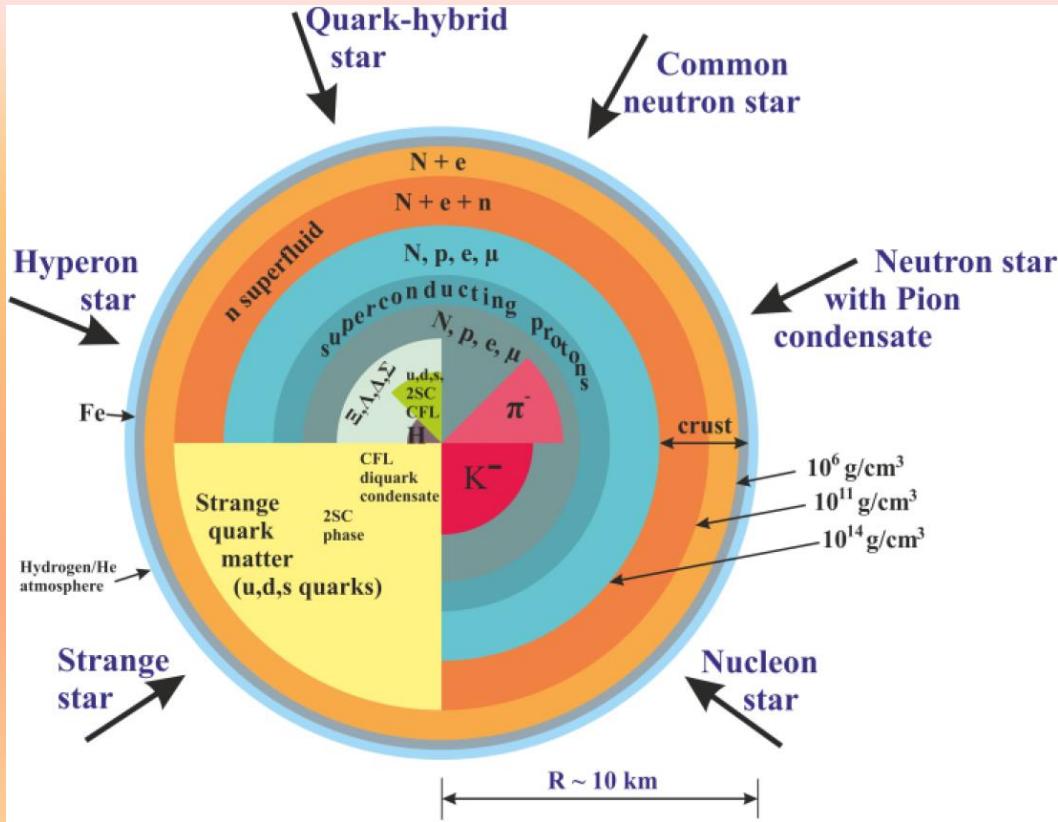


# Instabilità termodinamiche in Stelle di Neutroni



A. Lavagno<sup>a,b</sup>, D. Pigato<sup>a,c</sup>

a) Department of Applied Science and Technology, Politecnico di Torino, I-10129, Italy

b) INFN, Sezione di Torino, I-10125 Torino, Italy

c) OABI (Osservatorio astronomico Biellese)

# Lagrangiane relativistiche

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{octet}} = & \sum_k \Psi_k (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_k + g_{\sigma k} \sigma - g_{\omega k} \gamma_\mu \omega^\mu - \\ & g_{\rho k} \gamma_\mu \frac{\tau_k}{2} \cdot \rho^\mu) \Psi_k + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) \\ & - \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu} \cdot \rho^{\mu\nu} \\ & + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \cdot \rho^\mu + U(\sigma, \omega, \rho), \end{aligned}$$

Ottetto barionico (nucleoni e iperoni) in interazione con i campi mesonici ( $\sigma$ ,  $\omega$  e  $\rho$ ) ed il potenziale non-lineare  $U$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_\Delta = & \bar{\psi}_\Delta \nu [i\gamma_\mu \partial^\mu - (m_\Delta - g_{\sigma\Delta} \sigma) - g_{\omega\Delta} \gamma_\mu \omega^\mu \\ & - g_{\rho\Delta} \gamma_\mu I_3 \rho_3^\mu] \psi_\Delta^\nu, \end{aligned}$$

Lagrangiana riferita alle isobare della delta ( $\Delta^-$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^+$ )

I mesoni leggeri ( $\pi$ ,  $K$ ,  $K$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ) e ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $K^*$ ,  $K^*$ ,  $\phi$ ) sono introdotti come particelle quasi libere dotate di potenziale chimico effettivo .

