

# Spigolature astronomiche<sup>★</sup>

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

## Fissione e fusione: l'utilizzo dell'energia nucleare

Annibale D'Ercole

RECENTEMENTE i media hanno dato grande risalto a un risultato ottenuto in un esperimento di energia nucleare eseguito tramite l'apparato NIF (National Ignition Facility) presso il Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, California. Tale risalto (giustificato ma eccessivo, come vedremo) ha dato lo spunto per la presente nota così organizzata: nel livello base diamo alcune semplici nozioni sui nuclei atomici, mentre nel livello avanzato descriviamo come è possibile utilizzarli per produrre energia.

Com'è noto, un atomo è costituito da un nucleo centrale e da elettroni che gli orbitano intorno. A sua volta il nucleo è composto da *neutroni* e *protoni* (che nel loro insieme vengono detti *nucleoni*) sostanzialmente di pari massa ( $m_n \approx m_p = 1,67 \times 10^{-27}$  kg) e pari raggio ( $0,83 \text{ fm} = 0,83 \text{ femtometri}^1 = 0,83 \times 10^{-15} \text{ m} = 0,83$  milionesimi di miliardesimi di metro). Il neutrone, come dice la parola stessa, è privo di carica elettrica mentre il protone ha una carica positiva pari a  $q_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  (dove C sta per l'unità di misura coulomb della carica elettrica). L'elettrone ha una carica opposta a quella del protone ed è quindi legato al nucleo dalla forza elettrostatica che è molto più intensa di quella gravitazionale.

Nuclei diversi sono caratterizzati da un diverso valore dei numeri  $A$  e  $Z$ :  $A$  è detto *numero di massa* e indica il numero totale di nucleoni, mentre  $Z$  è detto *numero atomico* e rappresenta il numero di protoni.

\* Questa rubrica – iniziata nel 1999 e che ha ormai quasi raggiunto i novanta numeri – si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi “fondamenti di astronomia”, volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

<sup>1</sup> Il femtometro è stato inizialmente chiamato “fermi” in onore del fisico italiano Enrico Fermi.

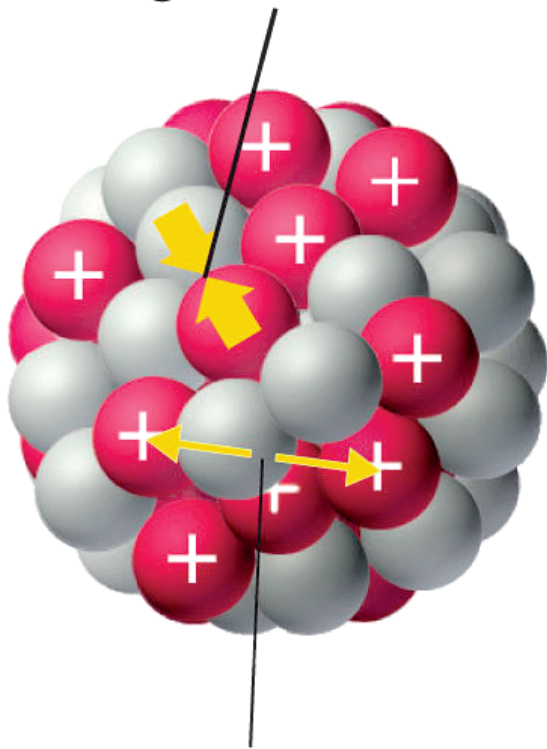
In breve, un determinato elemento  $X$  viene indicato come  ${}^A_ZX$ . Nuclei di uno stesso elemento hanno lo stesso numero di protoni. Per quanto riguarda il numero di massa, invece, esistono nuclei che pur avendo lo stesso  $Z$  (e quindi rappresentativi dello stesso elemento) hanno un diverso  $A$ , ossia hanno un diverso numero di neutroni. Questi nuclei vengono detti *isotopi*.<sup>2</sup>

Il nucleo atomico mostra un paio di “stranezze”: 1) la presenza apparentemente superflua di neutroni che non contribuiscono a legare gli elettroni all'atomo, e 2) l'“impacchettamento” dei protoni entro distanze dell'ordine di 1 fm nonostante l'enorme forza repulsiva che esercitano reciprocamente. Com'è facile verificare, l'attrazione gravitazionale tra protoni è ben lungi dal contrastarne la tendenza alla dispersione. Questo significa che deve esistere un'altra forza attrattiva talmente intensa da riuscire a mantenere i protoni legati fra loro. Ed effettivamente nei nuclei è presente la cosiddetta *forza nucleare forte* (inizialmente ipotizzata da Ettore Majorana nel 1933) che ogni nucleone esercita nei confronti degli altri. Essa è estremamente intensa (circa 100 volte quella elettrica) fino a distanze di circa  $\sim 1$  fm, ma diminuisce rapidamente diventando insignificante a distanze superiori a circa 2,5 fm. La repulsione elettrica tra due protoni alla distanza di 1 fm è talmente intensa che neanche la loro forza forte riuscirebbe a tenerli uniti. Vengono pertanto in soccorso i neutroni che incrementano la forza forte lasciando inalterata quella elettrica. Questo spiega le due “stranezze” citate all'inizio di questo paragrafo (FIG. 1).

