



论文

基于最新NICER中子星半径观测和手征有效场论结果推断核物质状态方程及中子星性质

谢文杰^{1,2,3*}

1. 运城学院物理与电子工程系, 运城 044000

2. 运城学院山西省智能光电传感应用技术创新中心, 运城 044000

3. 广西师范大学广西核物理与核技术重点实验室, 桂林 541004

*联系人, E-mail: xiewenjie@ycu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-11; 接受日期: 2025-10-15; 网络出版日期: 2025-12-12

广西重点实验室开放课题(编号: NLK2023-03)和中央财政引导地方科技发展资金(编号: Guike ZY22096024)资助项目

摘要 本研究采用包含同位旋效应的中子星核心物质状态方程, 结合最新的中子星半径观测数据以及手征有效场论在低密度区域的约束, 利用贝叶斯方法系统分析了状态方程参数的不确定性及其对中子星宏观性质的影响。结果表明, 对称核物质参数 K_0 与 J_0 的约束较为稳定, 而对称能参数 L 与 K_{sym} 的不确定性显著缩小, 在90%置信水平下分别为 $58.0^{+2.0}_{-10.0}$ 和 $-156.0^{+24.0}_{-60.0}$ MeV。进一步分析表明, 对称能在 $2\rho_0$ 处的取值范围为39.5–49.5 MeV。研究结果显示, 手征有效场论在低密度区域提供了主要约束, 而中子星观测数据在高密度区域起主导作用。此外, 中子星的宏观性质也得到了更严格的限定: 在90%置信水平下, 最大质量为 $2.20^{+0.10}_{-0.20} M_{\odot}$, 不支持将GW190814的次级致密天体解释为中子星。半径差 $\Delta R = R_{2.0} - R_{1.4}$ 被约束为 $-0.27^{+0.18}_{-0.42}$ km, 表明结合最新中子星观测与手征有效场论的联合分析倾向于支持相对较软的状态方程。然而, 当仅考虑中子星观测或仅考虑手征有效场论时, 均得到 $\Delta R > 0$, 对应较硬的状态方程。

关键词 核物质状态方程, 贝叶斯统计方法, 中子星半径观测, 核物质对称能**PACS:** 02.70.Uu, 26.60.+c, 21.65.+f

1 引言

理解致密丰中子核物质性质并约束其状态方程(Equation of State, EOS)是核物理与天体物理共同的核心目标^[1,2]。自GW170817引力波事件以来^[3], 多信使观测包括双中子星并合的潮汐形变、射电脉冲星的高精度质量测量, 以及中子星内部组成探测器(Neutron

Star Interior Composition Explore, NICER)合作组对质量-半径的推断^[3–15]与地基核实验在广泛密度区间内对对称核物质压力的约束相结合, 正推动在饱和密度及其以上区域重建核物质EOS的密度依赖性^[1,16,17]。低密度区的对称能斜率 L 已获得相对稳健的统计约束, 而在两倍饱和密度附近及以上的高密区, 关于对称能曲率参数 K_{sym} 及更高阶对称能参数的不确定性仍然显

引用格式: 谢文杰. 基于最新NICER中子星半径观测和手征有效场论结果推断核物质状态方程及中子星性质. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 232011
Xie W J. Study of the nuclear matter equation of state and neutron star properties based on latest nicer radius observations and chiral effective field theory results (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 232011, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0387

著, 显示出当前数据对超饱和密度EOS的分辨力仍有限, 需要更高精度的引力波事件与X射线脉冲星观测继续改进.

天体观测与核理论计算^[18,19]约束相结合, 为研究丰中子物质的性质、中子星核心可能存在的夸克相或超子相, 以及暗物质在中子星内外的分布提供了重要信息. 尤其是NICER对距离最近且最亮的毫秒脉冲星PSR J0437-4715的质量-半径约束^[12], 结合精确的质量先验^[20], 使得半径推断精度在68%置信度下达到约7%, 为典型 $1.4M_{\odot}$ 中子星的半径提供了关键约束, 并对约两倍核饱和密度下丰中子物质的压力及中间密度区间的状态方程施加了直接约束^[21,22]. 同时, 对PSR J0030+0451的重新分析揭示了更复杂的热斑几何并修正了质量-半径结果^[10], 而PSR J0740+6620的更大数据集则提供了更稳健的约束^[11,14], 为更新中子星EOS提供了重要契机.

在天体观测取得进展的同时, 基于手征有效场论(χ EFT)的核物质EOS研究也取得了显著进展^[23]. 结合先进的多体计算方法, χ EFT相互作用能够在接近核饱和密度下对中子物质进行精确描述, 从而为中子星外核的状态方程提供关键约束. 在目前的工作中, 基于之前的研究工作^[24-26], 结合最新的观测数据^[9,10,12,15,27]和手征有效场论的研究结果^[23], 采用贝叶斯框架来推断出最新的核物质对称能理论参数的不确定范围. 本文内容安排如下, 在第2节介绍中子星模型和贝叶斯框架; 第3节展示中子星物态方程与结构的计算结果; 最后在第4节给出结论.