Potenziali dei singoli adroni :  
 (B: n° barionico, C: carica elettrica, S: stranezza)

$$\mu_i = b_i \mu_B + c_i \mu_C + s_i \mu_S.$$

# Conservazione (globale) carica elettrica (C) e numero Barionico (B)

- Materia b-stabile.
- Richiesta conservazione carica elettrica **C** e barionica **B** globalmente.
- Gli unici leptoni presenti saranno gli elettroni e i muoni, essendo i neutrini fuggiti dal mezzo stellare nelle sue prime fasi evolutive (fase di proto-neutron star).
- Gli **iperoni** ( $\Lambda$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ) sono introdotti fissando il valore delle costanti di accoppiamento con i campi mesonici ( $\sigma$ ,  $\omega$  e  $\rho$ ) per riprodurre il valore del corrispondente potenziale nucleare alla densità di saturazione nucleare.
- L'accoppiamento tra campi mesonici e le **isobare della Delta** ( $\Delta^-$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^+$ ) è stato fatto scegliendo un range di valori possibili e permessi ottenuti in recenti esperimenti di scattering eletronico e pionico e fotoassorbimento su nuclei.
- Non disponiamo quindi di valori precisi, ma di un set di valori permessi da analizzare come vedremo in Fig1.

# Fig 1.

(valori permessi di costanti di accoppiamento Delta-particles e campi mesonici)

2

A. Lavagno and D. Pigato / Physica A 531 (2019) 121595

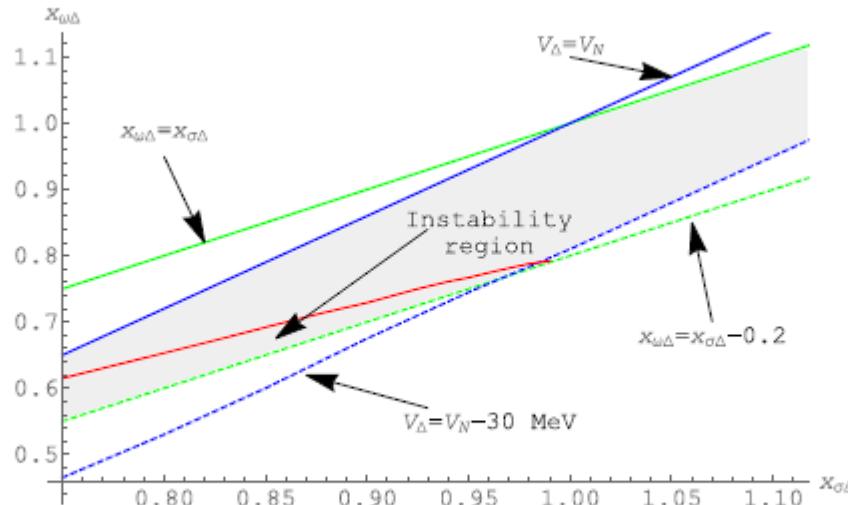


Fig. 1. Relation between the coupling ratios  $x_{\omega\Delta}$  and  $x_{\sigma\Delta}$  in terms of experimental constraints related to pion and electron scattering and from photoabsorption on nuclei. Below the red line, thermodynamic instabilities are present in the equation of state.

- In Figura (area grigia): regione di coupling permesse (valori sperimentali) tra campi mesonici e risonanze della Delta.
- Al di sotto della linea rossa si individua una regione di Instab. Termodinamica, dove una transizione di fase, da materia nucleare a delta-matter, è possibile.
- Andremo ad analizzare in particolare, le configurazioni di parametri corrispondenti alla regione Instabile e agli effetti sul mezzo stellare

# Instabilità termodinamica in materia b-stabile

Fase di coesistenza ottenuta  
mediante costruzione di Gibbs:

$$\mu_B^I = \mu_B^{II}, \quad \mu_C^I = \mu_C^{II}, \\ P^I(T, \mu_B, \mu_C) = P^{II}(T, \mu_B, \mu_C).$$

(è richiesta l'uguaglianza tra le Pressioni ed i potenziali chimici Barionici (B) e di Carica (C) nelle due Fasi)

Ogni qual volta per il sistema è energeticamente favorevole separarsi in 2 fasi a differente B e C, piuttosto che restare nella fase principale, una transizione di fase può avere luogo (*nel sistema si genera una regione di Instabilità Termodinamica*).

