



中子星可观测量与不同密度段核物质状态方程的关联

张靖 文德华

Correlation Between Neutron Star Observation and Equation of State of Nuclear Matter at Different Densities

ZHANG Jing, WEN Dehua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021019>

引用格式:

张靖, 文德华. 中子星可观测量与不同密度段核物质状态方程的关联[J]. *原子核物理评论*, 2021, 38(2):123–128. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021019

ZHANG Jing, WEN Dehua. Correlation Between Neutron Star Observation and Equation of State of Nuclear Matter at Different Densities[J]. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(2):123–128. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021019

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

局域物态方程对中子星整体性质的影响

Imprint on the Neutron Star Global Properties by Part of the Equation of State

原子核物理评论. 2018, 35(3): 264–269 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.264>

致密物质状态方程：中子星与奇异星

Dense Matter Equation of State: Neutron Star and Strange Star

原子核物理评论. 2019, 36(1): 1–36 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.001>

能通过大质量中子星转动惯量来限定超子参数吗?

Can the Moment of Inertia of Massive Neutron Stars be Used to Constrain the Hyperon Couplings?

原子核物理评论. 2018, 35(2): 127–132 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.127>

中子星内部强子-夸克相变的有限尺度效应研究

Hadron-quark Phase Transition with Finite-size Effect in Neutron Stars

原子核物理评论. 2017, 34(3): 509–513 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.509>

天体物理、引力波及重离子碰撞中的物质

MAGIC: Matter in Astrophysics, Gravitational Waves, and Ion Collisions

原子核物理评论. 2020, 37(3): 272–282 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC75>

原子核对称能对中子星壳层结构的影响

Influence of Nuclear Symmetry Energy on Neutron Star Crusts

原子核物理评论. 2017, 34(3): 387–391 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.32.03.387>

文章编号: 1007-4627(2021)02-0123-06

中子星可观测量与不同密度段核物质状态方程的关联

张靖, 文德华[†]

(华南理工大学物理与光电学院, 广州 510641)

摘要: 中子星物质主要是由高密度非对称核物质组成。目前通过地面重离子碰撞等实验来认识高密度非对称核物质的物态还存在很大的不确定性。随着对中子星天文观测精度的提高以及可观测量的增多, 基于对中子星的天文观测来反向约束高密度非对称核物质物态成为了可能。从理论上去探讨中子星的可观测量与不同密度段物态方程的关联程度, 将有助于上述反向对中子星物质物态的研究。本文利用分段式多方物态方程, 通过对中子星的半径 (R)、潮汐形变参数 (Λ)、转动惯量 (I) 等可观测量的计算分析, 给出了这些观测与物态方程各密度段的关联度。结果表明, 质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的典型中子星潮汐形变参数 (Λ) 和 f -模频率 (ν) 主要与 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$ 、 $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 和 $3.5\rho_{\text{sat}} \sim 4.5\rho_{\text{sat}}$ 三个密度段物态方程有较强关联; 中子星半径 (R) 主要与 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 及壳层物态有较强关联; 转动惯量 (I) 与 $4.5\rho_{\text{sat}}$ 以下各密度段均有一定关联。

关键词: 中子星; 物态方程; 贝叶斯分析

中图分类号: O571.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021019

1 引言

提高对高密度非对称核物质的认识一直是核物理和天体物理的共同目标。虽然通过地面实验已经对 $1 \sim 2$ 倍饱和核密度 ($\rho_{\text{sat}} \approx 2.7 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 核物质性质有了较好的认识, 但对于更高密度的非对称核物质物态方程, 则存在着很大不确定性。这主要是因为地面实验中产生的核物质同位旋效应都比较弱, 无法对同位旋依赖的核核相互作用给出很好的约束^[1]。

