



Stelle di quark

L'esplosione di una supernova è uno degli eventi più spettacolari e violenti dell'universo. La supernova rappresenta la "morte" di alcune stelle (quelle che hanno una massa iniziale compresa tra circa 8 e 25 volte la massa del sole) e, allo stesso tempo, segna la "nascita" di uno degli oggetti estremi della natura: la stella di neutroni. In questo oggetto stellare una quantità di materia pari a circa 1,5 volte la massa del sole (circa 2×10^{33} g) è compressa dalla gravità entro una sfera dal raggio di 10 km circa: un semplice calcolo ci permette di stimare che la densità media di queste stelle collassate è di circa 7×10^{14} g/cm³.

Una densità così grande è paragonabile a quella che si ha al centro dei nuclei atomici pesanti ($2,8 \times 10^{14}$ g/cm³). Una stella di neutroni, in un certo senso, può essere considerata come un nucleo atomico gigantesco. Nel nucleo di un atomo il numero di massa A (ovvero il numero complessivo di protoni e neutroni, detti collettivamente nucleoni) varia da A=1 per l'idrogeno, ad A=238 per il più pesante isotopo stabile dell'uranio. Per una stella di neutroni A vale circa 10^{57} .

In realtà, una stella di neutroni non è una sfera omogenea costituita soltanto da neutroni, ma possiede una struttura interna a gusci assai complessa e non completamente nota, determinata essenzialmente dall'interazione tra i suoi costituenti. In passato si riteneva che questi oggetti cosmici fossero composti principalmente da neutroni più una piccola quantità di protoni (che si formano in seguito al decadimento beta dei neutroni) e da un certo numero di elettroni e muoni (necessari per bilanciare la carica elettrica positiva dei protoni). Questa sarebbe in effetti la composizione se la densità centrale della stella non fosse così elevata da rendere possibile ed energeticamente conveniente sostituire in tutto o in parte i neutroni e i protoni con altre particelle.

La comparsa di nuove particelle nella regione più interna della stella è una diretta conseguenza della natura fermionica dei nucleoni, che ubbidiscono al principio di esclusione di Pauli. In base a tale principio, in un sistema di fermioni tutti dello stesso tipo non possono esistere due particelle che si trovino nello stesso stato. In maniera grossolana, possiamo dire che fermioni dello stesso tipo "si evitano" e quindi sono costretti ad occupare livelli energetici via via più alti, non occupati da altre particelle della loro stessa specie. L'energia del livello più alto per

ciascuna specie fermionica cresce al crescere della densità. Pertanto, ad una certa densità, nella regione centrale della stella di neutroni, può diventare energeticamente conveniente cominciare a sostituire neutroni e protoni con nuove particelle di tipo diverso, anche se di massa più elevata. È allora possibile che nella regione centrale di una stella di neutroni si formi un nocciolo che contenga in aggiunta ai nucleoni anche i cosiddetti iperoni. Questi ultimi, essendo delle particelle di tipo diverso dai neutroni e

Ignazio Bombaci
Università e Sezione
INFN di Pisa
e
Alessandro Drago
Università e Sezione
INFN di Ferrara

