

O exótico mundo das estrelas compactas

Marcio G. B. de Avellar

IAG-USP

22/09/2011

Contexto

Estrelas compactas são os objetos mais densos do Universo e podem vir em três variedades:

- Anãs brancas: compostas predominantemente por espécies nucleares;
- Estrela de nêutrons: composição desconhecida (híperons? nêutrons? quarks?);
- Buracos negros: regiões inacessíveis do espaço-tempo.

Como estudá-las?

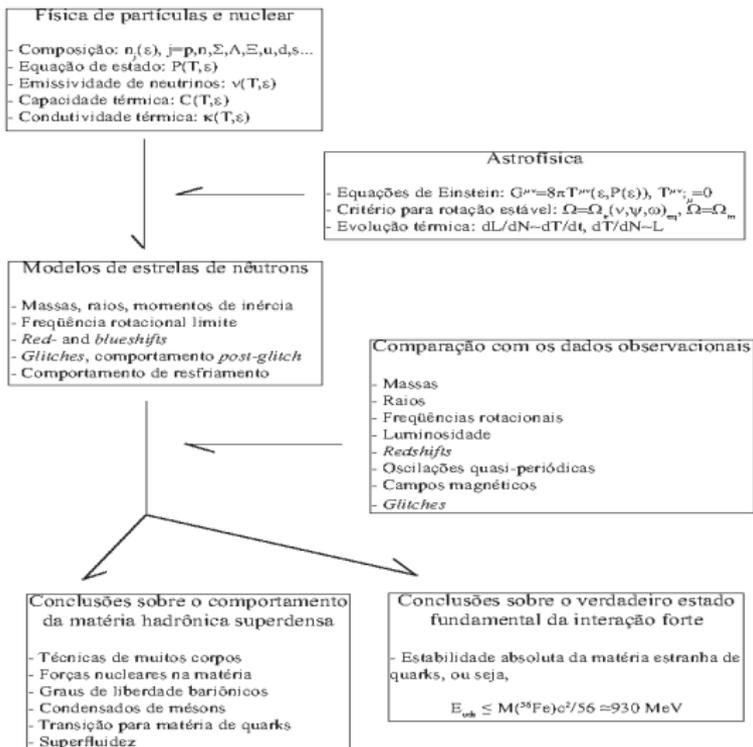
Ferramental teórico, dado que AB= $[M \lesssim 1.2M_{\odot}, R \simeq R_{\oplus}]$ e
EN= $[M \simeq 1.4M_{\odot}, R \sim 10km]$:

- Física relativística;
- Física da matéria densa levada ao extremo.

Observacionalmente:

- EN: sistemas binários em raios-x, surtos gama, pulsares, supernovas tipo II...
- AB: sistemas binários em UV-IR, novas, supernovas tipo Ia...

Pesquisa multidisciplinar



Tratamento matemático das ABs

O grau de compacidade de uma AB é pequeno e podemos usar a aproximação newtoniana. Assim, a equação da massa total e a do equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (1)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2} \quad (2)$$

Combinando as duas chegamos ao que chamamos de equação de estrutura estelar, válida em todos os casos:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho(r)} \frac{dP(r)}{dr} \right) = -4\pi G \rho(r) \quad (3)$$

Tratamento matemático das ABs

Precisamos agora da equação de estado, ou seja, uma relação $p(\rho)$. Quando efeitos quânticos começam a ficar importantes? Pode-se mostrar que o volume no espaço de fase ocupado por um elétron é:

$$(\Delta p_e \Delta q_e)^3 = 180 h^3 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{3/2}.$$

Para uma estrela com $M \sim 1 M_\odot$ e $R \sim 0,03 R_\odot$, $(\Delta p_e \Delta q_e)^3 \sim h^3$. Precisamos usar uma estatística adequada para a distribuição de partículas no gás segundo sua energia.

$$n(E) = \frac{g(E)}{e^{\alpha + E/kT} \pm 1},$$

onde $\alpha = \alpha(\rho) \ll 0$ para altas densidades.

