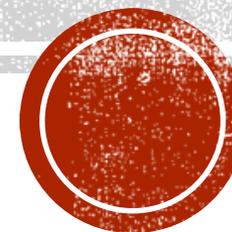


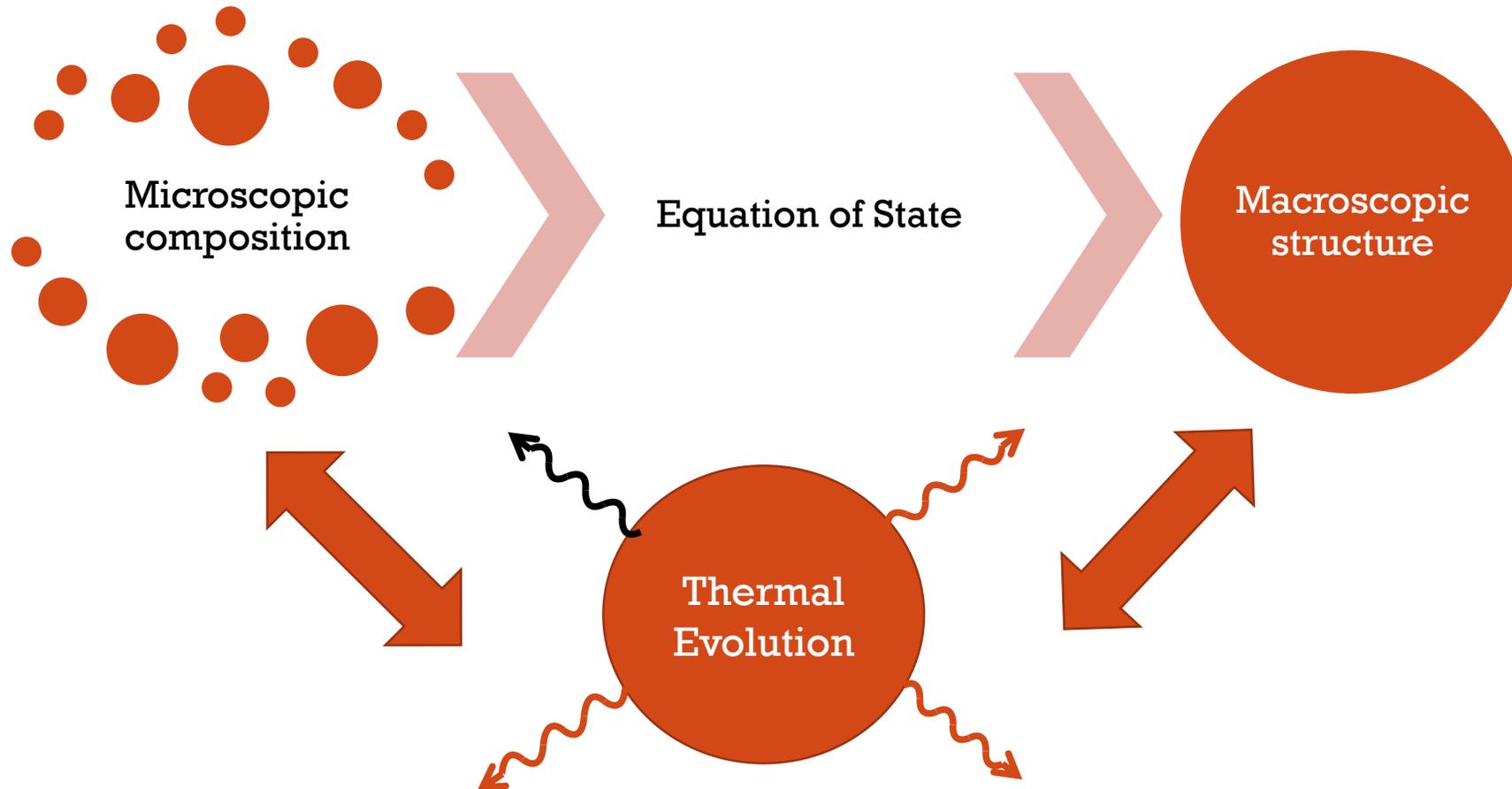
FÍSICA DE ESTRELAS DE NÊUTRONS

Rodrigo Picanço Negreiros – Universidade Federal
Fluminense - Brasil



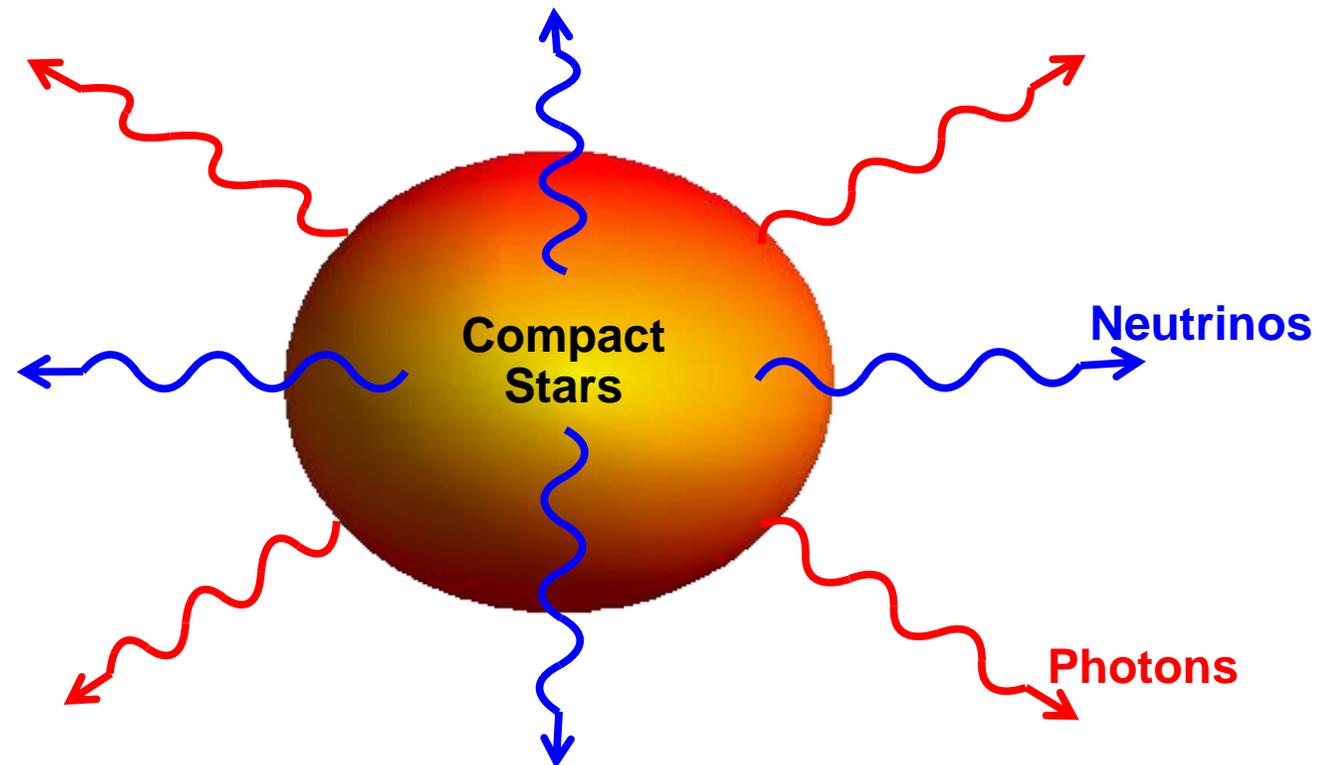
INTRODUÇÃO

- Precisamos de uma maneira adicional para restringir a Equação de Estado e composição de uma estrela compacta
- Precisamos usar todos os dados observacionais disponíveis.
- Existe uma grande quantidade de dados observacionais referentes as propriedades térmicas de estrelas compactas



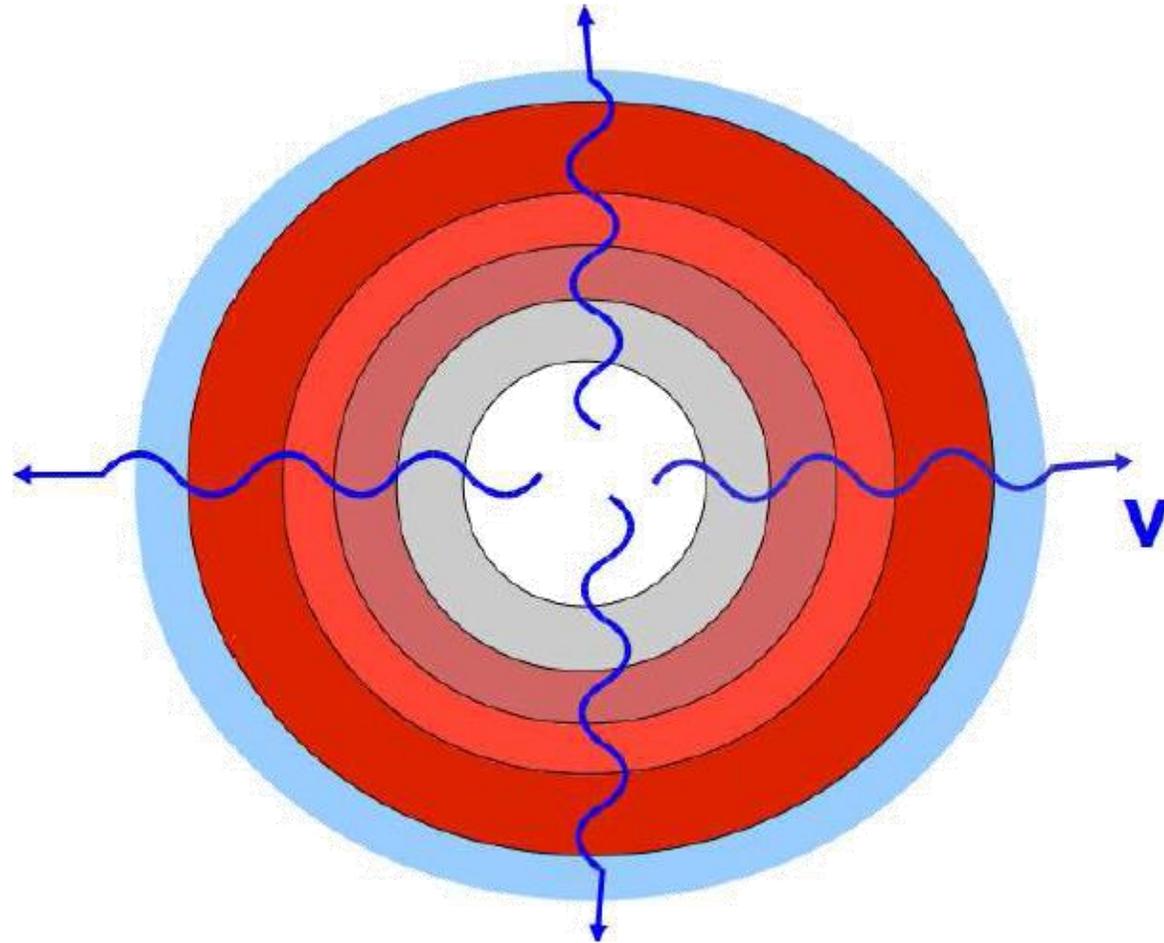
Introdução

- Resfriamento é dominado pela emissão de neutrinos
- Emissão de neutrinos depende fortemente da composição do objeto.
- Dependendo da sua massa (densidade central) o resfriamento estelar pode ser “rápido” ou “lento”.