Da quanto appena detto ci si aspetta che il numero di neutroni  $N$  cresca all'aumentare dei protoni, ed in effetti si osserva un incremento di  $N/Z$  con  $A$ . Per i nuclei più leggeri  $N$  e  $Z$  crescono di pari passo:  $N/Z = 1$ . Tuttavia, per nuclei con  $A > 40$  si registra

<sup>2</sup> Il caso più semplice è dato dal nucleo di idrogeno: nel 99,985% dei casi esso è rappresentato da un singolo protone e viene chiamato *protio* ( ${}^1_1\text{H}$ ). Vi è poi un 0,0156% di casi in cui il nucleo, detto *deuterio*, possiede un neutrone ( ${}^2_1\text{H}$ ) ed è anche indicato con la lettera D. Esiste infine l'isotopo *trizio* che contiene due neutroni ( ${}^3_1\text{H}$ ), anche indicato come T.

## Strong nuclear force



## Electrostatic repulsion

FIG. 1. Nucleo atomico composto da nucleoni (protoni + neutroni). Sono rappresentate la forza forte con cui i nucleoni si attraggono reciprocamente e la forza elettrostatica con cui si respingono i protoni.

un deciso aumento di  $N/Z$  (FIG. 2). Il motivo è dovuto al breve raggio di azione della forza forte che agisce sostanzialmente solo sui nucleoni circostanti. Se consideriamo un nucleo pesante come il cesio ( $A = 133$ ) con un raggio<sup>3</sup> di  $\sim 6$  fm, è chiaro che i nucleoni posti ad un'estremità del nucleo non risentono della forza forte dei nucleoni collocati all'estremità opposta. Questo pone un limite alle dimensioni di un nucleo stabile. Nuclei con  $Z > 83$  tendono a "sfaldarsi" *radioattivamente*. Paradossalmente (per la fisica classica) un eccesso di neutroni porta anch'esso ad una instabilità del nucleo per motivi legati alla meccanica quantistica e al *principio di esclusione* di Pauli di cui, però, non ci occuperemo in questa nota. Quanto esposto spiega come mai i nuclei stabili tendono a disporsi in FIG. 2 lungo una striscia relativamente stretta detta "banda di stabilità".

Fin qui abbiamo esposto (assai sommariamente) la fisica all'interno di un nucleo in termini di forze. È tuttavia più conveniente utilizzare una descrizione basata sul concetto di energia. A questo scopo iniziamo con un esempio familiare che nulla ha a che fare con la fisica nucleare. Consideriamo un si-

<sup>3</sup> Una sfera di volume  $V$  ha un raggio proporzionale alla radice cubica di tale volume:  $R \propto V^{1/3}$ . Se consideriamo un nucleo come un agglomerato sferico di volume  $V$  composto da  $A$  nucleoni si osserva che il suo raggio è dato da  $R = r_0 A^{1/3}$ , con  $r_0 = 1,2$  fm.

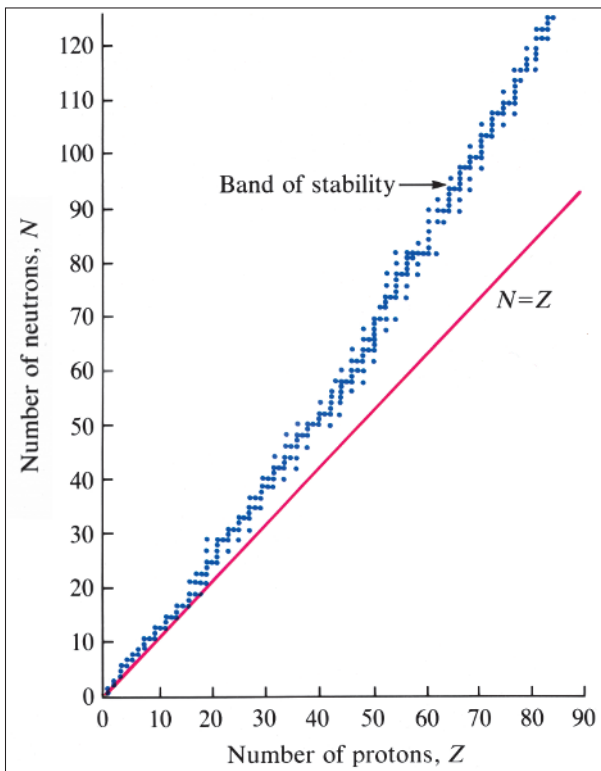


FIG. 2. La banda di stabilità. I punti azzurri rappresentano i nuclei stabili. Per  $Z < 20$  i protoni e i neutroni sono in ugual numero:  $N/Z = 1$ . Successivamente, i neutroni prevalgono sui protoni all'incirca con un rapporto  $N/Z = 1,5$ . Nuclei al di sopra (eccesso di neutroni) o al di sotto (scarsità di neutroni) della striscia azzurra sono instabili (radioattivi), così come i nuclei con  $Z > 83$ .

stema composto da due barrette magnetizzate in quiete e poste ad una distanza tale da non risentire della reciproca influenza. L'energia totale del sistema sarà allora  $E_t = 0$ . Esaminiamo ora il caso in cui le due barrette siano a diretto contatto, legate magneticamente. Per separarle e portarle alla distanza del caso precedente dobbiamo afferrarle e spendere dell'energia muscolare positiva (l'energia fornita ad un sistema dall'esterno è considerata positiva)  $E_s > 0$ . Pertanto, una volta allontanate, il sistema si ritrova di nuovo con energia nulla. Ma noi sappiamo che l'energia si deve conservare. Che fine ha fatto l'energia  $E_s$  che abbiamo immesso? Essa è stata spesa per "slegare" le due barrette serrate l'un l'altra dalla cosiddetta *energia di legame*  $E_l < 0$  generata dall'attrazione magnetica (in generale, qualunque forza attrattiva che tiene legate tra loro diverse parti di un sistema fisico fa sì che quest'ultimo sia dotato di una energia di legame negativa). In conclusione abbiamo  $E_t = E_s + E_l = 0$ , da cui, ovviamente,  $E_l = -E_s$ .

