

## Proprietà nucleari

In questa sezione ci occupiamo delle proprietà dei nuclei degli atomi e delle reazioni che li coinvolgono.

I nuclei sono costituiti da protoni, con carica positiva, e neutroni. Protoni e neutroni sono i cosiddetti “nucleoni” e sono a loro volta composti ciascuno da tre quark (che possono essere up, con carica  $+2/3$ , o down, con carica  $-1/3$ ; il protone ha due quark up e uno down, mentre il neutrone ne ha uno up e due down). La massa del protone vale  $1.672 \times 10^{-27}$  kg, ed è circa 1836 volte la massa dell'elettrone. Il neutrone ha una massa sostanzialmente uguale a quella del protone. Ovviamente il valore della carica elettrica del protone è uguale a quello dell'elettrone, ma di segno opposto ( $1,602 \times 10^{-19}$  C).

Quando le reazioni nucleari sono **spontanee**, si dice che il nucleo è radioattivo, cioè è instabile. Le reazioni nucleari possono anche essere indotte artificialmente. Nelle reazioni nucleari davanti al simbolo di ogni nucleo (o nuclide) si riportano due numeri, il numero atomico come pedice e il numero di massa come apice, e.g.  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ . Il numero di massa atomica è la somma di protoni e neutroni. Per ogni elemento ci sono (o sono possibili) vari **isotopi**, cioè nuclei che hanno lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni, e quindi diversa massa atomica.

### Energia di legame nucleare

La massa di un atomo di idrogeno  ${}^1\text{H}$  è esattamente uguale alla somma delle masse di un protone e di un elettrone, mentre la massa atomica di ogni altro atomo è leggermente inferiore alla somma delle masse di protoni, neutroni ed elettroni presenti. Il difetto di massa è una misura dell'energia di legame nucleare fra protoni e neutroni, in quanto la perdita di massa  $\Delta m$  è correlata all'energia liberata (nella formazione del nucleo)

$\Delta E$  tramite l'**equazione di Einstein**:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

dove  $c$  è la **velocità della luce nel vuoto**, cioè  $2.998 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>.

Ad esempio per una mole di atomi di litio,  ${}^7_3\text{Li}$ , l'energia di legame nucleare è di ben  $3.79 \times 10^9$  kJ (quella per il singolo atomo è  $6.29 \times 10^{-12}$  J), cioè quando le particelle si combinano per formare una mole di atomi di Li si libera una quantità enorme di energia. Per confronto, il calore liberato per la combustione di una mole di *n*-butano con O<sub>2</sub> è di “soli” 2857 kJ (per mole di butano).

Quando si confrontano le energie di legame per i diversi nuclei è più conveniente normalizzarle, considerando l'**energia di legame media per**

**nucleone**, cioè per particella del nucleo, considerando solo protoni e neutroni. Tipicamente le energie per nucleone sono espresse in mega-elettronvolt, MeV.

Solitamente si riporta in grafico l'**energia per nucleone** in funzione del numero di massa degli atomi, cioè l'energia (positiva) che si libera (per nucleone) nel processo di formazione del nucleo dalle sue particelle fondamentali, e quindi può essere usata come una misura delle **stabilità relative dei nuclei** rispetto alla decomposizione nelle particelle. Il nucleo con la più grande energia di legame, cioè il nucleo più stabile, è il  $^{56}_{26}\text{Fe}$ . In generale, i nuclei con numeri di massa intorno a 60 hanno i valori più elevati di energia di legame per nucleone, e si ritiene che tali elementi (e.g. Fe, Ni) costituiscano il nucleo terrestre. In linea teorica, se i nuclei fossero in equilibrio fra loro, tenderebbero a trasformarsi in nuclei di ferro (o atomi a lui vicini). Il grafico (inserto) mostra anche che i nuclei con numero atomico pari sono più stabili di quelli dispari a causa dell'accoppiamento di spin protone-protone (curva a dente di sega), inoltre i nuclei pari-pari (sia numero di protoni che numero di neutroni pari) sono molto più stabili di quelli dispari-dispari (solo quattro nuclei dispari-dispari sono stabili –  $^2\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{N}$  – e altri 4 hanno emivite più lunghe di 1 miliardo di anni) e che certi numeri di massa (**numeri magici** di protoni e neutroni), come 4, 12 e 16...., hanno energie di legame per nucleone relativamente alte, il che significa che  $^4_2\text{He}$ ,  $^{12}_6\text{C}$  e  $^{16}_8\text{O}$  sono particolarmente stabili. I nuclei più stabili sono quelli che hanno i cosiddetti numeri magici (che in realtà corrispondono a gusci pieni e chiusi a livello nucleare) sia per protoni che per neutroni. Infine, dal grafico si nota che la stabilità nucleare tende a diminuire apprezzabilmente per i nuclei con numero di massa  $> 100$ .