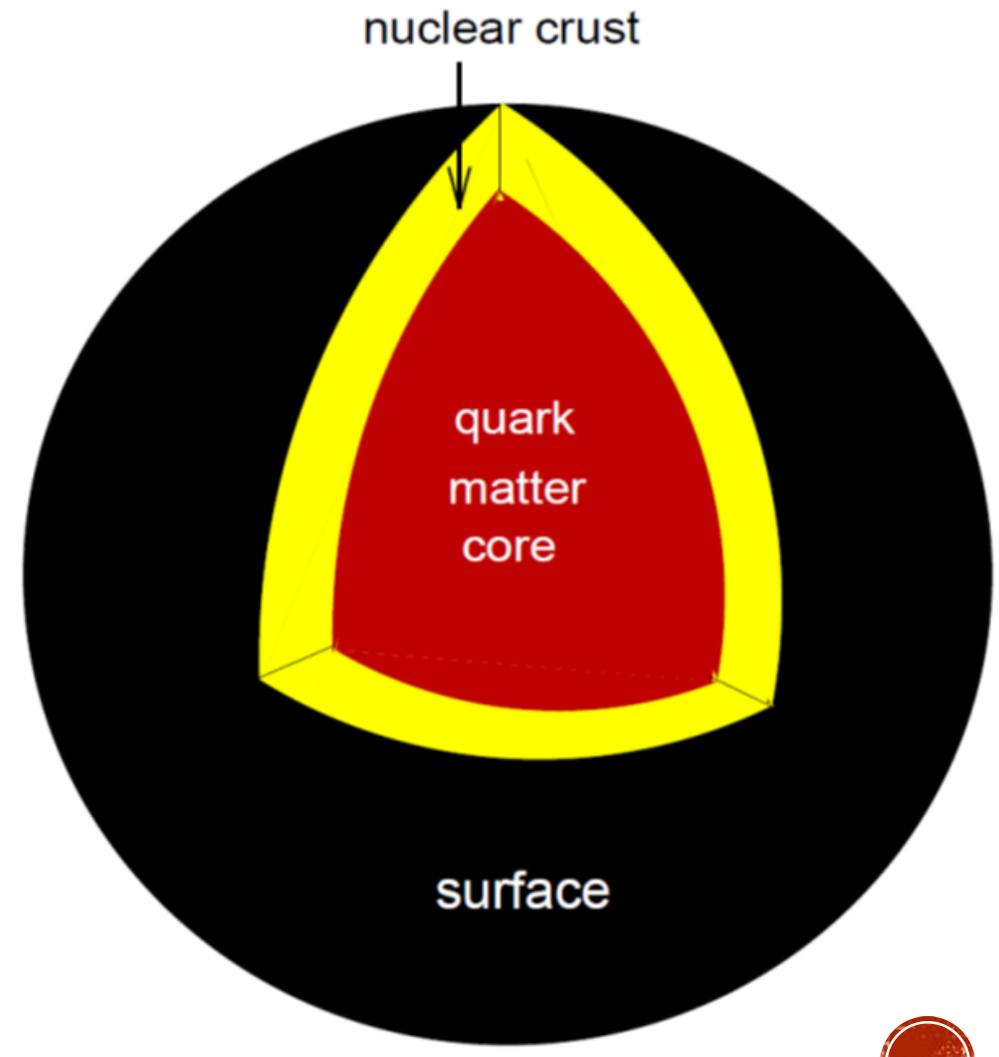
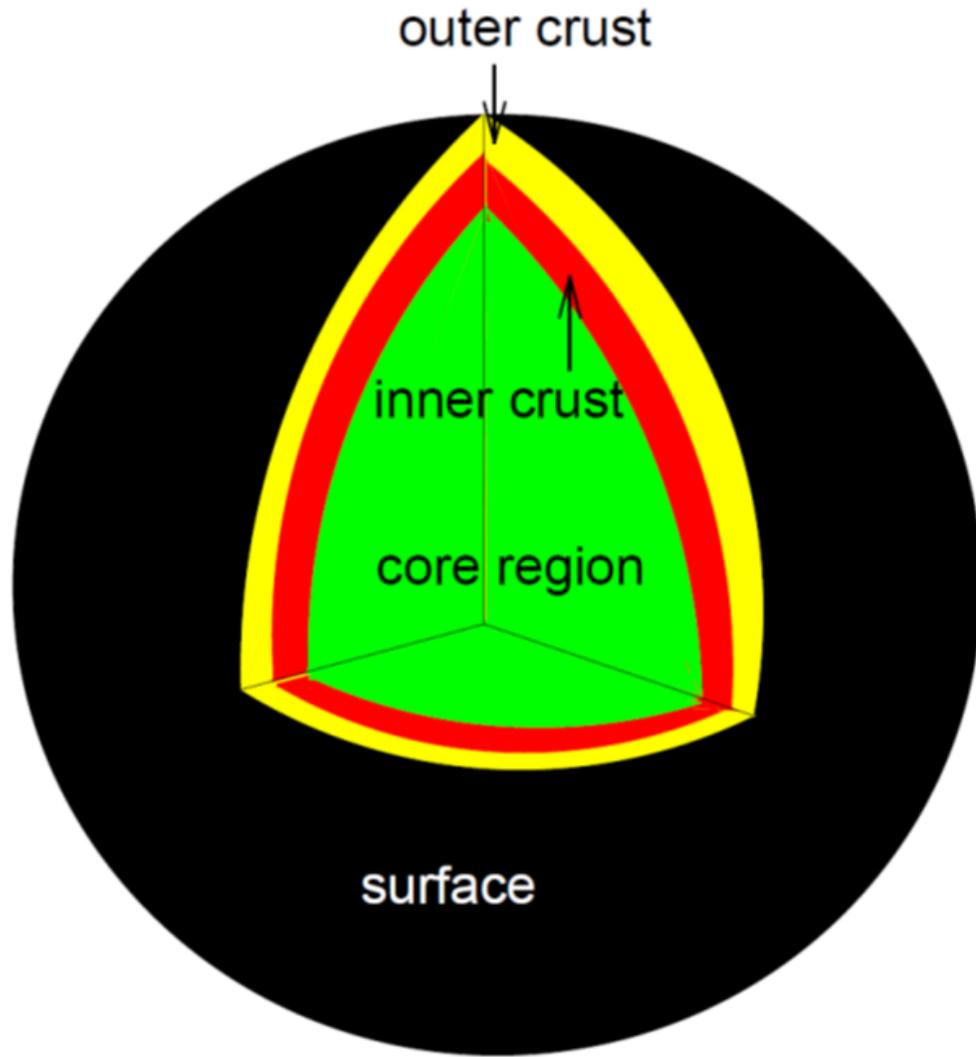


Introdução

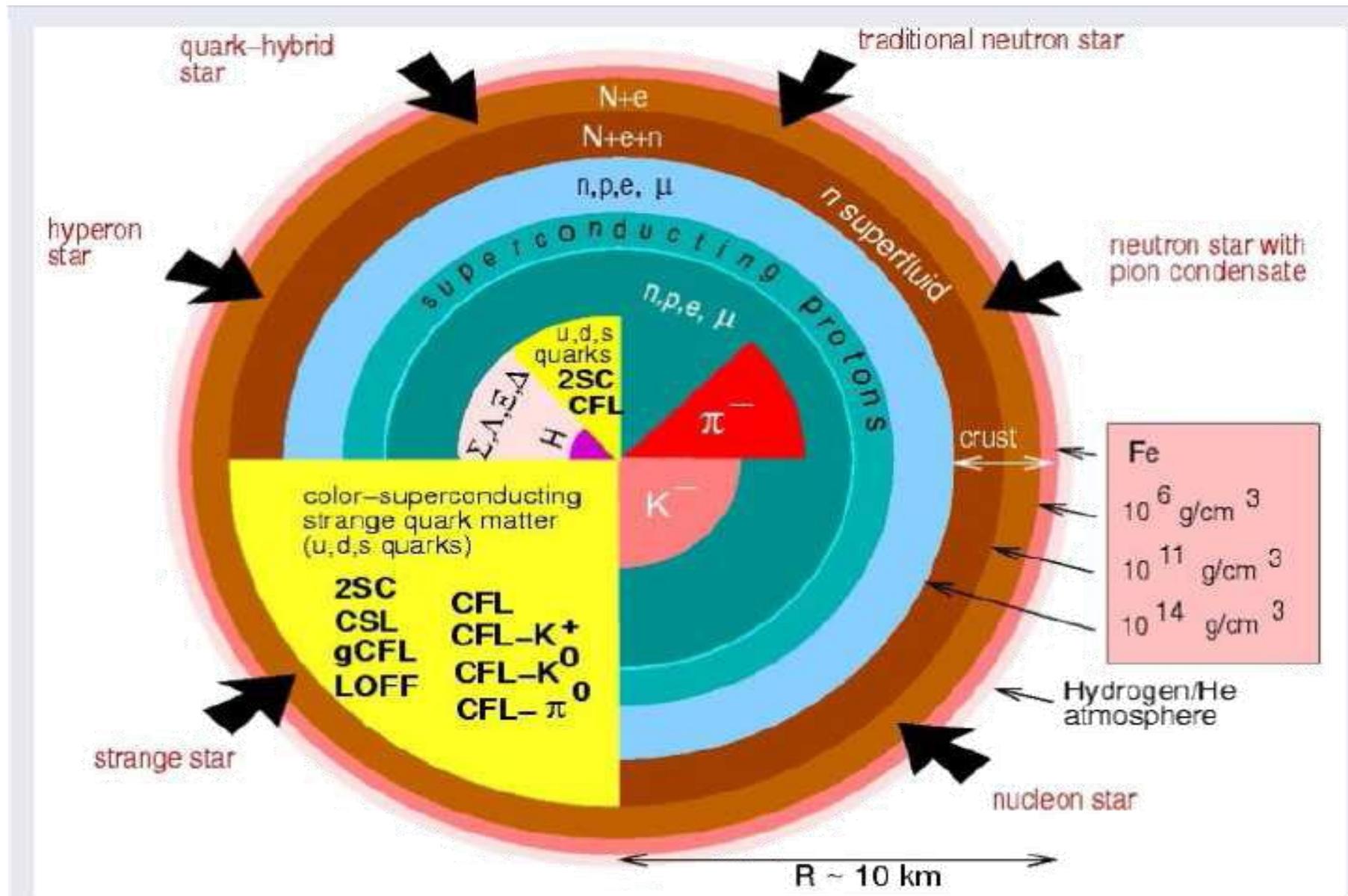
- Resfriamento estelar se dá de dentro pra fora!



RELEMBRANDO AS POSSÍVEIS ESTRUTURAS



Relembrando as possíveis estruturas



EQUAÇÕES DE EVOLUÇÃO TÉRMICA

- Equações relativísticas para o balanço e transporte de energia.

$$\frac{\partial(L e^{2\phi})}{\partial m} = \frac{1}{\epsilon \gamma \sqrt{1 - 2m/r}} \left(\epsilon_\nu e^{2\phi} + c_\nu \frac{\partial(\Gamma e^\phi)}{\partial t} \right)$$
$$\frac{\partial(\Gamma e^\phi)}{\partial m} = - \frac{(l e^{-\phi})}{16\pi^2 r^4 \kappa \epsilon \gamma \sqrt{1 - 2m/r}},$$

Propriedades macroscópicas

Propriedades microscópicas



EVOLUÇÃO TÉRMICA - INGREDIENTES

- Ingredientes Macroscópicos

- Distância radial
- Perfil de massa
- Perfil de pressão
- Perfil de densidade
- Métrica

- Ingredientes microscópicos

- Condutividade Térmica
- Calor específico
- Emissividade de Neutrinos
- Emissividade de fótons
- Emparelhamento



EVOLUÇÃO TÉRMICA – EMISSIVIDADE DE NEUTRINOS

Core

Direct Urca process

$$\epsilon_{\nu,DU} = 4.0 \times 10^{27} \left(\frac{Y_c \rho}{\rho_s} \right)^{1/3} \frac{m_{B1}^* m_{B2}^*}{m_n^2} R T_9^6 \Theta \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Modified Urca process

$$\epsilon_{\nu,MU,n} = 8.55 \times 10^{21} \left(\frac{m_n^*}{m_n} \right)^3 \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{1/3} T_9^8 \alpha_n \beta_n \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1},$$

$$\epsilon_{\nu,MU,p} = 8.53 \times 10^{21} \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right)^3 \left(\frac{m_n^*}{m_n} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{1/3} T_9^8 \alpha_p \beta_p F_p \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Bremsstrahlung

$$\epsilon_{\nu,BR,nn} = 7.33 \times 10^{19} \left(\frac{m_n^*}{m_n} \right)^4 \left(\frac{\rho_n}{\rho_0} \right)^{1/3} T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1},$$

$$\epsilon_{\nu,BR,pp} = 1.70 \times 10^{19} \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right)^4 \left(\frac{\rho_p}{\rho_0} \right)^{1/3} T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1},$$

$$\epsilon_{\nu,BR,np} = 3.14 \times 10^{20} \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_n m_p} \right)^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_0} \right)^{1/3} T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}.$$

Crosta

Electron Bremsstrahlung

$$\epsilon_{BR} = 10^x \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$x = 11.204 + 7.304\tau + 0.2976r - 0.37\tau^2 + 0.188\tau r - 0.103r^2 + 0.0547\tau^2 r - 6.77 \ln(1 + 0.228\rho/\rho_0),$$

