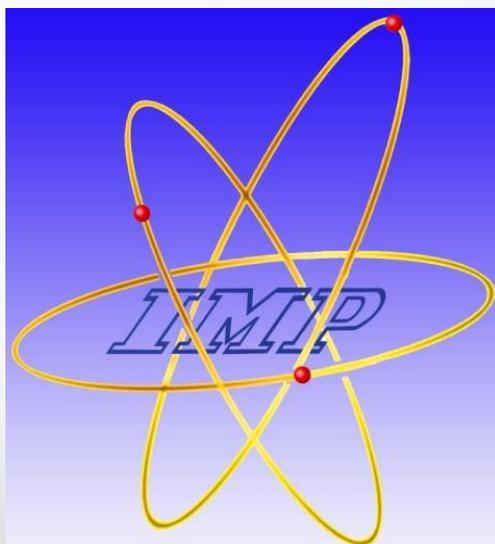


核物质超流性与中子星冷却



董建敏

中国科学院近代物理研究所

2020-08-29

兰州



近代物理研究所



中科院近代物理研究所成立于1957年，依托大科学装置开展与核物理相关的课题研究，目前职工约1000人。

姓名：董建敏

籍贯：山东临沂

毕业学校：近代物理所/兰州大学(2012)

电子邮箱：dongjm07@impcas.ac.cn

工作单位：中科院近代物理研究所



研究兴趣：

核物质状态方程与超流性；

脉冲星周期跃变；

中子星热演化；

强磁场中子星；

中子星引力波辐射

新手上路
请多关照！



目 录

1 引言

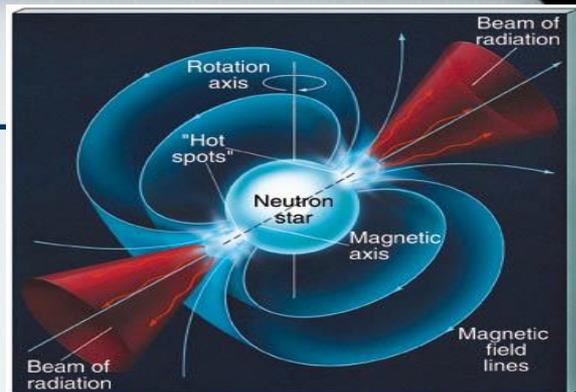
2 核物质超流性

3 中子星中微子发射与冷却

4 脉冲星周期跃变

5 总结与展望

中子星



质量 $\approx (0.1-2.8)M_{\odot}$

半径 $\approx (10) \text{ km}$

自转周期 $P \approx 1.4 \text{ ms} - 12\text{s}$ (已发现的范围)

表面磁场: $10^8-10^{15} \text{ Gauss}$ (绝大多数脉冲星)

表面温度: 10^5-10^6K — 非脉冲(软)x射线热辐射

同超新星遗迹成协(?) 发现10个

高空间运动速度: 大多数: $v \approx (200-500) \text{ km/s}$

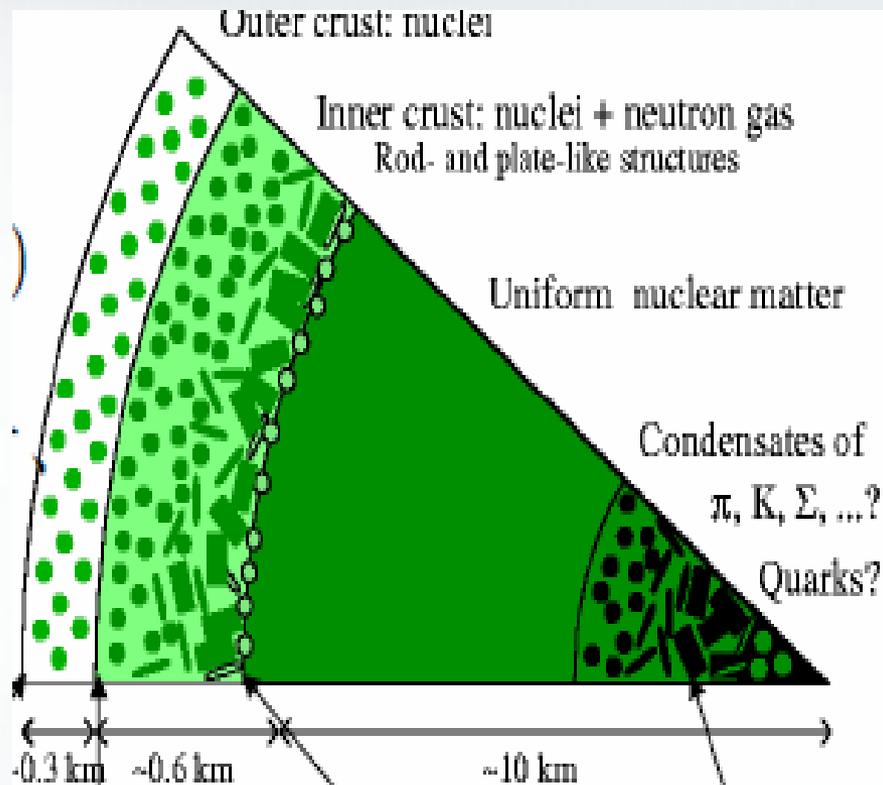
高密度,
快自转
强磁场
强引力场

...

蕴含超丰
富的物理

研究中子星的意义: 揭示极端条件下的物理规律; 中子星涉及物理学与天文学的很多分支, 也涉及自然界几种基本相互作用, 对基础物理发展具有重要推动作用。

中子星的结构



1) 外壳:

$10^6 \sim 4.3 \times 10^{11} \text{g/cm}^3$

Fe原子核晶格点阵, 自由电子气体

2) 内壳:

$4.3 \times 10^{11} \sim 1.4 \times 10^{14} / \text{cm}^3$

重原子核, 游离中子, 自由电子气体

3) 外核: $1.4 \times 10^{13} \sim 6 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$, 核物质, 流体状态

4) 内核: ?

核物质超流性

超流性是一种费米面效应，对中子星的热演化过程、理解脉冲星的周期跃变至关重要！

- 1) 1958年Bohr、Mottelson 和Pines 基于原子核奇偶质量差、转动惯量理论和实验值的差别等现象提出的原子核对关联(超流性)。
- 2) 1959年Migdal将BCS理论用于核物理并指出中子星内部会出现超流性，能隙 $\sim 1\text{MeV}$ ，相应的临界温度 $\sim 10^{10}\text{K}$ 。
- 3) 1969年Baym等为了解释Vela和Crab等年轻的脉冲星周期跃变现象(Glitch),提出了中子星内部超流涡旋状态，才引起重视。
- 4) 2011年D. Page et al 宣称给出了中子星内部存在着 $^3\text{P}_2$ 中子超流体的直接证据 (PRL 106, 081101(2011))。

超流性在中子星冷却中的作用：改变中微子发射速率、物质的热容量，中子星物质的热导率

中子星冷却

决定中子星冷却的物理量:

- 中微子发射速率
- 物质的热容量
- 物质组分及状态方程
- 核物质超流性
- 热导率
- 星体的磁场
- 加热机制

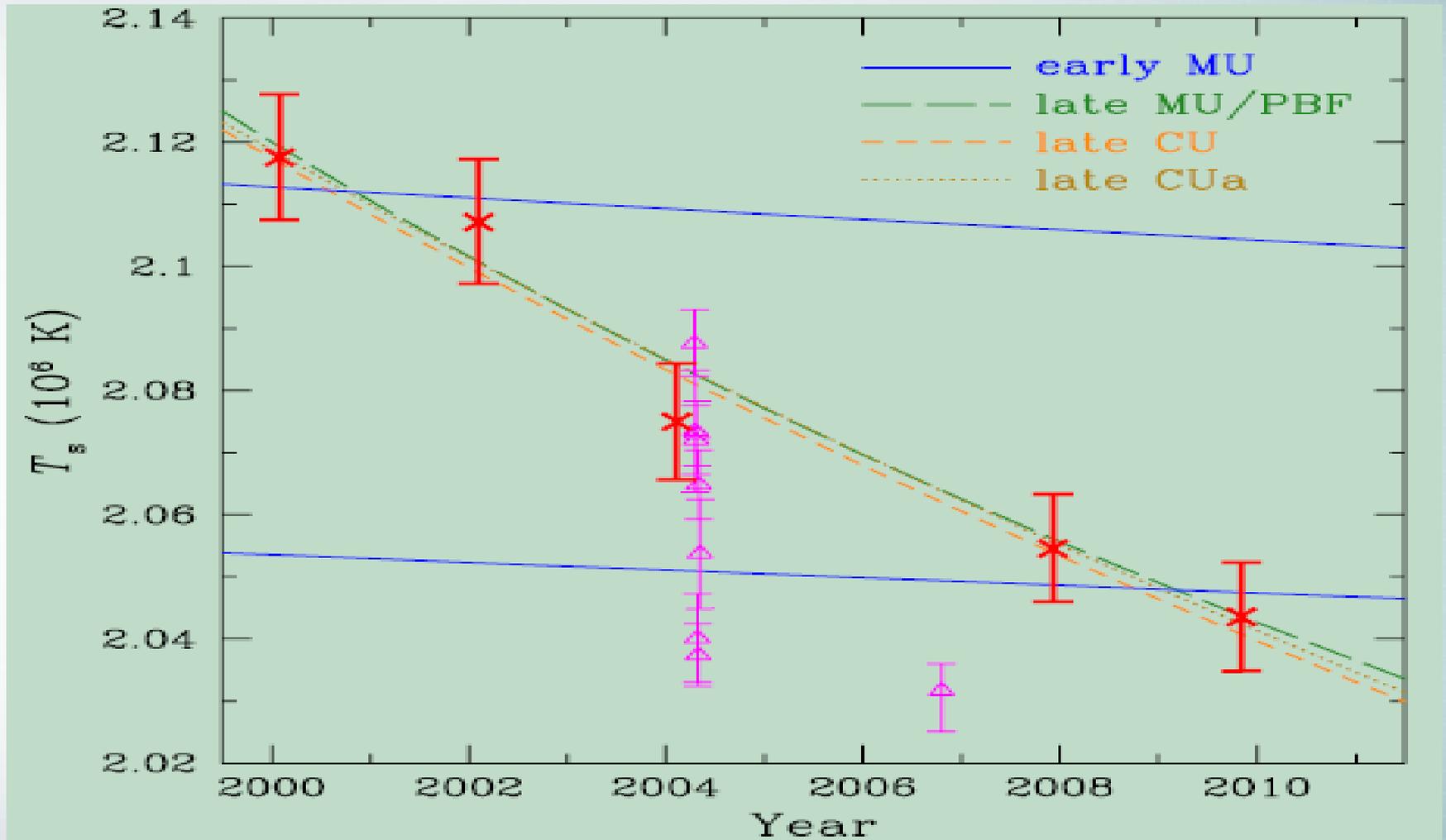
$$\frac{dE_{\text{th}}}{dt} = C_V \frac{dT}{dt} = -L_\nu - L_\gamma + H,$$

冷却过程:

- (1) 刚诞生, Urca过程快速冷却
- (2) $t < 10^5$ 年, 中微子冷却阶段;
- (3) $t > 10^5$ 年, 光子冷却阶段.

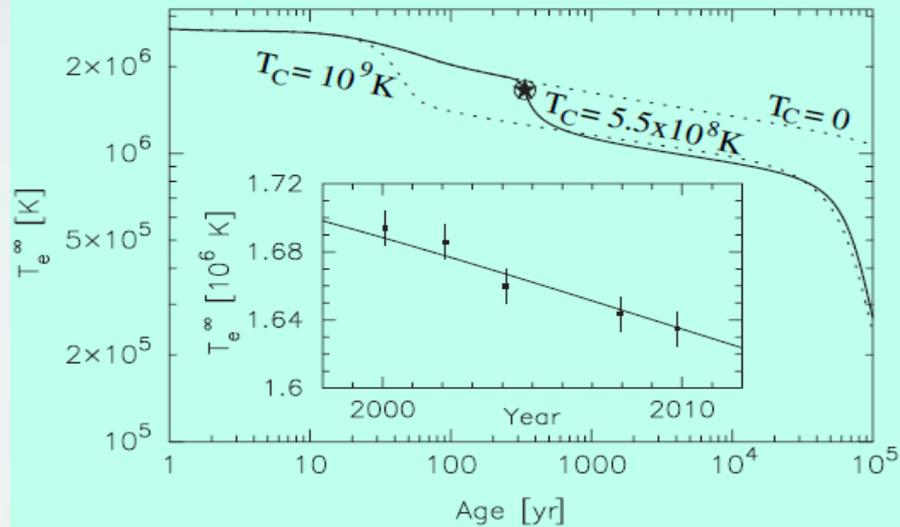
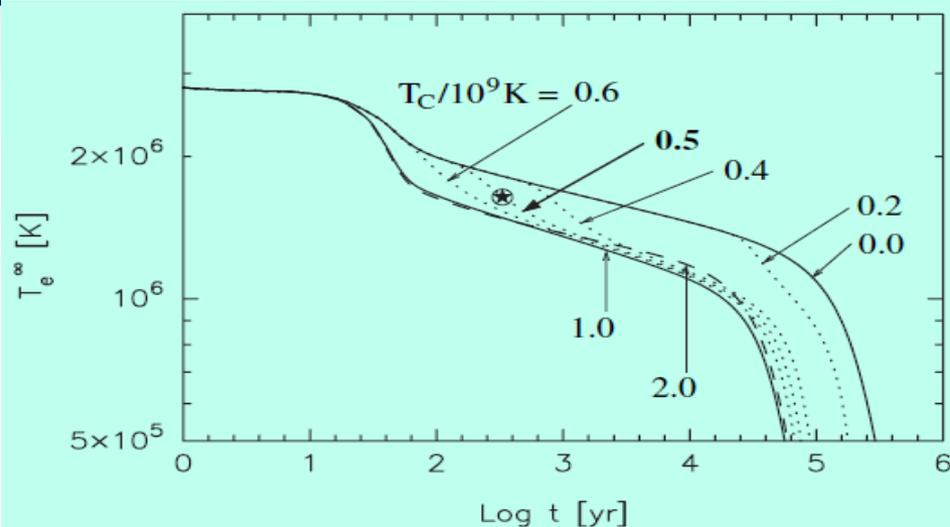
中子星冷却理论的主要目标是计算冷却曲线, 即温度或光度随时间的演化, 并与天文观测进行对比。目前存在多种方案。

Cas A 中子星的冷却观测



快速冷却! C. O. Heinke, W. C. G. Ho, ApJL, 719: L167 (2010)

中子星物质的 3P_2 超流性



PRL 106, 081101 (2011)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
25 FEBRUARY 2011

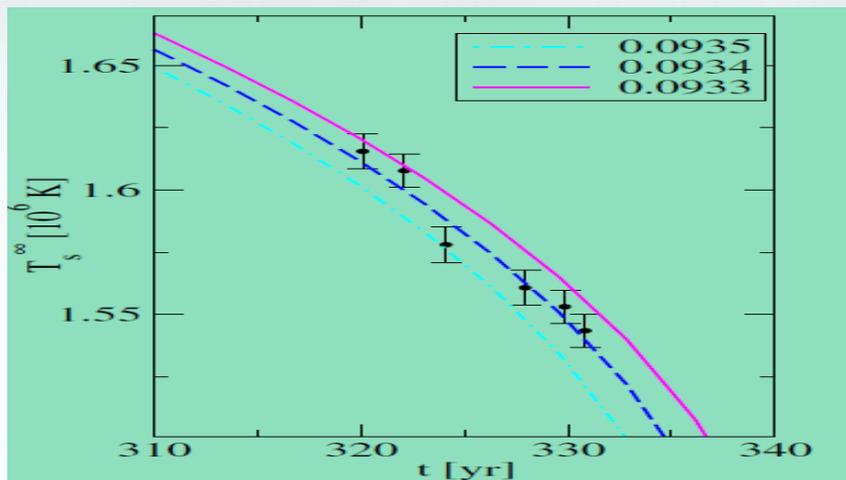


Rapid Cooling of the Neutron Star in Cassiopeia A Triggered by Neutron Superfluidity in Dense Matter