Questi dati sono essenziali per l'applicazione di reazioni nucleari come fonti di energia. Infatti, **una reazione nucleare sarà esotermica se:**

- un atomo pesante si divide in due nuclei di massa media (**fissione nucleare**)
- due atomi leggeri si combinano per dare un nucleo di massa media (**fusione nucleare**).

## Radioattività

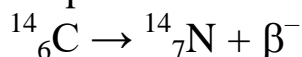
Un nucleo radioattivo è instabile ed emette spontaneamente particelle e/o radiazione elettromagnetica.

Le trasformazioni nucleari spontanee hanno solitamente energie di attivazione molto alte e quindi sono spesso (ma non sempre!) molto lente. I **principali processi di decadimento spontaneo** di un nucleo radioattivo sono:

- emissione di particelle  $\beta$ , cioè elettroni emessi **dal nucleo**
- emissione di positroni, cioè particelle  $\beta^+$
- cattura di elettroni da parte del nucleo
- emissione di particelle  $\alpha$  (cioè nuclei di elio,  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ )
- emissione di radiazioni  $\gamma$ , cioè raggi X ad energia molto alta.
- emissione di neutrini ( $\nu_e$ ) o antineutrini

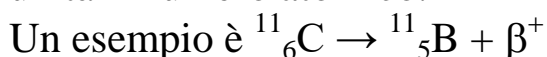
L'emissione di un elettrone dal nucleo trasforma praticamente un neutrone in un protone, cioè lascia la massa atomica invariata ma fa aumentare di una unità il numero atomico.

Un esempio è quello del decadimento radioattivo del carbonio-14, che perde una particella  $\beta$  trasformandosi in un nucleo di azoto-14 secondo l'equazione:



Un positrone ha la stessa massa dell'elettrone ma carica opposta.

Formalmente l'emissione di un positrone trasforma un protone in un neutrone. Quindi lascia invariata la massa atomica e fa diminuire di una unità il numero atomico.



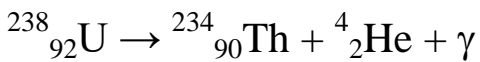
Affinché possa avvenire l'emissione di un positrone, la differenza di energia fra nucleo padre e il nucleo figlio che si otterrebbe deve essere maggiore di 1.022 MeV. In caso contrario, i nuclei ricchi di protoni decadono per cattura di elettroni.

Le emissioni  $\beta$  e  $\beta^+$  sono dovute al cambio di orientazione (*flavor*) di un quark.

La cattura di elettroni (*electron capture*) avviene quando il nucleo "assorbe" uno dei suoi elettroni orbitali, tipicamente dai gusci più interni (K o L), e quindi – come l'emissione  $\beta^+$  – all'atto pratico trasforma un protone in un neutrone. Il "buco" lasciato libero dall'elettrone catturato dal nucleo viene rapidamente occupato da un elettrone di un livello più esterno (e quindi a più alta energia) e il processo comporta l'emissione di radiazione (raggi X). Se questa radiazione colpisce un elettrone dei gusci più esterni può provocarne l'emissione (*effetto Auger*).

Tutti e tre questi processi sono accompagnati dall'emissione di un neutrino o antineutrino (vedi dopo).

L'emissione di particelle  $\alpha$ , cioè nuclei di elio, fa diminuire il numero atomico di 2 unità e la massa di 4 unità. Un esempio è il decadimento radioattivo dell'uranio-238 a torio-234:



Da notare che le particelle  $\alpha$  acquisiscono rapidamente elettroni dall'ambiente, e quindi la reazione nucleare genera atomi neutri di elio. In effetti, l'elio sulla terra deriva dal decadimento nucleare di uranio e torio presenti nella crosta terrestre. Il 99.997 % dell'elio così generato è sfuggito nell'atmosfera durante i periodi di attività tettonica negli ultimi 4 miliardi di anni. Una piccola frazione è rimasta intrappolata da strati di roccia impermeabile insieme al gas naturale, in concentrazioni che possono arrivare fino al 7% in volume. L'elio per usi commerciali viene appunto estratto dal gas naturale. Al momento circa i  $\frac{3}{4}$  del fabbisogno mondiale di elio vengono forniti dagli USA, ma si teme che in un prossimo futuro si andrà incontro a una scarsità globale di questa risorsa (tuttavia, studi recenti suggeriscono che in Nord America ci siano grosse – e inattese – riserve di elio nel sottosuolo delle regioni montuose del nord-ovest).

