# Stelle di neutroni

## Introduzione

Le stelle di neutroni sono tra gli oggetti più affascinanti dell'universo. Appartengono alla famiglia delle stelle collassate, che includono nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri. Tutti e tre i membri di questa famiglia sono il risultato finale del collasso gravitazionale di una stella e l’energia irradiata non è prodotta dalla reazione di fusione nucleare come avviene nelle altre stelle.

Come per le nane bianche è la pressione degli elettroni degeneri a equilibrare il collasso gravitazionale, le stelle di neutroni sono invece sostenute dalla pressione dei neutroni degeneri, mentre i buchi neri non sono sostenuti affatto in quanto stelle completamente collassate (per la materia degenere, ossia a densità elevatissime, vedere oltre).

Le stelle di neutroni rappresentano l'ambiente più estremo dell'universo, in termini di densità, campi magnetici e potenziale gravitazionale, senza entrare nelle regioni sconosciute che si trovano al di là dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, da cui nessuna informazione può uscire.

Le stelle di neutroni rappresentano una sorta di laboratorio naturale per testare la nostra attuale comprensione di come la materia si comporta in presenza di campi gravitazionali e magnetici estremi, e la descrizione della fisica di questi oggetti coinvolge tutte e quattro le forze fondamentali della natura.

Infatti, anche se è la gravità a causare la nascita di queste stelle collassate, le forze nucleari ed elettromagnetiche svolgono un ruolo importante nel loro equilibrio e stabilità. In particolare, la descrizione della composizione della materia all'interno delle stelle di neutroni richiede la comprensione dei processi fondamentali che avvengono a densità estremamente elevate, dove le forze nucleari forti e deboli sono dominanti.

La presenza di campi magnetici estremamente elevati produce un'intensa radiazione elettromagnetica, l'esistenza di un'enorme magnetosfera e l'accelerazione di particelle a energie relativistiche.

Questi oggetti astronomici sono anche un ambiente in cui gli effetti relativistici e quantistici devono essere necessariamente presi in considerazione, a causa del campo gravitazionale estremamente elevato e dell'alta densità della materia, che fa sì che gli effetti quantistici siano dominanti rispetto a quelli classici.

## Perché “stelle di neutroni”

Il nome "stella di neutroni" deriva dall'abbondante presenza di neutroni nella materia che costituisce le regioni interne di tali stelle. L'abbondanza di neutroni proviene dal decadimento beta inverso, che è il processo inverso del decadimento naturale del neutrone, e che avviene in ambienti ad altissima densità, come appunto all'interno di una stella collassata.

La composizione della materia nelle stelle compatte, in generale, comprende elettroni, nuclei e neutroni liberi. In una nana bianca, il principale contributo alla pressione deriva dal gas degli elettroni degeneri, che è la diretta conseguenza del principio di esclusione Pauli per i fermioni. Le nane bianche sono oggetti molto densi, ma la densità nelle stelle di neutroni può essere milioni di volte superiore.

Con l'aumentare della densità, il decadimento beta inverso tende ad aumentare il contenuto di neutroni nei nuclei atomici, che ad un certo punto diventano in grado di esistere in uno stato non legato (quando superano la cosiddetta neutron drip line).

Quando la densità aumenta ulteriormente, la pressione del gas degenere dei neutroni liberi diventa il contributo dominante alla pressione. A queste densità estreme, paragonabili alla densità nucleare, possono avvenire processi ancora più esotici, come la condensazione dei pioni o l'esistenza di materia composta da soli quark, ma queste previsioni teoriche non sono state pienamente confermate.

## Relatività generale

Le stelle di neutroni hanno un raggio stimato tra i 10 e i 100 km, che non è lontano dal raggio di Schwarzschild per l'orizzonte degli eventi di un buco nero di poche masse solari. Questo rende gli effetti relativistici più importanti rispetto al caso, ad esempio, delle nane bianche, il cui raggio può essere paragonabile a quello di un pianeta.

Ciò significa che il potenziale gravitazionale vicino a una stella di neutroni deve essere descritto dalle equazioni di campo di Einstein, la cui soluzione in un caso sfericamente simmetrico è detta metrica di Schwarzschild.

L'equilibrio idrostatico all'interno della stella è descritto dal sistema di equazioni Oppenheimer-Volkoff, che fornisce il profilo di pressione radiale e il potenziale gravitazionale, data una particolare equazione di stato.

Questo sistema di equazioni sostituisce l'equazione di Lane-Emden, che viene utilizzata per determinare l'equilibrio stellare nel limite newtoniano. La relatività generale influisce anche sulla luminosità della stella a causa del red-shift gravitazionale della radiazione emessa dalla stella.

## Equazione di stato

Il problema chiave per la descrizione fisica della materia nelle stelle di neutroni è la formulazione di un'equazione di stato che sia valida in tali ambienti estremi. Esistono modelli diversi a seconda della densità.