中子星主要由高密度非对称核物质组成, 其内部密度最高可达 10 倍饱和核密度, 因此中子星是研究高密度非对称核物质的天然实验室。理论上, 中子星宏观性质一般只依赖于中子星物质的物态方程。根据不同物态方程选择合适边界条件就可以计算出中子星半径 (R)、潮汐形变参数 (Λ)、转动惯量 (I) 及 f -模振动频率 (ν) 等宏观性质。一般而言, 一个物态方程在一定条件下可以给出一个确定的中子星观测量。然而一个中子星观测量却可以对应许多种可能的物态方程。因此直接根据观测量来反向约束物态方程比较困难。贝叶斯分析方法为解决这一困难提供了有效手段: 结合观测数据对大量的物态方程样本进行分析, 利用贝叶斯分析方法就可以对物态方程进行筛选和约束。

随着探测技术发展, 越来越多中子星宏观性质可以被观测到。LIGO(激光干涉引力波天文台)等对双中子星合并引力波的探测揭开了引力波天文学的序幕。通过对双中子星合并引力波信号的观测, 可以对中子星质量 (M)、半径 (R) 及潮汐形变参数 (Λ) 等性质给出有效约束^[2], 进而再约束中子星物质物态方程。NICER 对单一中子星质量和半径的同时测量也提供了对中子星物质物态方程新的约束^[3-4]。目前已有许多利用中子星观测量对高密度核物质物态方程进行约束的研究。例如, 利用 GW170817 双中子星引力波的探测, 可以对 2 倍饱和核密度处的压强进行约束^[5]; 可以对饱和核密度附近核物质的状态方程进行约束^[6]; 还可以对中子星壳层物质的物态方程进行约束^[7]。研究发现, 中子星最大观测质量倾向于比较硬的物态方程, 排除了低密度段较软的物态方程。而 GW170817 潮汐形变参数观测结果则倾向于较软的物态, 把这两个观测相结合, 可以更进一步约束中子星物质物态方程^[8]。

关联度主要用于衡量一个模型中任意两个参数之间是否互相影响, 关联度高的两个参数之间往往有相同或者相反变化趋势。将各参数之间关联度以矩阵的形式组合在一起形成关联度矩阵, 利用关联度矩阵可以清晰地看出各参数之间的关联性^[9-10]。本文将通过分析潮汐

收稿日期: 2021-03-08; 修改日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11975101); 广东省自然科学基金资助项目 (2020A1515010820)

作者简介: 张靖 (1994-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 从事理论物理研究; E-mail: 201820127552@mail.scut.edu.cn

[†] 通信作者: 文德华, E-mail: wendehua@scut.edu.cn.

形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I) 及 f -模振动频率 (ν) 与物态方程各密度段的关联度矩阵, 探讨中子星不同观测量与物态方程各密度段的关联情况。

在对中子星性质进行研究过程中, 人们提出了许多不同中子星物质物态方程模型, 例如基于微观理论模型的 SLy^[11], APR^[12] 等和基于同位旋依赖参数化模型^[13] 等。利用贝叶斯分析方法需要生成海量物态方程。为了生成海量的物态方程, 同时也便于计算中子星观测量与物态方程不同密度段的关联, 本文采用分段多方物态方程^[14]。分段多方物态方程形式简单, 不需要做大量复杂计算就能够快速生成大量物态方程, 并且这些物态方程能够覆盖大部分微观模型给出的结果。同时利用分段多方物态方程还可以在不同密度段进行变化, 满足我们对不同密度段物态方程进行研究的需求。

本文第 2 部分简要介绍了所采用的多方物态方程, 贝叶斯分析方法及中子星潮汐形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I) 及 f -模振动频率 (ν)。第 3 部分给出了中子星观测量对物态方程的约束, 以及各观测量与物态方程不同密度段之间的关联。最后对本文进行总结。

2 模型介绍

本文使用分段化多方物态 $P = K\rho^\Gamma$ 来描述中子星物质。可以通过改变每一段多方指标 Γ 来生成对应密度段的物态方程。生成的物态方程每一段都具有独立特征, 这有利于我们探究不同密度段物态方程与中子星潮汐形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I) 及 f -模频率 (ν) 之间的关联。我们采用分段化多方物态方程如下:

$$P = \begin{cases} K_0\rho^{\Gamma_0} & 0 < \rho \leq \rho_0 \\ K_1\rho^{\Gamma_1} & \rho_0 < \rho \leq \rho_1 \\ \dots & \dots \\ K_8\rho^{\Gamma_8} & \rho_8 < \rho \leq \rho_9 \\ K_9\rho^{\Gamma_9} & \rho_9 < \rho < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