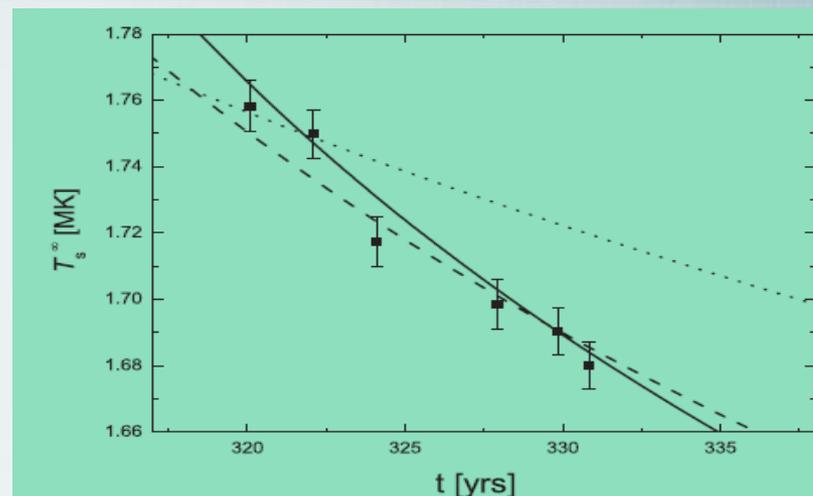
Dany Page,¹ Madappa Prakash,² James M. Lattimer,³ and Andrew W. Steiner⁴

We propose that the observed cooling of the neutron star in Cassiopeia A is due to enhanced neutrino emission from the recent onset of the breaking and formation of neutron Cooper pairs in the 3P_2 channel. We find that the critical temperature for this superfluid transition is $\approx 0.5 \times 10^9$ K. The observed rapidity of the cooling implies that protons were already in a superconducting state with a larger critical temperature. This is the first direct evidence that superfluidity and superconductivity occur at supranuclear densities within neutron stars. Our prediction that this cooling will continue for several decades at the present rate can be tested by continuous monitoring of this neutron star.

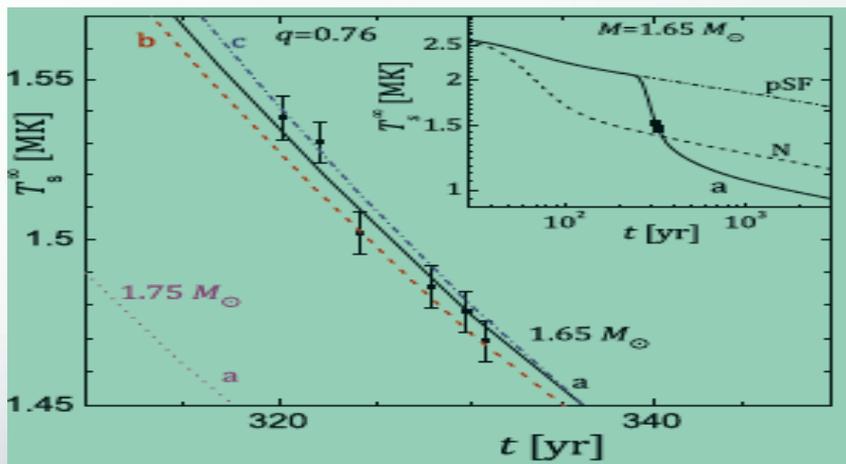
其它一些理论研究



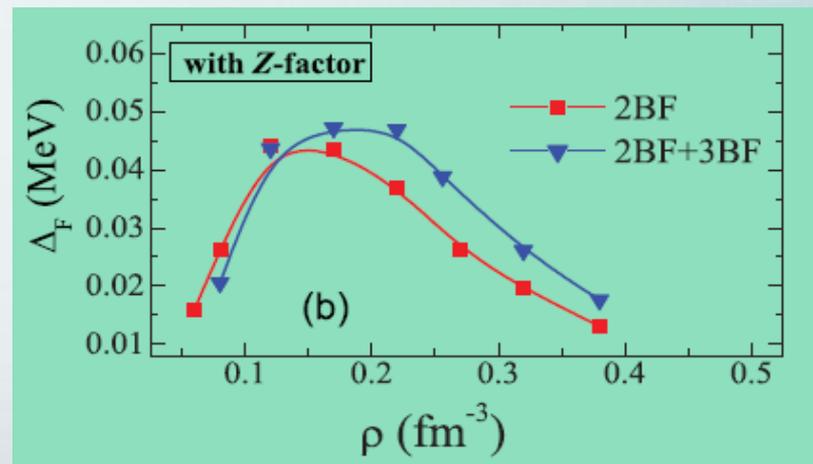
A. Sedrakian, A&A 555, L10 (2013)



S.H. Yang et al, ApJL 735:L29 (2011)

