

[nuclei e stelle]

anno 4 numero 9 / 9.09

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

Il 27 dicembre 2004 i satelliti in orbita e i radiotelescopi a terra rivelarono un potentissimo lampo proveniente dalla nostra Galassia, un bagliore talmente forte da disturbare la ionosfera terrestre e saturare velocemente i rivelatori in orbita. Invisibile ai nostri occhi, della durata di qualche decimo di secondo, il lampo di luce gamma fu molto più intenso di qualunque evento mai osservato proveniente dallo spazio profondo, oltre il sistema solare. La gigantesca vampata di luce era stata prodotta da una particolare stella di neutroni identificata alcuni anni prima nella costellazione del Sagittario dal satellite della NASA battezzato Rossi X-ray Explorer. La (*Soft Gamma Repeater*) SGR1806-20 dista circa 50.000 anni luce dalla Terra. Un anno luce, circa 9.500 miliardi di chilometri, è la distanza che la luce percorre in un anno. La nostra galassia ha un diametro di circa 100.000 anni luce e uno spessore di “solo” 1.000, contiene circa 200 miliardi di stelle oltre al gas e alla polvere che danno luogo alla formazione di altre stelle. Una cascata di numeri per addentrarci in questa sfida all’immaginazione che apre la mente

alla vastità sconfinata dell’Universo e tentare di afferrarne le armonie che avvicinano alla comprensione della materia e delle forze che la regolano. Nel corso della sua vita, in un processo che può durare milioni di anni, una stella trasforma e sforna nuclei sempre più pesanti. Terminato il combustibile nucleare, le stelle più massive possono esplodere in un evento che chiamiamo supernova. La stella di neutroni che ne rimane ruota velocemente, addensa in una decina di chilometri di diametro una massa dell’ordine di quella del Sole e produce un fortissimo campo magnetico. Nella Via Lattea vi sono milioni di stelle di neutroni. All’interno della stella di neutroni si trova probabilmente materia nucleare ad alta temperatura e densità in uno stato di plasma primordiale. I fisici con esperimenti ai grandi acceleratori di particelle studiano la materia nucleare e, alle energie più alte, cercano di riprodurre lo stato in cui questa si trova nelle stelle. Così il cerchio si chiude, è un’armonia naturale che trascina, incuriosisce ed entusiasma, dalle stelle ai nuclei dai nuclei alle stelle.

Andrea Vacchi



Al cuore della materia

Nel nucleo l’origine della varietà degli elementi.

di Angela Bracco



a.

Una caratteristica affascinante della natura sulla Terra è la sua sorprendente varietà, frutto di un numero infinito di combinazioni atomiche. I nuclei costituiscono la gran parte della massa degli atomi e rappresentano la quasi totalità della materia ordinaria osservata nell’Universo. Gli atomi si sono formati solo molto dopo la creazione dei nuclei, poiché il legame tra elettroni e nuclei, è possibile solo a temperature molto basse, se confrontate con quelle delle grandi esplosioni cosmiche e delle fornaci delle stelle, dove i nuclei vengono prodotti. L’avventura della scoperta dei nuclei inizia verso fine Ottocento, quando Henri Becquerel si accorse che nuovi tipi di raggi d’energia venivano emessi spontaneamente e continuamente dagli atomi d’uranio. Si capì poi che questa radioattività naturale implicava la trasformazione di un elemento in un altro, ritenuta impossibile secondo le conoscenze del tempo. Attorno al 1910, Ernest Rutherford scoprì che un particolare tipo di radiazione era costituita da nuclei di elio (costituiti da due protoni e due neutroni), molto più pesanti degli elettroni e carichi positivamente. Rutherford ebbe l’idea geniale di studiare le proprietà della materia “sparando” queste particelle (chiamate *particelle alfa*) su sottili lamine d’oro (vd. fig. b, p. 6). Scoprì inaspettatamente che una certa frazione di questi proiettili veniva respinta all’indietro. “È come se una palla di cannone sparata contro un foglio di carta velina tornasse indietro!” esclamò Rutherford. Per spiegare le sue osservazioni immaginò che, diversamente da quanto si era creduto fino ad allora, la carica positiva degli atomi d’oro non fosse distribuita uniformemente, ma concentrata in un volume molto minore di quello dell’atomo, corrispondente ad un raggio ben 50.000 volte più piccolo. I proiettili respinti erano quelli che urtavano e “rimbalzavano” proprio contro questo minuscolo nucleo. L’esperimento di Rutherford costituì la base del modello con il quale un altro fisico, il danese Niels Bohr descrisse l’atomo. Secondo questo modello il nucleo comprende la quasi totalità della massa dell’atomo e costituisce il centro di forza elettromagnetica, attorno al quale si muovono gli elettroni. I costituenti del nucleo sono i protoni, in numero uguale agli elettroni ma con carica opposta, e i neutroni. I neutroni hanno circa la stessa massa dei protoni ma sono neutri, non hanno cioè carica elettrica (Chadwick, 1932). Stabilita l’esistenza del nucleo bisognava capire le proprietà delle forze capaci di tenere assieme protoni e neutroni (detti in generale nucleoni) nel nucleo: un problema davvero formidabile. L’energia che tiene assieme il nucleo è molto elevata e proporzionale al numero di nucleoni. Il volume del nucleo è proporzionale alla sua massa, ovvero la densità all’interno di tutti nuclei è circa la stessa. Da queste evidenze sperimentali si deduce che le forze nucleari devono esercitare un’attrazione assai intensa, in grado di vincere la repulsione elettromagnetica tra i protoni carichi positivamente, ma che allo stesso tempo, a brevissime distanze, i nucleoni sentono una forza repulsiva, che impedisce il collasso del nucleo. È poi necessario spiegare la stabilità di certe configurazioni nucleari rispetto ad altre: così ad

a.
Hans Geiger (a sinistra) e Ernest Rutherford (a destra) nel laboratorio di Rutherford a Manchester nel 1908.

esempio il sistema costituito da due neutroni non è stabile, mentre lo è il *deuterio*, formato da un neutrone e da un protone. Più in generale, i nuclei con un dato numero di protoni sono instabili se vi sono troppi o troppo pochi neutroni. Negli anni '30 Fermi ed il suo gruppo a Roma investigarono la capacità degli isotopi – ovvero dei nuclei con un definito numero di protoni, ma differente numero di neutroni – di diventare stabili nel tempo, trasformando protoni in neutroni o viceversa, attraverso un processo chiamato *decadimento beta*. Il decadimento beta è dovuto a un altro tipo di forza, chiamata forza debole, molto meno intensa non solo di quella nucleare ma anche di quella elettromagnetica. La forza debole induce la prima reazione nel ciclo di produzione d'energia nelle stelle, permettendo la formazione del deuterio a partire da due protoni ed è la causa per cui il Sole brucia molto lentamente! Il nucleo quindi è un sistema dove sono in azione tre tipi di forze: la forza nucleare, la forza elettromagnetica e la forza debole. Comprendere e svelare la struttura dei nuclei è

un processo laborioso che non solo richiede la misura delle loro masse, delle loro dimensioni, della densità e della distribuzione della materia, ma implica anche la conoscenza di come il sistema risponde all'azione di sollecitazioni esterne di diverso tipo. Anche nel caso di materiali che usiamo tutti i giorni, non ci basta sapere il loro peso o la loro densità, ma vogliamo determinare altre proprietà tra cui la loro elasticità e deformabilità a diverse temperature e sotto diversi tipi di sforzi. Lo strumento principe per sollecitare il nucleo è rimasto quello introdotto da Rutherford: l'utilizzo di reazioni nucleari indotte da vari proiettili (ioni, elettroni, fotoni...). Grazie all'intensa ricerca compiuta con gli acceleratori dei laboratori di tutto il mondo, tra cui anche quelli dell'Infn, i Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl), quelli del Sud (Lns) a Catania e i Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) si è appreso che il nucleo è uno dei più complessi sistemi quantistici che abbiamo in natura. Mentre certi fenomeni nucleari possono venire compresi sulla base del cambiamento di singoli nucleoni, ovvero trasformazioni di singoli neutroni e protoni,

- b.

Esperimento di Rutherford.
Le particelle alfa, che incidono su una sottile lamina d'oro, vengono deflesse con angoli tanto più grandi quanto più ravvicinato è stato "l'incontro" con i nuclei dell'oro. Lo schermo fluorescente che circonda il bersaglio permette di visualizzarne il punto di arrivo.
- c.

Il raggio del nucleo è cinquantamila volte più piccolo dell'intero atomo. Mantenendo queste proporzioni, se il nucleo fosse grande come una formica al centro di uno stadio, gli elettroni starebbero alla distanza degli spalti.
- d.

Nel decadimento beta un neutrone (protone) si trasforma in un protone (neutrone), liberando un elettrone (positrone) e un antineutrino (neutrino). Reazioni nucleari di questo tipo innescano il ciclo di produzione di energia nelle stelle.

altri coinvolgono il nucleo nel suo insieme. Alcuni di questi ultimi, come la fissione, che porta alla divisione del nucleo, sono legati ai cambiamenti della forma dei nuclei ed alla dinamica della loro superficie. Il fatto di aver imparato tanto non vuol certo dire che siamo in grado di capire la fisica nucleare in tutta la sua complessità e nelle sue diverse sfaccettature. In effetti, per spiegare la varietà e l'origine degli elementi che sono presenti nel nostro Universo ci serve molto di più! Ad esempio, per quale ragione l'idrogeno e l'elio, che hanno uno e due protoni, sono tanto più abbondanti degli elementi più pesanti? Per rispondere a questa domanda fondamentale dobbiamo mettere assieme conoscenze di fisica nucleare, di astrofisica e di cosmologia. Oggi sappiamo che mentre idrogeno ed elio sono stati prodotti nel Big Bang all'origine del nostro Universo, gli elementi più pesanti possono prodursi solo nelle stelle. La loro creazione è legata alla fusione dell'elio, che avviene nelle stelle più pesanti del Sole (giganti rosse). Questi processi di fusione nucleare fondono due nuclei leggeri, creando un nuovo nucleo più pesante e

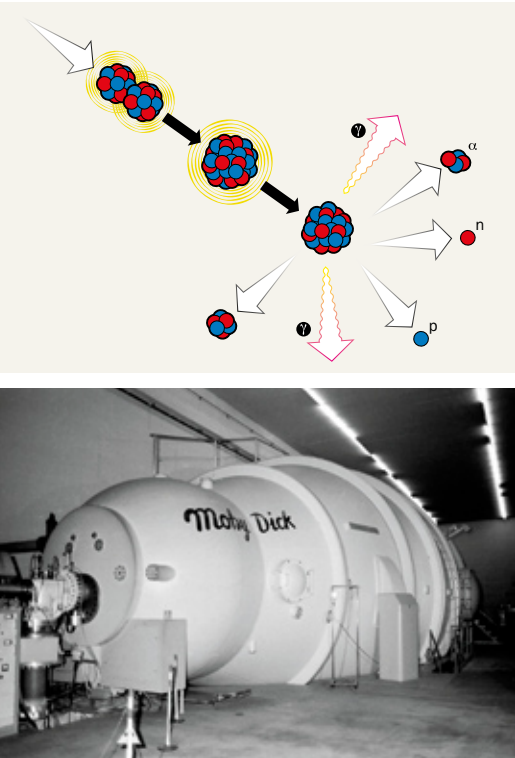
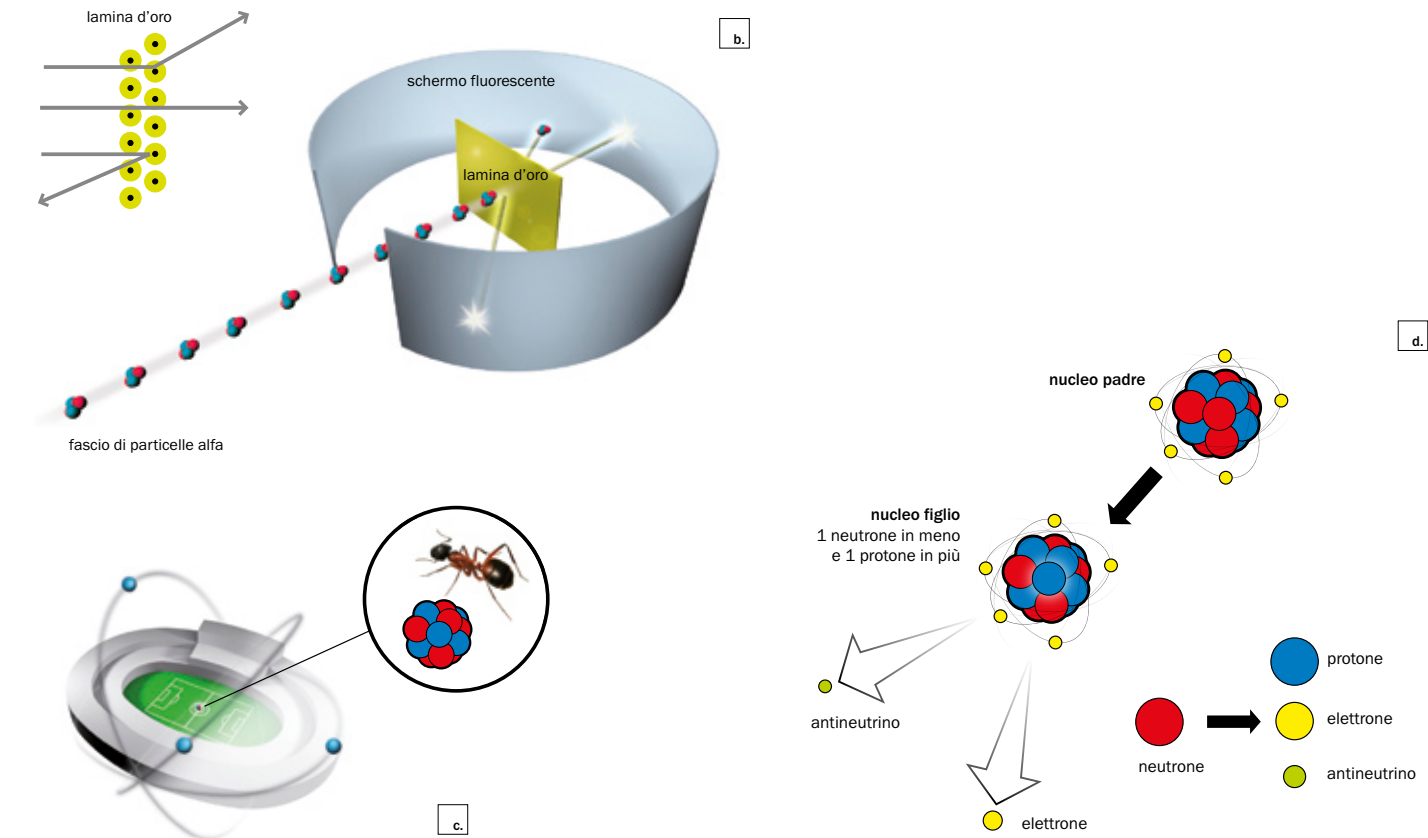
liberando l'energia in surplus. In questo modo possono essere creati nuclei pesanti fino a quelli di nichel e ferro, che sono formati da circa 60 nucleoni. L'esistenza di nuclei con massa ancora maggiore è possibile invece grazie a fenomeni diversi, come ad esempio nelle esplosioni delle supernovae, durante le quali si formano molti nuclei di grande massa tra cui l'uranio e il torio. In questi processi i nuclei esposti a un grande flusso di neutroni, tendono a catturarli e a formare nuovi nuclei molto ricchi di neutroni, che sono però instabili, decadono e si trasformano rapidamente. I nuclei radioattivi di tipo diverso coinvolti nei processi stellari sono del resto migliaia. L'esplosione di una supernova però può anche portare alla formazione di un nuovo stato della materia, creando una stella composta in gran parte solo da neutroni. Le stelle di neutroni concentrano una massa equivalente a quella del nostro Sole, che ha un raggio di 700.000 chilometri, in una sfera del raggio di una decina di chilometri. La loro struttura è determinata dall'enorme pressione gravitazionale, e dalla resistenza offerta dalla materia nucleare.

- e.

Fermi professore a Roma, 1927 circa.
- f.

Illustrazione schematica della collisione di un nucleo in movimento con un bersaglio fisso, che produce reazioni con emissione di particelle (protoni, neutroni, alfa) e di raggi gamma. I nuclei incidenti sono prodotti da acceleratori.
- g.

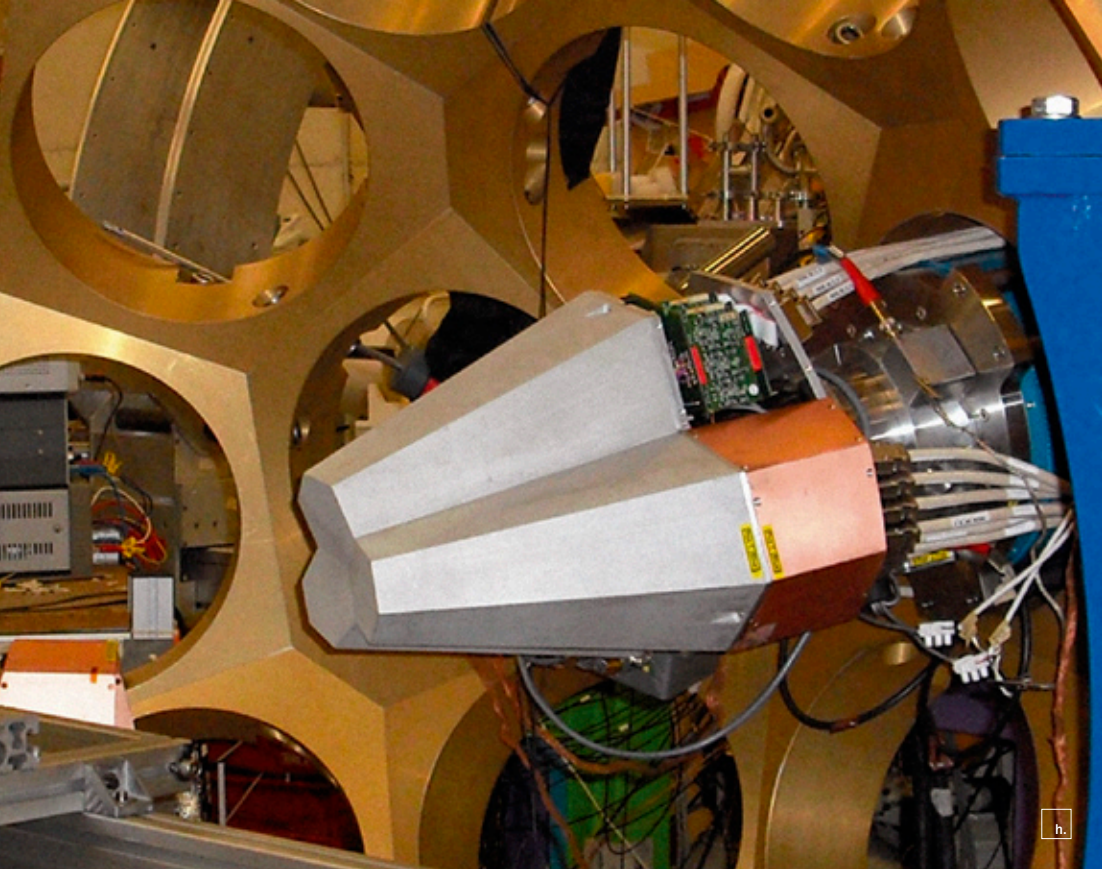
L'acceleratore lineare (*Tandem*) dei Laboratori di Legnaro dell'Infn inaugurato 20 anni fa; il contenitore bianco (*Moby Dick*) isola il terminale di 15 milioni di Volt che serve ad accelerare gli ioni pesanti.



- e.

f.

g.



Riprodurre in laboratorio le caratteristiche della materia nucleare per lo studio delle stelle di neutroni è oggi una delle frontiere della ricerca in fisica nucleare. Molti nuclei che invece hanno avuto un ruolo importante nella formazione degli elementi nei processi stellari sono instabili, decadono velocemente e non sono naturalmente presenti sulla Terra. Produrli in laboratorio è un obiettivo centrale della ricerca attuale. Ma arrivare ai limiti della stabilità nucleare è un compito molto ambizioso, che richiede sviluppi tecnologici di punta per creare fasci accelerati di ioni radioattivi e rivelatori di alte prestazioni. Per studiare questi fenomeni riveste un ruolo molto importante la rivelazione della radiazione gamma, ovvero dei fotoni ad alta energia emessi dai decadimenti nucleari, e una collaborazione europea sta realizzando un nuovo rivelatore di grande efficienza (*Agata*). In effetti gli esperimenti con fasci radioattivi forniscono rigorosi controlli delle nostre aspettative teoriche sul comportamento dei nuclei in condizioni estreme, peraltro molto difficili da prevedere esattamente. Il nucleo, che è un sistema complesso formato da molte particelle, muta sensibilmente le sue proprietà quando si altera il rapporto tra protoni e neutroni rispetto ai nuclei stabili. Come è avvenuto in passato, le ricerche di fisica nucleare hanno un grande potenziale di ricadute applicative in altri settori: come, per citarne solo uno, lo sviluppo di radioisotopi per la medicina. L'avventura intrapresa per comprendere la varietà della nostra natura è tuttora in corso e ci entusiasmerà anche negli anni a venire!

Biografia
Angela Bracco, professore all'Università degli Studi di Milano, si occupa di fisica nucleare dal 1980 e ha condotto esperimenti per lo studio della struttura nucleare con spettroscopia gamma. Partecipa all'esperimento Agata ed è attualmente presidente della commissione scientifica nazionale di fisica nucleare dell'Infn.

Link sul web
<http://www.nupecc.org>
<http://agata.pd.infn.it>

h. Un elemento del rivelatore Agata, che è attualmente in fase di realizzazione da parte di varie istituzioni europee tra cui l'Infn. La struttura piramidale rappresenta elementi di cristalli rivelatori per raggi gamma, che, assorbiti dai cristalli, producono un segnale proporzionale alla loro energia.

