



南京大學
NANJING UNIVERSITY

誠樸雄偉
勵學敦行

致密核物质与中子星性质 的强子描述

马永亮

南京大学

中国科学技术大学, 合肥, 2026.04.28

Ref.: Hadronic description of nuclear matter and neutron star properties, Yao Ma, Yong-Liang Ma, Jia-Ying Xiong, arXiv:2603.01933 [nucl-th].

CONTENTS

目录

01. 研究背景

- 超高密度下的物质形态谜题
- 当前对核物质性质得认识
- 中子星作为宇宙核物理实验室

02. 理论模型与方法论

- 一般的量子强子动力学 (GQHD) 模型
- 核物理及天文学数据的贝叶斯联合分析 (BJA)

03. 数值结果与分析

- 成功再现核物质性质 | 统一描述中子星质量-半径关系
- 状态方程 (EoS) 的软硬分析 | 声速峰值的物理启示
- 利用引力波事件对潮汐形变参数的约束

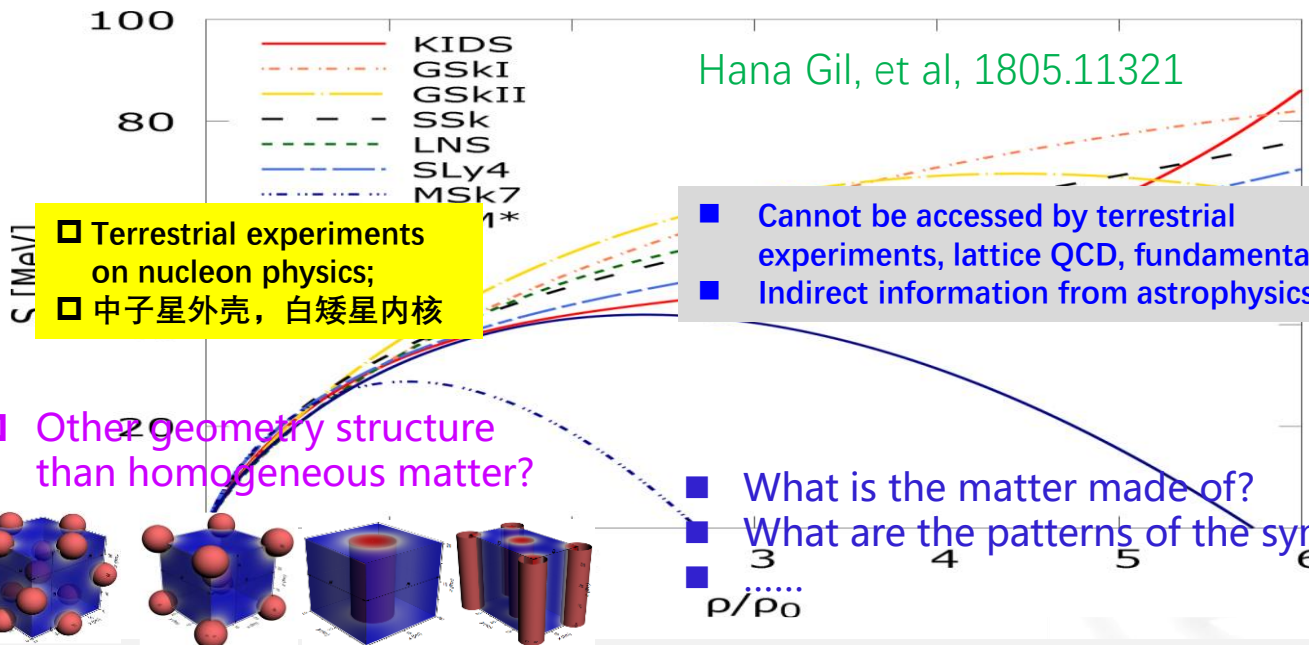
04. 结论与展望

- 总结本研究在致密核物质领域的核心发现与突破
- 模型改进方向与潜在的后续研究

PART 01

研究背景

Property of nuclear matter has been studied for several decades:

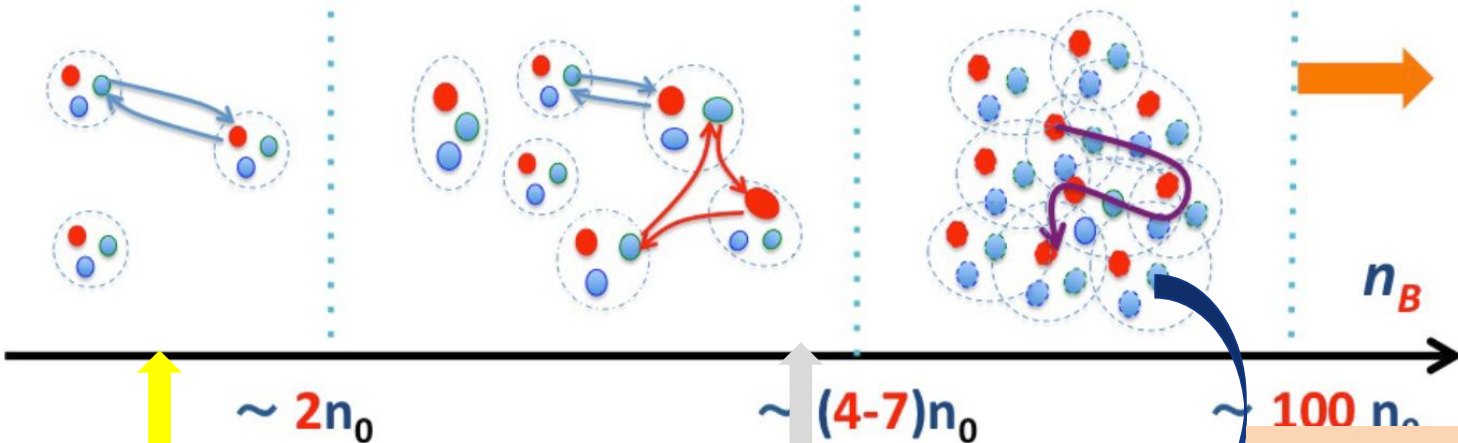


- ◆ 这些问题对粒子物理与核物理中的许多基本问题都有重要意义：手征对称性的破缺机制、核子质量的起源.....
- ◆ 构建微观与宇观的桥梁：致密星的组成与结构、观测性质.....

NS $\sim 2.3 M_{solar}$ has $n_{cent} \sim (5 - 7)n_0$ may contain quarks in some form.

G. Baym, et al., 1707.04966

Nuclear \longrightarrow **Interpolated EoS** \longleftarrow **Quark models (non-confining)** (pQCD)



Terrestrial experiments on nucleon physics

- Cannot be accessed by terrestrial experiments, lattice QCD, fundamental QCD!
- Indirect information from astrophysics.

Indirect constraints on the model/EoS construction

- Information about the masses of the heaviest neutron stars derives primarily from precise Shapiro time delay measurements of pulsars orbiting in binary systems with white dwarf companions

PSR J1614–2230 $M = 1.908 \pm 0.016 M_{\odot}$

PSR J0348+0432 $M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$,

PSR J0740+6620 $M = 2.08 \pm 0.07 M_{\odot}$.

PSR J0952–0607 $M = 2.35 \pm 0.17 M_{\odot}$.

- P. B. Demorest, *et al.* Nature 2010, 467, 1081.
- E. Fonseca, *et al.* Astrophys. J. 2016, 832, 167.
- Z. Arzoumanian, *et al.* Astrophys. J. Suppl. 2018, 235, 37.
- J. Antoniadis, *et al.* Science 2013, 340, 448.
- H. T. Cromartie, *et al.* Nat. Astron. 2020, 4, 72.
- E. Fonseca, *et al.* Astrophys. J. Lett. 2021, 915, L12.
- R. W. Romani, *et al.* Astrophys. J. Lett. 2022, 934, L17.

- Together with their masses the radii of neutron stars can be inferred from X-ray profiles of rotating hot-spot patterns measured with the NICER telescope.

PSR J0030+0451 $M = 1.34_{-0.16}^{+0.15} M_{\odot}$, $R = 12.71_{-1.19}^{+1.14} \text{ km}$,

PSR J0740+6620 $M = 2.072_{-0.066}^{+0.067} M_{\odot}$, $R = 12.39_{-0.98}^{+1.30} \text{ km}$.

- T. T. Riley, *et al.* Astrophys. J. Lett. 2019, 887, L21.
- T. E. Riley, *et al.* Astrophys. J. Lett. 2021, 918, L27.

$$v_s^2 = \frac{\partial p(n)/\partial n}{\partial \varepsilon(n)/\partial n} = \frac{\partial p(n)}{\partial \varepsilon(n)}$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \langle \theta_{\mu}^{\mu} \rangle = \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial n} (1 - 3v_s^2)$$

■ Density dependence of SV in cold nuclear matter

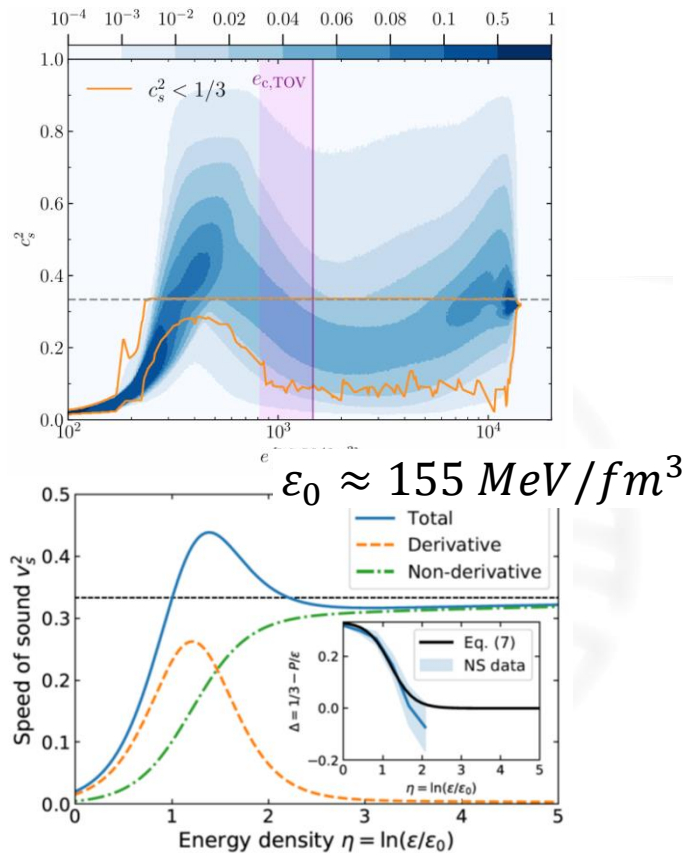
- EOSs with subconformal sound speeds,, are possible in principle but very unlikely in practice, being only 0.03% of our sample. Hence, it is natural to expect that $c_s^2 > 1/3$ somewhere in the stellar interior.

