tradotto in italiano, può essere trovato in [2].



Figura 3: Foto di gruppo del Congresso di Fisica Nucleare di Roma 11-18 Ottobre 1931. In prima fila (da sinistra a destra): Robert Millikan, Arthur Compton, Marie Curie, Guglielmo Marconi, Niels Bohr. Dietro a Marconi, in terza fila c'è Fermi che parla con Paul Ehrenfest.

emessa anche una particella di spin $1/2$ e priva di carica, quindi invisibile ai nostri rivelatori. Questo risolverebbe entrambi i problemi della conservazione dell'energia e quello dello spin. Pauli definisce **conservazione della statistica** quest'ultimo problema.

La differenza tra le energie iniziale e finale dell'equazione (1) sarebbe data dalla somma dell'energia dell'elettrone E_e e quella di questa particella elettromagneticamente neutra E_ν

$$\omega_{if} = E_e + E_\nu \quad .$$

Rivelando solo E_e, è evidente che si osservi uno spettro continuo di valori il cui massimo è proprio ω_{if}, il valore atteso.

Anche il problema della statistica degli spin sarebbe risolto perché nello stato finale abbiamo due particelle a spin $1/2$ la cui combinazione degli spin è intera, conservando la statistica. Nell'esempio del decadimento del neutrone lo stato finale è composto da tre particelle a spin semi-intero che si compongono in uno spin totale semi-intero come quello del neutrone.

Per discutere di queste questioni, legate alla struttura del nucleo atomico, Fermi organizzò un Congresso internazionale di Fisica Nucleare che si tenne a Roma dall'11 al 17 Ottobre del 1931. Il congresso fu gestito dall'Accademia d'Italia e finanziato dalla Fondazione Alessandro Volta, una istituzione fondata dalla società Edison di elettricità. L'occasione fu sfruttata dal fascismo per un'operazione propagandistica sull'apertura culturale del regime: lo stesso Mussolini intervenne alla seduta inaugurale del congresso e ricevette i congressisti a palazzo Venezia.

Pauli era molto cauto rispetto alla sua proposta, e racconta la situazione in una lettera inviata, anni dopo, a Franco Rasetti [3].

> "Ho parlato per la prima volta di una particella neutra, per salvare il principio di conservazione dell'energia nel decadimento β, al convegno di fisica

di Pasadena nella primavera del 1931. Niente tuttavia venne pubblicato nel *Bullettin of the National Academy of Science* per mia precauzione [...] Poi ne parlai a Roma al congresso di Fisica Nucleare, dove c'erano praticamente tutti i fisici più famosi (*Horribile dictu*: Là ho dovuto anche stringere la mano a Mussolini. Perdonami di ciò.) [...] In contrasto con Bohr, Fermi era molto a favore della mia nuova idea e fu lui che inventò il nome neutrino [3] in questo congresso, ovviamente per distinguerlo dal neutrone pesante. [...] In una discussione durante il congresso Fermi mi chiese di parlare della mia nuova idea, ma io ero ancora molto cauto e al congresso di Roma non ne parlai in pubblico, ma solo privatamente. "

In un congresso a Parigi nel Luglio 1932 Fermi, invitato a presentare un intervento sullo "Stato attuale della Fisica Nucleare", accennò all'ipotesi del neutrino proposta da Pauli al congresso di Roma dell'anno precedente.

Nel 1932 l'identificazione del neutrone da parte di James Chadwick convinse Ettore Majorana a sviluppare una teoria del nucleo composto da protoni e neutroni legati tra loro da una interazione nuova rispetto a quella elettromagnetica e gravitazionale: l'interazione nucleare forte [6].

Fermi partecipò alla 7^a Conferenza Solvay nell'Ottobre del 1933 e in quella occasione Pauli presentò la sua idea sull'esistenza del neutrino con maggiore convinzione che nel congresso di Roma, perché, come ricorda in una lettera a Rasetti [3]

"... dopo la scoperta del neutrone mi era diventato chiaro che non solo la conservazione dell'energia ma anche la conservazione dello spin (e della statistica) rendevano necessaria, nel decadimento β, l'esistenza di una nuova particella di spin semi-intero [il neutrino]. Capii quindi che le mie precauzioni non erano più giustificate. Ne parlai di nuovo al congresso Solvay a Bruxelles (con Fermi e Bohr di nuovo presenti) e questa volta il mio intervento fu pubblicato."

Stimolato dalle discussioni avvenute al congresso di Bruxelles, Fermi completò il lavoro sul decadimento β. Rasetti ricorda [3]

"Nell'autunno del 1933 Fermi ci mostrò un articolo che aveva meditato e scritto nelle prime ore del mattino da parecchi giorni, già in forma completa di tutti gli sviluppi matematici, su una teoria dell'emissione dei raggi β fondata sull'ipotesi di Pauli del neutrino, dalla quale si deducevano risultati precisi sulle caratteristiche quantitative del fenomeno. Poche teorie della fisica moderna sono state così originali, così feconde di risultati [...] come la teoria di Fermi dei raggi β, che ancora oggi domina non soltanto l'ordinario processo β (che rappresenta la trasformazione di un neutrone in un protone con la creazione di un elettrone e un neutrino) ma anche numerose trasformazioni di particelle instabili."

Segrè ricorda quanto Fermi andasse fiero di questo lavoro [3]

"Fermi espose la sua teoria ad alcuni di noi durante una vacanza nell'inverno del 1933, in Val Gardena, dopo una giornata di sci. [...] Era pienamente consapevole dell'importanza del suo lavoro e disse che quello sarebbe stato il suo capolavoro, ricordato dalla posterità, certo il meglio di quanto aveva fatto fino ad allora."

Fermi inviò la prima versione dell'articolo sul decadimento β alla rivista `Nature`, di carattere generalista, che tuttora si contende con `Science` il titolo della più accreditata vetrina della ricerca scientifica d'avanguardia. `Nature` rifiutò di pubblicare l'articolo perchè [5]

"contenente speculazioni troppo remote dalla realtà per poter interessare i lettori."

[3] Una storia dettagliata di come sia nato il nome neutrino può essere trovata in [4].