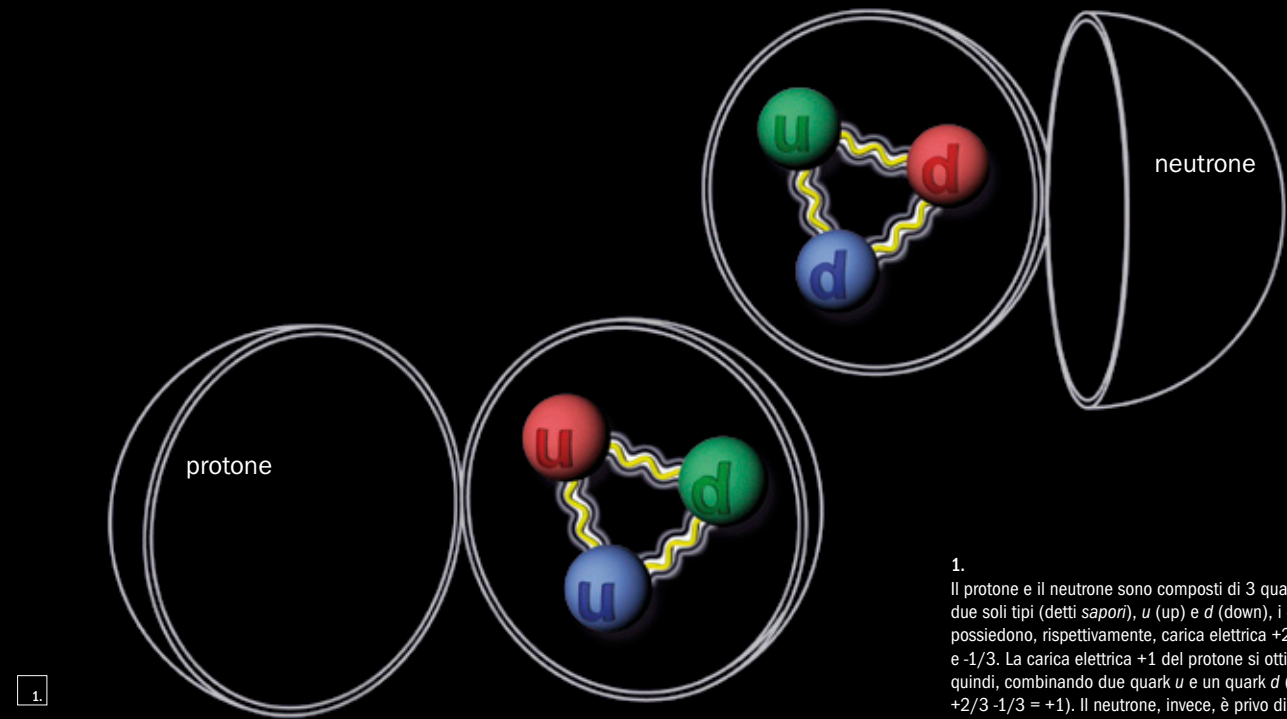
[as] box

La Qcd

I protoni e i neutroni, al pari delle altre particelle che sperimentano l'interazione forte – gli *adroni* – non sono particelle elementari ma sono costituiti da ingredienti più fondamentali: i quark. I quark hanno caratteristiche intrinseche molto diverse da quelle di altre particelle elementari, quali l'elettrone e il neutrino. La prima caratteristica rilevante è che essi hanno carica elettrica frazionaria rispetto a quella dell'elettrone e ciò si riflette nel modo in cui essi si combinano a formare gli adroni. Inoltre, i quark possiedono un'altra proprietà, detta *colore*. Il termine non ha alcuna attinenza con la luce visibile ed è soltanto una metafora per il fatto che tale proprietà sussiste in 3 varietà, dette *rosso*, *verde* e *blu*. Gli antiquark portano gli anticolori corrispondenti. La ricetta per formare un adrone è semplice da enunciare:

i quark vanno combinati in modo che il colore complessivo sia nullo. Questo significa che i quark non possono mai essere prodotti come particelle libere isolate, ma si trovano permanentemente confinati all'interno di particelle "bianche". Alla radice di questo bizzarro comportamento c'è la natura particolare dell'interazione tra i quark. Questa è di un tipo completamente nuovo e mediata da un nuovo tipo di particelle, i *gluoni*, i quali risentono dei colori dei quark. Il colore svolge in questo modello il ruolo svolto dalla carica elettrica nell'elettromagnetismo, e per questo ci riferiamo a questa nuova interazione con il nome di forza di colore e alla teoria che la descrive con il nome di *cromodinamica quantistica* (dall'inglese *quantum chromodynamic*, Qcd). La forza di colore tra due quark non diminuisce

con la distanza che li separa, il che è all'origine del loro *confinamento* all'interno degli adroni. L'altra faccia di questa proprietà è rappresentata dalla cosiddetta *libertà asintotica*, vale a dire il fatto che ad altissima energia – il che, per il principio d'indeterminazione di Heisenberg, equivale alle piccolissime distanze – quark e gluoni interagiscono molto debolmente tra loro. In altre parole, la forza di colore agisce come una sorta di molla. Così come protoni e neutroni non sono fondamentali, non lo è nemmeno la loro reciproca interazione, vale a dire la forza nucleare. Questa altro non è che un residuo dell'interazione di colore tra i quark e i gluoni che li compongono, allo stesso modo in cui l'interazione tra atomi e molecole deriva dalle interazioni elettromagnetiche tra gli elettroni e protoni costituenti. [D. B.]



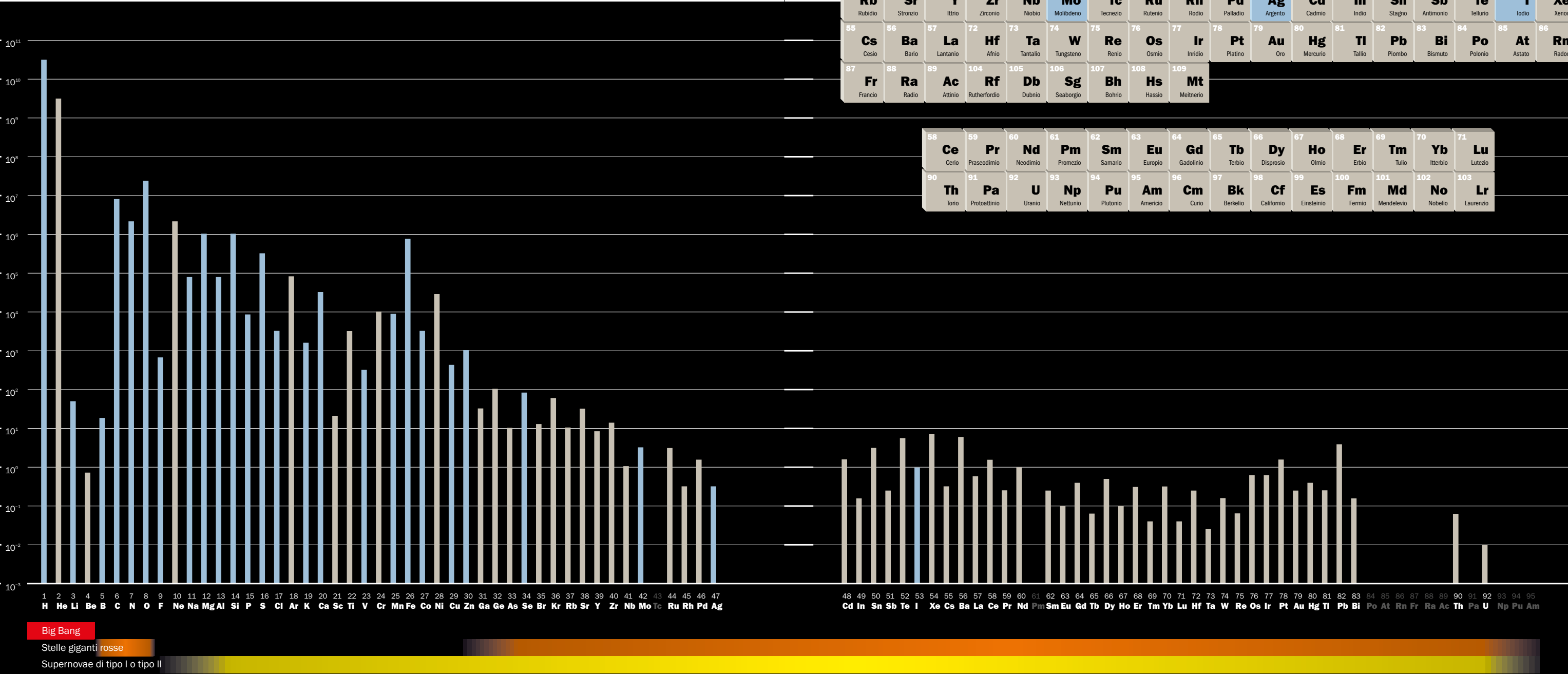
1. Il protone e il neutrone sono composti di 3 quark di due soli tipi (detti *sapori*), *u* (up) e *d* (down), i quali possiedono, rispettivamente, carica elettrica +2/3 e -1/3. La carica elettrica +1 del protone si ottiene, quindi, combinando due quark *u* e un quark *d* (+2/3 +2/3 -1/3 = +1). Il neutrone, invece, è privo di carica elettrica e si ottiene combinando due quark *d* e uno *u* (-1/3 -1/3 +2/3 = 0). I tre colori dei quark inoltre sono combinati in modo che la particella sia "bianca" ovvero una miscela di rosso, verde e blu.

Figli delle stelle

L'istogramma rappresenta le abbondanze dei vari elementi presenti nel sistema solare, ordinati per numero atomico crescente sull'asse orizzontale. Sull'asse verticale è indicata l'abbondanza relativa di ciascun

elemento, scegliendo il silicio come elemento di paragone ed assegnandogli convenzionalmente un'abbondanza di un milione di atomi. Per ogni milione di atomi di silicio vi sono, ad esempio, circa 30 miliardi di atomi di idrogeno e meno di un atomo di berillio. In percentuale, l'idrogeno rappresenta il 75%, l'elio il 23% e tutti gli altri elementi contribuiscono con il residuo 2%. Alcuni elementi hanno abbondanze così basse da non essere rappresentabili con la scala scelta. In colore azzurro sono indicati gli elementi

che sono indispensabili alla vita, mentre le barre orizzontali sotto l'istogramma indicano i luoghi dove si sono formati i vari elementi, dal Big Bang primordiale alle giganti rosse o alle supernovae. Gli atomi di idrogeno di cui siamo costituiti hanno quindi l'età dell'universo. Gli elementi più pesanti, per quanto più recenti, sono giunti “da lontano”, da stelle ormai scomparse che, esplodendo, hanno disseminato nello spazio i vari elementi da essi generati. Figli delle stelle? Sì, e di molte stelle. [C. S.]



Alchimie celesti

Vita, morte e miracoli delle stelle.

di Margherita Hack

Vere e proprie centrali di energia nucleare “galattiche” che nel corso della loro vita irradiano nello spazio tutta l'energia prodotta nel loro interno con vari tipi di reazioni nucleari. Sono queste le stelle, quegli astri che ogni notte illuminano il nostro cielo e che, in ultima analisi, hanno permesso la nascita degli elementi di cui sono formati i pianeti e quindi noi tutti. Non tutte sono eguali o funzionano alla stessa maniera. Vediamo quali sono le loro principali proprietà.

Le stelle si formano in certe regioni delle galassie in cui la densità è da qualche centinaio a qualche migliaio di volte la densità del mezzo interstellare diffuso (pari a un atomo di idrogeno per centimetro cubo nella nostra galassia, la Via Lattea). Sono le regioni galattiche dette *nebulose interstellari*, formate da gas di idrogeno, elio e impurità di tutti gli altri elementi e da minuscole particelle solide (dette *polveri interstellari*), composte da grafite, silicati e ghiaccio che, pur rappresentando solo l'1 o il 2% della materia nebulare, sono molto importanti per la formazione di una stella, perché aggregano attorno a sé altro gas, altre particelle e formano sotto l'azione della gravità un primo agglomerato di materia. Il fisico inglese James Jeans ha mostrato, nel 1902, che se la massa iniziale di una regione più densa supera un certo limite (tanto più alto quanto più alta è la temperatura e più bassa è la densità del gas), essa tende a crescere a spese delle regioni adiacenti. Se, invece, la massa è minore si dissolve e scompare.

Quando la massa minima supera il *limite di Jeans* ha inizio il cosiddetto *collasso gravitazionale*, il gas “cade” su sé stesso, accelerando progressivamente. Il collasso fa sì che la temperatura del gas al centro salga fino a valori dell'ordine di qualche milione di gradi, il che consente l'innescarsi delle prime reazioni nucleari (vd. fig. a. p. 16). La centrale di energia nucleare “galattica” diviene così attiva. Il collasso gravitazionale si arresta quando la forza di pressione esercitata dal moto di agitazione termica delle particelle diventa eguale e contraria alla forza di gravità. A questo punto, la massa stellare rimane in equilibrio fra la gravità che tenderebbe a schiacciarla sotto il proprio peso e la forza di pressione del gas che tenderebbe a disperdere il gas nel mezzo. In questa condizione di equilibrio l'energia nucleare prodotta si propaga attraverso la massa stellare e viene irradiata nello spazio. È nata così una stella.

Non tutte le masse collassanti permettono la nascita di una stella, ma solo quelle comprese fra circa un decimo e 50 volte la massa del Sole. Per valori più piccoli la temperatura nel nocciolo centrale della stella non raggiunge valori tali da innescare le reazioni nucleari, mentre per valori molto più grandi la pressione diventa tanto alta da superare la forza di gravità e impedire la formazione di una stella stabile. Si può capire intuitivamente come la massa iniziale di una stella ne condizioni sia le caratteristiche fisiche iniziali – raggio e luminosità – sia la sua evoluzione. Infatti, più grande è la massa collassante, maggiore deve essere la temperatura nel nocciolo centrale necessaria per fermare il collasso. Più alta è la temperatura, maggiore è la produzione di energia nucleare e, di conseguenza, maggiore deve essere la superficie di dissipazione dell'energia prodotta perché la

<
Giovani stelle blu, luminose ma destinate a breve vita, fotografate dal telescopio Hubble della Nasa nella Nube di Magellano, nella costellazione Tucano, a 200.000 anni luce dalla Terra.

stella rimanga in equilibrio termico. Ecco perché si osserva che le stelle più luminose sono anche quelle di massa e di raggio maggiori. E anche con la maggiore temperatura superficiale. Stelle aventi una massa un decimo di quella del Sole, per esempio, sono, rispetto a questo, circa 100 volte meno luminose e hanno un raggio circa la metà. La loro temperatura superficiale è intorno ai 2.500 gradi e il loro colore è rossastro, e perciò sono dette *nane rosse*. Stelle con massa 40 volte quella solare, invece, sono 200.000 volte più luminose e hanno un raggio pari a 20 volte quello del Sole, con temperature superficiali intorno ai 20.000 gradi. Per il loro colore bianco azzurrastro, queste sono dette *giganti azzurre*. Questi valori sono quelli propri della prima fase della vita di una stella, che è anche la più lunga, quella cioè in cui la fonte di energia è determinata dalla trasformazione – nel nocciolo centrale – di idrogeno in elio. La durata di questa fase è tanto più lunga quanto più piccola è la massa e la luminosità della stella. Prendiamo, ad esempio, una stella di massa pari a un decimo e luminosità pari a un centesimo quella del Sole. La sua disponibilità di “combustibile” nucleare è proporzionale a un decimo di quella solare e il dispendio di energia a un centesimo. Essa dispone di combustibile per un tempo pari a 10 volte la durata della stessa fase di vita del Sole, che è di circa 10 miliardi di anni. All’altro estremo, una stella di massa 40 volte quella del Sole spende il suo combustibile 200.000 volte più rapidamente e questa fase della sua vita dura appena 2 milioni di anni (ovvero 40/200.000 moltiplicato per i 10 miliardi di anni di vita del Sole). Questo spiega anche come mai le deboli stelle rosse, dette nane rosse, sono tanto più abbondanti delle brillanti stelle azzurre, ovvero le giganti azzurre.

Nelle varie fasi di vita di una stella si verificano vari tipi di processi nucleari che spiegano come si siano formati tutti gli elementi che osserviamo sulla Terra e nell'Universo. Nelle prime fasi, quando la stella sta ancora collassando e la temperatura nel suo nocciolo centrale è compresa fra circa mezzo milione e 5 milioni di gradi, si ha una serie di reazioni nucleari in cui si formano, a partire dai protoni, nuclei di idrogeno pesante (il deuterio), nuclei dei due isotopi dell'elio (elio-3 ed elio-4) e nuclei di litio, berillio e boro. Questi elementi vengono “bruciati” nella successiva fase di contrazione a temperature più alte di 5 milioni di gradi, per cui non è possibile spiegare la loro formazione nell’interno delle stelle. I nuclei di deuterio e dei due isotopi dell'elio si possono formare nelle primissime fasi di espansione dell'Universo, fra 3 e 20 minuti dopo il Big Bang, quando le temperature sono dell’ordine del miliardo di gradi e la densità è paragonabile a quella dell'acqua: è questa la cosiddetta fase di *nucleosintesi primordiale*. Più difficile spiegare la formazione dei nuclei di litio, berillio e boro. Questi si suppone siano il risultato della frammentazione, causata dai raggi cosmici, dei nuclei di carbonio, ossigeno e altri elementi presenti nel mezzo interstellare. L'energia che la stella irraggia nella prima fase della sua vita (quella successiva al raggiungimento della condizione di equilibrio descritta in precedenza), proviene dalla trasformazione di idrogeno in elio secondo il *processo protone-protone* (vd. fig. b. p. 16), che ha luogo in stelle di massa eguale o più piccola del Sole a temperature eguali o inferiori a 13 milioni di gradi. Nelle stelle di massa maggiore il processo dominante è invece il *ciclo del carbonio*, in cui 4 protoni danno luogo a una particella alfa e il carbonio-12 agisce come catalizzatore. Quest’ultimo processo ha luogo per temperature comprese tra i 15 e i circa 40 milioni di gradi (che è il caso delle giganti azzurre).

Quando tutto l'idrogeno del nocciolo centrale è trasformato in elio, la stella resta priva di fonti di energia nucleare, perché l’elio a quelle temperature è inerte. Il nocciolo si raffredda, la gravità prende il sopravvento e ha inizio una seconda fase di contrazione e riscaldamento, fino a che la temperatura raggiunge i 100 milioni di gradi e tre particelle alfa possono formare un nucleo di carbonio-12, nel cosiddetto *processo a 3 alfa* (vd. fig. b. p. 16). Le successive fasi evolutive sono ben diverse, a seconda che si abbia a che fare con stelle di massa minore o di poco superiore a quella del Sole oppure con stelle di grande massa.

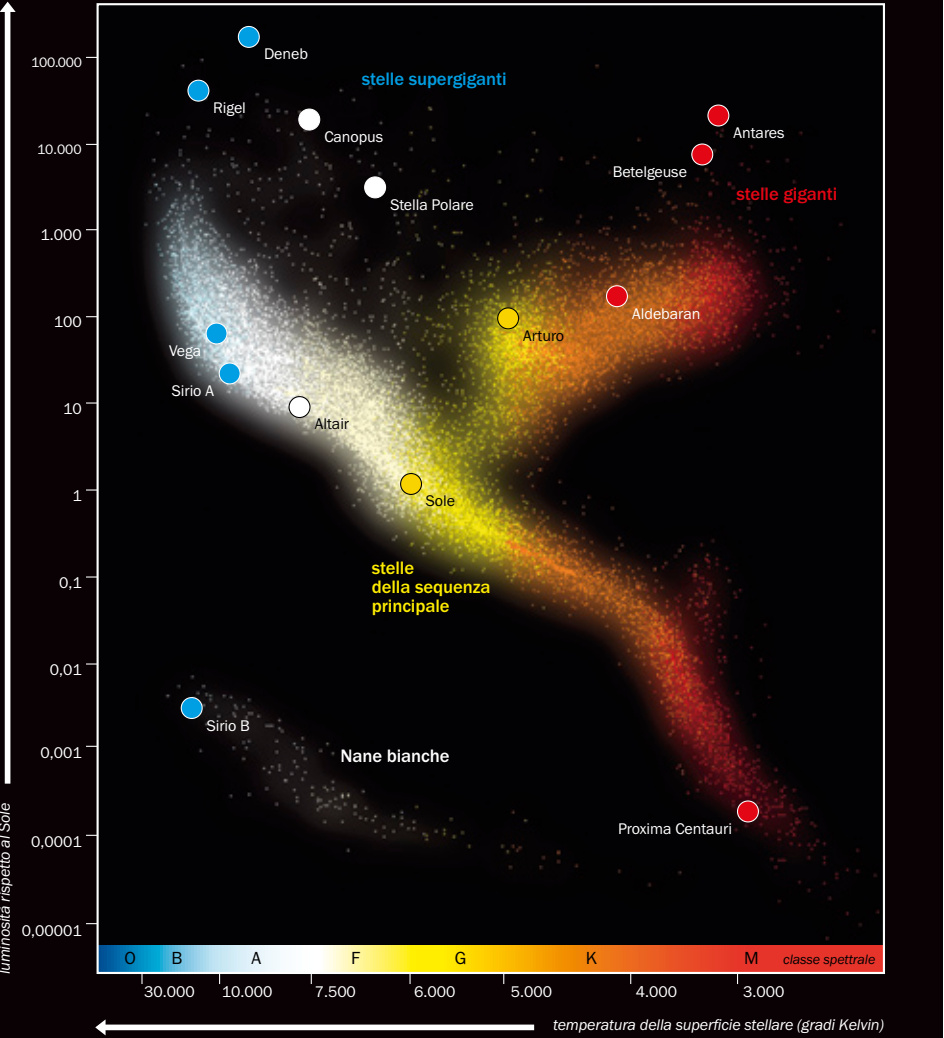
Nelle prime, in seguito alle successive contrazioni, il gas da perfetto che era (le dimensioni delle singole particelle sono molto inferiori alla loro distanza media) diventa *degenere*, ovvero, per quanto riguarda la pressione, si comporta come un solido: la pressione non dipende più dalla temperatura, ma solo dalla densità. Questa è la condizione che si verifica quando, ad esempio, la stella ha esaurito il combustibile di elio. In questa situazione la sua forza di pressione è sufficiente a mantenere l’equilibrio contro la forza di gravità. Non può verificarsi alcuna contrazione né, quindi, aumento di temperatura e successivo innesco di altre reazioni nucleari. La stella rimane senza fonti di energia nucleare, seguita a irraggiare la sua energia termica e va lentamente raffreddandosi. Questo sarà il futuro del Sole fra circa 5 miliardi di anni. Però prima subirà una profonda trasformazione, perché l’innesco della combustione dell’elio in carbonio, che avviene a temperature molto più alte di quelle dell’idrogeno in elio, ha per effetto una produzione di energia molto maggiore, sia pure per tempi

