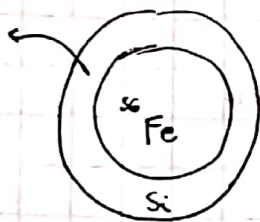


STELLE DI NEUTRONI

reazioni
attive



Le reazioni del silicio accrescono la massa del core di Fe inerte ed elettronicamente degenero perché la sua ρ cresce.

La densità cresce fino a raggiungere la soglia per attivare i processi β inversi
→ STELLE DI NEUTRONI

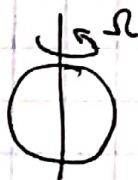
Nelle stelle normali abbiamo scritto le equazioni di equilibrio idrostatico trascurando gli effetti relativistici, in questa stella di neutroni non possiamo perché

raggio di $\frac{2GM}{L^2 R} \approx 0,4$ poiché $M \approx 1,4 M_\odot$ in $R \approx 10 \text{ km}$
Swarthchild (sotto il pole diventerebbe buco nero) → raggio stella neutroni

Caratteristiche:

- PERIODO REGOLARE, 1,6 ms - 4 s
- $\dot{P} > 0$, il periodo cresce lentamente
- STANDARD PER LA MISURAZIONE DEL TEMPO, periodo noto con molte cifre

Queste devono poter essere spiegate da qualsiasi modello di PULSAR, effettivamente è l'unico che riesce a spiegare periodi così brevi. Immaginiamo un oggetto che ruota



Il valore max della velocità angolare è legato alla densità (non può essere grande a piacere perché prima o poi la $F_{\text{centrifuga}} > F_{\text{gravitazionale}}$)
⇒ conoscere il periodo pone vincoli sulla ρ .

$$\Omega^2 R < \frac{GM}{R^2} \Rightarrow \Omega < \sqrt{\frac{4\pi}{3} G \bar{\rho}} \Rightarrow \bar{\rho} > \frac{3}{4\pi} \frac{\Omega^2}{G} = \frac{3\pi}{G} \frac{1}{P^2}$$

Ω è legato al periodo di rotazione

Se $P = 1 \text{ s} \Rightarrow \bar{\rho} > 10^8 \text{ g/cm}^3$

⇒ Le pulsar non possono essere nane bianche (si disgregherebbero con queste ρ)

1) Però perché il segnale di una pulsar non può essere interpretato come una pulsazione...?

→ non si riesce ad ottenere un periodo con un'accuratezza di 13 ulse
significabile a causa delle sovrapposizioni tra i vari modi di oscillazione

→ la pulsar non dovrebbe smorzarsi, $\dot{P} < 0$

Non può essere interpretato nemmeno come sistema binario, in cui il periodo è il periodo orbitale, perché potremmo fare il ragionamento analogo a quello fatto per trovare \bar{P} e troveremmo un limite sul raggio orbitale. Tale raggio dovrebbe essere « raggio neve bianca ».

Non solo, essendo cori vicini dovrebbero emettere onde gravitazionali, avvicinarsi e il periodo diminuire.

⇒ LE PULSAR SONO STELLE DI NEUTRONI CHE RUOTANO CON PERIODO $ms - s$
DOWTO AL FATTO CHE VI È UN CAMPO MAGNETICO (CON I QUE
POLI) CHE È DISASSIATO (NON ALLINEATO) CON L'ASSE DI ROTAZIONE
⇒ dipolo magnetico che varia nel tempo → produce radiazione em.

Le stelle che producono stelle di neutroni sono quelle con $M \geq 8-10 M_{\odot}$

Core di Fe $\left\{ \begin{array}{l} \text{STELLE NEUTRONI} \quad M \leq 20-30 M_{\odot} \\ \text{BUCHI NERI} \quad M \geq 20-30 M_{\odot} \end{array} \right.$

NOTA: si ottengono dalle
supernovae che
espellono gli strati
esterni.