L'emissione di particelle  $\alpha$  o  $\beta$  è spesso accompagnata dall'emissione  $\gamma$ , che però non altera né il numero atomico né quello di massa. Questo avviene perché il nuclide-figlio, cioè il prodotto della perdita di particelle  $\alpha$  o  $\beta$  dal nucleo madre, si trova spesso in uno stato nucleare eccitato e raggiunge il suo *ground state* emettendo radiazione  $\gamma$ .

Neutrini e un antineutrini posseggono massa quasi nulla, non hanno carica e vengono espulsi dal nucleo in coincidenza dell'espulsione, rispettivamente, di un positrone e di un elettrone. Sperimentalmente si osservò che, mentre le particelle  $\alpha$  emesse da un certo nucleo hanno tutte la stessa energia, le energie delle particelle  $\beta$  sono distribuite in un ampio intervallo continuo fino a raggiungere un massimo. Questa osservazione, piuttosto sorprendente dal momento che i nuclei hanno livelli di energia quantizzati, cioè discreti, portò a postulare che l'emissione  $\beta$  fosse accompagnata dalla contemporanea emissione di un'altra particella ad energia variabile, l'antineutrino, in modo tale che la somma delle due energie fosse pari a valori quantizzati.

La figura mostra il grafico degli isotopi/nuclidi per tipo di decadimento. I nuclei arancioni e blu sono instabili. I quadrati neri tra queste regioni

rappresentano i nuclei (o nuclidi) stabili. La diagonale è la posizione teorica sul grafico dei nuclei per i quali il numero dei protoni è lo stesso del numero dei neutroni. Il grafico mostra che fino al Ca (20 protoni), i nuclei stabili (curva spezzata nera) hanno numero pari di protoni e neutroni, ma i nuclei stabili più pesanti devono avere più neutroni che protoni (la curva nera è più alta della diagonale). A  $Z = 50$  è evidenziato lo stagno, che ha 10 isotopi stabili, e a  $Z = 82$  il piombo, a cui corrisponde l'ultima casella nera (nuclide stabile).

Gli isotopi radioattivi in blu, che stanno sopra la curva nera degli isotopi stabili, hanno un eccesso di neutroni. Per questo danno decadimento  $\beta$  (cioè emettono elettroni dal nucleo), che trasforma neutroni in protoni. Viceversa, gli isotopi radioattivi in arancione, che stanno sotto la curva di stabilità, hanno un eccesso di protoni nel nucleo e quindi danno decadimento  $\beta^+$  (cioè emettono positroni dal nucleo), che trasforma protoni in neutroni. I nuclei molto pesanti (in giallo) tendono a dare emissione  $\alpha$ , che consente di smaltire rapidamente l'eccesso di protoni e neutroni.

L'unità di misura della radioattività nel sistema SI è il becquerel (Bq), pari ad una disintegrazione nucleare per secondo. Una unità non SI anche utilizzata è il Curie (Ci) dove  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

Le **energie associate con l'emissione** di particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , e di radiazioni  $\gamma$  sono notevolmente differenti. Una particella  $\alpha$  viene emessa con un'energia nell'intervallo  $6 - 16 \times 10^{-13} \text{ J}$  e questo significa che può penetrare pochi centimetri di aria, causando la ionizzazione di alcune molecole. Un flusso di particelle  $\alpha$  può venire fermato da alcuni fogli di carta o da un sottile foglio metallico.

Il rischio per la salute associato con queste particelle deriva solo in caso di ingestione di nuclei che le emettano (e.g. polonio-210 nel caso Litvinenko del 2006).

Una particella  $\beta$  viene emessa con energia di  $0.03 - 5.0 \times 10^{-13} \text{ J}$ , ma dal momento che sono molto più leggere delle particelle  $\alpha$  esse viaggiano molto più veloci e per percorsi più lunghi. Il potere di penetrazione delle particelle  $\beta$  è maggiore di quello delle particelle  $\alpha$ , ed è necessaria una sottile lastra di alluminio per fermarle.