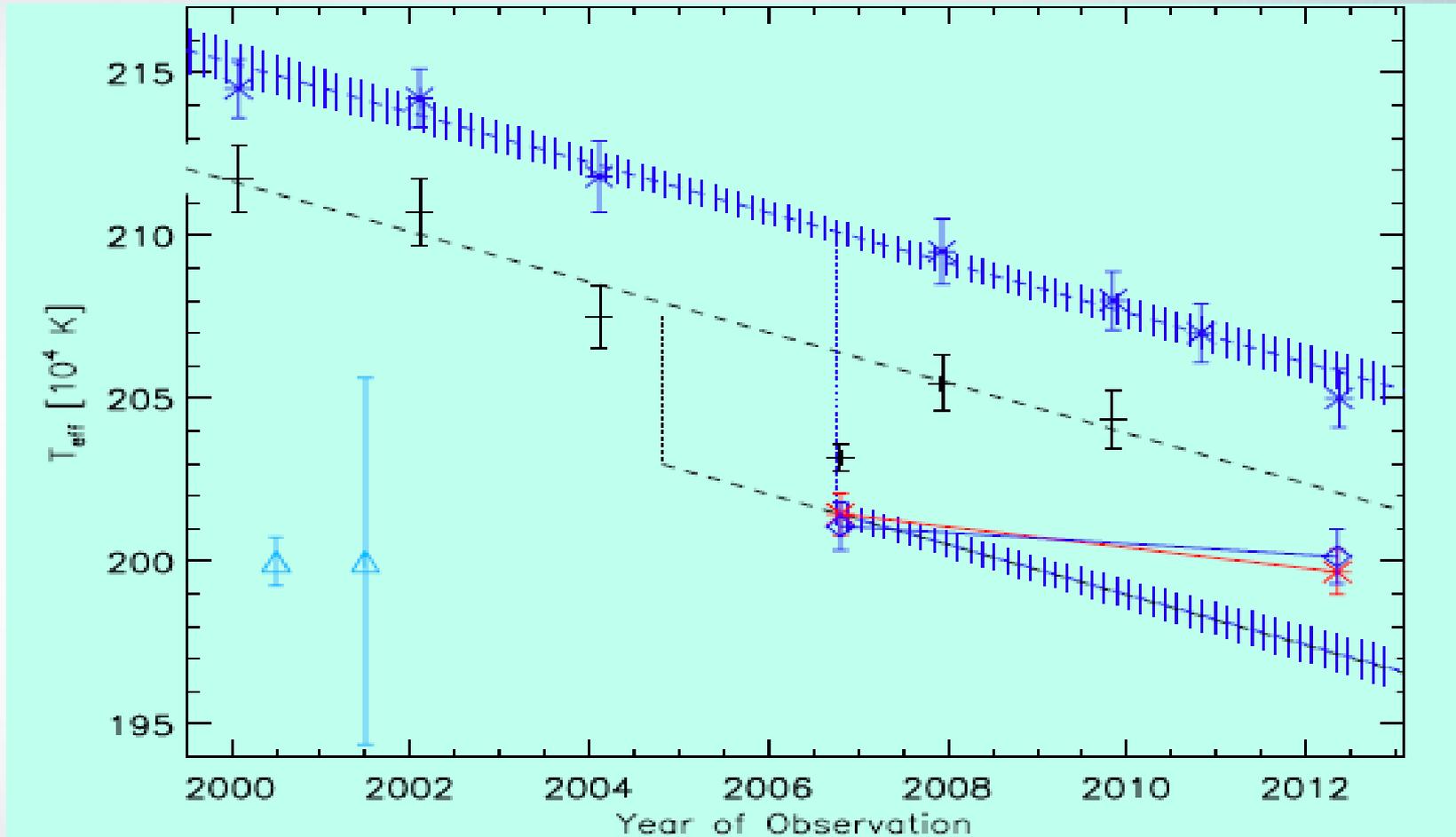


P. S. Shternin et al, MNRAS 412, L108 (2011)



J. M. Dong et al. PRC 87, 062801(R) (2013)

Cas A中子星的冷却-新的观测结果

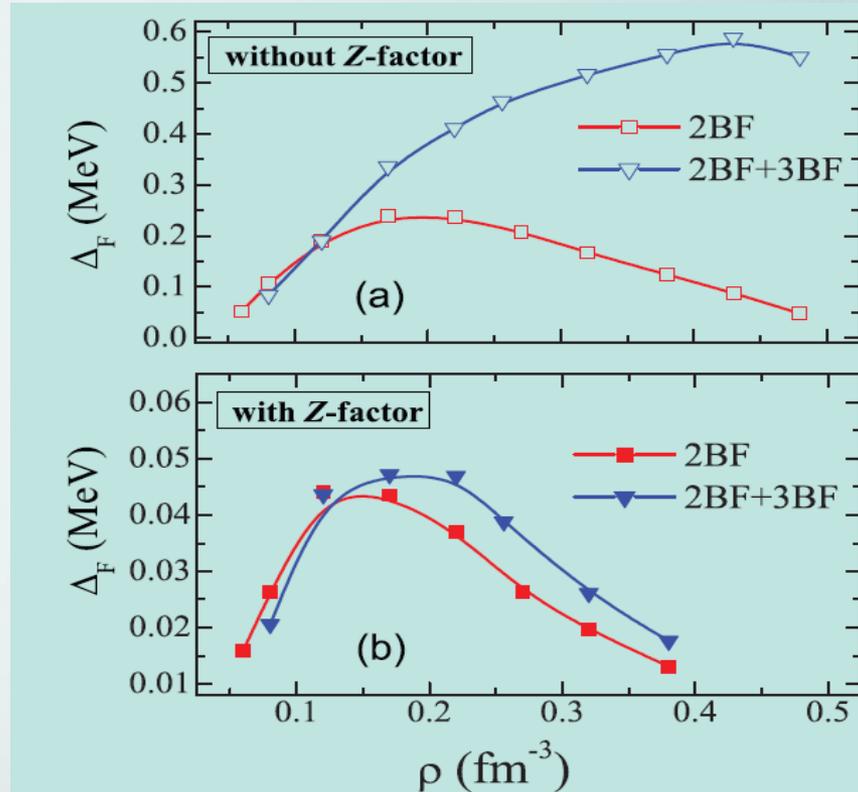
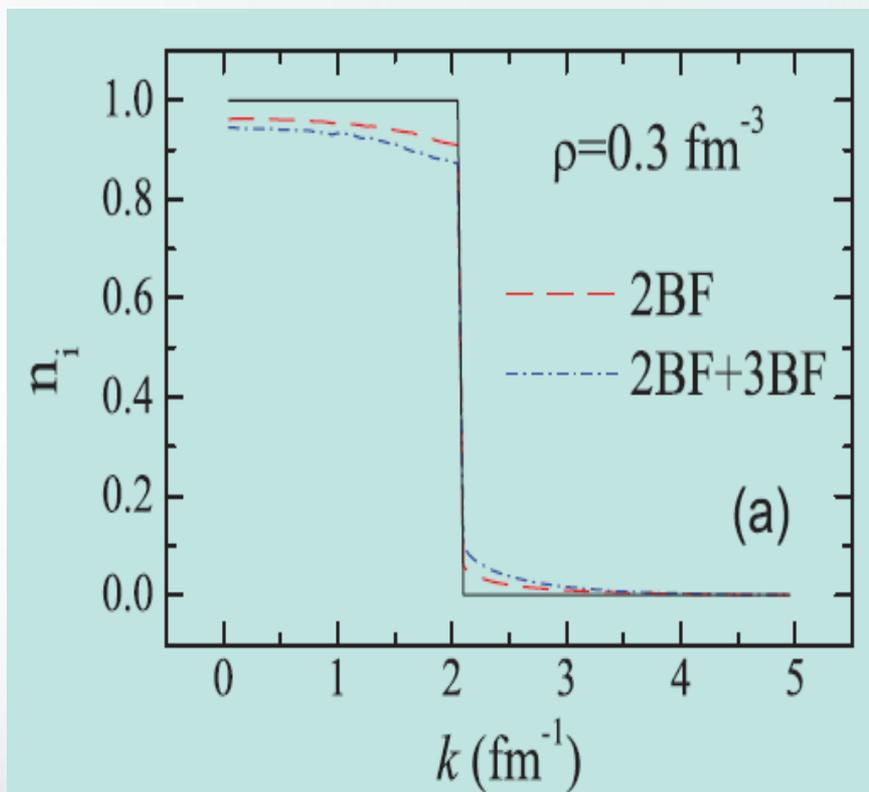


Rapid cooling of NS in Cas A was not observed!

B. Posselt, et al. 2013, ApJ, 779, 186

高密度中子物质超流性-Z因子效应

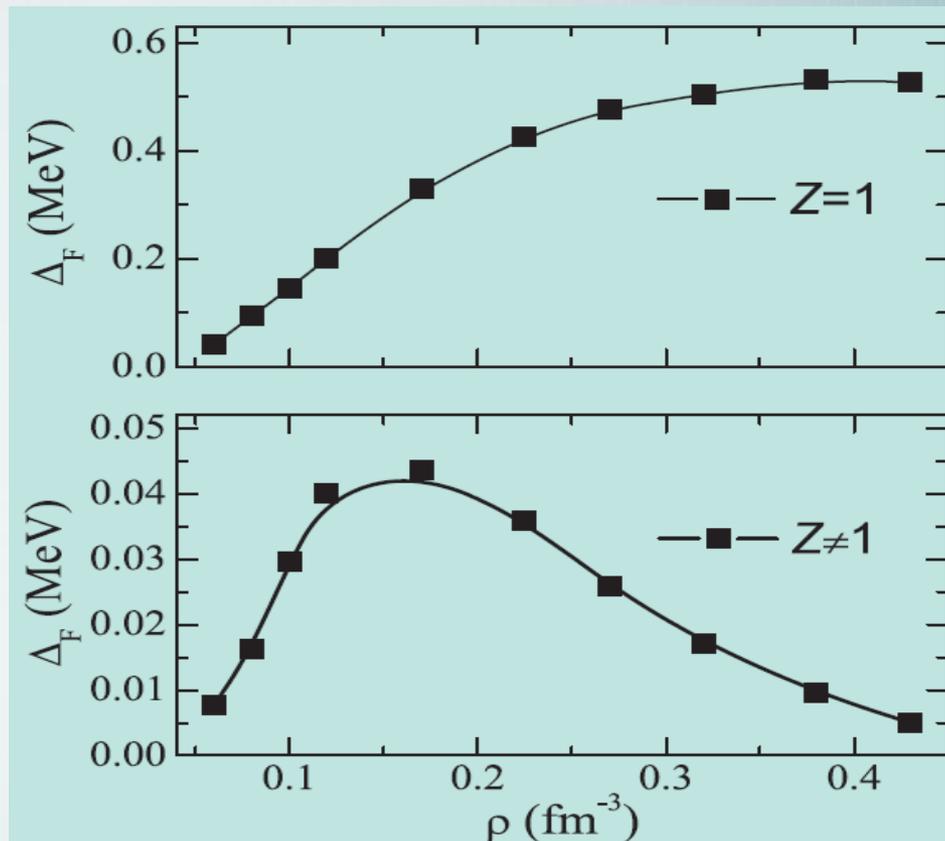
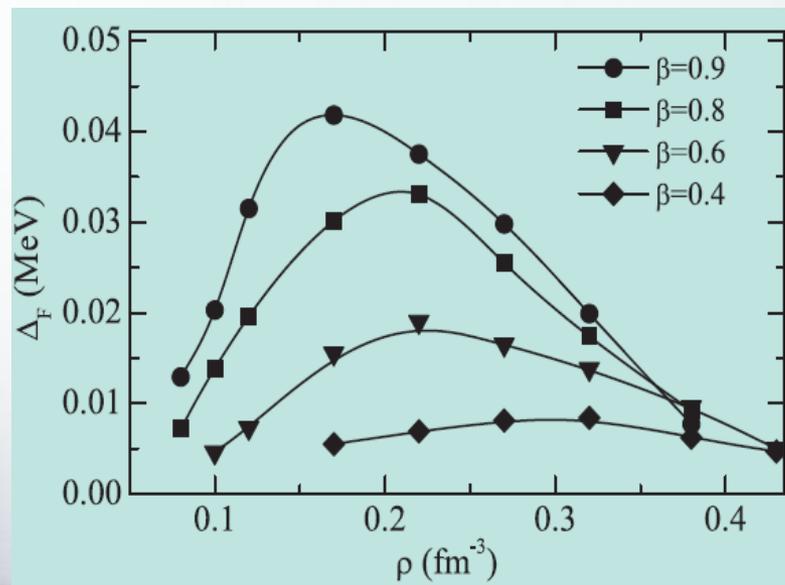
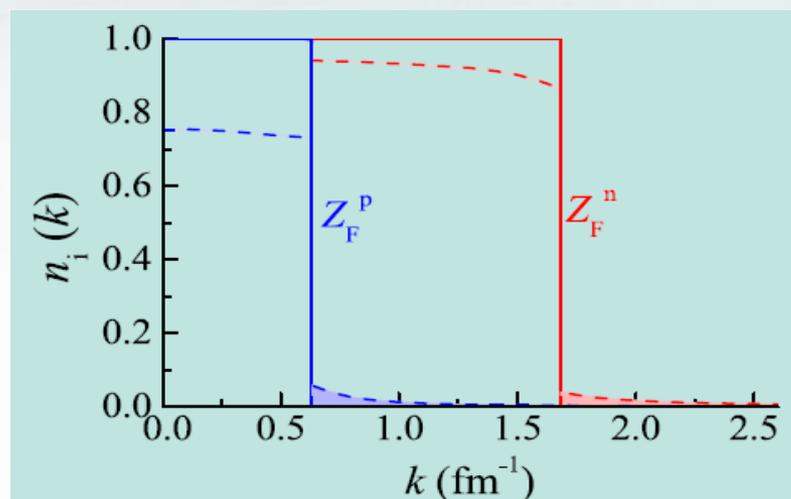
$$\begin{pmatrix} \Delta_L(p) \\ \Delta_{L+2}(p) \end{pmatrix} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty p'^2 dp' \frac{Z(p)Z(p')}{E_{p'}} \begin{pmatrix} V_{L,L}(p, p') & V_{L,L+2}(p, p') \\ V_{L+2,L}(p, p') & V_{L+2,L+2}(p, p') \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_L(p') \\ \Delta_{L+2}(p') \end{pmatrix}$$