[as] box

Il colore delle stelle

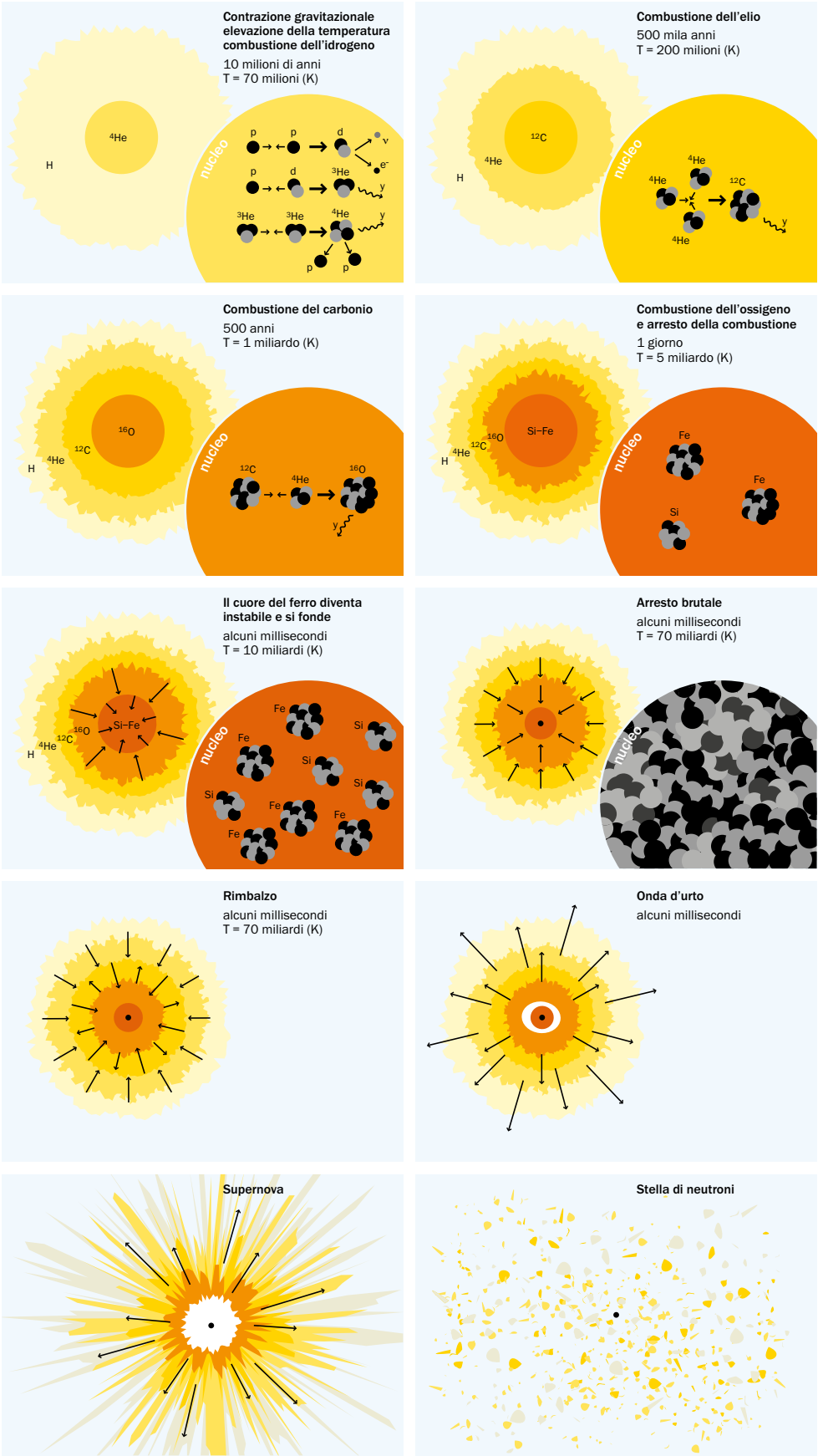
Guardando la volta celeste in una notte serena, lontani dalle luci della città, noteremo subito che le stelle appaiono con diversa luminosità. Bisogna, però, tener conto delle diverse distanze che ci separano da esse: una stella vicina apparirà assai più luminosa di una sua “gemella” lontana. Per confrontare tra loro le stelle, dovremo dunque immaginare di porle dapprima alla stessa distanza, misurando così la loro *luminosità assoluta*. Usando il Sole come stella di riferimento e assegnandogli luminosità pari a 1, le altre stelle avranno luminosità diverse, ad esempio pari a 0,01, a 10, a 1.000. Un occhio attento scoprirà poi una caratteristica meno evidente: le stelle hanno colori leggermente diversi, alcune tendono al blu, altre sono di un bianco brillante e altre appaiono rossastre. C'è un legame tra il colore di una stella e la sua luminosità assoluta, o sono due caratteristiche indipendenti?

La risposta venne intorno al 1910, indipendentemente da parte di due astrofisici, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell, che costruirono un grafico nel quale in ascisse posero il colore delle stelle (quelle bluastre



a sinistra e le più rosse a destra), e in ordinate la loro luminosità assoluta. In tal modo, ogni stella è rappresentabile come un punto nel cosiddetto *grafico H-R*, denominato così secondo le iniziali dei suoi inventori, il grafico più famoso di tutta l'astronomia. In base al colore, le stelle sono classificate in *classi spettrali* diverse, identificate convenzionalmente con le lettere O, B, A, F, G, K e M. Va sottolineata una importante connessione: ad ogni colore corrisponde una ben determinata temperatura, quella della superficie visibile della stella che si comporta come un *corpo nero* alla medesima temperatura. Nel grafico qui riportato vi è la posizione di alcune migliaia di stelle della nostra galassia, alcune delle quali sono individuate con il loro nome. Appare immediata una constatazione: le stelle non si distribuiscono uniformemente nel grafico H-R, ma vi sono chiare zone di addensamento. La più popolata è la fascia trasversale che va dalle calde stelle blu alle fredde stelle rosse, la cosiddetta *sequenza principale*. Si distinguono inoltre altre due regioni, quella in alto a destra, dove si addensano le stelle giganti rosse,

e quella in basso a sinistra, popolata dalle nane bianche. È da notare la grande variabilità di temperatura superficiale e luminosità esistente tra le diverse stelle. Si va dai 3.000 gradi kelvin delle stelle M (rosse), ai quasi 6.000 gradi del Sole fino agli oltre 30.000 gradi delle stelle blu. Il diagramma H-R, oltre a “fotografare” la situazione attuale delle stelle, ha una fondamentale applicazione: permette di visualizzare come in un film l'evoluzione di ciascuna stella nel corso della sua vita. Dobbiamo immaginare infatti che, con lo scorrere del tempo, le singole stelle si muovono nel grafico H-R “in corteo”, con traiettorie e velocità assai diverse tra loro. La posizione iniziale della stella è lungo la sequenza principale, e lì permane per gran parte della sua esistenza, bruciando idrogeno e producendo elio. Dopodiché la stella può finire la sua esistenza lungo la sequenza principale (come accade ad esempio per le nane rosse) oppure “morire” dopo una evoluzione (vd. figg. p. 16), a volte anche molto contorta, in un'altra zona del grafico H-R. [C. S.]



a.	b.
c.	d.
e.	f.
g.	h.
i.	l.

In queste figure è raffigurata la nascita, la vita e la successiva morte di una stella molto più massiccia del Sole. In ogni figura è indicato il tempo necessario per il processo descritto e a quale temperatura *T* esso avviene.

a.
Dopo che una nebulosa interstellare sotto l'effetto della gravità ha formato il primo agglomerato di materia, essa collassa e si riscalda, finché si scatenano le prime reazioni nucleari di fusione dell'idrogeno.

b.
L'elio prodotto si concentra nel cuore della stella. Successivamente per fusione produce del carbonio.

c.
Il carbonio e l'elio si fondono in ossigeno.

d.
Per fusione dell'ossigeno, si crea silicio e infine ferro. Quest'ultima giornata sarà letale per la vita della stella. Una massa solare di ferro si è creata nel cuore della stella.

e.
Dato che il ferro è l'elemento più stabile dell'Universo, le reazioni nucleari non possono più produrre l'energia necessaria per impedire il collasso...

f.
... ma quando i nuclei diventano così vicini da toccarsi, il cuore della stella non può più comprimersi. Il collasso si arresta...

g.
... e gran parte della massa stellare urta e "rimbalza" sulla stella di neutroni che si sta formando.

h.
Avviene l'esplosione.

i.
Nasce una supernova.

l.
In questo forno che si è creato, i nuclei inseminano le nebulose di nuove specie nucleari.

molto più brevi. La stella quindi aumenta la sua superficie di dissipazione, cioè si espande. Si stima che il Sole aumenterà il suo raggio da 100 a 200 volte e la sua superficie lambirà l'orbita della Terra. Il Sole diventerà allora una *gigante rossa*, con un nocciolo caldo e denso circondato da un enorme involucro rarefatto, la cui espansione ha prodotto una diminuzione della temperatura superficiale da circa 6.500 a circa 3.000 gradi. Questo involucro andrà lentamente evaporando disperdendosi nello spazio interstellare e ciò che resterà sarà una piccola stella di raggio circa eguale a quello della Terra e ad alta temperatura superficiale, ovvero una *nana bianca*, che andrà lentamente disperdendo nello spazio la sua energia termica per ridursi dopo miliardi di anni a un corpo freddo di gas degenerare. Attorno a essa rimarrà un rilucente guscio di idrogeno ed elio in espansione nello spazio, memoria della precedente fase di gigante rossa: è nata una *nebulosa planetaria*. Il futuro delle stelle che sono molto più grandi del Sole sarà invece diverso, perché ad ogni esaurimento di combustibile nucleare seguirà un raffreddamento, una contrazione, un successivo riscaldamento e innesco di un altro combustibile nucleare. A temperature così alte come quelle che si raggiungono nel nocciolo delle grandi

stelle, il gas non diventa mai degenerare. In seguito alle varie contrazioni arriva un momento in cui il nocciolo centrale ha temperature di circa 10 miliardi di gradi, densità di miliardi di volte la densità dell'acqua e sarà composto da nuclei di ferro e nichel (vd. fig. d. p. 16). In queste condizioni di temperatura e densità, il ferro si frantuma in nuclei di elio, ma questa reazione, a differenza di tutte quelle che l'hanno preceduta, è *endotermica*: invece di produrre energia l'assorbe e la prende dalla massa di gas sovrastante. La conseguenza è che nel giro di mezz'ora la temperatura del nocciolo piomba da 10 miliardi a 100 milioni di gradi. La pressione del gas non è più in grado di contrastare la gravità e tutta la massa della stella precipita verso il nocciolo, aumentando la temperatura di tutti quelli strati più esterni in cui ci sono ancora nuclei in grado di dar luogo a reazioni *esotermiche* (quelle che, invece, cedono energia all'ambiente). Nel giro di mezz'ora si scatena tutta una serie di reazioni nucleari incontrollate, nel corso delle quali vengono prodotti tutti gli elementi e la stella esplode scaraventandoli nel mezzo interstellare da cui si formeranno altre stelle con i loro pianeti: s'innesca così una lenta evoluzione chimica della galassia, che si arricchisce di elementi più pesanti di idrogeno

m.
La Nebulosa del Granchio, resti di una supernova fotografati dal telescopio Hubble, ovvero tutto ciò che rimane da una tremenda esplosione di una stella. Osservatori cinesi e giapponesi registrarono questa supernova già quasi mille anni fa nel 1054.



ed elio. Nel nocciolo centrale il collasso forma una stella di neutroni (vd. fig. g. p. 16), o, in casi più estremi, un buco nero. È il fenomeno della supernova, l'apparizione improvvisa di una stella tanto brillante da eguagliare lo splendore dell'intera galassia che la contiene (vd. fig. m. p. 15). È stato dimostrato, grazie soprattutto alla celebre sintesi pubblicata nel 1957 dai quattro astrofisici Geoffrey Burbidge e Margaret Burbidge, Fred Hoyle e Willy Fowler (i quali dagli astrofisici vengono chiamati simpaticamente B²HF!) che, oltre all'elio, tutti gli elementi che si trovano nell'Universo e sulla Terra, si formano nell'interno delle stelle durante le diverse fasi della loro evoluzione grazie a numerosi processi nucleari. A causa di questi processi, solo nelle stelle di grande massa possono verificarsi le condizioni di equilibrio che precedono l'esplosione, e la stella da centrale di energia nucleare si trasforma in una vera e propria bomba nucleare. Invece di portare la morte questa “bomba” però porta la vita, perché crea tutti gli elementi necessari per formare i pianeti e gli esseri viventi.

n.



Biografia

Margherita Hack è professore emerito dell'Università di Trieste e membro nazionale dell'Accademia dei Lincei. Ha diretto l'Osservatorio Astronomico e il Dipartimento di Astronomia dell'Università di Trieste. Per lungo tempo è stata membro dei gruppi di lavoro dell'ESA e della NASA.

Link sul web

www.valdosta.edu/~cbarnbau/astro_demos/frameset_stellar.html

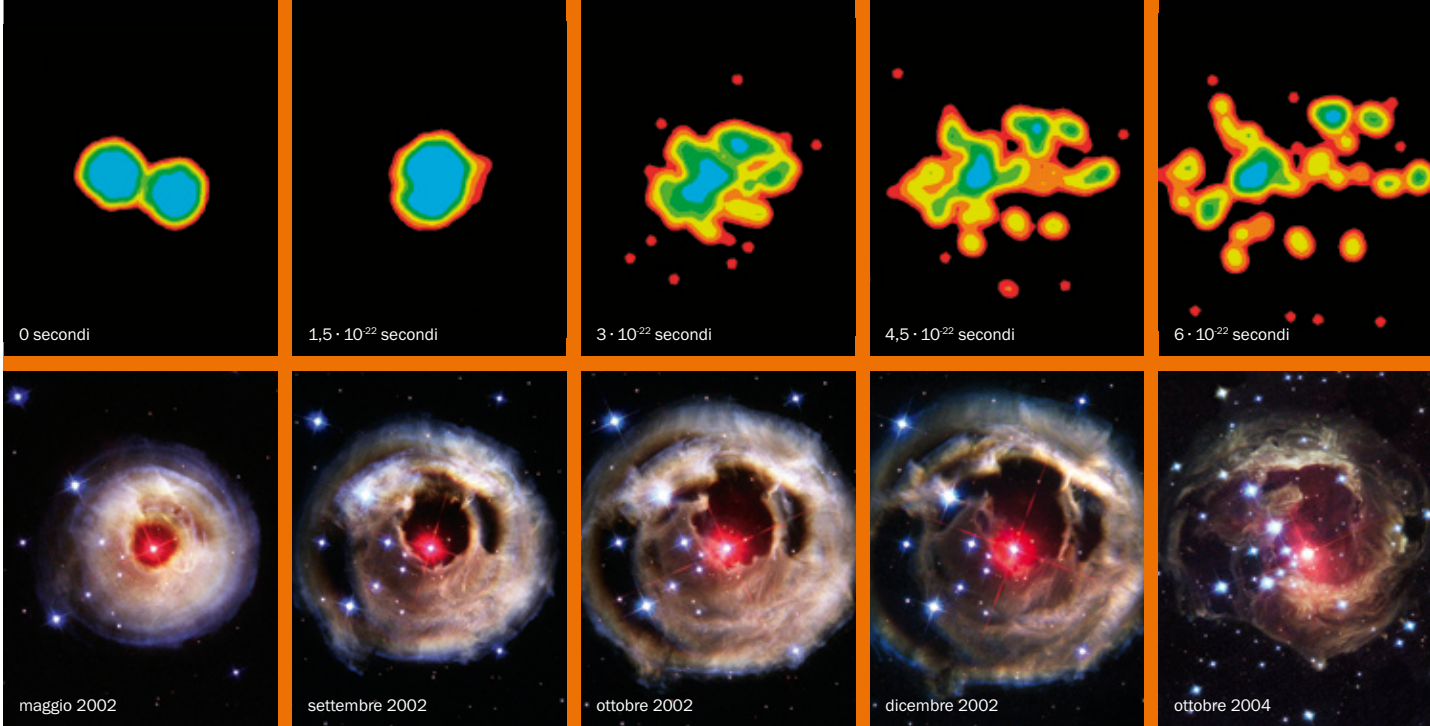
www.jinaweb.org/html/movies.html

n.
Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, Willy Fowler e Fred Hoyle nel luglio 1971, 14 anni dopo la loro famosa pubblicazione (lavoro così famoso che dagli astrofisici viene simpaticamente chiamato B²HF, dalle iniziali degli autori), insieme al trenino a vapore che fu regalato a Fowler nell'ambito di una conferenza organizzata in onore del suo sessantesimo compleanno.

All'estremo

Dai nuclei alla materia nucleare.

di Maria Colonna e Michela D'Agostino



a.

I nuclei atomici sono così compatti perché al loro interno, tra i nucleoni (protoni e neutroni), agiscono forze intensissime. Un modo per guardare all'interno dei nuclei atomici è spaccarli, rompendo i legami tra i nucleoni: per farlo occorre bombardarli con altre particelle accelerate a velocità pari a qualche decimo di quella della luce (circa 100 milioni di km/h), vincendo così la *repulsione coulombiana* che si esercita fra le particelle cariche (i protoni). Velocità così elevate possono essere raggiunte in laboratorio, grazie agli acceleratori di particelle. Si realizza così il contatto che scatena le forze nucleari, la cosiddetta *interazione forte*: si tratta di forze colossali, cui sono associate energie

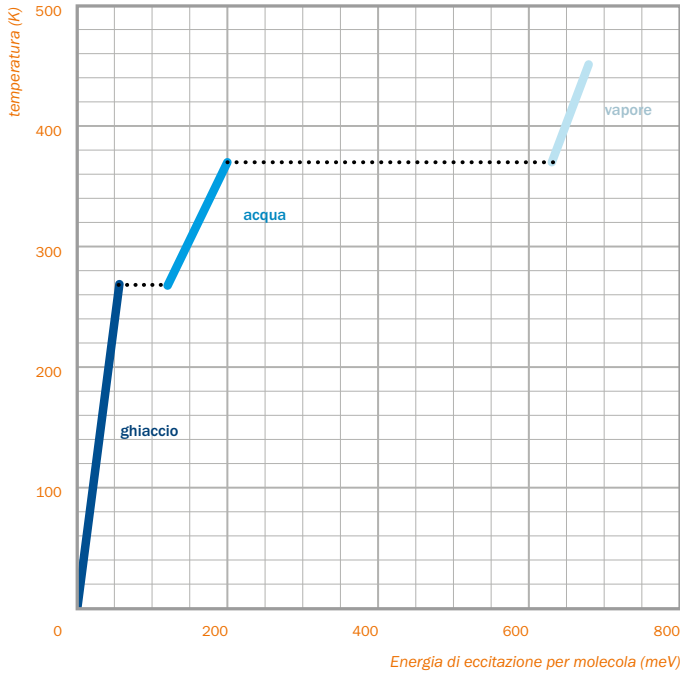
dell'ordine della decina di milioni di elettronVolt (MeV). In una porzione molto limitata di materia, si innesca un piccolo cataclisma in cui nuclei possono rompersi in più pezzi (fissione, frammentazione) o fondersi con altri (fusione): avviene cioè una reazione nucleare. Lo studio del comportamento di questa nuova forma di materia, un insieme di nucleoni in varie condizioni di densità e temperatura (materia nucleare), che può crearsi in seguito alle collisioni fra nuclei, è una delle principali attività che ha impegnato i fisici nucleari negli ultimi decenni. Questa ricerca non è fine a se stessa, ma ha un impatto notevole sulla nostra comprensione

a.
In alto: simulazione numerica del processo di multiframmentazione che si verifica nel corso di una collisione fra nuclei a energie di laboratorio dell'ordine delle decine di MeV per nucleone. In basso: osservazioni del telescopio Hubble della stella V838 Monocerotis . Il lampo di luce prodotto dalla violenta esplosione, che agli inizi del 2002 ha reso questa stella la più luminosa di tutta la Via Lattea, si propaga all'interno degli strati di polvere che la stella aveva emesso in precedenza, illuminandoli a distanze via via crescenti.

dei fenomeni dell’Universo. Oggi, infatti, non v’è dubbio che siano le reazioni nucleari la fonte di energia che alimenta il Sole e le altre stelle e che, nel corso della lunga esistenza di una stella, possano crearsi al suo interno fasi di materia nucleare che non esistono altrove, ma che possono essere riprodotte sebbene per tempi brevissimi (10^{-22} secondi) in laboratorio. La forza nucleare agisce tra i nucleoni in modo simile alla *forza di Van der Waals*, che è la forza che si esercita tra le molecole di un fluido: all’interno del nucleo, a piccolissima distanza i nucleoni si respingono, mentre si attraggono a media distanza. Per tanti versi è possibile affermare che i nuclei atomici si comportano come gocce di liquido. È bene però ricordare che si tratta di un liquido alquanto speciale, di natura *quantistica*. Nel regno dell’infinitamente piccolo (le dimensioni dei nuclei sono dell’ordine di qualche fermi, cioè del milionesimo di micron), le leggi fisiche non sono più quelle che governano la vita di tutti i giorni. È la meccanica quantistica a imporre nuove leggi, conferendo ai nucleoni localizzati all’interno del nucleo un movimento incessante: il cosiddetto *moto di punto zero*, dovuto al principio di indeterminazione di Heisenberg. Questa agitazione riduce fortemente il grado di coesione dei nuclei e li avvicina al comportamento dei liquidi. Nonostante

l’elevatissima intensità delle forze coinvolte, un liquido di questo tipo non può diventare solido. Reazioni nucleari poco violente ci hanno permesso di studiare le piccole oscillazioni della materia nucleare, sollecitate dal contatto fra i due nuclei collidenti. Abbiamo imparato che i nuclei vibrano con frequenze proprie altissime, le cosiddette *risonanze giganti*, come una molla con costante elastica enorme. Da questa osservazione si deduce che la materia nucleare è difficile da comprimere, proprio come un liquido. L’analisi nucleo-liquido ci porta ben presto a un’intrigante questione: è possibile far “bollire” i nuclei, fornendo loro calore? Inoltre, che cosa succede se due gocce di liquido nucleare vengono lanciate violentemente l’una contro l’altra? In realtà, il problema che ci si pone è di più ampio respiro: si vuole studiare l’*equazione di stato* della materia nucleare, cioè la relazione che lega pressione, densità e temperatura di questa forma di materia, e costruirne il *diagramma di fase*, che ci dice, in funzione delle “coordinate” del sistema come densità e temperatura, qual è l’aspetto (la fase, per l’appunto) della materia che stiamo studiando. Le collisioni fra nuclei atomici pesanti, a energie di laboratorio dell’ordine delle decine di MeV per nucleone, costituiscono lo strumento più idoneo ad affrontare questo tipo di problematiche.

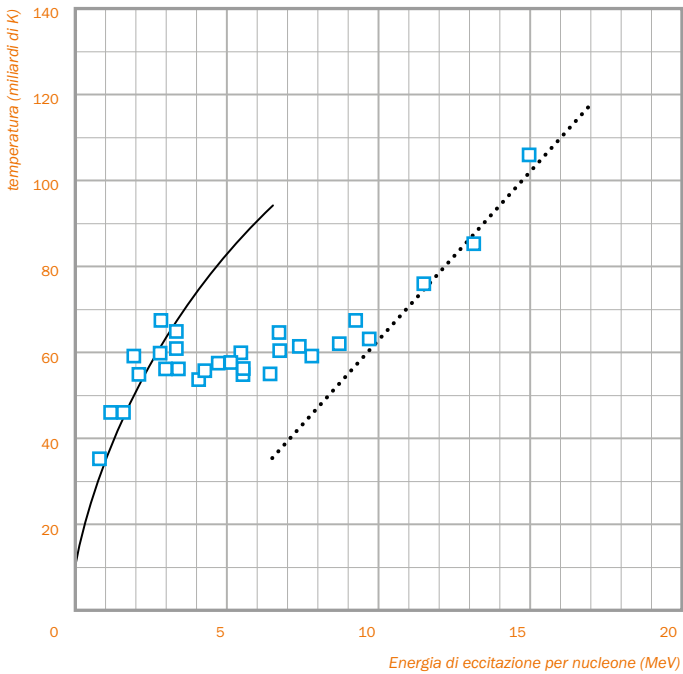
b. / c.
La curva calorica di materia nucleare (fig. c.) presenta un comportamento analogo a quello della temperatura dell’acqua in ebollizione (fig. b.). Osserviamo che, in entrambi i casi, la temperatura si mantiene costante in un certo intervallo, nonostante il calore fornito al sistema. Questo comportamento indica il verificarsi di una transizione fra due diversi stati di materia: il calore fornito viene utilizzato per rompere i legami del liquido (che si converte in vapore) e la temperatura si mantiene costante.



b.

