

寻找由奇异夸克物质构成的天体

邹泽城¹, 黄永锋^{1,2,†}, 张晓黎³

(1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;
2. 南京大学现代天文与天体物理教育部重点实验室, 南京 210023;
3. 南京大学物理学院, 南京 210093)

摘要: 由上、下、奇异夸克组成的致密奇异夸克物质可能是强相互作用物质的绝对基态。基于这一奇异夸克物质假说, 脉冲星实际上可能是奇异星。奇异星的质量-半径关系、冷却等观测特征与传统的中子星有所不同, 但当前的天文观测尚不能完全区分二者。奇异星能够驱动快速射电暴和引力波暴。而奇异夸克物质的稳定性更使得行星质量的奇异夸克物质团块, 即奇异行星能够自束缚地稳定存在。奇异行星非常致密, 能够在周期小于 6 100 s 的非常近的轨道上围绕中心天体公转, 而一般物质组成的行星在此距离上则会被潮汐瓦解。因此, 这种密近的系外行星一旦被发现, 便能有力地佐证奇异星的存在。同时, 奇异矮星也能在奇异夸克物质假说下稳定存在。未来的多波段多信使天文观测将能有助于厘清致密物质的真实性质。

关键词: 致密核物质; 奇异星; 快速射电暴; 引力波; 核天体物理

中图分类号: O572

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.QCS2023.05

CSTR: 32260.14.NuclPhysRev.41.QCS2023.05

0 引言

致密星, 此处特指内部由强相互作用物质构成的天体, 与许多天文现象密切相关。它们具有高密度、强引力, 是极端天体物理过程的理想实验室。然而迄今为止, 极高密度(数倍核饱和密度)下强相互作用物质的性质仍然十分不清楚, 因此致密星的内部结构依旧是一个谜, 各种不同的物理模型给出了不同的星体结构^[1-3]。

四十年前, Witten^[4]正式提出了奇异夸克物质假说, 指出由几乎等量的上、下、奇异夸克组成的奇异夸克物质可能才是强相互作用物质的绝对基态^[5-7]。基于这一奇异夸克物质假说, 致密星的内部可能完全由奇异夸克物质构成, 即天文观测到的脉冲星实际上是奇异星^[8-9]。徐仁新等^[10]更提出致密星可能是由奇子构成的奇子星。奇异夸克物质最简单的状态方程可以用唯象的无质量 MIT 口袋模型 $P = (\rho - 4B)/3$ 描述, 其中 P 是压强, ρ 是密度, 而 B 是表示禁闭的口袋常数。可以注意到, 口袋模型允许奇异夸克物质在零压下具有有限大的密度, 这说明奇异夸克物质是自束缚的。因此, 不同质量的奇异天体, 从行星质量的奇异行星到太阳质量的奇异星都

能稳定存在。在“裸”的奇异星的表面附近, 夸克由短程的强相互作用所束缚, 而电子由长程的电磁相互作用所束缚, 所以电子的分布较为弥漫, 从而在奇异星的表面生成高达 $\sim 10^{17} \text{ V cm}^{-1}$ 的电场。这一强电场可以支撑起普通物质构成的壳层^[8], 而壳层最大密度受制于电场与表面重力的机械平衡, 只能达到约五分之一倍中子滴密度^[11-12]。这种带壳层的奇异星的普通物质壳层与奇异夸克物质核之间是通过电场间隙而非相变来间隔, 因此在中心压强较低时星体依然能够稳定存在, 即构成独特的奇异矮星序列^[13-14]。

同样在四十年前, 王青德与陆埏^[15]首次提出扰动在夸克物质中的阻尼比在 π 凝聚物质中更为高效, 这是很早就被提出的可以用于区分奇异星与中子星的判据。目前已经提出了许多经典的区分奇异星与中子星的方法, 但遗憾的是, 在目前的观测条件下, 它们各自具有判断上的模糊性, 而不能很确定地作为明晰的判据。现举例如下:

● 奇异星与中子星有着不相同的质量-半径关系曲线^[4, 16-19]。但这些曲线强烈地依赖于未定的模型参数^[3, 20]。

收稿日期: 2023-11-30; 修改日期: 2024-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12233002, 12041306); 科技部 SKA 专项项目(2020SKA0120300); 国家重点研发计划项目(2021YFA0718500)

作者简介: 邹泽城(1998-), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 从事高能天体物理研究; E-mail: zou.ze-cheng@smail.nju.edu.cn