2 理论框架

在当前对中子星内部成分尚未完全明确的研究背景下, 本文采用的理论模型假定中子星仅由核子与轻子(包括电子和 μ 子)构成, 且不考虑强子至夸克的相变. 中子星内部的压强可通过以下表达式计算:

$$p(\rho, \delta) = \rho^2 \frac{d}{d\rho} \left(\frac{\epsilon(\rho, \delta)}{\rho} \right),$$

$$\epsilon(\rho, \delta) = \rho E(\rho, \delta) + \rho M + \epsilon_l(\rho, \delta), \quad (1)$$

式中 $\epsilon(\rho, \delta)$ 表示能量密度, M 为平均核子质量. $E(\rho, \delta)$ 代表每个核子的能量, 其中 $\rho = \rho_n + \rho_p$ 为核子密度, $\delta \equiv (\rho_n - \rho_p)/\rho$ 为同位旋不对称度(角标 n 和 p 分别

表示中子和质子). 每核子能量 $E(\rho, \delta)$ 是核物质状态方程的一个重要输入量, 可近似表达为^[28]

$$E(\rho, \delta) = E_0(\rho) + E_{\text{sym}}(\rho) \cdot \delta^2 + O(\delta^4), \quad (2)$$

式中 $E_0(\rho)$ 表示对称核物质(具有等量的中子数和质子数组成的核物质)的每核子能量, 而 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 代表核物质对称能. 它们在饱和密度 ρ_0 附近可展开为

$$E_0(\rho) \approx E_0(\rho_0) + \frac{K_0}{2} \left(\frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right)^2 + \frac{J_0}{6} \left(\frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right)^3, \quad (3)$$

$$E_{\text{sym}}(\rho) \approx E_{\text{sym}}(\rho_0) + L \left(\frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right) + \frac{K_{\text{sym}}}{2} \left(\frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right)^2 + \frac{J_{\text{sym}}}{6} \left(\frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right)^3, \quad (4)$$

式中 $E_0(\rho_0) \approx -16 \text{ MeV}$. $K_0 = 9\rho_0^2 [\partial^2 E_0(\rho)/\partial \rho^2]_{\rho=\rho_0}$ 为不可压缩系数, 其值反映核物质抵抗压缩的能力; $J_0 = 27\rho_0^3 [\partial^3 E_0(\rho)/\partial \rho^3]_{\rho=\rho_0}$ 是对称核物质的偏度参数, 主要影响中子星的最大质量^[24,29]; $J_{\text{sym}} = 27\rho_0^3 [\partial^3 E_{\text{sym}}(\rho)/\partial \rho^3]_{\rho=\rho_0}$ 则为对称能的偏度参数. 轻子部分的能量密度 $\epsilon_l(\rho, \delta)$ 通过无相互作用费米气体模型计算:

$$\epsilon_l(\rho, \delta) = \frac{m_l^4}{8\pi^2} \left[t \sqrt{1+t^2} (1+2t^2) - \ln(t + \sqrt{1+t^2}) \right], \quad (5)$$

式中 $t = (3\pi^2 \rho_l)^{1/3}/m_l$, ρ_l 和 m_l 分别为轻子的密度和质量. 电中性条件($\rho_p = \rho_e + \rho_\mu$)和 β 平衡条件($\mu_n - \mu_p = \mu_e = \mu_\mu \approx 4\delta E_{\text{sym}}(\rho)$)共同决定同位旋不对称度 δ 的取值, 其中 $\mu_i = \partial \epsilon(\rho, \delta)/\partial \rho_i$ 表示化学势. 将方程(1), (3), (4)和(5)联立, 即获得中子星核心的状态方程. 中子星壳层分为内壳与外壳, 分别采用文献^[30,31]提出的模型, 壳-核过渡区的临界密度与压力则通过热力学条件计算得到^[24]. 获得状态方程后, 将其代入Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV)方程, 通过四阶龙格-库塔法数值求解, 可获得中子星的质量与半径.

为了获得理论参数的不确定范围, 本文采用贝叶斯统计方法, 通过后验概率分布量化参数不确定性. 贝叶斯公式表示为

$$P(\mathcal{M} | D) = \frac{P(D | \mathcal{M})P(\mathcal{M})}{\int P(D | \mathcal{M})P(\mathcal{M})d\mathcal{M}}, \quad (6)$$

式中 $P(\mathcal{M} | D)$ 为后验分布, $P(D | \mathcal{M})$ 为似然函数, $P(\mathcal{M})$ 为先验. 在本文的研究中, 基于之前工作^[26]的结果, 整合了多项最新的观测数据, 包括新观测到的源, 比如PSR J0437-4715^[32]和PSR J1231-1411^[15]以及质

量更小的源HESS J1731-347^[27], 此外, 还包括经过修正和更新的观测数据, 比如PSR J0030+0451^[10]和PSR J0740+6620^[9]. 详细数据见表1^[9, 10, 15, 27, 32–35].

表1 目前工作中所用的中子星观测数据

Table 1 The neutron-star observational data used in the present work

质量 ($M_{\odot}$)	半径 R (km)	来源与参考文献
1.4	$11.9^{+1.4}_{-1.4}$ (90% CI)	GW170817 ^[33]
1.4	$11.7^{+1.1}_{-1.1}$ (90% CI)	QLMXBs ^[34]
1.4	$10.8^{+2.1}_{-1.6}$ (90% CI)	GW170817 ^[35]
$1.37^{+0.17}_{-0.17}$	$13.11^{+1.3}_{-1.3}$ (68% CI)	PSR J0030+0451 ^[10]
$1.418^{+0.037}_{-0.037}$	$11.36^{+0.95}_{-0.63}$ (68% CI)	PSR J0437-4715 ^[32]
$2.08^{+0.07}_{-0.07}$	$12.97^{+1.56}_{-1.39}$ (68% CI)	PSR J0740+6620 ^[9]
$0.77^{+0.20}_{-0.17}$	$10.4^{+0.86}_{-0.78}$ (68% CI)	HESS J1731-347 ^[27]
$1.04^{+0.05}_{-0.03}$	$13.5^{+0.3}_{-0.5}$ (68% CI)	PSR J1231-1411 ^[15]