Passiamo ora ai nuclei atomici tenendo in mente l'esempio delle calamite. L'energia positiva  $E_s$  rappresenta l'energia che bisognerebbe iniettare in un nucleo per separare i nucleoni l'uno dall'altro. La stessa quantità di energia (ma di segno opposto)  $E_l$  è l'energia di legame necessaria per tenere aggregati i nucleoni che costituiscono il nucleo. Nel mondo microscopico, tuttavia, bisogna considerare un importante dettaglio che risulta trascurabile nel-

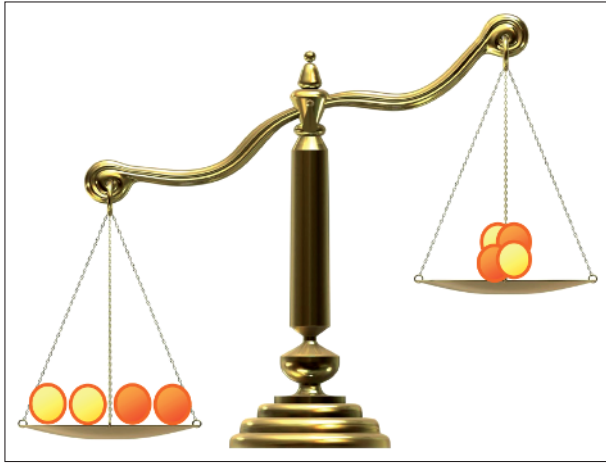


FIG. 3. La massa del nucleo di elio  ${}^4_2\text{He}$  è inferiore di una quantità  $\Delta m$  alla somma dei nucleoni che lo compongono:  $\Delta m = 2m_p + 2m_n - m_{{}^4_2\text{He}}$ .

l'esempio delle calamite. Classicamente ci aspetteremmo che la massa di un nucleo atomico equivalga alla somma delle masse dei suoi nucleoni. Ad esempio, l'elio  ${}^4_2\text{He}$  dovrebbe avere una massa totale pari a  $m_t = 2m_p + 2m_n = 6,695 \times 10^{-27}$  kg. In realtà si osserva una massa  $m_{\text{He}} = 6,645 \times 10^{-27}$  kg. Pertanto è presente un cosiddetto *difetto di massa*  $\Delta m = m_t - m_{\text{He}} = 5 \times 10^{-29}$  kg, pari a  $0,0075 m_t$  (FIG. 3). Questo difetto è collegato alla celeberrima equazione di Einstein (a cui abbiamo dedicato le *Spigolature* del n. 4 del 2006) che sancisce l'equivalenza tra massa ed energia:  $E = mc^2$  (dove  $c = 3 \times 10^5$  km/s è la velocità della luce). Infatti, in virtù di questa formula, all'energia di legame  $E_l$  dell'elio è associata una massa  $-E_l/c^2 = \Delta m$  che va sottratta (giacché  $E_l$  è negativa) alla massa totale per cui  $m_{\text{He}} = m_t - \Delta m$ . Nella fattispecie,  $E_l = -\Delta mc^2 = -4,5 \times 10^{-12}$  joule.<sup>4</sup>

La FIG. 4 mostra come varia in funzione del numero di massa  $A$  l'energia media di legame per nucleone  $E_l/A$ , ossia l'energia necessaria per "staccare" un solo nucleone da un nucleo e condurlo fuori dalla portata della forza forte. L'unità usata per l'energia in questo grafico – e più in generale nella fisica delle particelle – è l'*elettronvolt* (1 eV =  $1,6 \times 10^{-19}$  joule;<sup>5</sup> 1 MeV =  $10^6$  eV). Come si vede, nei nuclei più leggeri l'energia di legame per nucleone cresce rapidamente col numero di massa. Con l'incremento di  $A$  questa crescita tuttavia rallenta perché la repulsione elettrica dei protoni aumenta mentre il contributo della forza forte diminuisce, dal momento che,

<sup>4</sup> In termini più abituali, si considerino 6 g di  ${}^4_2\text{He}$ . Essi sono composti da  $9,23 \times 10^{23}$  atomi a cui corrisponde un'energia di legame totale  $9,23 \times 10^{23} \times -4,5 \times 10^{-12} = -4,15 \times 10^{12}$  J (che, cambiata di segno, può anche essere interpretata come l'energia necessaria per "smembrare" tutti i nuclei nei nucleoni costituenti) pari all'energia liberata da 1000 tonnellate di tritolo.