➤ S. Altiparmak, C. Ecker, L. Rezzolla, ApJL. 939 (2022) 2, L34.

- the peak in the sound velocity is attributed to the derivative contribution from the trace anomaly that steeply approaches the conformal limit.

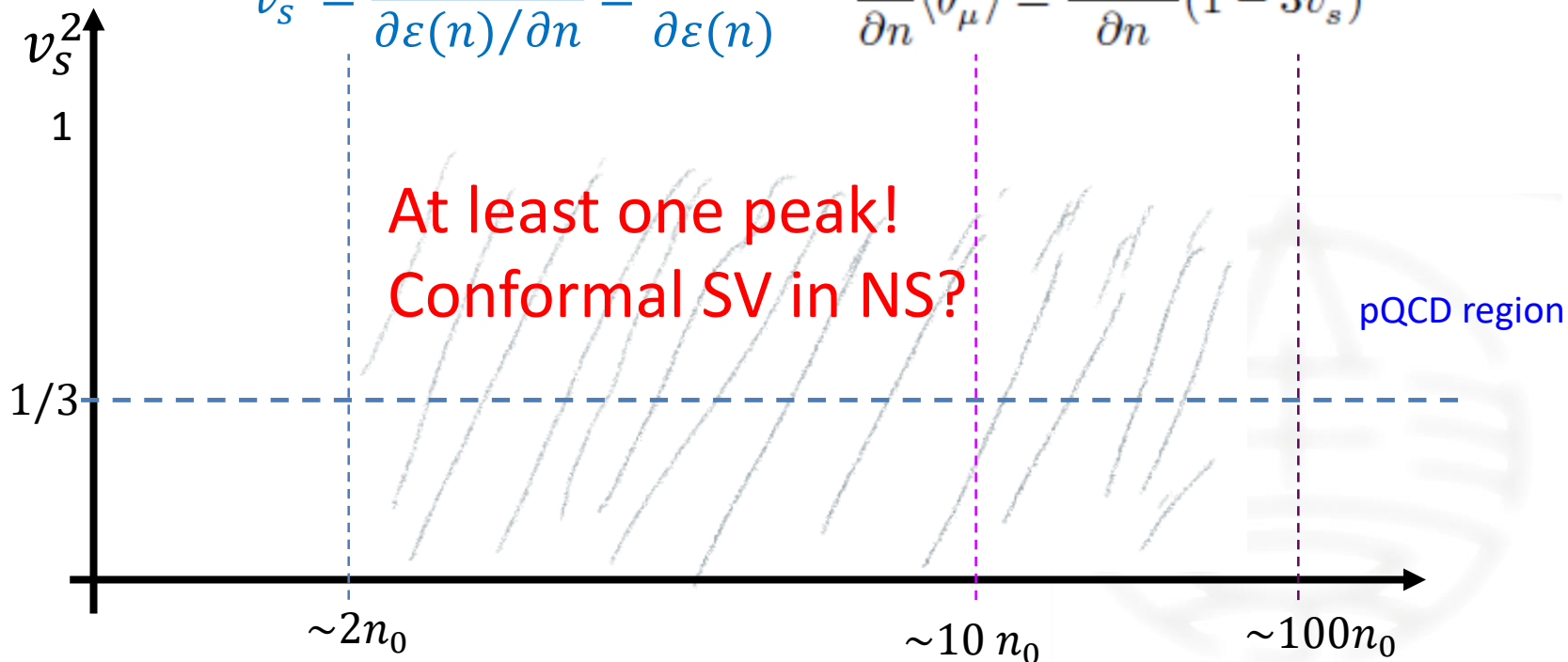
$$c_{s, \text{deriv}}^2 = -\varepsilon \frac{d\Delta}{d\varepsilon} \quad c_{s, \text{non-deriv}}^2 = \frac{1}{3} - \Delta$$

➤ Y. Fujimoto, K. Fukushima, L. D. McLerran, M. Praszalowicz, PRL.Lett. 129 (2022) 25, 252702.

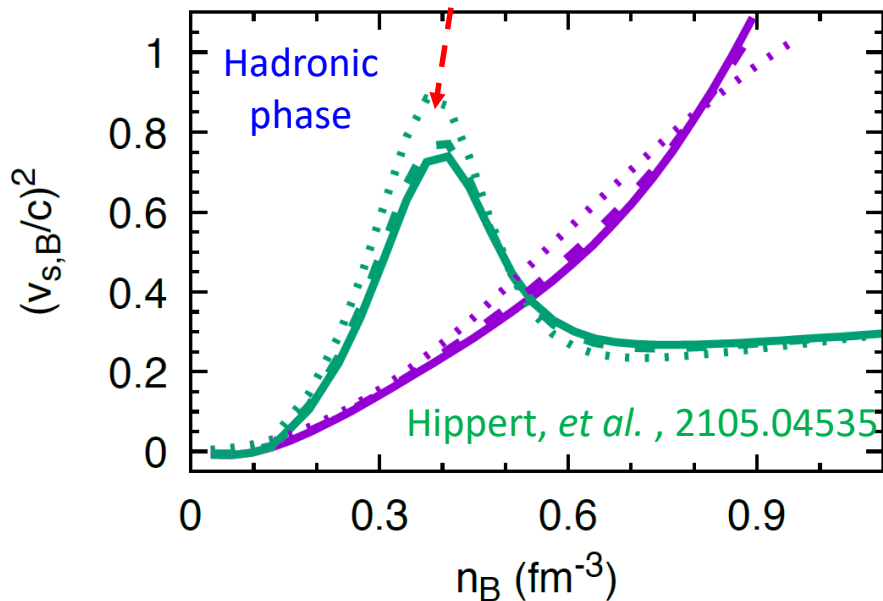




$$v_s^2 = \frac{\partial p(n)/\partial n}{\partial \epsilon(n)/\partial n} = \frac{\partial p(n)}{\partial \epsilon(n)} \quad \frac{\partial}{\partial n} \langle \theta_\mu^\mu \rangle = \frac{\partial \epsilon(n)}{\partial n} (1 - 3v_s^2)$$



Emerges in the transition from a phase with broken chiral symmetry to one with gapped Fermi surface with the condensation of diquarks and dibaryons.



- Transition from hadronic phase to quarkyonic phase;
- At $(2\sim 4)n_0$ due to topology change;
- Hadron-quark crossover;
- Formation of diquark gap.

- L. McLerran and S. Reddy, PRL122 (2019), 122701.
- T. Zhao and J. M. Lattimer, PRD102 (2020), 023021.
- YLM and M. Rho, PRD99 (2019), 014034; PPNP113 (2020), 103791;
- G. Baym, S. Furusawa, et al., APJ 885 (2019), 42;
- M. Leonhardt, M. Pospiech, et al., PRL125 (2020), 142502 (2020).

■ Phase transition/configuration change!?

中子星：宇宙中的核物理实验室



■ 极端物理环境的天然实验室

中子星是大质量恒星演化末期的产物，内部密度从表面饱和核密度 ($n_0 \approx 0.16 \text{ fm}^{-3}$) 飙升至核心的10倍 n_0 。它是人类在宇宙中唯一能研究极端核物质行为的天体。

核心问题：超高密度下的物质形态

随着密度的增加，物质是保持强子结构，还是发生相变解禁闭？



低密区 ($< 2n_0$) — 科学界共识

物质由中子、质子和电子等基本强子组成，其物理性质已被广泛研究并达成一致。



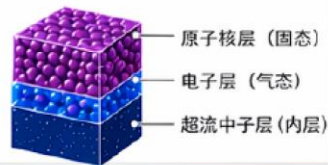
高密区 ($> 2n_0$) — 前沿探索争议

存在纯强子物质、夸克-胶子等离子体、夸克-强子混合相等多种理论可能性，尚无定论。

致密星的结构类型：由内部物质与外层 BPS 组成

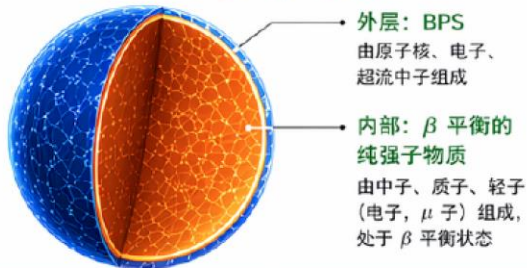
BPS 的组成 (外层)

- 原子核 (离子晶格)
 - 电子 (相对论简并费米气体)
 - 超流中子 (中子超流体)
- 厚度约为 $10^2 \sim 10^4$ cm



致密星可能由不同的物质构成，主要可分为三类结构：纯强子星 (β 平衡)、纯夸克星和强子-夸克混合星。它们都由致密的内部物质与外层 BPS (原子核、电子、超流中子) 组成。

1. 纯强子星 (β 平衡)



- 外层: BPS
由原子核、电子、超流中子组成
- 内部: β 平衡的纯强子物质
由中子、质子、轻子 (电子, μ 子) 组成, 处于 β 平衡状态

β 平衡条件 (弱相互作用平衡)



(轻子守恒)

化学势关系:

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e, \quad \mu_e = \mu_\mu$$

电中性条件

总电荷为零:

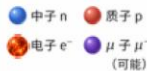
$$n_p = n_e + n_\mu$$

(忽略正电轻子质量贡献)

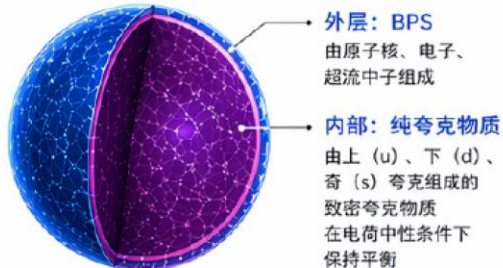
特点

- 内部为致密的强子物质;
- 粒子分数由 β 平衡条件及电中性条件共同决定;
- 可能出现超流、中子超导等量子现象。

组成粒子



2. 纯夸克星



- 外层: BPS
由原子核、电子、超流中子组成
- 内部: 纯夸克物质
由上 (u)、下 (d)、奇 (s) 夸克组成的致密夸克物质在电荷中性条件下保持平衡

夸克物质特性

- 由自由夸克构成, 处于强相互作用的夸克物质相;
- 可能为色超导相 (如 CFL, 2SC 等);
- 需要极高的电子壳维持电中性。

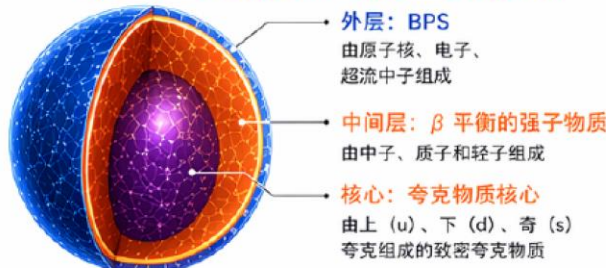
组成粒子



特点

- 整体由夸克构成, 仅有极薄电子壳;
- 可能存在色超导等新奇相;
- 结构更均匀致密。

3. 强子-夸克混合星 (强子-夸克混合)