6个状态方程参数的先验分布与之前工作中^[24, 26]的范围设置一致, 也采用的是均匀形式的先验分布, 它们的先验范围为 $220 \text{ MeV} \leq K_0 \leq 260 \text{ MeV}$, $-800 \text{ MeV} \leq J_0 \leq 400 \text{ MeV}$, $-400 \text{ MeV} \leq K_{\text{sym}} \leq 100 \text{ MeV}$, $-200 \text{ MeV} \leq J_{\text{sym}} \leq 800 \text{ MeV}$, $30 \text{ MeV} \leq L \leq 90 \text{ MeV}$, $28.5 \text{ MeV} \leq E_{\text{sym}} \leq 34.9 \text{ MeV}$. 似然函数综合了手征有效场论在 $1.5\rho_0$ 以下密度区域的结果和目前最新观测到的中子星半径观测的高斯似然, 具体形式为

$$P[D|M(p)] = P_{\text{filter}} \times P_{\text{mass,max}} \times P_{\text{radius}}, \quad (7)$$

式中,

$$P_{\text{radius}} = \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R,j}} \exp \left[-\frac{(R_{\text{th},j} - R_{\text{obs},j})^2}{2\sigma_{R,j}^2} \right], \quad (8)$$

P_{filter} 表示状态方程需要满足一定的条件, 包括: (1) 中子星壳-核临界压力为正值; (2) 热动力学稳定和因果条件; (3) 在壳-核临界密度 ρ_t 至 $1.5\rho_0$ 密度区域中子星内部压力须满足手征有效场论的计算结果, 即在密度范围 $\rho_t < \rho < 1.5\rho_0$ 中, 中子星内部压力须落由手征有效场论计算得到的压力范围之内, 见文献^[23]图4中的N³LO结果. $P_{\text{mass,max}}$ 要求状态方程能够支持目前已观测到的最大中子星质量, 本文中采用的中子星的最大观测质量为 $1.97M_{\odot}$, 所有不能支持这一最大质量的状态方程将被舍弃. 为消除初始抽样的非平衡效应, 弃去前40000步, 使用后续800000步样本进行后验分布推断, 采用Metropolis-Hastings算法和马尔可夫链-蒙特卡罗方法来模拟参数的后验分布.

3 结果

在贝叶斯分析中引入新的观测数据以及手征有效场论结果作为似然函数后, 用于描述核物质状态方程的六个参数在不确定性范围上呈现出差异化变化, 后验分布如图1所示, 90%置信区间如表2所列, 具体如下: (1) 对称核物质状态方程的参数 K_0 和 J_0 的分布范围基本保持不变, 表明新数据对其约束效应有限. 然而值得注意的是, K_0 的最概然值呈现向较大数值的偏移. 这一趋势可能意味着在饱和密度附近对称核物质的压缩性更强. (2) 对称能斜率参数 L 和曲率参数 K_{sym} 的不确定性显著收缩. 后验分布范围与仅考虑手征有效场论

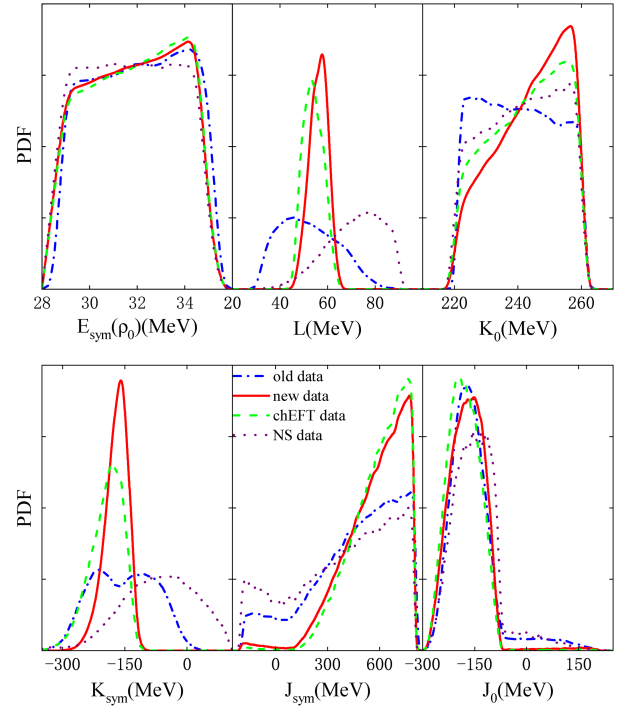


图1 (网络版彩图)基于表1中所列的最新中子星半径观测数据得到的核物质状态方程的6个参数的后验概率分布(红色曲线). 为了比较, 图中还包括了文献^[26]中基于之前中子星半径观测数据(蓝色曲线)、仅由手征有效场论结果(绿色曲线)、仅由中子星新数据, 即表1中的数据(紫色曲线)得到的后验分布

Figure 1 (Color online) Posterior probability density distributions of the nuclear EOS parameters obtained from the updated neutron star radius observational data (shown by red curves). For comparison, the results in ref. ^[26] (shown by blue curves), by the results of chiral effective field theory (shown by the green curves) and by the observation data listed in Table 1 (shown by purple curves) are included.