<sup>5</sup> Si considerino due piastre collegate ad una pila in modo che una abbia carica negativa e l'altra positiva e che tra esse vi sia una differenza di potenziale di un volt. Un elettrone adiacente alla piastra negativa verrà respinto da quest'ultima e attratto dalla piastra opposta. Esso accelererà sempre di più fino ad acquisire, al raggiungimento della piastra positiva, un'energia cinetica pari a  $1,6 \times 10^{-19}$  joule corrispondenti, per definizione, a 1 eV.

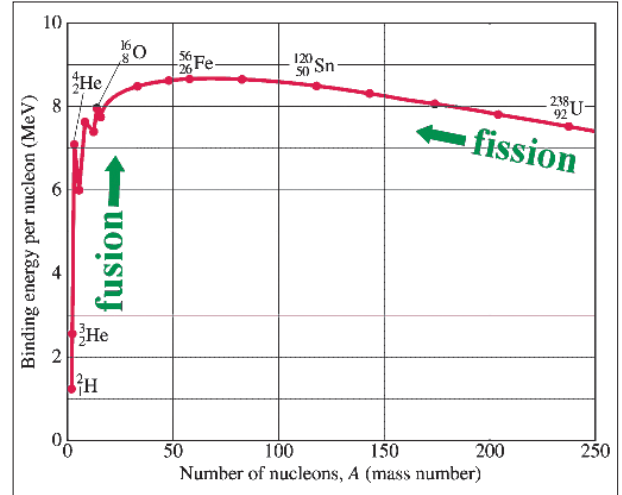


FIG. 4. Energia di legame per nucleone  $E_l/A$  in funzione di  $A$  (cambiata di segno per facilitare l'interpretazione). La curva presenta un massimo per  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  detto *picco del ferro*. A destra di tale picco è possibile realizzare reazioni nucleari esotermiche solo risalendo la curva tramite fissione, ossia spaccando un atomo pesante in due frammenti più leggeri. Al contrario, a sinistra del picco l'energia viene prodotta per fusione, ossia unendo nuclei leggeri in nuclei più pesanti.

come abbiamo detto, solo i nucleoni vicini sono legati strettamente tra loro e non quelli separati da maggiore distanza. L'energia di legame per nucleone raggiunge il massimo per il nucleo del ferro  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$  per poi diminuire all'aumentare della repulsione elettrostatica tra protoni. Per  $Z > 82$  (ossia per elementi più pesanti del piombo  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ) l'intensità di questa repulsione è tale da superare l'attrazione della forza forte consentendo la presenza di soli nuclei radioattivi che nel tempo si trasformano in nuclei stabili con diversi valori di  $A$  e  $Z$ .

Per quanto riguarda la produzione di energia nucleare il picco del ferro rappresenta una sorta di discriminante. Dalla FIG. 4 vediamo infatti che, "a sinistra" del  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , due nuclei leggeri che si uniscono danno luogo ad una *fusione* formando un nucleo più pesante con una massa tuttavia inferiore alla somma delle masse dei due nuclei originali a causa della sua maggiore energia di legame. Questa massa mancante viene generalmente convertita in raggi  $\gamma$ , in neutrini e in energia cinetica di particelle. Un caso particolare di fusione è illustrato in FIG. 5.

A "destra" del picco del ferro la produzione di energia tramite fusione è impraticabile per diversi motivi. Innanzi tutto è necessario fornire a due nuclei pesanti un'elevata energia cinetica per permettere loro di unirsi prevalendo sulla forte repulsione elettrica dovuta alla numerosa presenza di protoni. Inoltre, visto l'andamento della curva in FIG. 4, il nucleo finale avrebbe un'energia di legame inferiore a quella dei nuclei di partenza e – contrariamente alla fusione dei nuclei leggeri – il processo assorbirebbe energia piuttosto che produrne. Solo eventi astrofisici estremi come le esplosioni di supernovae possono produrre energia sufficiente a generare per fusione nuclei più pesanti del ferro.

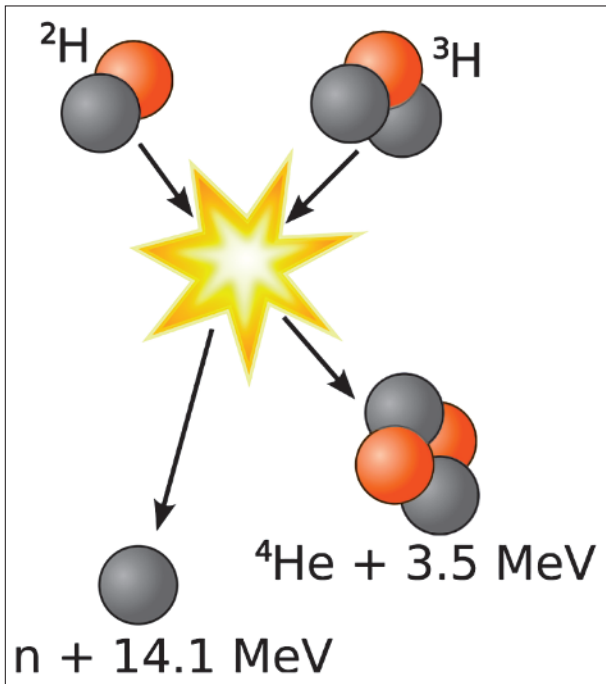


FIG. 5. La fusione di due diversi isotopi del nucleo di idrogeno, il deuterio  ${}^2\text{H}$  (D) e il trizio  ${}^3\text{H}$  (T), genera un nucleo di elio e libera dai legami nucleari un neutrone. Questo tipo di fusione è ottimale per la formazione di elio perché avviene a energie cinetiche di D e T (necessarie per superare la repulsione coulombiana e attivare la fusione) relativamente basse e genera maggiore energia rispetto alla fusione di altri elementi. In particolare, la differenza tra massa iniziale e finale rilascia una quantità di energia pari a 17,6 MeV, essenzialmente sotto forma di energia cinetica del neutrone per l'80% e del nucleo d'elio per il 20%.