Infatti, in queste reazioni l’energia in gioco è tale che può crearsi, anche se solo per brevissimi istanti, materia nucleare in varie condizioni di temperatura (circa 50 miliardi di gradi kelvin) e densità (fino a parecchie centinaia di milioni di tonnellate per centimetro cubo, circa il doppio della densità normale dei nuclei). Si tratta di temperature mille volte più grandi di quelle che si raggiungono all’interno del Sole e di densità ben più elevate (si pensi che la densità centrale del Sole è “appena” qualche centinaio di grammi per centimetro cubo). Queste condizioni si trovano solo nel cuore delle stelle più compatte. La transizione di fase liquido-gas, predetta dalle teorie nucleari da più di venti anni, ha trovato varie conferme sperimentali nell’ultimo decennio, grazie allo sviluppo di rivelatori sempre più sofisticati, in grado di identificare frammenti e particelle leggere (il *vapore nucleare*) emessi nel corso di una reazione. Più precisamente, identificando e misurando i frammenti emessi, è possibile risalire all’energia depositata nel sistema e alla sua temperatura. Mettendo in relazione in un grafico queste due quantità, ecco apparire la *curva calorica dei nuclei*, che presenta somiglianze straordinarie con quella dell’acqua e che ci riporta a quel fenomeno che, forse inconsapevolmente, osserviamo tutti i giorni quando facciamo

bollire l’acqua in pentola per prepararci un piatto di spaghetti. Le intense forze nucleari frenano i nuclei interagenti, convertendo grossa parte della loro energia cinetica in calore. Per effetto della compressione generata dall’urto e delle elevate temperature raggiunte, il sistema si dilata. L’energia assorbita viene utilizzata per rompere i legami del liquido nucleare che si trasforma in vapore a più bassa densità, mentre la temperatura si mantiene costante. E se l’acqua bolle a 100 gradi centigradi, i nuclei bollono a circa 50 miliardi di gradi kelvin! Negli urti più violenti, questo processo corrisponde a una vera e propria esplosione del sistema in una miriade di piccoli frammenti, le cui velocità sono direttamente legate al valore della “costante elastica” della materia nucleare. I nuclei sono fatti di due tipi di particelle: protoni e neutroni. Gli elementi presenti sul nostro pianeta non esauriscono di certo tutte le possibili combinazioni ed è oggi ben noto che nelle fasi successive della vita di una stella, in un altalenarsi di contrazioni (dovute alla gravità) e di fusioni termonucleari, intervengono diverse specie nucleari che non sopravvivono. Questi nuclei, in cui normalmente non ci si imbatte perché hanno una vita media troppo breve, sono i *nuclei esotici*. L’unico modo per studiarli è quello di ricrearli in laboratorio. Se da un lato, questo consente di consolidare le nostre



c.

conoscenze sulla struttura dei nuclei e di penetrare i misteri della genesi degli elementi, dall'altro ci offre la possibilità di studiare il comportamento di materia nucleare in condizioni estreme, non solo di densità e temperatura, ma anche di *isospin*, cioè di asimmetria tra neutroni e protoni. La comprensione del comportamento di questi sistemi esotici è tuttora una delle grosse sfide della fisica nucleare, una sfida resa possibile dallo sviluppo di progetti che mirano a creare nuovi fasci di nuclei collidenti e nuovi rivelatori, in grado di identificare non solo la carica di ciascun prodotto di reazione, ma anche il numero di neutroni in esso contenuti. In questi ultimi anni abbiamo imparato che la materia asimmetrica è ancora più incompressibile e che la transizione di fase liquido-gas presenta nuove caratteristiche. Come ogni buon liquido che si rispetti, anche la materia nucleare può essere “distillata” e si separa in fasi con diversa composizione: la parte liquida, che contiene meno neutroni, diventa più simmetrica, mentre il vapore nucleare si arricchisce dei neutroni in eccesso. Dall’entità di questo fenomeno, che nasce dal fatto che la forza nucleare che si esercita fra due nucleoni dello stesso tipo è meno intensa della forza che agisce fra un neutrone e un protone, si possono evincere informazioni generali, che possono essere utilizzate anche in altri contesti. Poiché di nuclei e di materia nucleare sono fatte anche le stelle, lo studio delle reazioni fra nuclei pesanti è uno strumento davvero unico per capire i fenomeni fisici che avvengono nei corpi celesti. Le condizioni fisiche in laboratorio e nel contesto stellare sono piuttosto differenti e ricoprono un enorme intervallo di scale di tempi e dimensioni, dall’infinitamente piccolo all’infinitamente grande. Eppure è possibile collegare le due classi di fenomeni, che coinvolgono processi nucleari a livello fondamentale, tramite i concetti di equazione di stato e diagramma di fase di materia nucleare. Ad esempio, è l’equazione di stato di materia nucleare a governare il processo di esplosione delle *supernovae*; in queste stelle, che hanno esaurito tutte le combustioni nucleari in grado di produrre energia, per effetto della gravità i nuclei si incollano l’un l’altro, si crea cioè materia nucleare. Ed è proprio dal valore della “costante elastica” nucleare che dipende il destino della stella. Infatti, a causa dell’elevata incompressibilità della materia nucleare, si genera l’“onda di shock” che dissemina nello spazio quasi tutta la massa all’interno della stella, che brillerà in cielo

per qualche settimana, lasciandosi alle spalle un cuore fatto di neutroni. Le stelle di neutroni, nate da queste esplosioni spettacolari, sono oggetti estremi della natura, dove una quantità di materia pari a circa 1,5 volte la massa del Sole è compressa dalla gravità entro una sfera dal raggio di 10 km circa (il raggio del Sole è 700.000 km). La densità media di queste stelle collassate è circa il triplo di quella che si ha al centro dei nuclei atomici pesanti. L’asimmetria tocca valori elevatissimi e sulla crosta, dove la densità è più bassa, possono formarsi agglomerati simili ai prodotti che emergono in laboratorio dalla frammentazione di nuclei ricchi di neutroni. In un certo senso, una stella di neutroni può essere considerata come un nucleo gigantesco, contenente 10^{57} nucleoni, ed è proprio l’equazione di stato di materia nucleare asimmetrica a deciderne la struttura interna e persino la stabilità, cioè l’eventualità che collassi in un buco nero. In certe condizioni, nel cuore di queste stelle si raggiungono valori ancora più elevati di densità, per cui i nucleoni si sovrappongono a tal punto da creare un nuovo stato di materia, il plasma di quark e gluoni, cioè proprio quella fase di materia nucleare che si cercherà di ricreare ad *Alice*, uno dei quattro esperimenti principali allestiti all’acceleratore Lhc, al Cern di Ginevra. Ma questa è un’altra storia...

Biografie

Maria Colonna è ricercatrice ai Laboratori Nazionali del Sud di Catania. Svolge attività di ricerca teorica nel campo della fisica delle collisioni fra ioni pesanti, dalle energie di Fermi alle energie relativistiche, con particolare attenzione allo studio delle transizioni di fase e di fenomeni collettivi di materia nucleare.

Michela D’Agostino svolge la sua attività di ricerca al Dipartimento di Fisica e alla Sezione Infn di Bologna. È impegnata dal 1990 nel campo della fisica nucleare con ioni pesanti a energie intermedie (10-100 MeV/nucleone) e in particolare si occupa della termodinamica dei nuclei caldi da un punto di vista sperimentale.

Link sul web

www.ganil.fr/theorie/vision/niveau_1_set_frame_a.html

www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~ono/

www.racine.ra.it/planet/testi/cosa_stelle.htm

www.racine.ra.it/planet/testi/ener_nucl.htm

[as] box

Il rivelatore Chimera

Macchine acceleratrici che consentono lo studio di reazioni nucleari a energie di laboratorio dell'ordine delle decine di MeV per nucleone sono operative in vari laboratori nel mondo, tra cui a Catania nei Laboratori Nazionali del Sud (Lns) e a Padova nei Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl). I prodotti delle reazioni nucleari sono emessi in tutte le direzioni dello spazio e, per questo, il loro studio richiede dei rivelatori detti a 4 π , cioè che coprono l'intero volume attorno al punto di collisione. Un rivelatore a 4 π è composto da diversi moduli, il cui numero può variare sino alle migliaia e in cui i vari prodotti provenienti dalla reazione arrestano la loro corsa, rilasciando l'energia che posseggono. La traccia generata dalle particelle all'interno dei moduli di rivelazione consente di identificarne la carica e di misurarne l'energia. Dagli spettri energetici delle particelle si può poi risalire, ad esempio, al grado di

agitazione del sistema nucleare da cui provengono i prodotti osservati, ovvero alla sua temperatura. I rivelatori più sofisticati sono in grado di identificare anche la massa dei prodotti di reazione, grazie alla tecnica del tempo di volo, cioè alla misura del tempo impiegato da ciascuna particella a percorrere la distanza fra due moduli di rivelazione. Fra questi, quello che attualmente possiede le caratteristiche di rivelazione più avanzate è Chimera (*Charge Heavy Ion Mass Energy Resolved Array*), installato e attivo ai Lns. Il nome Chimera è ispirato a quello di un mostro mitologico composto da parti di diversi animali e per questo capace di diverse possibilità di azione. Allo stesso modo questo strumento, basandosi su diverse tecniche di rivelazione, consente di ottenere molteplici informazioni sulle particelle rivelate e quindi sulle reazioni nucleari che le hanno generate. [Sara Pirrone]

Biografia

Sara Pirrone è ricercatore dell'Infn della Sezione di Catania. Svolge la sua attività di ricerca nel campo della fisica nucleare sperimentale degli ioni pesanti, condotta ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn con il multirivelatore Chimera.

Link sul web

www.lns.infn.it



1. Il rivelatore Chimera installato ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. L'apparato è costituito da circa 1200 moduli di rivelazione distribuiti su 9 ruote concentriche, alcune ben visibili nella foto e una sfera, al centro della quale avviene la collisione nucleare. Le dimensioni del rivelatore sono di circa 4 metri di lunghezza e 2 metri di altezza.



Luna studia il Sole

Sotto il Gran Sasso per capire le stelle.

di Carlo Brogginì

Quando una grande nube di gas si contrae, viene rilasciata un'enorme quantità di energia gravitazionale che progressivamente scalda la stella che si sta formando. Raggiunta la temperatura centrale di alcuni milioni di gradi, si accende il "fuoco nucleare", si innescano cioè le reazioni di fusione termonucleare che trasformano idrogeno in elio e liberano energia. Luna (*Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics*) studia queste reazioni alla stessa energia, alcune decine di keV, alla quale esse avvengono nelle stelle. Si tratta di energie da 100 fino a 1.000 volte più piccole di quelle in genere esplorate nei laboratori di fisica nucleare. Il numero degli eventi di fusione che si hanno nell'apparato sperimentale è così piccolo da rendere impossibile il loro studio in presenza della radiazione dovuta ai raggi cosmici. Per questo nel 1991 un piccolo laboratorio di astrofisica nucleare è stato installato sotto

il Gran Sasso. La montagna riduce fortemente la radiazione cosmica e questo ha permesso di condurre esperimenti con un numero di eventi basso, sino a due fusioni al mese. Gli apparati sperimentali sono relativamente semplici: un acceleratore, in passato da 50 kV e ora da 400 kV, che fornisce fasci di idrogeno o elio con corrente molto elevata (sino a 1 mA), bersagli sia solidi che gassosi sui quali viene condotto il fascio e, infine, rivelatori al silicio, al germanio o a cristalli scintillanti, che identificano il processo di fusione attraverso le particelle prodotte o la radiazione emessa. I rivelatori sono selezionati in base alla loro radioattività intrinseca: questa deve essere minima per consentire di sfruttare sino in fondo la soppressione della radiazione cosmica fornita dal Gran Sasso. La prima fase di Luna è stata dedicata allo studio delle reazioni fondamentali della catena di fusione protone-protone (p-p) (vd. "Alchimie celesti", p. 12) e del ciclo di reazioni nota come "cno" (carbonio, azoto, ossigeno). Attraverso questi processi, in particolare la catena p-p, nella zona centrale del Sole ogni secondo si trasformano circa 600 milioni

di tonnellate di idrogeno in elio. Durante la trasformazione si generano neutrini che, dopo poco più di 8 minuti, raggiungono la Terra con un flusso di circa 60 miliardi per cm² al secondo. Il confronto tra i risultati degli esperimenti che rivelano questi neutrini, iniziati alla fine degli anni sessanta, e le previsioni del modello solare hanno permesso di comprendere le proprietà del neutrino e di verificare in maniera sempre più profonda il modello di funzionamento del Sole. Ingrediente fondamentale del modello sono le probabilità dei processi di fusione studiati da Luna o, in termine tecnico, la loro *sezione d'urto*. I risultati hanno permesso di calcolare in modo sempre più preciso il flusso di neutrini. Dopo decenni di esperimenti raffinatissimi e di perfezionamento del modello solare, si possono ormai usare i neutrini per "vedere" il centro del Sole e misurarne i parametri fondamentali come temperatura e composizione. I risultati di Luna sono naturalmente applicabili anche a stelle diverse dal Sole. In particolare, essi hanno mostrato come l'età delle più antiche strutture galattiche, gli ammassi globulari, debba essere aumentata di circa 1 miliardo di anni,

portando così a 14 miliardi di anni la stima dell'età dell'Universo. Terminata la fase essenzialmente "solare", l'attività di Luna è ora dedicata ai processi di combustione dell'idrogeno nei cicli che si innescano a temperature maggiori di quella del Sole: Ne-Na (neon-sodio) e Mg-Al (magnesio-alluminio). Si tratta di processi relativamente poco importanti per la produzione di energia, ma essenziali per comprendere la ragione profonda delle abbondanze dei vari elementi che, "cucinati" all'interno delle stelle, popolano l'Universo.

Biografia

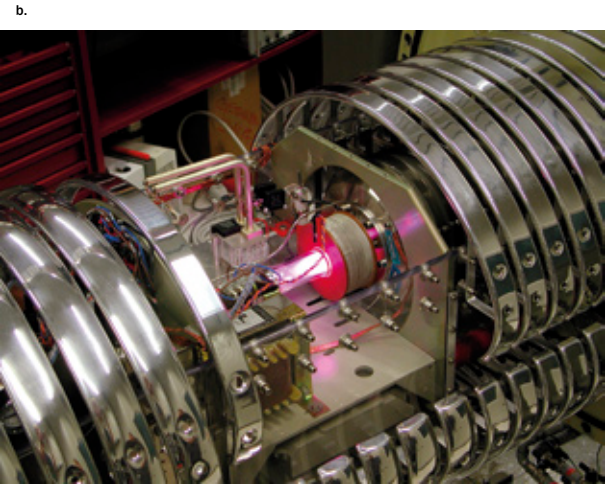
Carlo Brogginì è ricercatore presso la sezione Infn di Padova e membro del comitato scientifico del Gran Sasso. Dal 2002 al 2007 è stato responsabile nazionale dell'esperimento Luna.

Link sul web

www.lngs.infn.it

<http://luna.lngs.infn.it>

<http://npgroup.pd.infn.it/luna/>



a. Il Gran Sasso, con i suoi 2.912 m, è la vetta più alta degli Appennini. Sotto questa bellissima montagna, coperti da 1.400 m di roccia, si trovano i laboratori dell'Infn che ospitano l'esperimento Luna.

b. La sorgente di ioni dell'acceleratore di Luna (qui caricata con idrogeno). Ben visibile è il plasma di protoni ed elettroni che si forma nella regione di forte campo elettromagnetico.

Ceneri del Big Bang

Quel che resta dei primi tre minuti.

di Claudio Spitaleri e Vincenzo Napolano

Un esame attento dell'Universo attuale permette non solo di studiarne le caratteristiche presenti ma anche di provare a capire i primi istanti della sua nascita ed evoluzione. Ci sono in particolare alcuni indizi e prove significative, accumulate negli ultimi cinquanta anni, che hanno convinto la gran parte dei cosmologi della veridicità dell'ipotesi del Big Bang. Ovvero del fatto che all'origine dell'Universo, circa 13,7 miliardi di anni fa, vi sia un'espansione rapidissima e violenta partita da un punto infinitesimo, chiamato *singolarità dello spaziotempo*, in cui la temperatura e la densità della materia raggiungevano valori estremi. Le prove più convincenti che l'Universo sia nato proprio così, le hanno portate alcune scoperte e misure cruciali, avvenute nel secolo scorso. Il fatto ad esempio che le galassie si allontanassero tutte l'una dall'altra e con velocità crescente all'aumentare della loro distanza relativa, confermò l'ipotesi di un Universo in espansione e rese verosimile l'idea che in un qualche momento in passato la materia fosse concentrata tutta in una stessa regione. Una prova ancor più decisiva fu la scoperta alla metà degli anni '60 di una radiazione cosmica di fondo, che permea lo spazio cosmico in modo omogeneo e ci arriva (all'incirca) con la stessa intensità da tutte le direzioni. Questa radiazione fu immediatamente interpretata come un "eco" dell'enorme quantità di energia rilasciata, "raffreddandosi", dall'Universo primordiale, sotto forma di una radiazione, che si è attenuata via via durante la sua successiva espansione, prima di arrivare fino a noi. L'esistenza di questa radiazione è stata considerata un indizio estremamente convincente a favore del Big Bang. Un altro tassello fondamentale per completare il quadro di questa teoria è stato però aggiunto dai fisici nucleari, che hanno provato a spiegare come nei primi tre minuti di vita dell'Universo si siano generati la materia, così come la conosciamo, e i suoi costituenti elementari. Dopo circa un minuto dalla sua nascita l'Universo si era già raffreddato abbastanza per produrre protoni e neutroni stabili, che tramite fusioni nucleari, formarono i nuclei atomici del deuterio (un protone più un neutrone), quindi quello dell'elio-4 (o *particelle alfa* fatte di due protoni e due neutroni) e arrivarono probabilmente con successive fusioni a produrre il litio-7 e il berillio-7 (costituito da quattro protoni e tre neutroni), che è però instabile. Questo processo si intrappolò a questo punto in una sorta di collo di bottiglia per la mancanza di nuclei stabili con 8 nucleoni e dopo pochi minuti la temperatura e la densità dell'Universo diminuirono al punto da rendere impossibile altre fusioni nucleari. La *nucleosintesi primordiale* quindi, secondo la teoria comunemente accettata, non produsse i nuclei più pesanti, formati da un numero di protoni e neutroni maggiore di quello del berillio, come il carbonio o l'ossigeno, indispensabili tra l'altro alla nascita della vita. La produzione di questi elementi

a.

sarebbe avvenuta durante il successivo miliardo di anni, all'interno di stelle di grossa massa, dove si produssero le reazioni di fusione nucleare dei nuclei più pesanti, dando luogo alla cosiddetta *nucleosintesi stellare*. La possibilità di prevedere grazie a questo modello l'effettiva abbondanza nell'Universo degli elementi più leggeri costituisce un altro valido argomento a sostegno dell'esistenza del Big Bang. La nucleosintesi coinvolge processi e reazioni nucleari, che si realizzano in natura secondo determinate probabilità, chiamate sezioni d'urto. Calcolare e misurare in modo estremamente preciso queste probabilità è uno degli obiettivi della fisica nucleare e costituisce un elemento cruciale per ricostruire cosa sia accaduto in quei primi minuti di vita dell'Universo, insieme alle tecniche sempre più sofisticate e precise per estrapolare le effettive abbondanze degli elementi nell'Universo primordiale attraverso l'osservazione e la misura di quelle presenti. In effetti già dall'inizio degli anni '70, pur senza mettere in discussione l'esistenza del Big Bang, è stata proposta una variazione della teoria, nota come *Big Bang non omogeneo*, che prevede anche la possibilità che nuclei con più di 7 nucleoni si siano formati già durante la nucleosintesi primordiale. È quindi estremamente importante studiare la probabilità che nelle condizioni di un Big Bang non omogeneo si verificchino reazioni nucleari

che formino nuclei pesanti, come quella in cui un nucleo di litio-8 (costituito da 8 nucleoni: 3 protoni e 5 neutroni) scontrandosi con una particella alfa produce un nucleo di boro-11 (5 protoni e 6 neutroni) più un neutrone libero. L'esperimento "Big Bang" eseguito presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn, a Catania (in accordo con i risultati di altri gruppi di ricerca internazionali) ha mostrato come questa reazione sarebbe significativamente probabile nel contesto di un Big Bang non omogeneo, contribuendo all'acceso dibattito scientifico internazionale sulle effettive caratteristiche della nucleosintesi primordiale. È così che dai laboratori di fisica nucleare possono arrivare alcune risposte alla domanda più difficile e antica, ovvero come si sia formato il nostro Universo.

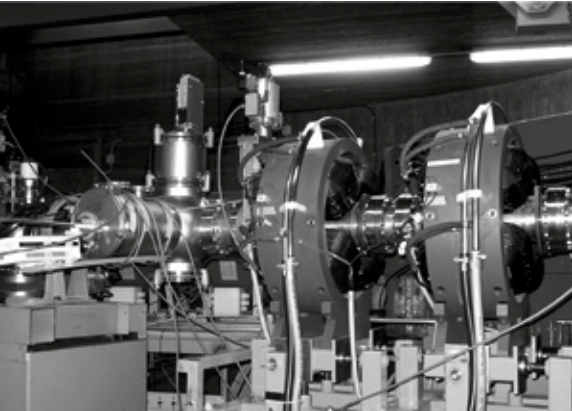
Biografia

Claudio Spitaleri è professore di fisica sperimentale all'Università di Catania e ricercatore dell'Infn ai Laboratori Nazionali del Sud. La sua ricerca è focalizzata sull'astrofisica nucleare sperimentale.

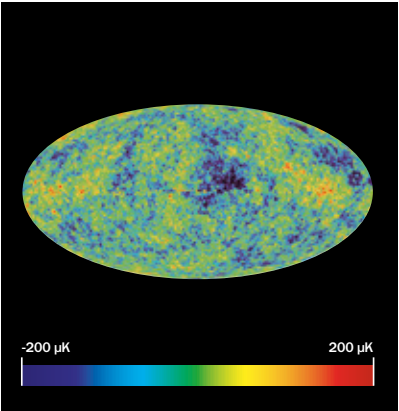
Link sul web

www.lns.infn.it/excyt/index.html

it.wikipedia.org/wiki/Nucleosintesi



b.



c.