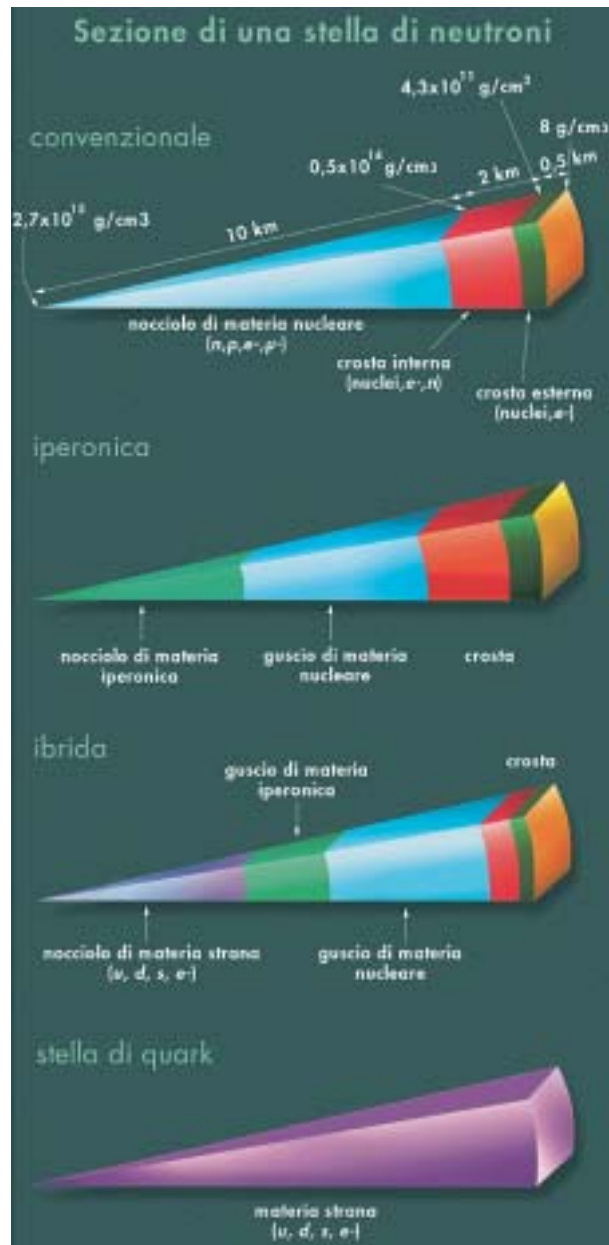


Fig. 1
Sezione di vari tipi di
stelle di neutroni; nella
prima figura sono
indicate, a titolo
esemplificativo, le densità
dei vari strati

dai protoni, possono occupare livelli energetici più bassi senza violare il principio di Pauli. Una stella di neutroni con un nocciolo contenente iperoni viene di solito chiamata *stella iperonica* (Fig. 1).

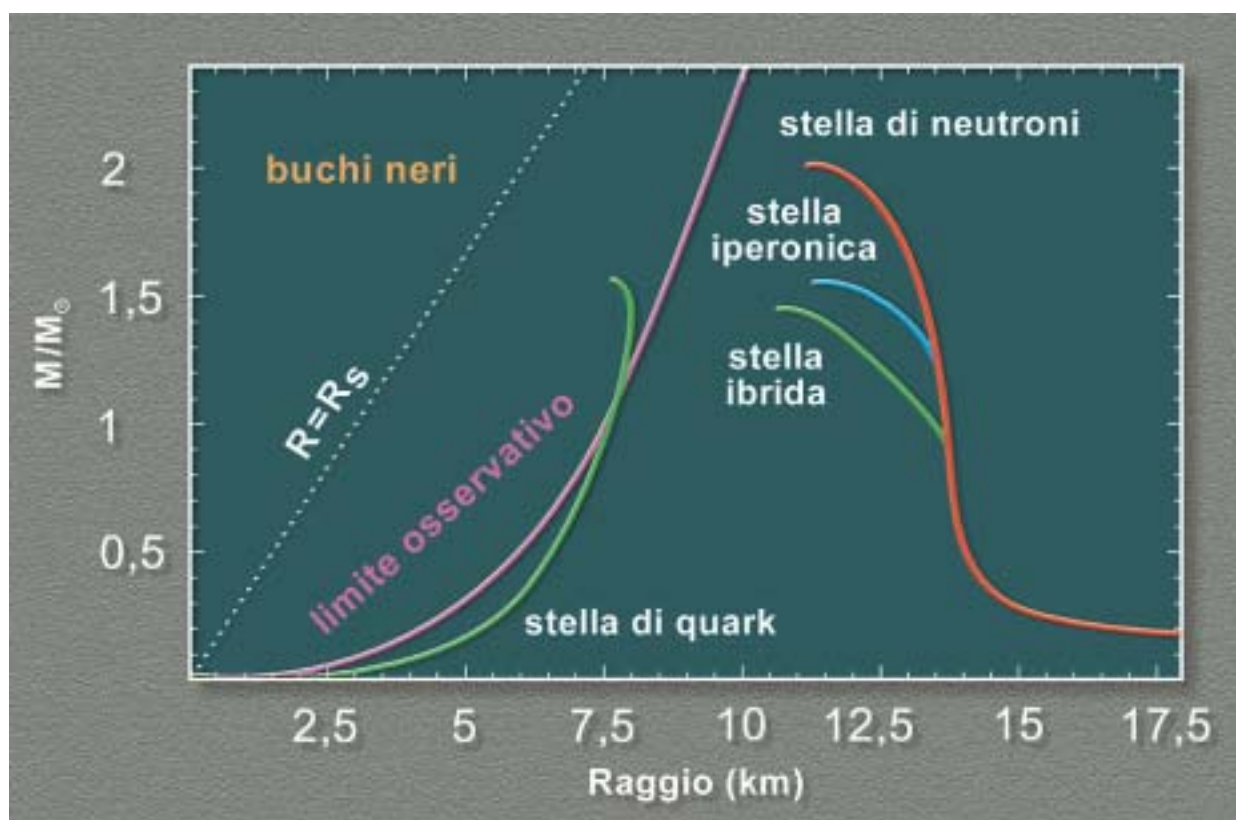
Da parecchi anni si è affacciata una nuova possibilità, e cioè che nel centro di alcune stelle di neutroni possa esistere un nocciolo costituito da materia di quark. I quark sono i costituenti degli adroni (dal greco *hadros*, forte), cioè di tutte quelle particelle che come i neutroni, i protoni e gli iperoni sono soggette all'interazione forte. Secondo la teoria che descrive l'interazione forte, i quark sono confinati all'interno degli adroni e non possono essere osservati singolarmente. Il confinamento si spiega con il fatto che la forza che lega i quark aumenta al crescere della distanza che li separa. Si ritiene tuttavia che in condizioni estreme di densità o di temperatura i quark possano essere liberati: l'alta densità comporta infatti una piccola distanza tra i quark e quindi un indebolimento delle forze di legame. Un modo intuitivo anche se molto schematico di rappresentare questo *deconfinamento* ad alte densità