其中, 系数 $K_0 = 3.053548 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-\Gamma_0}$, 各段终止密度为 $\rho_i = (i + 0.5)\rho_{\text{sat}}$, 第 0 段多方指标先验范围为 $1.32 < \Gamma_0 \leq 1.38$ ^[11], 其他段多方指标先验范围为 $0 < \Gamma_i \leq 8$, 为了使物态方程保持连续, 系数 K 由下式得到

$$K_i = K_{i-1}\rho_{i-1}^{(\Gamma_{i-1}-\Gamma_i)}. \quad (2)$$

在计算之前我们又利用因果律关系 (物态方程声速不超光速)、最大中子星质量观测结果 $M = 2.14M_\odot$ ^[15] 及 GW170817 事件对 $1.4M_\odot$ 中子星潮汐形变参数 $\Lambda_{1.4}$ 的约束^[5] 对物态方程进行了筛选。

贝叶斯分析基本公式

$$P(A|B) = P(B|A) * P(A)/P(B), \quad (3)$$

指出, 如果把 B 当作某个观测量, 其发生概率为 $P(B)$, A 当作某种可能的物态方程, 可能性为 $P(A)$, 则 $P(B|A)$ 就是物态方程 A 对应观测量 B 出现的概率, 通常又称为相似度函数。在本文中 B 取为潮汐形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I)、 f -模频率 (ν)。 A 为某一组参数 $A(\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_9)$ 对应的物态方程, 利用贝叶斯分析就可以得到在观测结果为 B 的情况下, 参数组 A 的概率 $P(A|B)$ 。本文计算中假设物态方程各密度段多方指标在 $0 < \Gamma \leq 8$ 的范围内服从均匀分布。本文使用了基于 (APT-MCMC)^[16] 的马尔可夫蒙特卡罗方法进行贝叶斯分析。

中子星潮汐形变参数 Λ 指在四极潮汐场作用下球形中子星的潮汐形变率, 满足如下公式:

$$\mathcal{Q}_{ij} = -\Lambda\epsilon_{ij}, \quad (4)$$

其中 \mathcal{Q}_{ij} 为诱导四极矩, 即潮汐形变量; ϵ_{ij} 为外部潮汐场。由于中子星的潮汐形变会对双中子星合并过程引力波的波形产生影响, 因此可以通过双中子星引力波的探测来获取潮汐形变参数, 继而再进一步利用潮汐形变参数 (Λ) 约束物态方程。

中子星的半径和转动惯量也是可观测量。理论上, 我们可以通过求解中子星结构方程 (TOV 方程)

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm}{r^2}\rho\left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right)\left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{mc^2}\right)\left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)^{-1}, \quad (5)$$

得到中子星的质量、半径等性质参量。方程中 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, 为万有引力常量; $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, 为光速; r 则表示当前所在点到中子星中心处的径向距离; $m = \int_0^r 4\pi r^2 dr$ 表示半径 r 以内球体的总质量。

中子星 f -模是中子星振动模式的一种, 是由静态中子星受扰动后内部体积元及时空度规变化而产生。中子星 f -模振动可以产生连续的引力波辐射, 携带有丰富的中子星内部结构和物质物态的信息, 是下一代引力波探测器重要的候选探测目标之一。下面简要介绍一下数值计算 f -mode 的基本依据。度规的微扰可以表达为如下形式^[17-18]:

$$ds^2 = -e^\nu(1 + r^l H_0(r) Y_m^l e^{i\omega t}) dt^2 - 2i\omega r^{l+1} H_1(r) Y_m^l e^{i\omega t} dt dr + e^\lambda(1 - r^l H_0(r) Y_m^l e^{i\omega t}) dr^2 + r^2(1 - r^l K(r) Y_m^l e^{i\omega t})(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2), \quad (6)$$

