第二届“粤港澳”核物理论坛

中子星与夸克素物质

曹高清
中山大学物理与天文学院

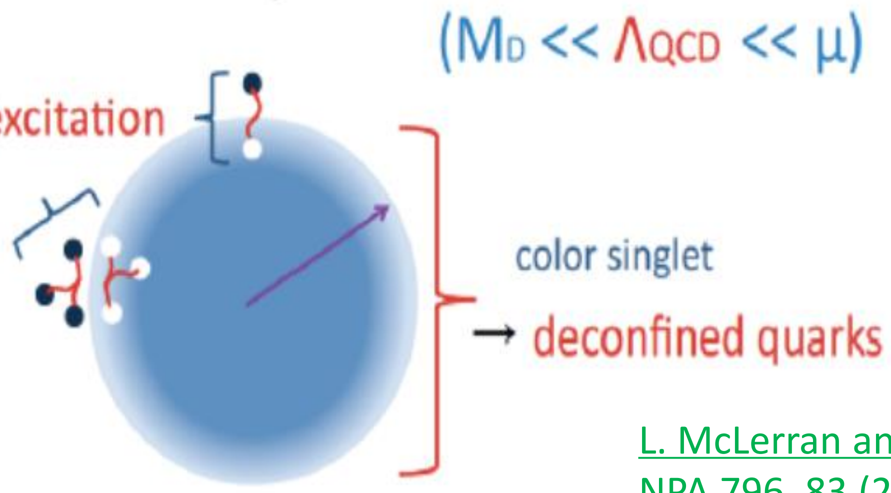
GC, Phys. Rev. D 105, 114020 (2022).

2023.6.19@SCNT

内容提要

- 什么是夸克素物质？
- 作为夸克素物质的中子星
- 手征有效场论模型
- 结果与讨论
- 总结

什么是夸克素（quarkyonic）物质？



手征对称性恢复
＋
禁闭

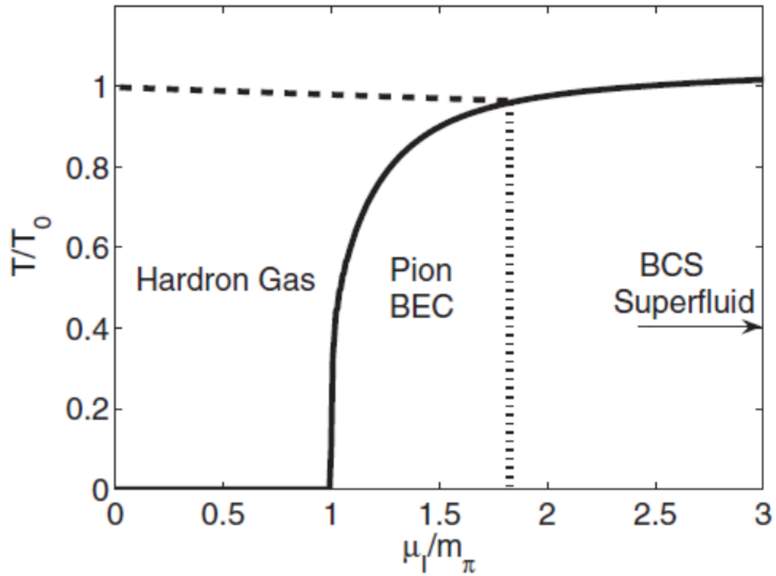
L. McLerran and R. D. Pisarski, NPA 796, 83 (2007).

1. 费米海：近自由的夸克;
2. 费米面：禁闭的强子，主要是重子;
3. 在大N_C极限下得到证明;
4. 在$N_C = 2$时得到格点QCD验证。

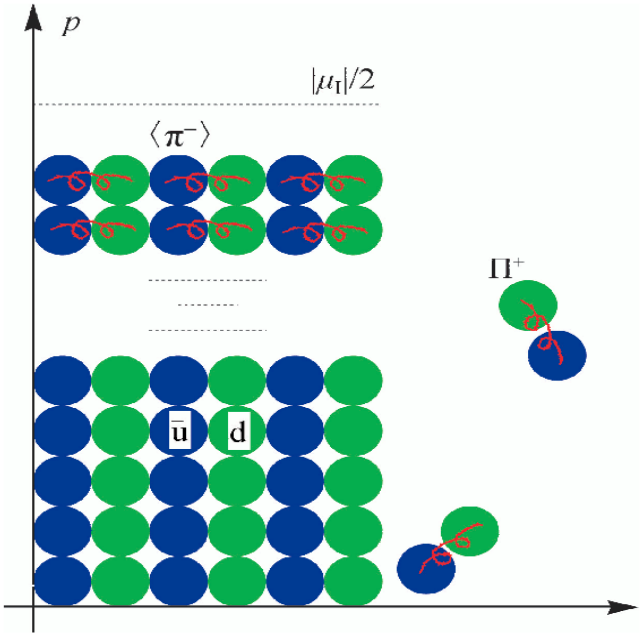
V. V. Braguta et. al., PRD.94.114510 (2016)