- 外层: BPS
由原子核、电子、超流中子组成
- 中间层: β 平衡的强子物质
由中子、质子和轻子组成
- 核心: 夸克物质核心
由上 (u)、下 (d)、奇 (s) 夸克组成的致密夸克物质

结构特点

- 外层为 BPS;
- 中间层为 β 平衡的强子物质层;
- 内部为夸克物质核心, 可能通过一次或多次相变形成;
- 可能存在过渡层或混合相。

组成粒子 (分层分布)

强子层:



夸克核心:



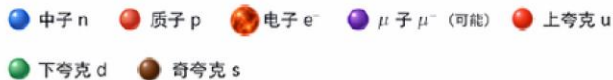
特点

- 强子与夸克物质共存;
- 可能存在相变过渡层或混合相;
- 具有丰富的物理现象和观测潜力。

典型参数 (量级)



图例: 组成粒子



注:

BPS = 原子核、电子、超流中子 (核壳)。致密星的内部结构仍存在理论不确定性, 取决于高密度 QCD 方程状态 (EOS) 及相变机制。

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Gravitational-Wave Constraints on the Neutron-Star-Matter Equation of State

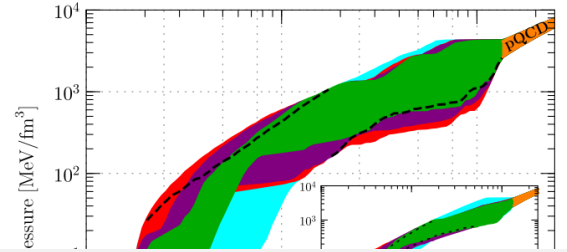
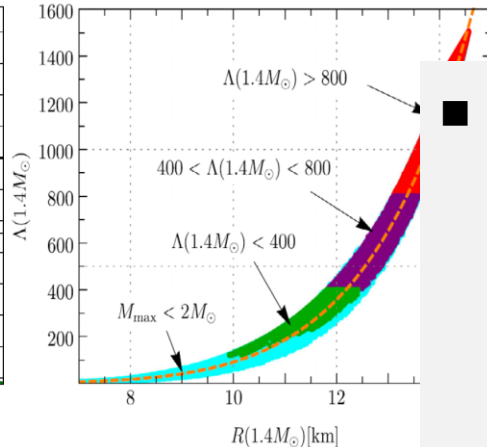
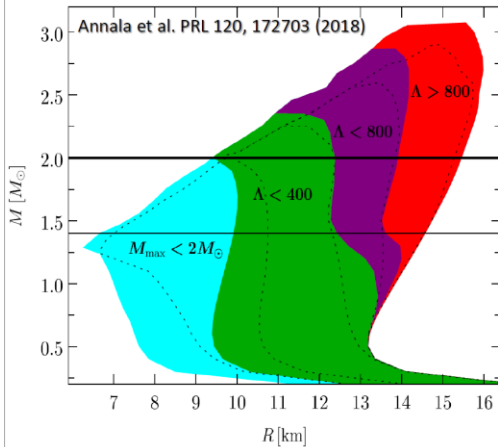
Eemeli Annala,¹ Tyler Gorda,¹ Aleksi Kurkela,² and Aleksi Vuorinen¹

*O. Box 64, FI-00014 University of Helsinki, Finland
Switzerland
6 Stavanger,*

received 6 Feb

Impact of $\tilde{\Lambda} < 800$ on NS radius & EOS

- ▶ $\Lambda_{1.4} \lesssim 800$: in terms of NS radius $10 \lesssim R_{1.4M_\odot} \lesssim 13.5$ km for an EOS
 - ▶ connects to the NNLO pQCD (Kurkela et al. 2010) and chiral EFT (Hebeler et al. 2013)
 - ▶ causality $c_s < c$ and $M_{\text{EOS,max}} \gtrsim 2M_\odot$ constraints in the intermediate region



■ Tidal deformability(GW170817):

$$\Lambda_{1.4} < 800$$

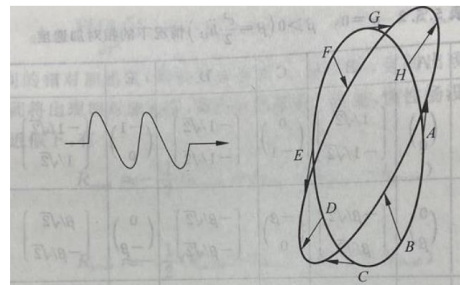
$$\tilde{\Lambda} = 300^{+420}_{-230} \rightarrow \tilde{\Lambda} = 190^{+390}_{-120}$$

$$R = 11.9^{+1.4}_{-1.4} \text{ km}$$

C. Y. Tsang, *et al.*, 1807.06571

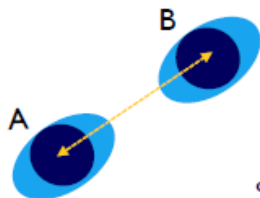
GW only has transverse components, stretch and squeeze alternatively.

- Tidal acceleration → Tidal deformability



Tidal deformation → accelerated phase evolution

- 1) grav. fields from star B → the deformation of star A
- 2) deformed energy density → quadrupole grav. fields



quadrupole moment $Q_{ij} = -\lambda(M) E_{ij}$ external field $E_{ij} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}$

polarizability

gravitational pot. from the star A $V_A(r) \simeq -\frac{GM_A}{r} - \frac{GQ_{AB}}{r^3} \simeq -\frac{GM_A}{r} - \frac{G}{r^3} \left(\frac{\lambda GM_B}{r^3} \right)$

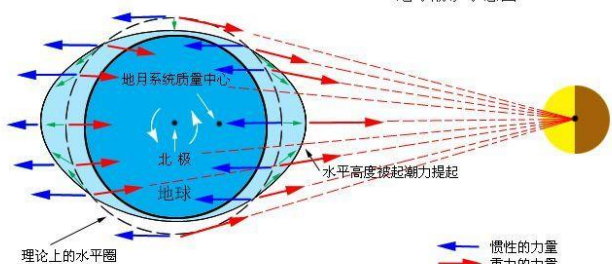
Usually: $\Lambda(M) = 32 \frac{\lambda G}{R^5}$: Closely related to the compactness of NS



一、月亮对海洋潮汐的影响。

如图所示：

地球潮汐示意图



← 惯性的力量
→ 重力的力量

中子星观测对状态方程的约束

利用中子星质量-半径观测（左）和潮汐变形观测（右），对致密物质状态方程进行约束，不同颜色区域对应不同观测数据的约束范围。

质量-半径 (M-R) 约束

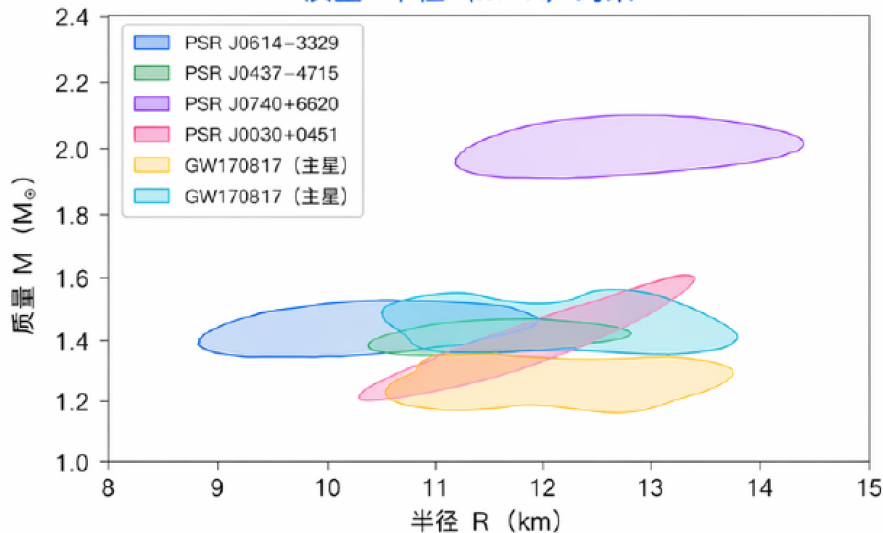


图 2-4 中子星质量-半径约束，不同颜色区域表示不同观测数据的约束范围[6-12]。

- PSR J0614-3329: 约 1.4 M_{\odot} 的中子星 (射电脉冲星)
- PSR J0437-4715: 约 1.44 M_{\odot} 的中子星 (高精度毫秒脉冲星)
- PSR J0740+6620: 约 2.08 M_{\odot} 的高质量中子星
- PSR J0030+0451: NICER 观测得到的质量-半径后验分布
- GW170817: 双中子星并合事件，主星和次星的后验分布范围