考虑Z因子效应（费米面排空效应）后中子物质的超流性大大减弱！

J. M. Dong *et al.* PRC 87, 062801(R) (2013)

3PF_2 超流性-微观计算



3PF_2 超流性在中子星冷却中的作用被极大地抑制了!

Dong *et al.*, ApJ 817, 6 (2016)

中子星冷却-中微子发射

1. Durca $n \rightarrow p + l + \bar{\nu}_l, p + l \rightarrow n + \nu_l,$

最有效的中微子辐射过程，但要求质子组分较高

2. Murca $n + N \rightarrow p + N + l + \bar{\nu}_l, p + N + l \rightarrow n + N + \nu_l,$

通常认为是主要的中微子辐射过程

3. Bremsstrahlung $N + N \rightarrow N + N + \nu + \bar{\nu},$

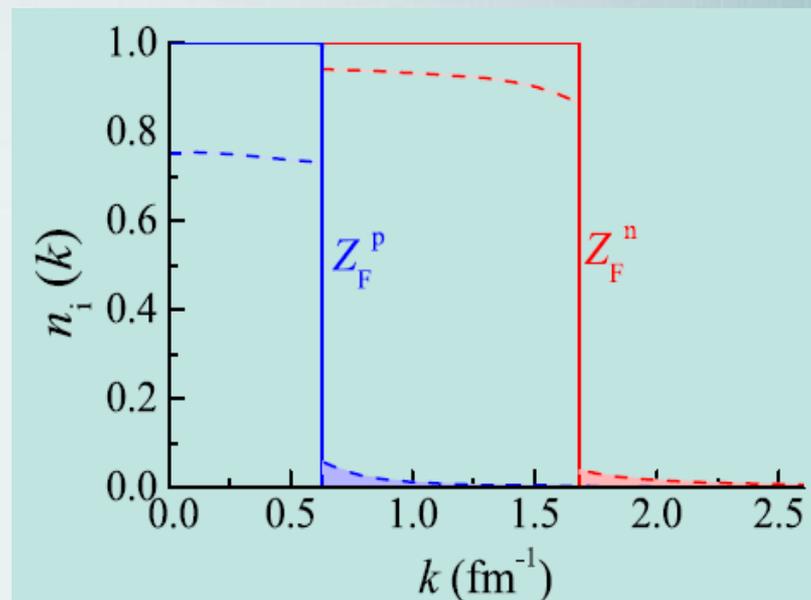
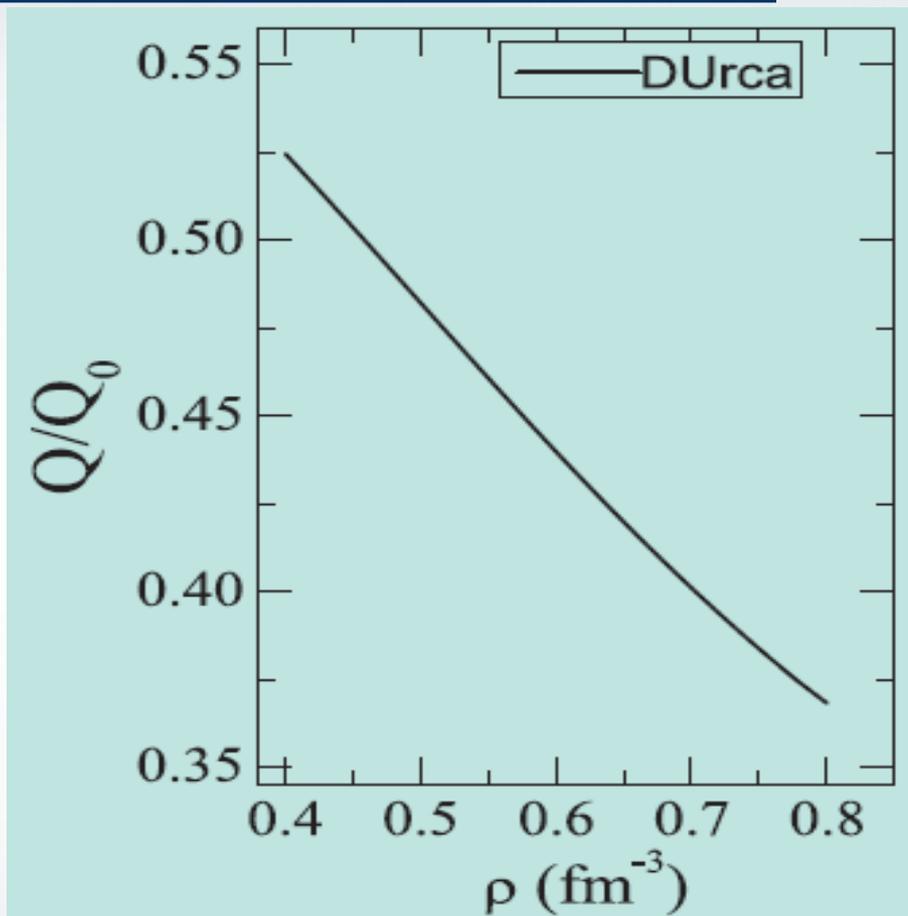
效率比**Murca**低