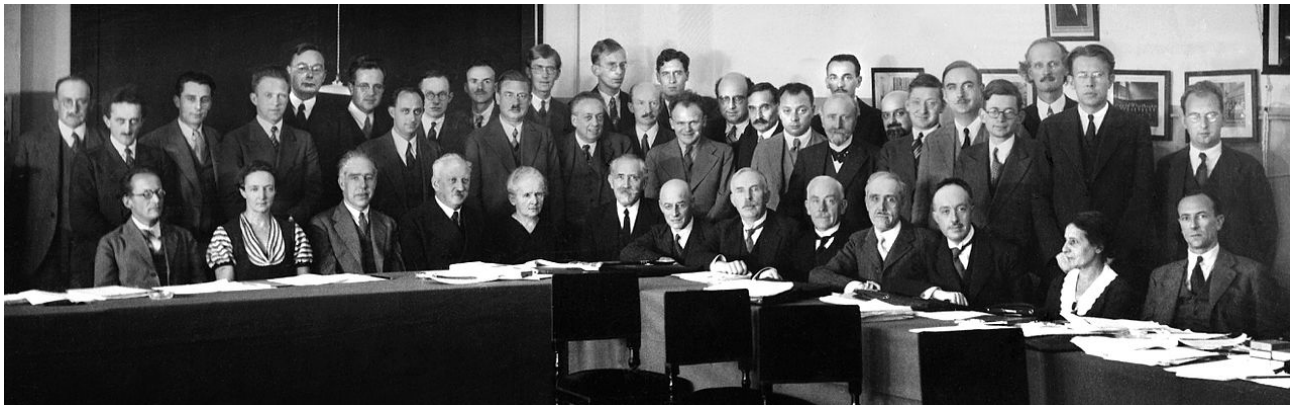


Figura 4: Foto di gruppo della 7^a Conferenza Solvay Bruxelles, 22-29 Ottobre 1933. Seduti da sinistra a destra: Erwin Schrödinger, Irène Joliot-Curie, Niels Bohr, Abram Ioffe, Marie Curie, Paul Langevin, Owen Willans Richardson, Lord Ernest Rutherford, Théophile de Donder, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Lise Meitner, James Chadwick. In piedi, da sinistra a destra: Émile Henriot, Francis Perrin, Frédéric Joliot-Curie, Werner Heisenberg, Hendrik Anthony Kramers, Ernst Stahel(de), Enrico Fermi, Ernest Walton, Paul Dirac, Peter Debye, Nevill Francis Mott, Blas Cabrera y Felipe, George Gamow, Walther Bothe, Patrick Blackett, M.S. Rosenblum, Jacques Errera, Edmond Bauer, Wolfgang Pauli, Jules-Émile Verschaffelt, Max Cosyns, Édouard Herzen, John Douglas Cockcroft, Charles Drummond Ellis, Rudolf Peierls, Auguste Piccard, Ernest Lawrence, Léon Rosenfeld.

Il rifiuto di pubblicare il lavoro di Fermi del 1934 è considerato uno dei maggiori infortuni editoriali della lunga esistenza della rivista.

Fermi fu piuttosto infastidito da questo rifiuto ed inviò una versione preliminare del lavoro alla rivista `Ricerca Scientifica` [7] e poi una versione più completa al `Nuovo Cimento` [8] e una traduzione parola per parola a `Zeitschrift für Physik` [9]. [4]

La teoria di Fermi fu immediatamente accettata dalla comunità scientifica, e utilizzata per lo studio dei decadimenti beta del nucleo e anche per descrivere fenomeni subnucleonici legati all'interazione nucleare debole.

Il neutrino fu identificato nel 1956, due anni dopo la morte di Fermi, da Clyde Cowan e Fred Reines in un esperimento eseguito presso il reattore a fissione di Savannah River [10].

L'articolo di Fermi

Il titolo dell'articolo è molto modesto indicando come "tentativo" la teoria presentata. Nel primo paragrafo, Fermi presenta i problemi osservativi legati al decadimento β e chiarisce che lavora all'interno della proposta di Pauli in cui nel decadimento vengono emessi elettrone e neutrino [5]. Fermi accenna al fatto che sulla base del principio di indeterminazione di Heisenberg elettroni e neutrini non possono essere confinati nel nucleo. E quindi, sempre citando Heisenberg, considera l'ipotesi che il nucleo sia composto da protoni e neutroni. Quindi ipotizza che elettrone e neutrino vengano creati durante il processo di decadimento in analogia a ciò che accade con i fotoni nel decadimento γ.

A questo punto, formula le tre ipotesi su cui si fonda i suo lavoro. L'ipotesi $a)$ è quella di non considerare fisso il numero di elettroni e neutrini, ma di ritenere che questi vengano creati durante il processo di decadimento. Afferma che

> "Questa possibiltà non ha per altro alcuna analogia con la possibilità della creazione o della distruzione di una coppia elettrone-positrone . . . "

Discute di quest'ultimo caso in termini di mare di Dirac in cui il positrone risulta essere una lacuna e quindi il numero totale "(infinitamente grande)" di elettroni si conserva.

L'ipotesi $b)$ considera protoni e neutroni come fossero una sola particella distinta da nume-

[4] È interessante notare che oggi queste due riviste si sono fuse in una rivista: `European Physics Journal`.

[5] F. Vissani [1] fa notare che, almeno nella sua visione iniziale, W. Pauli riteneva che neutrino ed elettrone fossero presenti nel nucleo. Infatti nella famosa lettera del 1930 dice esplicitamente ". . . possibilità che nei nuclei possano esistere particelle neutre."

ri quantici differenti utilizzando il formalismo dell'isospin formulato da W. Heisenberg [11].

L'ipotesi c) indica la necessità di descrivere in maniera unificata sia le particelle che chiama pesanti (protone e neutrone) sia quelle leggere (elettrone e neutrino) e afferma che

> "... ogni transizione da neutrone e protone deve essere accompagnata dalla creazione di un elettrone e neutrino; e che il processo opposto, trasformazione di un protone in neutrone, sia accompagnato dalla sparizione di un elettrone e di un neutrino."

Nel secondo paragrafo dell'articolo Fermi presenta gli operatori di creazione e distruzione introdotti da Jordan e Klein [12] per fornire una formalizzazione elegante della teoria della radiazione di Dirac [13]. La rappresentazione che Fermi ne dà è quella oggi adottata dalla maggior parte dei testi di Teoria dei Campi. Quello di Fermi è il primo lavoro in cui questo formalismo è usato per descrivere la creazione di particelle massive e a spin semi-intero [1].

Usando questi operatori, Fermi descrive il sistema delle particelle pesanti, il nucleo, in termini non relativistici. Siccome le energie cinetiche delle particelle leggere, elettrone e neutrino, sono confrontabili con le loro masse a riposo, Fermi descrive il loro sistema utilizzando il formalismo relativistico di Dirac che implica l'uso di quadrivettori.

Dopo aver descritto separatamente i sistemi delle particelle pesanti e di quelle leggere introduce l'interazione tra questi due sistemi. Questo termine di interazione è scritto nella forma più semplice possibile in termini di operatori di creazione e distruzione in modo che l'espressione soddisfi le regole delle simmetrie spazio-temporali e garantisca la conservazione della quantità di moto.

Per calcolare la probabilità di transizione, Fermi stima che all'interno del nucleo le densità di probabilità di trovare elettrone e neutrino sono essenzialmente costanti. Inoltre, considera che il neutrone si trasformi in protone senza che questo modifichi la sua posizione nel nucleo. Chiama "permesse" queste transizioni anche se afferma chiaramente che questo nome non implica che non ce ne siano di altro tipo. Questa terminologia è usata ancora oggi. Fermi non considera il fatto che durante la transizione lo spin del neutrone che decade possa cambiare direzione. Queste transizioni "permesse" senza cambio di spin sono chiamate ancora oggi "transizioni di Fermi". Le transizioni "permesse" in cui lo spin del neutrone cambia direzione sono dette "transizioni di Gamow-Teller".