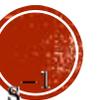
e⁺e⁻ Annihilation

$$\epsilon_{\text{pair}} \propto 10^{23} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

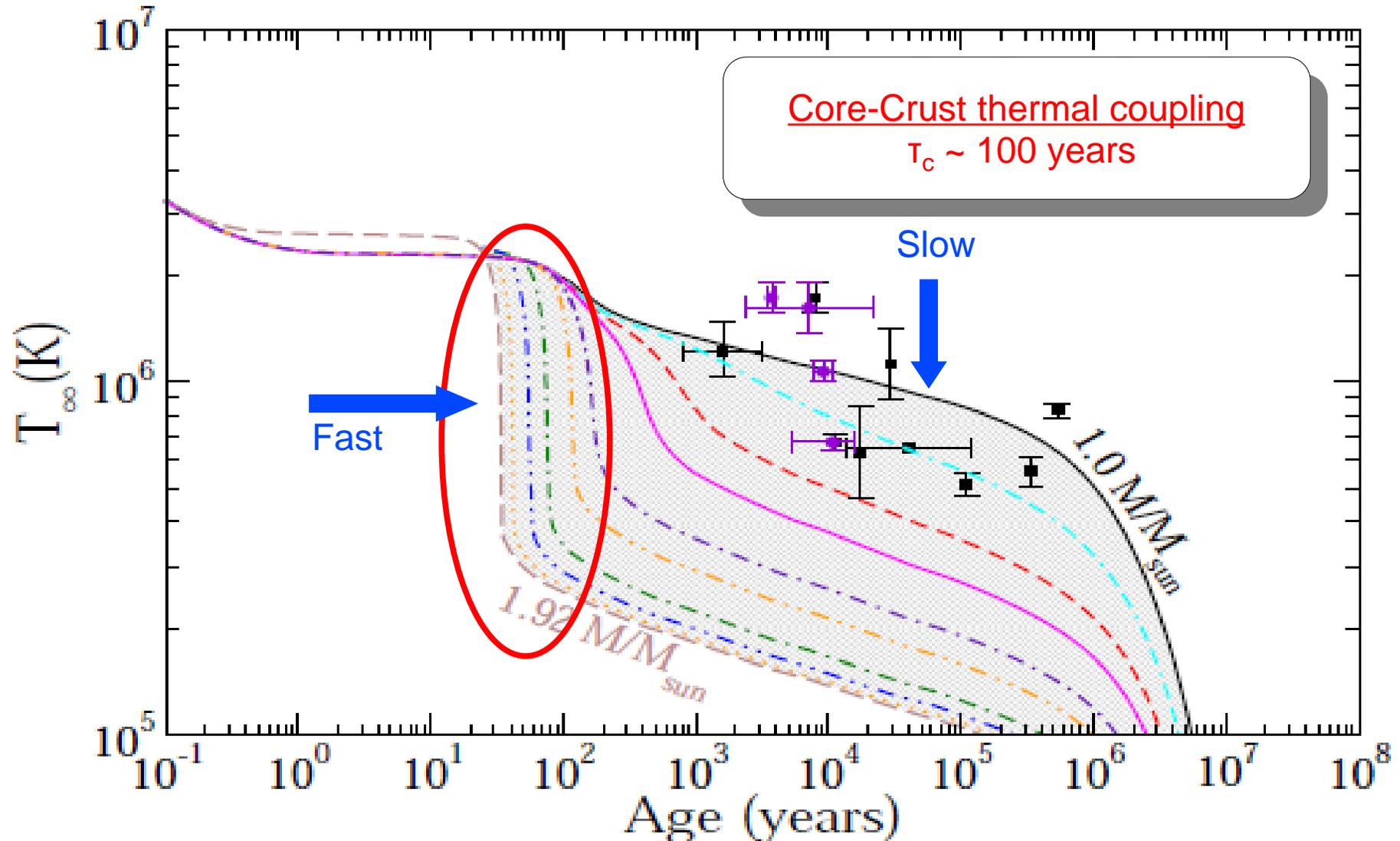
Plasmon Decay

$$\epsilon_{\text{pair}} = Q_c \frac{C_V^2}{96\pi^4 \alpha} \left(\frac{T}{T_r} \right)^9 (16.23 f_p^6 + 4.604 f_p^{7.5}) e^{-f_p}$$

$$Q_c \equiv \frac{G_F^2}{\hbar} \left(\frac{m_c c}{\hbar} \right)^9 \approx 1.023 \times 10^{23} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$



EVOLUÇÃO TÉRMICA – RESFRIAMENTO RÁPIDO/LENTO



Evolução Térmica – resfriamento rápido/lento

- Processo Urca direto leva ao resfriamento rápido

Só ocorre quando existem conservação do momento:

Emparelhamento!!

Composição microscópica é fundamental para o resfriamento!

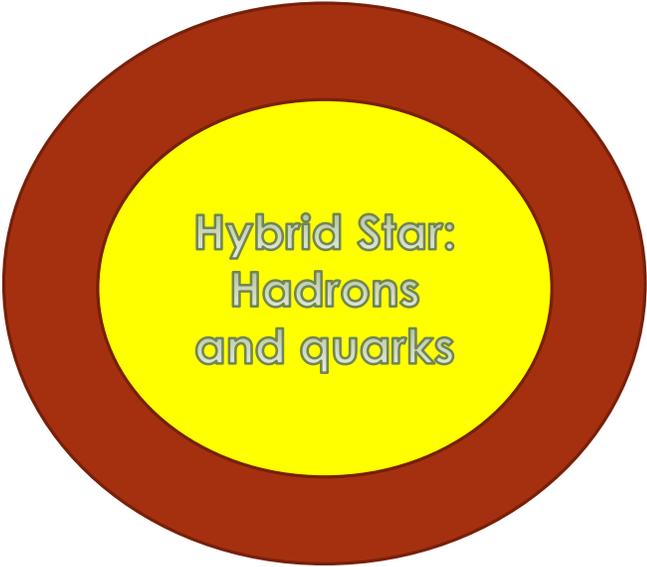
$$\epsilon_{\nu,DU} = 4.0 \times 10^{27} \left(\frac{Y_e \rho}{\rho_s} \right)^{1/3} \frac{m_{B1}^* m_{B2}^*}{m_n^2} R T_9^6 \Theta \text{ ergs cm}^{-3} \text{s}^{-1}$$



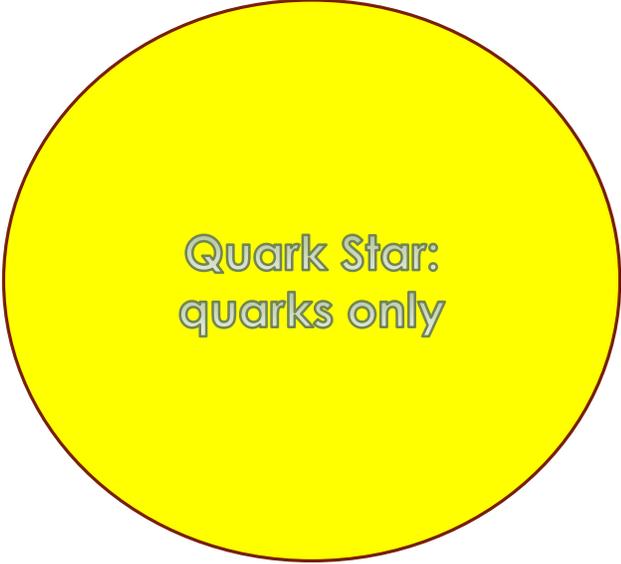
ESTRELAS COMPACTAS – EVOLUÇÃO TÉRMICA



Neutron Star:
Hadrons only
(confined
quarks)