其中 $e^\nu = 1 - 2Gm/(c^2 r)$, $e^\lambda = [1 - 2Gm/(c^2 r)]^{-1}$, 由

球对称星体结构方程求得， ω 表示星体振动的角频率，由于振动会逐渐衰减， ω 一般为复数。流体元的扰动为

$$\xi^r = r^{l-1} e^{-\lambda/2} W(r) Y_m^l e^{i\omega t}, \quad (7)$$

$$\xi^\theta = -r^{l-2} V(r) \partial_\theta Y_m^l e^{i\omega t}, \quad (8)$$

$$\xi^\phi = -r^l (r \sin\theta)^{-2} V(r) \partial_\phi Y_m^l e^{i\omega t}, \quad (9)$$

其中 H_0, H_1, K, W 和 V ，为扰动函数， Y_m^l 为球谐函数，利用线性化爱因斯坦方程

$$\delta G_{\mu\nu} = 8\pi \delta T_{\mu\nu}, \quad (10)$$

和能量守恒方程^[19]

$$\delta(T_{\mu\nu;\mu}) = 0, \quad (11)$$

其中： $G_{\mu\nu}$ 为爱因斯坦张量，可由度规 $g_{\mu\nu}$ 求得； $T_{\mu\nu}$ 为能量动量张量，在理想流体中 $T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu}$ ， u_μ 表示四维速度，可由度规求得；下标 $\mu, \nu \in \{t, x_1, x_2, x_3\}$ 。式中分号“;”表示协变微商。结合边界条件：中子星中心处无奇点，表面压强为 0 并且振动所产生的引力波只有向外的分量，就可以求解中子星 f -模振动频率 (ν) 和衰减时间 (τ)^[20]。本文主要对 f -模振动频率 (ν) 进行分析。

3 计算结果及分析

在对潮汐形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I) 和 f -模的频率 (ν) 进行分析之前，我们先根据中子星的观测以及相关物理条件对物态方程进行筛选。筛选条件包括：满足因果律、物态方程所支持的最大质量大于最大观测质量 $2.14 M_\odot$ 、以及潮汐形变参数 $\Lambda_{1.4} < 800$ 。

采用满足上述约束条件的物态方程，我们计算了质量为 $2.14 M_\odot$ 中子星的中心密度及压强的联合分布，如图 1 所示。从图中可以看出，质量为 $2.14 M_\odot$ 中子星的中心密度主要分布在 $2.3\rho_{\text{sat}} \sim 8\rho_{\text{sat}}$ 之间，对应压强分布在 $10^{34.1} \sim 10^{35}$ Pa 之间。从图 1 还可以看出，对于 $2.14 M_\odot$ 中子星，当中心密度确定的时候，该密度所对应的压强范围约束在图中的高亮区域，即分布在一个较小的区域。同时也可以看出，中心密度值比较大的时候，其对应的压强也相应较高。

上述筛选条件会对分段化多方物态方程的参数产生怎样的约束呢？我们在表 1 中列出了在因果律、最大观测质量及 GW170817 潮汐形变观测约束三个条件共同约束下物态方程多方指标的 90% 可信区间的取值范围。从表中可以看出，经过筛选之后物态方程在密度为