Le radiazioni  $\gamma$  hanno lunghezza d'onda molto corta e quindi energia molto elevata. Le energie delle radiazioni  $\gamma$  sono dello stesso ordine di grandezza delle particelle  $\beta$ , ma il loro potere di penetrazione è di gran lunga

maggiore, tanto che per bloccarle è necessaria una lastra di piombo spessa alcuni centimetri.

Le particelle più penetranti sono i neutroni. Per bloccare un flusso di neutroni (usati nei reattori nucleari) è necessario un muro di cemento spesso più di 1.5 metri.

Il decadimento radioattivo di qualsiasi nucleo segue una **cinetica del primo ordine**, tuttavia la cinetica che si osserva può essere complicata dal decadimento del nuclide-figlio. Considerando un singolo stadio sappiamo che per una cinetica del primo ordine si può scrivere, se  $N$  è il numero di nuclei radioattivi, che

$$v = -dN/dt = kN$$

dove  $k$  è la costante cinetica del I ordine (al contrario delle cinetiche delle reazioni chimiche, quelle dei decadimenti radioattivi non dipendono dalla temperatura). La forma integrata di questa equazione può essere scritta come:

$$\ln N - \ln N_0 = -kt$$

dove  $N$  è il numero di nuclidi al tempo  $t$  ed  $N_0$  è il numero di nuclidi iniziali, al tempo 0, oppure in forma esponenziale:

$$N/N_0 = e^{-kt}$$

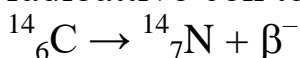
Ad esempio, il decadimento radioattivo del primo ordine del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  presenta la tipica curva esponenziale caratteristica di un processo di decadimento semplice. Il tempo che serve per dimezzare il numero di nuclei radioattivi presenti al tempo  $t$ , cioè per passare da  $N_t$  a  $N_t/2$ , è una **costante** per ogni nucleo chiamato il **tempo di semivita**, ed è collegato alla costante cinetica caratteristica di quel nucleo tramite:

$$\ln N/2 - \ln N = -kt_{1/2}$$

$$-\ln 2 = -kt_{1/2}$$

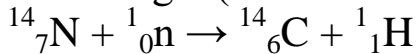
$$t_{1/2} = \ln 2/k$$

Un'applicazione molto nota, che sfrutta il decadimento radioattivo, è quella della datazione di reperti archeologici di origine organica (e.g. reperti lignei) con il carbonio-14 (premio Nobel per la chimica nel 1960 a W. F. Libby). Il metodo deriva dal fatto che l'isotopo del carbonio  $^{14}_6\text{C}$  è radioattivo con tempo di semivita di 5730 anni, secondo l'equazione:



In un organismo vivente (e.g. una pianta) il rapporto fra  $^{14}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  è costante in quanto, anche se il carbonio-14 decade, esso viene

costantemente riformato alla stessa velocità dalle collisioni fra neutroni ad alta energia (radiazioni cosmiche) e l'azoto-14 atmosferico:



Il processo di fotosintesi nelle piante assicura che l'acquisizione di carbonio-14 (e anche di carbonio-12 e -13) sotto forma di  $\text{CO}_2$  sia continuo. Quando però una pianta muore si interrompe l'assunzione di carbonio-14 e il decadimento di questo isotopo fa sì che il rapporto  ${}^{14}\text{C}:{}^{12}\text{C}$  cambi gradualmente nel tempo secondo la cinetica del primo ordine del  ${}^{14}\text{C}$ . Assumendo che il rapporto  ${}^{14}\text{C}:{}^{12}\text{C}$  nelle specie viventi non sia cambiato significativamente nella scala dei tempi archeologici, è possibile datare un manufatto misurando tale rapporto di isotopi.

La figura successiva fa vedere graficamente i tempi di emivita dei vari isotopi.