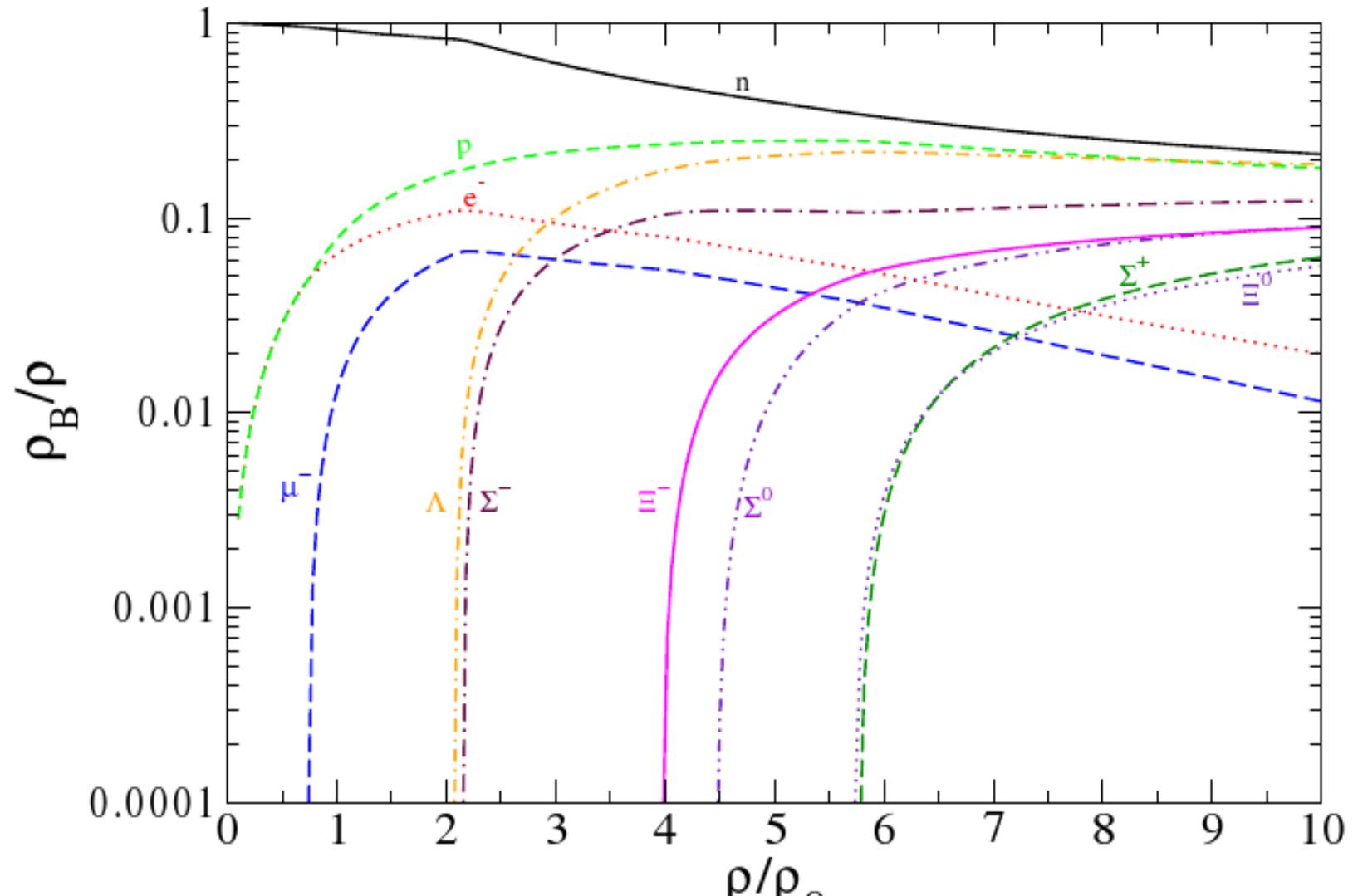
Hybrid Star:
Hadrons
and quarks



Quark Star:
quarks only



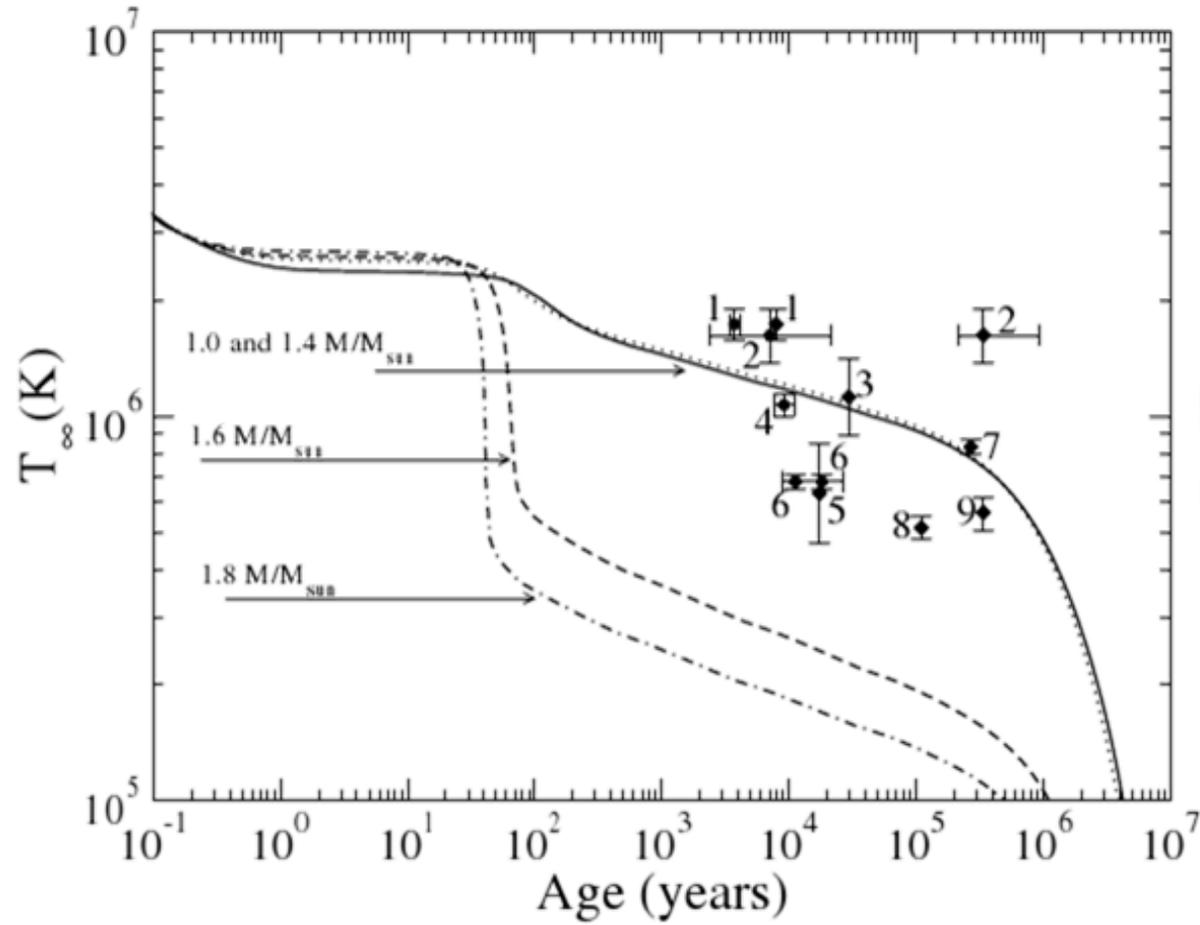
MODELO MICROSCÓPICO: ESTRELAS DE NÊUTRONS