È tuttavia possibile estrarre energia dai nuclei pesanti tramite *fissione*, ossia "spaccandoli" in due frammenti il cui rapporto tra le rispettive masse è variabile, ma tipicamente dell'ordine 1:2. Essendo più piccoli, i frammenti si trovano più a sinistra – e quindi più in alto – lungo il ramo destro della curva di FIG. 4. Questo significa che la somma delle energie di legame dei due frammenti è maggiore di quella del nucleo originario. Per quanto detto più sopra, la somma delle masse dei frammenti è minore di quella del nucleo iniziale e questa massa mancante, come ormai sappiamo, è trasformata in energia. In FIG. 6 è rappresentato un tipico esempio di fissione in cui un nucleo di uranio  ${}^{235}_{92}\text{U}$  viene spezzato mediante un neutrone utilizzato come proiettile. Come si vede, vengono rilasciati singoli neutroni che possono a loro volta indurre altre fissioni di nuclei circostanti ognuna delle quali produce ulteriori neutroni innescando una *reazione a catena* (si veda il livello avanzato). La fissione di 1 grammo di uranio produce un'energia pari alla combustione di circa 2800 kg di carbone.

*La fissione nucleare richiama inevitabilmente alla mente la devastante potenza della bomba atomica sganciata su Hiroshima. Noi non tratteremo qui i*

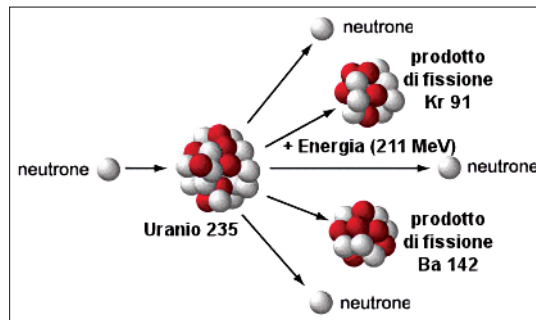


FIG. 6. Fissione dell'uranio  ${}^{235}_{92}\text{U}$  da parte di un neutrone. Vengono liberati tre neutroni mentre il nucleo di uranio è spezzato in due frammenti, il kripton  ${}^{91}_{36}\text{Kr}$  e il bario  ${}^{142}_{56}\text{Ba}$ , entrambi radioattivi. L'energia prodotta è pari a circa 200 MeV (corrispondente a circa lo 0,1% della massa del nucleo originario) in forma di raggi  $\gamma$ , energia cinetica dei due frammenti e dei neutroni liberi. Quelli illustrati non sono gli unici frammenti possibili; due nuclei di elementi diversi possono ugualmente realizzarsi.

*dettagli del meccanismo della bomba. Tuttavia vale la pena sottolineare alcuni aspetti di carattere generale. Come si vede dalla FIG. 6, nella fissione di un nucleo  ${}^{238}_{92}\text{U}$  un singolo neutrone ne libera tre; ognuno di questi può a sua volta scindere un altro nucleo di uranio liberando altri tre neutroni, e così via. Questo processo viene detto reazione a catena e, una volta iniziato, è in grado di autosostenersi. Perché questo avvenga è però necessario che vi sia un numero adeguato di nuclei da spezzare, che vi sia, cioè, una massa critica di uranio al di sotto della quale la reazione a catena non produce l'effetto desiderato. In caso contrario, la reazione a catena è in grado di rilasciare "istantaneamente"<sup>6</sup> una quantità enorme di energia.*

*Bisogna sottolineare che in natura una data quantità di uranio è composta per il 0,7% dall'isotopo  ${}^{235}_{92}\text{U}$  e per lo 99,3% dall'isotopo  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Quest'ultimo, contrariamente all' ${}^{235}_{92}\text{U}$ , ha una scarsa probabilità di essere spezzato da un neutrone che invece viene catturato per formare  ${}^{239}_{92}\text{U}$ . Isolare l' ${}^{235}_{92}\text{U}$  richiede una procedura alquanto complessa; nel costruire la prima bomba atomica gli scienziati impiegarono due anni per ottenere una massa di uranio del peso di 64 kg arricchita al 90% di  ${}^{235}_{92}\text{U}$ .*

*Naturalmente, è possibile ottenere energia dalla fissione dell'uranio in maniera controllata, come dimostrano le oltre 400 centrali nucleari presenti al mondo, costruite allo scopo di produrre energia elettrica. È stato il gruppo di Enrico Fermi nel 1942*

<sup>6</sup> Ragionando con ordini di grandezza, un neutrone ha una velocità  $v \sim 10^7$  m/s mentre la massa critica ha dimensioni lineari  $L \sim 0,1$  m. Per attraversare direttamente la massa critica il neutrone impiegherebbe  $\tau \sim L/v = 10^{-8}$  s. In realtà i neutroni prodotti ad ogni fissione procedono in diverse direzioni, e l'effettivo tempo per completare la reazione a catena è circa 80 $\tau$ , cioè circa un microsecondo.