† 通信作者: 黄永锋, E-mail: hyf@nju.edu.cn

● 奇异星能够自转得较中子星略快些^[21]。但目前尚未发现能证认为奇异星的亚毫秒脉冲星。

● 奇异星的冷却性质与中子星有所不同^[22-26]。但奇异星中可能存在的色味锁定或色超导与中子星中的超流等配对效应使得它们的冷却性质均很不确定^[27]。奇异星的普通物质壳层也会使得其与中子星从冷却上难以区分^[28]。

● 奇异星与中子星的潮汐形变性质不同^[29-31]，因此双星并合时的引力波信号会有所差别^[32-33]。但引力波测量得到的潮汐形变参数具有强简并性，从而难以完全区分不同的状态方程^[34]。

● 奇异星的星震模式与中子星有所不同^[15, 35-38]。但奇异星所特有的核芯—壳层振荡模远远弱于当前和近期未来的引力波探测器的探测极限^[39]。

除上述传统方法外，探索奇异夸克物质天体所具有的独特性或许能够更好地检验奇异夸克物质假说。第1节将简述奇异星所能具有的天体物理爆发现象。第2节将讨论奇异夸克物质天体序列的低中心压强端，即奇异行星(裸的奇异夸克物质天体)和奇异矮星(带壳层的奇异夸克物质天体)。最后是总结现状并展望未来发展。

1 奇异星相关爆发现象

1.1 奇异星与快速射电暴

快速射电暴是来自宇宙学距离上的明亮的窄带射电爆发现象，持续时间往往只有 ms 量级^[40-41]。目前已经发现了接近 700 个快速射电暴源，其中 29 个被证认为重复爆发源，而余下的单次爆发则尚不清楚它们是本征的单次爆发事件还是未被观测到重复的爆发。通过这些观测，已经进行了不少对快速射电暴的统计分析研究^[42-44]，并对快速射电暴的物理机制提出了许多限制。但是直至现在，快速射电暴的起源仍悬而未决。多种不同的模型被提出以解释快速射电暴的观测特征，比如，单次的快速射电暴可能来自致密星与小行星的碰撞^[45-46]，而与之对应的重复快速射电暴则可能源自致密星穿过小行星带产生的多次碰撞^[47-49]。

在奇异星表面，被强电场所支撑的壳层一旦坍塌，会释放出巨大的能量，也可能驱动一次快速射电暴^[50]。在这一模型中，随着奇异星吸积周围环境中的物质，壳层最终将超过电场所能支撑的极限。超重的壳层终将在自由落体时标内完全坍塌，释放出大量的正负电子对。这些高能的正负电子对在极冠区会被加速到相对论性，并沿着磁场快速流出，产生所观测到的快速射电暴。

而如果奇异星是从伴星吸积物质，那么吸积流将沿

磁场流入并堆积在极冠区，最终在极冠区局部的超重会诱使奇异星壳层部分地坍塌，产生一次射电爆发。这次坍塌结束后，奇异星依旧会继续吸积伴星物质，重复上述过程产生重复的快速射电暴^[51]。这一过程受到吸积盘的黏滞调制，从而具有取决于盘时标的周期性(图1)。具体而言，热黏滞不稳定性使得吸积盘在厚盘与薄盘之间来回切换，使得吸积率在活跃态与宁静态之间转换，活跃态时吸积产生多次重复的快速射电暴，宁静态时快速射电暴的活动停滞。观测表明这一模型能很好地解释重复快速射电暴 FRB 20180916 的 16.35 ± 0.15 天周期^[52]。

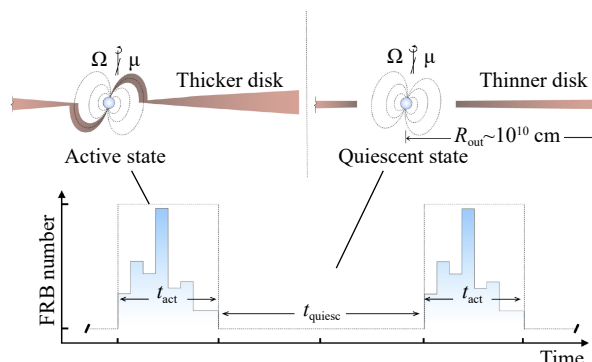


图1 奇异星吸积伴星物质时吸积盘的黏滞调制产生周期性重复快速射电暴^[51]