推广——Quarksonic 物质

BEC-BCS crossover



G. Sun, L. He and P. Zhuang, PRD 75, 096004 (2007).

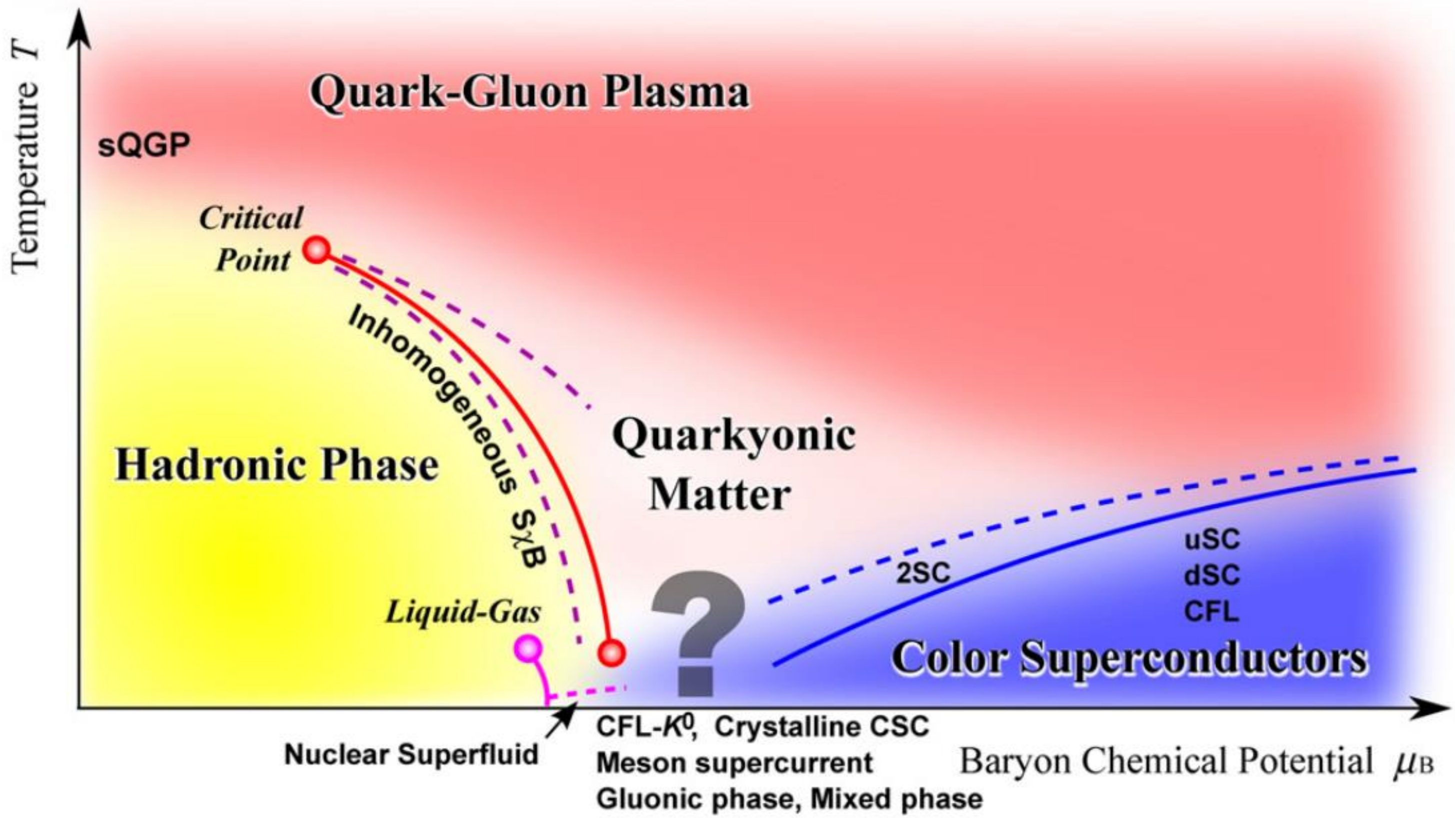


GC, L. He and X.G. Huang, CPC 41, 051001 (2017) .

