

# ESTRELAS de NEUTRÕES:

um laboratório de física nuclear, física de partículas e  
relatividade geral!

Constança Providência

Departamento de Física  
Universidade de Coimbra



- 1 Um pouco de história...
- 2  $2M_{\odot}$ : um desafio
- 3 NS: uma previsão simples
- 4 Formação de uma estrela de neutrões (NS)
- 5 Observação de estrelas



# Quem detectou a primeira estrela de neutrões?

S. Jocelyn Bell Burnell was born in northern Ireland in 1943. After receiving a B.S. degree in physics from Glasgow University, Scotland, she went to Cambridge University, England, where she earned her doctorate in radio astronomy in 1969. Since then she has done research in the newest branches of astronomy involving gamma-rays and x-rays. In 1978 she received the American Tentative Society Award for her pulsar research. Currently she is a research scientist at the Mullard Space Science Laboratory of the University College London.



Burnell

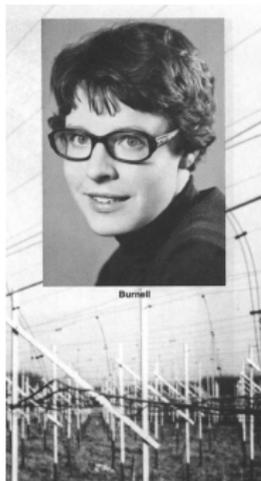
**Espetámos mais de 1000 postes e 2000 dipólos entre eles, Jocelyn Bell**

Cambridge University

"We put up over a thousand posts and strung more than 2000 dipoles between them."



# Quem detectou a primeira estrela de neutrões?



Nobel da Física em 1974

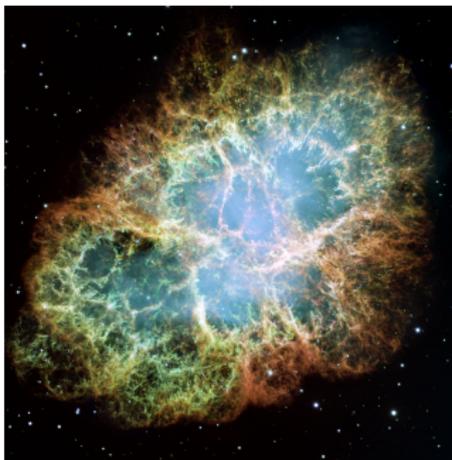
Em 1967, **Jocelyn Bell e Antony Hewish** detetam a emissão de pulsos regulares de ondas de radio. Chamam a este fenómeno:

**Little Green Man - 1**

A radiação foi interpretada como sendo emitida por uma **estrela de neutrões isolada e em rotação.**



# Nebulosa Caranguejo e Pulsar do Caranguejo



Remanescente da supernova **SN 1054** registrada como uma estrela visível à luz do dia, por **astrónomos chineses e árabes em 1054**.

Fica à distância de cerca de **6 300 anos-luz da Terra**. No seu interior: **um pulsar** descoberto em 1968.



# Pulsar do Caranguejo PSR B0531+21

Propiedades de uma estrela de neutrões “canónica”

---

---

Nome: PSR B0531+21

Massa:  $1.4 M_{\odot}$

Densidade:  $10^{15} \text{ g/cm}^3$

Temperatura da superfície:  $10^6 \text{ K}$

Período: 33 s

Constelação: Taurus

Raio:  $\sim 10 \text{ Km}$

Pressão:  $10^{29} \text{ atm}$

velocidade de escape:  $0.6 c$

Campo magnético:  $10^{12} \text{ G}$

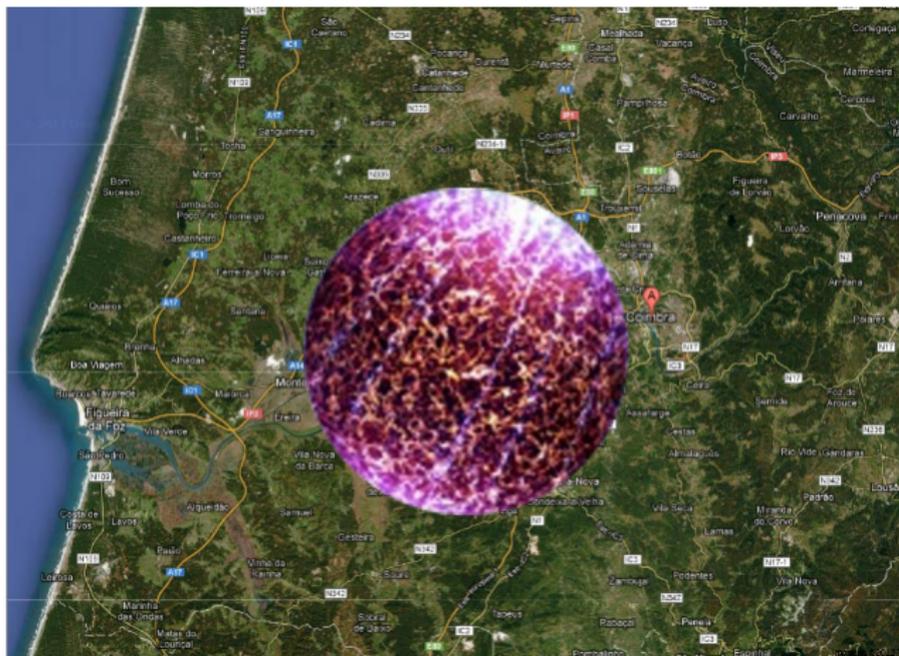
---

---



# Tamanho de uma estrela de neutrões

Diâmetro: 20-30 km



# O Pai da física nuclear

Ernest Rutherford, 1912



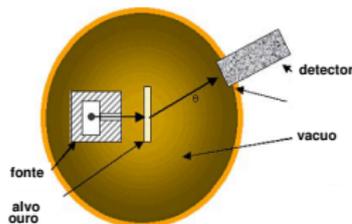
## Ernest Rutherford

Propõe em 1911:

o modelo do átomo

nasce a Física Nuclear!

Ganhou o prémio Nobel da Química em 1908.



**modelo de Rutherford:**

99% da massa do átomo  
concentrada num ponto



# Massa limite de Chandrasekhar

Colapso de uma anã branca - 1931

## Subramanyan Chandrasekhar

Prémio Nobel em 1983 (com William A. Fowler)  
pela sua teoria matemática dos buracos negros



Quando elétrões se tornam relativistas  
a pressão que exercem enfraquece.

$$p_{rel} \sim \rho^{4/3}, \text{ vs } p_{nonrel} \sim \rho^{5/3}$$

Uma anã branca com  $M > 1.4M_{\odot}$  colapsa!

*For a star of small mass*

*the white-dwarf stage is an initial step  
towards complete extinction.*

*A star of large mass*

*cannot pass into the white-dwarf stage  
and one is left speculating on other possibilities.*



# Estrela de neutrões

Uma primeira proposta?



## Lev Landau

no artigo “On the theory of stars” (1932)

Calcula a massa máxima de uma estrela  
Propõe a existência de estrelas densas  
formadas por um núcleo atômico gigante



# O neutrão

James Chadwick, 1932



## James Chadwick

### Descobre o neutrão:

- partícula neutra, sem carga eléctrica
- não é repelida pela carga eléctrica do núcleo.
- penetra os núcleos
- divide os núcleos em duas ou mais partes.

Ganhou o prémio Nobel em 1935.



# Estrela de neutrões: a primeira proposta!

Walter Baade e Fritz Zwicky, 1933



W Baade



F Zwicky

Logo após a descoberta do neutrão, em 1933:

os astrónomos **Walter Baade e Fritz Zwicky** propõem a existência de **estrelas de neutrões** com um raio de cerca de **10 km**

Seriam o resultado de uma **supernova!**

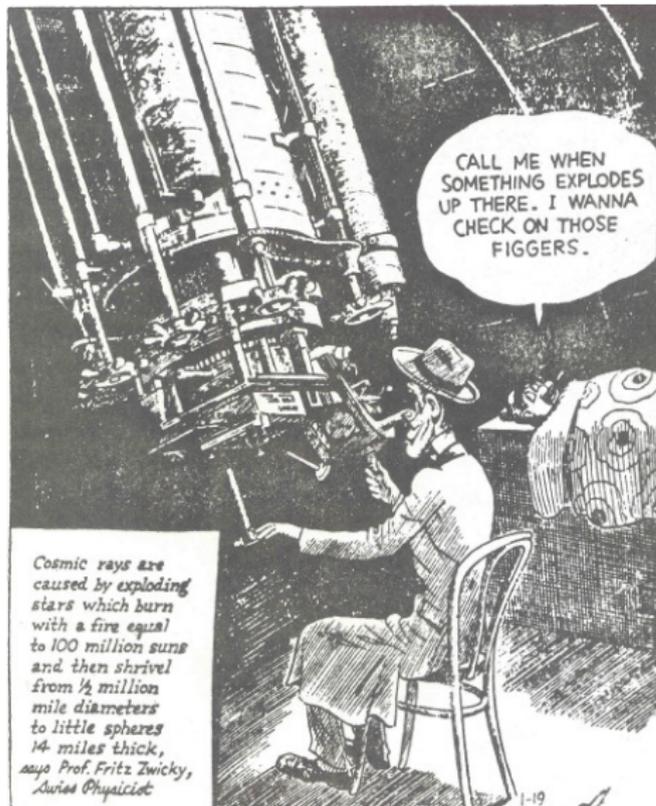
*With all reserve we advance the view that supernovae represent the transition from ordinary stars into “neutron stars”, which in their final stages consist of extremely closed packed neutrons*

**Como observar um objecto tão pequeno?**



# Estrela de neutrões: a primeira proposta!

Los Angeles Times de 19 Janeiro de 1934.

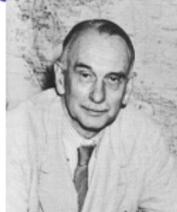


“Cosmic rays are caused by exploding stars which burn with a fire equal to 100 million suns and then shrivel from 1/2 million mile diameters to little spheres 14 miles thick, says Prof. Fritz Zwicky, Swiss Physicist.”



# Limite de Tolman-Oppenheimer-Volkov (TOV)

Equação de TOV, 1939



Tolman



Oppenheimer



- Soluções estáticas das equações de campo de Einstein para um fluido perfeito com simetria esférica

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{G\epsilon(r) m(r) \left[ 1 + \frac{p(r)}{\epsilon(r)c^2} \right] \left[ 1 + \frac{4\pi r^3 p(r)}{m(r)c^2} \right]}{r^2 \left[ 1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r} \right]}$$

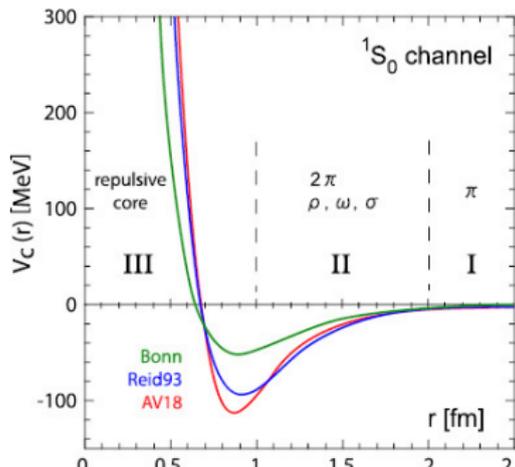
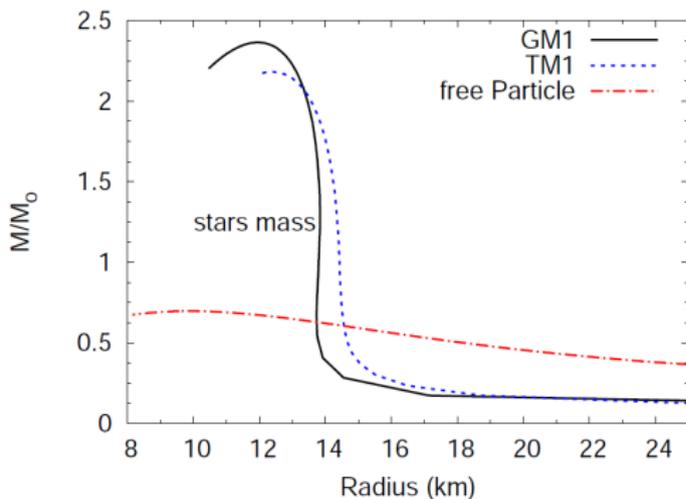
$$m(r) = 4\pi \int_0^r dr' r'^2 \epsilon(r')$$

- NS formada por um gás de Fermi de neutrões livres: massa máxima de uma estrela estável  $\sim 0.7M_{\odot}$ .