La già citata particolare stabilità dei nuclei pari-pari tende ad impedire il loro decadimento  $\beta$  (in due stadi) per dare un altro nuclide pari-pari dello stesso numero di massa ma di energia inferiore (e naturalmente con due protoni in più e due neutroni in meno), perché il decadimento, procedendo uno stadio alla volta, dovrebbe passare attraverso un nuclide dispari-dispari. Viceversa, i nuclei dispari-dispari sono in genere altamente instabili rispetto al decadimento  $\beta$  perché i prodotti del decadimento sono pari-pari, e quindi energeticamente più favoriti (il decadimento di  ${}^{14}\text{C}$ , pari-pari, a  ${}^{14}\text{N}$ , dispari-dispari e stabile, fa eccezione). Il  ${}^{14}\text{N}$  ha spin nucleare pari a 1 in quanto sia protoni che neutroni, essendo dispari, ne hanno uno spaiato con spin  $\frac{1}{2}$ . Come per gli elettroni, è più stabile la configurazione con spin nucleari paralleli, quindi i due spin si sommano. L'emissione di particelle  $\alpha$  o  $\beta$  può essere uno stadio parte di un **decadimento in serie**. Un esempio è mostrato nella figura dove il nucleo iniziale è  ${}^{238}_{92}\text{U}$  che decade spontaneamente a  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ , il quale a sua volta decade spontaneamente per emissione di una particella  $\beta$  a  ${}^{243}_{91}\text{Pa}$ , il quale a sua volta perde spontaneamente ancora una particella  $\beta$  (esempio di due decadimenti  $\beta$  in serie da un nucleo pari-pari a un altro) Il decadimento in serie prosegue con una successione di nuclei che emettono particelle  $\alpha$  o  $\beta$  fino a raggiungere l'isotopo stabile  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . Tutti gli stadi di questa serie procedono con velocità diverse; da notare che quando ci sono due decadimenti  $\beta$  in serie da un nucleo pari-pari a un altro, il secondo è sempre più veloce perché riguarda un nucleo dispari-dispari, meno stabile. I valori dei tempi di semivita dei nuclei radioattivi variano enormemente,

e.g. da  $4.5 \times 10^9$  anni per  $^{238}_{92}\text{U}$  a  $1.6 \times 10^{-4}$  s per  $^{214}_{84}\text{Po}$ . La tabella successiva elenca i tempi di semivita per i nuclei coinvolti nella serie di decadimenti radioattivi mostrati nella figura precedente.

In natura ci sono circa 300 isotopi stabili mentre ce ne sono circa 3000 radioattivi (quelli conosciuti ed altri 6000 ipotizzati da calcoli teorici). In realtà, fra i cosiddetti isotopi stabili vengono inclusi anche 33 isotopi "quasi stabili", anche detti *nuclidi radioattivi primordiali*, cioè presenti fra i 94 elementi naturali. Essi, pur essendo radioattivi, hanno un tempo di dimezzamento estremamente lungo anche se confrontato con l'età della Terra di 4.5 miliardi di anni (Ga) o comunque abbastanza lungo (> 80 milioni di anni) da far sì che essi siano sopravvissuti fino ad oggi (il limite della semivita pari a 80 Ma è sperimentale, in quanto la determinazione di un nuclide radioattivo dipende dalla sua velocità di decadimento ma anche dalla quantità originale del nuclide e dalla sua concentrazione in giacimenti). Escludendo questi ultimi, gli isotopi veramente stabili sono 255. Sommando 255 a 33 si ottengono i 288 *nuclidi primordiali*. Non si può escludere che in futuro si trovi che nuclei ritenuti stabili (cioè fra i 255) in realtà abbiano decadimenti radioattivi estremamente lenti (emivite più lunghe di  $10^{22}$  anni). Tuttavia, in natura si trovano sulla terra 339 nuclidi, cioè 51 in più dei sopra-citati 288 nuclidi primordiali. I 51 nuclidi che fanno la differenza, pur avendo emivita inferiore a 80 milioni di anni, cioè troppo breve per essere sopravvissuti alla formazione della Terra, sono figli di isotopi primordiali (come il radio che deriva dal decadimento dell'uranio) oppure sono creati da processi energetici naturali, come il carbonio-14 che si genera dall'azoto atmosferico in seguito a bombardamento dei raggi cosmici (*nuclide cosmogenico*).

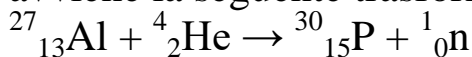
In realtà, per le conoscenze attuali, nessun nucleo più pesante del piombo (numero atomico 82) possiede isotopi stabili. Quindi il piombo è ritenuto essere l'elemento più pesante con isotopi stabili. 80 dei primi 82 elementi (esclusi tecnezio e promezio), hanno almeno un isotopo stabile. Il record di isotopi stabili è dello stagno, che ne ha 10. Gli elementi che hanno un solo nuclide stabile sono 26 e tutti tranne uno hanno numero atomico dispari (infatti, per quanto detto sopra, i nuclei con numero atomico dispari sono meno stabili di quelli pari e quindi tendono, in generale, ad avere meno isotopi stabili).