1. 费米海：近自由的夸克与反夸克;
2. 费米面：禁闭的强子，主要是介子;

皆大欢喜的相图

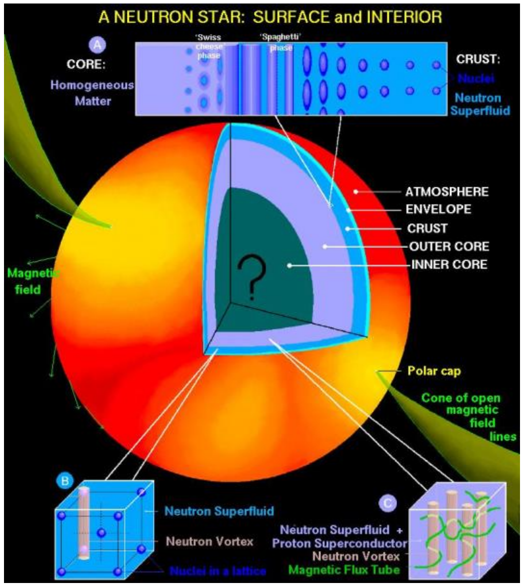
K. Fukushima and T. Hatsuda, Rep. Prog. Phys. 74 (2011) 014001

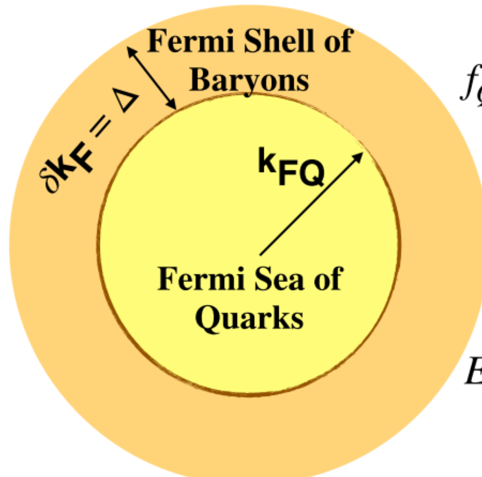


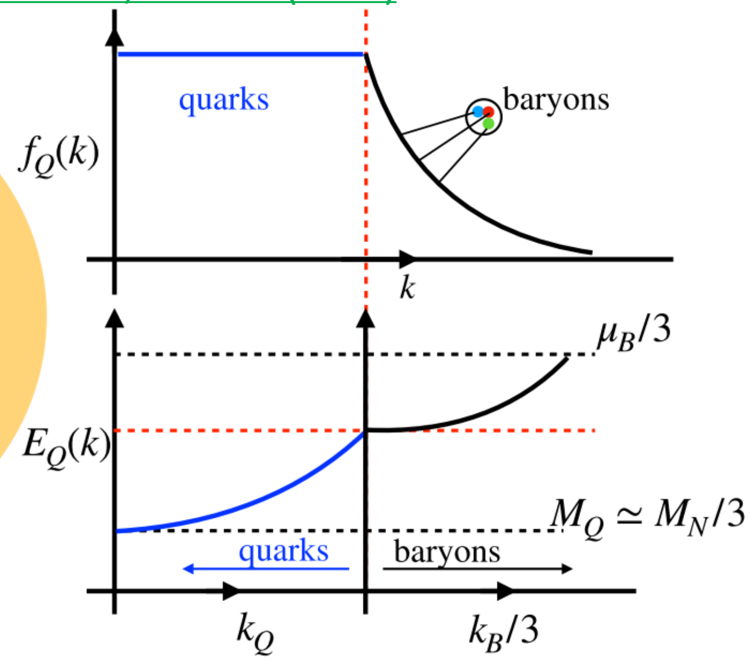
机遇：未来的低能EIC与EICC可能产生夸克素物质

作为夸克素物质的中子星

L. McLerran and S. Reddy, PRL 122, 122701 (2019)



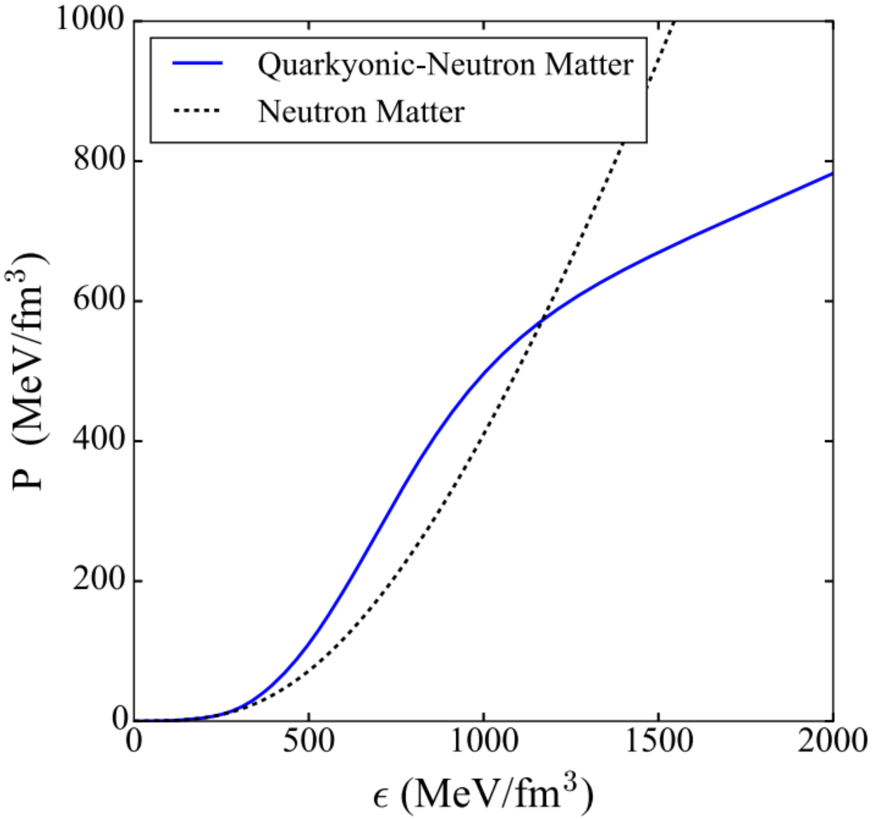




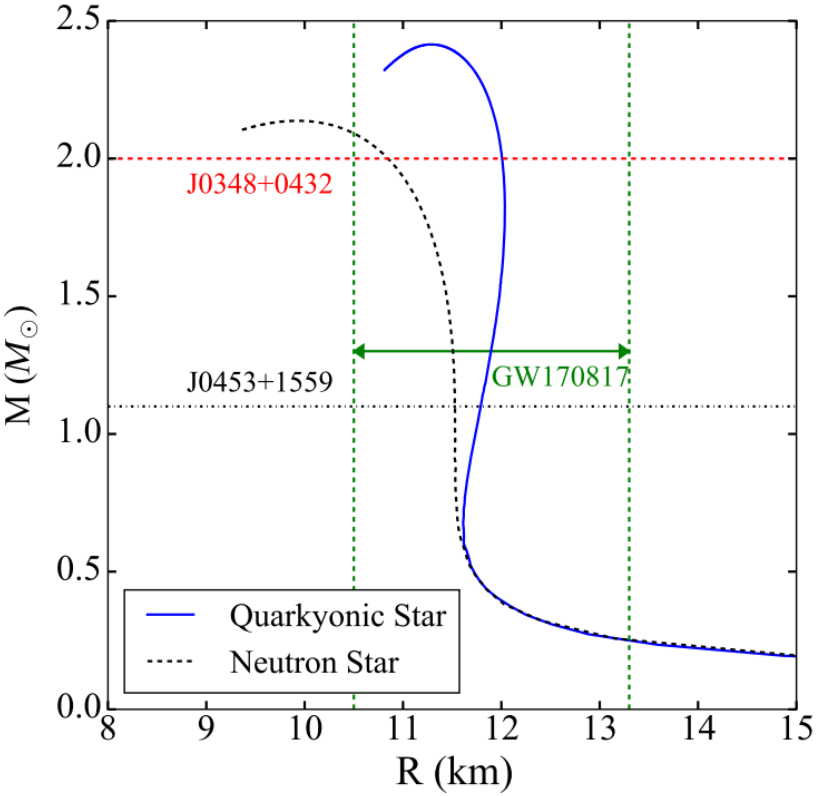
位置空间 + 动量空间

$$\begin{cases} n_B = \dfrac{2}{3\pi^2}\left[k_{\rm FB}^3 - (k_{\rm FB}-\Delta)^3 + k_{\rm FQ}^3\right], \qquad k_{\rm FQ} = \dfrac{(k_{\rm FB}-\Delta)}{N_c}\Theta(k_{\rm FB}-\Delta) \\ \epsilon(n_B) = 4\displaystyle\int_{N_c k_{\rm FQ}}^{k_{\rm FB}} \frac{d^3k}{(2\pi)^3}\sqrt{k^2+M_N^2} + 4N_c\int_0^{k_{\rm FQ}} \frac{d^3k}{(2\pi)^3}\sqrt{k^2+M_Q^2} \end{cases}$$

中子相互作用势能 $V_n(n_n) = \tilde{a} n_n \left(\frac{n_n}{n_0}\right) + \tilde{b} n_n \left(\frac{n_n}{n_0}\right)^2$