4. Cooper pair breaking and formation (PBF)

$N + N \rightarrow [NN] + \nu + \bar{\nu}.$

在温度略低于临界温度时有效

中微子发射率-Z因子效应

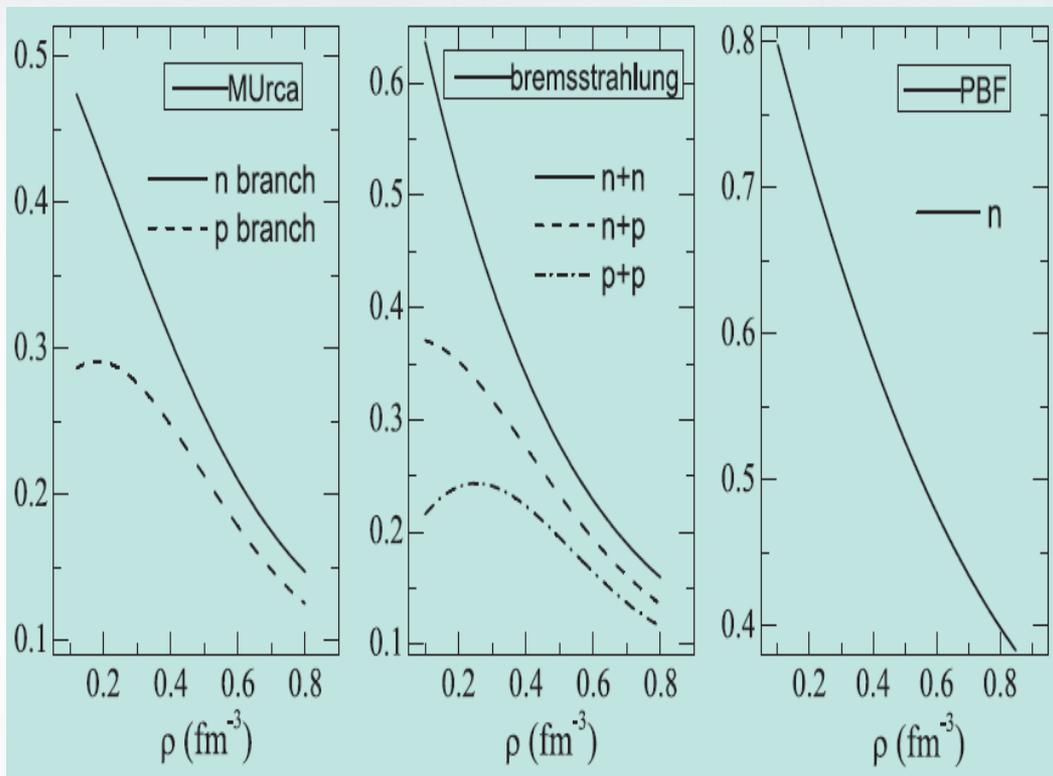


$$Q^{(D)} = 2 \int \frac{dk_n}{(2\pi)^3} \epsilon_\nu dW_{i \rightarrow f} n_n(k) \times [n_p(k)|_{T=0} - n_p(k)](1 - f_l),$$

Durca条件: $k_{F_n} = k_{F_p} + k_{F_e}$

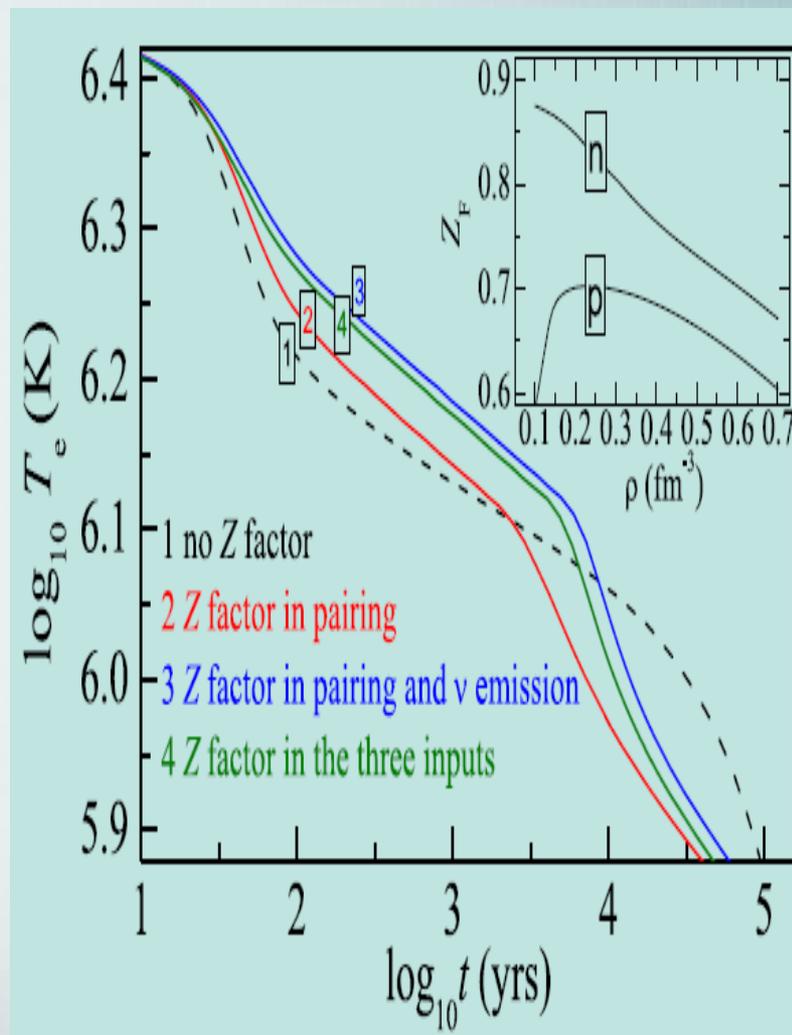
如果**DUrca**过程能够发生，Z因子效应(费米面排空效应)导致中微子发射率降低，与以往结论完全相反。

中微子发射率-Z因子效应



**Z因子效应导致中微子发射率降低，
延缓年轻中子星冷却！**

Dong *et al.*, ApJ 817, 6 (2016)



动态星体结构下中子星冷却

星体冷却 → EoS变化 → 星体结构变化 → 额外能量产生

EOS: 相对论平均场, 将温度视为微扰!

$$\Delta\sigma = -g_\sigma m^* \left[\sum_{B=n,p} \left(\frac{1}{\pi^2} \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}} \Delta\mu_B + \frac{(kT)^2}{6} \frac{\mu_B}{\sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}} \right) \right] \times [(m_\sigma^2 + 2g_2\sigma + 3g_3\sigma^2) + \frac{1}{2\pi^2} g_\sigma^2 m^{*2} \left(\frac{-\mu_B}{\sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}} + 2 \ln \frac{m^*}{\mu_B + \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}} + \frac{\mu_B^2 + \mu_B \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}}{\mu_B^2 - m^{*2} + \mu_B \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}} \right)]^{-1}$$

$$\Delta\mu_e = -\frac{(x_p + x_n)[y_e + y_\mu - y_p] + x_p(y_n + y_p)}{(x_p + x_n)(x_e + x_\mu) + x_p x_n} - \frac{x_p x_n (g_\rho/2) 2}{(x_p + x_n)(x_e + x_\mu) + x_p x_n} \Delta\rho_0,$$

$$\Delta\mu_\mu = \Delta\mu_e,$$

$$\Delta\mu_p = \frac{(x_e + x_\mu)\Delta\mu_e + y_e + y_\mu - y_p}{x_p},$$

$$\Delta\mu_n = \Delta\mu_p + \Delta\mu_e + (g_\rho/2) 2\Delta\rho_0,$$

$$\Delta\rho_{30} = [m_\rho^2 + 2\Lambda_v g_\rho^2 g_\omega^2 \omega_0^2 - \frac{(4\Lambda_v g_\rho^2 g_\omega^2 \rho_{30} \omega_0)^2}{m_\omega^2 + 3c_3 \omega_0^2 + 2\Lambda_v g_\rho^2 g_\omega^2 \rho_{30}^2} + \frac{g_\rho^2 x_n}{2}]^{-1} \times \left\{ -g_\rho/2 \left[\left(\frac{x_n}{x_p} - 1 \right) (x_e + x_\mu) + x_n \right] \Delta\mu_e - g_\rho/2 \left[\left(\frac{x_n}{x_p} - 1 \right) (y_e + y_\mu - y_p) + y_n - y_p \right] \right\}$$

$$\Delta\omega_0 = \frac{-4\Lambda_v g_\rho^2 g_\omega^2 \rho_{30} \omega_0}{m_\omega^2 + 3c_3 \omega_0^2 + 2\Lambda_v g_\rho^2 g_\omega^2 \rho_{30}^2} \Delta\rho_{30},$$

$$x_B = \frac{1}{\pi^2} \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}} \mu_B, \quad B = n, p$$