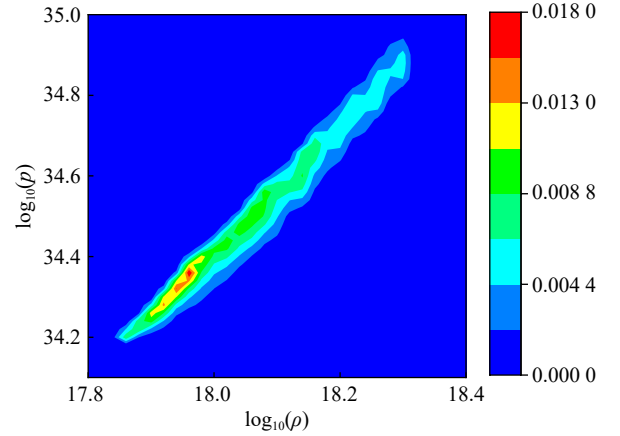


图 1 (在线彩图) 质量为 $2.14 M_\odot$ 的中子星中心密度 ρ 与压强 p 的联合分布

表 1 经过因果律、最大观测质量 $M = 2.14 M_\odot$ 和潮汐形变参数 $\Lambda_{1.4} < 800$ 共同筛选后的物态方程各密度段多方指标 Γ 的 90% 置信度取值范围

序号	物态方程密度范围	多方指标 Γ 取值范围
0	$0 < \rho \leq 0.5 \rho_{\text{sat}}$	$1.32 < \Gamma_0 \leq 1.38$
1	$0.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 1.5 \rho_{\text{sat}}$	$1.1 < \Gamma_1 \leq 4.4$
2	$1.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 2.5 \rho_{\text{sat}}$	$2.3 < \Gamma_2 \leq 7.3$
3	$2.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 3.5 \rho_{\text{sat}}$	$0.9 < \Gamma_3 \leq 5.3$
4	$3.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 4.5 \rho_{\text{sat}}$	$0.4 < \Gamma_4 \leq 3.7$
5	$4.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 5.5 \rho_{\text{sat}}$	$0.3 < \Gamma_5 \leq 2.7$
6	$5.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 6.5 \rho_{\text{sat}}$	$0.1 < \Gamma_6 \leq 2.3$
7	$6.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 7.5 \rho_{\text{sat}}$	$0 < \Gamma_7 \leq 2.2$
8	$7.5 \rho_{\text{sat}} < \rho \leq 8.5 \rho_{\text{sat}}$	$0 < \Gamma_8 \leq 2.1$
9	$8.5 \rho_{\text{sat}} < \rho < +\infty$	$0 < \Gamma_9 \leq 2.5$

$0.5\rho_{\text{sat}} < \rho < 5.5\rho_{\text{sat}}$ 范围内的多方指标 Γ 参数空间上下限都得到了一定的约束，而在 $5.5\rho_{\text{sat}} \sim 8.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段只有上限得到了较好的约束。导致这种结果的主要原因是为了满足最大观测质量和潮汐形变参数 (Λ) 的限制，低密度段的物态方程不能太软。同时为了满足潮汐形变参数 (Λ) 和声速不超光速的限定，物态方程又不能太硬，因此上下限都得到了一定约束。而在 $5.5\rho_{\text{sat}} \sim 8.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段，多方指标的约束主要来源于因果律的约束。如果未来能够精确地观测到更多更大质量的中子星，则可以对该密度段物态方程的多方指标下限进行约束。

利用上述的定性分析可以得到中子星观测量对物态方程各密度段大致的约束。但随着观测量的增加以及观测精度的提升，通过更加精确地探索中子星观测量与物态方程的关联度，进而对物态方程进行约束变得可行。接下来我们将通过关联度矩阵的计算来展示中子星观测量 Λ 、 R 、 I 和 ν 与多方物态各密度段多方指标之间的关联。关联度矩阵定义为^[21]

$$\text{corr}(P_\alpha, P_\beta) = \frac{\text{cov}(P_\alpha, P_\beta)}{\sigma_\alpha \sigma_\beta}, \quad (12)$$

其中 $\text{cov}(P_\alpha, P_\beta)$ 定义为

$$\text{cov}(P_\alpha, P_\beta) = \iint [P_\alpha - \langle P_\alpha \rangle][P_\beta - \langle P_\beta \rangle] \times p(P_\alpha, P_\beta) dP_\alpha dP_\beta, \quad (13)$$

P_α, P_β 代表不同参数 α, β 中选取出的样本, $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ 为样本的标准差, $\langle P_\alpha \rangle, \langle P_\beta \rangle$ 为样本的均值。从式 (13) 可以看出, 关联矩阵的矩阵元主要表示两个参数分布之间是否具有相同或相反的变化趋势, 也就是两个参数之间的关联性。

