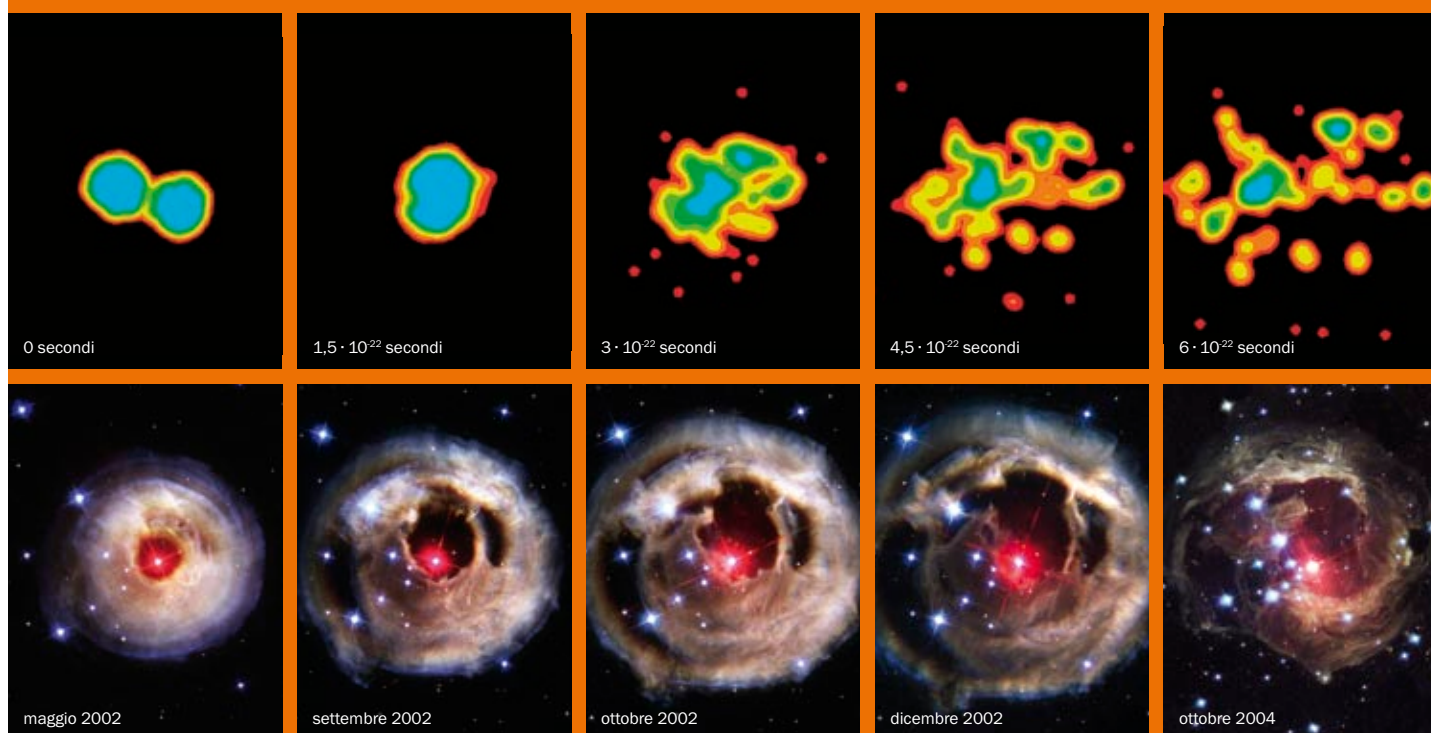


All'estremo

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

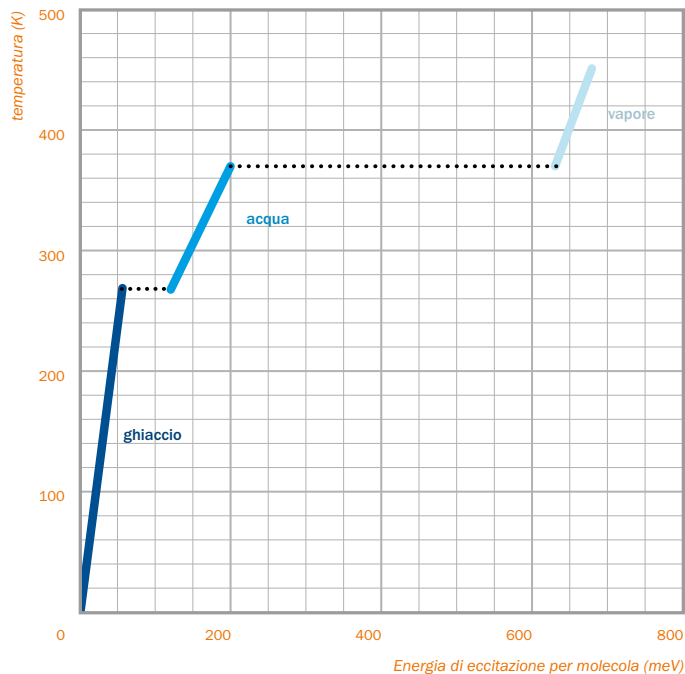
l'elevatissima intensità delle forze coinvolte, un liquido di questo tipo non può diventare solido. Reazioni nucleari poco violente ci hanno permesso di studiare le piccole oscillazioni della materia nucleare, sollecitate dal contatto fra i due nuclei collidenti. Abbiamo imparato che i nuclei vibrano 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'analogia 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.

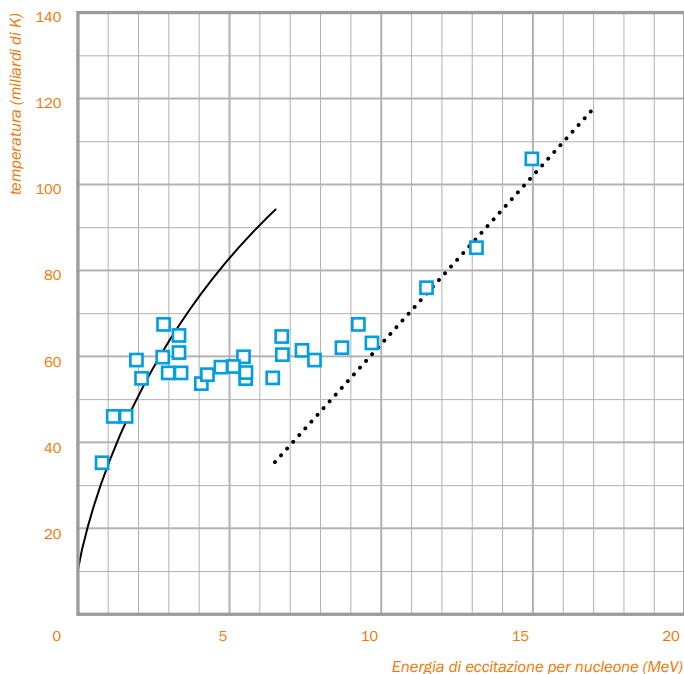


b.

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 alternarsi 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

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 4π , cioè che coprono l'intero volume attorno al punto di collisione.

Un rivelatore a 4π 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.