● Altre caratteristiche tipiche:

• $M \approx 1,4 M_{\odot}$ $R \approx 10 \text{ km}$ $\Rightarrow \bar{\rho} \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3 > \rho_0$ densità nucleare
 $E_{\text{grav}} \approx \frac{GM}{R} \approx 10^{51} \text{ erg} \sim 20\% \text{ Mc}^2$ → energia a riposo
 $g \approx \frac{GM}{R^2} \approx 10^{14} \text{ m/s}^2 \Rightarrow$ estremamente densa (montagne max 4mm)

$\bar{P} \sim (2-3 \text{ volte}) P_0$

$\rho_{\text{centro}} \sim (10-20 \text{ volte}) \rho_0$

• T molto alte, ma si raffredda con il tempo

• Campi magnetici molto intensi $\sim 10^{15} \text{ Gauss}$

Riprendendo il modello di Gold ci dobbiamo aspettare che il momento magnetico è:

$$|\vec{m}| = \frac{B_p R^3}{2}$$

$$\dot{E}_m = -\frac{2}{3c^3} |\ddot{\vec{m}}|^2 = -\frac{B_p^2 R^6 \Omega^4 \sin^2 \alpha}{6c^3}$$

↓
rate con cui viene rilasciata energia

Questa energia viene emessa a spese dell'energia cinetica rotazionale

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega^2 \quad I = \frac{2}{3} M R^2 \quad \leftarrow \text{per una sfera omogenea}$$

$$\dot{E}_{rot} = I \Omega \dot{\Omega} = -I \frac{(2\pi)^2}{P^3} \dot{P}$$

tenendo il periodo misurabile
possiamo calcolare queste quantità

$$\dot{E}_{rot} = \dot{E}_m \Rightarrow B_p = \sqrt{\frac{3c^3 I P \dot{P}}{2\pi^2 R^6 \sin^2 \alpha}}$$

→ si lega l'intensità del campo B
con le altre quantità

Esiste un limite superiore per la massa delle stelle di neutroni
però è difficile trovarla perché bisogna tener conto delle correzioni
relativistiche e del fatto che è un gas degenere interagente

MASSA DI TOLMAN-OPPENHEIMER-VOLKOFF

$$M \approx 2-3 M_\odot$$

Supponiamo di prendere una massa m e dall'alto la facciamo precipitare
su M di raggio R

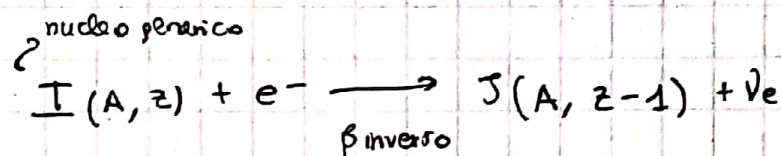
$$\frac{GMm}{R} = \frac{GM}{c^2} mc^2 \rightarrow \text{mi dà la frazione dell'energia a riposo
di } m \text{ che viene liberata}$$

L'energia liberata è $\propto M$, per una stella di neutroni è 15%.
Questa energia >> energia liberata nelle reazioni termonucleari
(0,7% $H \rightarrow He$, 0,9% $H \rightarrow Fe$)

→ fenomeni estremamente energetici quando qualcosa cade su oggetti
compatti

SUPERNOVAE GRAVOTERMICHE

Le stelle di neutroni nascono dall'esplosione di supernovae. Tale esplosione è causata dall'instabilità del nucleo di ferro. Questo nucleo è inerte, invece in una shell c'è la combustione del silicio che aumenta la massa di ^{56}Fe e la densità del nucleo. Questo core elettronicamente degenere non può crescere a dismisura ma è limitato superiormente dalla massa di Chandr. ($\sim 1,25 M_{\odot}$, più piccola perché peso molecolare del ferro > 2). Quindi la struttura non può più rimanere all'equilibrio idrostatico perché a causa della densità gli e^- raggiungono energia sufficiente ad attivare i processi β inversi.

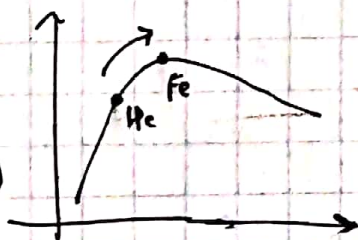


Questo processo sottrae e^- , ma il core di Fe è sorretto dalla P_e
 \rightarrow struttura collassa, T aumenta, ρ aumenta

\Downarrow
prima o poi i fotoni hanno energie sufficienti a fotoionizzare il ferro.



Processo ENDOTERMICO che sottrae 100 MeV per nucleo di Fe.