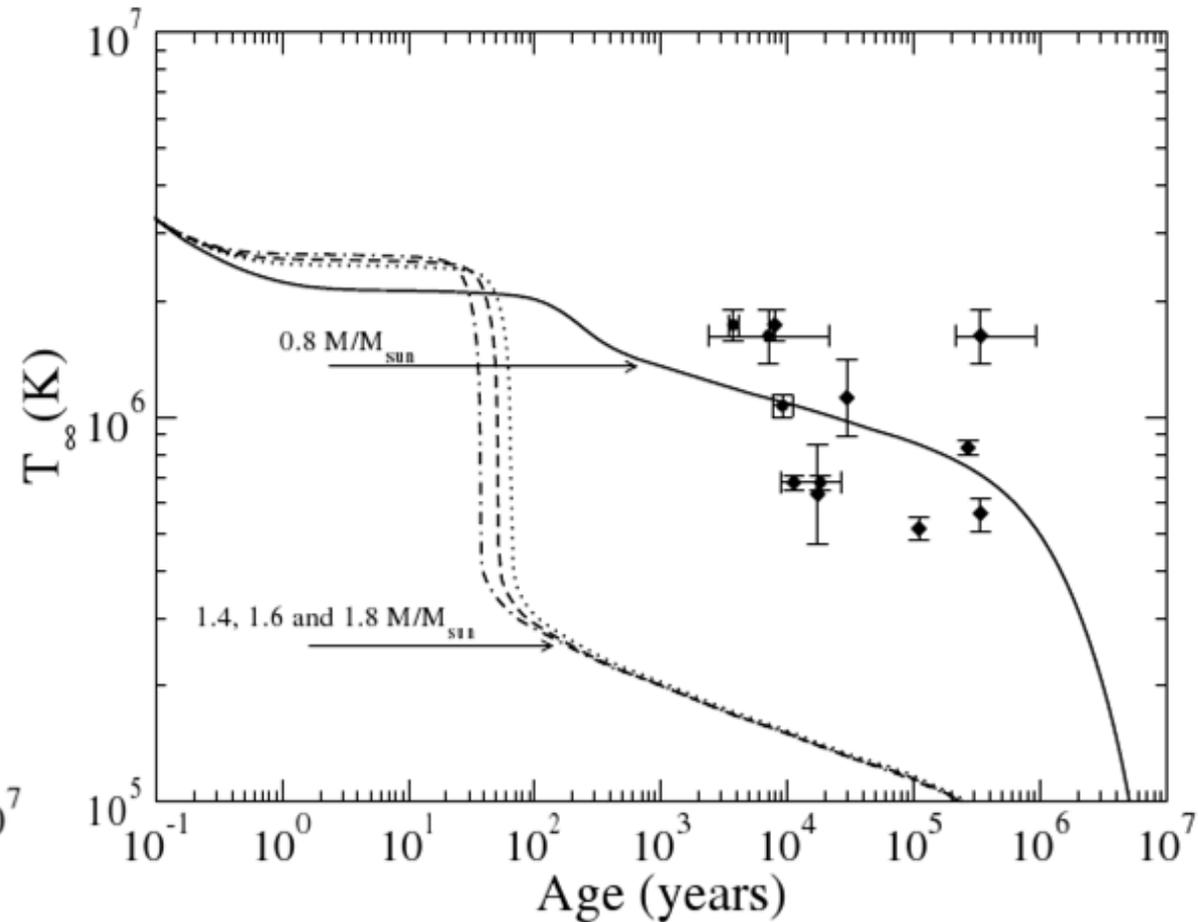
HV



Modelo microscópico: Estrelas de Nêutrons



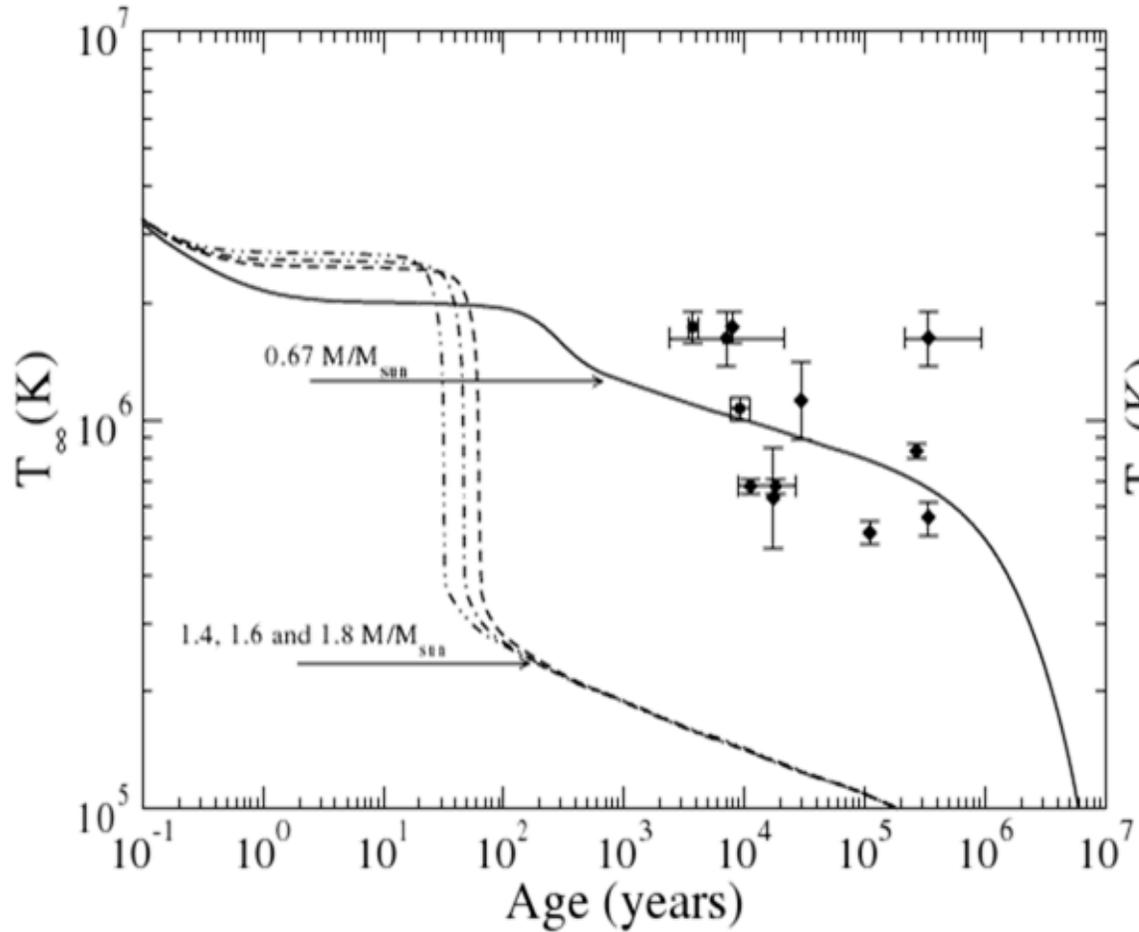
HA



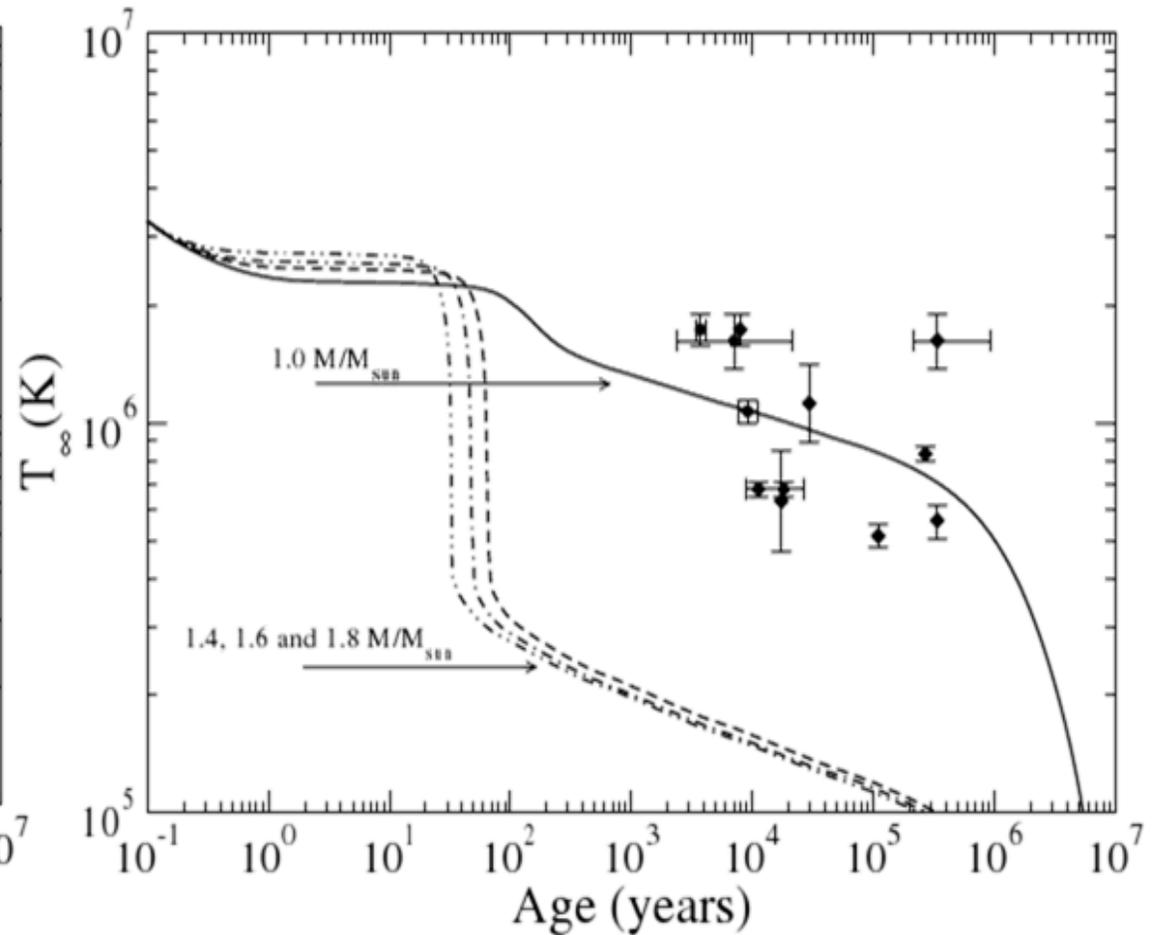
HB



Modelo microscópico: Estrelas de Nêutrons



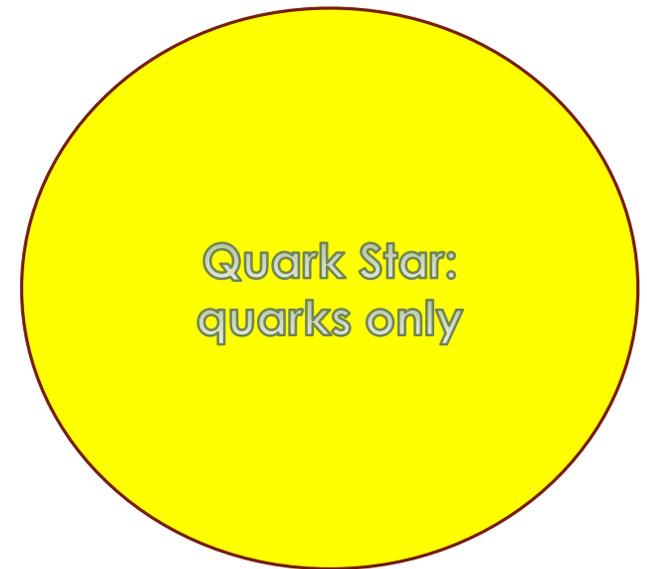
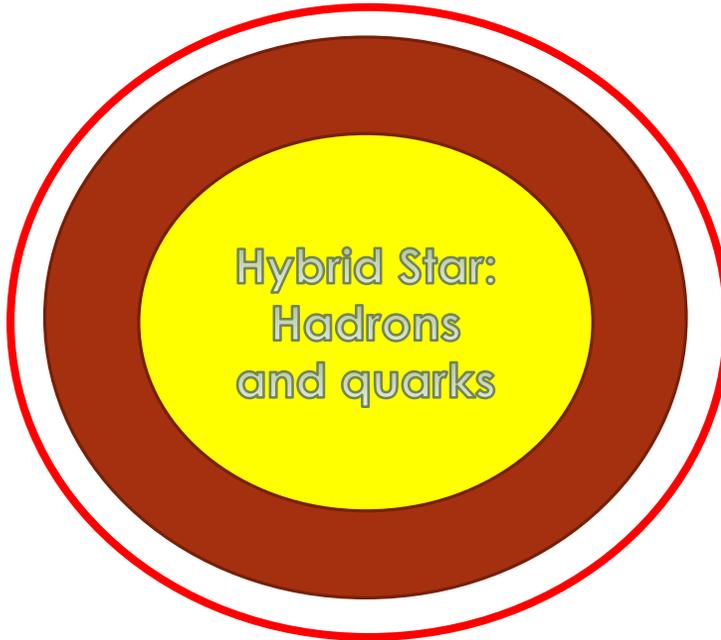
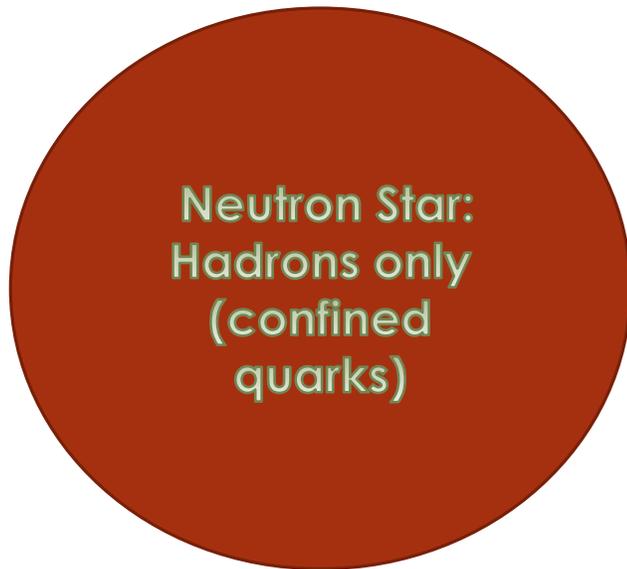
HV