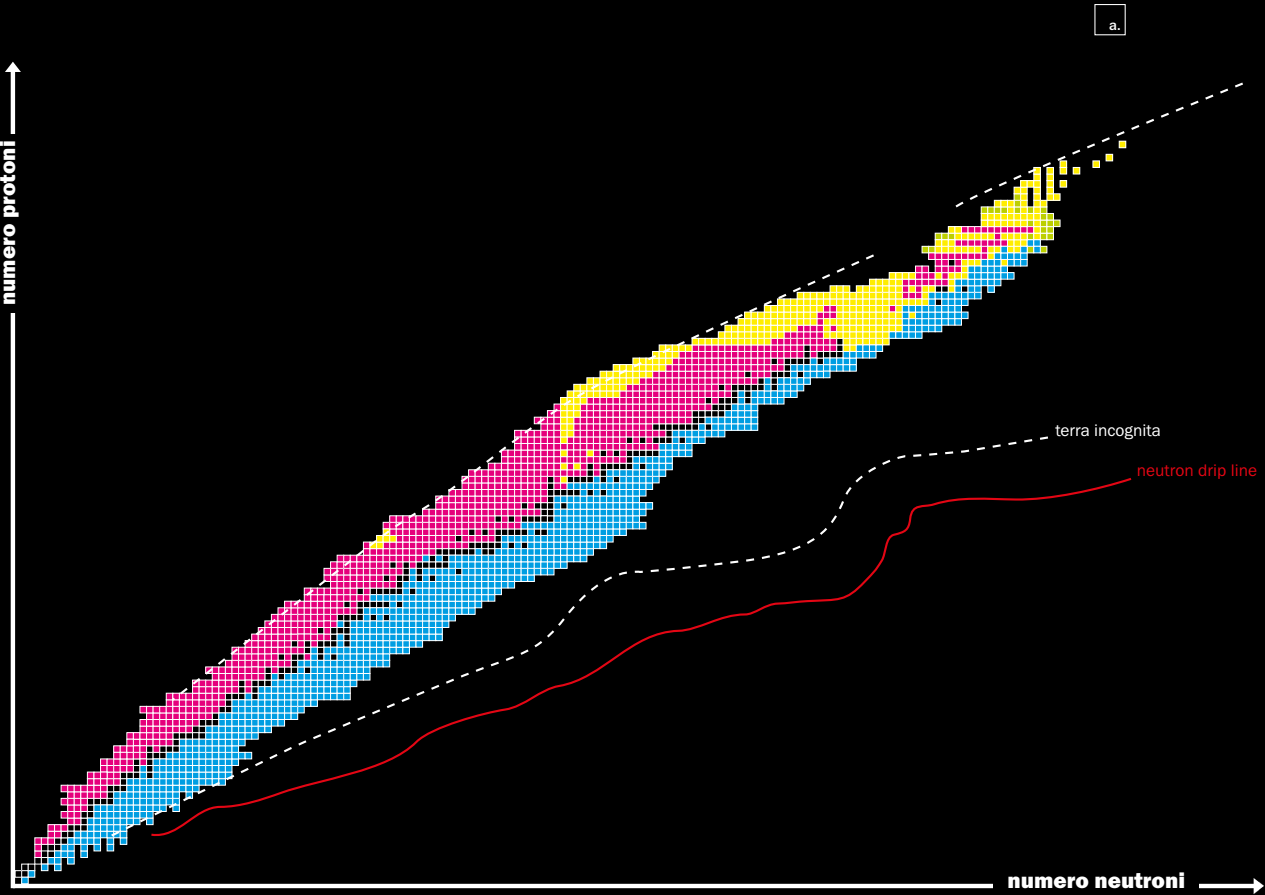
- a. La colonna di gas e polveri della Nebulosa Cone.
- b. La "facility" Excyt di produzione ed accelerazione di fasci radioattivi.
- c. Mappa del fondo cosmico a microonde "visto" da WMAP (<http://map.gsfc.nasa.gov>). L'immagine mostra le fluttuazioni di temperatura (segnalate dai diversi colori) dell'Universo primordiale, 380.000 anni dopo il Big Bang. Le zone a temperature diverse corrispondono ai grumi di materia cresciuti fino a formare le galassie. L'escursione termica massima tra i diversi punti è di 400 milionesimi di grado kelvin.

Terre incognite

Spes, una fabbrica di nuclei esotici.

di Gianfranco Prete

a. Carta dei nuclidi. Rappresentazione della distribuzione dei nuclei, dove sulle ascisse è riportato il numero di neutroni e sulle ordinate il numero di protoni (numero atomico) degli isotopi. I quadratini neri rappresentano i nuclei stabili (valle di stabilità), mentre i quadratini colorati (in giallo, rosa, verde e azzurro) indicano i nuclei instabili conosciuti. I diversi colori dipendono dalle caratteristiche dei nuclei, le quali ne determinano i modi di decadimento. I nuclei nell'area compresa fino alla linea tratteggiata non sono conosciuti e costituiscono la terra incognita. La linea rossa rappresenta la *neutron drip line*, cioè il confine oltre il quale supponiamo non esistano sistemi legati di neutroni e protoni. Le nostre conoscenze attuali però non ci permettono di stabilire esattamente dove questa linea si collochi. Per comprendere il ruolo delle reazioni nucleari nelle stelle è importante conoscere il comportamento dei nuclei che partecipano al processo-*r* (linea tratteggiata nella terra incognita).



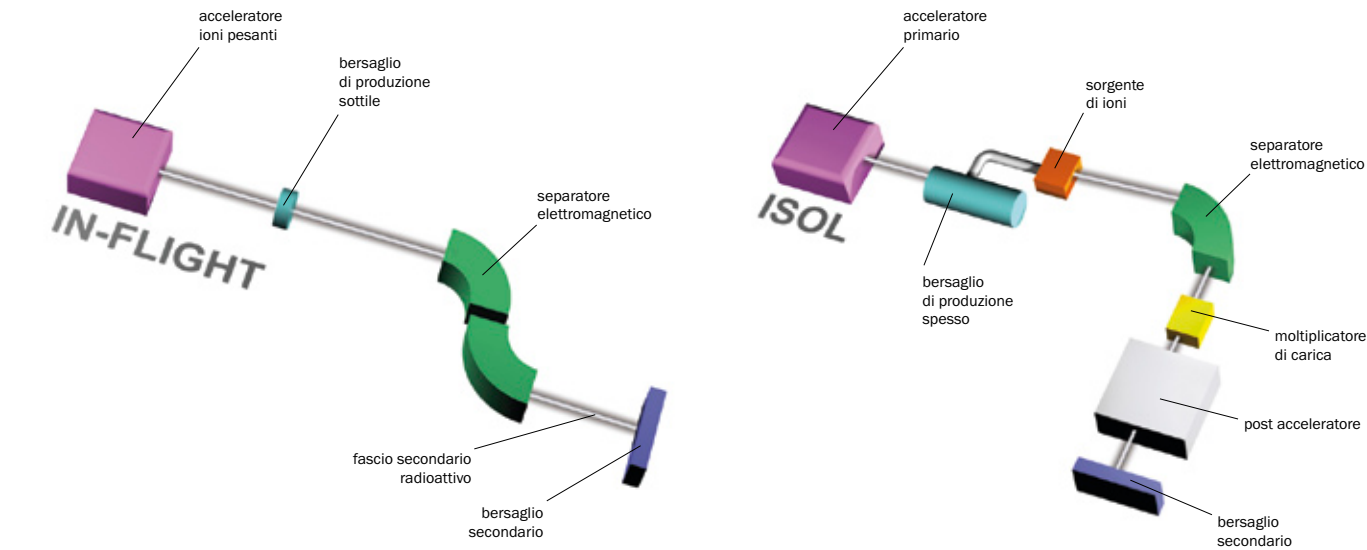
A partire dal 2014, in Italia sarà possibile studiare i nuclei atomici e le reazioni nucleari in regioni della carta dei nuclidi attualmente inaccessibili. Potremo indagare i processi che portano alla formazione dei nuclei pesanti nelle stelle, ma saremo anche in grado di produrre nuovi radiofarmaci e creare materiali innovativi. Questo grazie a Spes (*Selective Production of Exotic Species*), un progetto multidisciplinare e multiutente che sarà realizzato ai Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Spes produrrà fasci di ioni ricchi di neutroni per le attività di ricerca di fisica nucleare, ma anche fasci di protoni e neutroni per applicazioni in campo medico, astrofisico, per lo studio dei materiali e dei reattori nucleari di IV generazione (quei reattori cioè che produrranno scorie con vita media molto più breve, concepiti per minimizzare i rifiuti e ottimizzare l'utilizzo del combustibile nucleare).

I nuclei presenti in natura sulla Terra sono in gran parte stabili. Questi nuclei si dispongono, nella carta dei nuclidi, lungo una zona chiamata *valle di stabilità*. La maggior parte delle conoscenze attuali della struttura nucleare si basa su esperimenti nei quali si inducono reazioni nucleari con fasci di ioni stabili su bersagli di nuclei anch'essi stabili. Questo ha limitato lo studio alle specie nucleari che sono vicine alla valle di stabilità, per le quali il rapporto tra neutroni e protoni non è molto differente da quello dei nuclei stabili. Al di fuori di questa regione abbiamo poche informazioni sul comportamento dei nuclei, soprattutto per quelli ricchi di neutroni. La zona della carta dei nuclidi occupata da questi nuclei è stata così battezzata *terra incognita*. Questa area è delimitata dalla *neutron drip line*, oltre la quale si prevede che non esistano sistemi legati di neutroni e protoni. Non conosciamo sperimentalmente questa linea e anche le teorie non sono concordi nel definirne la posizione.

Nella regione della terra incognita sono compresi i nuclei che partecipano al cosiddetto *processo-r*, il processo di cattura rapida di neutroni responsabile della formazione degli elementi pesanti nelle stelle e dei fenomeni che portano alle violente esplosioni delle supernovae.

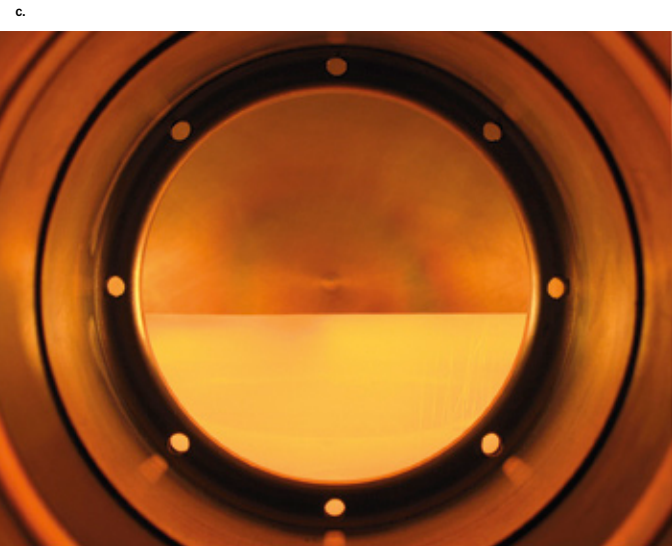
Lo studio sperimentale della struttura dei nuclei e della dinamica delle reazioni nucleari nella regione della terra incognita rappresenta la frontiera della fisica nucleare per i prossimi 20 anni. Questi nuclei sono chiamati *esotici* perché possono presentare proprietà del tutto nuove rispetto ai nuclei finora studiati, come ad esempio la loro dimensione. La scoperta di nuclei con un "alone" di neutroni rappresenta una delle evidenze sperimentali più significative di queste strane proprietà. Proprietà che sono previste anche per i nuclei esotici più pesanti in cui l'alone si dovrebbe trasformare in una vera e propria "pelle" di neutroni che ricopre il nucleo. Queste proprietà, dovute al debole legame tra i neutroni più esterni e il nucleo stesso, possono avere effetti rilevanti sulla struttura e sulle forme di eccitazione dei nuclei esotici.

b. Esistono due metodi per produrre fasci di nuclei radioattivi: il metodo *In-Flight* e il metodo *Isol*, che sarà utilizzato nel progetto Spes. La prima tecnica consiste nell'interazione di un fascio primario di alta energia su un bersaglio sottile. Le reazioni tra proiettile e bersaglio sono di fissione o di frammentazione: in entrambi i casi i nuclei prodotti mantengono una elevata velocità e quindi non c'è bisogno di riaccelerarli. È necessario invece separare i nuclei interessanti da tutti gli altri nuclei prodotti durante l'interazione. L'insieme di nuclei ottenuti viene perciò analizzato "in volo", mentre è trasportato nelle sale sperimentali. Nella tecnica *Isol*, invece, i nuclei radioattivi sono prodotti e termalizzati in un bersaglio molto spesso e devono quindi essere estratti. Poi, le diverse specie nucleari prodotte vengono separate mediante un dispositivo elettromagnetico e iniettate in un post-acceleratore, che fornisce loro l'energia necessaria per gli esperimenti.

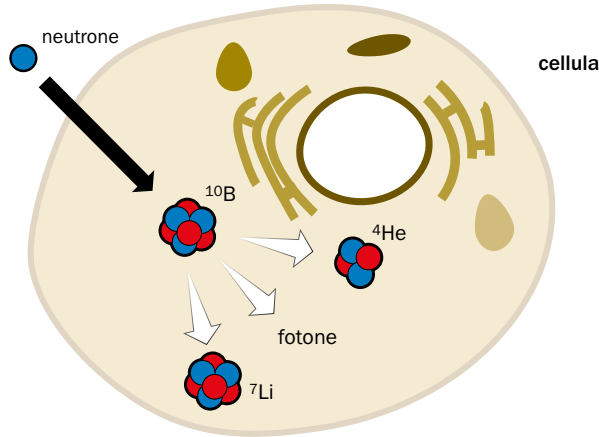


Il progetto Spes sarà dedicato allo studio dei nuclei esotici ricchi di neutroni. Avrà come obiettivo principale quello di produrre fasci riaccelerati di nuclei non stabili che permettano di indagare sperimentalmente il comportamento dei nuclei nella zona della terra incognita, per rispondere a domande sulla struttura di questi nuclei e sulle loro proprietà a elevate energie di eccitazione, ma anche per indagare sui meccanismi che governano l'evoluzione delle stelle. Spes sarà realizzato, con il contributo di tutta la comunità di fisica nucleare dell'Infn, ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Nei laboratori è già presente un acceleratore lineare a cavità superconduttive, Piave-Alpi, in grado di fornire fasci accelerati a energie dai 5 ai 15 MeV per nucleone (MeV/amu), che sarà utilizzato per l'accelerazione dei fasci instabili. La tecnica di produzione si basa sul metodo Isol (*Isotope Separation On Line*) che utilizza la fissione dell'uranio indotta da un fascio di protoni per produrre i nuclei esotici da riaccelerare. Nel progetto Spes un bersaglio di carburo di uranio naturale, costituito da 7 dischi di 4 cm di diametro e 1 mm di spessore (28 gr di materiale), viene bombardato da un fascio primario di protoni con energia di 40 MeV, producendo diecimila miliardi di fissioni al secondo. Il bersaglio viene scaldato fino a 2.000 °C e i prodotti di fissione, estratti per agitazione termica e ionizzati per ionizzazione superficiale, sono selezionati e trasportati verso l'acceleratore Piave-Alpi per formare fasci secondari di ioni ricchi di neutroni da utilizzare per la sperimentazione. Un sistema analogo a più bassa potenza, Excyt, in grado di fornire fasci esotici leggeri è stato realizzato a Catania ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn e rappresenta un'installazione di riferimento per lo sviluppo del progetto Spes.

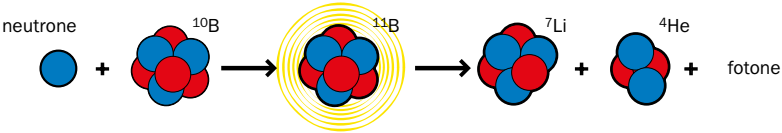
L'elemento più critico del progetto è il sistema bersaglio-sorgente poiché deve sostenere la potenza del fascio primario, lavorare ad alta temperatura e in un ambiente ad alta radioattività. La progettazione termica di questo sistema, la produzione e caratterizzazione degli elementi di carburo di uranio naturale, i sistemi di sicurezza e radioprotezione dell'impianto rappresentano alcuni dei punti del progetto Spes che richiederanno lo sviluppo di tecnologie d'avanguardia. Dal punto di vista della sperimentazione i punti di forza sono: l'intensità dei fasci, 10-100 volte superiore a quanto attualmente disponibile; l'alta selezione in massa dei fasci, cioè la capacità di selezionare l'isotopo di interesse con cui formare il fascio tra tutti i nuclei estratti dalla sorgente; la loro energia, 2-3 volte più alta di quella fornita dai migliori sistemi Isol oggi operativi nel mondo. Spes è inserito in un quadro di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico in collaborazione con importanti laboratori nel mondo: il Cern in Svizzera, Ganil in Francia, Ornl negli Stati Uniti, Triumf in Canada e Kek in Giappone. Spes è anche indirizzato verso la ricerca applicata. Uno dei suoi punti di forza è l'acceleratore primario di protoni: un ciclotrone da 70 MeV con due porte di uscita. L'elevata intensità del fascio di protoni e la possibilità di estrarre due fasci indipendenti dal ciclotrone



c. Immagine della sorgente a ionizzazione di Spes, durante il test di verifica del comportamento termico a 2.000 °C. Utilizzando un pirometro è possibile misurare la temperatura della superficie senza contatto con l'oggetto. Le misure sperimentali sono confrontate con le simulazioni con cui è stato progettato tutto il sistema bersaglio-sorgente di Spes.



d.



permettono di far funzionare, contemporaneamente agli esperimenti di fisica nucleare, una facility applicativa per lo studio di nuovi radiofarmaci e la ricerca nel campo dei reattori di IV generazione. Per la ricerca applicata è anche prevista la messa in funzione di un acceleratore di protoni di alta intensità e bassa energia con cui realizzare fasci di neutroni. Irraggiando un bersaglio di berillio o di litio si produrranno fino a centomila miliardi di neutroni al secondo, che saranno utilizzati per studi applicativi nel campo dei materiali, dell'astrofisica e della medicina. Una applicazione importante in campo medico è lo studio della Bnct (*Boron Neutron Capture Therapy*) per la cura dei tumori diffusi. Questa tecnica fa uso di neutroni “termalizzati” (cioè portati a energia molto bassa, pari all'energia di agitazione termica), che nel nostro caso avranno un flusso di un miliardo di neutroni al secondo per centimetro quadrato. Il metodo è basato sulla capacità del boro di catturare neutroni termici e decadere in un nucleo di litio e uno di elio. Nell'applicazione medica il ¹⁰B viene legato a speciali molecole che, iniettate nel paziente, sono assorbite dalle cellule tumorali. L'irraggiamento del paziente con neutroni termici provoca la rottura del ¹⁰B che si comporta come una “micro-bomba” distruggendo in modo selettivo solo le cellule tumorali. Questo metodo, ancora in fase sperimentale, rappresenta una strada da studiare che potrebbe aprire nuove prospettive nella cura di particolari neoplasie. Queste attività applicative, che si sviluppano a partire dalle ricerche di fisica di base condotte dall'Infn con gli acceleratori di particelle, sono promosse e sostenute dall'istituto ma, poiché sono progetti multidisciplinari, per essere realizzati richiedono l'impegno e la collaborazione anche di partner esterni.

d. Rappresentazione del meccanismo su cui si basa il metodo Bnct (*Boron Neutron Capture Therapy*). Un atomo di ¹⁰B, portato nella cellula con procedure chimiche, viene sottoposto al bombardamento con neutroni termici e si spacca in un nucleo di ⁴He e in un nucleo di ⁷Li. L'energia rilasciata da questa reazione nucleare all'interno della cellula ne blocca la riproduzione.

Biografia

Gianfranco Prete è ricercatore dell'Infn ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Ha collaborato alla realizzazione di esperimenti di fisica nucleare ed è oggi responsabile del progetto Spes.

Link sul web

www.inl.infn.it/~spes
www.ins.infn.it/excyt/index.html
www.eurisol.org/site02/index.php
www.phy.ornl.gov/hribf/



Frammenti nucleari

Misure di alta precisione per la radioprotezione nello spazio e per l'adroterapia.

di Clementina Agodi e Giovanni Raciti

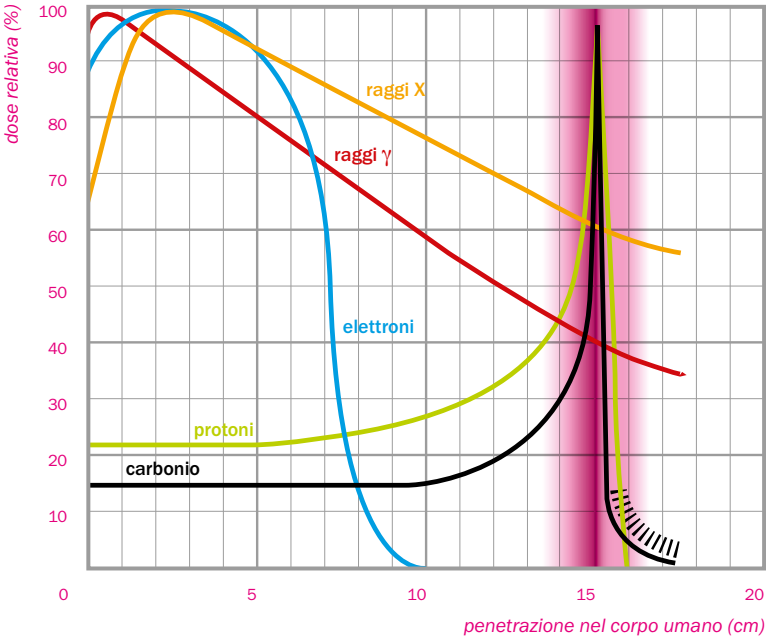
I primi studi sulle reazioni di *frammentazione del proiettile* risalgono al 1978 e vennero effettuati al *Lawrence Berkeley Laboratory*. In queste reazioni, nuclei medi e pesanti, accelerati a energie molto al di sopra della barriera coulombiana, interagendo con un nucleo bersaglio, si frammentano dando origine a diverse specie nucleari più leggere. Gli ioni prodotti vengono emessi con velocità leggermente inferiore a quella del proiettile iniziale, distribuendosi entro un cono di piccola apertura angolare rispetto alla direzione d'incidenza del proiettile.