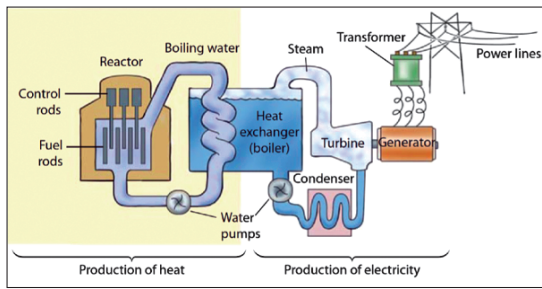


FIG. 7. Schema di una centrale nucleare (si veda il testo).

a realizzare la prima fissione controllata costruendo una “pila atomica” (come venne battezzata allora) all’Università di Chicago.

Una centrale nucleare a fissione (FIG. 7) è composta da una camera di combustione piena d’acqua (detta nocciolo) dove avviene la fissione del combustibile formato da barre di  $^{235}_{92}\text{U}$  arricchito da un 3% di  $^{235}_{92}\text{U}$ . La scarsità di quest’ultimo isotopo impedisce il realizzarsi di un’esplosione simile a quella di una bomba. Il tasso di reazioni dipende dal numero di neutroni che operano la scissione di ulteriori nuclei<sup>7</sup> di  $^{235}_{92}\text{U}$ . Questo numero è controllato da barre con inserimento regolabile nel reattore e composte da materiale come il cadmio o il boro in grado di assorbire neutroni; inserendo del tutto le barre di controllo è possibile bloccare la reazione a catena.

Benché appaia controintuitivo, un nucleo di uranio ha maggiore probabilità di essere spezzato da un neutrone lento piuttosto che da uno veloce. Per ottenere la massima efficienza è dunque necessaria la presenza di un moderatore che rallenti i neutroni. L’acqua presente agisce effettivamente da moderatore in quanto i neutroni, urtando contro le sue molecole, cedono loro gran parte della propria energia. Tuttavia, la normale molecola d’acqua composta da due atomi di prozio e uno di ossigeno ( $\text{H}_2\text{O}$ ) presenta l’inconveniente che i protoni tendono a catturare i neutroni formando deuterio e sottraendoli quindi al processo della reazione a catena. Per questo motivo viene preferita, nonostante il suo maggior costo, la cosiddetta acqua pesante che ha una scarsa propensione alla cattura di neutroni, giacché nelle sue molecole il deuterio è già presente in quanto il prozio è sostituito proprio dal deuterio ( $\text{D}_2\text{O}$ ).

Come abbiamo detto, l’acqua nel reattore si scalda per via dei neutroni veloci. Inoltre essa è sottoposta a pressioni altissime (circa 100 volte quella atmosferica) e può quindi raggiungere temperature di

<sup>7</sup> Per ottenere una fissione controllata (ossia un tasso stazionario nella produzione di energia) è necessario che ogni singolo neutrone “perso” nel processo di fissione precedente sia rimpiazzato da un solo neutrone nella fissione successiva. Se il rimpiazzo è inferiore, la produzione di energia è destinata ad esaurirsi, se superiore essa cresce eccessivamente.

oltre 300 °C senza evaporare;<sup>8</sup> questo calore viene trasferito ad un altro recipiente pieno d’acqua normale il cui vapore attiva una turbina che aziona un generatore di elettricità. La separazione tra i due contenitori d’acqua è necessaria per impedire la trasmissione di radioattività dei frammenti del nucleo di  $^{235}_{92}\text{U}$  alla turbina e, più in generale, all’esterno della centrale.

L’attività delle centrali nucleari non produce i gas serra tipici dei combustibili fossili ma genera elementi, dette scorie radioattive, che per migliaia di anni emettono radiazioni dannosissime per l’uomo e per l’ambiente se non trattate opportunamente. Inoltre, la scorta mondiale di uranio è all’incirca  $\frac{1}{4}$  di quella del petrolio e dunque è destinata ad esaurirsi.

Per ovviare ai succitati (e ulteriori) inconvenienti, è allo studio la possibilità di realizzare centrali che producano energia tramite la fusione dell’idrogeno in elio. In effetti, queste reazioni non rilasciano scorie radioattive ma nuclei di elio (che è un gas nobile del tutto innocuo) e il “carburante” – composto da D e T (FIG. 5) – è abbondante.<sup>9</sup>

La fusione avviene continuamente al centro delle stelle. Ad esempio, nel Sole la pressione centrale è assai elevata a causa del peso degli strati di gas sovrastanti, la densità è anch’essa notevole (circa  $10^5$  volte quella dell’atmosfera terrestre al livello del mare) e la temperatura è dell’ordine di  $15 \times 10^6$  °C. A queste temperature le singole particelle del gas (composto principalmente da idrogeno ed elio) sono dissociate negli elementi costitutivi (ioni positivi, cioè nuclei, ed elettroni) e il gas stesso è una miscela (globalmente neutra) di particelle cariche detta plasma. Grazie all’elevata temperatura, la velocità di agitazione termica dei nuclei è tale da permettere loro di vincere la mutua repulsione coulombiana ed avvicinarsi a distanze dell’ordine di 1 fm in maniera da rimanere reciprocamente “arpionati” dalla forza forte e realizzare la fusione dell’idrogeno in elio, liberando energia. Ogni secondo nel Sole 564 milioni di tonnellate di idrogeno si trasformano in 560 milioni di tonnellate di elio, mentre le rimanenti 4 milioni di tonnellate di materia vengono tramutate in energia.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa avviene quando la pressione del vapore uguaglia quella esercitata sull’acqua. Pertanto, aumentando la pressione aumenta anche la temperatura di ebollizione. Per questo motivo in montagna (dove la pressione atmosferica è minore) l’acqua bolle a temperature inferiori a 100 °C e gli spaghetti impiegano più tempo a cuocersi!