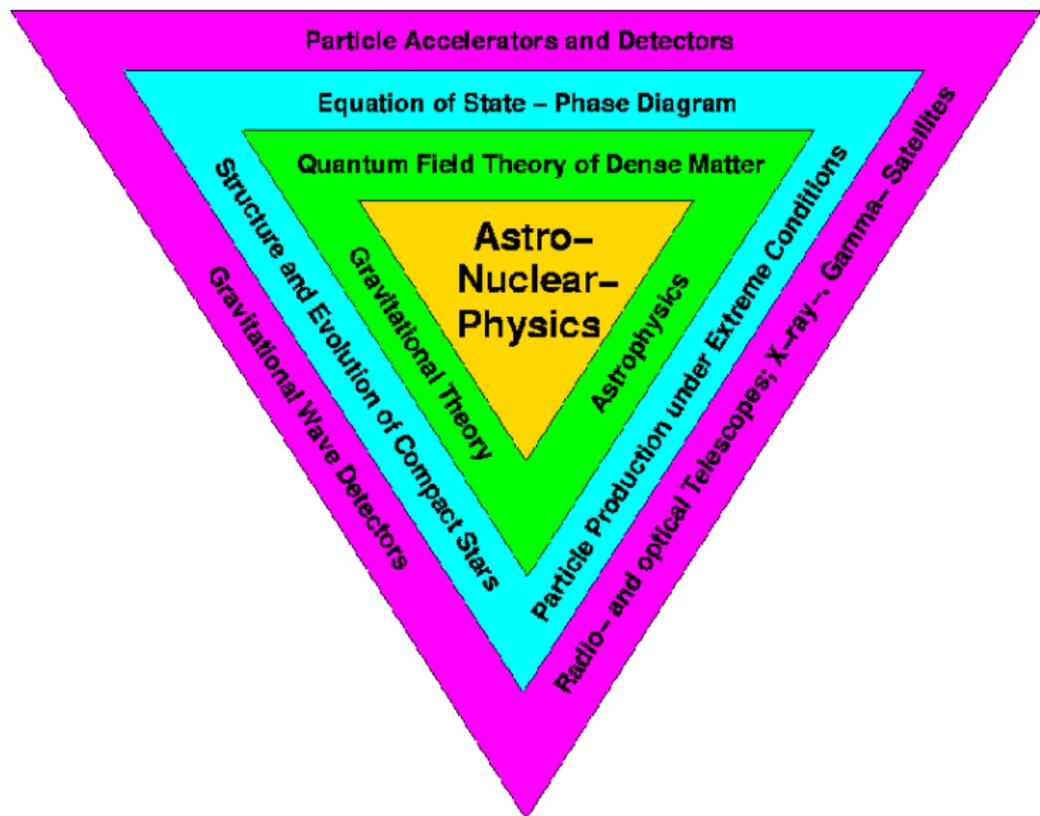
**Se  $M > 0.7M_{\odot}$  estrela colapsa num buraco negro!**

# Interação nuclear

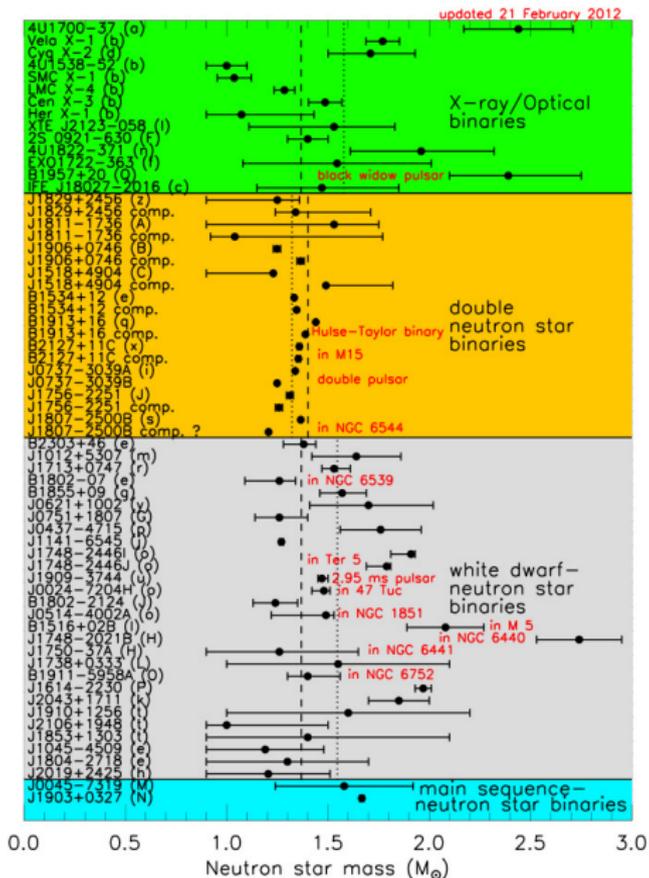
- $0.7 M_{\odot} \rightarrow$  valor não realístico, falta a interação nuclear
- As massas das estrelas de neutrões tornam a astrofísica e física nuclear interligadas!



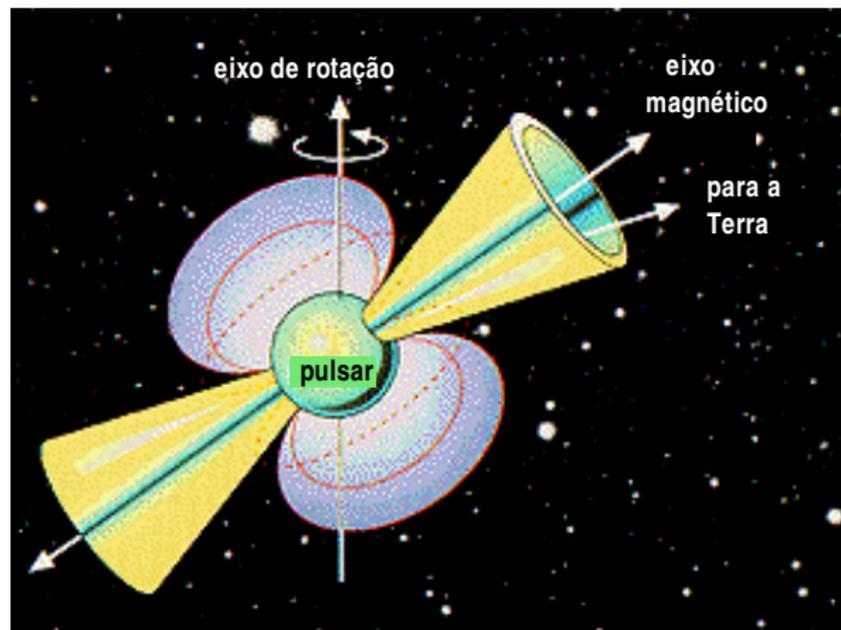
# Astro-Nuclear-Physics



# Massas de Estrelas de Neutrões



# O que é um pulsar?



**Pulsares:** são estrelas de neutrões em rotação emitindo ondas electromagnéticas com **intensidade variável** em **períodos regulares**.  
O período varia de 0.001 segundo a 2 segundo

# Ouvir um Pulsar

<http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/Education/Sounds/sounds.html>

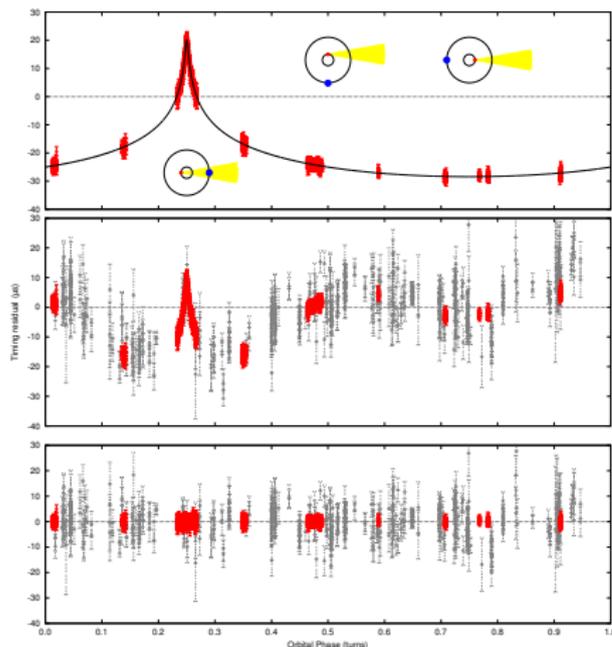


# Pulsar PSR J1614-2230, binário com anã branca

Demorest et al, Nature 467 (7319) 2010

Descoberto pelo Radio-telescópio Parkes (Austrália), 2006

**Propriedades:** **Mass**  $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$   
**Radius**  $13 \pm 2$  km  
**Período rotação** 3.15 ms



**Mass medida com  
grande precisão pelo  
“atraso de Shapiro”**

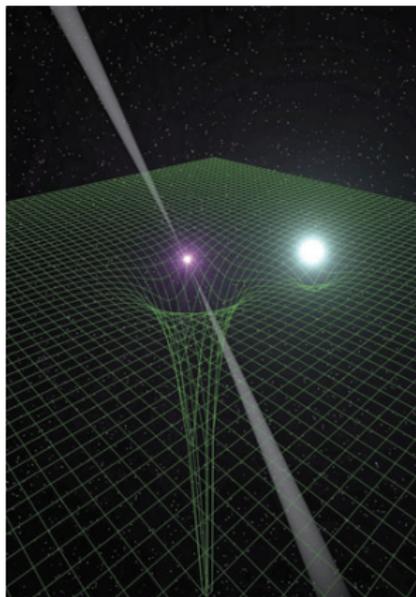


# Pulsar PSR J0348+0432, binário com anã branca

J Antoniadis, P. Freire et al, Science 340 (6131) 2013

Descoberto pelo Radio-telescópio Green Bank Telescope, USA, 2007

<b>Propriedades:</b>	Massa	$2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$
	Raio	$13 \pm 2$ km
	Período órbita	2h 27m
	Período rotação	39 ms