潮汐变形 (Λ) 约束

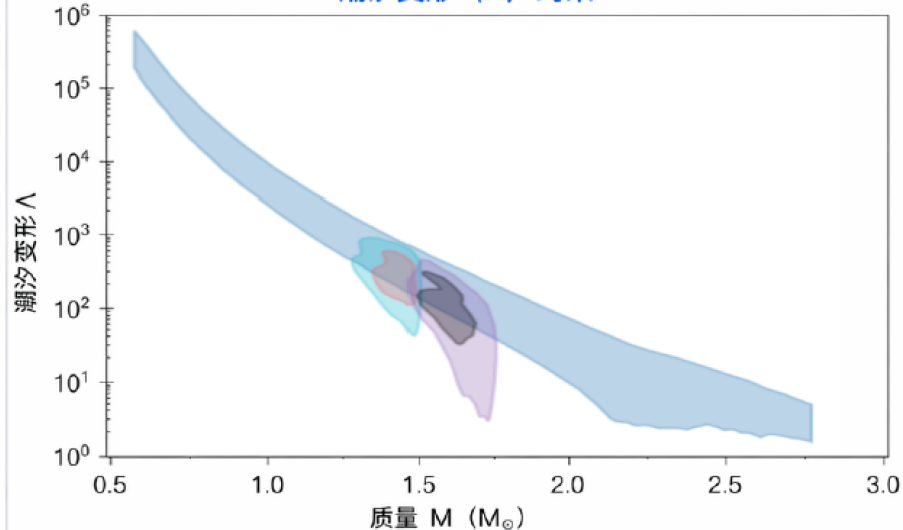


图 2-5 中子星潮汐变形对状态方程的约束，不同颜色区域表示不同观测的约束范围。

物理意义

M-R 观测和潮汐变形观测共同对致密物质的状态方程 (EOS) 施加重要约束。

高质量中子星 (如 PSR J0740+6620) 要求 EOS 足够硬以支撑大质量，而 GW170817 的潮汐变形结果限制了 EOS 在中等密度下不能过硬。

PART 02

理论模型与方法论

MODEL & METHODOLOGY

广义量子强子动力学 (GQHD) 模型



GQHD 广义量子强子动力学模型

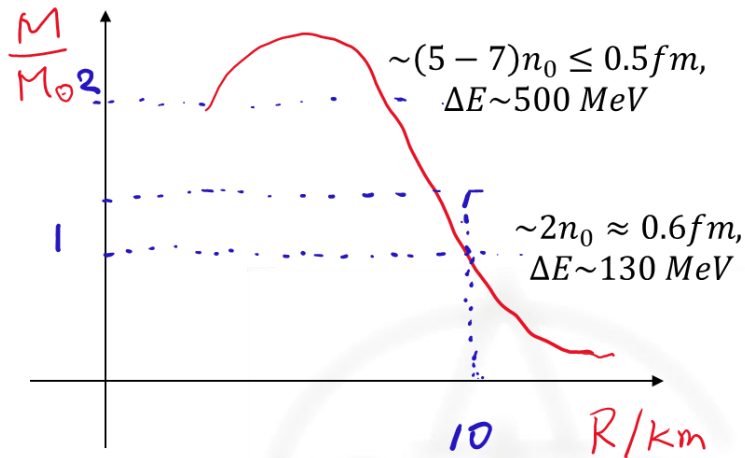
核心思想：我们采用了一个尽可能普适的强子模型，其拉格朗日量包含了所有低于1 GeV的强子共振态，旨在系统性地描述从核物质到中子星内部的复杂相互作用。

基本自由度与关键相互作用

- 核子 (p,n) 与介子 ($\sigma/\omega/\rho/a_0$) 构成基本骨架，介子传递核力。
- 引入关键的 $\sigma\omega\rho a_0$ 四介子混合相互作用项，实现状态方程“软硬兼施”。

$$L = L_N + L_\sigma + L_\omega + L_\rho + L_{a_0} + L_I$$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_N &= \bar{\Psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_N) \Psi, \\
 \mathcal{L}_\sigma &= \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 \\
 &\quad - \frac{1}{2} g_4 \sigma^2 \omega^\mu \omega_\mu - \frac{1}{2} g_5 \sigma^2 \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu \\
 &\quad - g_6 \sigma \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu - g_7 \sigma \omega^\mu \omega_\mu, \\
 \mathcal{L}_\omega &= -\frac{1}{4} \Omega^{\mu\nu} \Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu + \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} c_4 \omega^\mu \omega_\mu \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu, \\
 \mathcal{L}_\rho &= -\frac{1}{4} \vec{P}^{\mu\nu} \cdot \vec{P}_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu + \frac{1}{4} d_3 (\vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu)^2, \\
 \mathcal{L}_{a_0} &= \frac{1}{2} \partial_\mu \vec{a}_0 \cdot \partial^\mu \vec{a}_0 - m_{a_0}^2 \vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0 + \frac{1}{4} b_3 (\vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0)^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} b_4 (\vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0) (\vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu) + \frac{1}{2} b_5 \sigma (\vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0) \\
 &\quad + \frac{1}{2} b_6 \vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0 \sigma^2 + \frac{1}{2} b_7 \vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0 \omega^\mu \omega_\mu + b_8 \vec{a}_0 \cdot \vec{\rho}^\mu \omega_\mu \sigma \\
 &\quad + b_9 \vec{a}_0 \cdot \vec{\rho}_\mu \omega^\mu, \\
 \mathcal{L}_I &= \bar{\Psi} (g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \vec{\rho}_\mu + g_{a_0} \vec{a}_0) \Psi. \quad (2)
 \end{aligned}$$



Nuclear force up to $\Lambda \sim 10n_0 \sim 700$ MeV

贝叶斯联合分析 (BJA)

为确定GQHD模型中的21个关键参数，采用贝叶斯联合分析将核物理实验、中子星观测等多领域“异质约束”纳入统一统计框架，通过量化评估找到最能解释全量数据的参数组合。

核心思想：概率认知的迭代更新

利用贝叶斯定理，将对参数的初始假设（先验）与实测数据的兼容性（似然）深度融合，最终得到反映数据与理论共识的后验概率分布。

$$p(\theta | D) \propto p(D | \theta) \times p(\theta)$$

- 后验 $p(\theta|D)$ ：给定数据时参数的最终概率分布（目标）
- 似然 $p(D|\theta)$ ：模型参数对观测数据的预测拟合度
- 先验 $p(\theta)$ ：分析前基于物理规律对参数的认知假设

MCMC 驱动的标准化流程



模型定义：确立GQHD理论框架与21维参数空间范围



全域收束：整合核物质性质与中子星质量-半径等异质数据



似然评估：遍历参数空间，计算每一点对全量数据的拟合度



智能采样：利用MCMC算法高效遍历高维空间，生成后验样本

价值产出：从采样样本中提取物理量的概率分布、最佳拟合值及误差范围，量化结果的不确定性。

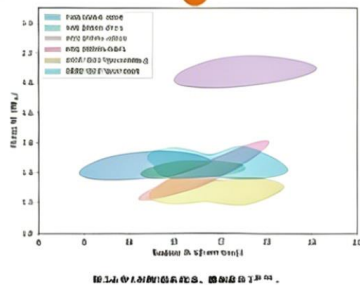
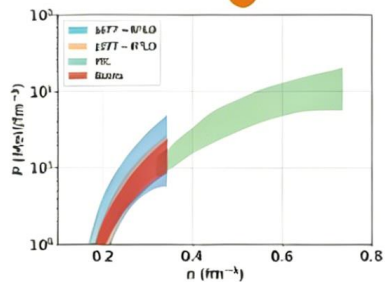
Bayesian Analysis

$$p(\theta | \mathbf{D}) = \frac{p(\mathbf{D} | \theta)p(\theta)}{p(\mathbf{D})}$$

prior distribution of parameter space

$$p(\mathbf{D}) = \int p(\mathbf{D} | \theta)p(\theta)d\theta$$

$$p(\mathbf{D} | \theta) = \prod_{i=1}^n p(D_i | \theta)$$



$n_0 \rightarrow 0.155 \pm 0.050$ (fm⁻³)
 $E_0(n_0) \rightarrow -16.0 \pm 1.0$ (MeV)
 $E_{\text{sym}}(n_0) \rightarrow 31.7 \pm 3.2$ (MeV)
 $K_0 \rightarrow 250 \pm 50$ (MeV)
 $L_0 \rightarrow 58.7 \pm 28.1$ (MeV)
 $J_0 \rightarrow -200 \pm 600$ (MeV)

PART 03

数值结果与分析



南京大學
NANJING UNIVERSITY

Optimal parameter

| Par | TM1 | NL1 | NL3 | FSU | FSUG | GWM1 | GWM2 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $g_{\sigma NN}$ | 10.0 | -10.1 | -10.1 | -10.2 | -10.6 | 7.55 | -9.90 |
| $g_{\omega NN}$ | 12.6 | 13.3 | 12.8 | 13.4 | 14.3 | 10.5 | 12.5 |
| $g_{\rho NN}$ | 4.63 | 4.98 | 4.57 | 7.27 | 5.88 | 5.97 | 7.05 |
| $g_{a_0 NN}$ | — | — | — | -6.70 | — | -6.60 | -6.25 |
| m_σ (MeV) | 511 | 492 | 503 | 492 | 492 | 445 | 504 |
| b_5 (MeV) | — | — | — | — | — | -124 | 117 |
| b_9 (MeV) | — | — | — | — | — | -1820 | -10.6 |
| g_2 (MeV) | -1420 | 2400 | 2130 | 1600 | 844 | -676 | 1710 |
| g_6 (MeV) | — | — | — | — | — | -1960 | 32.5 |
| g_7 (MeV) | — | — | — | — | — | -36.6 | 136 |
| b_3 | — | — | — | — | — | 254 | 72.1 |
| b_4 | — | — | — | — | — | 2.07 | 2.26 |
| b_6 | — | — | — | 180 | — | 5.26 | 181 |
| b_7 | — | — | — | — | — | -6.43 | 0.117 |
| b_8 | — | — | — | — | — | -328 | 17.7 |
| g_3 | 0.610 | -36.3 | -30.1 | 5.88 | 49.9 | 7.58 | 6.59 |
| g_4 | — | — | — | — | — | -2.87 | 1.19 |
| g_5 | — | — | — | — | — | 123 | 0.949 |
| c_3 | 71.3 | — | — | 172 | 418 | 1.09 | 172 |
| c_4 | — | — | — | 204 | 2590 | 0.127 | 204 |
| d_3 | — | — | — | — | — | 648 | 4.68 |

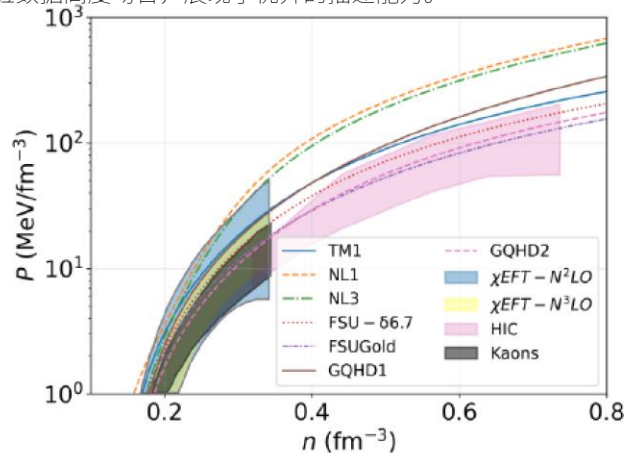


Nuclear matter properties around saturation density

我们的GQHD模型（特别是GQHD2参数集）在饱和密度(n_0)附近的核物质性质预测上，与实验数据高度吻合，展现了优异的描述能力。

Sugahara, Y., Toki, H., Nucl. Phys. A 579, 557 (1994).
 Reinhard, P.-G., Rufa, M., Maruhn, J., Zeitschrift für Physik A 323, 13 (1986).
 Lalazissis, G. A., König, J., Ring, P., Phys. Rev. C 55, 540 (1997).
 Li, F., Cai, B.-J., Zhou, Y., Astrophys. J. 929, 183 (2022).
 Todd-Rutel, B. G., Piekarewicz, J., Phys. Rev. Lett. 95, 122501 (2005).