状态方程



质量-半径关系

手征有效场论模型

夸克介子模型 + Walecka模型

$$\mathcal{L}_{\rm q}=\bar{q}\left[i\partial\!\!\!/ + \left(\frac{\mu_{\rm B}}{N_c}+\frac{\mu_{\rm I}}{2}\tau_3\right)\gamma^0 - g_q\left(\sigma+i\gamma^5\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{\pi}\right)\right]q,$$ 夸克

$$\mathcal{L}_{\rm n}=\bar{n}\left[i\partial\!\!\!/ - \mu_{\rm n}\gamma^0 - g_{\rm Ns}\left(\sigma-i\gamma^5\pi^0\right) - g_{\rm N\omega}\omega\!\!\!/ + g_{\rm N\rho}\left(\rho\!\!\!/^3-\gamma^5 A\!\!\!/^3\right)\right]n,$$ 中子

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\rm M}=&\frac{1}{2}\left(\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma+D_\mu\boldsymbol{\pi}\cdot D^\mu\boldsymbol{\pi}\right)-\frac{\lambda}{4}\left(\sigma^2+\boldsymbol{\pi}\cdot\boldsymbol{\pi}-v^2\right)^2+c\,\sigma\\&-\underline{\frac{1}{4}\left(\omega_{\mu\nu}\omega^{\mu\nu}+\boldsymbol{\rho}_{\mu\nu}\cdot\boldsymbol{\rho}^{\mu\nu}+\mathbf{A}_{\mu\nu}\cdot\mathbf{A}^{\mu\nu}\right)}+\frac{1}{2}g_{\rm s\omega}\left(\sigma^2+\boldsymbol{\pi}\cdot\boldsymbol{\pi}-h_\omega^2\right)\omega_\mu\omega^\mu\\&+\frac{1}{2}g_{\rm s\rho}\left(\sigma^2+\boldsymbol{\pi}\cdot\boldsymbol{\pi}-h_\rho^2\right)\left(\boldsymbol{\rho}_\mu\cdot\boldsymbol{\rho}^\mu+\mathbf{A}_\mu\cdot\mathbf{A}^\mu\right),\end{aligned}$$ 介子

1. 当 $c=0$，完全手征对称性 ➡ 夸克、核子质量
2. ω 介子耦合常数由对称核物质饱和性质决定；
   GC and J. Liao, JHEP 10, 168 (2020).
3. ρ 介子耦合常数由对称能及其斜率决定
   M. Oertel, et. al., RMP 89, 015007 (2017)

$$\begin{cases}E_{\rm sym}(n_0)=32\ {\rm MeV}\\ L_{\rm sym}(n_0)=60\ {\rm MeV}\end{cases}$$

热力学势

平均场近似：σ, ω, ρ_0凝聚

介子

$$\Omega_v = \frac{\lambda}{4}\left(\langle\sigma\rangle^2 + \langle\boldsymbol{\pi}\rangle\cdot\langle\boldsymbol{\pi}\rangle - v^2\right)^2 - c\,\langle\sigma\rangle - \frac{g_{s\omega}}{2}(\langle\sigma\rangle^2 - h_\omega^2)\langle\omega_0\rangle^2 - \frac{g_{s\rho}}{2}(\langle\sigma\rangle^2 - h_\rho^2)\langle\rho_0^3\rangle^2$$

夸克

$$\Omega_{\rm q} = -2N_cT\sum_{l,t=\pm}\int\frac{d^3p}{(2\pi)^3}\ln\left(1+e^{-[E_{\rm q}(\mathbf{p})+l(\frac{\mu_{\rm B}}{N_c}+t\frac{\mu_{\rm I}}{2})]/T}\right)$$

中子

$$\Omega_{\rm n} = -\frac{1}{2}g_{s\omega}(\langle\sigma\rangle^2 - h_\omega^2)\langle\omega_0\rangle^2 - \frac{1}{2}g_{s\rho}(\langle\sigma\rangle^2 - h_\rho^2)\langle\rho_0^3\rangle^2$$

$$-2T\sum_{l=\pm}\int\frac{d^3p}{(2\pi)^3}\ln\left(1+e^{-[E_{\rm n}(\mathbf{p})+l(\mu_{\rm n}-(g_{{\rm N}\omega}\langle\omega_0\rangle-g_{{\rm N}\rho}\langle\rho_0^3\rangle))]/T}\right)$$

$$+2T\sum_{l=\pm}\int\frac{d^3p}{(2\pi)^3}\ln\left(1+e^{-[E_{\rm n}(\mathbf{p})+l(\mu'_{\rm n}-(g_{{\rm N}\omega}\langle\omega_0\rangle-g_{{\rm N}\rho}\langle\rho_0^3\rangle))]/T}\right)$$