È interessante notare che nel considerare la

L'esperimento KATRIN

L'esperimento KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) è progettato per misurare la massa del neutrino elettronico osservando con grande accuratezza la distribuzione energetica degli elettroni emessi nel decadimento β del nucleo di trizio ^{3}H nella regione di massima energia: esattamente il procedimento indicato da Fermi. Il contenitore dello spettrometro è stato costruito a Deggendorf in Baviera e doveva essere trasportato a Karlsruhe che dista 350 km. Purtroppo le sue dimensioni erano tali che il trasporto per le autostrade non era possibile, e anche i canali navigabili che collegano il Danubio al Reno erano troppo stretti. Per questa ragione, il rivelatore è stato trasportato per via d'acqua scendendo il corso del Danubio fino al Mar Nero, quindi percorrendo il Mediterraneo, l'oceano Atlantico, fino a Rotterdam, quindi ha disceso il fiume Reno fino a Karlsruhe, e ha percorso via terra solo gli ultimi 7 km di un viaggio lungo 8600 km.



Figura 5: Passaggio del *tank* dello spettrometro di KATRIN nella cittadina tedesca di Eggenstein-Leopoldshafen durante il trasporto avvenuto nel 2006.

transizione tra neutrone e protone con l'ipotesi sopra indicata Fermi si preoccupa del principio di esclusione di Pauli:

> "Nel nucleo si deve dunque avere uno stato neutronico occupato abbastanza elevato al di sopra di uno stato protonico libero perché l'emissione sia possibile."

Nel paragrafo 7 dell'articolo, Fermi si occupa degli effetti della massa del neutrino, indicando un metodo per una sua eventuale misura che consiste nell'osservare l'andamento dello spettro elettronico vicino al valore massimo dell'energia. Questa metodologia è quella utilizzata oggi per le misure più accurate del valore della massa del neutrino, che attualmente la collaborazione KATRIN (vedi il riquadro) indica con un limite superiore di 0.8 eV [14]. [6]

A questo punto, Fermi corregge la descrizione del moto dell'elettrone, che prima ha considerato come particella libera, inserendo l'interazione elettromagnetica con il nucleo. Definisce una funzione che corregge il moto della particella libera, funzione che ancora oggi, nei manuali di Fisica Nucleare, è chiamata funzione di Fermi.

Prima di confrontare la sua teoria con i dati sperimentali, Fermi stima l'intensità di quelle transizioni da lui definite "non permesse", trovando che "sono circa 100 volte meno intense di quelle normali".

L'ultimo paragrafo dell'articolo è dedicato al confronto con i dati sperimentali disponibili all'epoca [16]. Fermi scrive:

> "Nel complesso si può concludere da questo confronto tra teoria ed esperienza che la concordanza è certo altrettanto buona quanto si sarebbe potuto attendersi."

Attribuisce le discrepanze sia all'imprecisione nelle misure, ma anche ai dettagli numerici dei calcoli. Ad ogni modo, questi calcoli gli permettono di stimare l'ordine di grandezza dell'intensità dell'interazione tra particelle pesanti e leggere.

> "Riassumendo sembra giustificato affermare che la teoria, nella forma in cui la abbiamo qui esposta, si trova in accordo con i dati sperimentali, i quali per altro non sono sempre molto precisi. Se anche del resto, in un ulteriore confronto della teoria con l'esperienza, si dovesse arrivare a delle contraddizioni, sarebbe sempre possibile modificare la teoria senza alterarne essenzialmente i fondamenti concettuali. [...] Solo un ulteriore sviluppo della teoria, come anche un aumento nella precisione dei dati sperimentali, potranno indicate se una tale modificazione si renderà necessaria."

L'eredità di Fermi

Nel lavoro pubblicato sul `Nuovo Cimento` Fermi non parla esplicitamente di una nuova interazione fondamentale, quella che oggi chiamiamo interazione nucleare debole. D'altra parte fornisce una stima quantitativa dell'intensità dell'interazione tra le particelle leggere e pesanti. Di fatto, questo è il primo lavoro in cui si mette in evidenza l'esistenza dell'interazione debole.

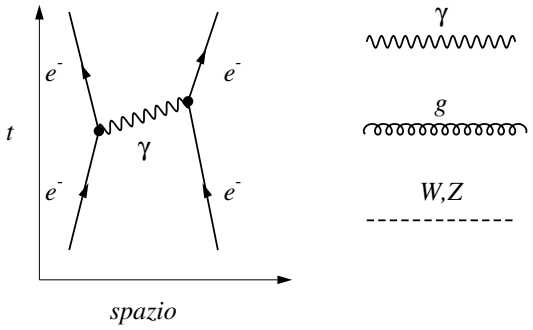


Figura 6: A sinistra: diagramma in cui due elettroni interagiscono elettromagneticamente scambiandosi un solo fotone. A destra: simboli comunemente usati nei diagrammi per identificare i fotoni γ, i gluoni g, mediatori dell'interazione forte, e $W^{\pm}$ e Z^0, mediatori dell'interazione debole.

Oggi, il modo di descrivere la fenomenologia delle interazioni fondamentali è molto differente rispetto all'approccio usato da Fermi. L'idea è che le interazioni fondamentali siano media-

[6] Anche l'esperimento HOLMES, situato presso i laboratori di criogenia dell'Università Milano Bicocca, è pensato per effettuare una misura della massa del neutrino osservando lo spettro di emissione del nucleo ^{163}Ho con tecniche criogeniche. L'obiettivo dell'esperimento è quello di raggiungere una sensibilità di 0.1 eV. [15].

te dallo scambio di particelle a spin intero. Ad esempio, due elettroni che interagiscono elettromagneticamente si scambiano fotoni. La Figura 6 presenta un diagramma in cui i due elettroni si scambiano un solo fotone. I mediatori dell'interazione forte sono i gluoni e quelli dell'interazione debole i bosoni $W^{\pm}$ e Z^0. Mentre fotoni e gluoni hanno massa nulla, $W^{\pm}$ e Z^0 sono molto massivi, il $W^{\pm}$ circa 80 volte più massivo del protone e lo Z^0 circa 90.

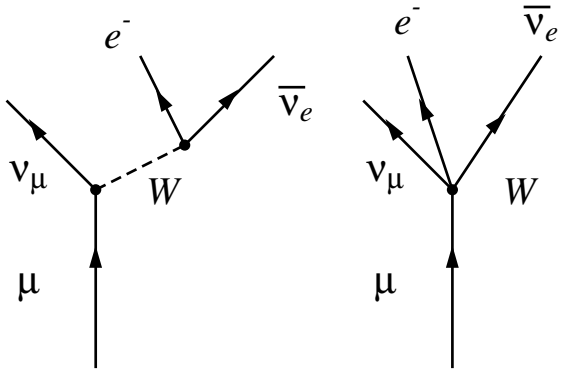


Figura 7: Diagrammi che descrivono il decadimento debole del muone, A sinistra il diagramma nella teoria fondamentale, a destra la sua semplificazione nella teoria di Fermi.

Il fenomeno più semplice per lo studio dell'interazione debole è il decadimento del muone. Il muone, μ, è una particella fondamentale, cioè priva di struttura interna, sensibile solo alle interazioni debole ed elettromagnetica. Ha una massa circa 200 volte maggiore di quella dell'elettrone. Si tratta essenzialmente di un elettrone molto più massivo che, per il tramite dell'interazione debole, decade secondo lo schema indicato nella Figura 7.