consiste nell'immaginare gli adroni come bolle all'interno delle quali si trovano i quark: quando, a densità sufficientemente elevate, le bolle sono così vicine da rendere molto alta la pressione fra le medesime, si possono rompere liberando i quark.

Quindi una stella di neutroni potrebbe possedere nel suo centro un nocciolo costituito da un "brodo" di quark *deconfinati*, cioè non costretti a muoversi entro i rispettivi adroni, come avviene in condizioni normali. Questo nuovo stato della materia viene chiamato *materia di quark* e le stelle collassate costituite in questo modo vengono chiamate *stelle di neutroni ibride*, poiché costituite in parte da adroni e in parte da quark deconfinati.

Una possibilità più estrema porta a prevedere l'esistenza di un nuovo tipo di stelle compatte costituite quasi integralmente da una miscela di quark up (u), down (d) e strange (s), ovvero da quella che è chiamata (per la presenza del quark s) *materia strana*. Tale possibilità è una delle conseguenze di una ipotesi formulata nel 1971 da Arnold R. Bodmer e riproposta da Eduard Witten nel 1984. Se-

Fig. 2
Diagramma massa/raggio per vari tipi di oggetti stellari compatti; la massa è misurata in unità di masse solari, R_s indica il raggio di Schwarzschild caratteristico dei buchi neri. Il limite osservativo indicato è dedotto dall'osservazione di SAX J1808.4-3658



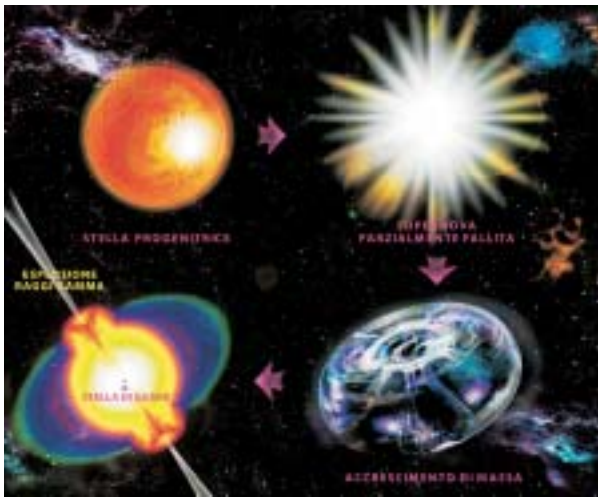


Fig. 3 - 4
Rappresentazione artistica dell'evoluzione di una stella a stella di quark con emissione di raggi gamma (GRB) (disegni di Luca Cesaro)

condo l'ipotesi di Bodmer-Witten la materia strana sarebbe lo stato di minima energia della materia, cioè avrebbe un'energia per adrone minore di quella del nucleo del ferro-56, che è il nucleo atomico più legato esistente in natura.

A prima vista l'ipotesi di Bodmer-Witten potrebbe apparire del tutto priva di senso e in contraddizione con l'esperienza quotidiana. Infatti, se essa fosse vera, i nuclei atomici potrebbero decadere spontaneamente formando una goccia di materia strana. Tuttavia, tale processo di decadimento, pur se possibile da un punto di vista energetico, è estremamente improbabile, dato che i neutroni e i protoni, che costituiscono i nuclei atomici, sono fatti soltanto di quark di tipo u e d. Per trasformare il nucleo in una goccia di materia strana, bisognerebbe trasformare alcuni dei quark u e d in quark s, e tali processi sono possibili mediante la cosiddetta interazione debole che, come dice il nome, agisce in modo assai meno intenso di quella forte, per cui il tempo necessario per trasformare simultaneamente un certo numero di quark u e d in quark s all'interno del nucleo risulterebbe enormemente più grande dell'età dell'universo. Di conseguenza, anche se l'ipotesi di Bodmer-Witten fosse vera, il ferro e tutti gli altri nuclei atomici sarebbero di fatto stabili, con una vita media enormemente lunga.