Blocking effect: $\mu'_{\rm n} = \mu_{\rm n} - (N_c m_{\rm q} - m_{\rm n})$

能隙方程、热力学量

有限温、有限密耦合能隙方程

$$\partial\Omega/\partial X = 0 \quad (X = \langle\omega_0\rangle, \langle\rho_0^3\rangle, \langle\sigma\rangle)$$

热力学关系

重子数密度、同位旋密度、熵密度

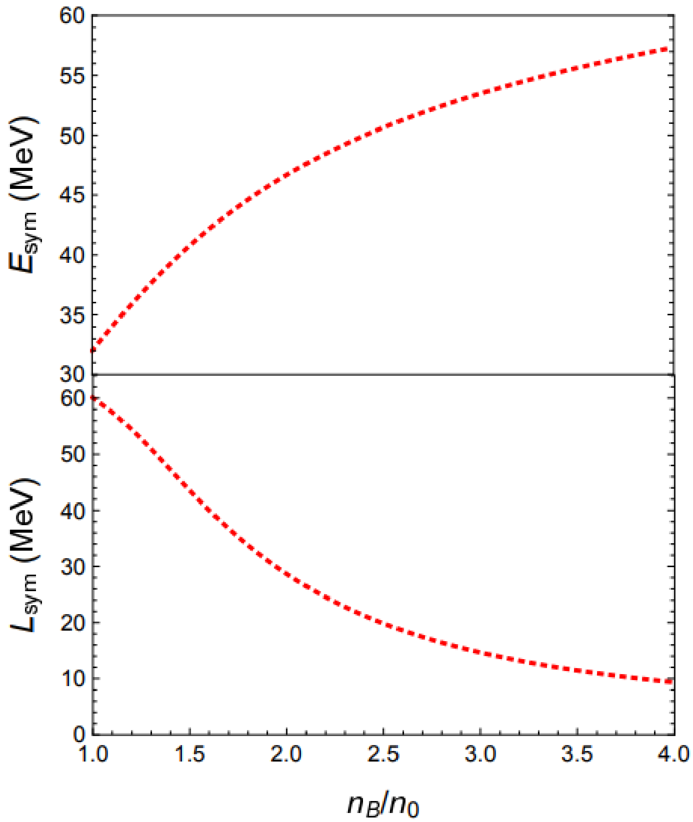
$$n_\mathrm{B} = -\partial\Omega/\partial\mu_\mathrm{B} \qquad n_\mathrm{I} = -\partial\Omega/\partial\mu_\mathrm{I}$$

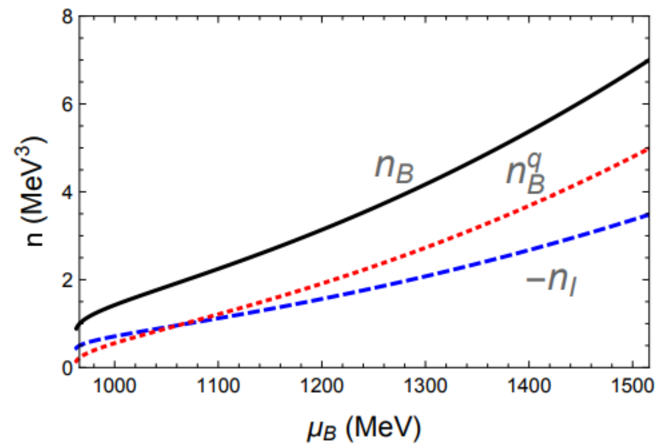
$$s = -\partial\Omega/\partial T$$

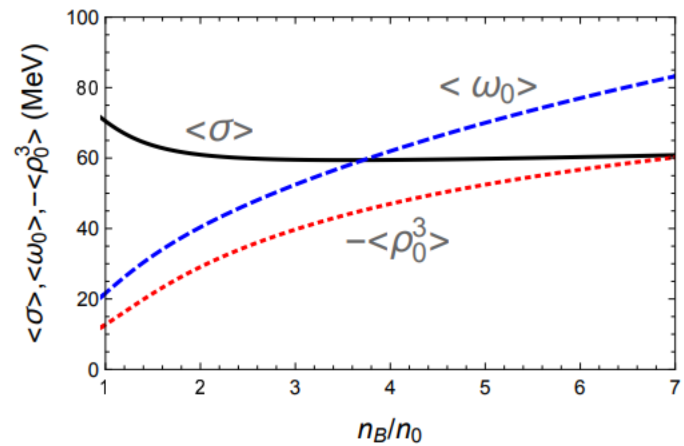
能量密度

$$\epsilon \equiv \Omega + \mu_\mathrm{B} n_\mathrm{B} + \mu_\mathrm{I} n_\mathrm{I} + sT - \epsilon_0$$