Il diagramma a sinistra descrive il decadimento del muone secondo la moderna trattazione. Il muone, una volta creato, viaggia libero e in un certo istante, mediamente dopo circa 2.2×10^{-6} secondi, emette un W^- e si trasforma in elettrone. Il W^- a sua volta viaggia e, dopo un tempo molto più breve, decade creando una coppia elettrone e (anti)neutrino elettronico. In questo processo sono coinvolte solo particelle prive di struttura interna e non ci sono complicazioni legate all'interazione forte come nel caso del decadimento del neutrone.

Il percorso del W^- è essenzialmente descritto dall'espressione

$$g \frac{1}{Q^2 - M_W^2} g \tag{2}$$

dove M_W è la massa del W^- e Q^2 è essenzialmente il quadrato dell'energia a cui avviene il processo. Con g si indica la costante che accoppia W^- con muone ed elettrone, vertice di sinistra, e poi W^- con elettrone ed anti-neutrino, vertice di destra. Un gran numero di esperimenti ha mostrato che il valore della costante g è lo stesso per i due casi in esame.

Nel caso $Q^2 \ll M_W^2$ abbiamo che

$$\left| g \frac{1}{Q^2 - M_W^2} g \right| \overset{Q \ll M_W}{\longrightarrow} \frac{g^2}{M_W^2} \equiv \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{(\hbar c)^2} G_F$$

dove la costante G_F è detta costante di Fermi. In questo caso, il diagramma di sinistra della Figura 7 si trasforma in quello di destra, che descrive in termini moderni l'approccio di Fermi.

I decadimenti β avvengono ad energie di pochi MeV, mentre la massa del $W^{\pm}$ è di circa 80 GeV, quindi per questi decadimenti la condizione $Q^2 \ll M_W^2$ è ben verificata. A tutt'oggi il confronto tra teoria ed esperimento per i decadimenti β è fatto usando la teoria di Fermi, e non il più complicato approccio delle Teoria dei Campi.

È un piacere ringraziare Paolo Ciafaloni, Vincenzo Flaminio e Francesco Vissani per i loro commenti che mi hanno aiutato a migliorare, e a correggere, l'articolo.

[1] F. Vissani: *First steps towards understanding neutrinos A tribute to Enrico Fermi on the 90th anniversary of the β decay model*, Quaderni di Storia della Fisica, 31 (2024) 109.

[2] G. Co': *Neutrini ed interazione debole*, Ithaca, VI (2015) 7.

[3] M. De Maria: *Fermi: un fisico da via Panisperna all'America*, Supplemento n. 8 a Le Scienze, 368 (aprile 1999) 1.

[4] H. Kragh: *A terminological history of early elementary particle physics* Archive for History of Exact Sciences, Pubblicato on-line (2022). https://doi.org/10.1007/s00407-022-00299-2

[5] L. Belloni, S. Olivares: *Fermi e l'energia atomica*, RCS Mediagroup, Milano (2016).

[6] Ettore Majorana: *Uber die Kerntheorie*, Zeitschrift für Physik, 82 (1933).137

[7] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta*, Ric. Sci., 4 (1933) 491.

[8] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dei raggi β*, Nuovo Cimento, 11 (1934) 1.

[9] E. Fermi: *Versuch einer Teorie der β-Stralen*, Zeitschrift für Physik, 88 (1934) 161.

[10] L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire: *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation*, Science, 124 (1956) 103.

[11] Werner Heisenberg: *Uber den Bau der Atomkerne*, Zeitschrift für Physik, 77 (1932) 1.

[12] P. Jordan, O. Klein: *Zum Mehrkörperproblem der Quantentheorie*, Zeitschrift für Physik, 45 (1927) 751.

[13] P. A. M. Dirac: *The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation*, Proc. Roy. Phys. Soc. London, 114 (1927) 243.

[14] KATRIN Collaboration: *Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity.*, Nat. Phys., 18 (2022) 160.

[15] M. Borghesi et al.: *An updated overview of the HOLMES status*, Nucl. Inst. Met. A, 1 (0) 5.1 2023 168205

[16] B. W. Sargent: *The maximum energy of the β-Rays from uranium X and other bodies*, Proc. Roy. Soc., 139 (1933) 659.

Giampaolo Co': è Professore Associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi quantistici a molticorpi e della redazione di *Ithaca*.

“Una mentalità semplificatrice” Lo stile scientifico di Enrico Fermi *

Neither aesthetic nor other philosophical or quasi-metaphysical principles – except that of simplicity – could preoccupy or delay Fermi.

G. Holton

Vincenzo Barone

DISIT, Università del Piemonte Orientale, Alessandria, Italy
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Torino, Torino, Italy

Il principio di semplicità

Tutte le testimonianze su Enrico Fermi insistono su un punto: la sua dote fondamentale, come scienziato, come docente e come divulgatore, era la semplicità.

Scrive Enrico Persico, che fu suo amico sin dai tempi del liceo [2]:

> “Se dovessi condensare in un solo tratto la fisionomia mentale, pur così complessa, di Enrico Fermi, direi che la sua caratteristica principale era una prodigiosa capacità di vedere subito l’essenziale in ogni cosa, e di puntare direttamente su di esso coi mezzi più semplici.”

La semplicità fu per Fermi, al tempo stesso, metodo e stile, criterio euristico e canone espressivo. I due aspetti sono intimamente legati: l’affinità tra metodo di ricerca e stile comunicativo – entrambi improntati alla stessa “mentalità semplificatrice” (l’espressione è ancora di Persico) – è una delle caratteristiche peculiari e più visibili dell’opera del fisico romano. Il percorso di scoperta e la sua esposizione obbedivano a regole e meccanismi simili, cosicché molto spesso l’uno si rispecchiava fedelmente nell’altra. I due contesti arrivavano addirittura a coincidere: le elaborazioni teoriche di Fermi non di rado prendevano forma in pubblico, nel momento stesso in cui egli illustrava un certo argomento ai suoi studenti e collaboratori, ragionando ad alta voce, a cadenza costante, come ricordano tutti coloro che ebbero la fortuna di partecipare ai suoi seminari, [2, 3, 4].

*Questo articolo è tratto dall’introduzione del volume di Ref. [1]. Ringraziamo la casa editrice Bollati Boringhieri per aver gentilmente concesso l’uso del testo.

Così, ad esempio, nacque la sua teoria quantistica della radiazione: dallo sforzo di capire e porre in una forma più familiare e più semplice alcuni precedenti tentativi di quantizzazione dell'elettrodinamica, e dal continuo impegno nell'affinare la presentazione dei risultati man mano ottenuti. L'esito finale di questo lungo itinerario di indagine e di chiarificazione – l'articolo *Quantum Theory of Radiation* del 1932 [5] – rappresentò per molti fisici la via d'accesso alla teoria quantistica dei campi ed è, per usare le parole di Hans Bethe, "un esempio insuperato di semplicità in una materia difficile" [6].