Tratamento matemático das ABs

Estudando a estatística peculiar de Fermi-Dirac, verifica-se que mesmo a $T = 0$ o gás exerce pressão, sendo esta relacionada com a energia de Fermi, ou o potencial químico (α) a temperatura nula:

$$\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{6\pi^2}{\gamma} \right)^{2/3} \rho^{2/3}.$$

Diz-se que o gás a $T = 0$ é completamente degenerado e $n(E) = g(E)$. Mas isso é verdade para estrelas?

Tratamento matemático das ABs

Temos que analisar a condição de degenerescência: $kT \ll \epsilon_F \Rightarrow$ gás degenerado. Para ABs $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$ e $T \sim 10^4 - 10^6 \text{ K}$: condição é satisfeita. Calcula-se, então, a pressão desse gás de Fermi:

$$P = \frac{1}{3} \int_0^{p_F} p \cdot v(p) \cdot \frac{2}{h^3} \cdot 4\pi p^2 dp, \quad (4)$$

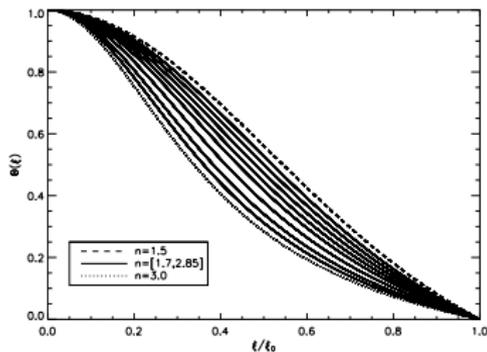
onde a relação $v(p)$ depende se as partículas são relativísticas ou não.

Tratamento matemático das ABs

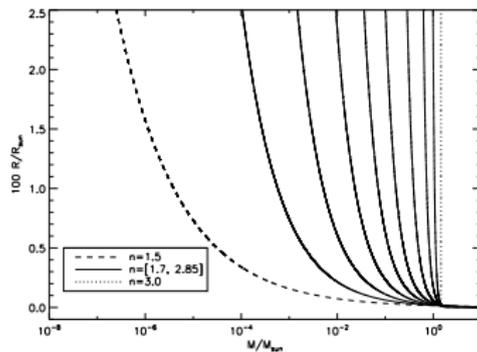
- Essa integral pode ser escrita em uma forma simples de equação politrópica: $P = K\rho^\Gamma$, onde K depende da natureza do gás e $\Gamma = 1 + 1/n$ é chamado de índice politrópico ($\Gamma = 5/3$ para não relativístico e $\Gamma = 4/3$ para relativístico).
- Substituindo a equação de estado na equação de estrutura, chegamos, enfim, às equações de Lane-Emden:

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\theta(\xi)}{d\xi} \right) = -\theta(\xi)^n. \quad (5)$$

Resultados



(a) Solução da Lane-Emden



(b) Relação massa-raio para diferentes índices

Figura: Eis as anãs brancas

Tratamento matemático das ENs

- Em 1932, Chadwick descobre o nêutron e em 1934, Baade e Zwicky, fazem a primeira ligação associação entre supernovas e ENs.
- Em 1939, Tolman, Oppenheimer e Volkoff consideraram seriamente a questão da estrutura desses objetos compactos.
- Dado o grau de compaticidade, $GC \sim 0.2 - 0.4$, a distorção do espaço-tempo é considerável:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Tratamento matemático das ENs

A equação do slide anterior resulta nas:

$$\frac{8\pi G}{c^2} \rho(r) = \frac{\lambda' e^{\lambda(r)}}{r} + \frac{1 - e^{\lambda(r)}}{r^2}$$

$$\frac{8\pi G}{c^4} p(r) = \frac{\nu' e^{\lambda(r)}}{r} - \frac{1 - e^{\lambda(r)}}{r^2}$$

$$p'(r) + \frac{1}{2} \left(c^2 \rho(r) + p(r) \right) \nu'(r) = 0$$

Tratamento matemático das ENs

E das equações anteriores resultam as equações de estrutura: a de massa e a do equilíbrio hidrostático:

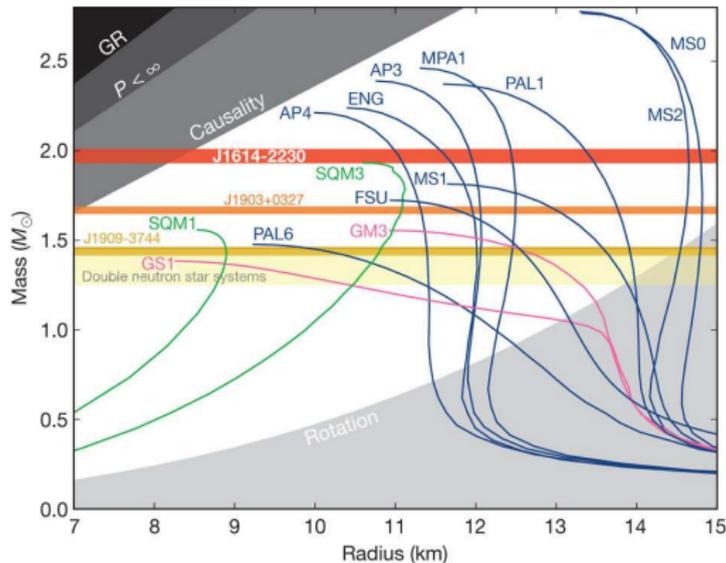
$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (6)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2} \left(1 + \frac{p(r)}{c^2 \rho(r)}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 \rho(r)}{c^2 m(r)}\right) \left(1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r}\right)^{-1} \quad (7)$$

Essas são as equações TOV. Novamente, precisamos da equação de estado para resolvê-las.

Tratamento matemático das ENs

A densidade chega a $10^{14} \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$ comportamento da matéria é desconhecido:



Observações

A maioria das estrelas aparecem em sistemas binários. ABs em sistemas binários podem evoluir para Variáveis Cataclísmicas:

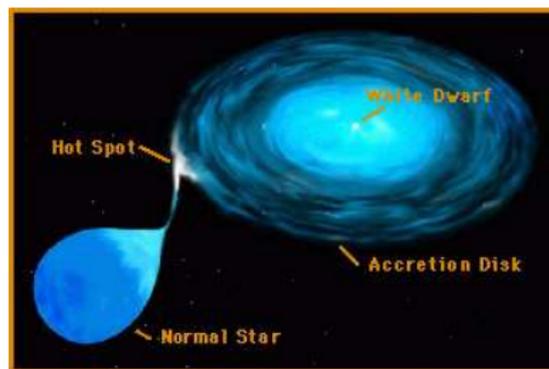
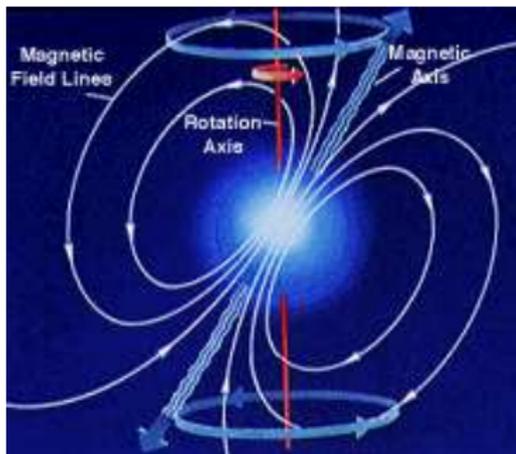


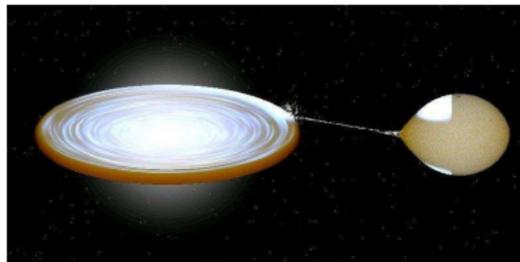
Figura: Estudo de dois fenômenos importantes: acreção e evolução do sistema binário

Observações

As estrelas de nêutrons podem ser observadas de dois jeitos, pulsares e em sistemas binários:



(a) Pulsar



(b) LMXB

Figura: Eis as estrelas de nêutrons

Observações

Pulsares foram as primeiras associações de um objeto astrofísico com estrelas de nêutrons. São geralmente observados em rádio, mas:

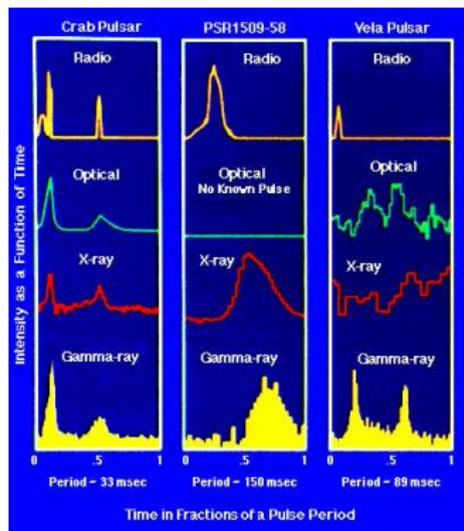


Figura: Pulsos observados em vários comprimentos de onda

Observações

Sistemas binários de baixa massa fornecem as ferramentas para estudar a RG e a EoS (indiretamente):

- Estudos temporais;
- Estudos espectroscópicos.

Observações

Queremos acessar as regiões de física extrema:

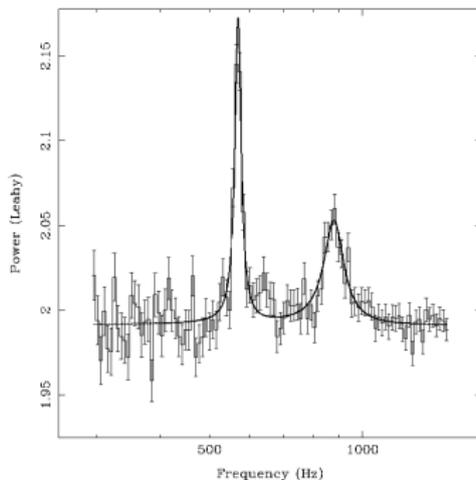


Figura: kHz QPO, frequências compatíveis com o ISCO

Observações

Queremos acessar as regiões de física extrema:

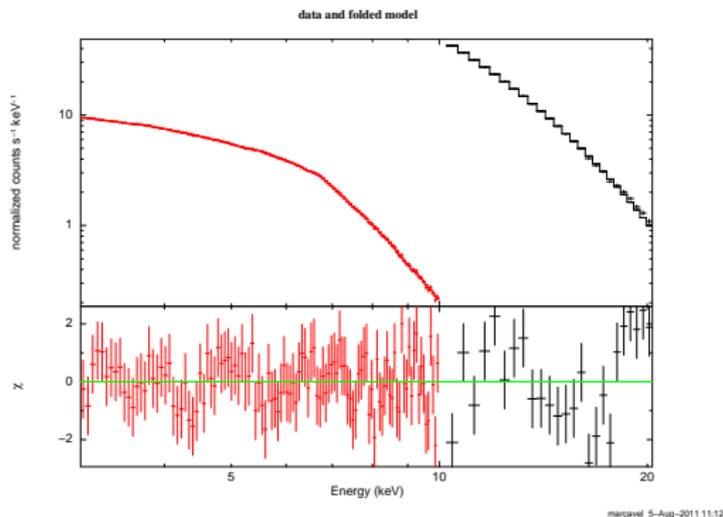


Figura: Linha do ferro: fortes distorções relativísticas

Observações

Nosso objetivo é obter o raio:

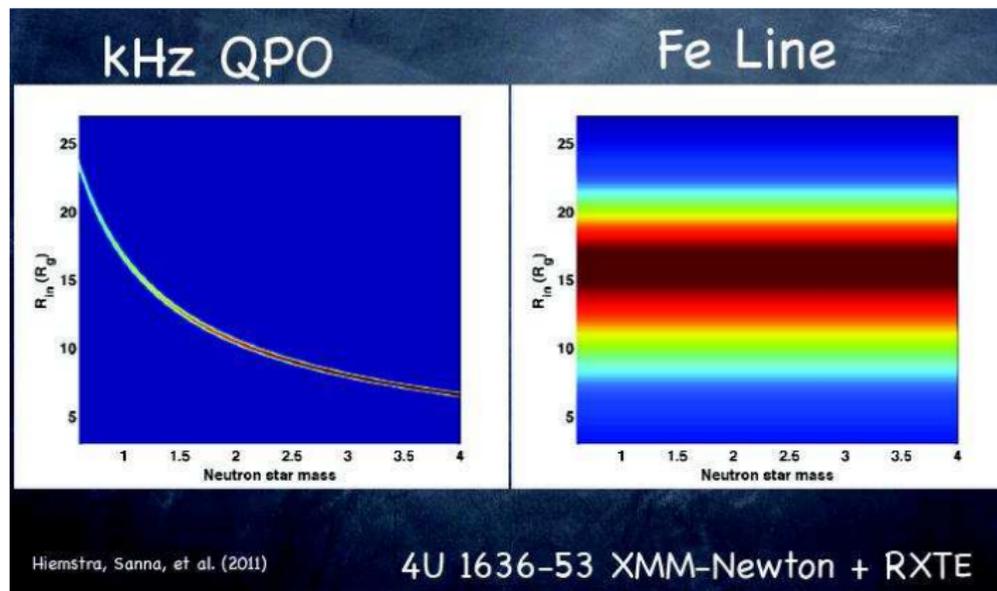


Figura: Combinando os dois métodos

Observações

Assim, podemos, além de estudar a acreção em regime de gravitação forte, restringir o espaço de parâmetros para a EoS:

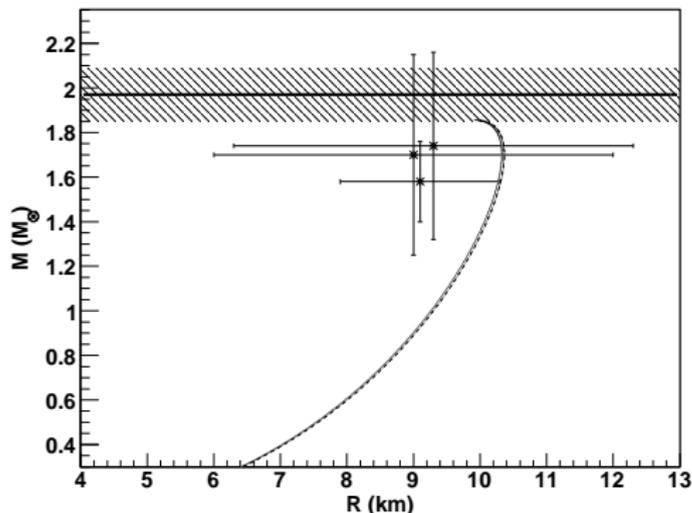


Figura: Vínculos observacionais à equação de estado

Finalmente

Entretanto, estamos no limite da tecnologia atual em raios-x. Outras abordagens podem ajudar:

- Medidas estatísticas de entropia de informação, desequilíbrio e complexidade;
- Caracterização de sistemas binários LMXBs em outros comprimentos de onda, à procura de jatos, pulsos, mapeamentos de eclipse etc.

Referências

- Avellar, M. G. B. ; Horvath, J. E. . *Exact and quasi-exact models of strange stars*. International Journal of Modern Physics D, v. 19, p. 1937, 2010.
- de Avellar, M. ; Horvath, J. ; Paulucci, L. . *Self-bound models of compact stars and recent mass-radius measurements*. Physical Review. D, Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, v. 84, p. 043004, 2011.
- de Avellar, M. ; Mendez, M. ; Sanna, A. ; Horvath, J. . *Time lags in the kilohertz quasi-periodic oscillations of the low-mass x-ray binary 4U 1608–52* [em preparação]
- de Avellar, M. ; Horvath, J. . *Logic entropy and complexity in neutron stars* [em preparação]