Per l'intervallo compreso tra 10^7 a 4×10^11 g/cm^3 (sotto la Neutron drip line), sono stati sviluppati l'Harris-Wheeler e le equazioni di stato di Baym-Pethick-Sutherland. Questi modelli descrivono la materia costituita da nuclei, elettroni liberi e neutroni liberi (per determinare la soglia della Neutron drip line), e sono in grado di distinguere l'abbondanza relativa delle diverse specie (in particolare la composizione nucleare) in funzione della densità.

Al di sopra di 10^7 g/cm^3, gli elettroni sono relativistici, il che significa che la loro energia di Fermi (che segue dal principio di indeterminazione) è più grande della loro massa di riposo. La transizione da regimi non relativistici a regimi estremamente relativistici provoca un cambiamento nella forma politropica dell'equazione di stato (P\*V^n), che a sua volta porta ad una diversa configurazione di equilibrio per la stella.

Per le densità al di sopra della neutron drip line fino a densità nucleari (~2.8×10^14 g/cm^3) e al di sopra, la trattazione classica è inadeguata e i calcoli richiedono gli strumenti della teoria quantistica a molti corpi. L'equazione di Baym-Bethe-Pethick descrive la materia costituita da nuclei, elettroni liberi e neutroni liberi, come prima, ma ora la frazione di neutroni può essere arbitrariamente grande, e sono inclusi alcuni risultati della teoria a molti corpi.

Questo modello tiene conto del calo dell'indice politropico n al di sotto di 4/3 per le densità al di sopra della neutron drip line, che fa sì che la stella diventi instabile. L'indice politropico aumenta di nuovo sopra 4/3 per densità significativamente superiori alla neutron drip line, dove il contributo di neutroni alla pressione inizia a essere dominante sugli elettroni.

## Materia esotica

Con densità estremamente elevate (~10^15 g/cm^3), la composizione della materia può essere maggiormente esotica a causa delle creazioni di nuove particelle. Le prime che ci si dovrebbe aspettare sono i muoni, in possesso di una massa di 104 MeV.

Per densità più elevate, ci si può aspettare la risonanza Delta (uno stato eccitato di nucleoni) o altri iperoni, come Lambda e Sigma. La massa di pioni è di 140 MeV, quindi si possono creare al di sopra di qualche soglia. I pioni sono bosoni (hanno spin zero), il che significa che, in linea di principio, possono formare un condensato Di Bose-Einstein, a temperature sufficientemente basse.

Un condensato di pioni avrebbe l'effetto di attenuare l'equazione di stato e potrebbe anche far sì che la materia nucleare diventi solida a densità sufficientemente elevate. Per densità molto più grandi della densità nucleare, la forte interazione che mantiene i quark all'interno dei nucleoni diventa più debole, e alla fine i quark possono essere trattati come un gas relativistico di Fermi ideale. Sono stati proposti modelli di materia a quark (plasma di quark-gluoni) nelle regioni centrali delle stelle di neutroni, e la loro validità deve ancora essere verificata.

## Massa e raggio

Una volta che un'equazione di stato appropriata è stata dedotta, il sistema di equazioni Oppenheimer-Volkoff può essere utilizzato per determinare la massa e il raggio di una stella. Utilizzando diverse equazioni di stato, si ottengono diversi valori di massa, raggio e densità centrale.

Con valori medi per l'intervallo di massa ~0.7-1.4 masse solari e con densità centrale dell’ordine di 10^15 g/cm^3. Il raggio può variare tra 10-100 km. Questi dati possono quindi essere confrontati con osservazioni astronomiche.

Le osservazioni astronomiche delle stelle di neutroni sono iniziate quando sono state scoperte le prime intense sorgenti di raggi X cosmici. La scoperta delle pulsar ha dato una grande spinta alla ricerca sulle stelle di neutroni, ed è stata proposta l'ipotesi di nascita di stelle di neutroni nelle esplosioni di supernova.

Il modo principale per determinare la massa di oggetti astronomici è osservando i sistemi binari. Tipicamente, il sistema consiste in una stella visibile che orbita intorno a un centro di gravità, che denota l'esistenza di una stella compagna che può non essere vista.

La misurazione del periodo orbitale del sistema binario permette di determinare la massa delle stelle utilizzando la terza legge di Keplero, se si fa un'ipotesi sull'angolo di inclinazione del piano orbitale. Le osservazioni suggeriscono che la massa delle stelle di neutroni è coerente con 1,4-1,6 masse solari, che è vicino al limite di Chandrasekhar, e il raggio è ~10-20 km.

## Pulsars

Una forte evidenza dell'esistenza delle stelle di neutroni si è avuta dall'osservazione delle pulsar. Le pulsar sono intense sorgenti radio pulsanti che sono state osservate per la prima volta nel 1967. Le stelle di neutroni sono state identificate come gli unici oggetti astronomici compatibili con le caratteristiche della radiazione emessa dalle pulsar.