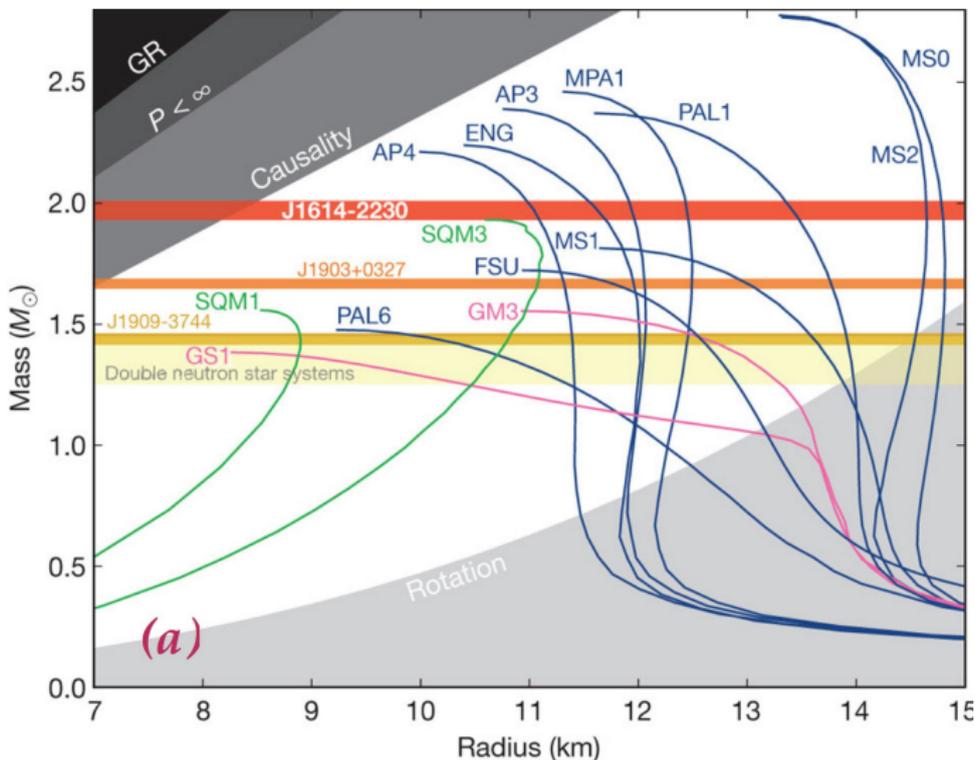


**Grande massa e pequeno período orbital permite medição do decaimento da órbita devido à emissão de ondas gravitacionais previstas pela teoria da relatividade**



# Que restrições podemos impor?

Gráficos Massa/Raio



# $2M_{\odot}$ : que questões são colocadas ?

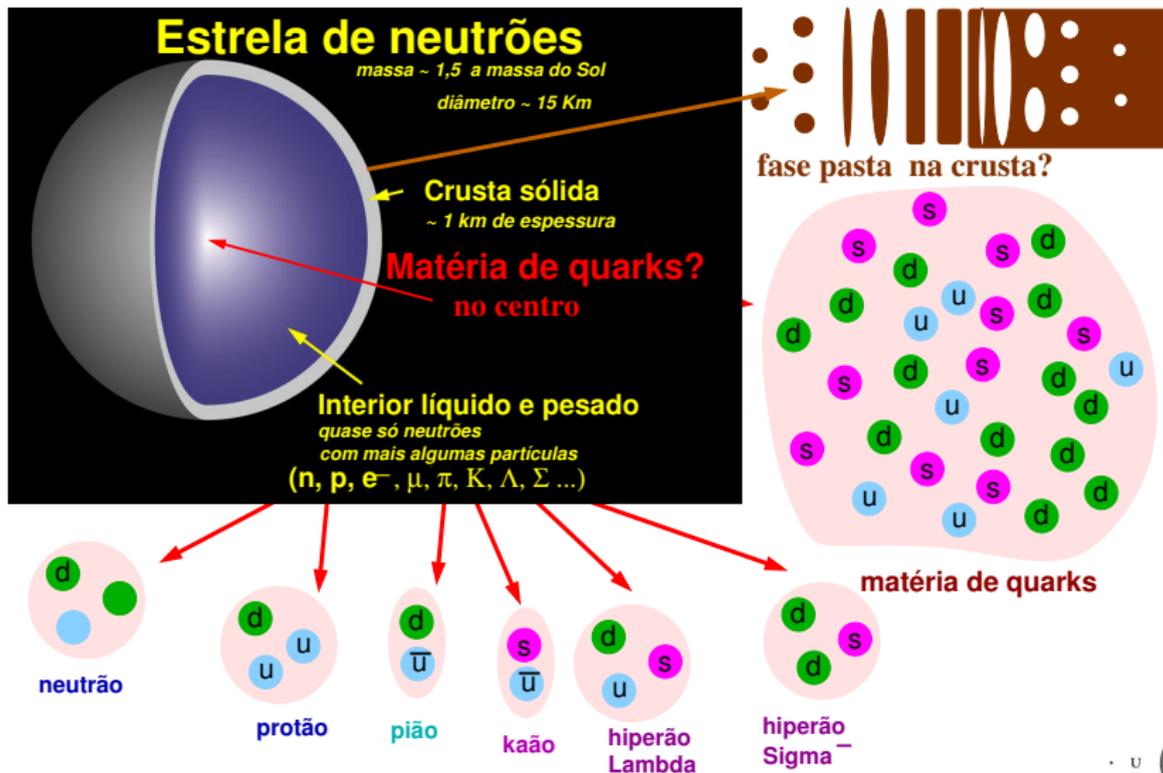
Haverá matéria exótica no interior duma NS?

## Quais são os constituintes de uma estrela de neutrões?

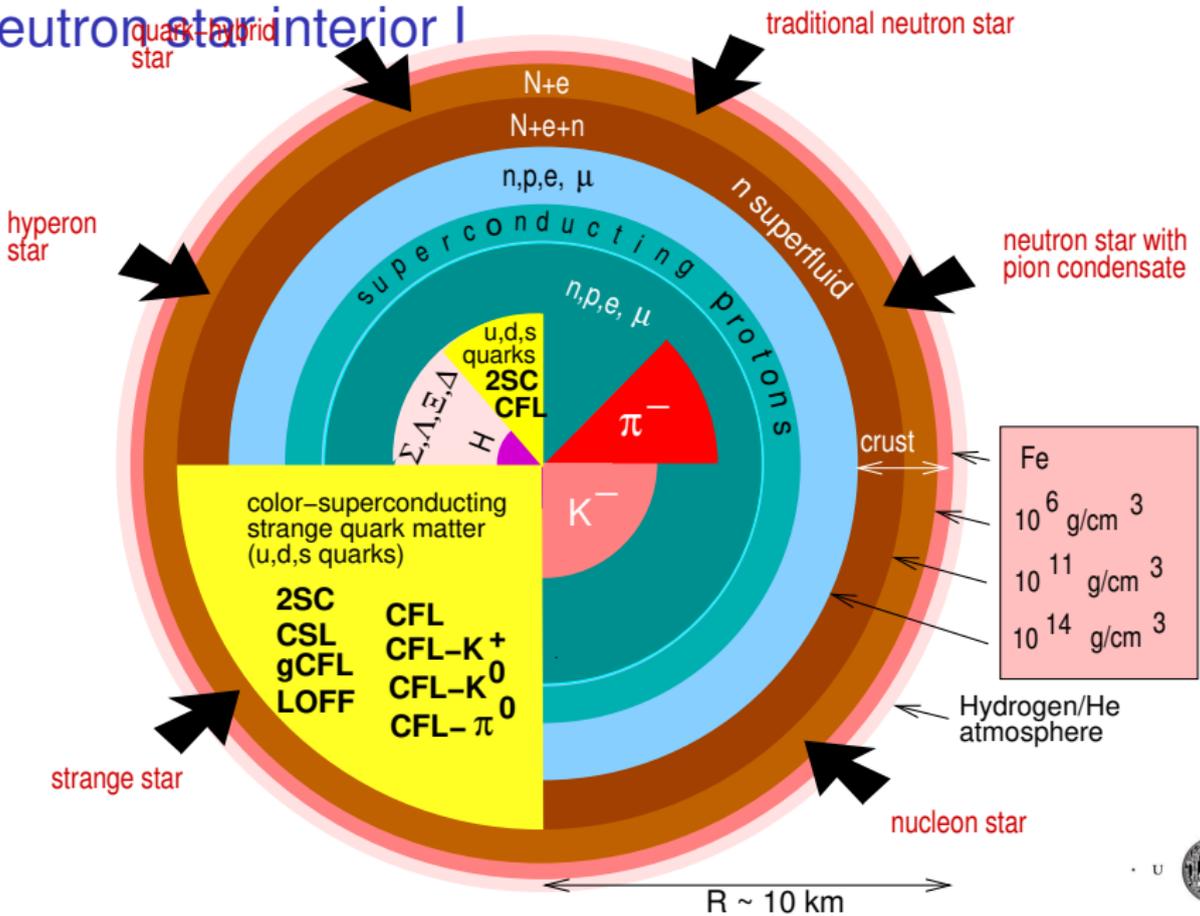
- ▶ neutrões, prótões, electrões
- ▶ se  $\rho \gtrsim 0.11 \text{ fm}^{-3}$ ,  $\mu_e > m_{\mu} \rightarrow$  é energeticamente favorável o aparecimento de muões
- ▶ se  $\rho \gtrsim 0.3 \text{ fm}^{-3}$ ,  $\mu_n > m_{\Lambda} \rightarrow$  é energeticamente favorável o aparecimento dos hiperões  $\Lambda$
- ▶ se  $\rho \gtrsim 0.5 - 0.6 \text{ fm}^{-3}$ ,  $\omega_K \sim \mu_e \rightarrow$  aparecimento de um condensado de kaões



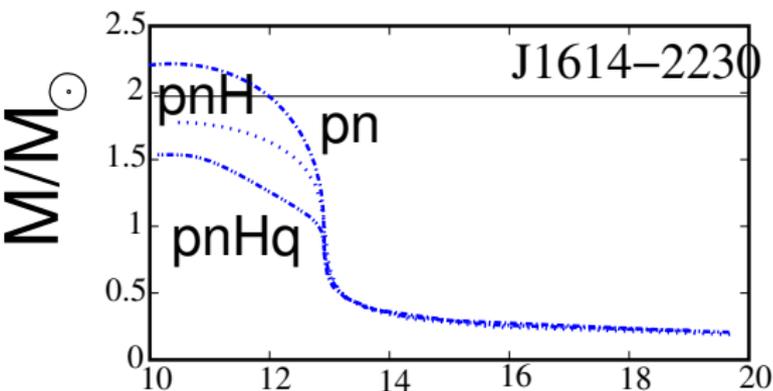
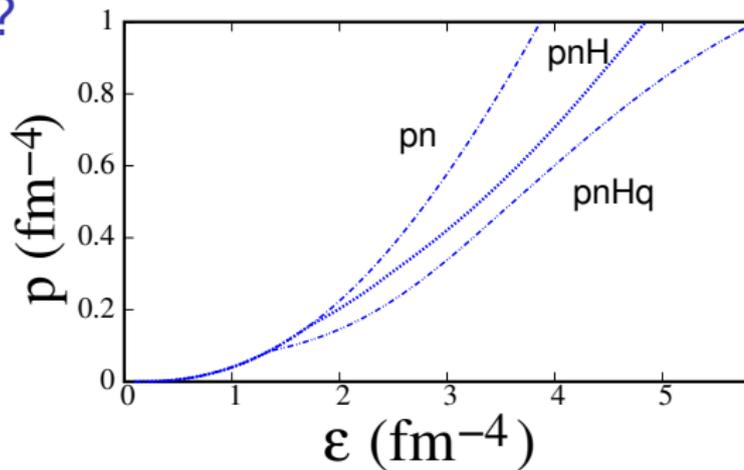
# De que é feita uma estrela de neutrões?