我们计算了质量为 $1.4M_\odot$ 中子星的 Λ 、 R 、 I 和 ν 与物态方程各密度段多方指标 Γ 的关联度矩阵, 如图 2 所示。图 2 中纵坐标数值对应表 1 中物态方程不同密度段, 从图 2 中可以看出: (1) 潮汐形变参数 (Λ) 和 f -模频率 (ν) 主要与 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$, $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 和 $3.5\rho_{\text{sat}} \sim 4.5\rho_{\text{sat}}$ 三个密度段物态方程有较强的关联性, 因此在约束以上三个密度段物态方程时适合使用潮汐形变参数 (Λ) 和 f -模频率 (ν)。 (2) 半径 (R) 主要与 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 2.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段物态方程有较强相关性。这也与 Lattimer 等 [22] 利用经验公式得到的结果一致。Lattimer 等 [22] 在分析中子星半径与物态方程关系时发现, 质量为 $1 \sim 1.4M_\odot$ 的中子星半径主要与密度为 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 2.0\rho_{\text{sat}}$ 时的压强存在较强关联, 两者之间符合 $R = \text{Constant} \cdot [P(\rho)]^{0.23-0.26}$ 的关系。另外我们还发现半径与 $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段物态方程、壳层物态方程也存在一定关联。 (3) 转动惯量与 $4.5\rho_{\text{sat}}$ 以下各密度段均有一定关联度, 并且与壳层物态有较强关联。需要指出的是, 每一段物态方程都是

9	0.01	0.03	0.12	0.04
8	0.03	0.08	0.05	0.04
7	0.08	0.03	0.04	0.05
6	0.20	0.01	0.14	0.21
5	0.36	0.10	0.27	0.37
4	0.55	0.23	0.47	0.58
3	0.77	0.51	0.69	0.81
2	0.39	0.75	0.73	0.53
1	0.66	0.29	0.56	0.71
0	0.02	0.56	0.77	0.12
	Λ	R	I	ν

图 2 (在线彩图) 质量为 $1.4M_\odot$ 中子星潮汐形变参数 (Λ)、半径 (R)、转动惯量 (I) 及 f -模频率 (ν) 与物态方程不同密度段之间的关联矩阵, 纵坐标数字对应物态方程各密度段

由多方指标 Γ 和系数 K 共同决定。

在中子星观测量的约束下, 多方物态方程各密度段的多方指标参数 Γ 之间是否也存在关联呢? 如果存在关联的话, 就会在一定程度上影响中子星观测参量对物态方程的反向约束。因为有关联的两个密度段的物态方程势必会同时对相关的中子星观测参量都产生影响。图 3 给出了物态方程各密度段多方指标 Γ 之间的关联度。从图中可以看出, 在 $0 \sim 0.5\rho_{\text{sat}}$ 和 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段之间, 以及 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$ 和 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 2.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段之间存在较为明显的关联性。潮汐形变参数 (Λ) 与壳层物态的关联度偏小, 部分原因就是壳层物态与 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段之间的物态方程存在关联。但总体来看, 各密度段之间关联度并不是特别强, 因此这种各密度段之间的物态方程关联只能对观测量与各段物态方程之间的关联度产生有限的影响, 并不会从根本上改变物态方程各密度段与观测量之间的关联。

9	0.00	0.07	-0.01	-0.09	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.09	1.00
8	0.00	0.02	-0.02	-0.01	-0.03	-0.05	-0.07	-0.07	1.00	-0.09
7	-0.01	-0.04	-0.02	0.09	0.04	0.01	-0.02	1.00	-0.07	-0.10
6	-0.01	-0.11	-0.02	0.19	0.12	0.06	1.00	-0.02	-0.07	-0.10
5	-0.01	-0.21	-0.01	0.30	0.21	1.00	0.06	0.01	-0.05	-0.10
4	-0.02	-0.32	-0.01	0.41	1.00	0.21	0.12	0.04	-0.03	-0.10
3	-0.01	-0.45	-0.03	1.00	0.41	0.30	0.19	0.09	-0.01	-0.09
2	0.02	-0.62	1.00	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
1	-0.55	1.00	-0.62	-0.45	-0.32	-0.21	-0.11	-0.04	0.02	0.07
0	1.00	-0.55	0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