物理量的变化







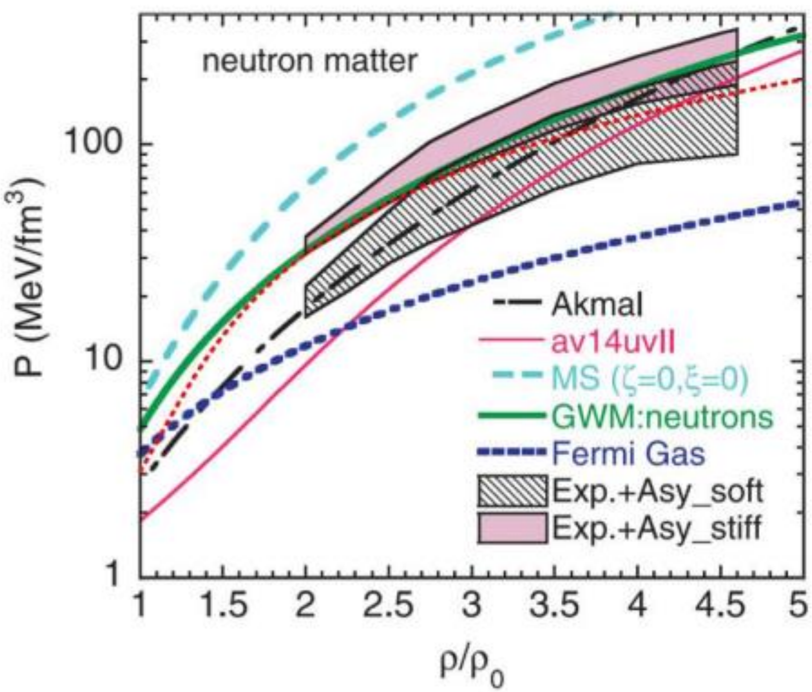
状态方程逐渐软化

高密区夸克主导，

手征对称性部分恢复

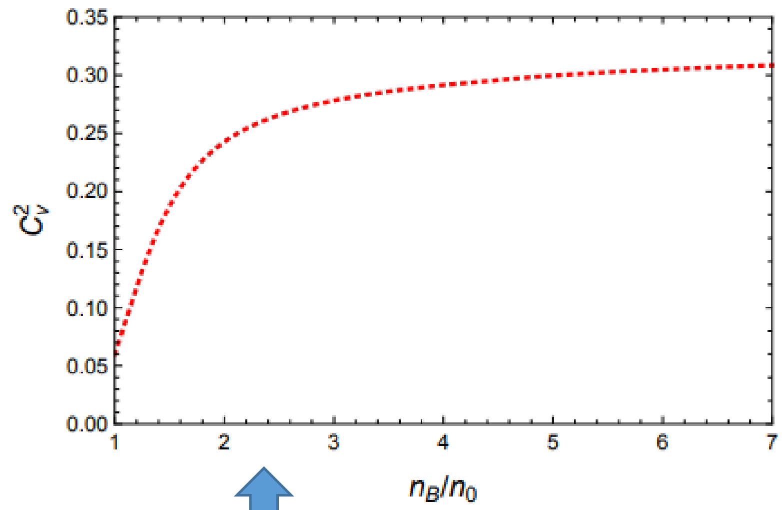
状态方程与声速

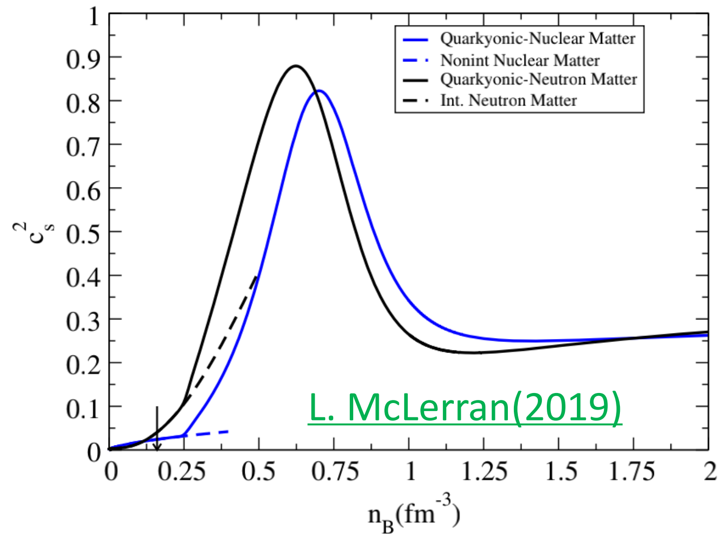
P. Danielewicz, et al.,
Science 298 (2002) 1592.