Lo studio del processo di frammentazione nucleare coinvolge, oggi, diversi campi d'interesse: dalla ricerca di base alle applicazioni. Tra queste ultime, tali tipi di studi danno un contributo fondamentale per l'innovazione nel campo medico, in particolare nell'adroterapia, la nuova frontiera della terapia contro il cancro, e nella valutazione dei rischi da radiazioni nei viaggi interplanetari. Il principale vantaggio dell'adroterapia che, in alternativa alla radioterapia convenzionale, nel trattamento dei tumori utilizza, appunto, fasci di adroni (cioè di protoni oppure di ioni), si basa sul così detto *profilo inverso* della distribuzione di dose con la profondità di penetrazione nei tessuti (*picco di Bragg*). Questo profilo è caratterizzato dalla deposizione di una frazione relativamente piccola dell'energia totale nella regione superficiale, più prossima alla pelle, e da un netto aumento in prossimità della fine del percorso, con successiva rapida diminuzione. Ciò consente di modulare l'energia del fascio incidente in modo tale che il picco di dose raggiunga, alla profondità voluta, i tessuti malati. Il principale obiettivo della radioterapia, in generale, è il controllo locale del tumore. A tal fine occorre cedere al focolaio tumorale una dose talmente elevata da distruggerlo, mantenendo, al tempo stesso, la dose nei tessuti sani circostanti più limitata possibile. Nell'adroterapia con ioni è fondamentale misurare i prodotti della frammentazione alle varie energie nell'attraversamento dei tessuti sani dopo la zona interessata al trattamento (code del picco di Bragg). Queste misure sono fondamentali per stimare correttamente come questo processo modifichi le distribuzioni di dose e l'efficacia biologica del trattamento stesso, preservando il più possibile i tessuti sani. L'altro aspetto applicativo degli studi sulla frammentazione riguarda la radioprotezione nello spazio. Quest'ultima è di crescente attualità in vista dei futuri programmi della Nasa, relativi alle missioni su Marte e alla colonizzazione del Sistema Solare, in particolare della Luna. Infatti, uscendo dallo schermo protettivo del campo magnetico terrestre, la radiazione cosmica diviene il principale rischio per la salute degli astronauti nelle missioni interplanetarie. Inoltre, la strumentazione di alta precisione utilizzata nelle

a.
La Nasa ha promosso lo studio della frammentazione di ioni a varie energie per ottimizzare le schermature delle navicelle spaziali, in modo da ridurre a livello accettabile il rischio per gli astronauti ed aumentarne il tempo di permanenza nello spazio.

missioni spaziali è molto suscettibile a danni da radiazione, tanto da poter persino determinare il fallimento della missione stessa. Ma che cosa hanno in comune l'adroterapia e le esplorazioni nello spazio? In entrambi questi campi di ricerca sono coinvolti processi fisici simili, la cui comprensione approfondita è importante sia per ottenere migliori trattamenti clinici con le radiazioni, che per rendere più sicuri i viaggi interplanetari. Per calcolare correttamente le dosi da radiazione e per valutarne i rischi, sono necessarie delle misure sperimentali di frammentazione e di radiobiologia. Nella valutazione dei rischi da radiazione nello spazio, l'obiettivo che si prefigge la Nasa è quello di poter lavorare in sicurezza nello spazio con rischi da radiazioni accettabili. Benché nella radiazione cosmica, tra le particelle, quelle più pesanti siano solo l'1% esse contribuiscono in modo significativo alla dose totale. Fino ad oggi in campo applicativo, i problemi relativi alla frammentazione sono stati affrontati utilizzando soprattutto simulazioni. I modelli su cui si basano le simulazioni, però, devono essere convalidati: questo approccio presenta notevoli incertezze, dovute a una carenza di misure sistematiche. Il *rischio* non è una

grandezza misurabile sperimentalmente, ma si calcola con un modello. Come convalidare e migliorare i modelli? Il modo c'è ed è quello di eseguire le misure sperimentali necessarie nei laboratori di fisica nucleare. Questo è proprio quello che stiamo facendo con una vasta campagna di misure sperimentali, che comprende l'utilizzo di fasci di particelle in un intervallo di energie d'interesse sia per l'adroterapia che per la radioprotezione nello spazio. Questo programma sperimentale, frutto di una collaborazione internazionale, prevede diverse misure sia in Italia ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn alle energie più basse, che in Germania al laboratorio Gsi a energie più elevate. Nel primo caso, i risultati saranno utilizzati per la realizzazione di un Sistema di Piano di Trattamento (Tps) per ioni leggeri ($A \leq 16$). Un Tps è un complesso sistema di calcolo, che aiuta a definire i parametri della radiazione per ogni specifico trattamento e a calcolare la dose inviata al paziente, in tempo reale e in modo interattivo. Quello che un'ampia collaborazione all'interno dell'Infn vuole sviluppare sarà all'avanguardia in questo campo, perché conterrà, grazie anche ai nostri esperimenti, molti elementi di innovazione rispetto a quanto fino ad oggi disponibile.



b.

b.
La figura mostra la dipendenza dalla profondità della dose relativa depositata per diverse radiazioni. La distribuzione di dose dei protoni e del carbonio ha un andamento diverso rispetto a quello di un fascio di elettroni di alta energia. Per protoni e carbonio, la dose in superficie è bassa rispetto a quella assorbita nella regione del picco, al contrario di quanto accade per elettroni, raggi X e gamma. Nel caso del carbonio, è evidenziata la regione interessata dagli effetti della frammentazione.

Biografie

Clementina Agodi è ricercatore ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn. È responsabile nazionale dell'esperimento Frag e fa parte della collaborazione Tps dell'Infn.

Giovanni Raciti, recentemente scomparso, era professore di fisica sperimentale all'Università di Catania. Col suo lavoro, ha dato importanti contributi alla fisica nucleare sperimentale in Italia e all'estero. Era responsabile nazionale dell'esperimento Frag, per lo studio della frammentazione nucleare.

Link sul web

www.lns.infn.it

<http://insweb.lns.infn.it/>

www.fluka.org/fluka.php

www.to.infn.it/it/tps

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/>

www.gsi.de/portrait/Broschueren/ionenstrahlen_e.html

Il bello dei nuclei

Fisica nucleare per l’arte e l’archeologia.

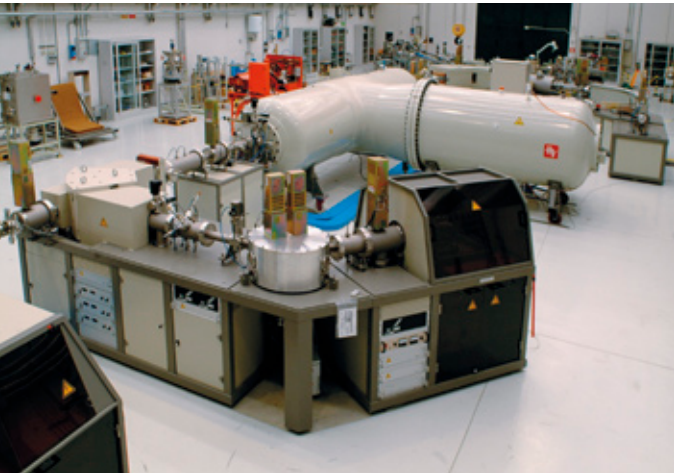
di Pier Andrea Mandò



a.

Fisica nucleare per l'arte e l'archeologia? E che c'entra? Beh, ci può entrare eccome! Molti neppure lo immaginano, ma le ricadute applicative della fisica nucleare e delle sue tecnologie sulla diagnostica dei beni culturali sono tante e importanti. L'Infn è stato attivo in questo settore fin dalla metà degli anni Ottanta, in particolare nella Sezione di Firenze, e più recentemente con ricerche in altre sedi tra le quali molto importanti quelle nei Laboratori Nazionali del Sud, a Catania. A Firenze vi ha dedicato, addirittura, un intero grande laboratorio: il Labec, dove un acceleratore di particelle è usato per gran parte del tempo disponibile proprio per queste applicazioni. E guardate che non si tratta di virtuosismi tecnici finì a se stessi. Chi può mettere in dubbio ad esempio che la datazione dei reperti archeologici sia importante per la ricostruzione della storia dell'uomo e dello sviluppo della civiltà? Ebbene, per le datazioni sono fondamentali principi e tecniche della fisica nucleare. Tutti avranno sentito almeno nominare il metodo del ^{14}C (carbonio 14) o radiocarbonio: questo metodo è basato proprio sulla “trasmutazione” nucleare, cioè il decadimento radioattivo di questo isotopo. Per capire come funziona, vanno fatte due premesse: la prima è che il ^{14}C è presente nell'atmosfera in una concentrazione di 10^{-12} (uno ogni mille miliardi di atomi di carbonio); la seconda, che il metabolismo degli esseri viventi, animali o vegetali, implica continuo scambio con l'ambiente (respirazione, sintesi clorofilliana, alimentazione), perciò i tessuti dei viventi hanno praticamente la stessa concentrazione di ^{14}C dell'atmosfera. Dopo la morte però, nei resti organici gli atomi di ^{14}C che via via scompaiono per decadimento radioattivo non possono essere più “rimpiazzati” da una riassunzione tramite metabolismi biologici. Così la loro concentrazione diminuisce: e la legge del decadimento radioattivo ci permette di conoscere perfettamente il ritmo di questa progressiva riduzione (nella fattispecie, ogni 5.730 anni la quantità di ^{14}C si riduce alla metà). Allora, misurando la concentrazione di ^{14}C rimasta oggi nei resti di un organismo ex-vivente, possiamo ricavare il tempo passato dalla sua morte. Alla base di questo processo naturalmente è la presenza e la concentrazione costante di ^{14}C in

- a.
La tonaca di San Francesco conservata a Cortona. La datazione, effettuata al Labec di Firenze su alcuni minuscoli frammenti della lana con cui è tessuta, ha confermato che è compatibile col periodo in cui ha vissuto il poverello di Assisi.
- b.
La sala misure del laboratorio dell'acceleratore *Tandetron* al Labec, nella sezione di Firenze dell'Infn. È con questo acceleratore che si effettuano, tra le altre applicazioni, anche le datazioni tramite misura del radiocarbonio con la tecnica della spettrometria di massa con acceleratore.



b.

atmosfera. Sarebbe naturale immaginare che, visto che è radioattivo e quindi via via scompare, dovesse sparire progressivamente anche dall'atmosfera, ma non è così. Come fa allora a non finire mai? La risposta viene da qualcosa che ancora una volta ha molto a che fare con la fisica nucleare. È il “bombardamento” che la Terra subisce da parte dei raggi cosmici, che – con una serie di interazioni successive – ricreano continuamente in atmosfera nuclei di ^{14}C , con un processo praticamente inverso al decadimento radioattivo. Riassumendo molto schematicamente: la radiazione cosmica crea in continuazione ^{14}C in atmosfera, che però essendo radioattivo dopo un certo tempo “scompare”. I due processi si bilanciano producendo una concentrazione costante di ^{14}C nell'atmosfera (10^{-12}), e la stessa concentrazione di ^{14}C la troviamo nei tessuti degli esseri viventi in conseguenza dei metabolismi biologici. Dopo la morte però i metabolismi cessano e il decadimento radioattivo fa diminuire il ^{14}C nei resti; misurando quanto ne è rimasto, è possibile determinare il tempo trascorso dalla morte. Sono quindi leggi e processi della fisica nucleare che ci danno la possibilità di datare i materiali

di origine organica. Ma non solo: anche i metodi e gli strumenti di misura della concentrazione residua di ^{14}C nei resti organici sono quelli della fisica nucleare. È una misura tutt'altro che facile, perché richiede grande sensibilità (la concentrazione è bassissima) ma anche gran precisione (per avere la data con piccola incertezza). Oggi, una misura sensibile e precisa si può fare anche su quantità minuscole di materiale: un capello, un semino, una scheggia di legno, un centimetro quadro di stoffa. Grazie a una tecnica nucleare chiamata “spettroscopia di massa con acceleratore”, che usa appunto particolari acceleratori di particelle (i Tandem). Nella “sorgente” dell'acceleratore, i diversi atomi nel materiale del reperto sono ionizzati e preaccelerati; in uscita dall'acceleratore, gli ioni vengono contati separatamente secondo le loro masse, usando rivelatori di particelle e altri apparati. Solo grazie alle elevate energie finali e ai particolari meccanismi con cui avviene l'accelerazione in queste macchine, si raggiunge la enorme sensibilità necessaria per il conteggio selettivo dei (pochissimi!) isotopi di ^{14}C , così da misurarne la concentrazione. E si riescono a misurare concentrazioni

di ^{14}C anche di solo uno ogni milione di miliardi, che è quella rimasta in reperti vecchi di circa 50 mila anni. Sacrificandone solo un milligrammo o giù di lì. Sono tante le risposte che vengono da queste misure, i dubbi che vengono fugati: ogni anno più di 10.000 date sono ottenute grazie al ^{14}C ! Capita che ogni tanto una datazione venga alla ribalta anche sui media, come nel caso della Sindone. Ma la vera importanza del metodo del ^{14}C sta nella produzione di tanti risultati, oscuri al grande pubblico, ma cruciali per la ricerca degli archeologi, giorno per giorno. Questo è possibile grazie al sapere ereditato dalla fisica nucleare e alle sue tecnologie (acceleratori, rivelatori di particelle). Strumenti inventati per fare misure di fisica nucleare fondamentale, ma utilizzati in questi casi per scopi applicativi.

Biografia

Pier Andrea Mandò è professore di fisica applicata all'Università di Frenze. Si è dedicato in particolare allo sviluppo di tecniche nucleari per lo studio dei beni culturali, creando un gruppo di ricerca che ha portato alla creazione del Labec (Laboratorio per i Beni Culturali dell'Infn).



Verso le nuove generazioni

L'energia nucleare oggi.

di Giovanni Ricco

Nel corso di questo secolo una delle sfide globali sarà mantenere l'equilibrio tra la domanda di crescita di energia per lo sviluppo economico e il conseguente impatto socio politico e ambientale. Anche contando su una crescita parallela della capacità di risparmio energetico sia nei Paesi industrializzati che in quelli in via di sviluppo, è prevedibile che la domanda globale di energia cresca nei prossimi decenni fino al doppio di quella attuale.

In Italia la situazione energetica non è delle migliori: il massiccio ricorso alle fonti fossili, soprattutto gas e petrolio, ha portato a una notevole dipendenza (circa 84%) dalle importazioni, a un costo della bolletta notevolmente più alto (+45% per le utenze domestiche rispetto alla media europea) e alla violazione del protocollo di Kyoto, che impone entro il 2012 la riduzione delle emissioni di gas serra (CO₂) del 6.5% rispetto a quelle del 1990. Già nel 2007 le emissioni risultavano nel nostro Paese superiori del 17% rispetto ai valori del 1990 e con tendenza all'aumento.

L'energia nucleare può coprire una quota significativa della crescita del fabbisogno energetico, riducendo al tempo stesso le preoccupazioni di natura ambientale, politica e sociale associate al consumo di combustibili fossili. Tuttavia una parte importante dell'opinione pubblica è ancora convinta che i rischi della energia nucleare siano più importanti dei suoi vantaggi. Vediamo quindi di esaminare i problemi che verrebbero sollevati dalla riattivazione in Italia delle centrali nucleari e le risposte che la moderna tecnologia può dare. Dal punto di vista della sicurezza nel mondo oggi sono regolarmente in funzione circa 440 reattori della cosiddetta seconda generazione, costruiti a partire dagli anni 70, 36 sono in costruzione e un centinaio già pianificati. Gli unici incidenti estremi sono avvenuti negli Stati Uniti a Three mile Island nel 1979 e in Ucraina a Chernobyl nel 1986. Furono dovuti entrambi a una sequenza di malfunzionamenti seguiti da operazioni errate da parte degli

addetti, che hanno portato alla parziale fusione del nocciolo con emissione di gas radioattivi a pressione molto elevata. Solo a Chernobyl però questi gas sono fuorusciti dal reattore, che non aveva una struttura di contenimento esterna adeguata. Anche in seguito allo studio di quegli incidenti e ai miglioramenti apportati, la sicurezza di tutti gli impianti costruiti nei paesi dell'Ocse (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) è andata sempre migliorando ed ha raggiunto oggi un livello altissimo, tanto che in molti casi l'attività degli impianti è stata prolungata dai 40 anni previsti fino a 60. Le normative di sicurezza sono oggi molto severe e tra il nocciolo radioattivo e la popolazione sono interposte almeno 4 barriere: la guaina del combustibile, il contenitore metallico, il sistema di raffreddamento e l'edificio in cemento armato. A questi si aggiungono sistemi di sicurezza sia elettromeccanici sia passivi, governati cioè da principi fisici che si innescano spontaneamente quando necessario. Un altro aspetto cruciale è naturalmente quello dello smaltimento delle scorie radioattive. Il combustibile bruciato contiene materiali a bassa radioattività (soprattutto isotopi di uranio) e residui a radioattività elevata. Tra questi ultimi vi sono i frammenti di fissione, che sono nuclei più leggeri dell'uranio con vite medie dell'ordine del centinaio di anni e gli attinidi minori, nuclei instabili un po' più pesanti dell'uranio con vite medie fino a parecchie migliaia di anni (come il plutonio ²³⁹Pu che è anche un possibile combustibile nucleare). La maggior parte dei vecchi reattori custodisce il combustibile bruciato così come è prodotto e necessita quindi di depositi molto capaci ben isolati dalla biosfera (miniére di sale, depositi geologici profondi). Per i nuovi reattori è iniziata in alcuni Paesi (Francia, Giappone) la pratica del ritrattamento, cioè la separazione della mistura di Uranio e Plutonio, che può essere usata come nuovo combustibile, dagli attinidi minori e dai frammenti, che possono essere vetrificati e conservati nei depositi sotterranei, ma in volumi ridotti.

Un reattore da 1.000 MW produce in un anno, dopo il ritrattamento, tra 15 e 35 m³ di rifiuti ad alta attività.

Va comunque ribadito che la disponibilità di un deposito geologico per le scorie a lunga durata è ad oggi una premessa indispensabile sia per l'utilizzo di nuove centrali nucleari, che per lo smantellamento dei vecchi impianti. Il ritrattamento delle scorie incide anche sulla disponibilità del combustibile. In ogni caso, però, anche senza ritrattamenti, le risorse disponibili di ²³⁵U sono sufficienti, agli attuali consumi, fino a circa fine secolo. Se si tiene conto delle risorse stimate, anche a costi di estrazione più elevati (il prezzo dell'uranio minerale contribuisce alla bolletta solo per il 5%) e quelle ottenibili dal disarmo nucleare, si possono guadagnare parecchie decine di anni.

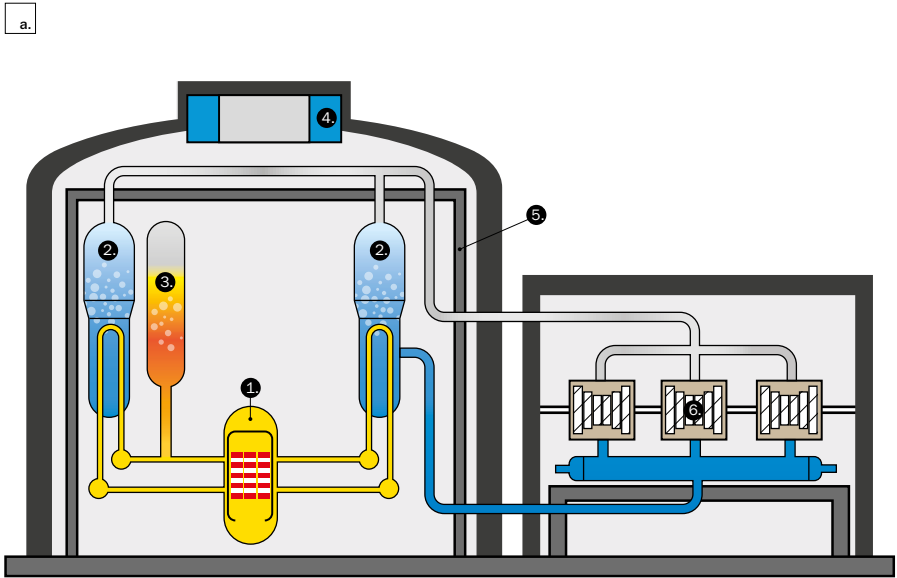
Per quanto riguarda i costi di produzione, quelli del nucleare sono assolutamente competitivi, ma i costi di costruzione sono molto elevati e i tempi lunghi. Ciò può rendere un investimento di questo tipo poco attraente. Una maggiore durata del periodo di produzione e una diminuzione del tempo di installazione aiuterebbe l'ammortizzamento dei capitali investiti.

Persiste infine il rischio dell'uso bellico o delittuoso di scorie radioattive da parte di gruppi terroristici o organizzazioni criminali. La linea di difesa si attua attraverso sistemi internazionali di salvaguardia e controllo (trattato di non proliferazione), nuove concezioni ingegneristiche di salvaguardia degli impianti. e la gestione sempre più internazionalizzata dell'intero ciclo del combustibile, con l'esclusione di processi nel corso dei quali si produca plutonio separato utilizzabile per ordigni bellici. La tecnologia dei reattori nucleari è da sempre oggetto di ricerche e innovazioni continue, che hanno prodotto un avanzamento costante delle garanzie di sicurezza degli impianti e di smaltimento delle scorie.

I reattori di ultima generazione, la cosiddetta terza generazione avanzata (III+), che entreranno in commercio entro qualche anno, saranno costruiti con procedure di sicurezza notevolmente potenziate, con diminuito impatto ambientale e riduzione dei rischi anche nelle già rarissime eventualità di fusione del nocciolo o impatto con un aereo. Questi miglioramenti, uniti alle più razionali tecnologie costruttive, permetteranno di garantire a 60 anni la durata dei nuovi impianti, ridurne i tempi di costruzione a 4 o 5 anni e portare il periodo di utilizzo a oltre il 90% del tempo, con conseguente contenimento dei costi. Il combustibile della generazione III+ può essere costituito per la metà da una miscelanza di uranio e plutonio, recuperata dal ritrattamento delle scorie, contribuendo così al loro smaltimento e al miglior utilizzo delle risorse. Tra i vari modelli di questa generazione proposti con queste caratteristiche due sono i più rilevanti per il mercato italiano.

a.
Westinghouse AP1000
Rappresentazione schematica del reattore AP1000 (Advanced Passive 1000), in cui è visibile in alto il serbatoio d'acqua a caduta libera per raffreddamento e lo sfiato dell'aria a convezione naturale.

1. Nocciolo del reattore
2. Generatori di vapore
3. Pressurizzatore
4. Serbatoio dell'acqua di raffreddamento per la sicurezza passiva
5. Struttura di contenimento di acciaio
6. Turbine



L'Epr ad acqua pressurizzata è costruito dall'azienda francese Areva e ha una potenza elettrica di 1.600 MW. Ha la certificazione della Comunità Europea (Eur) ed è in corso quella statunitense (Nrc). Punta ancora sui sistemi di sicurezza ridondanti. Ciò significa che un sistema di sicurezza, ad esempio il raffreddamento di emergenza, viene quadruplicato con componenti equivalenti di marche diverse posti in parallelo tra loro: una tecnologia complessa, ma ancora tradizionale, concepita per garantire una altissima affidabilità. A fronte di incidenti severi con fusione del nocciolo, il materiale fuso viene convogliato e contenuto in una apposita piscina, successivamente raffreddata. Particolarmente rinforzato il contenitore esterno in calcestruzzo armato spesso circa 2 m a doppia parete con rivestimento in acciaio.È in costruzione in Francia, Finlandia e Cina.