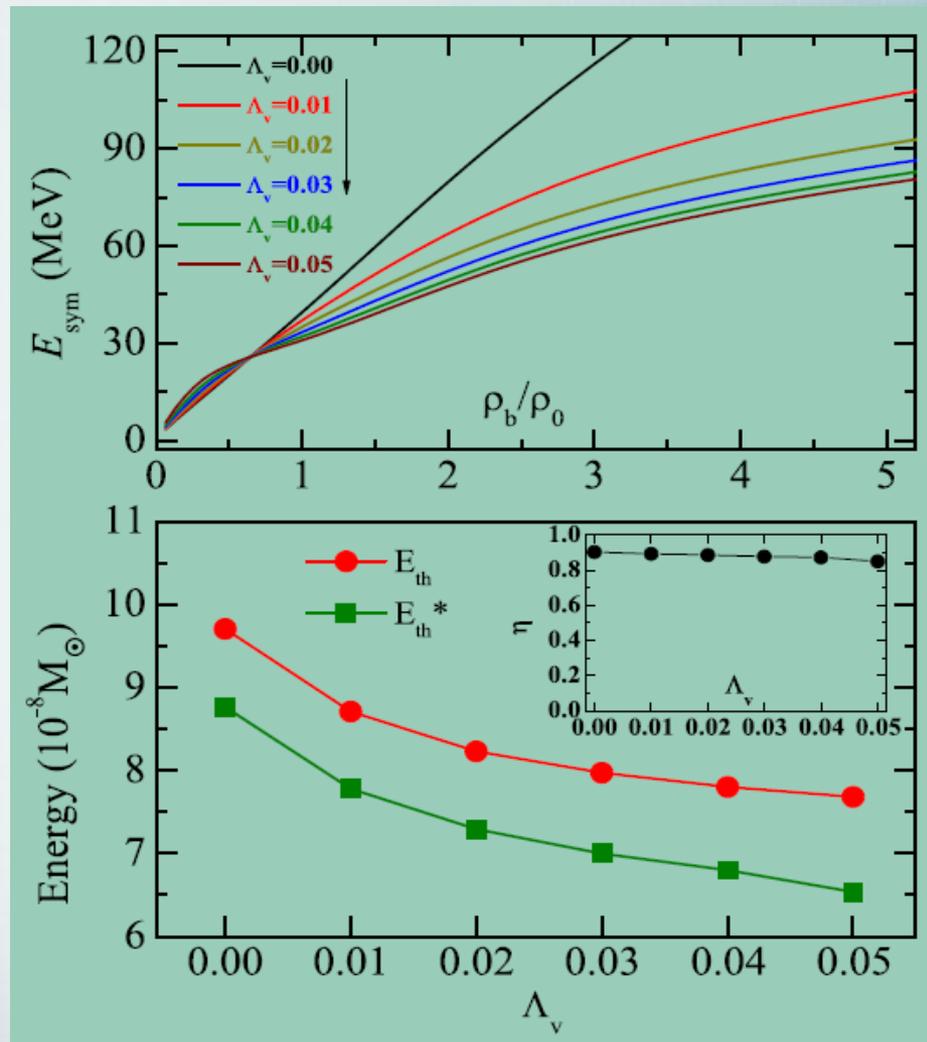
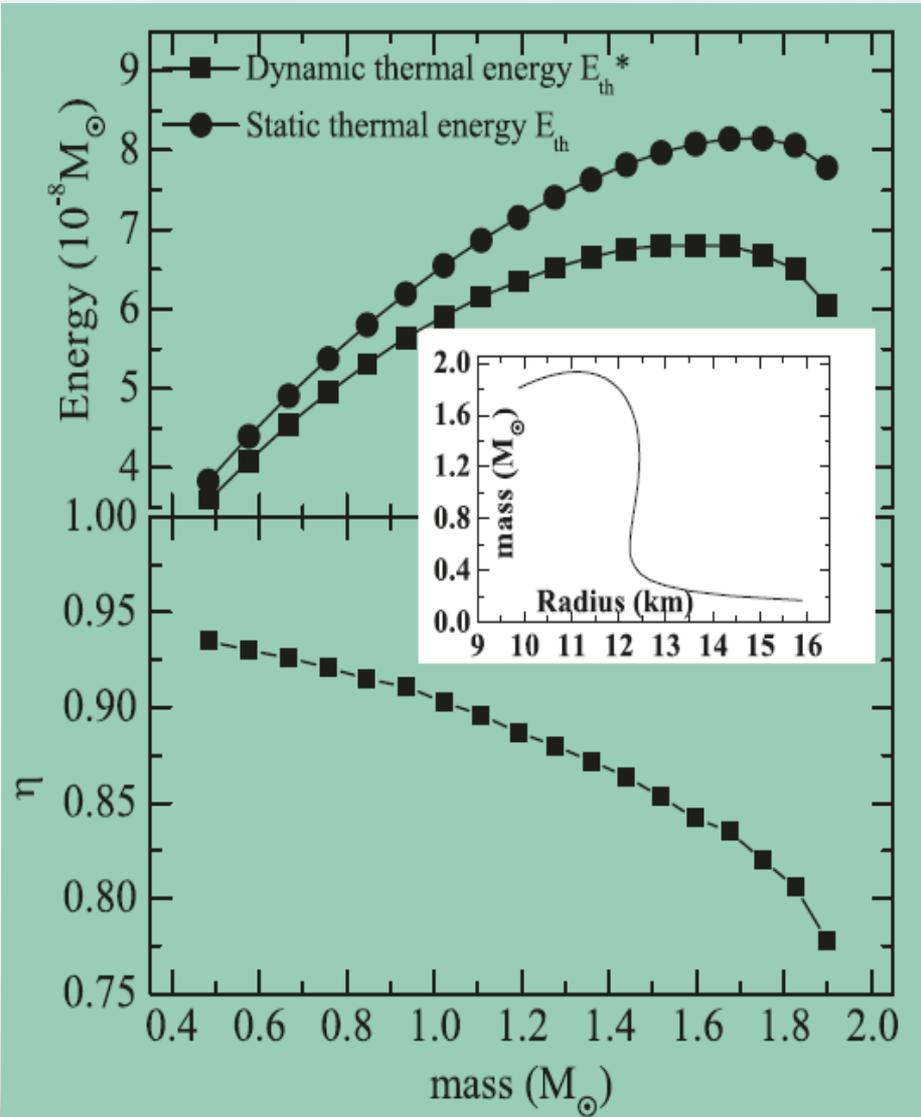
$$y_B = \frac{g_\sigma \Delta\sigma}{\pi^2} \sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}} m^* + \frac{(kT)^2}{6} \frac{2\mu_B^2 - m^{*2}}{\sqrt{\mu_B^2 - m^{*2}}},$$

$$x_l = \frac{1}{\pi^2} \sqrt{\mu_l^2 - m_l^2} \mu_l, \quad l = e, \mu$$

$$y_l = \frac{(kT)^2}{6} \frac{2\mu_l^2 - m_l^2}{\sqrt{\mu_l^2 - m_l^2}}.$$

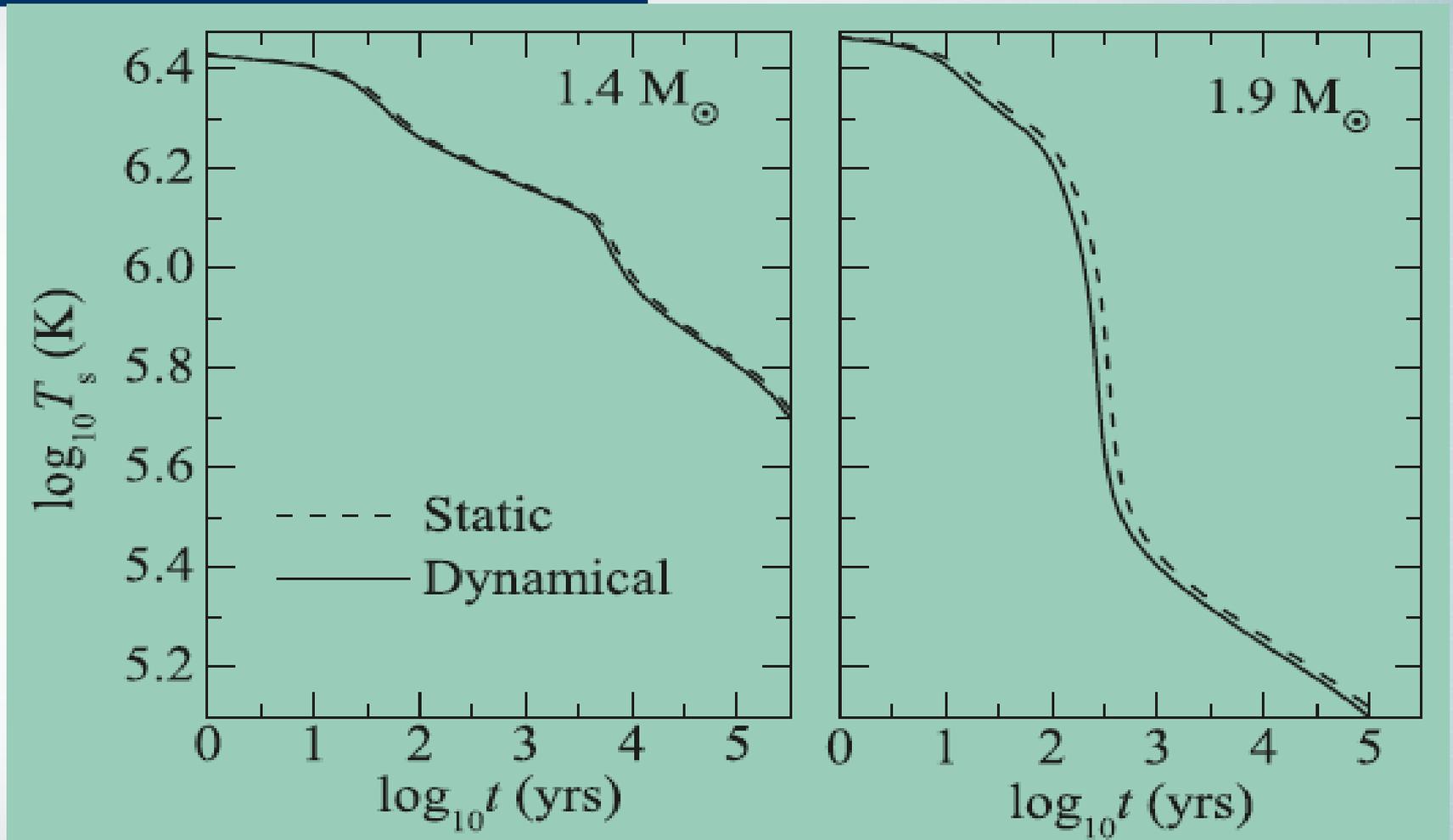
迭代求解!