表 2 基于表1中中子星观测数据和手征有效场论结果所得到的6个状态方程参数的90%置信区间. 为了比较, 文献[26]中的结果也展示在表中. 参数的单位为MeV

Table 2 The 90% confidence intervals for the six parameters derived from the neutron star observational data in Table 1 and results from chiral effective field theory. For comparison, the results from ref. [26] are also presented in the table. The units of the parameters are in MeV

	K_0	J_0	K_{sym}	J_{sym}	L	$E_{\text{sym}}(\rho_0)$
目前工作	$258.0^{+0.0}_{-32.0}$	$-150.0^{+50.0}_{-95.0}$	$-156.0^{+24.0}_{-60.0}$	$780.0^{+20.0}_{-450.0}$	$58.0^{+2.0}_{-10.0}$	$34.5^{+0.0}_{-5.5}$
文献[26]	$224.0^{+32.0}_{-2.0}$	$-170.0^{+80.0}_{-90.0}$	$-220.0^{+180.0}_{-50.0}$	$800.0^{+0.0}_{-720.0}$	$45.0^{+24.0}_{-12.0}$	$34.50^{+0.0}_{-5.5}$

结果(绿色曲线所示)得到的较为相近, 这反映出手征有效场论结果在约束这两个参数时起到较为决定性的作用. 这一现象可根据之前的研究理解[24,36], 参数 L 一般描述饱和密度附近及以下区域对称能的行为, 而 K_{sym} 则描述两倍饱和密度附近及以下区域的对称能行为, 而本文所采用的手征有效场论结果的密度区域($\rho \leq 1.5\rho_0$)与此相符, 故对其约束较强. (3) 之前的中子星观测数据(蓝色曲线所示)和手征有效场论结果倾向于较软的对称能, 而新的中子星观测数据(紫色曲线所示)则更支持较硬的对称能.

对称核物质每核子能量 E_0 和对称能 E_{sym} 均由上述6个参数共同决定, 因此参数不确定性的变化会直接反映在 E_0 与 E_{sym} 随密度演化的范围上. 如图2所示, 无论是对称核物质的每核子能量还是对称能, 其置信区间均较以往研究显著收缩. 其中, 对称能的改善尤为明显. 在90%置信度下, E_{sym} 随核子密度的增加而单调增大, 在 $2\rho_0$ 处的范围被限定在39.5–49.5 MeV; 在68%置信度下, 该范围为41.4–47.8 MeV. 值得注意的是, 该结果与手征有效场论的计算结果(46 ± 4 MeV)一致[37], 且相较于此前的结果($39.2^{+12.1}_{-8.2}$ MeV)有了显著改善[24].

图3给出了中子星的若干宏观性质的后验概率分布, 包括最大质量、1.4倍与2.0倍太阳质量中子星的半径及其差值, 以及在 $1.5\rho_0$, $2.0\rho_0$, $2.5\rho_0$ 和 $3.0\rho_0$ 处中子星内部压力的分布. 图中红色曲线表示基于新观测数据得到的结果, 绿色曲线对应的是仅基于手征有效场论结果得到的结果, 紫色曲线代表基于表1中所列中子星新观测数据得到的结果, 而蓝色曲线则对应文献[26]中基于旧观测数据得到的结果. 为了便于比较, 图中还给出了文献[38]中基于声速不变模型(CS)和分段多方(PP)模型得到的结果. 从图中可观察到以下现象: (1) 相较于旧数据, 新的观测数据显著提升了对中子星宏观性质的约束精度, 其表现为后验概率分布曲线明显收窄, 置信区间显著减小. 由此得到的无旋转中子星最大质量约为 $2.4M_\odot$, 与之前的结果(见文

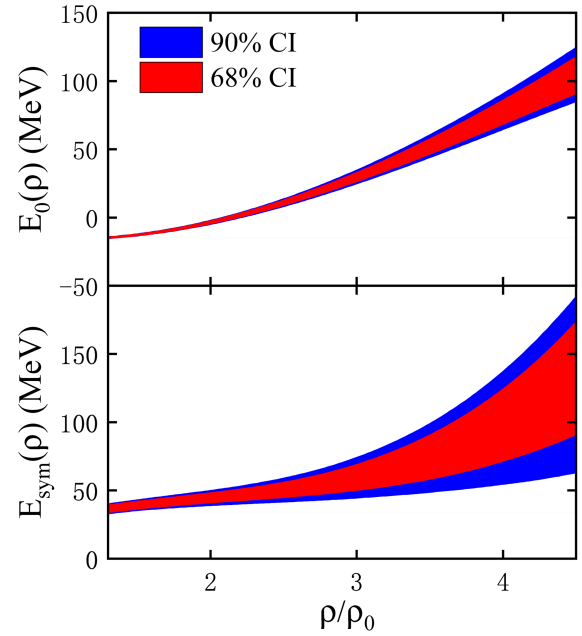


图 2 (网络版彩图)基于表1中所列的最新中子星半径观测数据得到的对称核物质每核子能量和对称能随密度变化的68%(红色阴影)和90%(蓝色阴影)置信范围

Figure 2 (Color online) The 68% and 90% confidence regions for the energy per nucleon in symmetric nuclear matter and nuclear symmetry energy as functions of the reduced density based on the data listed in Table 1.

献[26,29]) 基本一致, 从而不支持GW190814次级天体为中子星的解释. 相关物理量的68%与90%置信区间列于表3; (2) 与图1的结果相对应, 相比中子星观测数据, 基于手征有效场论得到的中子星半径较小, 内部压力也较小, 但这一差别随着密度的增加而减小, 如 $P(3\rho_0)$ 的后验分布图所示. 这意味着手征有效场论结果只在低密处发挥作用, 而在高密处则主要由中子星观测数据发挥约束作用; (3) 本文中基于手征有效场论结果得到的压力的后验分布与文献[38]中采用PP和CS模型得到的在 $2\rho_0$ 处结果基本一致, $3\rho_0$ 处差别变大; (4) 最大质量不依赖于贝叶斯推断中数据的选择.