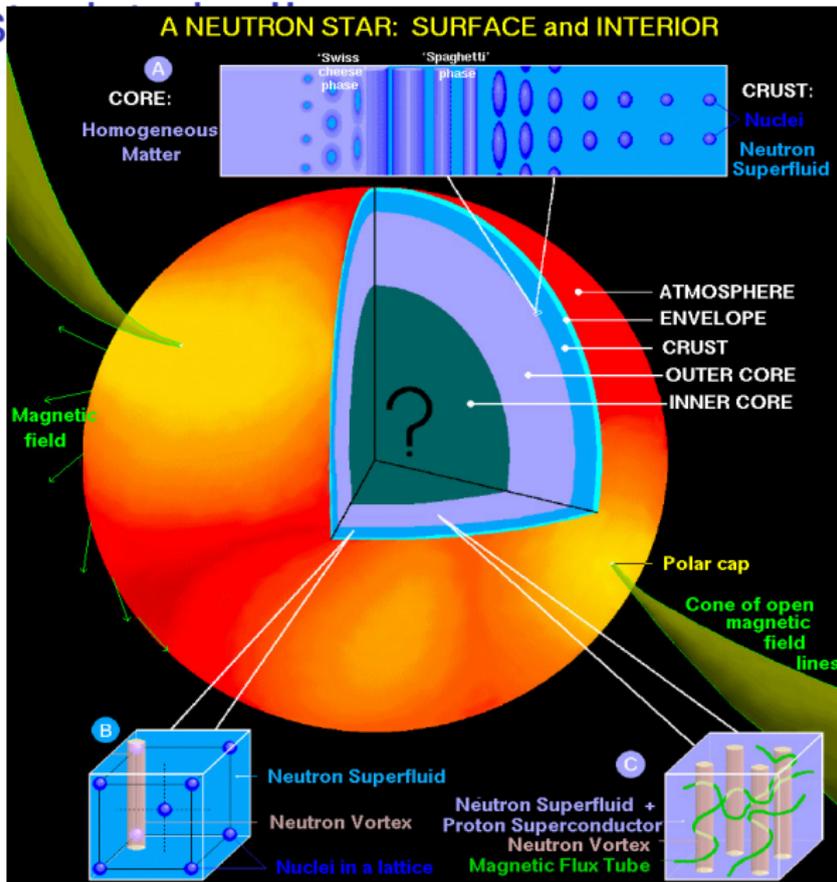
# Neutron star interior I



# $2M_{\odot}$ : matéria exótica excluída?



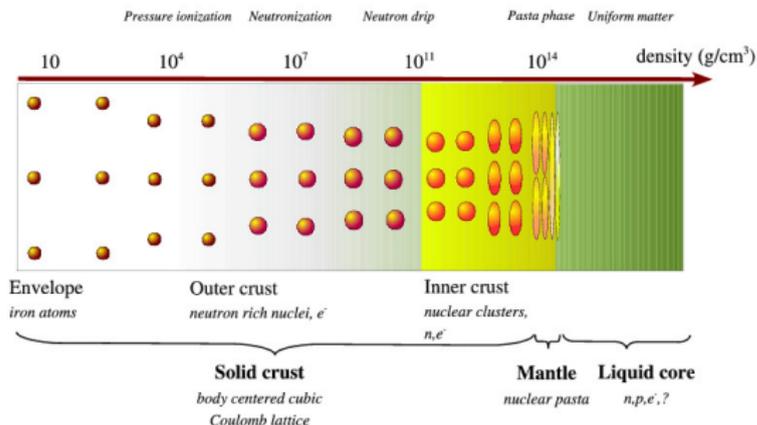
# Neutron stars



Dany Page, UNAM, México

# Crust

## cold catalyzed matter



(Chamel and Haensel, Living Reviews 2008)

- Surface on NS:  $p = 0$
- Lowest energy state of hadronic matter at zero compression and T: <sup>56</sup>Fe
- a bit deeper: nuclei embedded in a electron sea
- $\rho > \rho_{drip}$ : nucleons form clusters not necessarily spherical that take up lattice positions in a background gas of neutrons and electrons

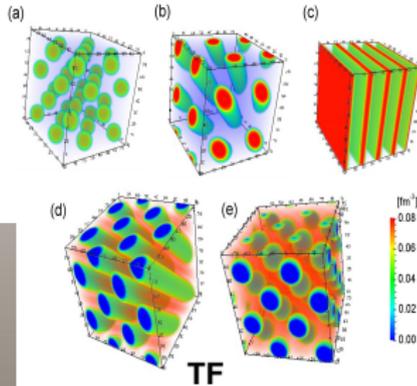
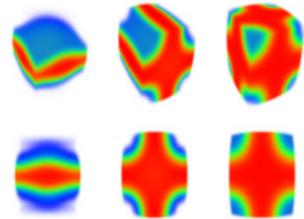
# Pasta phase

- In the inner crust the attractive nuclear and repulsive atomic length scales are comparable
  - ▶ leads to a complex ground state
  - ▶ gives rise to non-spherical shapes (rod, slabs, tubes, bubbles...)
  - ▶ should have unusual dynamical and transport properties



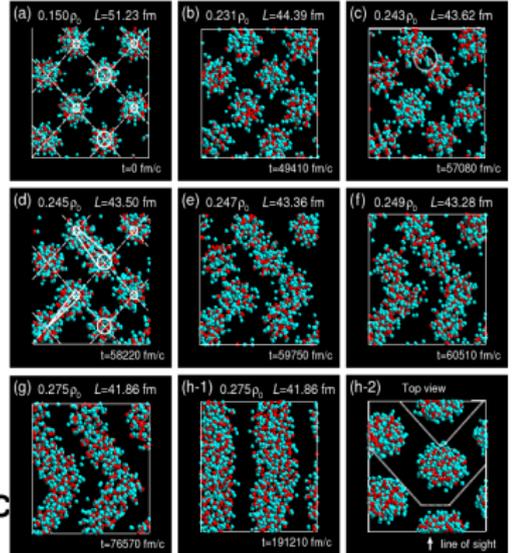
# Pasta phase

## Different methods



TF

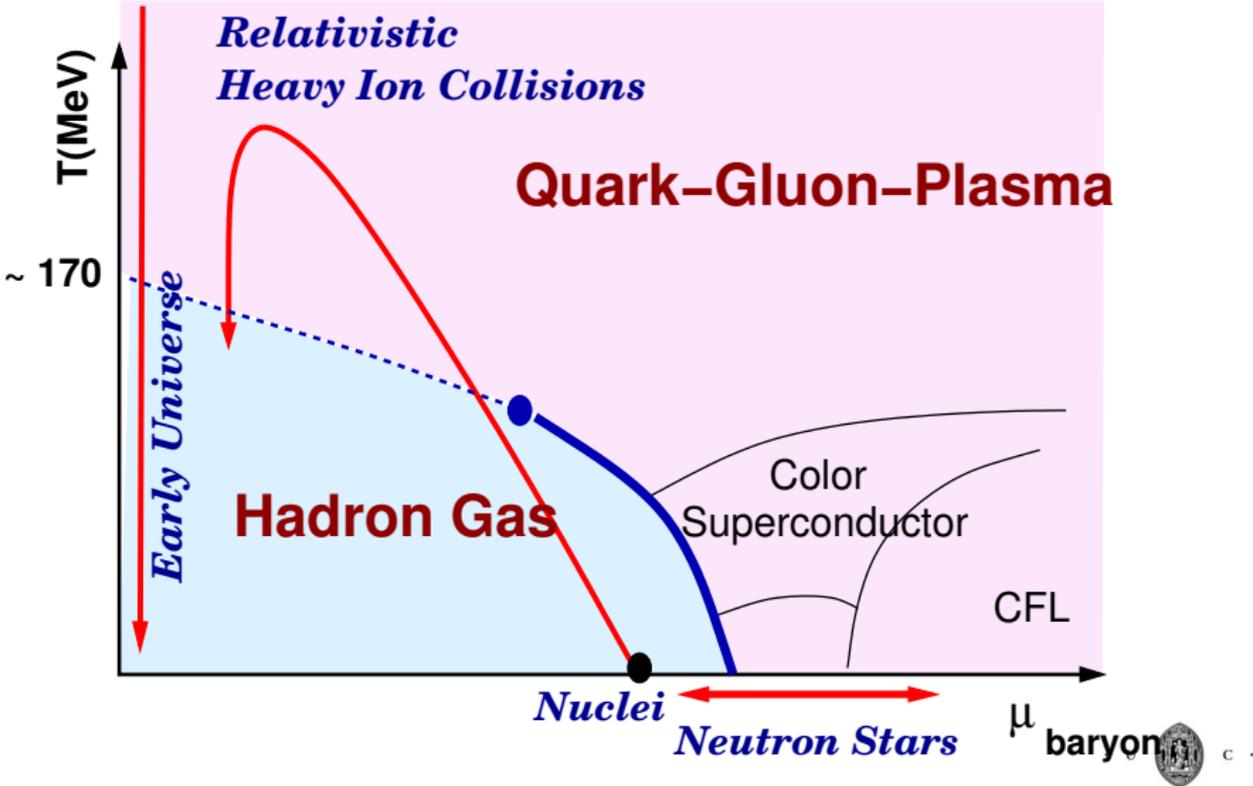
QMC



3D-HF (Newton & Stone),  
CMD (Horowitz et. al),  
QMD (Watanabe et al)  
TF (Okomada et al)



# Estrelas de neutrões e o Diagrama de fases da QCD



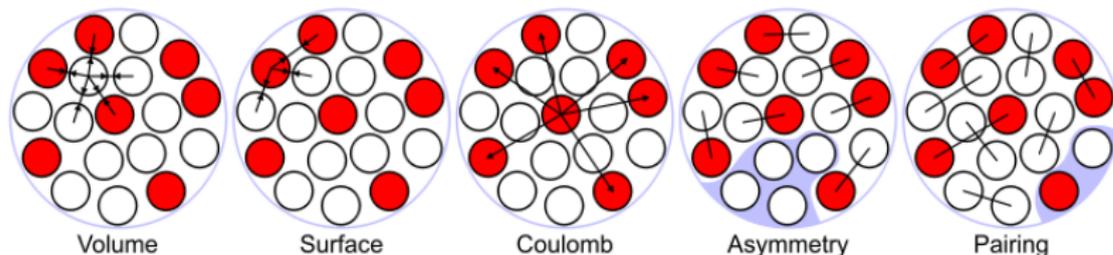
# Estrela de neutrões: previsão simples

Fórmula de von Weisäcker

A massa de um núcleo com  $Z$  prótons e  $A = N + Z$  nucleões:

$$M(Z, A) c^2 = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - B(Z, A)$$

onde  $B(Z, A)$  é a energia de ligação, parametrizada por

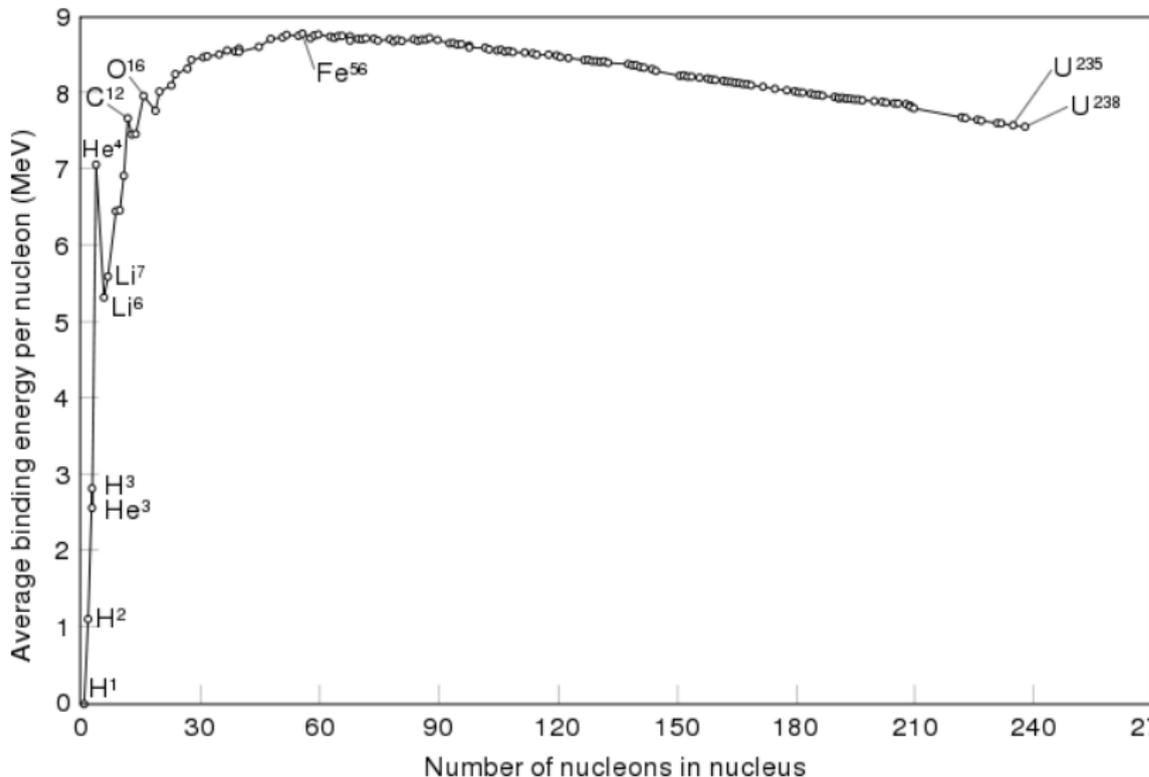


$$\begin{aligned} B(Z, A) = & - a_{\text{vol}} A + a_{\text{sur}} A^{2/3} \\ & + a_{\text{Coul}} \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{\text{sim}} \frac{(Z - N)^2}{A} \\ & + \delta a_p A^{-1/3} \end{aligned}$$