G300

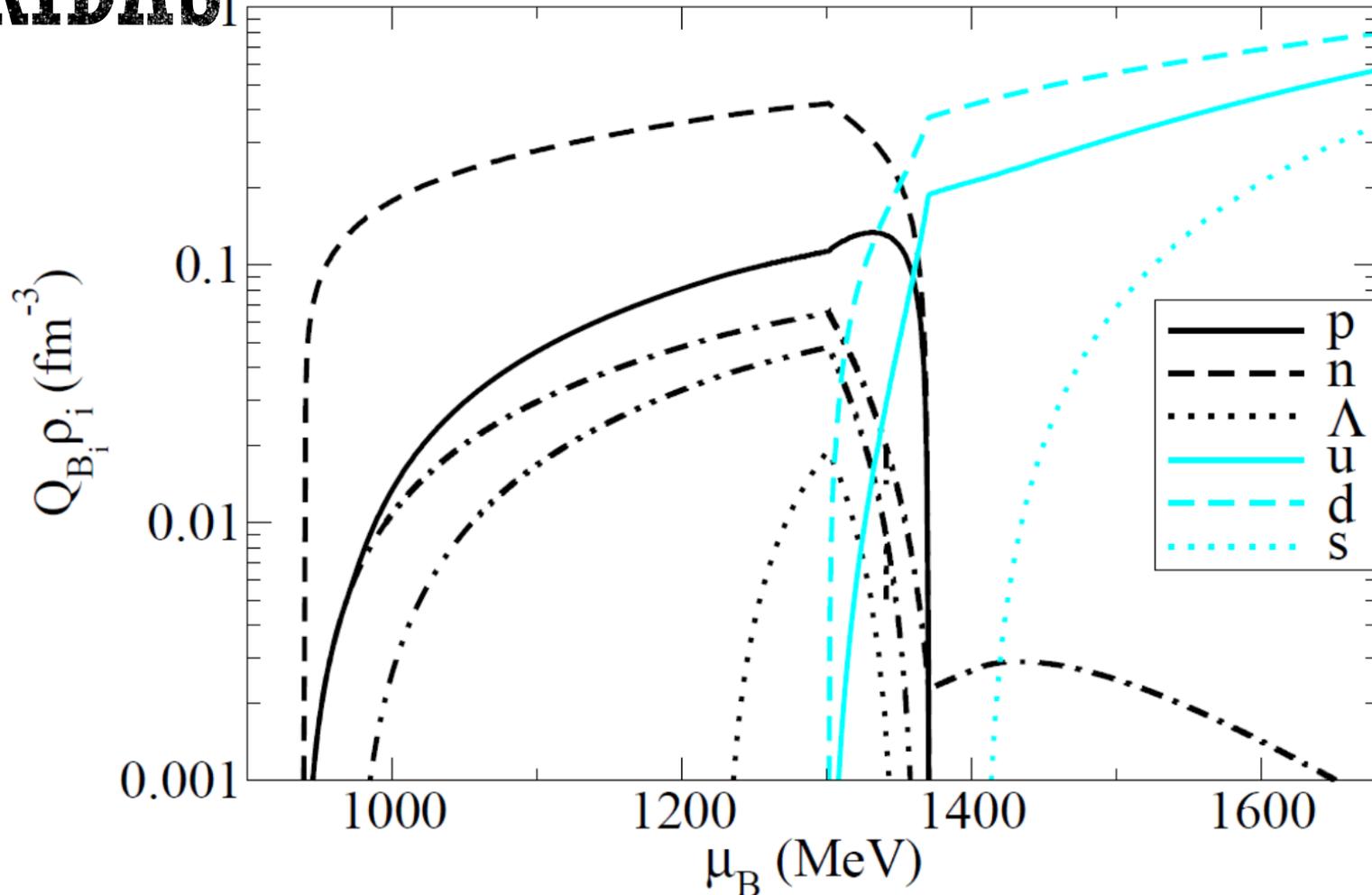


Estrelas compactas – Evolução Térmica

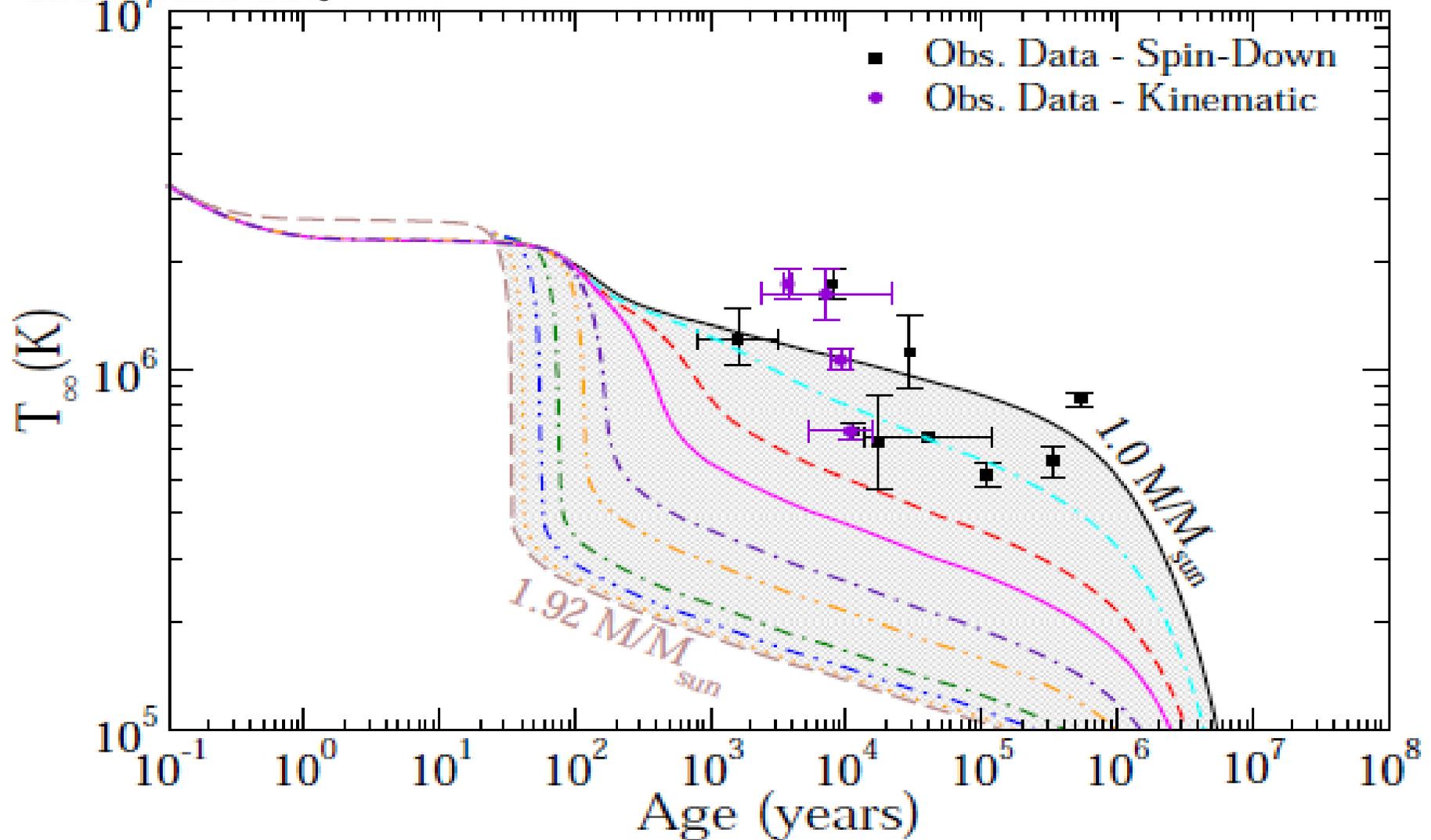


EVOLUÇÃO TÉRMICA – ESTRELAS HÍBRIDAS

Recall the composition

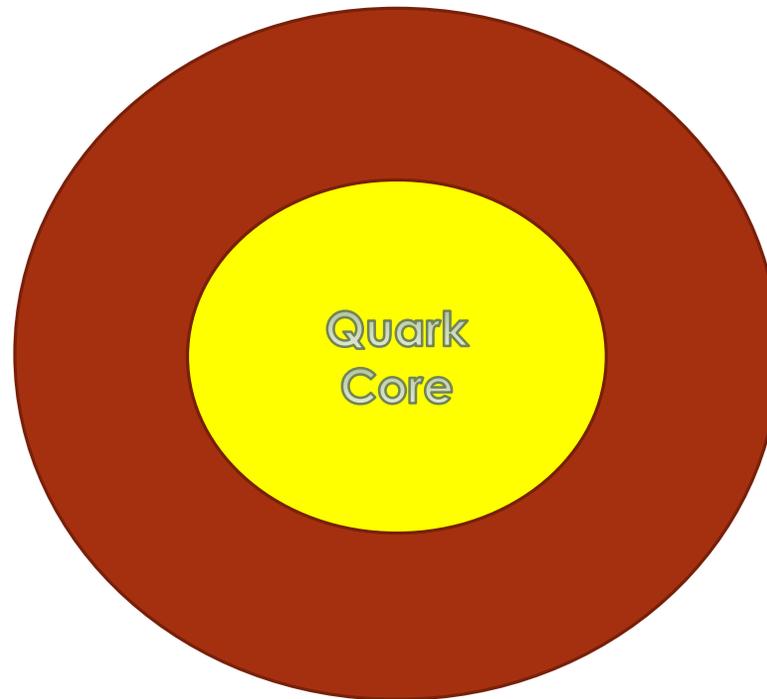


EVOLUÇÃO TÉRMICA – ESTRELAS HÍBRIDAS

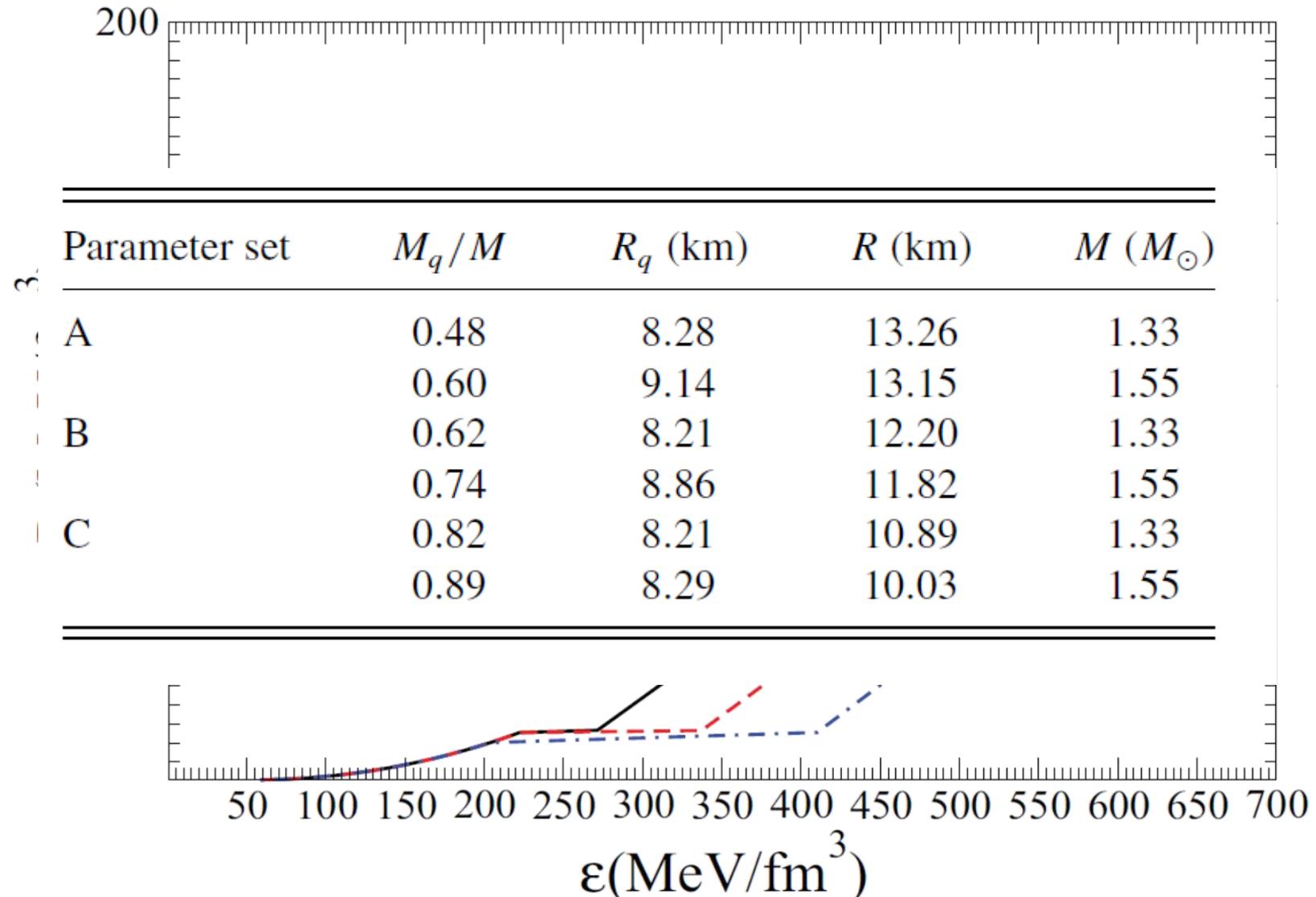


EVOLUÇÃO TÉRMICA — ESTRELAS HÍBRIDAS

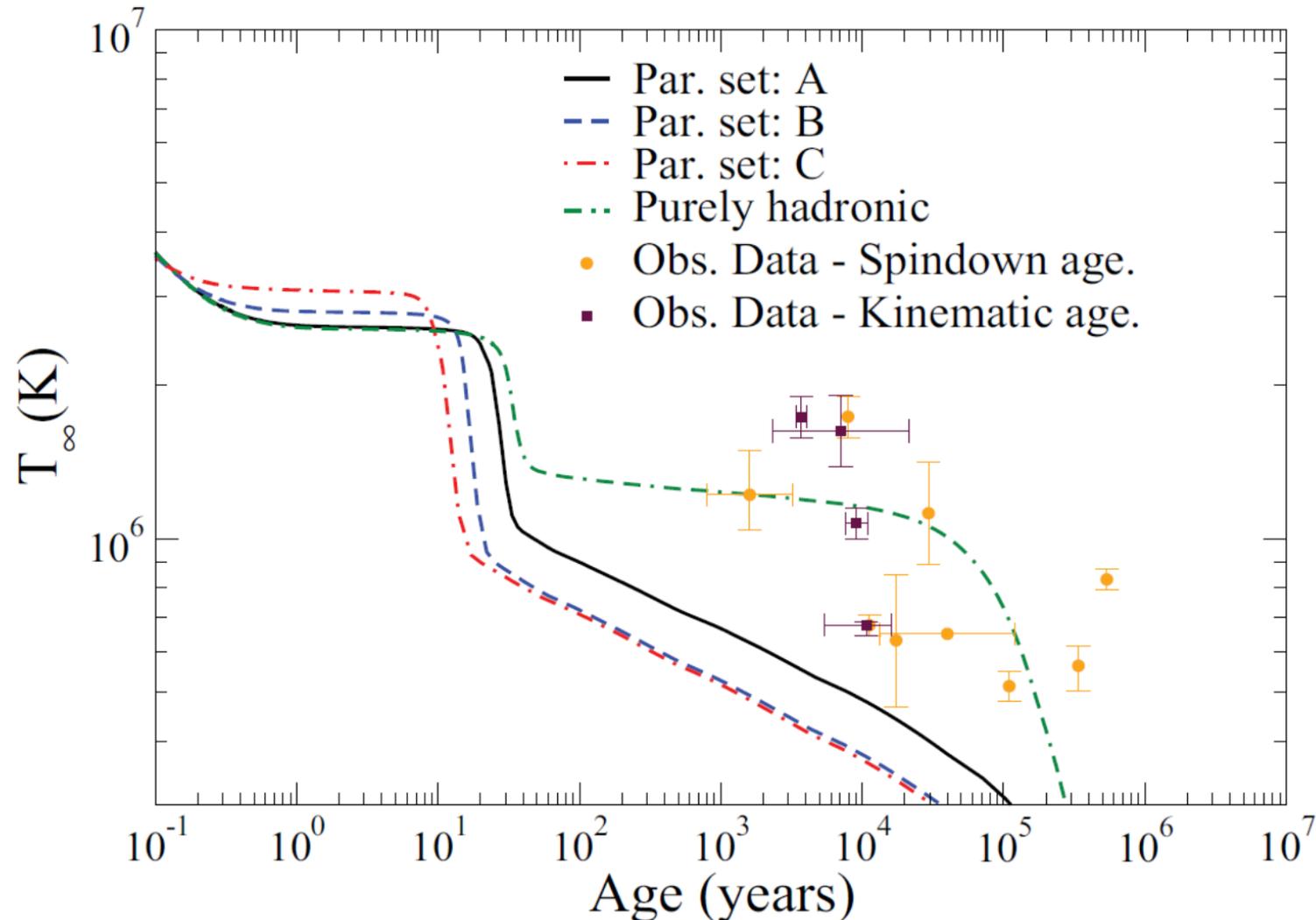
■ A importância do “miolo” de quarks