| | Empirical | TM1 | NL1 | NL3 | FSU- $\delta 6.7$ | FSUGold | GQHD1 | GQHD2 |
|-----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------------|---------|-------|-------|
| $E(n_0)$ | -16.0 ± 1.0 [19] | -16.2 | -16.5 | -16.3 | -16.3 | -16.3 | -17.2 | -16.1 |
| n_0 | 0.16 ± 0.05 [19] | 0.142 | 0.152 | 0.148 | 0.148 | 0.148 | 0.159 | 0.155 |
| $E_{\text{sym}}(n_0)$ | 30.9 ± 1.9 [49] | 36.0 | 43.5 | 38.2 | 32.7 | 29.1 | 32.3 | 33.4 |
| $L(n_0)$ | 52.5 ± 17.5 [50] | 108 | 140 | 121 | 53.5 | 53.1 | 49.6 | 49.6 |
| $K(n_0)$ | 230 ± 30 [51] | 257 | 207 | 246 | 229 | 228 | 349 | 214 |
| $E(1.5n_0)$ | -13.3 ± 0.5 [52] | -13.0 | -13.1 | -12.6 | -13.3 | -13.5 | -12.5 | -13.3 |
| $P(1.5n_0)$ | 3.41 ± 1.29 [53] | 4.26 | 5.52 | 5.57 | 3.97 | 3.58 | 6.52 | 3.67 |
| $L(\frac{2}{3}n_0)$ | 71.5 ± 22.6 [54] | 69.6 | 85.0 | 74.3 | 54.5 | 39.2 | 69.9 | 55.2 |
| m_σ | 600 ± 200 [33] | 511 | 492 | 503 | 492 | 492 | 445 | 504 |
| BJA | \uparrow | -4.51 | -15.3 | -11 | 3.8 | 4.28 | 1.13 | 8.03 |



Cozma, M. D., Eur. Phys. J. A 54, 40 (2018).
 Dutra, M., Lourenco, O., Sa Martins, J. S., et al., Phys. Rev. C 85, 035201 (2012).
 Dutra, M., Lourenço, O., Avancini, S. S., et al., Phys. Rev. C 90, 055203 (2014).
 Garg, U., Colò, G., Prog. Part. Nucl. Phys. 101, 55 (2018).
 Grams, G., Somasundaram, R., Margueron, J., et al., Phys. Rev. C 106, 044305 (2022).
 Howard, K. B., et al., Phys. Lett. B 801, 135185 (2020).
 Lattimer, J. M., Lim, Y., Astrophys. J. 771, 51 (2013).
 Leifels, Y., LeFevre, A., Reisdorf, W., et al., EPJ Web Conf. 88, 00018 (2015).
 Li, Z. Z., Niu, Y. F., Colò, G., Phys. Rev. Lett. 131, 082501 (2023).
 Ma, Y., Ma, Y.-L., Phys. Rev. D 112, 054026 (2025).
 Pattnaik, J. A., Panda, R. N., Bhuyan, M., et al., arXiv:2508.05291 (2025).
 Reed, B. T., Fattoyev, F. J., Horowitz, C. J., et al., Phys. Rev. Lett. 126, 172503 (2021).
 Sedrakian, A., Li, J.-J., Weber, F., Prog. Part. Nucl. Phys. 131, 104041 (2023).
 Shlomo, S., Kolomietz, V. M., Colò, G., Eur. Phys. J. A 30, 23 (2006).
 Stone, J. R., Stone, N. J., Moszkowski, S. A., Phys. Rev. C 89, 044316 (2014).
 Youngblood, D. H., Clark, H. L., Lui, Y. W., Phys. Rev. Lett. 82, 691 (1999).
 Zhang, Z., Chen, L.-W., Phys. Rev. C 92, 031301 (2015).



结论： GQHD模型成功再现了核物理实验所确定的核物质基态性质，预测精度优于传统NL3等模型，为研究更高密度的极端核物质状态奠定了坚实的物理基础。

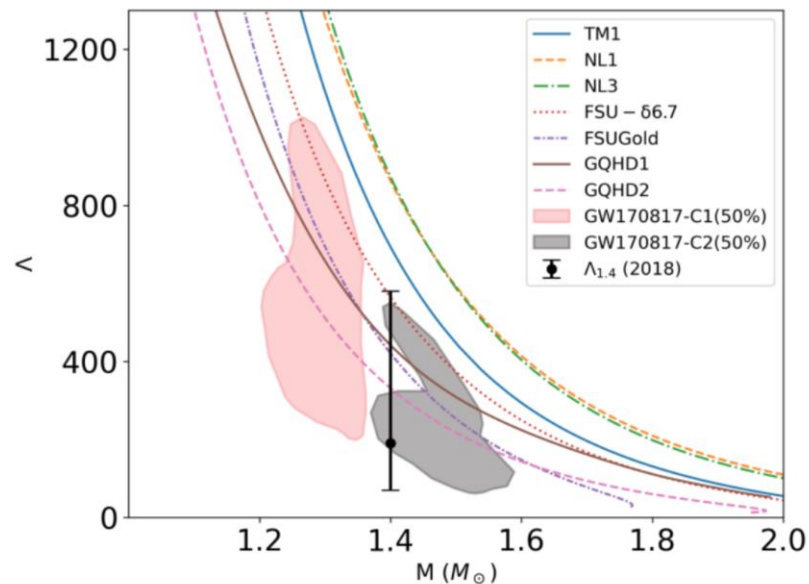
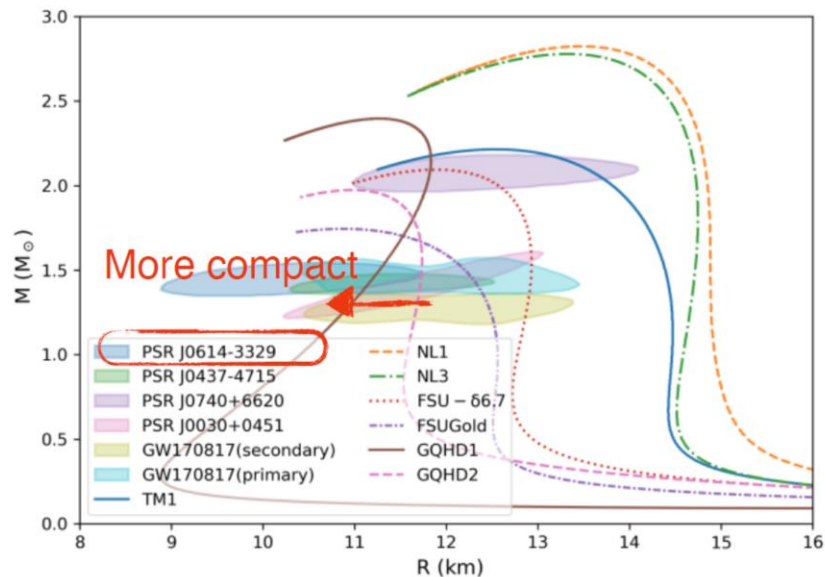


GQHD2 曲线：软硬特性

低密度区压力平缓（软），满足小半径观测；高密度区压力骤升（硬），足以支撑大质量中子星。

Neutron star structures

More favored by observations

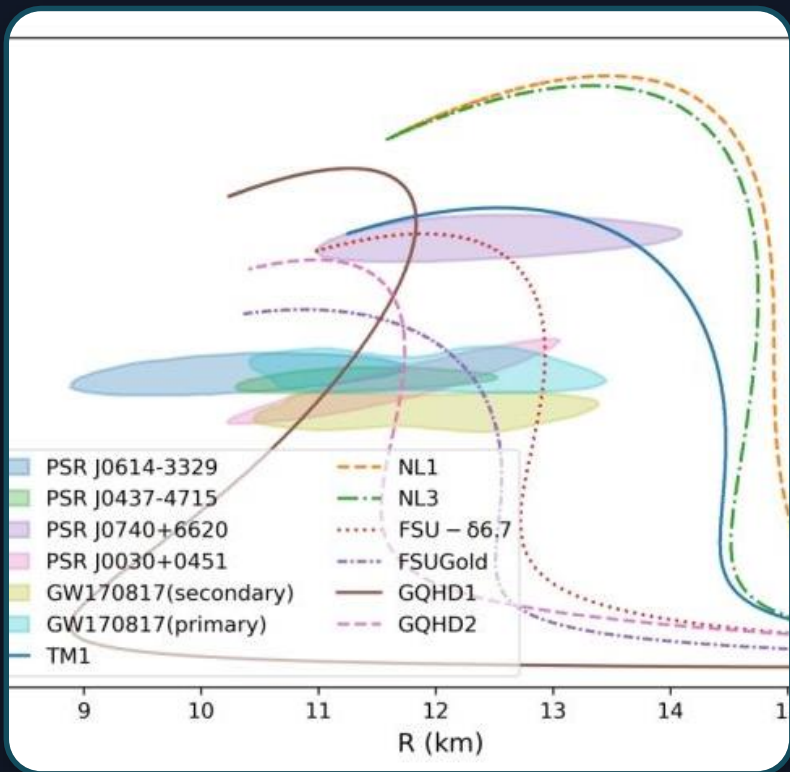


Abbott, B. P., et al., Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017).
 Abbott, B. P., et al., Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017).
 Abbott, B. P., et al., Phys. Rev. Lett. 121, 161101 (2018).
 Choudhury, D., et al., Astrophys. J. Lett. 971, L20 (2024).
 Mauviard, L., et al., arXiv:2506.14883 (2025).
 Salmi, T., et al., Astrophys. J. 974, 294 (2024).
 Vinciguerra, S., et al., Astrophys. J. 961, 62 (2024).