<sup>9</sup> Il deuterio è abbondante nell’acqua di mare ( $30 \text{ g/m}^3$ ) mentre il trizio, materiale radioattivo con un tempo di dimezzamento di 12,36 anni, non esiste in quantità apprezzabili in natura ma può essere generato in modo relativamente semplice.

<sup>10</sup> Precisiamo che nel Sole l’elio non viene prodotto secondo il procedimento illustrato in FIG. 5 ma tramite una serie relativamente complessa di passi intermedi detta *catena protone-protone (p-p)* che non discutiamo in questa sede (si vedano comunque le *Spigolature* del n. 2 del 2006).

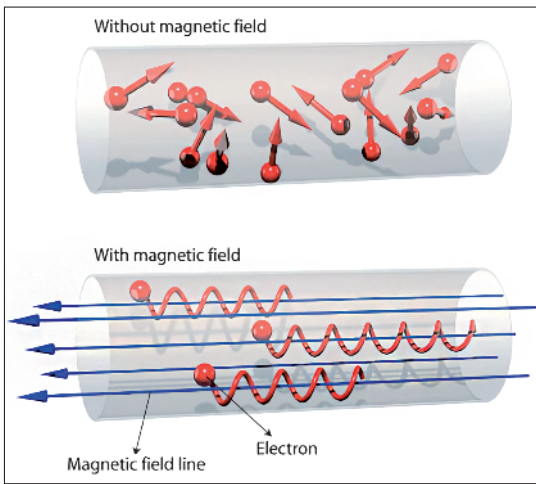


FIG. 8. Il pannello superiore illustra il moto termico caotico delle particelle (le cui velocità sono indicate dalle frecce) in assenza di campo magnetico. Il pannello inferiore mostra come le particelle cariche si muovono spiraleggiando lungo le linee di un campo magnetico eventualmente presente.

Realizzare una centrale a fusione sulla Terra significa produrre un plasma in condizioni simili per certi aspetti a quelle del centro del Sole. Si capisce, quindi, che la costruzione di queste centrali presenta difficoltà fisiche e ingegneristiche formidabili che implicano costi elevati (decine di miliardi di euro) e lunghe tempistiche di progettazione (qualche decennio). Su (alcune) problematiche riguardanti la realizzazione di centrali a fusione torneremo con maggior cognizione di causa al termine di questa nota. In quel che segue diamo una succinta descrizione dei meccanismi su cui si basa una centrale a fusione.

Una tale centrale necessita di un contenitore che racchiuda una quantità di plasma ad una temperatura talmente alta che le pareti materiali del contenitore evaporerebbero in breve. Pertanto il contenimento del plasma deve avvenire tramite meccanismi “immateriali”. I due possibili meccanismi sono il confinamento magnetico e il confinamento inerziale.

Il confinamento magnetico si basa sulla forza di Lorentz, una forza esercitata da un campo magnetico su qualsiasi carica elettrica in movimento; in particolare, la particella carica è indotta a muoversi spiraleggiando lungo le linee del campo (FIG. 8). Pertanto, dobbiamo immaginare il contenitore come una gabbia le cui sbarre sono rappresentate da linee di campo magnetico. Un contenitore così concepito va sotto il nome di tokamak (acronimo russo per “camera toroidale con spire magnetiche”) ed è frutto di una progettazione estremamente complessa. Per iniziare il processo viene attivato il campo magnetico e il contenitore viene riempito di gas composto da D e T con una densità  $10^4 - 10^5$  volte inferiore a quella dell’aria (vedremo più in là il per-

ché di valori così bassi). Questo gas viene poi completamente ionizzato e trasformato in plasma portandolo a temperature dell’ordine di  $10^8$  °C;<sup>11</sup> un tale riscaldamento è ottenuto facendo attraversare il gas da un’intensa corrente elettrica e sottoponendolo a onde radio ad alta energia. In queste condizioni si verifica l’ignizione, ossia l’attivazione di fusioni nucleari in grado di autosostenersi producendo elio e neutroni altamente energetici, come mostrato in FIG. 5. I nuclei di elio rimangono intrappolati nel contenitore contribuendo a mantenere caldo il plasma dopo il riscaldamento iniziale. I neutroni, invece, fuoriescono dal confinamento magnetico e vanno a urtare le pareti esterne che racchiudono il recipiente. Per via di questi urti le pareti si scaldano ed emettono calore che viene infine utilizzato per produrre elettricità (sostanzialmente come nel caso delle centrali a fissione).

In alternativa al confinamento magnetico c’è quello inerziale. In questo caso si ottengono una serie di “micro esplosioni” bombardando in successione, tramite potenti fasci laser, microsferi con un raggio dell’ordine di 1,5 mm, delimitate da un sottile guscio di materiale plastico e contenenti qualche milligrammo di “combustibile” composto da una miscela di deuterio e trizio (D-T). Ogni micro esplosione è paragonabile a quella di 11 kg di tritolo; un quantitativo maggiore di combustibile produrrebbe esplosioni che danneggerebbero le strutture della centrale.