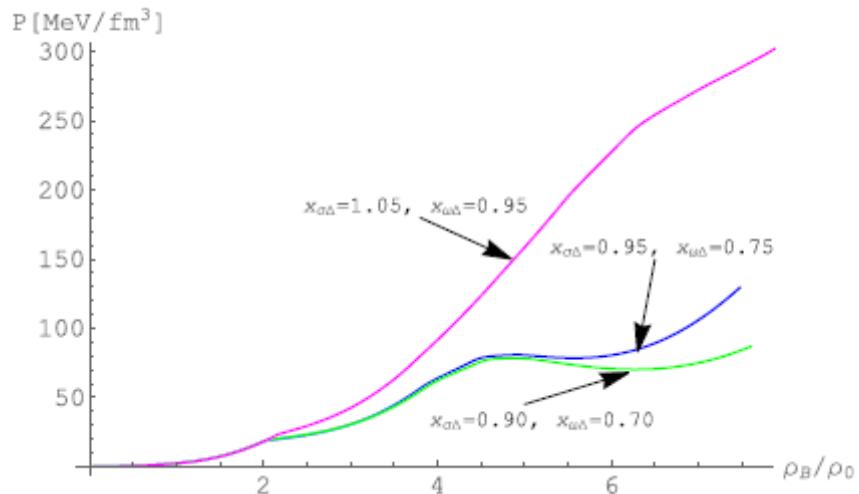
A)  $\rho_B \left( \frac{\partial P}{\partial \rho_B} \right)_{T, \rho_C} > 0.$

Se le **condizione A**  
(Stabilità Meccanica)  
e/o **B** (Stabilità Chimica)  
**non sono rispettate**, il  
sistema va in contro ad  
**una transizione di fase**.

B)  $\left( \frac{\partial \mu_C}{\partial r_c} \right)_{T,P} > 0$  or  $\begin{cases} \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial r_c} \right)_{T,P} < 0, & \text{if } r_c > 0, \\ \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial r_c} \right)_{T,P} > 0, & \text{if } r_c < 0. \end{cases}$

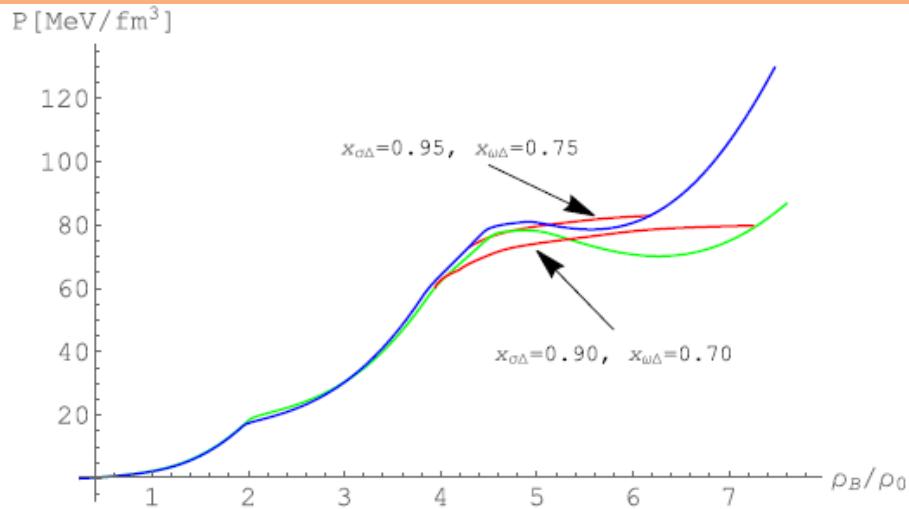
Il sistema si separa in **2 Fasi a differente B e C**, ma globalmente il loro valore è conservato.

# Equazione di stato stellari (EOS)



Esempio di Insorgenza di Instabilità  
Meccanica nelle equazioni di stato stellari  
(linee Blu e Verdi) e conseguente  
transizione di fase.