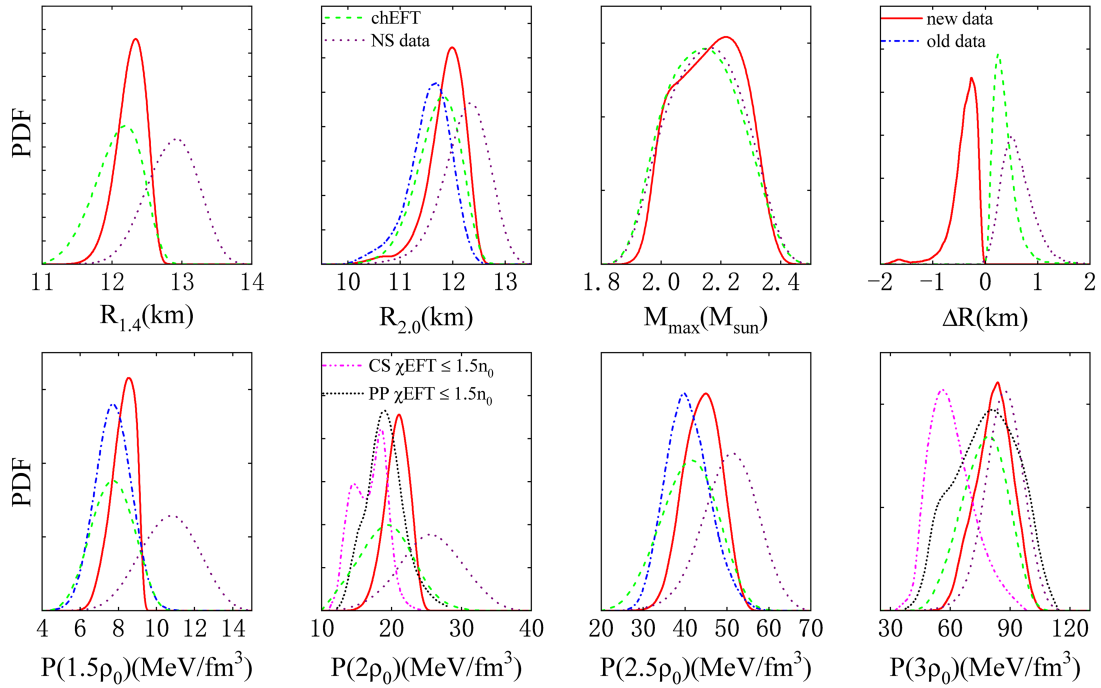


图 3 (网络版彩图)基于表1中所列的最新中子星半径观测数据和手征有效场论结果[23]得到的中子星宏观性质的后验概率分布(红色曲线), 包括1.4和2.0倍中子星半径 $R_{1.4}$ 和 $R_{2.0}$ 、中子星最大质量 $M_{\max}$ 、 ΔR 、 $1.5\rho_0$ 、 $2\rho_0$ 、 $2.5\rho_0$ 和 $3\rho_0$ 处的压力. 为了比较, 图中还包括了文献[26]中基于之前中子星半径观测数据得到的后验分布(蓝色曲线)以及文献[38]中基于多方(PP)模型和声速不变(CS)模型得到的结果

Figure 3 (Color online) Posterior probability distribution functions (red curves) of neutron star macroscopic properties derived from the latest neutron star radius observational data listed in Table 1 and results from chiral effective field theory [23], including the radii of 1.4 and 2.0 solar mass neutron stars ($R_{1.4}$, $R_{2.0}$), the maximum neutron star mass ($M_{\max}$), ΔR , and the pressure at densities of $1.5\rho_0$, $2\rho_0$, $2.5\rho_0$, and $3\rho_0$. For comparison, the figure also includes posterior distributions (blue curves) from ref. [26] based on previous neutron star radius observational data, as well as results from ref. [38] based on the piecewise-polytropic (PP) model and the constant-speed-of-sound (CS) model.

表 3 基于表1中所列的最新中子星半径观测数据和手征有效场论结果得到的中子星宏观特征量的68%和90%置信区间, 与图3中红色曲线所代表的结果所对应

Table 3 Macroscopic properties of neutron stars correspond to the 68% and 90% confidence intervals based on the latest neutron star radius observational data and the results from chiral effective field theory listed in Table 1, which align with the results represented by the red curves in Figure 3

置信区间	$R_{1.4}$ (km)	$R_{2.0}$ (km)	$M_{\max}$ ($M_{\odot}$)	ΔR (km)	$p(1.5\rho_0)$ (MeV/fm ³)	$p(2.0\rho_0)$ (MeV/fm ³)	$p(2.5\rho_0)$ (MeV/fm ³)	$p(3.0\rho_0)$ (MeV/fm ³)
68%	$12.30^{+0.20}_{-0.10}$	$12.00^{+0.20}_{-0.40}$	$2.20^{+0.10}_{-0.10}$	$-0.27^{+0.09}_{-0.27}$	$8.60^{+0.40}_{-0.60}$	$21.00^{+1.50}_{-1.50}$	$45.00^{+2.00}_{-7.00}$	$84.00^{+7.00}_{-11.00}$
90%	$12.30^{+0.20}_{-0.40}$	$12.00^{+0.40}_{-0.60}$	$2.20^{+0.10}_{-0.20}$	$-0.27^{+0.18}_{-0.42}$	$8.60^{+0.40}_{-1.40}$	$21.00^{+2.00}_{-3.50}$	$45.00^{+5.00}_{-9.00}$	$84.00^{+11.00}_{-19.00}$