纯强子模型可统一解释观测，并预测

声速峰结构及 $M_{\max} \sim 2M_{\odot}$

统一描述中子星质量-半径关系



🕒 结论：完美契合

本研究模型预测的 M-R 曲线，成功穿过了 PSR J0740+6620 等所有关键中子星观测数据的 1σ 置信区间，实现了理论与观测的高度一致。

🏠 多维数据解读

观测约束：彩色区域为脉冲星在 1σ 水平的置信区间，界定了物理边界。

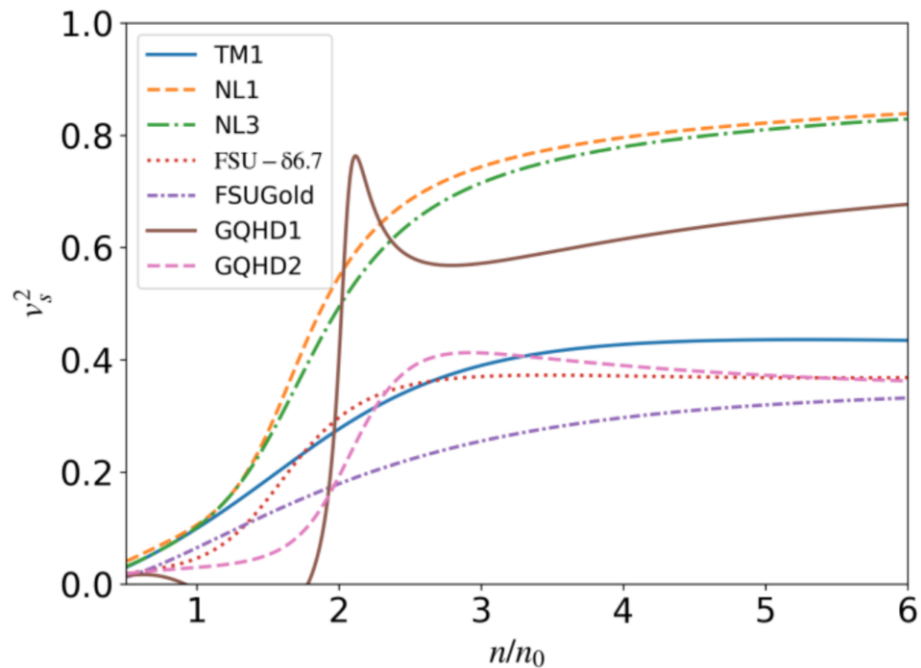
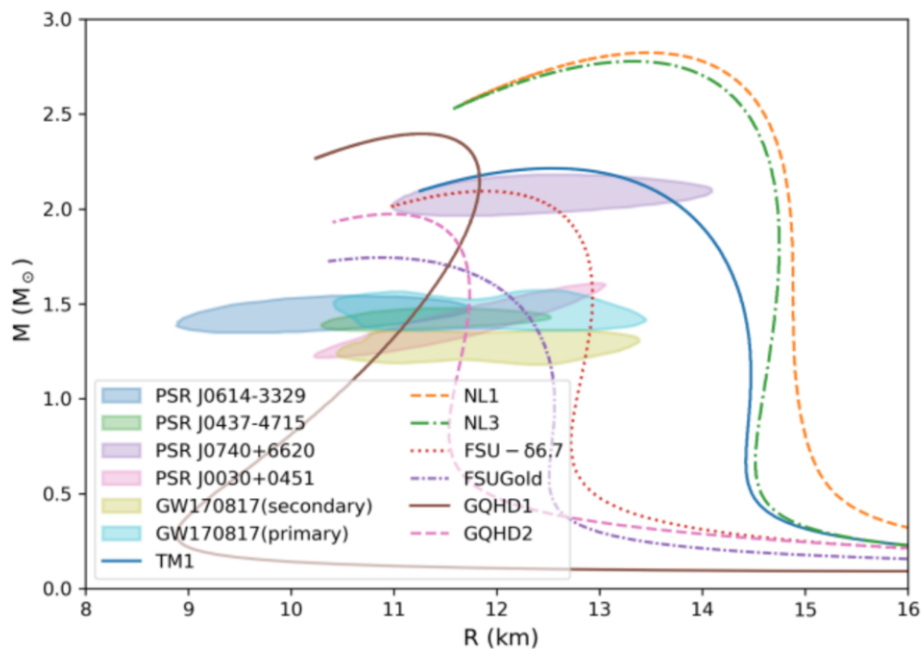
传统模型局限：Walecka 型模型或半径过大，或最大质量不足，难以同时满足约束。

GQHD 优势：同时满足 $1.4M_{\odot}$ 小半径、 $2M_{\odot}$ 大质量及 GW170817 引力波约束。

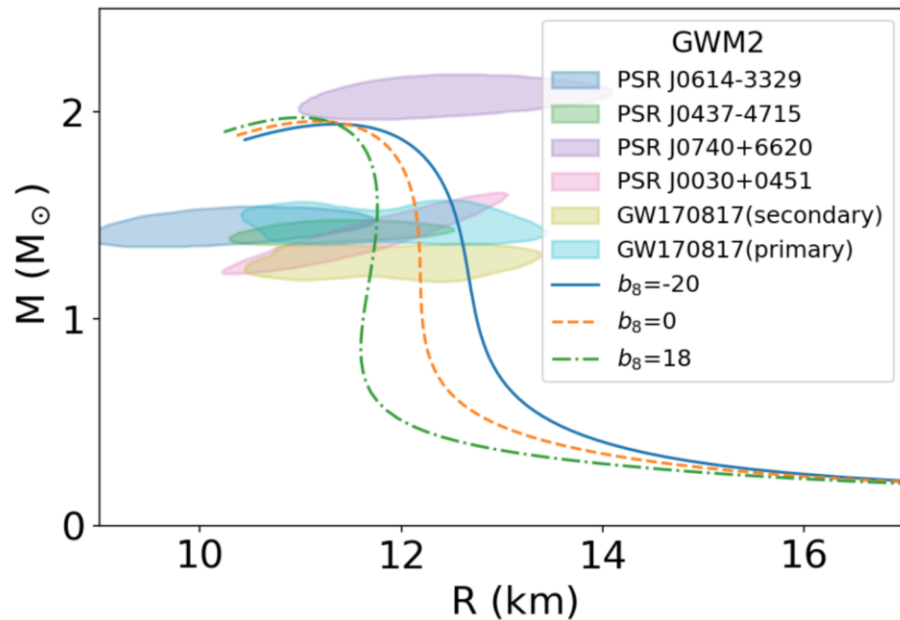
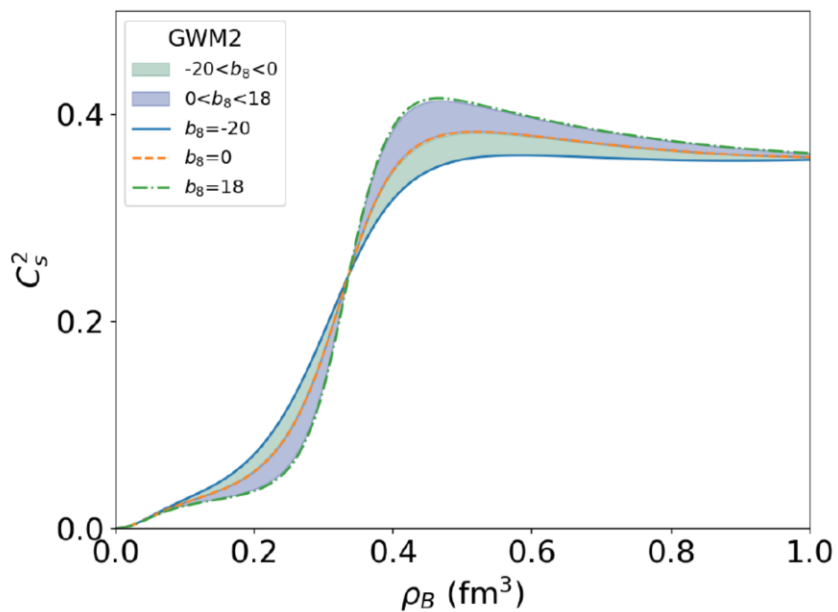
🏆 结论

GQHD 模型首次在纯强子框架内，实现了对所有现有中子星观测数据的统一解释。

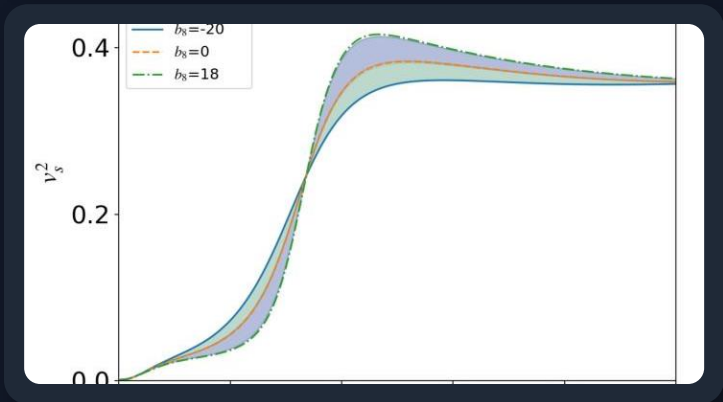
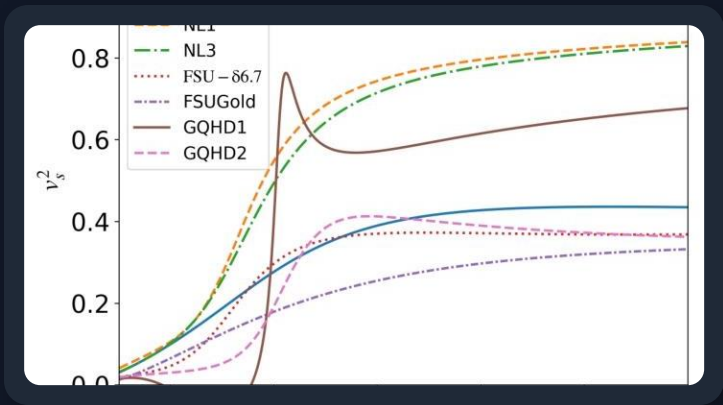
Peak for pure hadron matter



Peak induced from $\sigma\omega\rho a_0$ term for pure hadron matter



声速峰值：解开谜题的钥匙



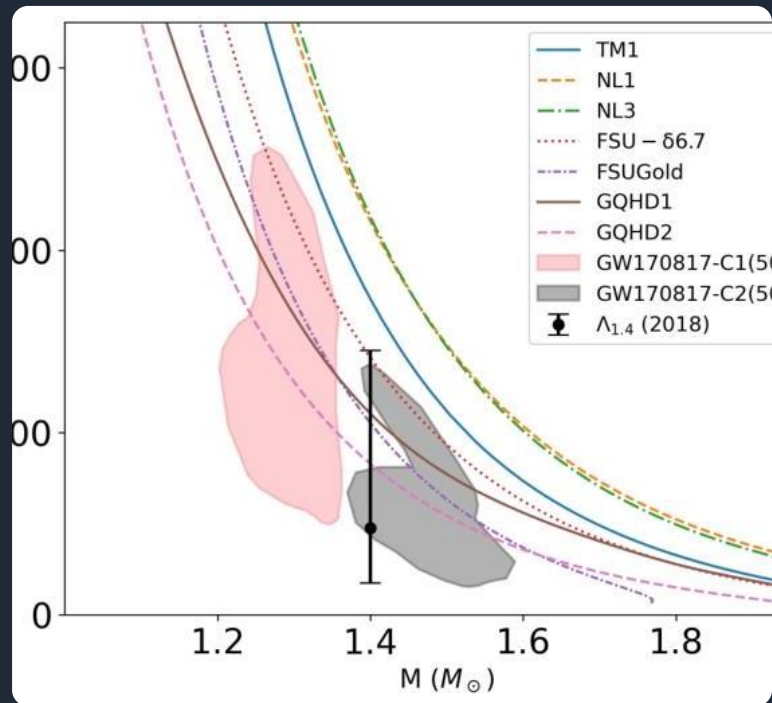
图表解读：声速的演化规律

- 坐标定义：横轴为密度比 n/n_0 ，纵轴为声速平方 v_s^2 。
- 传统模型：声速随密度呈现单调递增的趋势。
- GQHD 模型：在 $n \approx 2-3 n_0$ 区间出现显著的声速峰值，这是状态方程非单调行为的关键特征。