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ fm}$$

# Energia de ligação nuclear: $B(Z, A)$

## Resultados experimentais



# Estrela de neutrões: previsão simples

## Energia gravítica

- Núcleo só de neutrões não é estável:  $B(A, Z) > 0!$
- **Mas se incluirmos a força gravítica** (atractiva)
- Energia gravítica de uma esfera de massa  $M = A M_n$

$$E_{grav} = -\frac{3}{5} G \frac{M^2}{R}$$

- Energia eléctrica de uma esfera de carga  $Q = Ze$

$$E_{Coul} = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z^2}{R}$$

$$\begin{aligned} B(A, Z)/A = & - a_{vol} + \frac{a_{sur}}{A^{1/3}} \\ & + \frac{3}{5r_0} \left( \frac{Z^2}{A^2} e^2 - Gm_N^2 \right) A^{2/3} \\ & + a_{sim} \left( \frac{Z - N}{A} \right)^2 \end{aligned}$$



# Estrela de neutrões: previsão simples

Se considerarmos  $A$  muito grande  
obtemos um “núcleo” estável com

$$A \leq 10^{56}$$

$$R \sim 5 - 10 \text{ Km,}$$

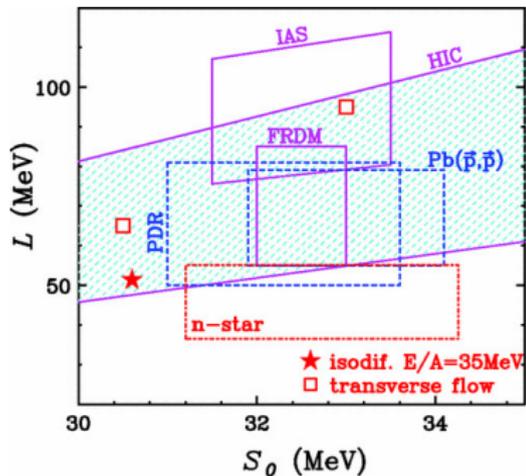
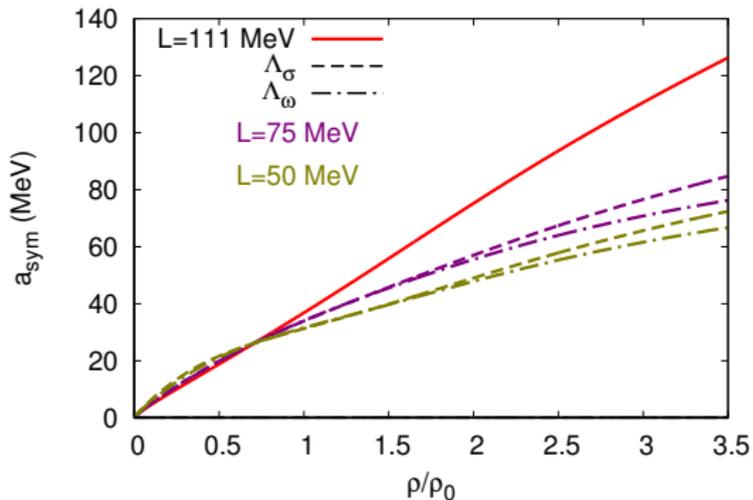
$$M \sim 1/10M_{\odot},$$

$$\rho \sim (2 - 6) \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

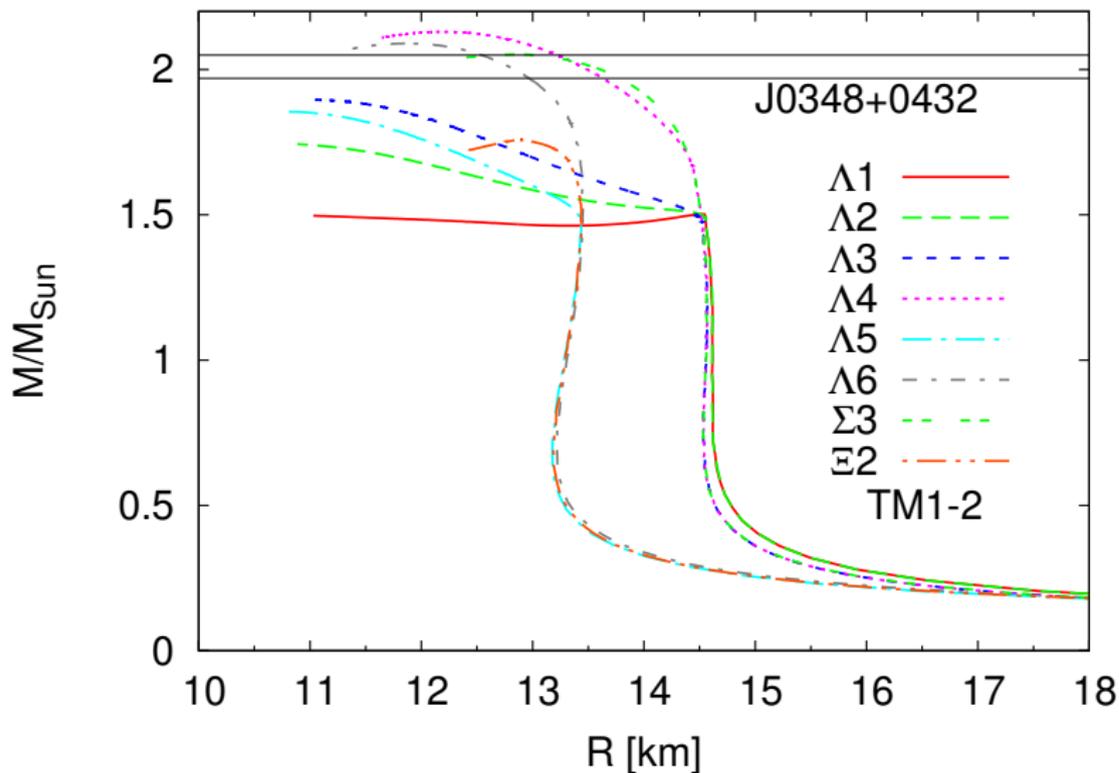


# Energia de simetria

Restrições experimentais, Tsang et al PRC86

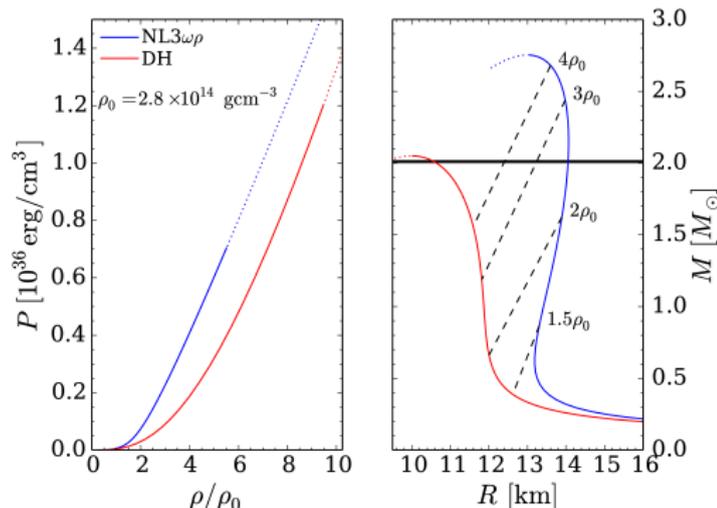


# Energia de simetria e estrelas de neutrões



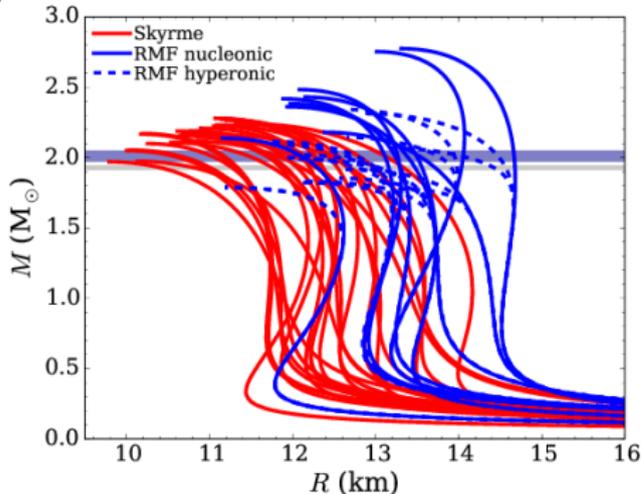
# Estrelas de neutrões: um laboratório de matéria densa

- As estrelas de neutrões são um verdadeiro laboratório que permite testar
  - ▶ física nuclear: energias altas, matéria muito rica em neutrões
  - ▶ QCD: desconfinamento, matéria de quarks, fases supercondutoras na cor
  - ▶ superfluides nuclear: propriedades como a temperatura crítica
- modelo microscópico → equação de estado → massa-raio

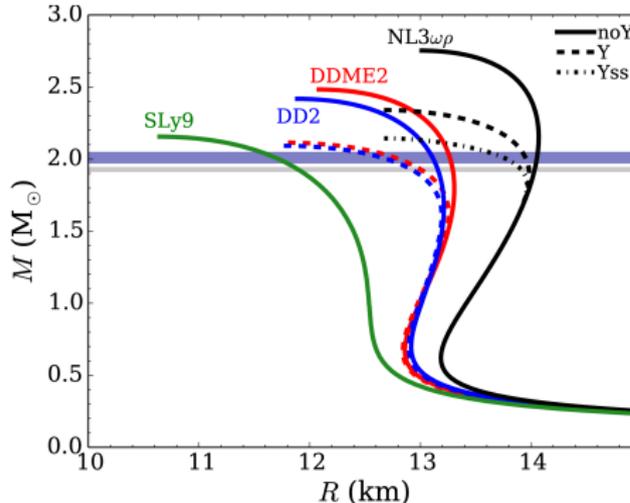


# Impondo $2M_{\odot}$

Fortin et al PRC 94.035804



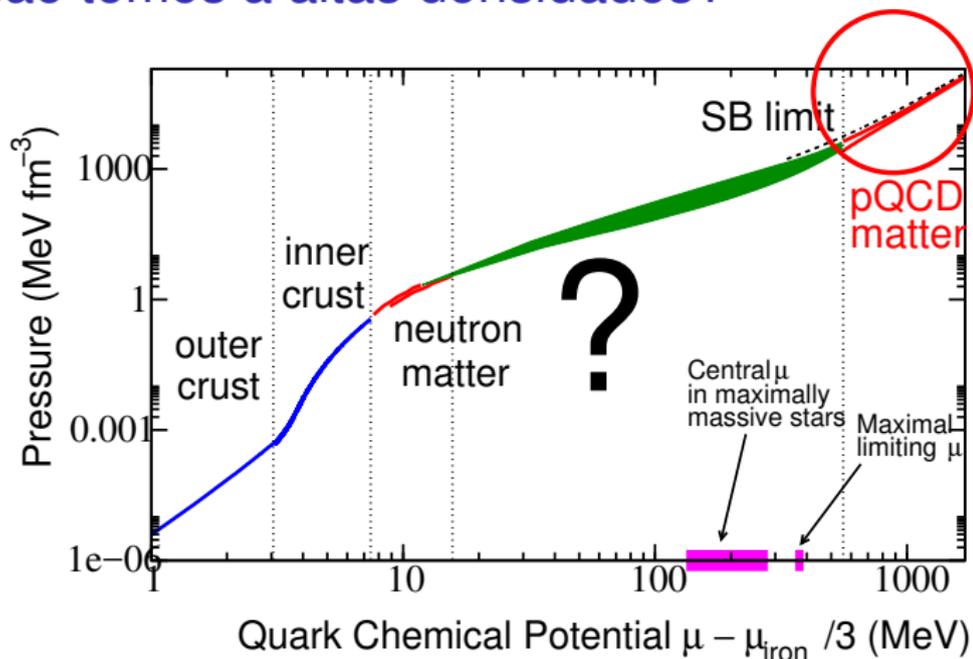
(Fortin et al 2016)