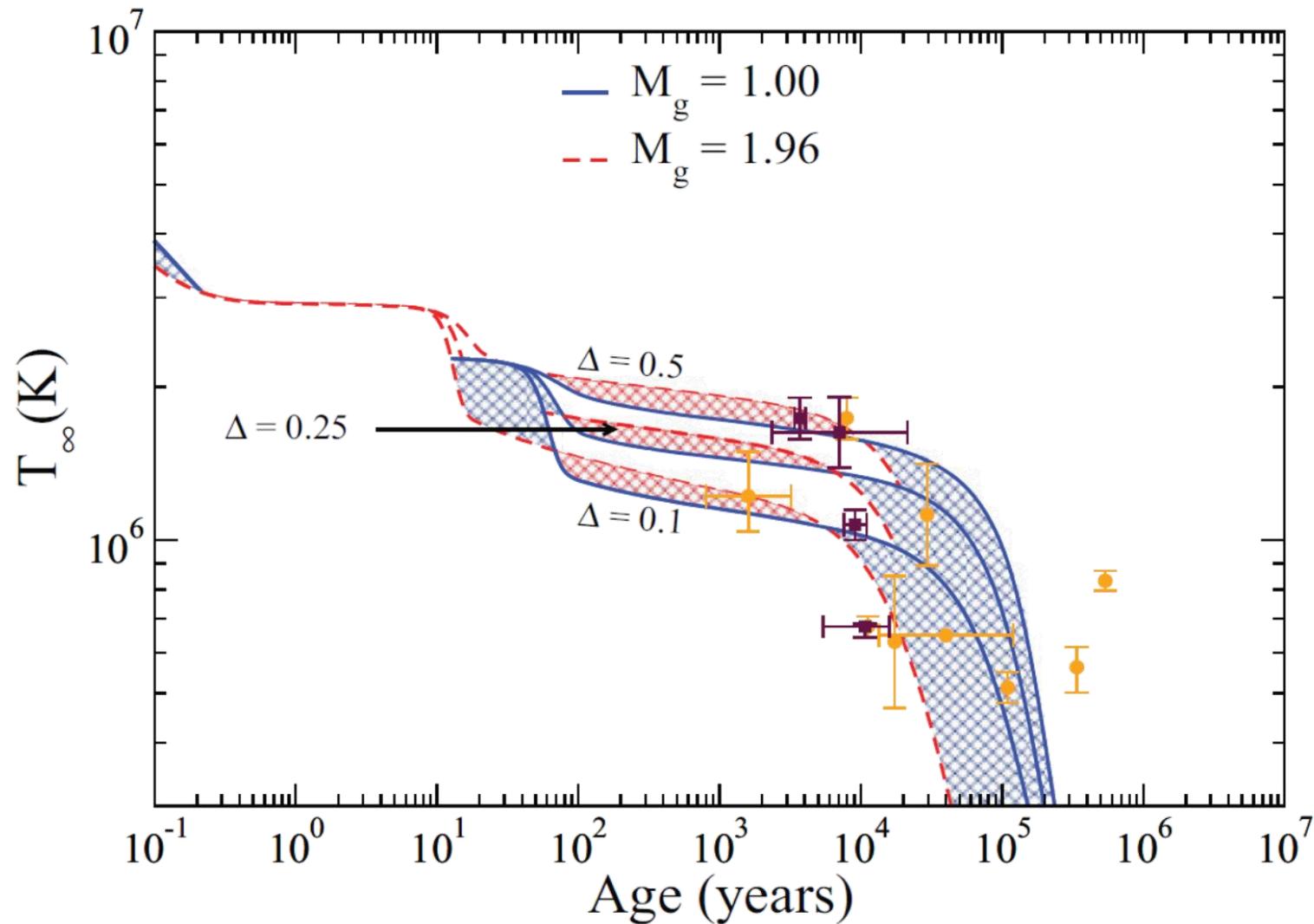
Evolução Térmica – Estrelas híbridas



EVOLUÇÃO TÉRMICA – ESTRELAS HÍBRIDAS



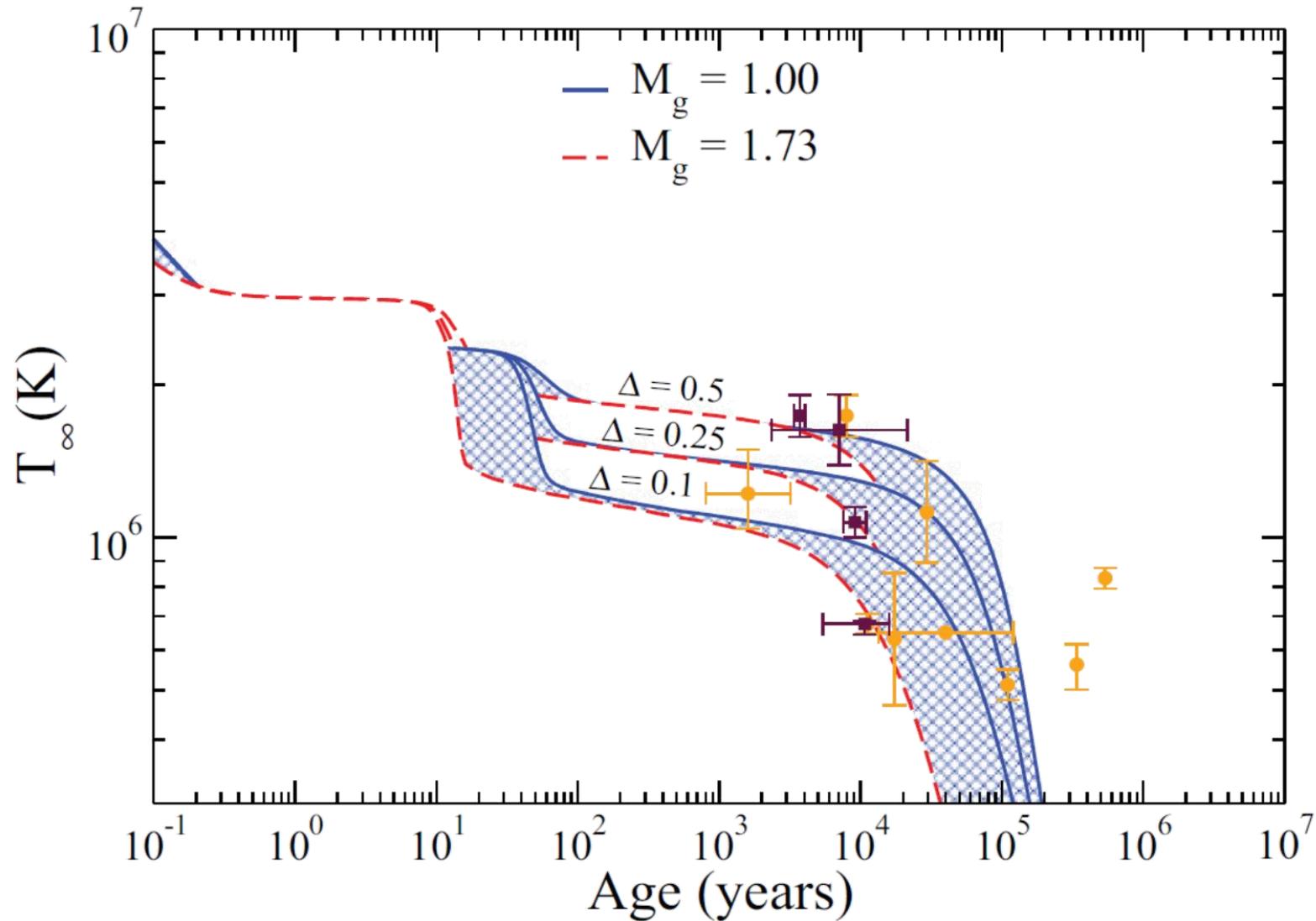
Evolução Térmica – Estrelas híbridas



Model A



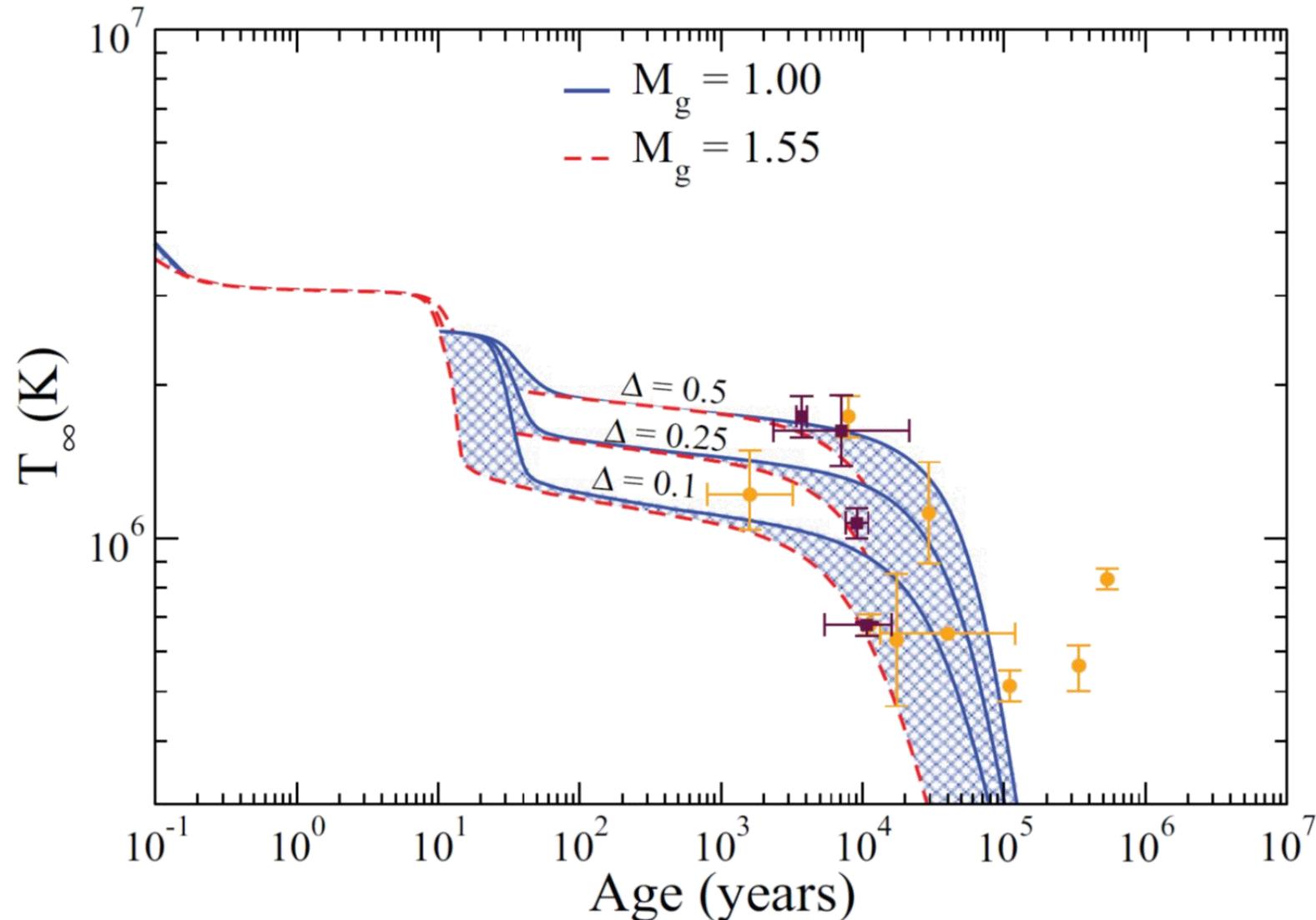
Evolução Térmica – Estrelas híbridas



Model B



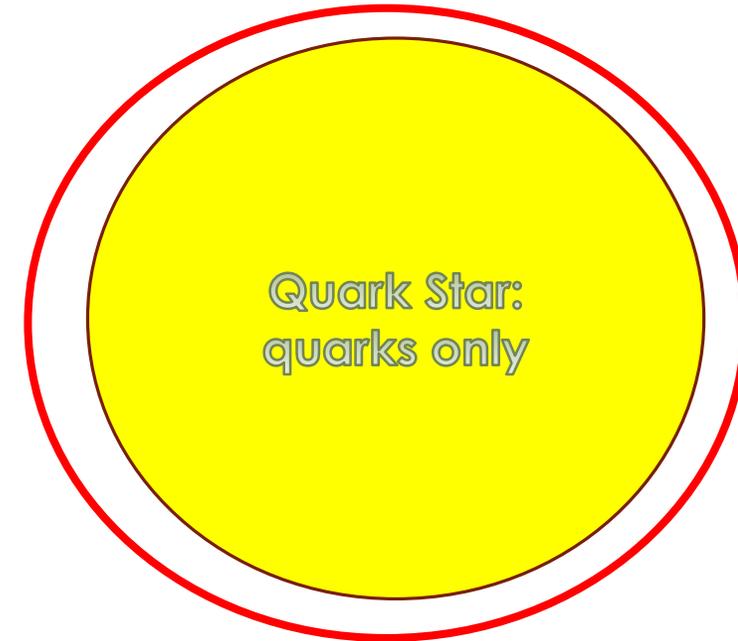
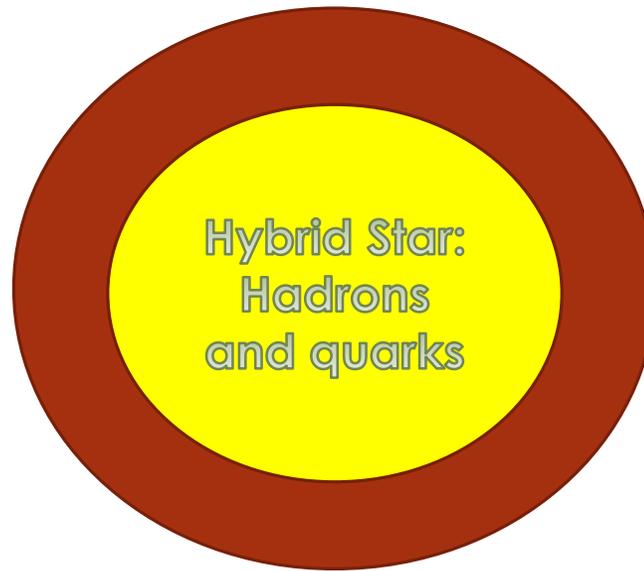
Evolução Térmica – Estrelas híbridas