Per accoppiamenti maggiori (linea Viola), il  
sistema è stabile ed evolve verso una  
configurazione ricca di nucleoni, iperoni e  
risonanze della delta

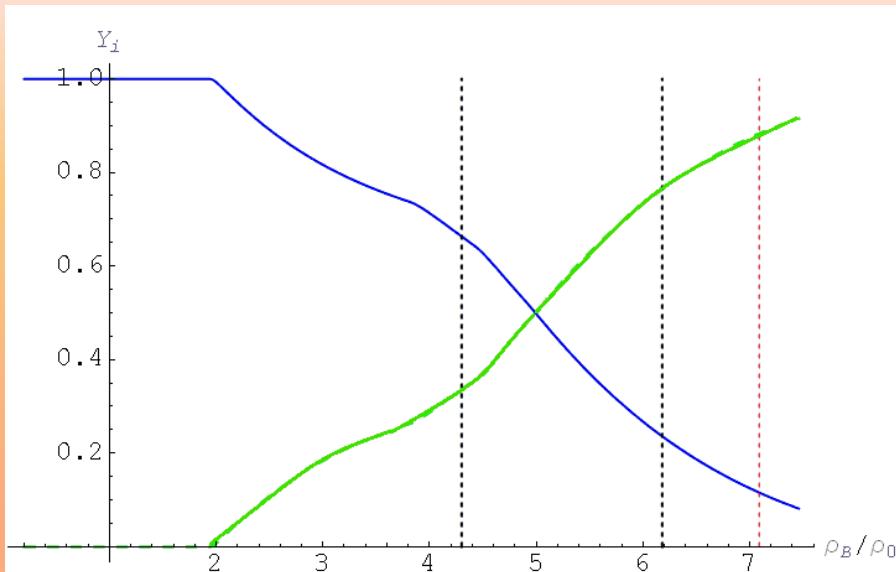


Durante la transizione di fase, il sistema  
si separa in 2 Fasi con differenti valori di  
B e C, mentre globalmente il loro valore  
è conservato.

(Le linee Rosse mostrano le correzione  
ottenute con GIBBS)

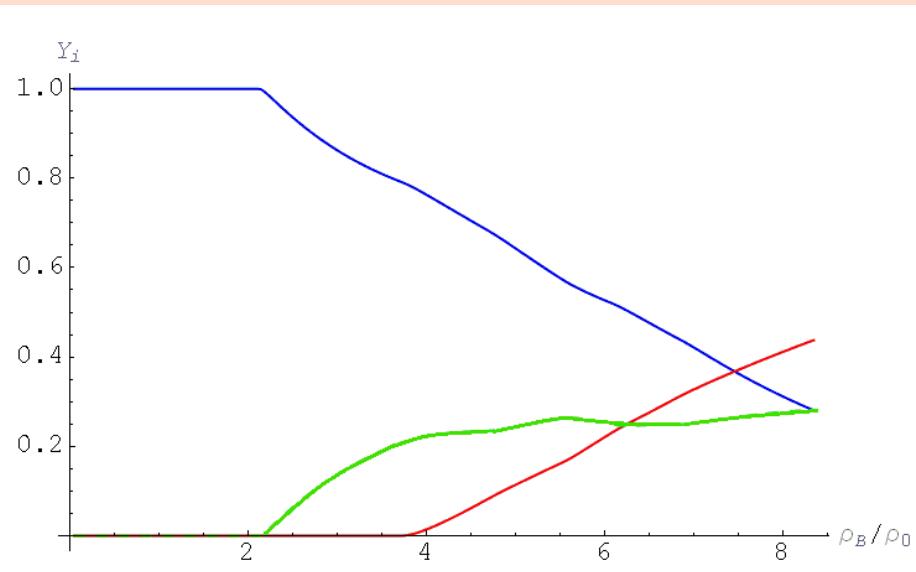
# Composizione stellare

Frazione di **Nucleoni (Linea Blu)**, **Iperoni (linea rossa)** e **delta-particles (linea verde)** in funzione degli accoppiamenti tra Delta e campi mesonici.



$(x_{\sigma\Delta} = 0.95 \text{ e } x_{\omega\Delta} = 0.75 \text{ (Regione INSTABILE)})$

In presenza di Transizione di Fase, la stranezza è fortemente soppressa, il n° di iperoni trascurabile e la stella composta quasi interamente da risonanze delta