(Fortin et al 2016)

- Todas as EoS são causais e prevêem  $M > 2.M_{\odot}$ 
  - ▶ intervalo de raios: **3km ( $1M_{\odot}$ ) e 4km ( $2M_{\odot}$ )**
- impondo restrições lab e teóricas: **only 4 models remain**
  - ▶ intervalo de raios: **1km ( $1M_{\odot}$ ) e 2km ( $2M_{\odot}$ )**
  - ▶ grande incerteza a massas altas: **faltas informação sobre a equação de estado a altas densidades!**

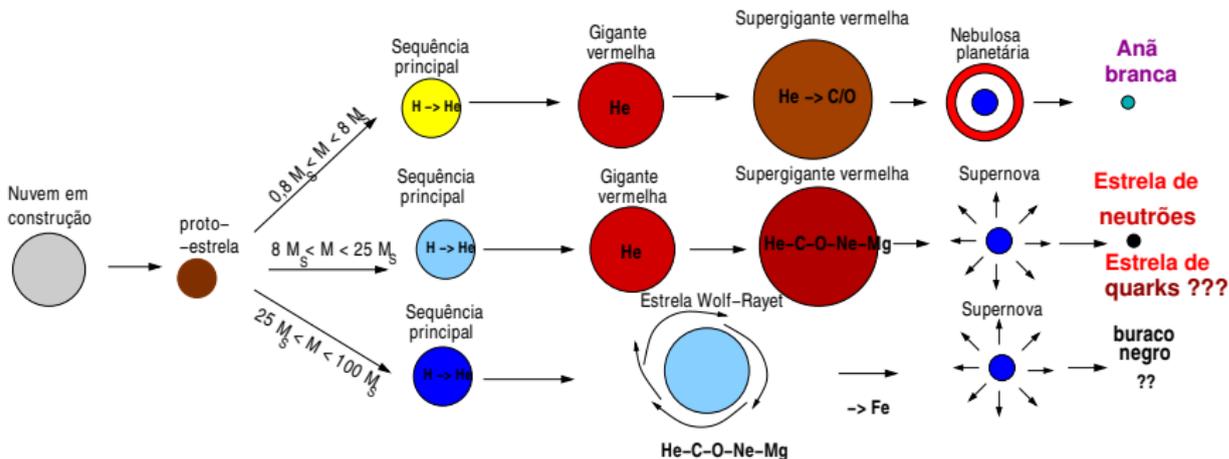
# Que informação temos a altas densidades?



(Kurkela ApJ 789, 2014)

- $T = 0$  QCD perturbativo a altas densidades (pQCD)
  - ▶ **estado da arte** (Kurkela et al PRD81 2010): cálculo perturbativo
  - ▶ EOS converge razoavelmente bem para  $r_{\mu_B} > 2.6\text{GeV}$

# Como evolui uma estrela?



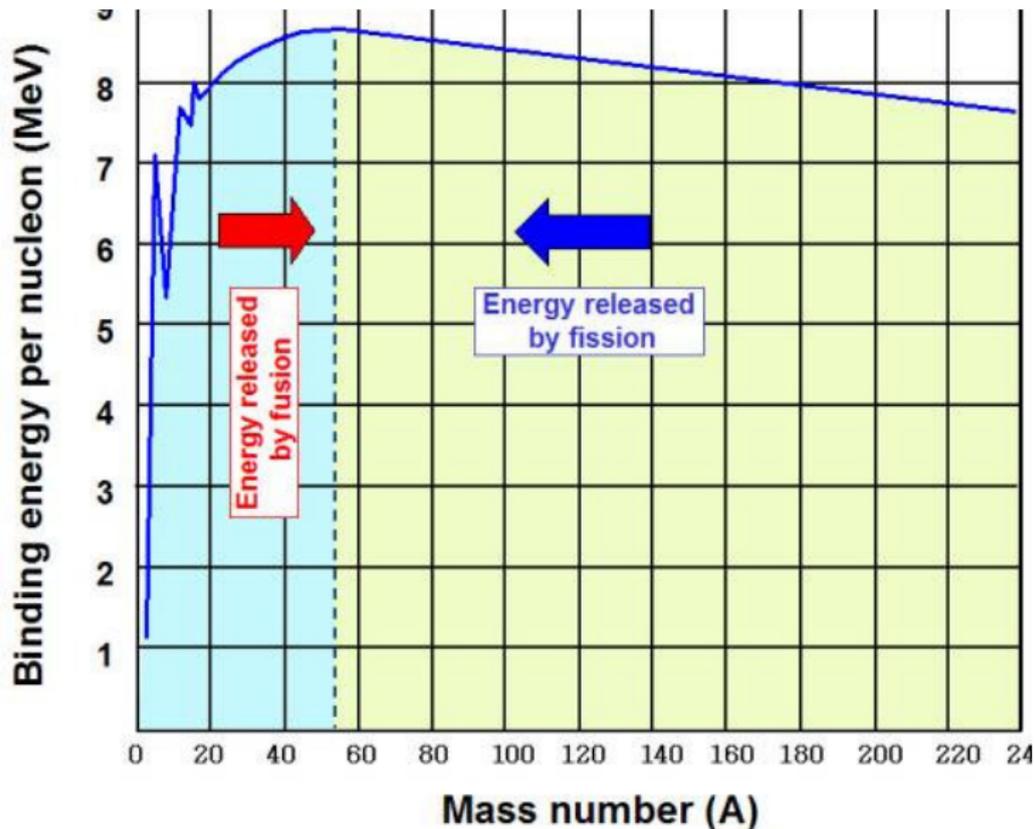
Evolução estelar.

# Estágios de uma estrela com $25 M_{\odot}$

Combustível	Produtos	Temperatura (K)	densidade (g/cm <sup>3</sup> )	duração (anos)
hidrogénio	hélio	$7 \times 10^7$	10	$10^7$
hélio(3- $\alpha$ )	C, O	$2 \times 10^8$	2000	$10^6$
carbono	Ne, Na, Mg, Al	$8 \times 10^8$	$10^6$	$10^3$
neon	O, Mg	$1.6 \times 10^9$	$10^7$	3
oxigénio	Si, S, Ar, Ca	$1.8 \times 10^9$	$10^7$	0.3
silício	Ni (decai em Fe)	$2.5 \times 10^9$	$10^8$	5 dias



# Porque só até ao ferro?



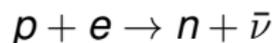


# As estrelas também morrem?

Uma estrela morre quando deixa de realizar a fusão nuclear, e colapsa. **A força gravítica vence!!**

## COLAPSO → SUPERNOVA

Neutralização da dos prótons reduz a pressão exercida pelos eletrões



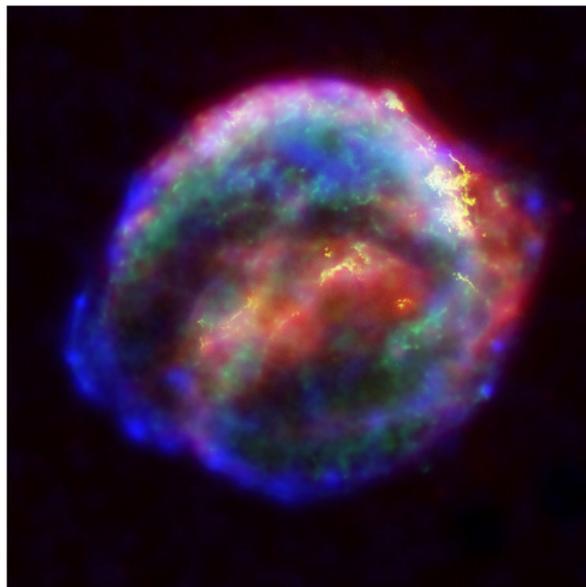
Durante o colapso, prótons e electrões combinam-se para formar **neutrões**, daí o nome **estrela de neutrões**.

**A energia emitida durante uma explosão de supernova é**  
 $\sim 1 - 100 \times 10^{51}$  erg = 1-100 foe

O Sol, se durante a sua vida toda tivesse a luminosidade atual, libertaria um total de 1.2 foe.



# O que é uma supernova?



## SN 1604

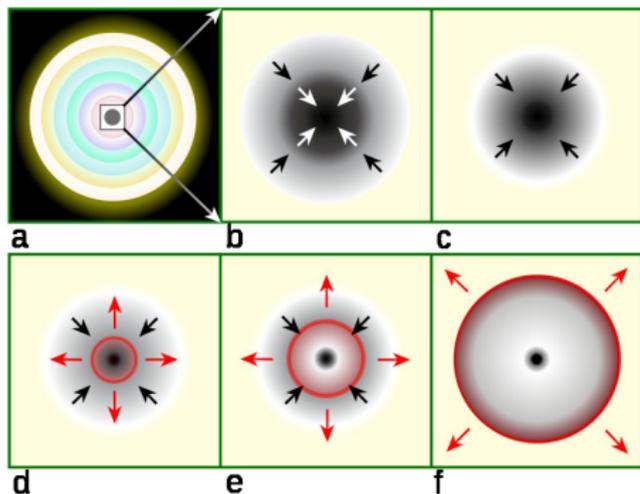
Supernova observada por  
Kepler

Chandra X-ray Observatory  
compilação de radiação:  
raios X, óptica e infravermelho

Sobressai em toda a galáxia até desaparecer após algumas semanas  
**Neste curto tempo emite mais energia que o Sol em toda a sua vida!**