图 3 (在线彩图) 物态方程各密度段多方指标 Γ 之间的关联度

前面图 2 只给出了观测量与物态方程不同密度段的关联性强弱, 无法给出潮汐形变参数 (Λ) 对物态方程具体的约束情况。如果观测给出了对潮汐形变十分精确的约束, 潮汐形变参数 (Λ) 会对物态方程产生怎样的约束呢? 我们假定质量为 $1.4M_\odot$ 的中子星取三个精确的潮汐形变参数值: $\Lambda_{1.4} = 200, 300$ 和 400 , 计算了其关联度最高的 $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段多方物态方程参量的约束。图 4 给出了潮汐形变参数 (Λ) 对该密度段物态方程多方指标 Γ_3 的约束。可以看出, 潮汐形变参数 (Λ) 能够对 Γ_3 给出较好的约束。例如在 90% 置信区间内, 如果 $\Lambda_{1.4} = 200$, 可以将 Γ_3 约束到 $5.1^{+0.4}_{-1.8}$ 之间; 如果 $\Lambda_{1.4} = 300$, 可以将 Γ_3 约束到 $3.7^{+0.6}_{-1.0}$ 之间, 如果 $\Lambda_{1.4} = 400$, 则可以将 Γ_3 约束到 $3.1^{+0.6}_{-1.0}$ 之间。

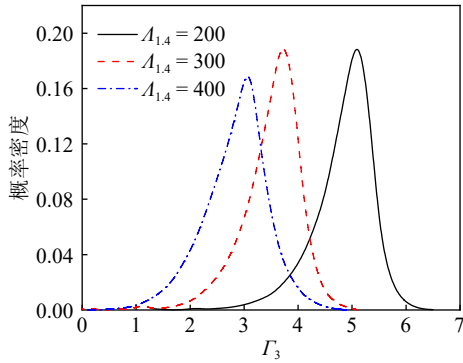


图 4 (在线彩图) 潮汐形变参数 (Λ) 对物态方程多方指标 Γ_3 的约束

4 结论

本文利用分段化多方物态方程, 探索了质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的典型中子星宏观可观测量 Λ 、 R 、 I 和 f -模频率 ν 与物态方程不同密度段之间的关联度。结果表明, 质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的典型中子星潮汐形变参数 (Λ) 和 f -模频率 (ν) 主要与 $0.5\rho_{\text{sat}} \sim 1.5\rho_{\text{sat}}$ 、 $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 和 $3.5\rho_{\text{sat}} \sim 4.5\rho_{\text{sat}}$ 三个密度段物态方程有较强的关联性; 中子星半径 (R) 主要与 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 及壳层物态有较强的关联性; 转动惯量与 $4.5\rho_{\text{sat}}$ 以下各密度段均有一定的关联度。本文通过计算关联度矩阵给出了各观测量与物态方程不同密度段之间的关联度, 为寻找合适的观测量约束不同密度段的物态方程提供了参考。例如在约束 $2.5\rho_{\text{sat}} \sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段物态方程时可以选用潮汐形变参数 (Λ) 或 f -模频率 (ν), 而要约束 $1.5\rho_{\text{sat}} \sim 2.5\rho_{\text{sat}}$ 密度段物态方程时, 中子星半径 (R) 则是更好的选择。

参考文献:

- [1] LI B A, KRASSTEV P G, WEN D H, et al. *European Physical Journal A*, 2019, 55(7): 1.
- [2] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 119(16): 161101.
- [3] MILLER M, LAMB F K, DITTMANN A, et al. *Astrophysical Journal Letters*, 2019, 887(1): L24.
- [4] RILEY T E, WATTS A L, BOGDANOV S, et al. *Astrophysical Journal*, 2019, 887(1): L21.
- [5] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 121(16): 161101.
- [6] MALIK T, ALAM N, FORTIN M, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98(3): 035804.
- [7] PEROT L, CHAMEL N, SOURIE A. *Phys Rev C*, 2020, 101(1): 015806.
- [8] ANNALA E, GORDA T, KURKELA A, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 172703.
- [9] FERREIRA M, PROVIDÊNCIA C M C. *Phys Rev D*, 2020, 102: 103003.
- [10] LI B A, MAGNO M. *Phys Rev C*, 2020, 102: 045807.
- [11] DOUCHIN F, HAENSEL P. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 380(1): 151.
- [12] AKMAL A, PANDHARIPANDE V, RAVENHALL D A. *Phys Rev C*, 1998, 58(3): 1804.
- [13] ZHANG N B, LI B A, XU J. *Astrophysical Journal*, 2018, 859(2): 90.
- [14] READ J S, MARKAKIS C, SHIBATA M, et al. *Phys Rev D*, 2009, 79: 124033.
- [15] CROMARTIE H T, FONSECA E, RANSOM S M, et al. *Nature Astronomy*, 2020, 4(1): 72.
- [16] ZHANG L A, URBANO A, CLERMONT G, et al. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 110: 1.
- [17] LINDBLOM L, DETWEILER S L. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 1983, 53: 73.
- [18] DETWEILER S, LINDBLOM L. *Astrophysical Journal*, 1985, 292: 12.
- [19] KOKKOTAS K D, SCHMIDT B G. *Living Reviews in Relativity*, 1999, 2(1): 2.
- [20] LIOUTAS G, STERGIIOULAS N. *General Relativity and Gravitation*, 2018, 50(1): 12.
- [21] MARGUERON J, CASALI R H, GULMINELLI F. *Phys Rev C*, 2018, 97(2): 025806.
- [22] LATTIMER J M, PRAKASH M. *Physics Reports*, 2000, 333: 121.

Correlation Between Neutron Star Observation and Equation of State of Nuclear Matter at Different Densities

ZHANG Jing, WEN Dehua[†]

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Neutron star matter is mainly composed of asymmetric dense nuclear matter. At present, there is still great uncertainty in the understanding of the high-density asymmetric nuclear matter through the terrestrial experiments, such as the heavy ion collisions. With the improvement of astronomical observation accuracy and the increase of observable measurements of neutron stars, it is possible to reverse constraint the state of high-density nuclear matter based on astronomical observation of neutron stars. Theoretically investigating the correlation between the observable measurements of neutron stars and the equation of states (EOSs) at different density sections will be helpful to the research of the reverse constraints. In this work, by employing the piecewise polytropic EOSs, the observable measurements of the radius(R), tidal deformability(Λ), moment of inertia(I) of the neutron star *etc.* are calculated and analyzed, and the correlations between these observations and each density segment of the EOSs are given. The results show that tidal deformability (Λ) and f -mode frequency (ν) of a canonical neutron star ($M=1.4 M_{\odot}$) are mainly correlated with $0.5\rho_{\text{sat}}\sim 1.5\rho_{\text{sat}}$, $2.5\rho_{\text{sat}}\sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ and $3.5\rho_{\text{sat}}\sim 4.5\rho_{\text{sat}}$ segments of EOSs; the neutron star radius (R) are mainly correlated with $1.5\rho_{\text{sat}}\sim 3.5\rho_{\text{sat}}$ and the crust segments of EOSs; the moment of inertia (I) are mainly correlated with the density below $4.5\rho_{\text{sat}}$ segments of EOSs.

Key words: neutron star; equation of state; bayesian analysis

Received date: 08 Mar. 2021; Revised date: 12 Apr. 2021

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11975101); Guangdong Natural Science Foundation(2020A1515010820)

[†] Corresponding author: WEN Dehua, E-mail: wendehua@scut.edu.cn.