\Rightarrow tutta l'energia che era stata liberata dall'He al Fe ora viene ripresa perché dal ^{56}Fe si riproduce ^4He

All'aumentare della T anche ^4He viene fotoionizzato:



\Rightarrow viene ripresa anche l'energia che era stata liberata da H a ^4He .

Quindi nel tempo del collasso (fase di secondo) viene ripercorsa la contraria tutta la strada dell'evoluzione.

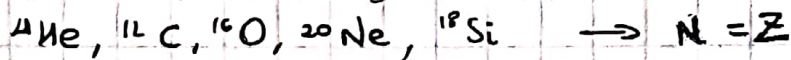
Progressivamente il core si arricchisce di neutroni. Il collasso prosegue finché non raggiunge $\bar{\rho} \sim 2,1 \rho_0$; a questo punto la materia è incompressibile \Rightarrow si crea un'onda d'urto che si propaga verso l'esterno

Vediamo il tempo scala del collasso:

$$\tau_{ff} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim 1s \ll \text{tempo scala del resto della stella che è molto densa} \Rightarrow \text{non si accorge che il core sta collassando, se ne accorge finché non viene investito dall'onda d'urto.}$$

Questa onda d'urto caldissima ama le combustioni, però non viene prodotto ^{56}Fe come quando siamo all'eq. idrostatico perché questa è una fase esplosiva che avviene in pochi secondi.

Nelle shell ci sono gli elementi delle combustioni precedenti:



Invece ^{56}Fe $Z \neq A$ $26p, 28n$

\Rightarrow non ho abbastanza neutroni per fare $^{56}\text{Fe} \Rightarrow$ si produce il nucleo più legato che ha $Z=N \rightarrow ^{56}\text{Ni}$
 \downarrow instabile ma $\tau_{\text{decad}} \gg \tau_{\text{nucleosintesi esplosiva}}$

\Rightarrow decade al termine della nucleosintesi della fase di supernova.

\rightarrow in ^{56}Fe \leftarrow da cui nascono le stelle successive
 \rightarrow ha origine RADIOGENICA

Per spiegare l'energia che viene rilasciata calcoliamo l'energia gravitazionale rilasciata:

$$\Delta E_{\text{grav}} \approx -G M_{\text{core}}^2 \left(\frac{1}{R_{\text{core}}} - \frac{1}{R_n} \right) \approx \frac{G M_c^2}{R_c} \approx 3 \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

\nearrow stella neutroni
 \nwarrow rima di collasso

SUPERNOVAE GRAVOTERMICHE \rightarrow pochissima energia rilasciata è di tipo gravitazionale

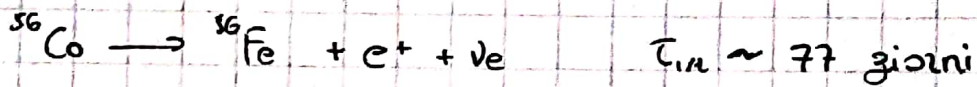
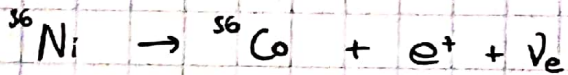
In cosa va questa energia?

\rightarrow nei processi di fotodisintegrazione del Fe che sottraggono energia
 \rightarrow processi fotodisintegrazione di ^4He
 $\rightarrow \sim 10\%$

- energia per eiettare l'involucro nel cosmo $\sim 1\%$
- energia sottoforma di radiazione luminosa nelle varie $\lambda \sim 1\%$
- gran parte dell'energia viene portata via dai NEUTRINI

ci rimane da vedere cosa viene prodotto durante la nucleosintesi

$$^{56}\text{Ni} \quad \tau_{1/2} \approx 6 \text{ giorni}$$



Dopo il picco della luminosità della supernova la sorgente principale della luminosità che vediamo è quella dovuta al decadimento del Cobalto \rightarrow perché se la sorgente è dovuta al decadimento radioattivo ci aspettiamo che l'energia emessa per unità di tempo \propto numero di nuclei radioattivi

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

\leftarrow come cambia il numero di nuclei radioattivi

$$\downarrow$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{a } t = \tau_{1/2} \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda \tau_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$$

$$\Rightarrow L \propto N \propto e^{-\lambda t}$$

$$\log L = -(\log_{10} e) \lambda t + \text{cost}$$

\rightarrow magnitudine con andamento rettilineo con pendenza data dal coefficiente (legato al $\tau_{1/2}$)