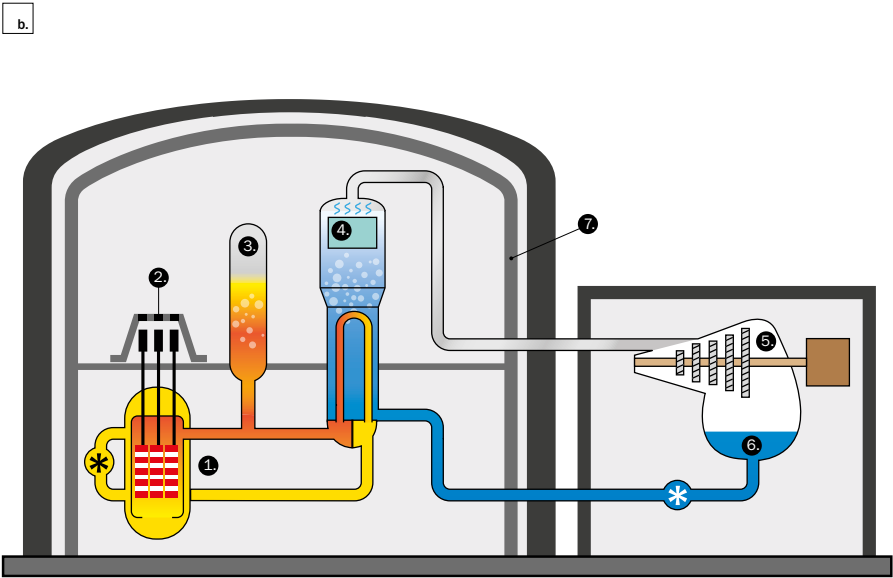
L'AP1000 ad acqua pressurizzata è costruito dalla multinazionale Westinghouse (Usa), ha una potenza elettrica di 1.117 MW. Ha la certificazione statunitense (Nrc), mentre è in corso quella della Comunità Europea (Eur). Punta alla sicurezza passiva: cioè a dispositivi di sicurezza, che non dipendono dall'intervento dell'uomo, né da reti di alimentazione o da sistemi elettronici, ma funzionano in modo automatico, sfruttando ad esempio semplici principi fisici (la gravità, la circolazione naturale di gas e fluidi...). In caso di eventi imprevisti si può quindi mantenere in sicurezza l'installazione per ore anche senza un comando attivo: si tratta di una tecnologia di sicurezze fortemente innovativa, che già anticipa i reattori di nuova generazione. In caso di incidente severo con fusione del nocciolo, il vaso di contenimento è progettato in modo da restare integro tramite refrigerazione delle pareti esterne. È in costruzione in Cina.

A lungo termine le centrali di quarta (IV) generazione, che dovrebbero essere disponibili industrialmente dopo il 2030, offriranno soluzioni più complete e sostenibili alle problematiche sollevate dai vecchi impianti.

Il Forum Internazionale Generazione IV, cui l'Italia afferisce solo tramite la Ue, ha selezionato per ricerche approfondite sei sistemi, per la maggior parte reattori a neutroni veloci, raffreddati non con acqua (che rallenterebbe i neutroni), ma con metalli liquidi e in grado di usare combustibili diversi dall'²³⁵U, come ²³⁸U e talvolta torio. La conversione nei reattori veloci dell'²³⁸U non fissile in materia fissile permetterebbe di moltiplicare per 60 l'energia prodotta a partire dall'uranio naturale portando la disponibilità del combustibile nucleare a migliaia di anni. Il medesimo meccanismo permetterebbe di bruciare le scorie trasformando per fissione gli attinidi minori a vita media lunghissima in frammenti più leggeri a vita media molto più breve e ridimensionando così la necessità di depositi geologici. Le nuove centrali nucleari saranno poi concepite in modo da offrire sicurezza passiva e la

b.
Areva Epr
Rappresentazione schematica del reattore EPR (European o Evolutionary Pressurized Reactor) da 1600 MW in cui è mostrata la doppia calotta contro gli attacchi aerei.

1. Nocciolo del reattore
2. Barre di controllo
3. Pressurizzatore
4. Generatore di vapore
5. Turbina
6. Acqua di raffreddamento
7. Doppia struttura di contenimento



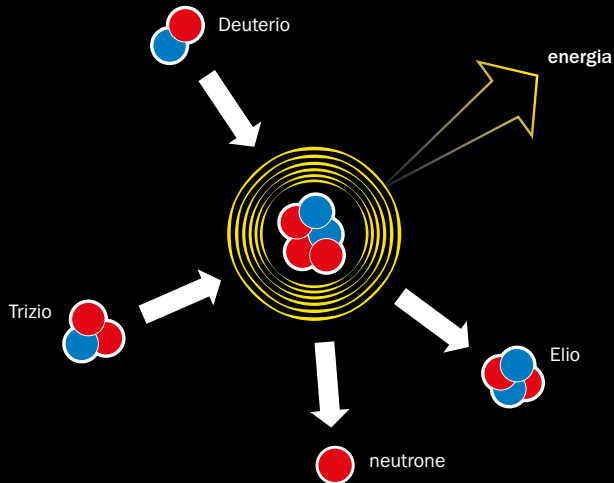
Un piccolo Sole sulla Terra

1. Nella reazione deuterio-trizio, un nucleo di deuterio e uno di trizio producono un nucleo di elio e un neutrone, liberando energia.

La fusione nucleare è una reazione (vd. fig. 1) in grado di produrre una gran quantità di energia bruciando una piccola quantità di combustibile. Nelle stelle l'innesco di questo meccanismo di produzione di energia è reso possibile dalle enormi forze gravitazionali, che generano a loro volta le condizioni di pressione e temperatura necessarie per rendere stabile il processo di combustione. Queste condizioni estreme però (fortunatamente) assenti sulla Terra, non rendono tecnologicamente semplice la realizzazione di reattori che funzionino utilizzando questa particolare reazione nucleare. I vantaggi, rispetto ad altri tipi di produzione di energia sono molteplici: alta efficienza di produzione di energia con basso consumo di combustibile, il combustibile è illimitato, poichè per una centrale da 1.000 MW sarebbero sufficienti ogni anno 110 kilogrammi di

deuterio e 380 kilogrammi di trizio. Non vi sarebbe inoltre nessuna emissione di anidride carbonica e una produzione di scorie a vita media brevissima e gestibili molto facilmente: la loro radiattività si esaurisce durante la stessa vita della centrale che le produce. Le difficoltà tecniche tuttavia sono molte e sostanzialmente legate al fatto che per riprodurre e controllare in laboratorio la reazione deuterio - trizio (vedi figura), considerata la più efficiente per la produzione di energia, è necessario operare il plasma (il gas caldissimo di deuterio e trizio privati degli elettroni e quindi elettricamente carico) a temperature di 150 milioni di gradi centigradi, cioè dieci volte più alte della temperatura del centro del Sole. Per affrontare questa importante sfida scientifica e tecnologica, gli stati europei hanno formato

il consorzio internazionale *Iter* che consentirà di realizzare, a partire dal 2018, i primi test di fattibilità su un impianto da 500 MW di potenza. Il progetto prevede la messa in esercizio del primo impianto per la produziode di energia (*Demo*) per il 2030. L'Infn partecipa al progetto *Iter* (attraverso il consorzio Rfx) e al progetto *Demo* nella costruzione della *International Fusion Materials Irradiation Facility*, una struttura in grado di ricreare in laboratorio le condizioni estreme di esposizione alla radiazione di tutti i materiali da utilizzare nella centrale. È un percorso scientifico lungo e impegnativo, che si può affrontare solo con grandi collaborazioni internazionali e importanti impegni finanziari. Ma è anche l'unico che potrà portarci un giorno ad addomesticare un piccolo Sole sulla Terra, per produrre energia pulita e pressochè illimitata. [A. S.]



1.

massima resistenza sia ai rischi della proliferazione che ai sabotaggi o agli attacchi terroristici. Tra i sistemi selezionati il primo a essere commercializzato sarà quello raffreddato al sodio, che si avvale della precedente esperienza del reattore veloce francese *Superfenix*, ed è quindi favorito dalla Francia. L'interesse della ricerca italiana (Enea, Infn, Ansaldo Nucleare) è invece attualmente indirizzato sui sistemi veloci raffreddati a piombo liquido, nei quali la ricerca italiana è leader in Europa. L'installazione di reattori di potenza nel nostro Paese va quindi vista contestualmente con la partecipazione a un percorso di ricerca e sviluppo verso un sempre maggiore livello di sostenibilità, che richiederà un impegno congiunto da parte di istituzioni, industria e enti di ricerca scientifica.

Biografia

Giovanni Ricco, professore di fisica nucleare e subnucleare dell'Università di Genova, è stato vicepresidente dell'Infn dal 2001 al 2006 e responsabile di vari esperimenti di fisica nucleare in Italia e negli Stati Uniti, al Jefferson Lab a Newport in Virginia. È attualmente coordinatore del progetto Infn-Energia.

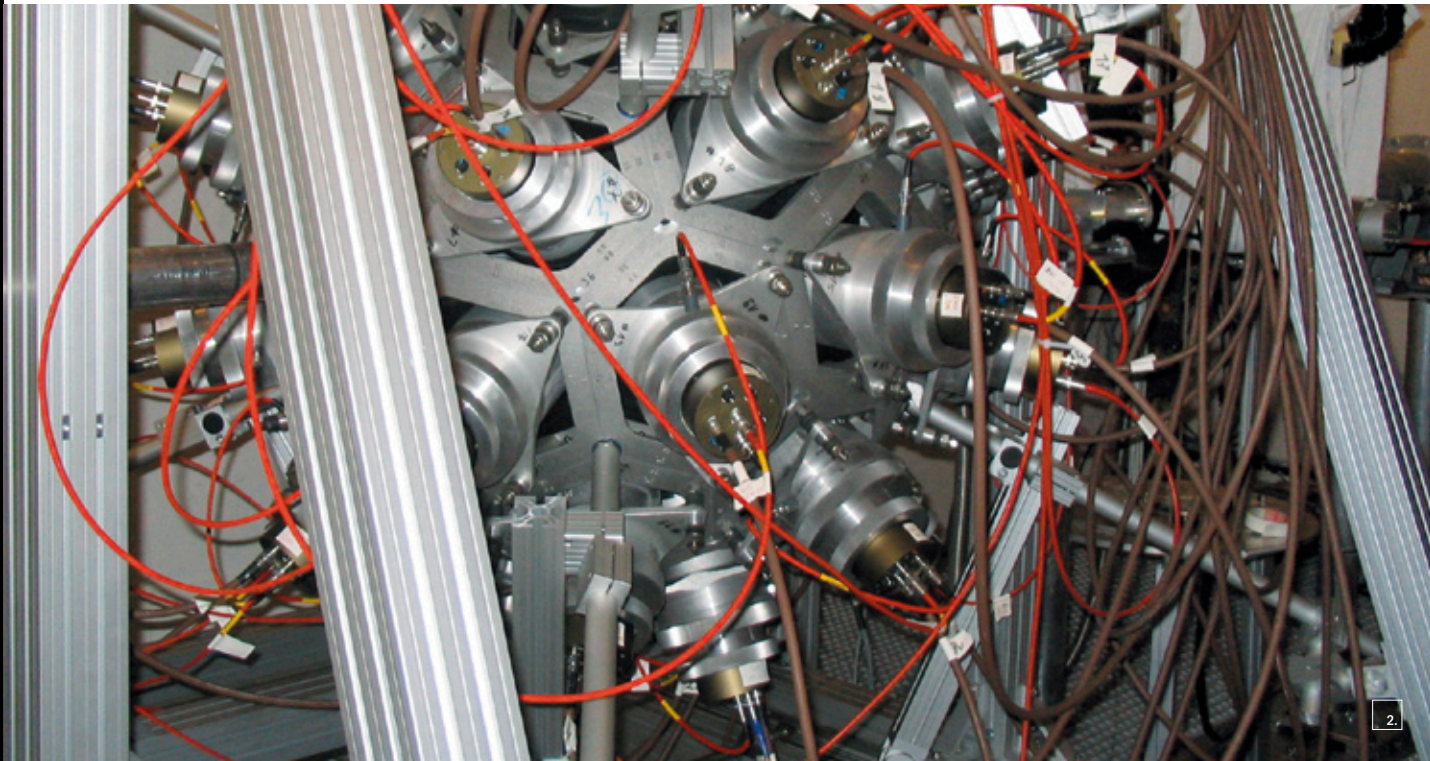
Link sul web

www.nea.fr Nuclear Energy Today,

www.sif.it

www.infn.it Appunti sull'Energia Nucleare

Neutroni in volo



La cattura di neutroni da parte di nuclei atomici riveste grande importanza nel campo dell'astrofisica perché responsabile della formazione degli elementi più pesanti del ferro. Questo processo ha luogo all'interno delle stelle durante la loro normale fase evolutiva o durante esplosioni di supernovae. Reazioni indotte da neutroni sono inoltre alla base di numerose applicazioni, fra le quali la più importante riguarda la produzione di energia nucleare da fissione. Lo studio delle interazioni neutroni-nuclei è pertanto fondamentale sia per migliorare la conoscenza dell'Universo e della sua evoluzione, sia per lo sviluppo di nuovi reattori nucleari e per applicazioni in campo medico e industriale. Da qualche anno, al Cern di Ginevra, è possibile studiare reazioni indotte da neutroni, grazie alla disponibilità di un fascio di neutroni a largo spettro di energia e alto flusso: n_TOF (da *Neutron Time Of Flight*). Il fascio, prodotto dall'interazione di protoni accelerati fino a 20 GeV su un bersaglio di piombo,

permette di studiare le reazioni neutrone-nucleo in funzione dell'energia dei neutroni, ricavata dal loro tempo di volo, cioè dalla misura del tempo impiegato da questa particella a percorrere la distanza fra il bersaglio di produzione e il punto di misura. Le reazioni sono studiate utilizzando diversi rivelatori, anch'essi all'avanguardia. Una collaborazione internazionale, a cui partecipano varie sezioni dell'Infn, porta avanti un programma sperimentale a n_TOF per lo studio delle reazioni indotte da neutroni che sono di interesse per l'astrofisica e per le tecnologie nucleari emergenti. In quest'ultimo campo sono allo studio reazioni su elementi transuranici, di fondamentale importanza per migliorare la sicurezza dei reattori attualmente in funzione, per la realizzazione dei reattori di IV generazione e per la progettazione di sistemi atti alla trasmutazione delle scorie nucleari a lunga vita media. Una intensa e interessante attività di ricerca è programmata a n_TOF per i prossimi anni. [Nicola Colonna]

2. Il calorimetro utilizzato a n_TOF per la misura delle reazioni di cattura neutronica. La sua forma sferica consente di coprire tutto il volume attorno al punto di collisione. L'apparato, costituito da 40 scintillatori al fluoruro di bario, è in grado di rivelare tutti i raggi gamma emessi nella reazione, discriminandoli dal rumore di fondo.

2.

Biografia

Nicola Colonna è ricercatore nella sezione Infn di Bari. Dal 2001 è il coordinatore per l'Infn dell'esperimento n_TOF.

Link sul web

www.cern.ch/n_TOF

[as] radici

Via Panisperna 89, Roma.

di Giovanni Battimelli,

professore di Storia della Fisica
all'Università di Roma La Sapienza

Nel settembre del 1931 si tiene a Roma un Congresso Internazionale di Fisica Nucleare, cui partecipano praticamente tutti i fisici che nel mondo sono coinvolti nelle ricerche su quella che è diventata la frontiera della fisica fondamentale. Si tratta del primo convegno specificamente dedicato al problema della fisica del nucleo atomico, e può a prima vista apparire strano che un evento simile si tenga a Roma anziché in una delle capitali storiche della ricerca in fisica atomica: Berlino, Parigi, Cambridge o Copenhagen. Ma a Roma le cose sono cambiate in modo radicale rispetto ai primi decenni del secolo, grazie all'arrivo nel 1927 di Enrico Fermi e alla formazione, intorno a lui, di un agguerrito gruppo di giovani riercatori. Ed è proprio sul terreno della nascente fisica del nucleo che questo gruppo dà i suoi primi contributi di rilievo.

Nel 1929 Franco Rasetti prova, grazie ad un raffinato esperimento di spettroscopia, che le proprietà dell'atomo di azoto sono incompatibili con il modello allora dominante, secondo cui il nucleo atomico è composto da una zuppa di protoni ed elettroni. All'epoca, il neutrone non è stato ancora scoperto, e d'altra parte l'emissione di elettroni dai nuclei degli elementi radioattivi nel cosiddetto decadimento beta sembra suggerire in modo naturale che gli elettroni debbano essere particelle costituenti dei nuclei stessi. I risultati di Rasetti mostrano però che qualcosa in questo modello non funziona, e sono uno dei principali argomenti di discussione al congresso di Roma. La chiave per la soluzione del problema arriva nel 1932 con la scoperta del neutrone, che porta alla formulazione del modello del nucleo composto da protoni e neutroni. L'anomalia messa in luce da Rasetti viene così risolta, ma si aprono nuove questioni. Come sono fatte le forze che tengono insieme protoni e neutroni nel nucleo? E da dove vengono gli elettroni emessi dai nuclei nel decadimento beta? Nel periodo immediatamente successivo, ancora i fisici di Roma danno le prime risposte a questi interrogativi. Tra il 1933 e il 1934 Ettore Majorana, stimolato anche dall'apprezzamento di un'autorità come Heisenberg, elabora e pubblica un fondamentale lavoro sulle forze nucleari, ed Enrico Fermi costruisce nello stesso periodo una teoria del decadimento beta che introduce un'idea radicalmente innovativa: nei processi nucleari le particelle possono essere create e distrutte, analogamente a quanto accade a un quanto di luce durante una transizione di un elettrone in un atomo tra due orbite stazionarie. La nozione stessa di "particella elementare" subisce un drastico mutamento di significato.

Nell'opinione di molti, a cominciare dallo stesso Fermi, la teoria del decadimento beta è il più significativo tra i tanti contributi alla fisica dati dal fisico romano. Tuttavia, la fama di Fermi presso il grande pubblico è legata piuttosto alle ricerche sperimentali da lui condotte nel 1934, prima da solo e poi in collaborazione con i più giovani colleghi dell'istituto di fisica romano, sui fenomeni di



a.



b.

radioattività artificiale indotti nei nuclei bombardati con neutroni. È il periodo, breve ma intenso, in cui si origina la saga dei "ragazzi di via Panisperna", e indiscutibilmente grazie a queste ricerche Roma diventa un punto di riferimento per la comunità internazionale dei fisici. La scoperta dell'efficacia dei neutroni lenti nell'attivazione dei nuclei, che avviene nell'ottobre del 1934, e di cui Fermi fornisce rapidamente l'interpretazione teorica, corona un felice periodo di ricerca e giustifica ampiamente il riconoscimento che a Fermi sarà dato nel 1938 con l'attribuzione del premio Nobel.

Da Fermi e Rasetti a Majorana e al gruppo dei "ragazzi" (Amaldi, Segrè, Pontecorvo, D'Agostino), la nascita della fisica nucleare è dunque largamente segnata dai contributi di una scuola formatasi e cresciuta in brevissimo tempo apparentemente dal nulla. In realtà, dietro questo successo c'è un sostegno istituzionale e una lungimirante politica della ricerca, ad opera della Facoltà di Scienze di Roma e in particolare dell'allora direttore dell'istituto di fisica (nonché senatore, ex ministro, accorto consulente dell'industria elettrica) Orso Mario Corbino. La storia di questi brevi anni della fisica romana è istruttiva anche perché mostra come i talenti individuali possano

esprimersi al meglio se opportunamente coltivati e messi in condizione di operare in un ambiente adeguato.

C'è però anche il lato oscuro della storia. Il 1934 segna il culmine della parabola ascendente del gruppo dei fisici romani. Nella seconda metà degli anni Trenta, le cose si muovono in fretta nel campo della fisica nucleare; non cambiano solo le idee, ma anche le tecniche utilizzate, la strumentazione disponibile, il sostegno finanziario necessario. Arrivano sulla scena i primi acceleratori, che mandano in cantina le vecchie e primitive sorgenti naturali di particelle energetiche. E allo stesso tempo, in Italia e a Roma cambiano, ma vanno in direzione opposta, l'attenzione e l'impegno istituzionale verso i settori della ricerca fondamentale. Fermi non riesce a realizzare un laboratorio nazionale per la fisica nucleare, il gruppo si disperde; le leggi razziali e l'involuzione generale della situazione italiana e del panorama internazionale faranno il resto. Quando alla fine del 1938 Fermi va a Stoccolma a ritirare il Nobel, sa che si tratta della prima tappa di un viaggio senza ritorno. Le menti brillanti da sole non bastano, senza il necessario supporto istituzionale. Per la fisica nucleare italiana, costruire in modo stabile questo supporto sarà il compito principale degli anni del dopoguerra.

a.
Da destra verso sinistra: Enrico Fermi, Giancarlo Wick e Edoardo Amaldi, con le rispettive famiglie a Ostia nel 1936.

b.
Da sinistra: Antonio Rostagni, Gleb Wataghin, Enrico Persico, Enrico Fermi, Matilde Rostagni. Gressoney, La Trinitè, dicembre 1932.

[as] tecnologia e ricerca

Eccellenza nucleare. Intervista a Roberto Adinolfi, AD di Ansaldo Nucleare.

di Vincenzo Napolano

L'Italia mantiene, ancora oggi, competenze e tecnologie estremamente avanzate, nel settore dell'energia nucleare e a dimostrarlo è anche l'attività di un'azienda come Ansaldo Nucleare. La società genovese negli ultimi due decenni ha costruito i suoi impianti esclusivamente all'estero e realizzerà e installerà nei prossimi anni, in Cina e negli Stati Uniti, alcuni tra i primi reattori al mondo della cosiddetta terza generazione avanzata. Abbiamo raggiunto Roberto Adinolfi, amministratore delegato di Ansaldo Nucleare, impegnato in un settore in cui ricerca scientifica e tecnologica e innovazione del prodotto industriale sono necessariamente legate.

[as] Cosa ha permesso ad Ansaldo Nucleare di non disperdere l'alto livello di competenze e tecnologie in ambito nucleare, raggiunto dal nostro Paese fino agli anni '80? È stato un lavoro, mai interrotto, di ricerca e innovazione. Ad esempio in passato abbiamo contribuito a sviluppare il modello degli impianti di terza generazione avanzata e siamo impegnati oggi nello sforzo di ricerca internazionale per la progettazione dei reattori della cosiddetta quarta generazione.

[as] Su questo terreno come è cresciuta la collaborazione con il mondo della ricerca, anche la cosiddetta ricerca di base?