Model C

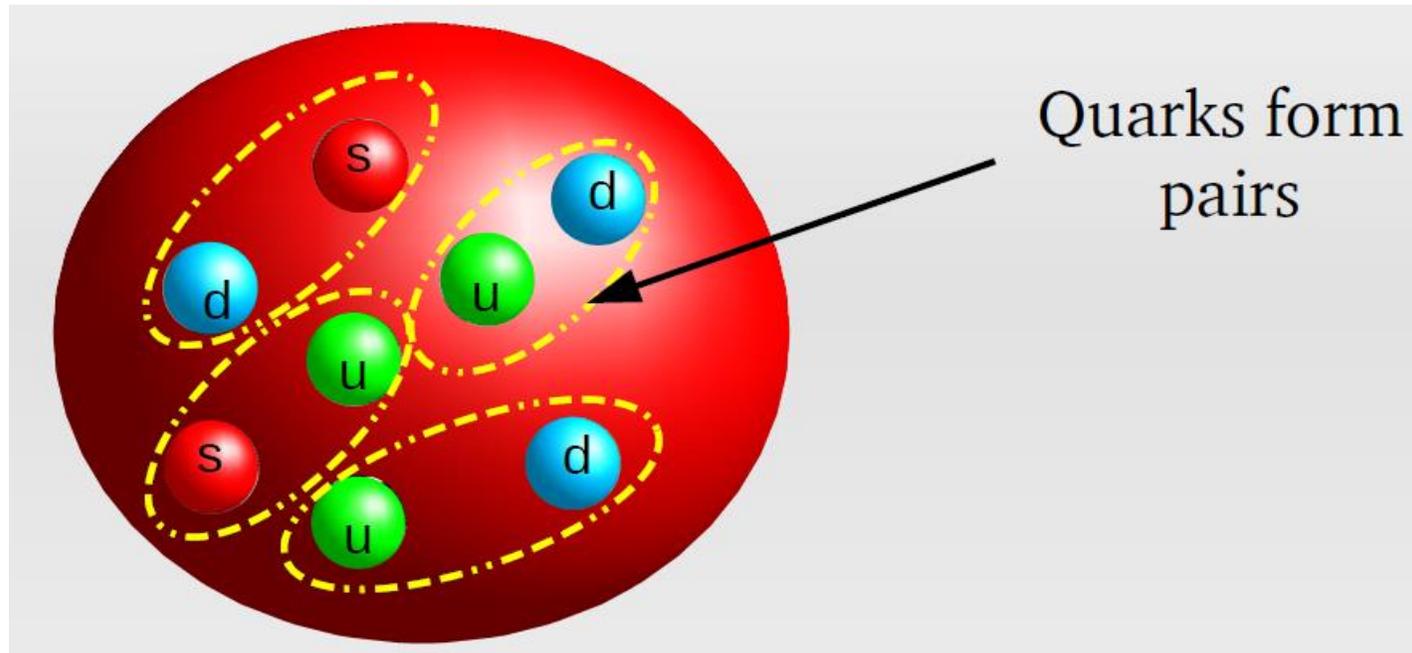


Estrelas compactas – Evolução Térmica



EVOLUÇÃO TÉRMICA— ESTRELAS DE QUARKS

- Matéria de quarks supercondutora.
- Supressão da emissão de neutrinos e redução do calor específico



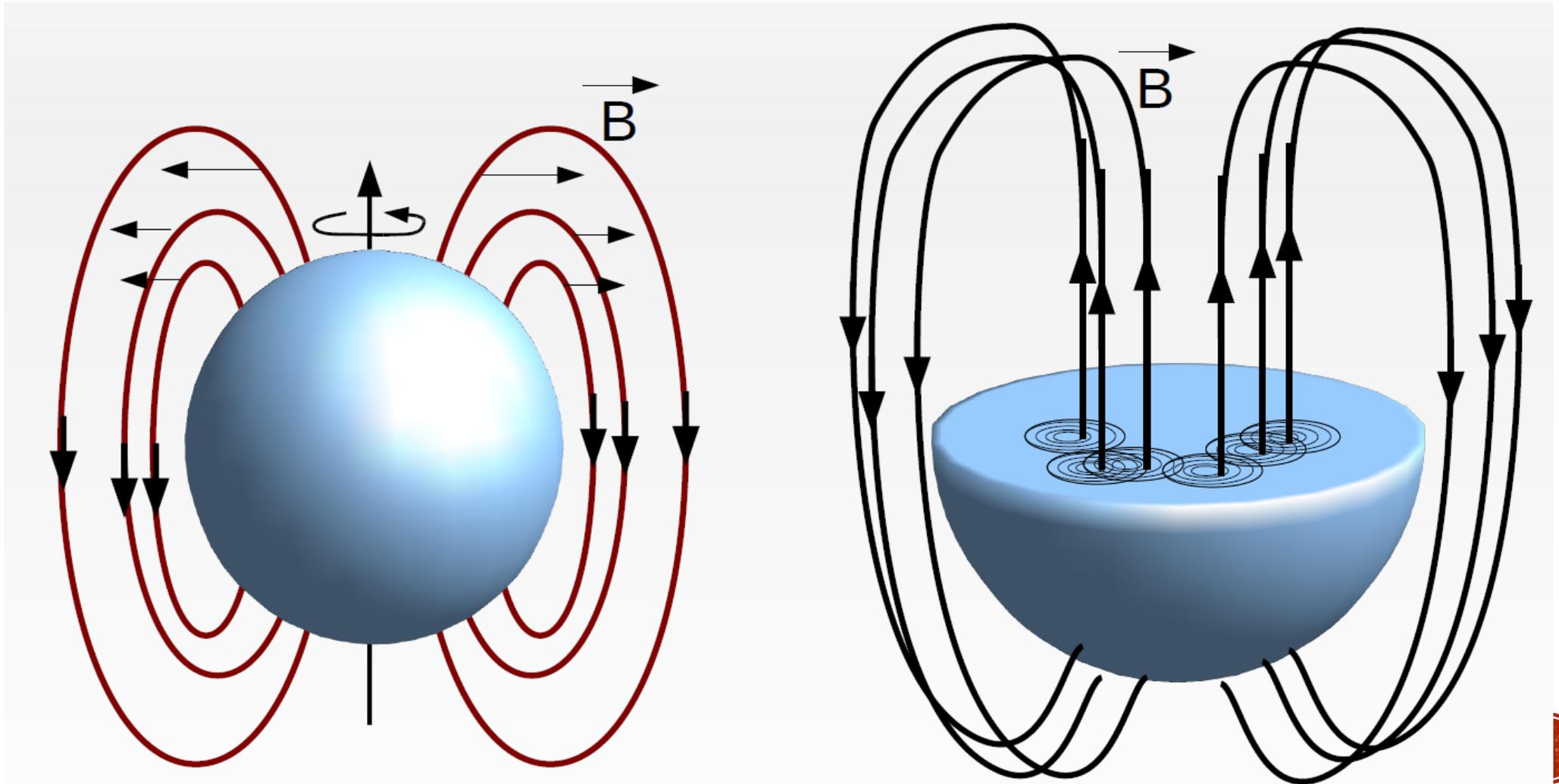
$$\epsilon_\nu \rightarrow \epsilon_\nu e^{-(\Delta/kT)}$$

$$C_{v,\text{CFL},Q} = 3.2C_Q \left(\frac{T_c}{T}\right) \times \left[2.5 - 1.7 \left(\frac{T}{T_c}\right) + 3.6 \left(\frac{T}{T_c}\right)^2 \right] e^{-\Delta/(\kappa_B T)}$$



EVOLUÇÃO TÉRMICA— ESTRELAS DE QUARKS

Processo de expulsão de vórtices.



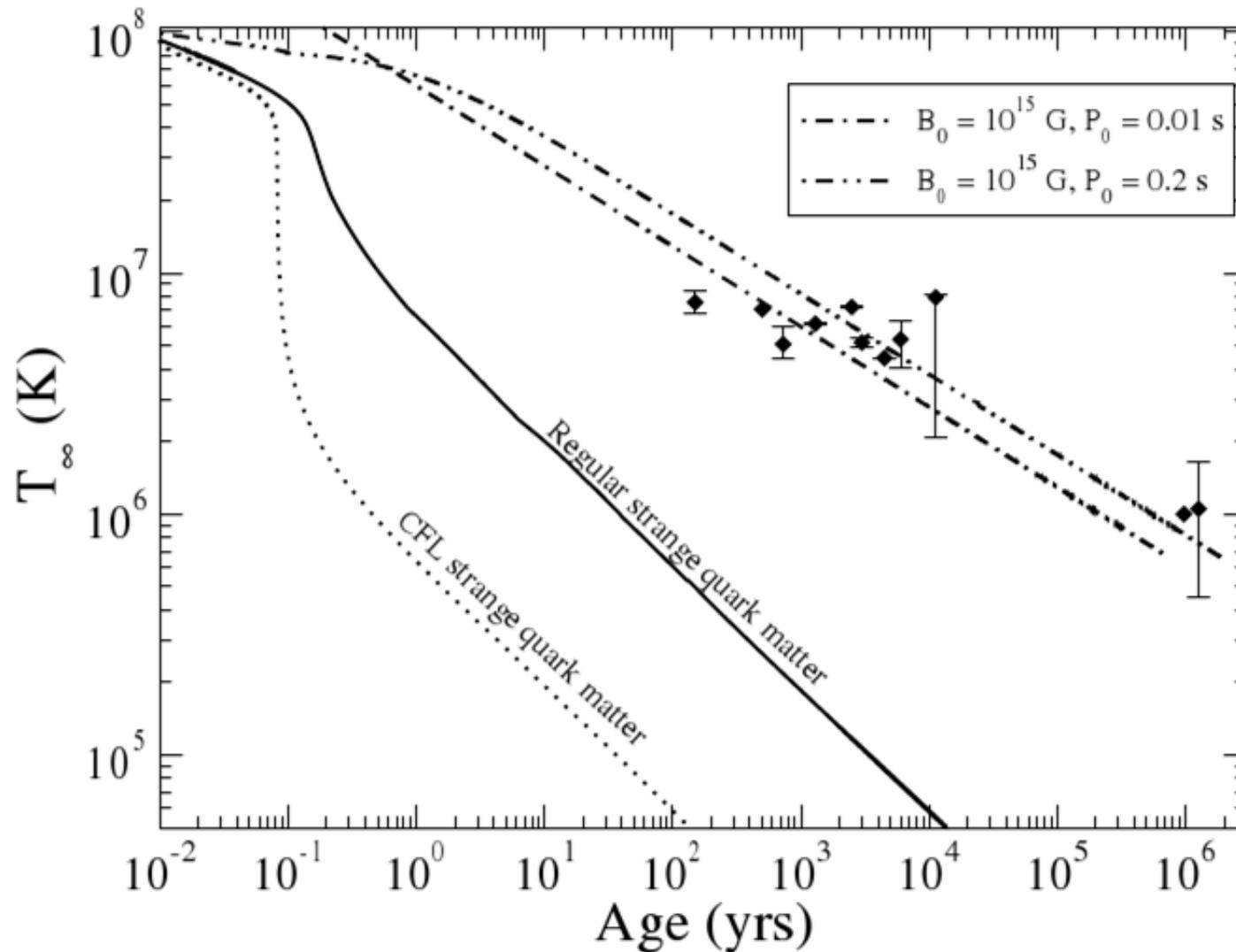
Evolução Térmica— Estrelas de Quarks

- Soft Gamma-Ray Repeaters (SGR's) e Anomalous X-Ray Pulsars (AXP's)
- Emissão de flashes irregulares e ultra-energéticos de radiação X e Gamma
- Temperaturas observadas muito altas.

Label	Name (K)	$T \times 10^6$ (10^3 years)	Age
A	SGR 1806-20	$7.56^{+0.8}_{-0.7}$	0.15
B	1E 1048.1-5937	$7.22^{+0.13}_{-0.07}$	2.5
C	CXO J164710.2-455216	7.07	0.5
D	SGR 0526-66	$6.16^{+0.07}_{-0.07}$	1.3
E	1RXS J170849.0-400910	$5.3^{+0.98}_{-1.23}$	6.0
F	1E 1841-045	$5.14^{+0.02}_{-0.02}$	3.0
G	SGR 1900+14	$5.06^{+0.93}_{-0.06}$	0.73
H	CXOU J010043.1-721134	$4.44^{+0.02}_{-0.02}$	4.5
I	XTE J1810-197	$7.92^{+0.22}_{-5.83}$	11.3
J	RX J0720.4-3125	$1.05^{+0.06}_{-0.06}$	1266
L	RBS 1223	$1.00^{+0.0}_{-0.0}$	974

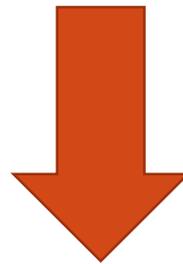


Evolução Térmica— Estrelas de Quarks



SUMÁRIO

- O estudo do resfriamento é de fato uma excelente maneira de se sondar o interior de estrelas compactas.
- Diferentes composições levam à evoluções térmicas distintas.
- Recentes avanços tecnológicos estão nos proporcionando uma grande quantidade de dados de alta qualidade.



Observações recentes e simulações modernas!