## Isotopi artificiali

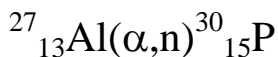


Il bombardamento di nuclei stabili con neutroni ad alta energia o con particelle cariche positivamente può trasformarli in nuclei radioattivi. In particolare il bombardamento con neutroni è molto efficace, in quanto essendo particelle neutre non subiscono repulsione elettrostatica da parte dei nuclei. Tuttavia per disporre di neutroni serve un reattore nucleare.

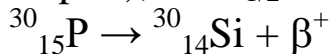
Le reazioni nucleari avvengono con la **conservazione del numero atomico** (numero di protoni) e **del numero di massa atomica** (protoni + neutroni) e possono essere utilizzate per generare isotopi artificiali. Ad esempio, quando un foglio di alluminio è bombardato con particelle  $\alpha$  che siano state accelerate in un ciclotrone (una macchina usata per accelerare fasci di particelle elettricamente cariche – normalmente ioni leggeri – utilizzando una corrente alternata ad alta frequenza ed alta tensione, in associazione con un campo magnetico perpendicolare, vedi immagine) avviene la seguente trasformazione nucleare:



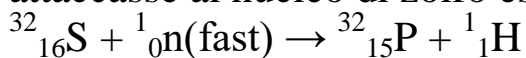
che in chimica nucleare si scrive anche nella forma:



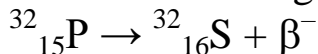
Il fosforo 30, prodotto di questa reazione, decade rapidamente (dispari-dispari), con  $t_{1/2}$  di 3.2 min, emettendo un positrone:



Isotopi diversi dello stesso elemento si possono ottenere con procedure diverse. Ad esempio, bombardando atomi di zolfo-32 con neutroni veloci (come quelli che si ottengono dalla fissione di  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , con energie di circa 1 MeV) si ottiene un altro isotopo del fosforo, il fosforo-32, con emissione di un protone (grezzamente, si può pensare come se il neutrone veloce si attaccasse al nucleo di zolfo espellendo un protone):



il quale (dispari-dispari) decade emettendo particelle  $\beta$ , con un tempo di semivita di 14.3 giorni:



Un processo molto importante per la produzione di isotopi radioattivi artificiali è la cosiddetta **reazione (n, $\gamma$ )**, che prevede il bombardamento di nuclei con neutroni lenti (anche detti **neutroni termici**), che hanno un'energia di circa **0.05 eV**, e la conseguente emissione di radiazione  $\gamma$ . La fissione dei nuclei di  ${}^{235}_{92}\text{U}$  genera neutroni veloci (energia cinetica di alcune centinaia di keV) e, per ottenere neutroni termici, la loro energia cinetica viene ridotta attraverso collisioni elastiche con nuclei leggeri (e.g.  ${}^{12}_6\text{C}$  o  ${}^2_1\text{H}$ ) durante il passaggio attraverso grafite o acqua deuterata (*acqua*

*pesante*). Un esempio di uso dei neutroni termici per la produzione di isotopi è il bombardamento di fosforo-31 per produrre fosforo-32 (diversamente dal caso visto sopra col neutrone veloce, il neutrone termico si *attacca al nucleo* senza espellere niente):



La produzione di nuclei artificiali ha **due importanti conseguenze**:

- la produzione di **isotopi artificiali** per elementi che non possiedono radioisotopi naturali;
- la sintesi di **elementi transuranici**, cioè con numero atomico  $Z \geq 93$ , che sono quasi tutti prodotti solo artificialmente dall'uomo. Altri elementi prodotti dall'uomo sono tecnezio (Tc), promezio (Pm), astato (At) e francio (Fr).

Nuclei diversi hanno capacità molto differenti di assorbire neutroni, e anche differenti probabilità di dare poi reazioni nucleari. Questa capacità si riassume nella cosiddetta **cross-section** (sezione d'urto) di un nucleo per una particolare reazione nucleare. Ad esempio i nuclei  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  e  ${}^1_1\text{H}$  hanno sezioni d'urto molto piccole rispetto alla cattura di neutroni (la sezione d'urto è una misura della probabilità della cattura neutronica), mentre al contrario  ${}^{10}_5\text{B}$  e  ${}^{113}_{48}\text{Cd}$  posseggono sezioni d'urto molto elevate.