动态星体结构下中子星冷却



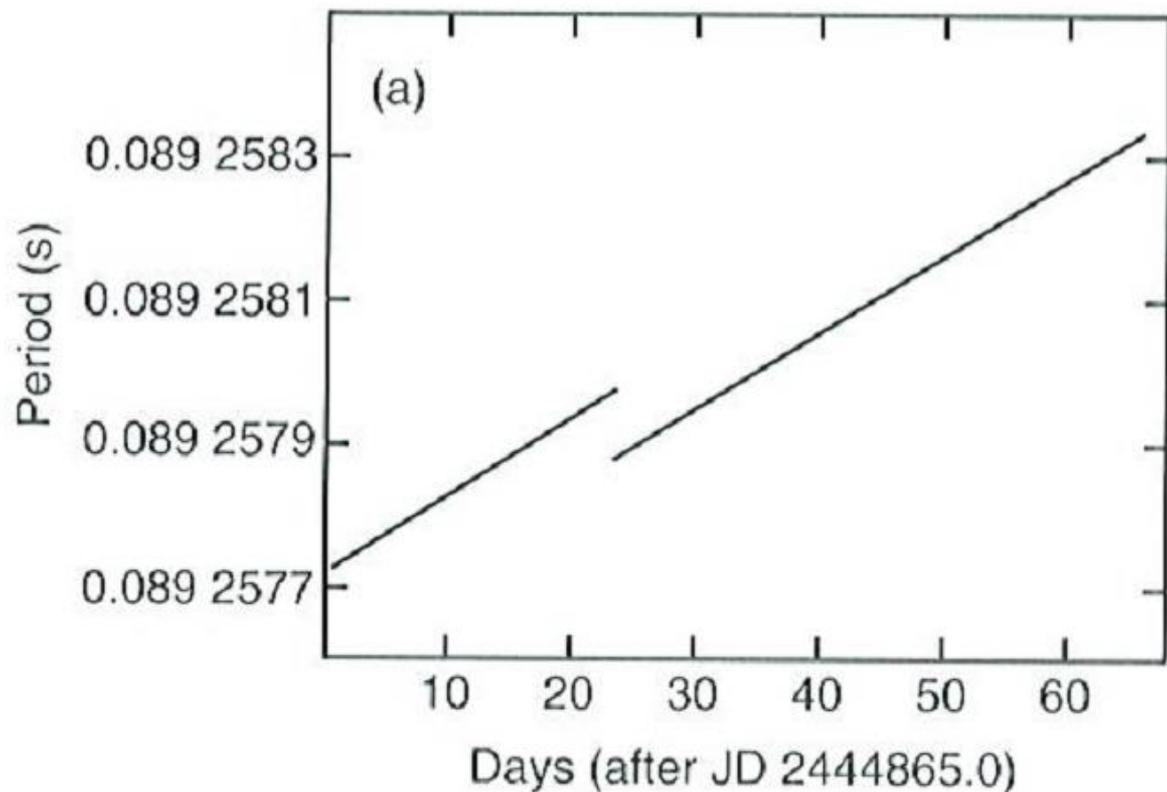
Dong, Wang, Zuo, ApJ 862, 67 (2018)

冷却曲线



The static treatment is a good approximation in the calculations of NS cooling.

脉冲星周期跃变



自转突然加快：
 $10^{-10} < \Delta v/v < 10^{-5}$
短时标

模型解释：
1) 星震模型
2) 内壳层超流体
角动量转移

.....

The most known: Crab and Vela $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-9} - 10^{-6}$

主流观点认为和中子星物质超流性有关！

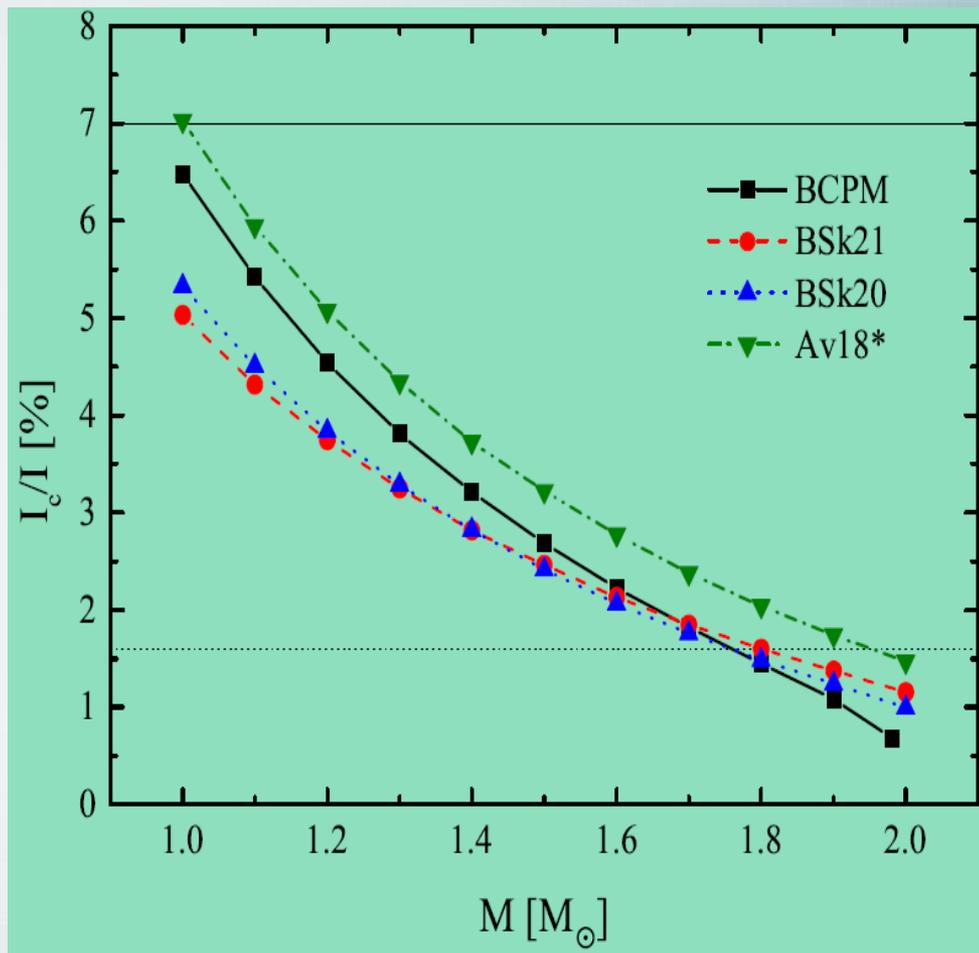
脉冲星周期跃变

研究对象: Vela 脉冲星

理论模型: Hartle-Thorne
慢转动近似, 关注壳层转动惯量, 采用统一的状态方程 (BCPM, BSk21, BSk20, 即能统一描述中子星壳层和核心, 合理地给出中子星核心-壳层物质相变密度

Glitch危机判断依据:

$I_c/I < 7\%$ --存在危机



Glitch危机仍然存在!

A. Li, J. M. Dong, J. B. Wang, R. X. Xu, ApJS 223,16 (2016)

总结

- 1) Z因子效应强烈压低中子 3PF_2 超流性, 3PF_2 超流性在中子星冷却中的作用被极大地抑制了
- 2) Z因子效应导致中微子发射率降低, 延缓年轻中子星冷却
- 3) 中子星冷却计算中冻结星体结构是很好的近似
- 4) Glitch危机仍然存在

Thanks!