峰值成因：微观相互作用的驱动

- 核心机制：峰值主要由拉格朗日量中的 b_8 项驱动。
- 关键相互作用： $\sigma\omega\rho a_0$ 四介子混合相互作用在中等密度区域显著增强了系统的排斥力。
- 物理结果：排斥力的增强直接导致了声速在特定密度区间的急剧跃升。

潮汐形变度的约束



Λ (潮汐形变度) 定义

描述中子星在引力场中被拉伸的程度，是引力波事件 GW170817 给出的独立关键观测量，直接反映星体内部物质分布。

GW170817 联合约束分析

GQHD模型预测 $\Lambda_{1.4}$ 为441.6(GQHD1)和320.5(GQHD2)。与GW170817的约束一致。

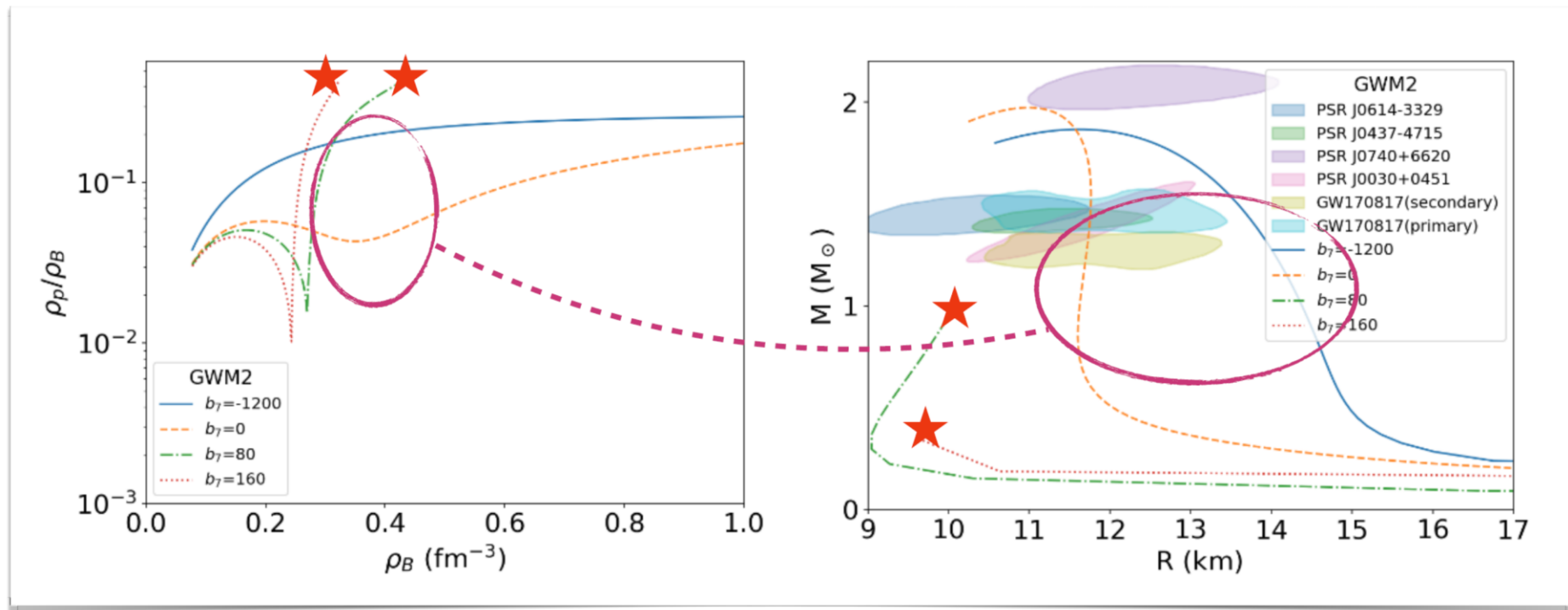
理论模型修正启示

潮汐形变度对理论提出了新的严格限制。成功的GQHD模型满足所有观测数据。

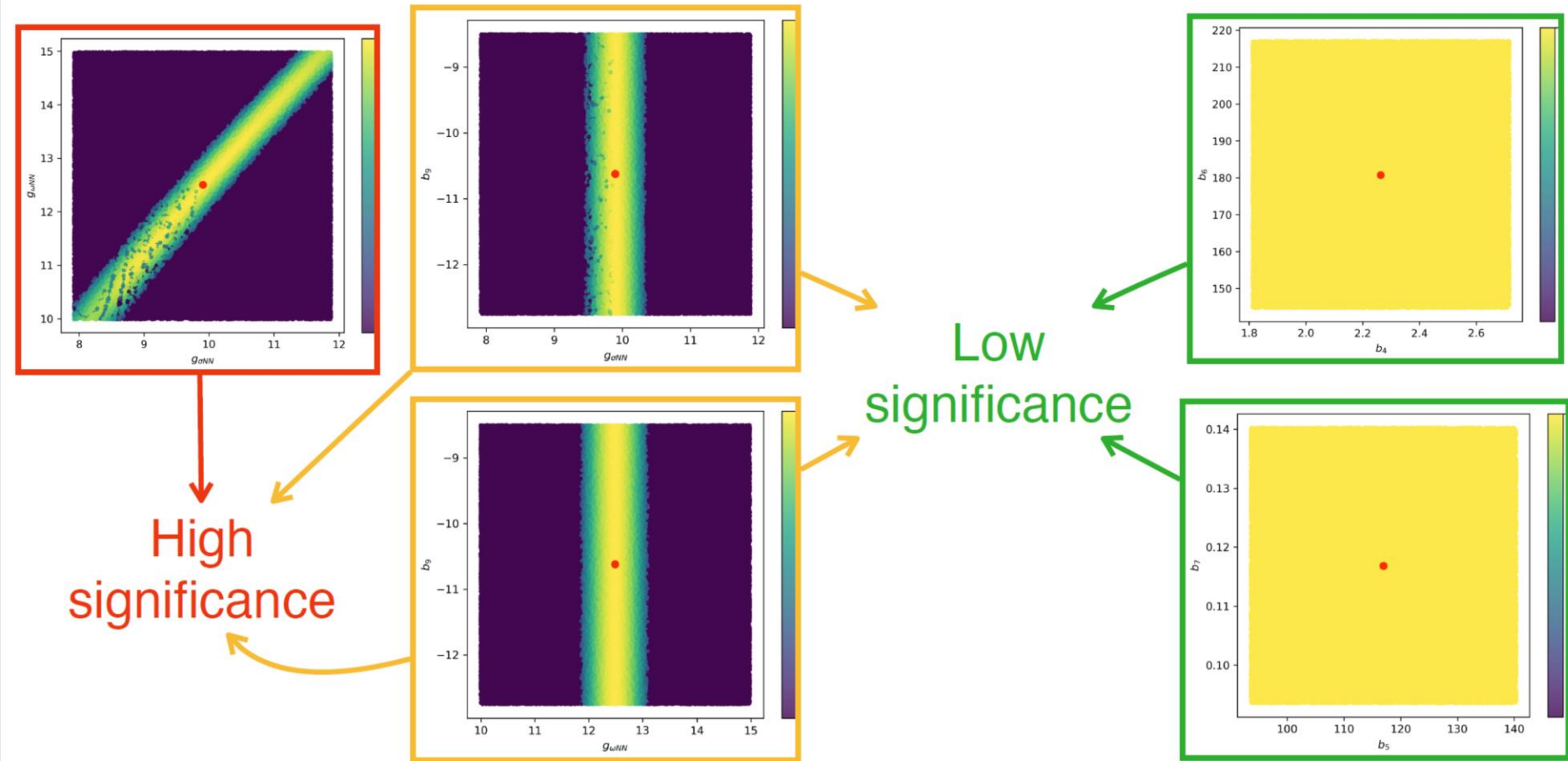


The proton ratio in beta equilibrium

Sensitive to $a_0^2 \sigma^2$



Parameter space



■ 模型化簡

Table 3. The change of the benchmark Δ_B , defined in Table 1, after deleting the corresponding operator based on GWM2 set. The inf means the likelihood defined by Eq. (3) is near zero.

| | | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-------|
| Parameter | $g_{\sigma NN}$ | $g_{\omega NN}$ | $g_{\rho NN}$ | $g_{a_0 NN}$ | b_3 | b_4 | b_5 (MeV) | b_6 |
| Δ_B | inf | inf | 691 | 210 | 0.381 | 0.00515 | 0.0428 | 9.95 |
| Parameter | b_7 | b_8 | b_9 (MeV) | g_2 (MeV) | g_3 | g_4 | g_5 | |
| Δ_B | 5.88×10^{-3} | 0.760 | 3.76×10^{-5} | inf | inf | 0.994 | 1.95×10^{-3} | |
| Parameter | g_6 (MeV) | g_7 (MeV) | c_3 | c_4 | d_3 | m_σ (MeV) | | |
| Δ_B | 1.94×10^{-2} | 19.7 | inf | 9.68 | 2.36×10^{-3} | inf | | |

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_S = & \bar{\Psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_N) \Psi + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{2} g_4 \sigma^2 \omega^\mu \omega_\mu - g_7 \sigma \omega^\mu \omega_\mu - \frac{1}{4} \Omega^{\mu\nu} \Omega_{\mu\nu} \\
 & + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu + \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 + \frac{1}{2} c_4 \omega^\mu \omega_\mu \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu - \frac{1}{4} \vec{P}^{\mu\nu} \cdot \vec{P}_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \vec{\rho}^\mu \cdot \vec{\rho}_\mu \\
 & + \frac{1}{2} \partial_\mu \vec{a}_0 \cdot \partial^\mu \vec{a}_0 - m_{a_0}^2 \vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0 + \frac{1}{2} b_6 \vec{a}_0 \cdot \vec{a}_0 \sigma^2 + b_8 \vec{a}_0 \cdot \vec{\rho}^\mu \omega_\mu \sigma \\
 & + \bar{\Psi} (-g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \vec{\rho}_\mu - g_{a_0} \vec{a}_0) \Psi ,
 \end{aligned}$$