与文献[38]中的结果相比, 本研究所得的不确定范围整体上保持一致, 但在数值上略偏大, 同时不确定区间较文献结果有所收缩, 显示出更高的约束精度. 在文献[22]中, 提出了一个新的观测量 $\Delta R = R_{2.0} - R_{1.4}$, 其正负可用于刻画中子星物质状态方程的软硬程度: 若 $\Delta R > 0$, 则表明状态方程相对较硬; 反之, 若 $\Delta R < 0$, 则表明状态方程较软. 从图3可以看出, 本研究得到的

结果为 $\Delta R < 0$, 其在90%置信水平下为 $-0.27^{+0.18}_{-0.42}$ km. 这一结果表明, 最新的观测数据更倾向于支持相对较软的状态方程. 值得注意的是, 单独基于手征有效场论结果和单独基于中子星观测数据得到的结果是 $\Delta R > 0$, 显示它们更支持较硬的状态方程.

图4左栏展示了无旋转中子星最大质量(M_{TOV})与 ΔR 之间的相关性. 从图中可以看出, 本研究结果与

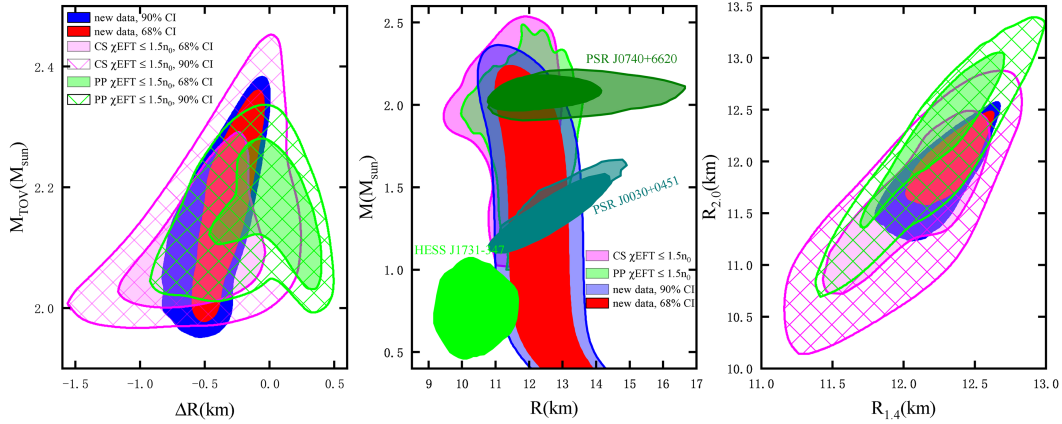


图 4 (网络版彩图) 基于表 1 中所列的最新中子星半径观测数据得到的中子星最大质量(M_{TOV})和 2.0 倍中子星半径与 1.4 倍中子星半径的差值 ΔR (左栏)、中子星质量与半径 (中栏) 以及 2.0 倍太阳质量中子星与 1.4 倍太阳质量中子星半径 (右栏) 的 68% (红色阴影) 和 90% (蓝色阴影) 置信范围. 为了比较, 文献 [38] 以及之前的中子星观测结果也展示在图中

Figure 4 (Color online) The 68% and 90% confidence regions for the correlations between M_{TOV} and ΔR (left panel), M and R (middle panel), and $R_{2.0}$ and $R_{1.4}$ (right panel). For comparison, these in ref. [38] and the observations from NICER collaboration are included.

文献 [38] 中的结果基本一致, 但不确定性区间更为收窄. 与文献 [38] 的结论相符的是, 中子星最大质量随 ΔR 的增大而增大. 这一趋势在本研究中表现得更为显著, 其物理图像也较为清晰: 随着 ΔR 增大, 状态方程趋于刚硬, 物质可压缩性减弱, 从而支持更大的最大质量; 反之, 当 ΔR 减小时, 状态方程变软, 中子星更易压缩, 其最大质量也随之减小.

图 4 中栏给出了中子星的质量-半径关系. 结果表明, 本研究与文献 [38] 中的结果一致, 且具有更窄的不确定性范围. 与较早的观测结果相比 (其中 HESS J1731-347 的数据来自文献 [27], J0030+0451 来自文献 [5, 39], J0740+6620 来自文献 [7]), 本研究能够较好地再现实测结果, 尤其是对质量较低的源 HESS J1731-347 也存在一定概率能够重现. 这一点与文献 [40] 中基于相对论平均场方法得到的结果存在差异, 后者未能有效描述 HESS 源. 由此可见, 目前的研究尚不能排除 HESS J1731-347 为中子星的可能性. 图 4 右栏显示了 $1.4M_{\odot}$ 与 $2.0M_{\odot}$ 中子星半径之间的相关性. 与前两幅图类似, 本研究结果同样与文献 [38] 中的结果一致, 但不确定范围进一步缩小, 显示出新观测数据在约束中子星半径方面的重要作用.