Immediatamente, le pulsar sono state identificate con resti di esplosioni di supernova, che darebbero luogo alla formazione di stelle di neutroni. La rapida rotazione delle stelle di neutroni, dedotta dal periodo delle pulsar, deriva dalla grande accelerazione che la stella sperimenta quando collassa, a causa della conservazione del momento angolare.

Questi periodi possono essere molto piccoli, fino a pochi ms, e sono molto regolari, cioè con scostamenti medi su molti periodi molto piccoli, il che rende le pulsar orologi universali estremamente precisi.

La rotazione delle stelle di neutroni è stata osservata rallentare sul lungo periodo, il che suggerisce che parte dell'energia di rotazione deve essere persa. I principali meccanismi che sono stati considerati per questo rallentamento sono la radiazione elettromagnetica, con il modello di dipolo rotante, e le onde gravitazionali, con l'emissione di quadrupolo. Le valutazioni di questi effetti mostrano che entrambi i processi devono essere considerati per tenere conto delle misurazioni.

## Campo magnetico

Le stelle di neutroni sono caratterizzate da campi magnetici estremamente elevati, che possono raggiungere fino a 10^12-10^13 G. Questi valori sono coerenti con l'aumento del campo magnetico causato dal collasso di una stella, con un campo magnetico iniziale ~100 G, a causa della conservazione del flusso magnetico.

La conservazione del flusso magnetico è associata all'alta conduttività del plasma, che porta al fenomeno del congelamento delle linee di campo magnetico nel plasma. Una particolare classe di stelle di neutroni, chiamate magnetar, può raggiungere campi magnetici fino a 10^15 G, che possono derivare da qualche effetto dinamo.

Il modello di dipolo rotante tiene conto del rallentamento della rotazione delle stelle e può fornire l'energia necessaria per produrre l'emissione radio. Il meccanismo invocato per l'emissione radio prevede l'accelerazione delle particelle nelle immediate vicinanze della stella, e l'emissione elettromagnetica è generata dalla radiazione di sincrotrone.

Le particelle vengono strappate dalla superficie stellare da un intenso campo elettrico, col risultato che una densa magnetosfera viene creata intorno alla stella. Le particelle di plasma co-ruotano con la stella, fino a quando la loro velocità si avvicina alla velocità della luce. La radiazione di sincrotrone proveniente da queste particelle viene emessa lungo una direzione specifica, e la rapida rotazione della stella fa sì che questa emissione continua venga rilevata da noi sotto forma di brevi impulsi periodici (come in un faro).

## Raffreddamento

Le stelle di neutroni non hanno processi di fusione nucleare che avvengono al loro interno, quindi la loro temperatura può solo diminuire nel tempo. Il principale meccanismo di raffreddamento consiste nell'emissione di neutrini, che domina sulla radiazione di corpo nero almeno per i primi ~1000 anni.

La temperatura subito dopo il collasso della supernova dovrebbe essere di circa 10^11 K, ma scende a 10^10-10^9 K in un tempo molto breve. La prima fase è dominata dall'emissione di neutrini per decadimento beta, che è proporzionale a T^8 e quindi scende rapidamente con la temperatura.

Altri processi che potrebbero intervenire in seguito sono bremsstrahlung (emissione di frenamento) di coppie di neutrini, le reazioni di condensazione pioniche e il decadimento beta dei quark. Tutti questi processi avvengono su scale dell’ordine di T^6, il che significa che diminuiscono più lentamente con la temperatura.

Infine, dopo che la temperatura è diminuita abbastanza, la radiazione di corpo nero (su scala T^4) inizia a prevalere sulle altre. In generale, la luminosità delle stelle di neutroni nell'intervallo visibile è molto piccola a causa della loro superficie estremamente piccola e a causa del red-shift gravitazionale della radiazione emessa.

## Onde gravitazionali

Relativamente di recente (2017), un segnale di onde gravitazionali proveniente dalla fusione di due stelle di neutroni di un sistema binario è stato rilevato dagli interferometri LIGO e Virgo. L'evento è stato il risultato della fase finale del moto a spirale di una coppia di stelle di neutroni intorno al loro comune centro di gravità, perdendo energia per radiazione gravitazionale e terminando in una fusione catastrofica.

Il processo ha portato alla creazione di una stella di neutroni massiccia (~2.7 masse solari), che è rapidamente collassata in un buco nero. Il segnale dell'onda gravitazionale è stato accompagnato da una breve emissione di raggi gamma (gamma ray burst) e poi da emissione ottica e infrarossa, che ha permesso di individuare la posizione della sorgente con maggiore precisione.

Anche se questo non è stato il primo rilevamento di onde gravitazionali, è stato il primo in cui era disponibile un segnale elettromagnetico, rappresentando così il primo caso di astronomia multi-messaggero. Eventi come questo sono molto importanti per la nostra migliore comprensione di questi oggetti estremi che esistono nell'universo.



traduzione di Roberto Perenna di un saggio in inglese di Andrea Casolari, su un blog pubblicato su WordPress.com,