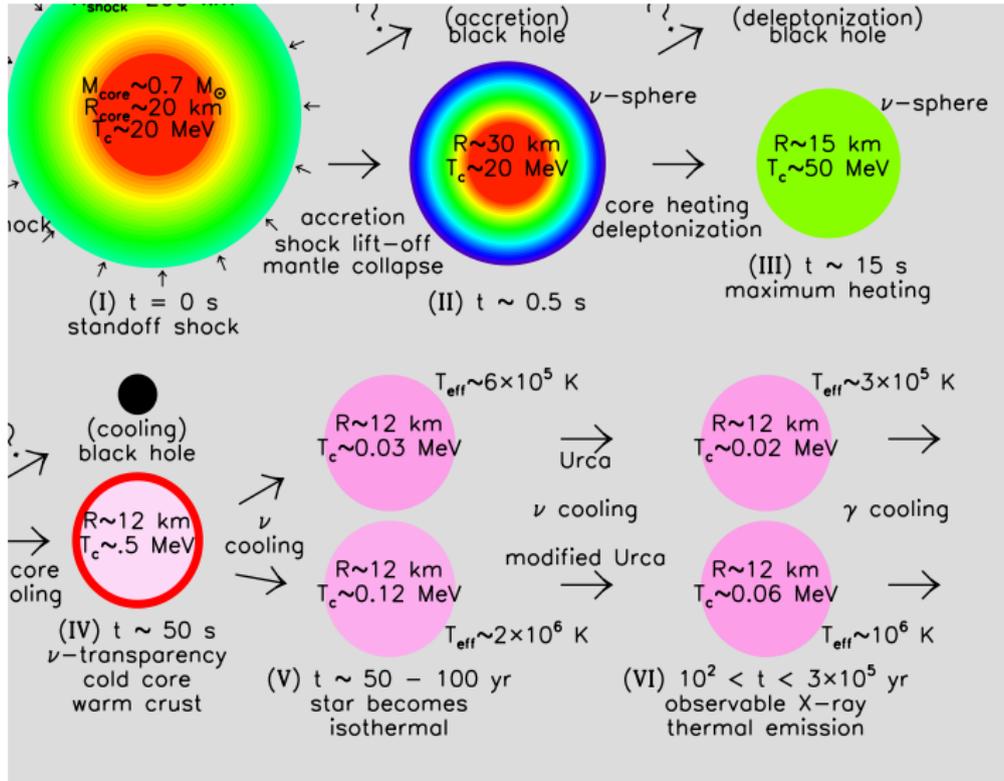
# Colapso de uma estrela: supernova



- a) formou-se um core de ferro
- b) massa de Chandrasekhar atingida:  
colapso começa
- c) o interior é comprimido
- d) o material cai sobre o core, é reenviado para fora numa onda de choque
- e) a onda de choque começa a estagnar e é revigorada por processos com neutrinos
- f) o material de fora detona deixando no centro uma NS



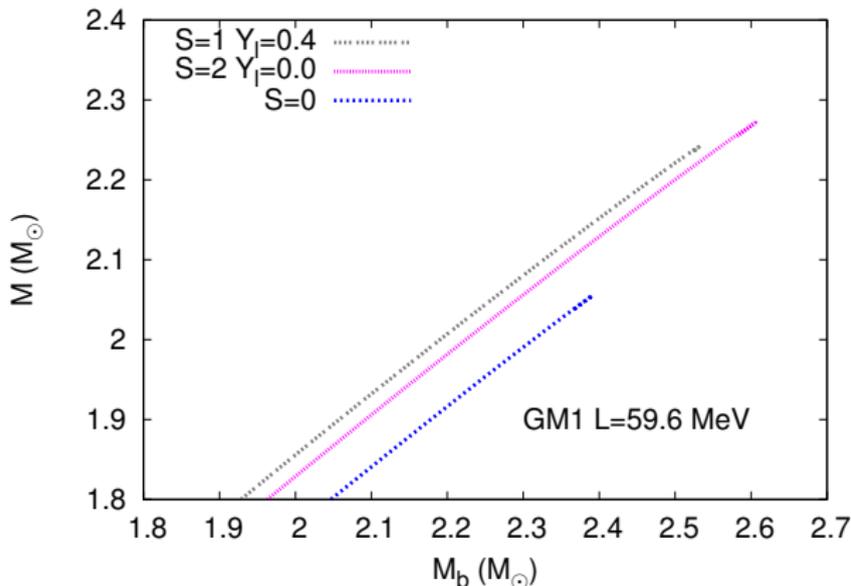
# Evolução duma protoestrela de neutrões



# Evolução duma protoestrela de neutrões

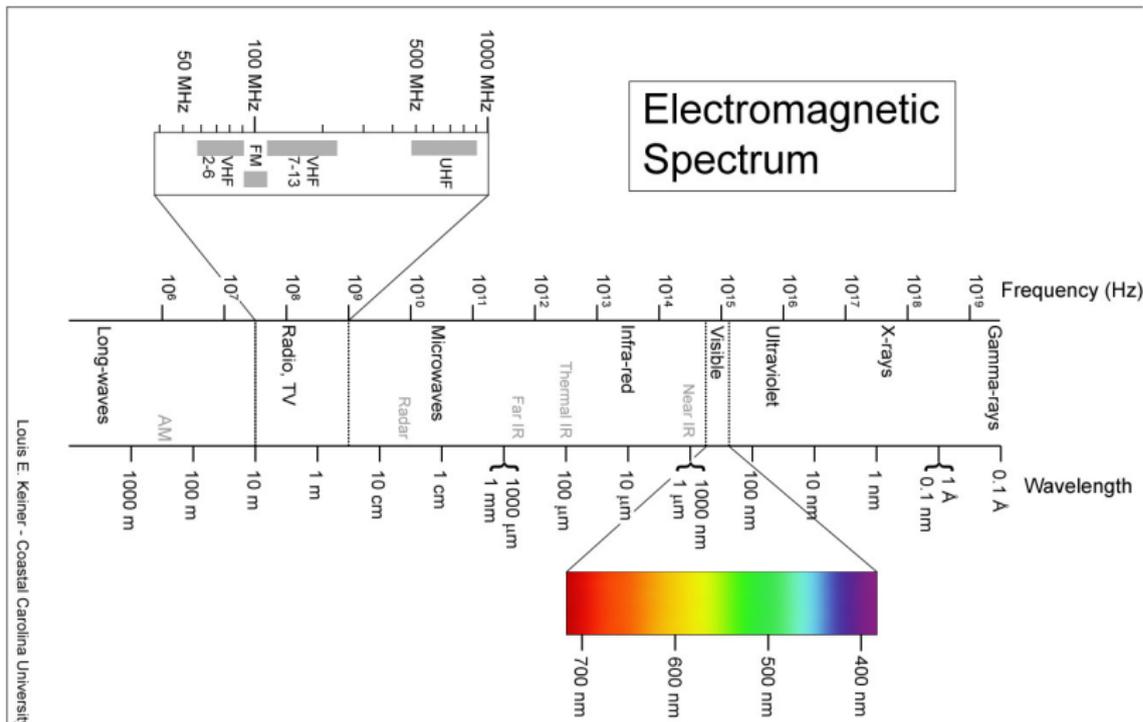
Possíveis consequências: surto de raios gama?

Arrefecimento de uma estrela com condensado de kaões:  
dará origem a um buraco negro?



# Como podemos observar as estrelas?

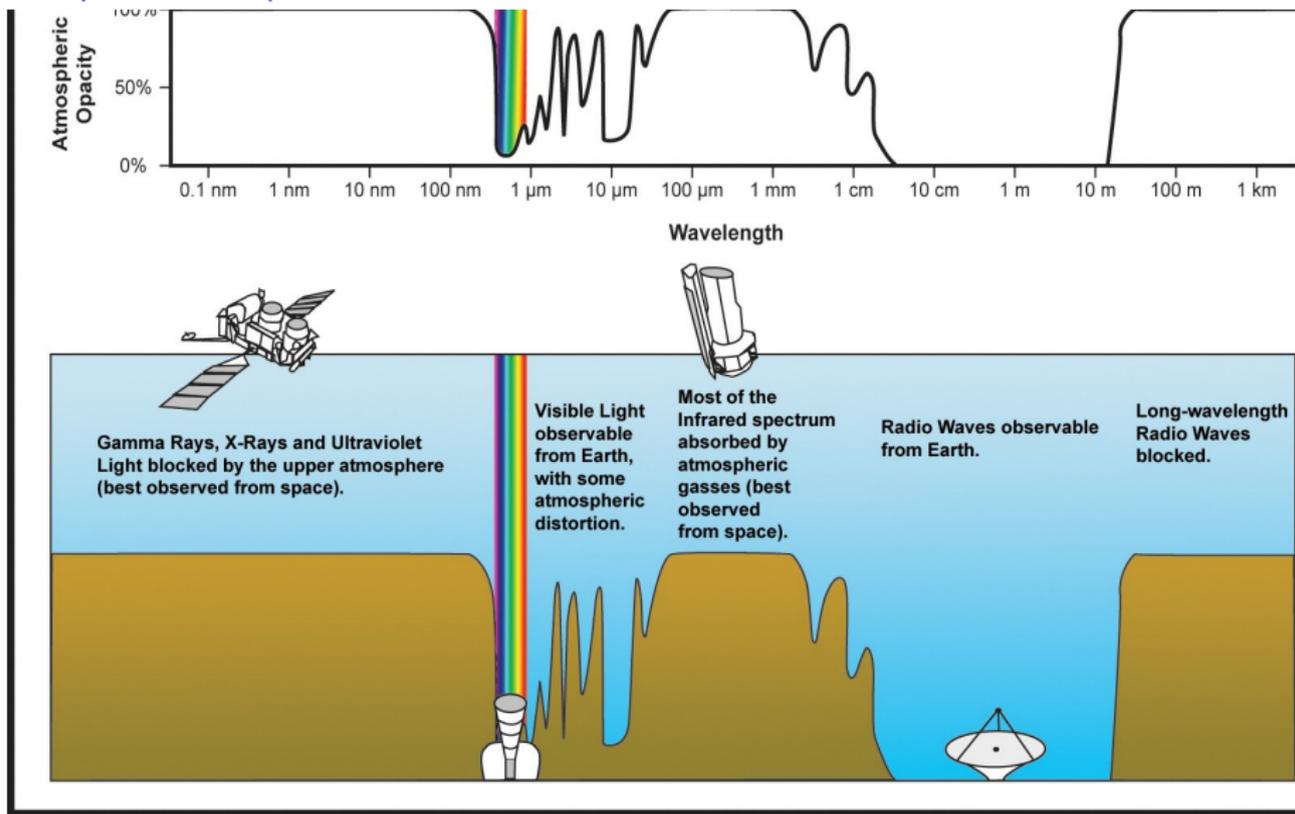
## Espectro eletromagnético



Louis E. Keiner - Coastal Carolina University

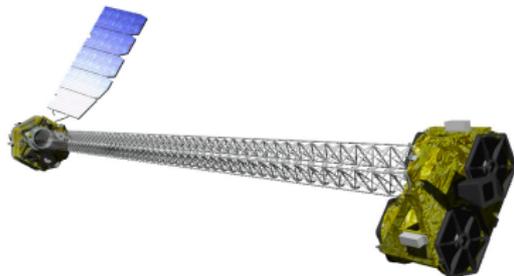
# Mas será que toda a radiação chega à Terra?

## Transparência e opacidade da atmosfera



# Chandra e NuSTAR

## Observação de RX

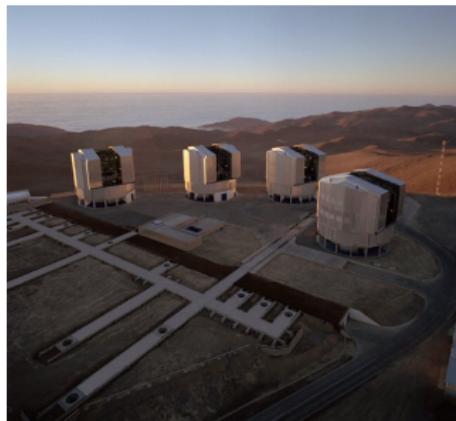
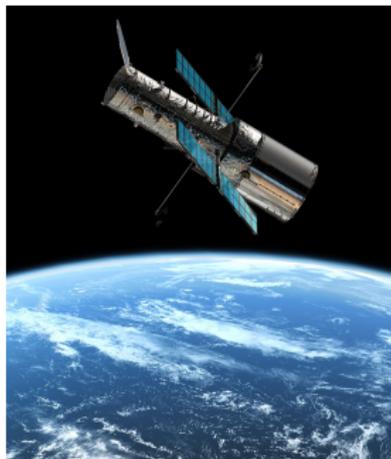


- Chandra é o observatório de raios X da NASA, lançado em 1999
- NuSTAR: telescópio de raios X da NASA, lançado em 2012
- Projetados para observar raios X de regiões remotas do espaço



# O Hubble e o VLT - Very Large Telescope

Observação no visível



- Very Large Telescope (European Southern Observatory ESO)
  - ▶ Maior conjunto de telescópios ópticos do mundo, deserto de Atacama, Chile
- Hubble: O telescópio espacial Hubble, orbita em torno da Terra desde 1990, com período 97 minutos.
  - ▶ Detecta luz visível sem ser distorcida pela atmosfera terrestre.