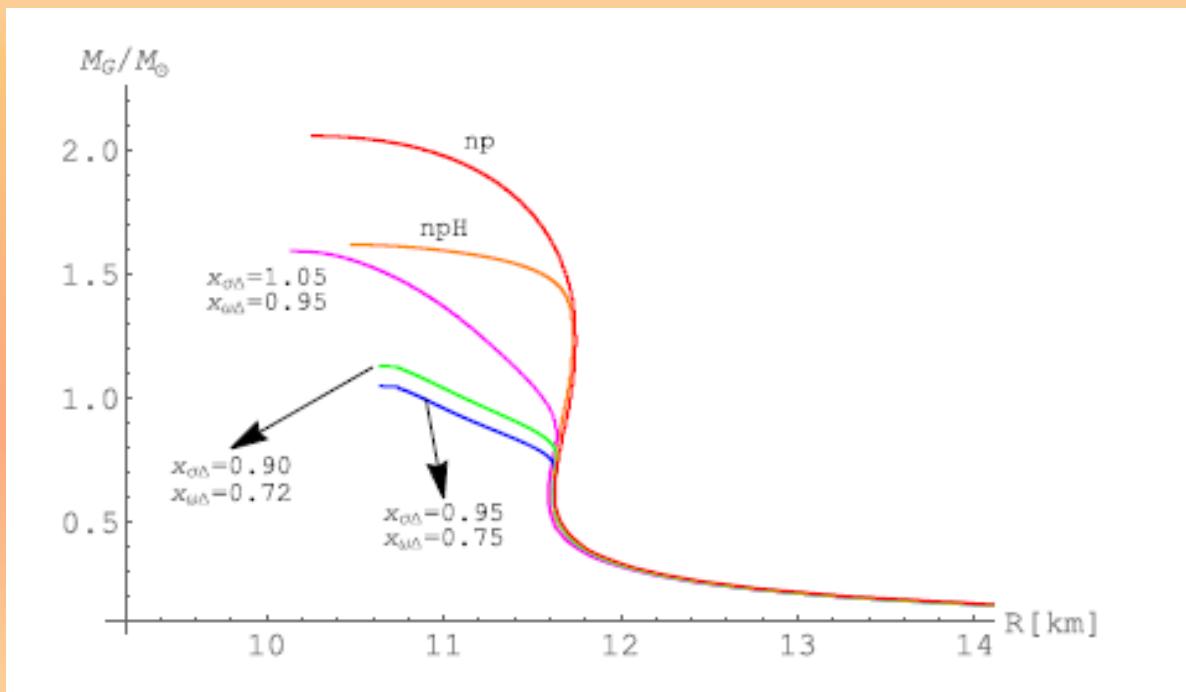


$(x_{\sigma\Delta} = 1.05 \text{ e } x_{\omega\Delta} = 0.95 \text{ (Regione STABILE)})$

In assenza di Instab. Termodinamiche, la stella torna alla normale composizione, con una frazione di stranezza (iperoni) importante nelle regioni centrali.

# Relazione Massa-Raggio.

L'effetto più rilevante, dovuto al possibile instaurarsi di una transizione di fase nell'oggetto Compatto (O.C.), si osserva nelle proprietà proprietà stellari e in particolare nella relazione Massa-Raggio.



In presenza di transizione di fase (linee **verdi** e **blu**), si ha un forte softening nelle EOS stellari (*a causa della forte soppressione dei nucleoni e alla quasi totale assenza di iperoni nella Fase Finale*) e l'O.C. raggiunge una Massa gravitazionale inferiore a quella in assenza di instabilità termodinamiche. (**Linea Viola**)

Osservare oggetti compatti con  $M_{\text{grav}} \approx 1M_\odot$  e Raggi  $\approx 10$  Km, potrebbe essere un marker importante per confermare la reale presenza di queste classi di stelle ricche di risonanze DELTA e dell'avvenuta transizione di fase.

# Conclusioni

- La presenza di Isobare della Delta può influenzare notevolmente le proprietà della stella di neutroni.
- Per determinati accoppiamenti  $\Delta$ -campi mesonici, possono istaurarsi regioni di instabilità termodinamica che conducono ad una transizione di fase nel sistema verso uno stato dominato dalle isobare della Delta. (*in modo analogo a quanto accade nella transizione di fase liquid-gas in materia nucleare*)
- In presenza di tali Instabilità, osserviamo:
  - una **transizione ad una fase dominata dalla delta** nella materia stellare,
  - una forte **riduzione nei nucleoni e nella stranezza**; iperoni trascurabili alla fine della transizione di fase,
  - una forte **riduzione nella Massa** gravitazionale del sistema
  - **variazioni nel processo di raffreddamento stellare ed emissione neutrinica** (URCA process).
- Futuri esperimenti in fisica delle alte energie ed osservazioni astrofisiche, ad es. con **NICER (Neutron star Interior Composition Explorer)**, saranno probabilmente in grado di confermare o meno l'esistenza di questa classe di oggetti compatti (*per ora solo ipotizzata*) e dunque anche dell'eventuale transizione di fase a Delta-matter.

Grazie per l'attenzione

e

Cielo Sereno!!!