与实验结果较相符

不太软也不太硬





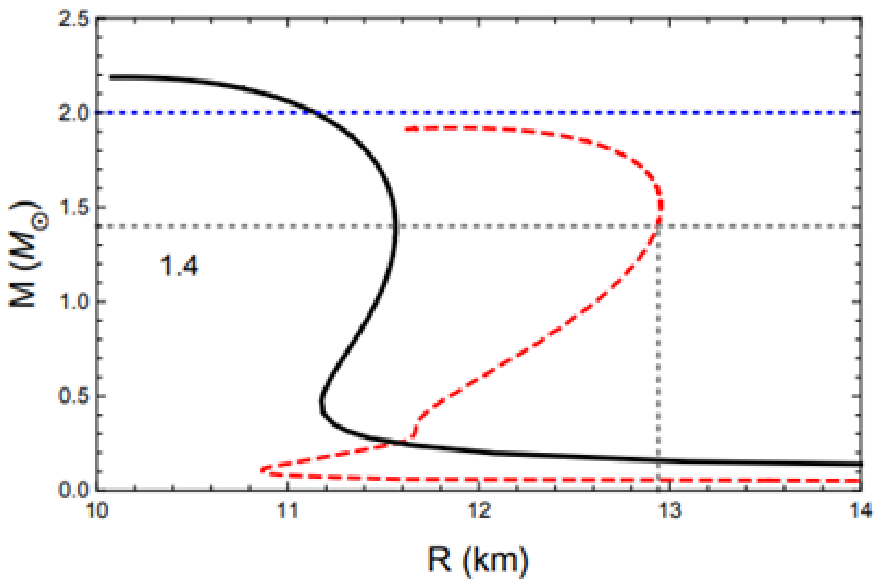
L. McLerran(2019)

中子星性质

$$\frac{\mathrm{d}P(r)}{\mathrm{d}r} = -G_\mathrm{N}\frac{[P(r)+\epsilon(r)]\left[M(r)+4\pi r^3 P(r)\right]}{r^2-2G_\mathrm{N}\,rM(r)}$$

$$\frac{\mathrm{d}M(r)}{\mathrm{d}r} = 4\pi r^2\epsilon(r)$$

TOV方程

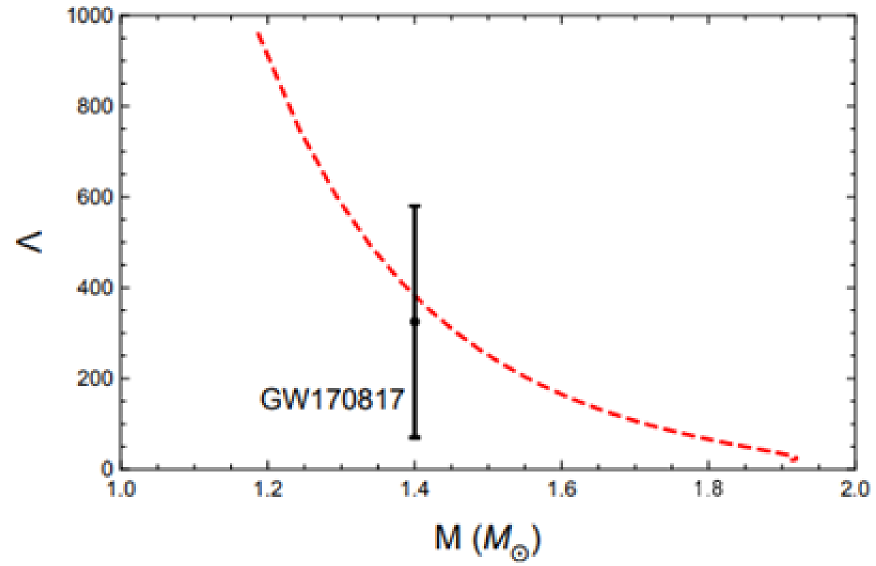


1. **1. 4倍太阳质量的半径与NICER结果一致**
2. **达不到2倍太阳质量**

中子星性质

$$\Lambda = \frac{2}{3}k_2\left(\frac{R}{G_{\rm N}M}\right)^5$$

Love数



3. 潮汐形变与中子星并合结果一致

总结

- 建立关于夸克素物质的场论模型
- 满足饱和性质和对称能的约束
- 较好描述1.4倍太阳质量的半径和潮汐形变
- 声速无峰，无法达到两倍太阳质量，待改进

谢谢！