A causa del violento riscaldamento dovuto ai laser, il lato esterno del guscio evapora verso l’esterno molto rapidamente. Si sviluppa allora lo stesso effetto che fa muovere i missili: per il principio di azione e reazione il guscio viene spinto vigorosamente verso il centro con velocità che nel NIF raggiungono 350 km/s. L’implosione comprime e riscalda la miscela che forma così un plasma ad altissima densità ( $\sim 1000$  g/cm<sup>3</sup>, circa il decuplo di quella del piombo), enorme pressione ( $\sim 10^{11}$  bar, ossia 100 miliardi di volte la pressione atmosferica al livello del mare) e temperatura simile a quella del centro del Sole ( $\sim 1,5 \times 10^7$  °C). Il plasma rimane confinato per via della sua inerzia (da cui il nome di questo metodo di confinamento) per un tempo brevissimo ( $\sim 10^{-10}$  s) prima di espandersi a sua volta (FIG. 9). Per il rilascio di energia nucleare è dunque necessario che la fusione avvenga in tempi pari o inferiori al tempo di confinamento, e questo è reso possibile dalla grande velocità con cui la microsfera collassa.

Se la microsfera fosse scaldata solo da un lato, per “l’effetto razzo” essa accelererebbe nella direzione opposta a quella lungo cui evapora il guscio e non si raggiungerebbero i valori di densità, tem-

<sup>11</sup> Questa temperatura è superiore a quella centrale del Sole, ma è quella a cui avviene la fusione tra deuterio e trizio.

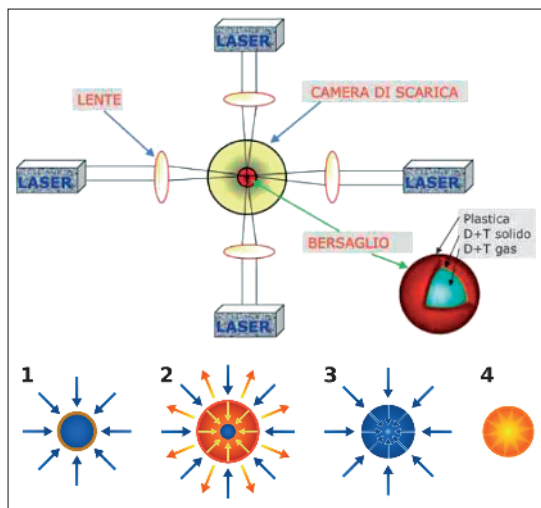


FIG. 9. Pannello superiore. Illustrazione schematica dell'“accensione” di una microsfera tramite la convergenza su di essa di vari fasci laser. Viene anche riportato uno spaccato della microsfera. Pannello inferiore. Le quattro fasi di una fusione all'interno di una microsfera: 1) riscaldamento dell'involucro tramite fasci laser (freccie blu). 2) La vaporizzazione dell'esterno dell'involucro e conseguente collasso del guscio (freccie gialle) che comprime la miscela D-T. 3) La densità e la temperatura centrali salgono fino a valori che permettono l'ignizione. 4) La fusione si propaga rapidamente attraverso tutta la microsfera.

peratura e pressione necessari per l'ignizione. È dunque essenziale scaldare il guscio uniformemente; nell'esperimento NIF una microsfera è stata colpita in ogni punto dall'energia di 192 potenti

fasci laser tramite un particolare accorgimento tecnologico.

La pressione  $P$  di un plasma è collegata alla sua densità  $\rho$  tramite la relazione  $P \propto \rho T$ . Dato l'elevato valore di  $T$  la densità del plasma in un tokamak deve essere necessariamente bassa perché la sua pressione possa essere sopportata dalla struttura della centrale. Per operare quindi con una ragionevole quantità di combustibile, la centrale deve avere le dimensioni di un palazzo di diversi piani. Per soddisfare le necessità energetiche di una nazione sarebbe quindi necessario costruire un discreto numero di centrali grandi, costose e dai lunghi tempi di realizzazione.

Per quanto riguarda la tecnica del confinamento inerziale, lo scalpore suscitato dall'esperimento NIF (a cui ci siamo riferiti all'inizio di questa nota) è dovuto al fatto che per la prima volta l'energia rilasciata da una microesplosione ( $3,15 \text{ MJ} = 3,15 \times 10^6 \text{ J}$ ) è stata superiore a quella ricevuta dai potentissimi laser ( $2,05 \text{ MJ}$ ). Il risultato è certamente notevole. Tuttavia bisogna considerare che l'energia spesa per attivare i laser è stata di  $322 \text{ MJ}$ . Pertanto, al momento l'esperimento NIF assorbe più energia di quella che produce. Inoltre, per erogare energia in modo continuo sono necessari alcuni impulsi laser al secondo. Attualmente, il sistema del NIF può realizzare un singolo impulso laser al giorno.

In conclusione, la strada da percorrere per realizzare energia per uso civile tramite fusione è ancora lunga e tortuosa.

**Annibale D'Ercole** si è laureato in Fisica all'Università di Roma “La Sapienza”. Astronomo associato presso l'INAF-Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.