Lo stile scientifico di Fermi è ben riassunto da Giovanni Gentile jr., fisico teorico di formazione pisana (e figlio del filosofo), che frequentò assiduamente l'Istituto di via Panisperna [7]:

> "Egli [Fermi] ha il grande pregio di sapere scoprire in un fenomeno fisico quali possano essere le linee principali per una possibile sua spiegazione teorica; e inoltre, per la sua capacità di valutare precisamente i vari fattori che concorrono a dare gli effetti osservati, sa porre il problema nei termini più semplici, per cui sia possibile arrivare quasi spontaneamente alla soluzione."

L'abilità semplificatrice di Fermi consisteva innanzi tutto nel riformulare i problemi fisici in modo tale da enuclearne gli aspetti fondamentali e renderli così più chiari e definiti, eventualmente riducendoli a una serie di problemi parziali di più facile risoluzione. A ciò si aggiungeva una straordinaria capacità di individuare sempre gli approcci più diretti e intuitivi, e di stimare approssimativamente i risultati prima ancora di avere la soluzione in forma definitiva. Questo modo di procedere ha lasciato una traccia in quelli che nel folklore della fisica vengono chiamati "problemi di Fermi". In un problema di Fermi [8].

> "... a prima vista, non si ha la minima idea di quale possa essere la soluzione e sembra che manchino informazioni cruciali per scoprirla. Ma quando il problema viene scomposto in sottoproblemi, a ognuno dei quali si può dare risposta senza l'aiuto di esperti o di libri, si riesce a fornire una stima mentalmente o con un semplice calcolo che si avvicina notevolmente alla soluzione esatta."

Fermi evitava, quanto più possibile, le astrazioni e le generalizzazioni e, pur padroneggiando perfettamente anche la matematica più difficile (come dimostrano alcuni suoi lavori), la considerava un mezzo e non un fine, e adoperava gli strumenti matematici con grande misura e in modo strettamente adeguato alla specifica situazione affrontata (mal tollerando l'uso e lo sfoggio di metodi sproporzionati rispetto ai problemi da risolvere). Laura Fermi ricorda, [9] p. 271, che quando Hans Bethe, futuro premio Nobel, trascorse un periodo di studio presso l'Istituto romano nel 1931, Fermi

> "gli insegnò a ridurre i problemi ai loro elementi essenziali, a cercare in un primo tempo soluzioni parziali, a sostituire la matematica rigorosa con il buon senso e il ragionamento."

Questo metodo impressionò notevolmente il giovane Bethe, abituato allo stile scientifico del suo maestro Arnold Sommerfeld, basato su analisi matematiche complete dei problemi, che spesso lasciavano in ombra la sostanza fisica delle questioni. Molti anni dopo, Bethe dichiarerà [6] di avere imparato da Fermi più che da chiunque altro nella sua vita e ricorderà le volte in cui lui e i suoi colleghi si recavano da Fermi per avere un consiglio su qualche problema difficile:

> "Gli spiegavamo la situazione e lui, dopo averci ascoltati attentamente per qualche minuto, rielaborava il problema in una forma completamente diversa. Ci dava la soluzione, o più frequentemente rendeva il problema così chiaro da permetterci di risolverlo, avendo nello stesso tempo il piacere di farlo da soli"

E anche quando affrontava problemi di cui aveva semplicemente sentito parlare di sfuggita in un seminario o in qualche conversazione, Fermi era capace di trovare delle soluzioni che risultavano immancabilmente più semplici e più comprensibili di quelle ottenute da chi aveva sollevato e studiato per primo la questione.

Maestro dell'analogia

La fisica di Fermi fu in larga misura orientata all'elaborazione di quelle che Einstein chiamava "teorie costruttive", teorie che descrivono un certo gruppo di fenomeni naturali a partire da elementi ipotetici relativamente semplici. Usando un'etichetta moderna possiamo dire che egli fu un "fenomenologo" [10]: le sue teorie nascevano per risolvere problemi fisici concreti e per interpretare e spiegare dei risultati sperimentali.

Segrè attribuisce questa predilezione per le questioni direttamente accessibili all'esperimento alla formazione da autodidatta di Fermi (tutta la fisica moderna l'aveva imparata da sé non essendoci in università alcun docente in grado di insegnargliela) e al conseguente "desiderio di verificare la bontà delle sue conclusioni col giudizio infallibile dell'esperienza" ([4] p. 22).

Per lo stesso motivo, Fermi non perseguì mai vaste sintesi teoriche preferendo affrontare problemi che richiedevano "l'applicazione recondita di princìpi noti, immaginazione e sottigliezza". La sua creatività si manifestava quindi nella capacità di costruire efficaci rappresentazioni mentali dei fenomeni e nel tradurle in modelli esplicativi e predittivi, rifuggendo tutte le astrattezze e i formalismi non strettamente necessari.

Uno degli strumenti fondamentali del fenomenologo è il ragionamento analogico, e Fermi fu indiscutibilmente un maestro dell'analogia [11]. Nel 1929 Fermi scriveva [12]

> "L'ipotesi più naturale che si è indotti a fare quando ci si trova di fronte a qualche cosa di sconosciuto è che il suo comportamento sia analogo a quello di cose simili meglio note."

E che questo fosse il suo modo di procedere abituale è confermato dalla moglie Laura, che ribadisce come, nell'esplorare l'ignoto, Fermi avesse bisogno di "riportarsi a fatti conosciuti, di stabilire paragoni e analogie" ([9], p. 273).

Una magistrale prova di immaginazione analogica è rappresentata da un lavoro del 1925 sulla teoria dell'urto tra elettroni e atomi [13]. Nell'introduzione Fermi illustra con grande limpidezza l'idea di base:

> "Quando un atomo, che si trovi nel suo stato normale, viene illuminato con della luce di frequenza opportuna, esso può eccitarsi, vale a dire passare ad uno stato quantico di maggior energia, assorbendo un quanto di luce. Se il quanto della luce eccitante è maggiore dell'energia necessaria a ionizzare l'atomo, esso può ionizzarsi perdendo, secondo la frequenza della luce, un elettrone appartenente agli strati superficiali o a quelli profondi dell'atomo. [...] Dei fenomeni di natura assai simile a questi si presentano anche nell'eccitazione per urto. Se si bombardano infatti gli atomi di un gas con elettroni di velocità sufficiente essi possono eccitarsi o ionizzarsi, e possono perdere anche, se la velocità degli elettroni eccitanti è molto grande, degli elettroni appartenenti a strati profondi dell'atomo. Lo scopo del presente lavoro è di precisare ulteriormente le analogie esistenti tra queste due classi di fenomeni, e precisamente di dedurre quantitativamente i fenomeni dell'eccitazione per urto da quelli dell'assorbimento ottico."

Il metodo proposto da Fermi consisteva nel sostituire il campo elettromagnetico prodotto dagli elettroni nelle vicinanze di un atomo con uno spettro equivalente di radiazione, e nel calcolare a partire da questo con metodi ordinari la probabilità di eccitazione o di ionizzazione dell'atomo. L'approccio venne contestato da Bohr, una critica che ferì non poco il giovane Fermi, ma anni dopo fu posto su solide basi quantomeccaniche da Weizsäcker e Williams, e da allora ha trovato numerose applicazioni.