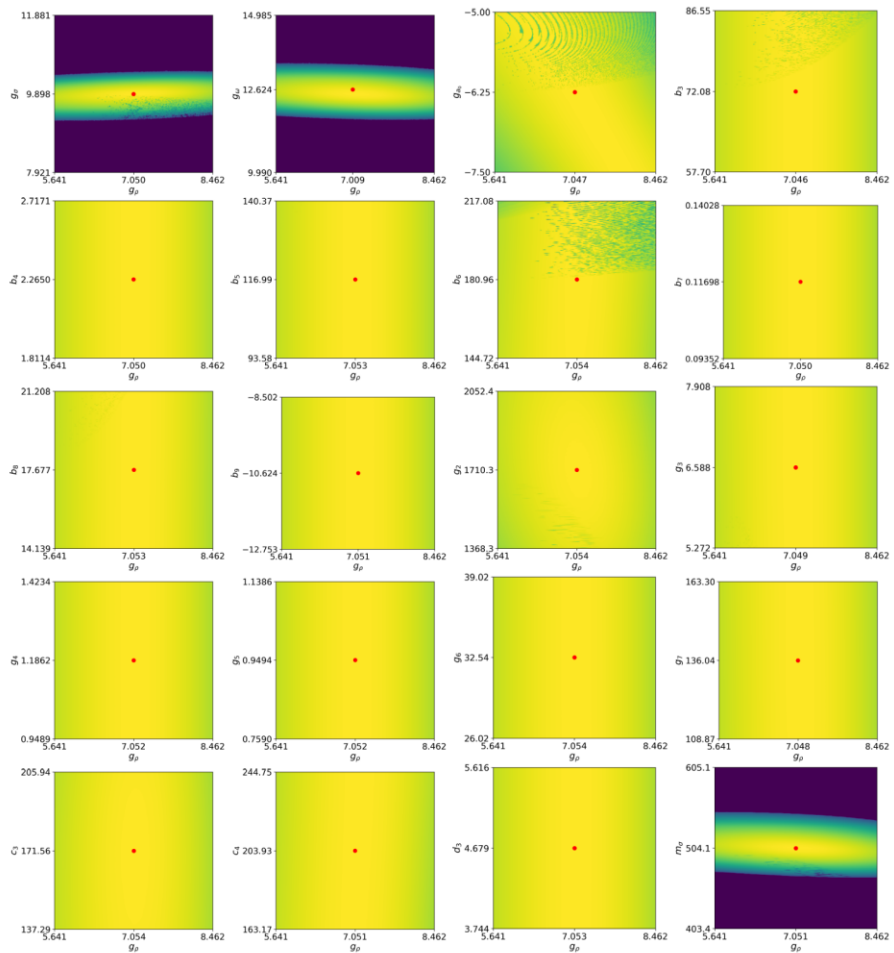
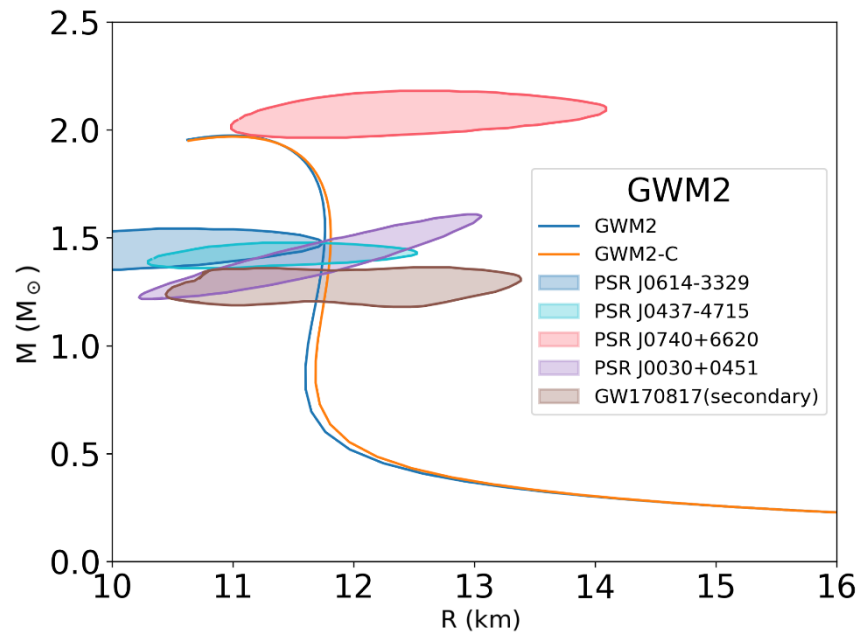


Figure 5. The graph shows the relationship between g_{pNN} and other parameters, where colors represent the relative magnitudes of BJA, and red dots represent our parameters.

Table 4. Nuclear matter properties and benchmark comparison.

| | Empirical | GWM2 | GWM2-C |
|---------------------------------|------------------|-------|--------|
| B.E. | -16.0 ± 1.0 | -16 | -16 |
| n_0 | 0.155 ± 0.05 | 0.155 | 0.155 |
| E_{sym} | 30.9 ± 1.9 | 33.1 | 33.1 |
| L | 52.5 ± 17.5 | 49.8 | 49.8 |
| K | 230 ± 30 | 214 | 214 |
| $E_{1.5n_0}$ | -13.3 ± 0.5 | -13.3 | -13.3 |
| $P_{1.5n_0}$ | 3.41 ± 1.29 | 3.67 | 3.67 |
| m_σ | 600 ± 200 | 504 | 504 |
| $P_{\text{PNM}}(\rho = 2/3n_0)$ | 11.4 ± 1.0 | 11.5 | 11.5 |
| $L(\rho = 2/3n_0)$ | 71.5 ± 22.6 | 54.9 | 54.7 |
| $E_{\text{sym}}(\rho = 1/3n_0)$ | 15.9 ± 1.0 | 14.5 | 14.5 |
| <i>benchmark</i> | ↑ | 7.92 | 7.86 |



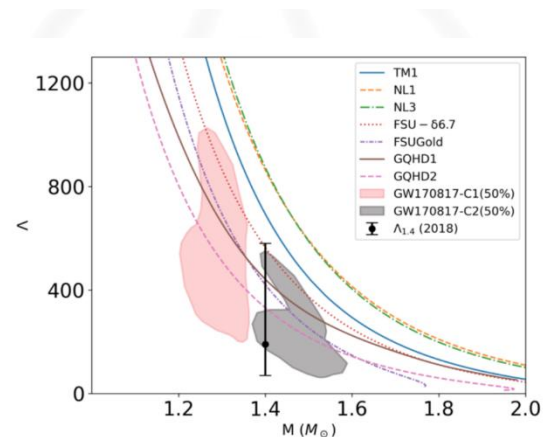
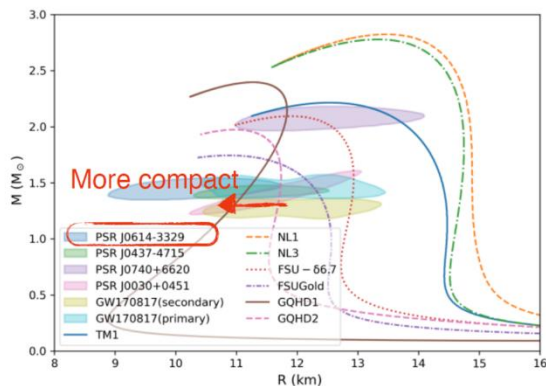
PART 04

结论与展望

CONCLUSION & OUTLOOK

- 基于强子自由度的模型可以描述目前为止所有已知的数据，不存在确切的理由引入奇异自由度、夸克物质等。

| | Empirical | TM1 | NL1 | NL3 | FSU- $\delta 6.7$ | FSUGold | GQHD1 | GQHD2 |
|-----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------------|---------|-------|-------|
| $E(n_0)$ | -16.0 ± 1.0 [19] | -16.2 | -16.5 | -16.3 | -16.3 | -16.3 | -17.2 | -16.1 |
| n_0 | 0.16 ± 0.05 [19] | 0.142 | 0.152 | 0.148 | 0.148 | 0.148 | 0.159 | 0.155 |
| $E_{\text{sym}}(n_0)$ | 30.9 ± 1.9 [49] | 36.0 | 43.5 | 38.2 | 32.7 | 29.1 | 32.3 | 33.4 |
| $L(n_0)$ | 52.5 ± 17.5 [50] | 108 | 140 | 121 | 53.5 | 53.1 | 49.6 | 49.6 |
| $K(n_0)$ | 230 ± 30 [51] | 257 | 207 | 246 | 229 | 228 | 349 | 214 |
| $E(1.5n_0)$ | -13.3 ± 0.5 [52] | -13.0 | -13.1 | -12.6 | -13.3 | -13.5 | -12.5 | -13.3 |
| $P(1.5n_0)$ | 3.41 ± 1.29 [53] | 4.26 | 5.52 | 5.57 | 3.97 | 3.58 | 6.52 | 3.67 |
| $L(\frac{2}{3}n_0)$ | 71.5 ± 22.6 [54] | 69.6 | 85.0 | 74.3 | 54.5 | 39.2 | 69.9 | 55.2 |
| m_σ | 600 ± 200 [33] | 511 | 492 | 503 | 492 | 492 | 445 | 504 |
| BJA | \uparrow | -4.51 | -15.3 | -11 | 3.8 | 4.28 | 1.13 | 8.03 |



结论与未来展望

核心结论 / Key Conclusions



强子模型的成功构建

包含 σ 、 ω 、 ρ 、 a_0 介子的广义强子模型，可在 1σ 水平统一描述核物质性质与中子星观测数据，无需引入夸克等奇异自由度。



声速峰值的核心机制

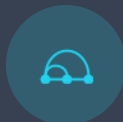
$\sigma\omega\rho a_0$ 相互作用导致的声速峰值，是实现EoS“中间软、高密硬”特性的关键，完美解释了观测数据上的矛盾。



中等质量星的观测启示

对中等质量中子星进行更精确的M-R测量，是检验纯强子星模型、并探寻高密度物质深层相结构的关键路径。

未来展望 / Future Outlook



精确界定相结构边界

致力于寻找能区分不同相结构的独特观测信号，从而在实验层面精确界定高密度核物质的相变边界。



纳入QCD基本对称性

将手征对称性等QCD基本原理深度纳入模型框架，从更基本的微观层面理解和描述强子间的相互作用。



应对更严格的数据约束

随着引力波探测器与X射线望远镜提供更高精度的数据，持续迭代和完善模型，以适应未来更严苛的观测检验。



南京大學

NANJING UNIVERSITY

Thank you for your attention!