4 结论

综上所述, 本工作通过在贝叶斯框架中将最新

的中子星半径观测数据与手征有效场论结果联合纳入似然函数, 对用于刻画核物质状态方程的六个参数以及由其导出的宏观天体量给出了更为严格的约束. 具体而言, 描述对称核物质近饱和密度行为的参数 K_0 与 J_0 总体上保持稳定, 且 K_0 的最概然值出现向较大值的轻微偏移; 而表征对称能低-中密度行为的参数 L 和 K_{sym} 的不确定性显著收缩, 这反映出手征有效场论在约束低密度对称能方面的决定性作用. 由此推导的对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 在密度演化上的置信区间较以往明显收窄, 在 $2\rho_0$ 处被限制在约 39.5–49.5 MeV (90%), 在 68% 置信度下为 41.4–47.8 MeV, 与手征有效场论的独立计算结果相兼容. 对于中子星宏观性质, 本联合约束得到的典型半径为 $R_{1.4} \approx 12.3$ km, $R_{2.0} \approx 12.0$ km, 且后验分布显著变窄; 基于当前数据的推断表明最大允许质量在约 $2.4M_{\odot}$ 的量级, 因而不支持将 GW190814 事件中的次级天体解释为中子星. 另一方面, $\Delta R = R_{2.0} - R_{1.4}$ 的后验值为负 (90% 置信区间 $-0.27^{+0.18}_{-0.42}$ km), 提示总体上最新观测与理论联合更偏向于相对较软的状态方程; 与之对应的内部压力在 $1.5\rho_0$ – $3\rho_0$ 区间也得到了更紧的约束, 并在低密度处与文献中基于多方/声速不变模型的结果保持一致. 值得注意的是, 对极高密度行为敏感的参数 (如 J_{sym}) 仍未获得显著改善, 表明当前观测与理论主要在 $\leq 2\rho_0$ – $3\rho_0$ 密度范围内发挥约束力, 而对更高密度区域的确定仍需依赖未来更高精度的引力波事件、X 射线脉冲

星测量以及重离子碰撞实验. 总之, 本研究展示了将精确天文观测与微观理论结果联合起来对核EOS进行限制的强大能力——在巩固低密度物理认知的同时,

显著提升了对中子星宏观性质的约束精度, 并为今后通过新增观测进一步制约高密度区行为提供了明确的方向.

参考文献

- 1 Li B A, Krastev P G, Wen D H, et al. Towards understanding astrophysical effects of nuclear symmetry energy. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 117
- 2 Li A, Zhu Z Y, Zhou E P, et al. Neutron star equation of state: Quark mean-field (QMF) modeling and applications. *J High Energy Astrophys*, 2020, 28: 19–46
- 3 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 4 Cromartie H T, Fonseca E, Ransom S M, et al. Relativistic Shapiro delay measurements of an extremely massive millisecond pulsar. *Nat Astron*, 2020, 4: 72–76
- 5 Fonseca E, Cromartie H T, Pennucci T T, et al. Refined mass and geometric measurements of the high-mass PSR J0740+6620. *Astrophys J*, 2021, 915: L12
- 6 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Properties of the binary neutron star merger GW170817. *Phys Rev X*, 2019, 9: 011001
- 7 Miller M C, Lamb F K, Dittmann A J, et al. The radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton data. *Astrophys J*, 2021, 918: L28
- 8 Riley T E, Watts A L, Ray P S, et al. A NICER view of the massive pulsar PSR J0740+6620 Informed by radio timing and XMM-Newton spectroscopy. *Astrophys J*, 2021, 918: L27
- 9 Salmi T, Vinciguerra S, Choudhury D, et al. The radius of PSR J0740+6620 from NICER with NICER background estimates. *Astrophys J*, 2022, 941: 150
- 10 Vinciguerra S, Salmi T, Watts A L, et al. An updated mass-radius analysis of the 2017–2018 NICER data set of PSR J0030+0451. *Astrophys J*, 2024, 961: 62
- 11 Dittmann A J, Miller M C, Lamb F K, et al. A more precise measurement of the radius of PSR J0740+6620 using updated NICER data. arXiv: 2406.14467
- 12 Choudhury D, Salmi T, Vinciguerra S, et al. A NICER view of the nearest and brightest millisecond pulsar: PSR J0437-4715. *Astrophys J*, 2024, 971: L20
- 13 Salmi T, Vinciguerra S, Choudhury D, et al. Atmospheric effects on neutron star parameter constraints with NICER. *Astrophys J*, 2023, 956: 138
- 14 Salmi T, Choudhury D, Kini Y, et al. The radius of the high-mass pulsar PSR J0740+6620 with 3.6 yr of NICER data. *Astrophys J*, 2024, 974: 294
- 15 Salmi T, Deneva J S, Ray P S, et al. A NICER view of PSR J1231-1411: A complex case. *Astrophys J*, 2024, 976: 58
- 16 Baiotti L. Gravitational waves from neutron star mergers and their relation to the nuclear equation of state. *Prog Part Nucl Phys*, 2019, 109: 103714
- 17 Annala E, Gorda T, Kurkela A, et al. Gravitational-wave constraints on the neutron-star-matter equation of state. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 172703
- 18 Miao Z, Zhu Y, Li A, et al. Dark matter admixed neutron star properties in the light of X-ray pulse profile observations. *Astrophys J*, 2022, 936: 69
- 19 Sun X, Miao Z, Sun B, et al. Astrophysical implications on hyperon couplings and hyperon star properties with relativistic equations of states. *Astrophys J*, 2023, 942: 55
- 20 Reardon D J, Bailes M, Shannon R M, et al. The neutron star mass, distance, and inclination from precision timing of the brilliant millisecond pulsar J0437-4715. *Astrophys J*, 2024, 971: L18
- 21 Lattimer J M, Prakash M. Neutron star structure and the equation of state. *Astrophys J*, 2001, 550: 426–442
- 22 Drischler C, Han S, Lattimer J M, et al. Limiting masses and radii of neutron stars and their implications. *Phys Rev C*, 2021, 103: 045808
- 23 Keller J, Hebeler K, Schwenk A. Nuclear equation of state for arbitrary proton fraction and temperature based on chiral effective field theory and a gaussian process emulator. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 072701
- 24 Xie W J, Li B A. Bayesian inference of high-density nuclear symmetry energy from radii of canonical neutron stars. *Astrophys J*, 2019, 883: 174