Fermi era affezionato all'idea della radiazione equivalente e la utilizzò in vari modi. Ciò è indicativo di un'altra caratteristica distintiva del suo stile di ricerca: la tendenza a organizzare le informazioni, i metodi e le conoscenze in un insieme di pochi casi paradigmatici, un repertorio di situazioni e meccanismi fisici fondamentali cui fare riferimento di fronte a un nuovo problema.

Era sua abitudine applicare uno stesso modello o una stessa idea in contesti molto diversi, ma simili per qualche aspetto (naturalmente, come precisa Segrè, il legame che in tal modo veniva instaurato tra problemi differenti, per quanto appa-

risse evidente a posteriori, era all'inizio tutt'altro che facile da individuare).

Il catalogo di idee e tecniche predilette da Fermi includeva, tra l'altro, i metodi statistici per i sistemi di molte particelle, la teoria delle perturbazioni (con le famose "regole d'oro", termine diventato poi di uso corrente), l'accoppiamento spin–orbita. Egli adoperò questa personale "cassetta degli attrezzi" prima nell'ambito della fisica atomica e della spettroscopia, poi nell'ambito della fisica nucleare e subnucleare. Secondo lo storico Gerald Holton, questo atteggiamento rifletteva la convinzione di Fermi che "la Natura stessa fosse assemblata nel modo più parsimonioso possibile" [14].

Un caso notevole di applicazione di un modello a un problema diverso da quello per il quale era stato originariamente sviluppato riguardò, nell'ottobre 1934, la scoperta dell'effetto dei neutroni lenti sulla radioattività artificiale. Per interpretare questo fenomeno Fermi riprese uno schema teorico che aveva inventato qualche mese prima per spiegare lo spostamento delle righe spettrali di vapori alcalini in presenza di gas estranei, osservato da Segrè e Amaldi. Ipotizzando che tale spostamento fosse dovuto alla diffusione degli elettroni esterni delle sostanze alcaline da parte degli atomi del gas perturbatore, Fermi aveva costruito una teoria quantistica dell'urto di elettroni di bassa velocità su centri di potenziale e introdotto il concetto di "lunghezza di diffusione" (ancora oggi di fondamentale importanza nella teoria dell'urto) [15].

Quando, nel corso degli esperimenti sulla radioattività indotta da bombardamento di neutroni, il gruppo di via Panisperna scoprì che l'interposizione di sostanze idrogenate che rallentavano i neutroni amplificava l'attivazione del bersaglio, Fermi riprese lo stesso modello per descrivere questa volta l'interazione tra neutroni lenti e nuclei, e per spiegare l'aumento della probabilità di cattura dei neutroni al decrescere della loro velocità. Il grafico della funzione d'onda degli elettroni o dei neutroni, la figura è la stessa nei due casi, diventò una sorta di marchio di fabbrica di Fermi, ricomparendo nel corso degli anni in numerosi articoli.

La strategia comunicativa

Con i suoi scritti, le sue conferenze e le sue lezioni, Fermi coprì tutti i dominî della comunicazione scientifica. La sua opera comprende infatti, oltre agli articoli di ricerca, una lunga serie di testi didattici (manuali universitari e scolastici), un cospicuo numero di saggi interspecialistici e di sintesi (destinati prevalentemente a colleghi di altre discipline e a insegnanti) e alcuni lavori divulgativi in senso stretto (cioè indirizzati a un vasto pubblico).

Di solito, in questi quattro generi di testo gli autori adottano modalità di presentazione molto diverse [16]. Per esempio, il discorso analogico, le rappresentazioni iconiche e i ragionamenti qualitativi, che sono molto diffusi nelle opere rivolte al pubblico comune, sono rari o pressoché assenti nei documenti più tecnici. Nel caso di Fermi ciò che sorprende è, al contrario, l'omogeneità formale e stilistica dei suoi scritti. Che si tratti di un articolo di ricerca o di un saggio divulgativo, egli adotta sempre la stessa "strategia comunicativa" [17], alla cui base vi sono alcuni elementi costanti:
i) una trattazione autoconsistente, in cui l'argomento è affrontato dal principio e al lettore sono fornite tutte le informazioni necessarie;
ii) alcuni punti di partenza dati per scontati (evidenze sperimentali e assunzioni ragionevolmente certe);
iii) un'enunciazione precisa dei problemi,
che vengono spogliati da tutte le complicazioni e riformulati in termini più chiari ed elementari;
iv) un percorso graduale di avvicinamento alla soluzione, guidato dall'intuizione fisica;
v) un'assoluta economia di mezzi tecnici e di formalismi matematici;
vi) un ampio uso di esempi concreti, di modelli e rappresentazioni visualizzabili;
vii) una certa cautela nei confronti delle novità non ancora consolidate.

Fermi attribuiva una grande importanza alla chiarezza di linguaggio e alla trasparenza dei testi. Racconta Bruno Pontecorvo [18] che, avendo sottoposto un articolo per l' `Enciclopedia Italiana`, di cui Fermi era direttore della sezione di fisica, questi, dopo averne letto l'inizio, gli fece seccamente notare che non ci capiva niente, e gli spiegò come bisognava scriverlo:

> "Almeno la prima parte (diciamo il dieci per cento o le prime due frasi, se l'articolo è breve) deve essere comprensibile per qualsiasi persona colta".

Gli scritti di Fermi rispettano universalmente questa regola, cosicché, anche nel caso degli articoli di ricerca, non occorre essere specialisti della materia per apprezzare e comprendere le prime pagine e il senso essenziale del lavoro.

Uno splendido esempio in proposito è offerto da uno degli articoli più famosi di Fermi, quello sul decadimento beta [19]. Nell'analisi di questo processo sembrava ovvio assumere che l'elettrone emesso pre-esistesse all'interno del nucleo. E tuttavia non vi era alcuna teoria in grado di descrivere il legame tra questi fantomatici elettroni nucleari e le altre particelle presenti nei nuclei.

L'idea di Fermi è che gli elettroni prodotti nel decadimento beta non vengano estratti dai nuclei, bensì creati, assieme ai neutrini (ipotizzati da Wolfgang Pauli), nel momento in cui il processo ha luogo. Egli si lascia guidare dall'analogia con il fenomeno dell'emissione dei quanti di luce dagli atomi: un fotone emesso dall'atomo, infatti, non esiste in precedenza, ma viene prodotto all'atto dell'emissione. Il problema degli elettroni nucleari non si pone più, e il processo che avviene all'interno del nucleo che decade è la conversione di un neutrone in un protone con la concomitante creazione di un elettrone e di un neutrino, per descrivere la quale Fermi ricorre al formalismo della seconda quantizzazione. Il risultato finale è la prima teoria quantistica di campo di un'interazione fondamentale, quella che chiamiamo oggi "interazione debole". L'introduzione dell'articolo *Tentativo di una teoria dei raggi* β è straordinariamente chiara e giova riportarla per intero:

> "Nel tentativo di costruire una teoria degli elettroni nucleari e della emissione dei raggi β, si incontrano, come è noto, due difficoltà principali. La prima dipende dal fatto che i raggi β primari vengono emessi dai nuclei con una distribuzione continua di velocità. Se non si vuole abbandonare il principio di conservazione dell'energia, si deve ammettere perciò che una frazione dell'energia che si libera nel processo di disintegrazione β sfugga alle nostre attuali possibilità di osservazione. Secondo la proposta di Pauli si può per esempio ammettere l'esistenza di una nuova particella, il così detto "neutrino", avente carica elettrica nulla e massa dell'ordine di grandezza di quella dell'elettrone o minore. Si ammette poi che in ogni processo β vengano emessi simultaneamente un elettrone, che si osserva come raggio β, e un neutrino che sfugge all'osservazione portando seco una parte dell'energia. Nella presente teoria ci baseremo sopra l'ipotesi del neutrino. Una seconda difficoltà per la teoria degli elettroni nucleari dipende dal fatto che le attuali teorie relativistiche delle particelle leggere (elettroni o neutrini) non dànno una soddisfacente spiegazione della possibilità che tali particelle vengano legate in orbite di dimensioni nucleari. Sembra per conseguenza più appropriato ammettere con Heisenberg che tutti i nuclei consistano soltanto di particelle pesanti, protoni e neutroni. Per comprendere tuttavia la possibilità dell'emissione dei raggi β, noi tenteremo di costruire una teoria dell'emissione delle particelle leggere da un nucleo in analogia alla teoria dell'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato nell'ordinario processo della irradiazione. Nella teoria dell'irradiazione, il numero totale dei quanti di luce non è costante; i quanti vengono creati all'atto della loro emissione da un atomo eccitato, e spariscono invece quando sono assorbiti. In analogia a ciò cercheremo di fondare la teoria dei raggi β sopra le seguenti ipotesi:
>
> a) Il numero totale degli elettroni e dei neutrini non è necessariamente costante. Elettroni (o neutrini) possono essere creati o distrutti [...]
>
> b) Le particelle pesanti, neutrone e protone, possono considerarsi, secondo le vedute di Heisenberg, come due diversi stati quantici interni della particella pesante [...]

> c) La funzione Hamiltoniana del sistema complessivo, costituito da particelle pesanti e leggere, deve scegliersi in modo che ogni transizione da neutrone a protone sia accompagnata dalla creazione di un elettrone e di un neutrino; e che il processo opposto, trasformazione di un protone in un neutrone, sia accompagnato dalla sparizione di un elettrone e di un neutrino. Si noti che con ciò resta assicurata la conservazione della carica elettrica."

Sono qui presenti tutti gli elementi caratteristici dello stile scientifico e comunicativo di Fermi: la precisa formulazione dei problemi e delle ipotesi di partenza, che indica già un percorso risolutivo, l'uso di un'analogia in chiave euristica e di rappresentazione concreta del fenomeno. Nel resto del lavoro, Fermi evita accuratamente tutte le complicazioni, che avrebbero distratto tanti altri teorici al suo posto, e, quando si trova a dover scegliere tra diverse possibili Hamiltoniane, adotta, inutile dirlo, "il criterio della massima semplicità".

Il lavoro sul decadimento beta fu respinto da `Nature` perché "troppo speculativo". Robert Oppenheimer lo giudicò "affascinante ma eccentrico" [20], e così dovette apparire a molti contemporanei. Ma l'eleganza dell'idea di fondo e della teoria proposta, e il successo fenomenologico ottenuto sulla base delle assunzioni più semplici, erano, agli occhi di Fermi, argomenti decisivi per convincerlo, come ricorda Segrè, che "quello sarebbe stato il suo capolavoro, ricordato dalla posterità" ([4], p. 75).

L'eredità

Nel 1934, Fermi scrive [21]:

> " Il fatto che nel mondo atomico si incontrino frequentemente oggetti eguali ci incoraggia a pensare che la struttura dei corpuscoli atomici non sia estremamente complessa e che, una volta che si sia riusciti ad analizzare la natura dei corpuscoli atomici, nuclei ed elettroni, non ci si trovi semplicemente ad avere spostato il problema della struttura della materia un gradino più in basso verso elementi più minuti, ma si sia per così dire raggiunto un pianerottolo che, se pur non rappresenti la base ultima su cui è costruito l'edificio materiale, e che forse non è raggiungibile dall'intelligenza umana, possa per lo meno considerarsi sufficiente per un tempo molto lungo. "

Nella seconda metà degli anni trenta la conoscenza del mondo fisico sembrava in effetti aver raggiunto un solido "pianerottolo", per dirla con Fermi. Il catalogo delle particelle elementari appariva definitivamente stabilito, con le tre particelle della materia ordinaria (elettrone, protone, neutrone), le corrispondenti antiparticelle (di cui si conosceva solo il positrone) e i tre mediatori delle forze (il fotone, il mesone di Yukawa e l'ipotetico gravitone). Uno schema elegante nella sua semplicità e simmetria, ma destinato a essere ben presto sconvolto da una serie di risultati sperimentali che cominciarono ad accumularsi già durante la guerra.

Quando, nell'ottobre 1949, Fermi tenne a Roma una conferenza su "Le particelle elementari", queste si erano ormai moltiplicate oltre ogni previsione [22]. Il loro numero, continuamente crescente, rendeva sempre più probabile che almeno alcune di esse non fossero in realtà elementari. Fermi osservava che [23]:

> "A questo punto, si presenta la necessità di fare una sistematica, per cui si riesca a capire per quale ragione alcune di queste particelle si osservano in natura, ed altre no."

Davanti a questa situazione confusa il genio ordinatore e semplificatore di Fermi si manifestò al massimo livello, con due diversi programmi di ricerca, entrambi pionieristici. Il primo, concretizzatosi in uno dei suoi lavori più congetturali, scritto con Chen Ning Yang [24], si basava sull'idea che qualcuna delle particelle cosiddette "elementari" fosse in realtà composta da altre particelle note. Ciò che, in particolare, Fermi e Yang suggerivano era che il pione fosse uno stato legato di un nucleone (protone o neutrone) e di un antinucleone. Questo permetteva di spiegare alcune sue proprietà intrinseche e la sua esistenza in forma di tripletto di particelle di diversa

carica (pione positivo, pione negativo e pione neutro).

Come ricorda Yang, Fermi non si illudeva che la proposta contenuta nel lavoro fosse realistica, ma la ritenne degna di pubblicazione ("uno studente risolve problemi, un ricercatore pone domande", disse a Yang [25]). Naturalmente oggi sappiamo che l'idea di Fermi e Yang era sbagliata, perché pioni, protoni e neutroni sono tutti oggetti non elementari; tuttavia, essa si rivelò feconda, perché attraverso le suggestioni che produsse e gli sviluppi che ne derivarono (ad esempio, l'estensione di Sakata alle particelle strane), portò infine alla descrizione corretta, il modello a quark di Murray Gell-Mann (giovane assistente all'Università di Chicago negli anni in cui vi lavorava Fermi).

L'altro programma di ricerca, più pratico, venne presentato da Fermi nella lezione di apertura dell'*International Conference on Nuclear Physics and the Fundamental Particles* del settembre 1951 [26], organizzata in occasione dell'entrata in funzione del grande sincrociclotrone di Chicago. In quella occasione Fermi affermò

> "La ricerca in fisica teorica può procedere lungo due strade:
> 1. raccogliere dati sperimentali, studiarli, fare ipotesi, fare predizioni, e infine verificare;
> 2. tirare a indovinare; se la natura è benevola e il teorico è intelligente, la cosa può funzionare".