Attualmente non ci sono esperimenti che permettano di escludere la validità dell'ipotesi di Bodmer-Witten e quindi la possibilità che esistano le cosiddette *stelle di quark* (o *stelle strane*). A differenza delle stelle ibride, in cui i quark nella fase deconfinata sono presenti solo al centro della stella, le stelle di quark sono costituite interamente da materia strana¹, e per questo sono oggetti estremamente compatti. Come si vede dalla Fig. 2, le stelle di quark di massa "piccola" possono avere raggi inferiori a 7-8 km, e ciò non è possibile per gli altri tipi di stelle compatte. L'origine di questa differenza è dovuta al diverso tipo di interazione che si ha fra i costituenti stellari. Infatti le stelle di quark (di "piccola" massa) sono tenute insieme dalle "forze di coesione" fra i quark, e le varie parti della stella continuerebbero a formare un unico corpo, anche in assenza dell'attrazione gravitazionale. Le stelle di neutroni tradizionali, iperioniche e quelle ibride sono in-

vece dei sistemi legati dalla forza gravitazionale.

Esistono chiare evidenze osservative che permettano di escludere o di confermare l'esistenza delle stelle di quark? Al momento purtroppo no. Nel caso della stella compatta nella sorgente di impulsi di raggi X denominata SAX J1808.4-3658 la relazione massa-raggio ottenuta dai dati osservativi² risulta marginalmente in disaccordo con quella permessa per le stelle di neutroni tradizionali, iperioniche e ibride. SAX J1808.4-3658 potrebbe essere quindi una stella di quark!

Una conferma quasi inequivocabile dell'esistenza delle stelle di quark sarebbe rappresentata dalla scoperta di una pulsar ruotante con un periodo inferiore a circa 0,5 millesimi di secondo. Infatti, tutti i modelli prevedono che una stella di neutroni non possa mai raggiungere periodi di rotazione così bassi, poiché sarebbe distrutta dalle intense forze centrifughe. Periodi di rotazione così brevi sono invece possibili per le stelle di quark. Purtroppo, anche in questo caso i dati osservativi non sono ancora decisivi. La pulsar più "veloce" finora scoperta, PSR1937+21, ha un periodo di rotazione di 1,56 millesimi di secondo, compatibile con entrambi i tipi di stelle collassate.

L'idea che possano esistere stelle di quark o stelle di neutroni ibride, potrà però anche essere rafforzata o esclusa da esperimenti di collisione ad altissima energia tra nuclei atomici pesanti. In realtà, il deconfinamento dei quark è stato forse già osservato negli esperimenti al CERN di Ginevra³. In altri esperimenti, come quelli in corso al Relativistic Heavy Ion Collider presso i Laboratori Nazionali di Brookhaven negli Stati Uniti, o quelli in programma al Large Hadron Collider al CERN, si spera di poter studiare in modo quantitativo la transizione di deconfinamento. Negli ultimissimi anni, inoltre, è stata avanzata da molti autori l'ipotesi che le colossali esplosioni che prendono il nome di Gamma Ray Burst possano essere legate alla trasformazione di una stella di neutroni in una stella ibrida o in una stella di quark⁴ (Fig. 3). Lo studio di questi violentissimi processi astrofisici potrebbe allora gettare nuova luce sulla struttura della materia in condizioni estreme.

¹ In alcuni casi la parte più superficiale della stella può essere costituita da una fase mista di materia adronica e materia di quark, oppure può esistere una sottilissima crosta fatta di materia "normale", ma questo non è essenziale per il resto della nostra discussione.

² D. LI et al., *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) pg. 3776.

³ L. RICCATTI et al., *INFN-Notizie* 3 (maggio 2000) pg. 2; B. GHIDINI, *INFN-Notizie* 3 (maggio 2000) pg. 3.

⁴ Z. BEREZHIANI et al., astro-ph/0209257 in stampa su *Astrophysical Journal*. Questo meccanismo potrebbe spiegare i casi in cui un Gamma Ray Burst è preceduto da una esplosione di supernova.