# Telescópios de ondas de radio: agora e futuro

## ALMA e o Square Kilometre Array - SKA



- ALMA - Atacama Large Millimeter Array
  - ▶ 66 radio-telescópios 12m e 7 m de diâmetro,  $\lambda = 0.3 - 9.6$  mm
  - ▶ informação: nascimento das estrelas no universo primordial e formação de planetas
  - ▶ Colaboração ESO, USA, Japão, Canada, Chile, 2011
- Square Kilometre Array - SKA
  - ▶ Projeto que envolve **21 países**.
  - ▶ As antenas distribuidas por 3000 km<sup>2</sup>: **Austrália** e **África do Sul**.
  - ▶ Informação: mapa dos céus será obtido 10 000 vezes mais depressa.

# O que é o LIGO?

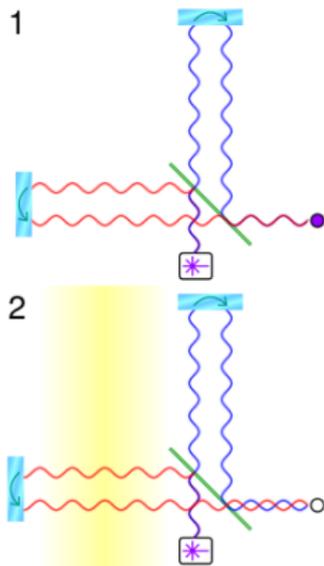
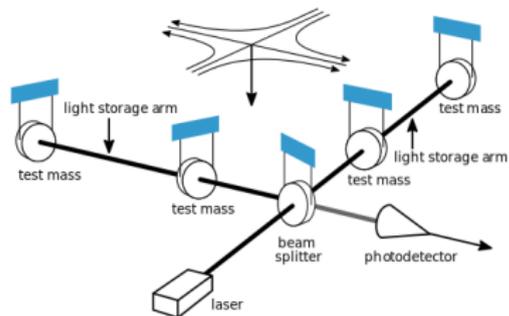
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford, Washington (USA)

- Interferómetro para detetar ondas gravitacionais (OG), é formado por dois braços perpendiculares com 4 km de comprimento
- formado por dois detetores ( Livingston e Hanford) separados de 2000 milhas para permitir filtrar o ruído local
- **Primeiras OG detetadas: 14 de setembro de 2015**
- Advanced LIGO: colaboração de vários países.
- Há outros detetores: Virgo (Itália), GEO 600 (Alemanha), TAMA 300 (Japão) que também serão atualizados melhorando a sensibilidade

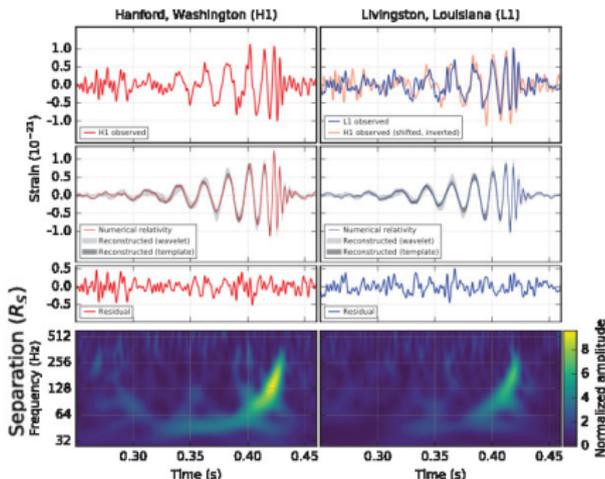
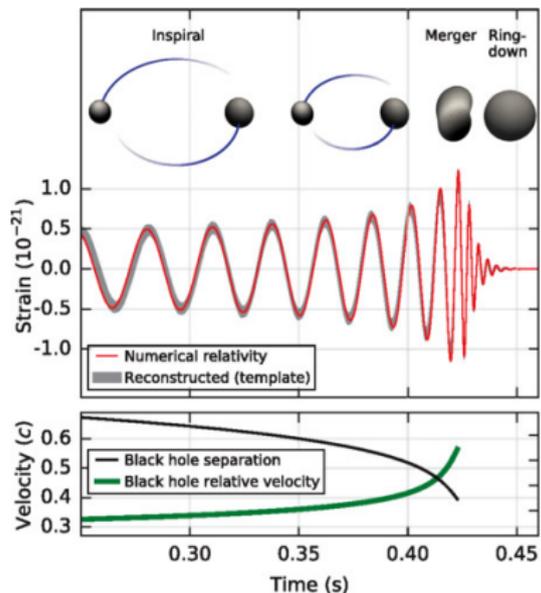
# Ondas gravitacionais



- Ondas gravitacionais da fusão de duas estrelas de NS
- variação comprimento  $10^{-18}$  m



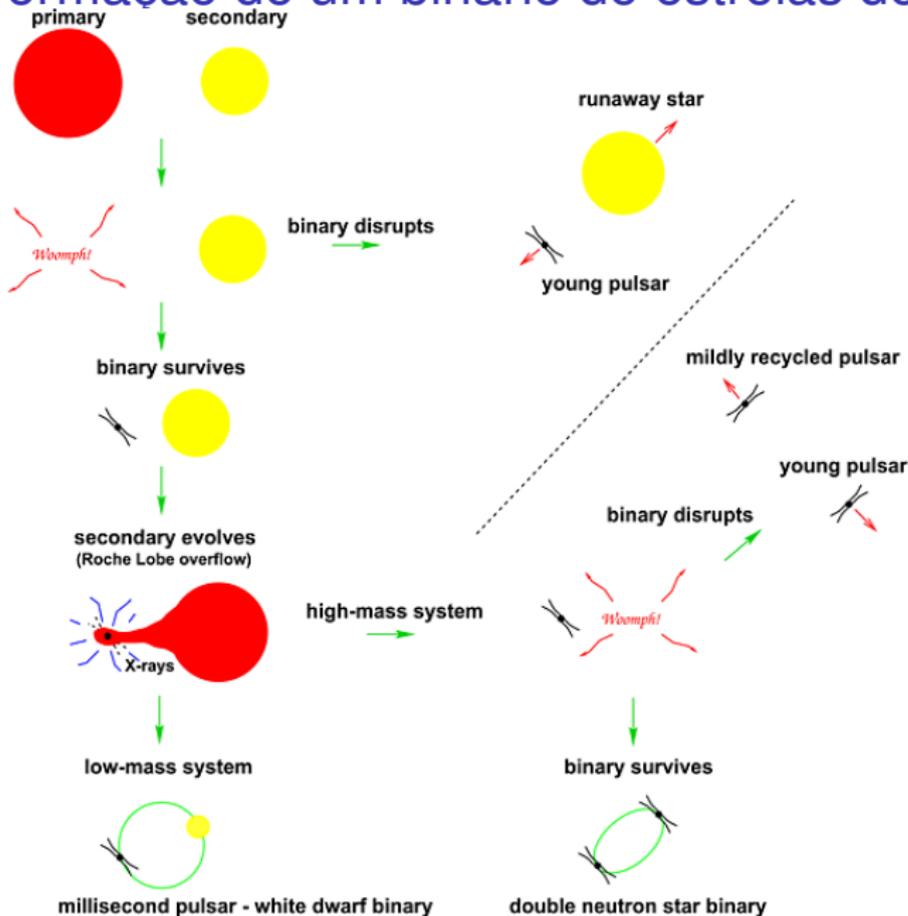
# Ondas gravitacionais



- Fusão de dois buracos negros de massas  $36$  e  $29 M_{\odot}$
- energia emitida nas ondas gravitacionais:  $3.0 \pm 0.5 M_{\odot}$



# Formação de um binário de estrelas de neutrões



# Formação de um binário de estrelas de neutrões

Ver vídeos em

<https://compstar.uni-frankfurt.de/outreach/animations-cartoons/>



# Astronomia de multi-mensageiros & laboratório

## ● New astrophysical measurements

### ▶ FAST, SKA

- ★ more massive NSs?
- ★ very fast spinning NSs?
- ★ moment of inertia  $\mathcal{I}$ ?

### ▶ NICER, Athena (ESA 2028) (X-ray telescopes)

- ★ simultaneous  $M, R$  with 5% precision on  $R$

### ▶ LIGO/VIRGO: tidal deformability $\Lambda$

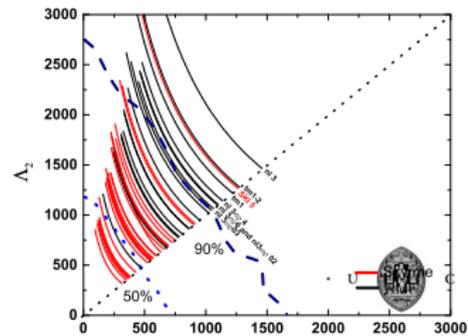
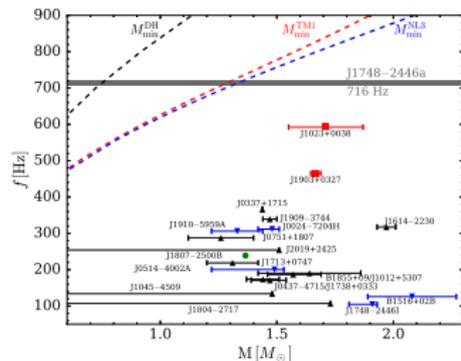
## ● New nuclear measurements

### ▶ PREXII, CREX: neutron skin thickness

### ▶ More hyperon properties (J-PARC, FAIR, NICA...)

## ● New European network PHAROS

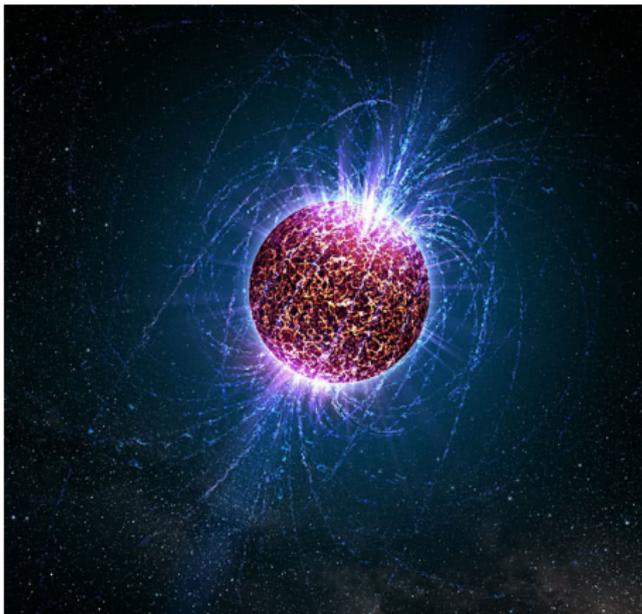
Haensel EPJA 2016



# Estrelas neutrões... O que falta descobrir? **MUITO!**

- PSR J1614–2230 e PSR J0348+043 com  $M \sim 2.0M_{\odot}$   
terão matéria exótica no seu interior? Quarks livres?
- Qual é o raio de uma NS? Conhecer simultaneamente R e M permite eliminar muitos modelos nucleares
- Qual é a massa máxima NS? Permite conhecer a massa mínima de um buraco negro e o número total de buracos negros estelares no universo
- Que fases existem no diagram de fases da matéria densa e fria? Como podemos usar as NS para estudar estas fases?
- Qual a origem dos campos magnéticos ultra-fortes dos magnetares?  
campo magnético magnetar:  $10^{12} - 10^{15}$  gauss
- Já conseguiremos detetar as ondas gravitacionais emitidas por estrelas de neutrões! Que informação conseguimos obter?
- ...





**OBRIGADA**

**cp@uc.pt**