Il programma che egli suggerì era vicino alla prima opzione e consisteva nello studiare gli urti nucleone-nucleone e pione-nucleone in modo da estrarre dai dati sperimentali le informazioni sull'interazione forte (la forza nucleare), agente a piccolissime distanze. Ecco in dettaglio la sua proposta:

> " È auspicabile organizzare i dati sperimentali in modo tale che essi esibiscano nella maniera più chiara le caratteristiche delle interazioni tra particelle fondamentali che hanno luogo a "contatto", cioè entro una regione di 10^{-13} cm. Ciò può essere fatto supponendo che la meccanica quantistica sia valida al di fuori di questa regione (sono abbastanza sicuro che sia così) e usandola per rimuovere dall'analisi quei fenomeni che non dipendono da ciò che accade nella zona di contatto. Il risultato è un'espressione compressa dei risultati sperimentali, in cui la natura delle interazioni fondamentali tra le particelle può essere più facilmente evidenziabile."

L'idea, in altri termini, è di separare nei dati il contributo calcolabile sulla base della meccanica quantistica (o comunque della fisica nota) da quello che racchiude ciò che non si sa della dinamica del processo. È un ulteriore esempio del tipico approccio fenomenologico fermiano (né puramente speculativo né ingenuamente empirico) ai problemi della fisica fondamentale. Nei suoi ultimi anni Fermi perseguì tenacemente e con successo questa strategia, che da allora è entrata stabilmente nel bagaglio metodologico della fisica delle particelle.

Nell'estate del 1954 Fermi tornò ancora in Italia per tenere a Varenna, sul lago di Como, un corso, rimasto memorabile, sulla fisica dei pioni e dei nucleoni. Bernard Feld, suo collaboratore, ricorda così quelle lezioni [27]:

> "C'era Fermi al culmine delle sue capacità: Fermi che metteva ordine e semplicità nella confusione, che scopriva relazioni tra fenomeni apparentemente scollegati; acume e saggezza fluivano dalle sue labbra, come al solito imbiancate dal gesso, con quella voce chiara e sonora che non aveva mai perso l'accento dolce delle vocali italiane nella sua fluente dizione americana."

La morte prematura, sopraggiunta di lì a poco, il 29 novembre 1954, impedì a Fermi di attraversare da protagonista, come certamente avrebbe fatto, il periodo d'oro della fisica delle particelle. Ma la sua eredità scientifica e metodologica è viva, e i fisici si muovono ancora oggi sulle sue orme.

[1] E. Fermi *Atomi Nuclei Particelle*, a cura di V. Barone, Bollati Boringhieri, Torino (2009).

[2] E. Persico: *Souvenir de Enrico Fermi*, Scientia, 49 (1955) 316. Trad. it. in *Conoscere Fermi*, a cura di C. Bernardini e L. Bonolis, Edizioni Scientifiche SIF, Bologna (2001) 37.

[3] F. Rasetti: *Enrico Fermi e la fisica italiana*, Celebrazioni Lincee 12, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma (1968).

[4] E. Segrè: *Enrico Fermi, fisico*, Zanichelli, Bologna (1971).

[5] E. Fermi: *Quantum Theory of Radiation*, Reviews of Modern Physics, 4 (1932) 87.

[6] H. Bethe: *Memorial Symposium held in Honor of Enrico Fermi at the Washington Meeting of the American Physical Society (April 29, 1955)*, Reviews of Modern Physics, 27 (1955) 253.

[7] G. Gentile jr.: Recensione di E. Fermi, *Molecole e cristalli* (Zanichelli, Bologna 1934), in *Scritti minori di scienza, filosofia e letteratura*, Firenze (1943), 194.

[8] H. C. von Baeyer: *The Fermi Solution*, Dover, Mineola, NY (2001).

[9] L. Fermi: *Atomi in famiglia*, Mondadori, Milano (1954).

[10] C. Bernardini: *La fisica di un eccezionale fenomenologo: Enrico Fermi*, in *Enrico Fermi. Significato di una scoperta*, AIN-ENEA, Roma (2001), 92.

[11] G. Holton: *On the Art of Scientific Imagination*, Daedalus, 125 (1996) 183.

[12] E. Fermi: *I fondamenti sperimentali della nuova meccanica atomica*, Periodico di Matematiche, 10 (1930) 71. Rist. in [1], 42.

[13] E. Fermi: *Sulla teoria dell'urto tra atomi e corpuscoli elettrici*, Nuovo Cimento, 2 (1925) 143.

[14] G. Holton: *The Birth and Early Days of the Fermi Group in Rome*, in Proceedings of the International Conference "Enrico Fermi and the Universe of Physics" (Roma 2001), ENEA, Roma (2003), 60.

[15] E. Fermi: *Sopra lo spostamento per pressione delle righe elevate delle serie spettrali*, Nuovo Cimento, 11 (1934) 157.

[16] M. Cloître e T. Shinn: *Expository Practice*, in T. Shinn e R. Whitley (a cura di), *Expository Science: Forms and Functions of Popularisation*, Reidel, Dordrecht (1985), 31.

[17] S. D'Agostino e A. Rossi: *Introduzione*, in *Enrico Fermi e l'Enciclopedia Italiana*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma (2001), XX.

[18] B. Pontecorvo: *Enrico Fermi*, Studio Tesi, Pordenone (1993).

[19] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dei raggi β*, Nuovo Cimento, 11 (1934) 1.

[20] Lettera a George Uhlenbeck (marzo 1934), in *Robert Oppenheimer. Letters and Recollections*, a cura di A. Kimball Smith e C. Weiner, Stanford University Press, (1995), 176.

[21] E. Fermi: *Le ultime particelle costitutive della materia*, Scientia, 55 (1934) 21.
Rist. in [1], 110.

[22] L. M. Brown, M. Dresden e L. Hoddeson (a cura di): *Pions to Quarks*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1989).
C.N. Yang: *La scoperta delle particelle elementari*, Boringhieri, Torino (1969).

[23] E. Fermi: *Le particelle elementari (prima parte)*, in *Conferenze di fisica atomica*, Fondazione Donegani e Accademia Nazionale dei Lincei, Roma (1950), 5.
Rist. in [1] 135.

[24] E. Fermi, C. N. Yang: *Are Mesons Elementary Particles?*, Physical Review, 76 (1949) 1739.

[25] C. N. Yang, in E. Fermi, *Note e memorie*, vol. II, Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press, Roma (1965), 674.

[26] E. Fermi, *Fundamental Particles*, in Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics and the Physics of Fundamental Particles, Chicago 1951.

[27] B. Feld, in E. Fermi, *Note e memorie*, vol. II, Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press, Roma (1965), 1004.

Vincenzo Barone: insegna fisica teorica all'Università del Piemonte Orientale ed è associato all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Alla ricerca nel campo della fisica adronica ha affiancato, nel corso degli anni, un'intensa attività divulgativa, partecipando ai principali festival scientifici, curando mostre e scrivendo una decina di libri. Di Fermi ha curato l'antologia Atomi Nuclei Particelle (Bollati Boringhieri, 2009).

Numero XXIV Anno 2024

Viaggio nella Scienza

Ithaca

Tecnologie nucleari