- 25 Xie W J, Ma Z W, Guo J H. Bayesian inference of the crust-core transition density via the neutron-star radius and neutron-skin thickness data. [Nucl Sci Tech](#), 2023, 34: 91
- 26 Xie W J. Bayesian inference of the parameters involved in the nuclear symmetry energy (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2024, 54: 222011 [谢文杰. 核物质对称能理论参数的贝叶斯统计推断. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 222011]
- 27 Doroshenko V, Suleimanov V, Pühlhofer G, et al. A strangely light neutron star within a supernova remnant. [Nat Astron](#), 2022, 6: 1444–1451
- 28 Bombaci I, Lombardo U. Asymmetric nuclear matter equation of state. [Phys Rev C](#), 1991, 44: 1892–1900
- 29 Zhang N B, Li B A. Extracting nuclear symmetry energies at high densities from observations of neutron stars and gravitational waves. [Eur Phys J A](#), 2019, 55: 39
- 30 Negele J W, Vautherin D. Neutron star matter at sub-nuclear densities. [Nucl Phys A](#), 1973, 207: 298–320
- 31 Baym G, Pethick C, Sutherland P. The ground state of matter at high densities: Equation of state and stellar models. [Astrophys J](#), 1971, 170: 299
- 32 Choudhury D, Salmi T, Vinciguerra S, et al. A NICER view of the nearest and brightest millisecond pulsar: PSR J0437–4715. [Astrophys J](#), 2024, 971: L20
- 33 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Measurements of neutron star radii and equation of state. [Phys Rev Lett](#), 2018, 121: 161101
- 34 Lattimer J M, Steiner A W. Constraints on the symmetry energy using the mass-radius relation of neutron stars. [Eur Phys J A](#), 2014, 50: 40
- 35 De S, Finstad D, Lattimer J M, et al. Tidal deformabilities and radii of neutron stars from the observation of GW170817. [Phys Rev Lett](#), 2018, 121: 091102
- 36 Xie W J, Li B A. Bayesian inference of the incompressibility, skewness and kurtosis of nuclear matter from empirical pressures in relativistic heavy-ion collisions. [J Phys G-Nucl Part Phys](#), 2021, 48: 025110
- 37 Lonardonì D, Tews I, Gandolfi S, et al. Nuclear and neutron-star matter from local chiral interactions. [Phys Rev Res](#), 2020, 2: 022033
- 38 Rutherford N, Mendes M, Svensson I, et al. Constraining the dense matter equation of state with new NICER mass-radius measurements and new chiral effective field theory inputs. [Astrophys J](#), 2024, 971: L19
- 39 Riley T E, Watts A L, Bogdanov S, et al. A NICER view of PSR J0030+0451: Millisecond pulsar parameter estimation. [Astrophys J](#), 2019, 887: L21
- 40 Xia C J, Xie W J, Bakhiet M. Astrophysical constraints on nuclear EOSs and coupling constants in relativistic-mean-field models. [Phys Rev D](#), 2024, 110: 114009

Study of the nuclear matter equation of state and neutron star properties based on latest nicer radius observations and chiral effective field theory results

XIE WenJie^{1,2,3*}

¹*Department of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China*

²*Shanxi Province Intelligent Optoelectronic Sensing Application Technology Innovation Center, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China*

³*Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Nuclear Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*

**Corresponding author (email: xiewenjie@ycu.edu.cn)*

In this work, we employ the equation of state (EOS) of neutron star core matter with explicit isospin dependence, combined with the latest neutron star radius observations and chiral effective field theory (EFT) constraints at low densities, to perform a Bayesian analysis of the EOS parameter uncertainties and their impact on neutron star macroscopic properties. The results indicate that the constraints on the symmetric nuclear matter parameters K_0 and J_0 remain relatively stable, while the uncertainties in the symmetry energy parameters L and K_{sym} are significantly reduced, yielding $L = 58.0^{+2.0}_{-10.0}$ MeV and $K_{\text{sym}} = -156.0^{+24.0}_{-60.0}$ MeV at the 90% credible level. The symmetry energy at twice saturation density is further constrained within 39.5–49.5 MeV. These results suggest that chiral EFT plays a dominant role at low densities, whereas neutron star observations primarily constrain the high-density behavior of the EOS. The macroscopic properties of neutron stars are also more tightly constrained. At the 90% credible level, the maximum mass is $2.20^{+0.10}_{-0.20} M_{\odot}$, which disfavors interpreting the secondary compact object in GW190814 as a neutron star. The radius difference $\Delta R = R_{2.0} - R_{1.4}$ is constrained to $-0.27^{+0.18}_{-0.42}$ km, indicating that the joint analysis of the latest neutron star observations and chiral EFT favors a relatively soft EOS. In contrast, analyses based solely on neutron star observations or chiral EFT results yield $\Delta R > 0$, corresponding to a stiffer EOS.

nuclear equation of state, Bayesian inference approach, neutron-star radius observations, nuclear symmetry energy

PACS: 02.70.Uu, 26.60.+c, 21.65.+f

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0387](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0387)