Il nostro, come altri settori industriali, ha probabilmente una certa tendenza alla conservazione. Se una tecnologia funziona, è affidabile e ci garantisce la sicurezza degli impianti, è naturale che vi sia una resistenza ad immaginare qualcosa di completamente diverso. Gli scienziati invece ci stimolano e ci aiutano a prendere in considerazione soluzioni completamente innovative, che in prospettiva possono risultare molto più vantaggiose, e a non limitarci unicamente a perfezionare ciò che già sappiamo fare.

[as] Ansaldo Nucleare e Infn sono impegnati in ricerche comuni su più fronti, ma riguardano soprattutto gli aspetti della sicurezza degli impianti e dello smaltimento delle scorie. Una delle linee di ricerca è quella delle tecnologie di monitoraggio ambientale della radioattività, che consentono di rilevare e controllare a distanza eventuali perdite nei depositi di scorie nucleari o nei trasporti di materiali radioattivi; oppure la misurazione con estrema precisione della radioattività presente all'esterno dei reattori. Noi chiediamo al mondo della ricerca di immaginare e concepire tecnologie completamente nuove. Il nostro compito poi, prima di ingegnerizzarle, è quello di verificarne fino in fondo la fattibilità industriale. In questa dialettica tra ruoli assolutamente complementari credo stia,

quando funziona, la vera chiave dell'eccellenza.

[as] L'altra sfida che oggi chiama in causa le idee fondamentali della fisica nucleare è quella della trasmutazione delle scorie radioattive, ovvero la trasformazione delle scorie a vita media estremamente lunga (oltre centomila anni), in nuclei che decadano in tempi molto più brevi (possibilmente fino centinaia di anni). Naturalmente una tecnologia del genere, una volta consolidata, migliorerebbe lo smaltimento e il deposito delle scorie in modo decisivo. Le strade che oggi nel mondo si percorrono in questa direzione sono essenzialmente due: quella dei reattori a neutroni veloci (tipici della quarta generazione), che possono utilizzare come combustibile nucleare anche la parte più persistente delle scorie, trasformandola in residui molto meno radiotossici; oppure l'utilizzo degli Ads (*Accelerator Driven System*), acceleratori di protoni ad altissima intensità di fascio, dedicati esclusivamente alla trasformazione delle scorie e non alla produzione di energia. Su questa seconda possibilità sono in cantiere progetti di ricerca che vedono impegnati insieme alla nostra azienda due enti di ricerca importanti come l'Infn e l'Enea.

[as] Infine, ma certo non ultima per importanza, c'è la formazione dei giovani, per cui Infn, Ansaldo e Università di Genova hanno creato un Master in "Scienza e Tecnologia della produzione di energia nucleare"? L'Italia, proprio grazie a una mentalità di innovazione e ricerca aveva alla metà degli anni

'80 nel settore nucleare un'eccellenza scientifica e tecnologica straordinaria e mai valutata con la giusta attenzione. Grazie a questa eredità è stato possibile mantenere vivo negli ultimi venti anni una sorta di presidio di competenze e tecnologie. La qualità è rimasta molto alta, ma è invece diminuita costantemente la quantità delle persone con determinate professionalità. Per evitare di disperdere questo patrimonio prezioso oggi è indispensabile e più che mai urgente formare le nuove leve.

[as] Del resto, al di là delle scelte energetiche del nostro paese, l'opinione pubblica italiana sembra ancora manifestare verso le tecnologie nucleari un sospetto e una diffidenza maggiori che in altri Paesi occidentali? Il disastro di Chernobyl ha accresciuto in tutto il mondo, e in Italia in particolare, un pregiudizio negativo verso il nucleare, che affondava le sue radici anche nell'origine "militare" della tecnologia, che la rendeva sospetta al pubblico. In alcuni Paesi però – come gli Stati Uniti o la Francia – si è compreso che l'unico atteggiamento corretto, e vantaggioso, è la completa trasparenza nel comunicare alla popolazione, non solo gli aspetti tecnologici e scientifici, ma anche quelli di gestione e impatto territoriale degli impianti nucleari; tutto ciò, in sostanza, che incide sulla vita della società. Tra tante altre cose in Italia abbiamo sofferto, almeno in passato, anche di un atteggiamento non altrettanto attento, sia da parte della classe dirigente, che dei tecnici e degli scienziati di questo settore.

- a.
Attività di *decommissioning* presso EUREX Saluggia (Vercelli – Italia).
- b.
La centrale nucleare di Cernavoda è stata costruita da una joint venture che include Ansaldo Nucleare, che lavora in Romania da oltre 30 anni.



[as] benvenuti a bordo

Intervista a Elena Guardincerri ricercatrice ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn.

di Antonella Varaschin



[as] Fisica per caso o per passione?

A dire il vero avevo la passione per la bicicletta! Praticavo ciclismo a livello agonistico così, al momento di decidere la facoltà universitaria, ho scelto quella più compatibile con gli orari dei miei allenamenti: fisica, anziché veterinaria. Quindi fisica un po' per caso, ma ora lo faccio con passione.

[as] Come hai cominciato?

Ho studiato a Genova, dove però non ho potuto specializzarmi in astrofisica, il settore che mi interessava. Mi sono trovata a lavorare un po' per caso a una tesi che consisteva nello sviluppo di una *simulazione Montecarlo* per un esperimento di fisica planetaria. Quando si è presentata l'occasione ho cambiato ambito: all'inizio avevo accettato una proposta per collaborare a *Borexino* e sono partita per il Gran Sasso. Ma non ho avuto fortuna: di lì a poco, ancor prima che io iniziassi a lavorare, è occorso un incidente all'impianto dell'esperimento che è rimasto sospeso per alcuni mesi. Ho avuto però una seconda occasione, sempre al Gran Sasso, questa volta a *Cuore* e per tutto il tempo del dottorato mi sono occupata del sistema di acquisizione dati dell'esperimento.

[as] E poi c'è stata Berkeley...

L'ho proprio cercata l'esperienza all'estero perché credo tuttora che ne valga la pena. Una caratteristica tutta italiana è quella di rimanere nel luogo dove si è nati e cresciuti come ricercatori, anche perché si è spesso favoriti rispetto a chi è partito e cerca di rientrare. Dalle altre parti è diverso: una collega spagnola mi raccontava che nel suo Paese un'esperienza all'estero è quasi un requisito indispensabile per avere un contratto a tempo indeterminato. Però far ricerca all'estero mi andava bene come esperienza temporanea, non volevo lasciare definitivamente l'Italia, dove ho i miei affetti. Così, quando ho avuto la possibilità, anche se volendo sarei potuta rimanere lì, ho deciso di rientrare con un assegno di ricerca.

[as] Com'è lavorare negli Stati Uniti?

Appena arrivata mi sono ritrovata immersa in due settimane di festeggiamenti perché Gorge

Smoot aveva vinto il Nobel, c'era un'atmosfera entusiasmante!

Quando io ho lavorato a Berkeley era un buon periodo: c'erano fondi e quindi più opportunità di quante ce ne fossero in Italia. Anche per viaggiare: certe volte non avevo nemmeno il tempo di riprendermi dal jet-leg e di smaltire la posta accumulata che dovevo ripartire. A Berkeley c'era la possibilità di portare avanti nuovi progetti e ho trovato gente da tutto il mondo, selezionata accuratamente, gente in gamba. Ora so che quanto a finanziamenti le cose sono un po' cambiate. Ma l'impressione che ne avevo avuto allora confermava l'idea che mi ero fatta dell'America: un po' come nei film, hai un sogno e lo puoi realizzare.

[as] Com'era la tua vita a Berkeley?

Non ho fatto fatica a trovarmi nuovi amici e il posto era bellissimo, un parco naturale. Ho deciso di non restare nella residenza universitaria e ho affittato un appartamento per conto mio. Mi mancava il mare di Genova, però. Lì c'è l'oceano, freddo e con gli squali, e io pratico canottaggio, quindi non era proprio l'ideale per me! Un'estate con un gruppo di amici ci siamo organizzati e siamo andati in barca a remi da Chiavari alla Corsica, è stata un'esperienza unica, la vacanza più bella della mia vita! Certe cose mi mancavano. Cercavo di rimediare all'assenza del mare andando in piscina. Ne avevo una vicino casa che apriva la mattina molto presto, così certi giorni alle sei e mezzo ero già in acqua, giusto il tempo di una nuotata prima dell'ufficio.

[as] Di che cosa ti stai occupando ora che sei rientrata in Italia?

Ho vinto un assegno post-doc all'Università di Genova ma lavoro ai laboratori del Gran Sasso agli esperimenti *Cuore*, che è ancora in costruzione, e *Borexino*, che è in presa dati al 2007. Così mi sono trasferita ad Assergi (sede dei Lngs, ndr) perché si lavora meglio stando sul posto.

[as] Pensi di ripartire?

No, io sono tornata in Italia con l'intenzione di rimanerci.



[as] incontri

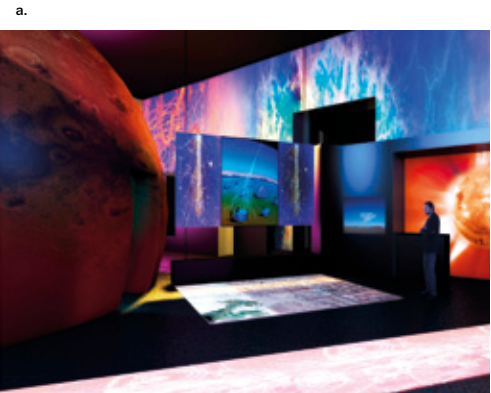
L'Universo: a te scoprirlo!

di Catia Peduto

A quattro secoli dalle prime osservazioni astronomiche con il cannocchiale fatte da Galileo Galilei, il 2009 è stato proclamato dall'Onu l'Anno *Internazionale dell'Astronomia*. Un anno di eventi dedicati all'Universo, che hanno luogo in circa 130 Paesi di tutto il mondo. Dal Piemonte alla Sicilia, le iniziative previste per l'Anno dell'Astronomia coinvolgono tutte le regioni d'Italia, unite dall'eloquente slogan di IYA2009: "L'Universo, a te scoprirlo!". Il calendario degli eventi (disponibile sul sito www.astronomy2009.it) prevede una ricca serie di mostre, proiezioni, corsi di astronomia di base, tavole rotonde, visite guidate agli osservatori della Penisola, concerti e corsi di formazione per docenti. Dopo la grande mostra di Padova dal titolo *Il Futuro di Galileo - Scienza e tecnica dal Seicento al Terzo Millennio* (allestita nel Nuovo Centro Culturale di San Gaetano dal 28 febbraio al 14 giugno) e l'esposizione di Firenze, *Galileo. Immagini dell'Universo*

dall'antichità al telescopio (in Palazzo Strozzi dal 13 marzo al 30 agosto), anche a Roma, nella seconda metà dell'anno, si celebra l'astronomia con la mostra *Astri e particelle. Le Parole dell'Universo* (a Palazzo delle Esposizioni dal 27 ottobre al 14 febbraio 2010), a cura dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn), dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf) e dell'Agenzia Spaziale Italiana (Asi). Nel percorso espositivo si cerca di dare una risposta alle grandi domande che da sempre muovono lo studio dell'Universo e le principali imprese scientifiche del nostro tempo. Partendo dalle tracce e dai segnali che ininterrottamente ci raggiungono da luoghi remoti nello spazio e nel tempo, la mostra racconta i grandi esperimenti, i telescopi e i rivelatori, costruiti negli ambienti più estremi del pianeta, per decifrare e interpretare le parole dell'Universo. I visitatori vengono condotti attraverso

una scenografia immersiva e coinvolgente nelle profondità del mare o nelle viscere della montagna, fino alle immense distese desertiche disseminate di enormi telescopi. E più in là, nello Spazio, dove sofisticati osservatori orbitano intorno alla Terra. Si tratta di strumenti che ascoltano il Cosmo alla ricerca di onde e particelle che, anche se impercettibili, ci portano tracce di eventi remoti e catastrofici. Sono gli esperimenti legati alla luce, alla gravità e alle particelle elementari a guidare i visitatori nel percorso espositivo, alla conoscenza delle scoperte, delle tecnologie innovative e dei protagonisti stessi dell'avventura scientifica: gli scienziati, organizzati in grandi collaborazioni internazionali, in cui spesso l'Italia occupa un posto di assoluto rilievo. In futuro è previsto che la mostra *Astri e Particelle* diventi il contenuto espositivo del museo inaugurato recentemente dall'Infn a Teramo, il *Galileium* (vd. *Asimmetrie* n. 6, p. 48).



a.
Rappresentazione grafica dell'esposizione *Astri e Particelle. Le Parole dell'Universo* (a Roma in Palazzo delle Esposizioni dal 27 ottobre al 14 febbraio).

[as] con altri occhi

Fisica ed entertainment: un matrimonio possibile.

di Patrizio Roversi,

conduttore televisivo

Grazie alla *Fisica in barca*, un’iniziativa di divulgazione dell’Infn che si è svolta quest’anno per la quarta volta, ho avuto modo di conoscere i fisici “in diretta” e in azione. E dopo questa esperienza è cambiato il mio rapporto con quegli strumenti semplici o complessi che ognuno di noi usa quotidianamente e di cui in linea di massima si guarda bene dal chiedersi i motivi del funzionamento. Io sono una di quelle persone tendenzialmente molto timide e pigre, che se usa un gps, un computer, un telefono satellitare, piuttosto che una barca a vela, non si chiede perché funzionano, ma prende atto che funzionano ed è contento. Invece, in realtà, questo tipo di conoscenza, anche minimale, ti porta a vedere i fenomeni quotidiani con altri occhi. Vedere dei fisici in barca che spiegano ai ragazzi, e quindi anche a me, come è avvenuto con *Fisica in barca* su Adriatica in giro per i porti d’Italia, le motivazioni di tanti movimenti fatti un sacco di volte in automatico quando si naviga in barca a vela, diventa un momento molto importante. Ritengo che il cittadino di oggi debba adottare dei comportamenti avendone la consapevolezza, avendo un minimo di coscienza scientifica, una cosa che magari trent’anni fa non serviva. Io ringrazio di aver avuto un professore alle medie, Giuliano Parenti, ormai 42 anni fa, che mi spiegava come funzionava il linguaggio delle immagini e quello pubblicitario. Mi ha iniziato così alla “comunicazione” e ne ho fatto il mio mestiere. Adesso c’è bisogno di molto di più. Credo che l’uomo della strada abbia bisogno di una continua educazione alla scienza per decidere e un’altrettanta educazione alla tecnologia per usarla. Ad esempio, nella situazione di crisi energetica e climatica in cui si trova la nostra Terra oggi, noi comuni cittadini siamo tenuti a prendere delle decisioni e a dover modificare i nostri comportamenti.

Scienza e tecnologia sono quindi, secondo me, tematiche che a scuola dovrebbero stare in prima fila. Per questo motivo è importantissimo che il ricercatore esca dal laboratorio, sia disposto a raccontarsi, per dare al pubblico gli strumenti critici per sostenere la ricerca stessa, soprattutto quella di base. L’Infn, con *Fisica in barca*, ma non solo, lo ha capito e questo mi fa piacere. Lo scorso anno ho anche partecipato a due *café scientifici* a Viterbo e a Roma, insieme al vicepresidente entrante e quello uscente dell’Infn, e mi è piaciuto moltissimo come loro sono riusciti a spiegare la fisica, anche molto complessa come quella legata a Lhc, ad un pubblico indifferenziato che era semplicemente curioso. Spiegazioni comprensibili e affascinanti. Purtroppo non tutti gli scienziati ne sono capaci e si rende necessaria una terminologia “di divulgazione” della fisica comprensibile a tutti. Bisognerebbe che gli scienziati rallentassero e le persone comuni come me accelerassero un po’. Un veicolo possibile per avvicinarsi al grande pubblico, che ho sperimentato personalmente, è la “divulgazione-entertainment”. Un esperimento che ho voluto tentare con Syusy Bladi in *Evoluti per Caso* (la trasmissione andata in onda su Rai Tre nel 2007). Il nostro ruolo era quello del “sindacalista”, quello che fa gli interessi del pubblico che vuole capire, ponendo allo specialista domande che non vogliono mai perdere il contatto con il linguaggio comune, che trascinano sempre lo scienziato a spogliarsi, a uscire, a rischiare spiegazioni anche non perfette ma in qualche modo comprensibili. In *Evoluti per Caso* abbiamo raccontato gli scienziati mentre facevano una ricerca sul campo e abbiamo capito che la comunicazione della scienza attraverso l’entertainment è possibile attraverso un lavoro di gruppo. Scienza ed entertainment è un matrimonio possibile. Ce la si fa se si è in due, come in tutti i matrimoni.

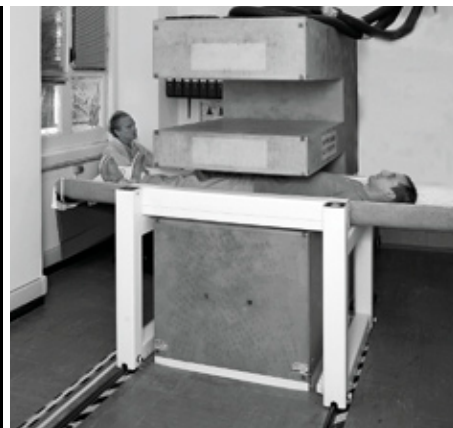
a. Patrizio Roversi che con il veliero *Adriatica dei Velisti per caso* da quattro anni ha permesso la crociera scientifica *Fisica in barca* (<http://web.infn.it/fisicainbarca>), promossa dall’Infn per divulgare la fisica a bordo e in porto.



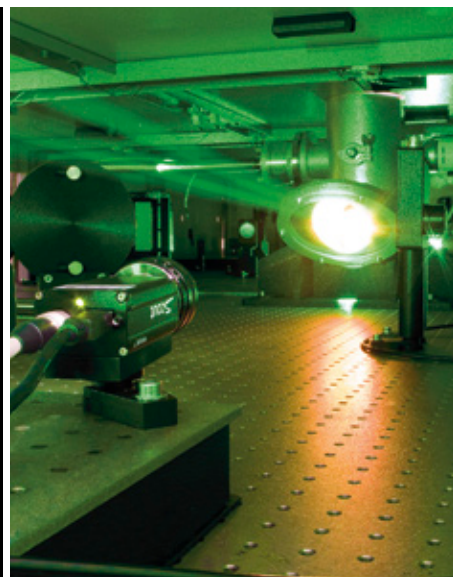
Un tipo da copertina_Fiumi di dati stanno arrivando dal satellite della Nasa Fermi. Lanciato in orbita poco più di un anno fa, sta già cambiando la nostra visione del “cielo gamma”, cioè del cosmo visto nella banda più energetica dello spettro elettromagnetico. La rivista scientifica internazionale *Science* ha dedicato a Fermi la copertina del numero del 14 agosto scorso. Al suo interno comparivano ben tre articoli a firma della collaborazione internazionale che lavora all'esperimento, a cui l'Italia partecipa con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn), l'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf) e l'Agenzia Spaziale Italiana (Asi). Quello che stupisce i ricercatori è soprattutto la rapidità con cui si stanno acquisendo questi risultati. Ciò è possibile grazie alla precisione del *Large Area Telescope* (Lat), uno dei due rivelatori collocati a bordo del satellite, il cui cuore è stato progettato e realizzato in Italia, nei laboratori dell'Infn. Il Lat serve allo studio dei fotoni gamma di altissima energia, mentre il secondo strumento collocato a bordo del satellite, il *Glast Burst Monitor* (Gbm), indaga quelli di energia più bassa. Fermi sta studiando, fra le molte sorgenti di radiazione gamma di alta energia, dozzine di pulsar, addirittura 16 delle quali sono una sua recente scoperta. Ed è solo l'inizio. [A.V.]



Un metal detector per il fegato_È stata firmata la convenzione, tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn), l'Ospedale Galliera di Genova e l'Associazione Ligure Talassemici Onlus che porterà alla costruzione di un nuovo strumento per la diagnosi non invasiva del sovraccarico di ferro nel fegato. Si chiamerà Mid 2 (*Magnetic Iron Detector*) e sarà l'evoluzione del prototipo già in uso al Galliera dal 2005, grazie al quale sono stati eseguiti in questi anni 1.100 esami su 650 pazienti. Mid si basa sul comportamento in un campo magnetico degli atomi di ferro presenti nel fegato del paziente che, come microscopici aghi magnetici, tendono a orientarsi lungo il campo applicato, modificandone l'intensità. Il dispositivo, che viene chiamato “biosuscettometro”, muove il paziente in prossimità di un magnete, mentre un rivelatore misura le variazioni del campo indotte dalla presenza del ferro nel corpo. L'eventuale sovraccarico di ferro si calcola in base alla differenza fra il segnale effettivamente prodotto dal corpo del paziente sotto esame, e quello che si suppone dovrebbe essere prodotto dallo stesso paziente nel caso avesse un contenuto di ferro normale (segnale basale). Mid consente di evitare l'intervento di biopsia e di eseguire analisi rapide e ripetibili, monitorando così periodicamente l'effetto delle terapie. Il prototipo Mid è stato progettato e realizzato nei laboratori della sezione dell'Infn di Genova. [A.V.]



Un super-laser a Frascati_Emette impulsi di luce la cui potenza supera di quasi 100 volte quella elettrica complessivamente installata in tutto il mondo, anche se la sua potenza media è come quella di una lampadina da 60 watt. Si chiama Flame (*Frascati Laser for Acceleration and Multidisciplinary Experiments*) ed è il più potente laser al mondo della sua categoria, pronto per essere acceso nei prossimi mesi nei Laboratori Nazionali di Frascati. Concepito per sviluppare il progetto strategico dell'Infn PlasmonX (*PLASma acceleration and MONochromatic X-ray production*) e realizzato presso la ditta Amplitude Technologies (Evry, Francia), Flame permetterà all'Italia di porsi all'avanguardia in questo settore della ricerca. Il “trucco” per ottenere così straordinarie potenze sta nel liberare una piccola quantità di energia (appena sufficiente ad innalzare di circa un grado la temperatura di 1cm³ d'acqua) in un tempo straordinariamente piccolo (pochi milionesimi di miliardesimi di secondo). Il sistema laser, con i suoi 300 terawatt (ovvero 300.000 miliardi di watt), renderà possibile l'avvio della sperimentazione sulle due tematiche fondanti del progetto PlasmonX: l'accelerazione mediante gas altamente ionizzato (plasma), che dovrebbe consentire di ridurre drasticamente le dimensioni degli attuali acceleratori di particelle, e lo sviluppo di sorgenti di raggi X e gamma, monocromatiche e a frequenza variabile, di straordinario interesse per le numerose applicazioni del progetto, fra le quali molte in campo medico (in particolare, per la diagnosi e la terapia dei tumori). Il progetto si avvale di una fruttuosa collaborazione fra diversi enti (Infn, Cnr, Enea e varie università) e coinvolge gruppi di ricerca operanti su tutto il territorio nazionale. [Danilo Giulietti]



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

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

Per contattare i laboratori dell'Infn:

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

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

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

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

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



www.infn.it

[rivista on line](#)
www.asimmetrie.it