1.2 奇异星与引力波暴

粗略地说，引力波辐射产生自质量四极矩变化的引力系统，而致密星的强引力场使得它们成为强大的引力波源。普遍认为双致密星的并合与单个致密星的星震是理想的观测目标。

来自双致密星并合的引力波事件 GW170817^[53] 确实体现了引力波探索致密星内部结构的强大能力。引力场对致密星的潮汐作用会使产生的引力波的相位相较于双质点的理想情况有所不同，从而可以通过观测到的引力波相移反向限制致密星的潮汐形变参数^[54]。潮汐形变参数与致密星的结构密切相关，因此原则上可以通过引力波相移推断致密星物质的状态方程。目前已经能够用 GW170817 的观测对奇异星^[55] 和中子星^[54] 的状态方程参数给出一些限制，但是还不足以认定到底哪一个才是真正的星体模型。更为复杂的是，潮汐形变参数与状态方程的其它参数之间存在简并。例如，对某些状态方程而言，它们在 1~1.5 倍核物质饱和和密度范围内的压强相差 3 倍，致密星在中等质量时的半径相差 0.5 km，但是无量纲的潮汐形变参数相差却小于 30——远远不足以被当前的引力波探测器所区分^[34]。

上述对双致密星并合引力波的成功探测使得人们对未来能够探测到来自致密星星震的引力波的可能性寄予

厚望, 虽然目前尚没有证认的事件。对稳定的平衡星体构型进行无限小扰动, 不同的回复力对应产生了不同的星震模。比如说 f 模和 p 模的回复力是压力, 而 g 模的回复力由浮力提供^[56], 所以 f 模反映了致密星的整体性质, 而 g 模则表征致密星内部的密度梯度信息。因此, 对这些星震模式的观测能够反推出致密星的物理性质^[57], 进而由其发射的引力波辐射将这些信息携带出来^[58]。但是利用这些星震模式区分奇异星和中子星仍有其模糊之处。首先, 磁场对星震有巨大的影响^[59], 但是目前致密星内部的磁场构型却不是十分清楚; 其次, 在这种反向推导问题中精确建模比较重要, 而星体模型本身却又有很大的不确定性^[57-58]; 最后, 在完整广义相对论下模拟快转中子星的星震依旧存在困难^[60]。

奇异星的核心与壳层之间并非通过相变连接而是通过电场分隔开来, 因此可以存在一种独特的核心-壳层振荡模式——壳层的重力与支撑它的电场力之间的差作为回复力, 使得奇异星的壳层在与核芯的机械平衡位置附近振荡^[39]。如果被观测到, 这一模式将成为带壳层的奇异星存在的直接证据。但是, 理论计算指出这种振荡模式的引力波辐射非常微弱, 不能被当前和近期未来的引力波探测器所探测到。

以上的方法更多类似于遥感, 即从致密星的外部来推断其内部物质的性质。另一种思路是用就地探测的手段来直接探索致密星的内部情况。当然, 就目前的科技水平而言, 并不能发射宇宙飞船到致密星内部采掘物质来研究。不过, 研究表明行星质量的原初黑洞可以被致密星捕获^[61-62], 进而在致密星内部旋近^①。这一旋近过程可以辐射引力波, 进而被探测到^[63-64]。但是以往的理论计算往往使用了过分简化的动力学^[63]或致密星结构^[64], 使得他们的结论存在缺陷, 甚至在定量上是

完全错误的。

通过使用准确的后牛顿动力学与真实的状态方程, 我们发现行星质量原初黑洞在致密星内部旋近的动力学特征与致密星的结构密切相关, 而且能够被辐射的引力波所揭示(图2)^[65]。下一代引力波探测器能够探测到约一兆秒差距内的 $10^{-5} M_{\odot}$ 原初黑洞的信号, 而对于木星质量的原初黑洞, 探测范围可达百兆秒差距。因此, 在致密星内部旋近的原初黑洞能够作为探索致密星结构、致密物质状态方程的有效探针。

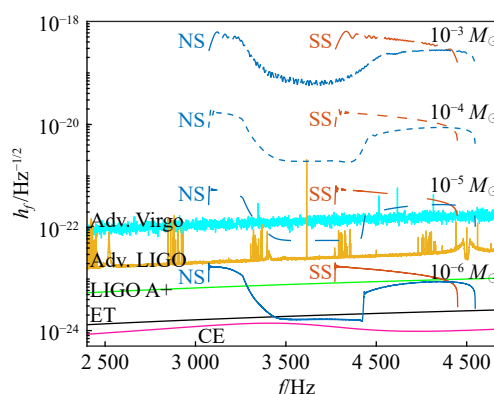


图2 在 1 kpc 处的行星质量原初黑洞在奇异星与中子星内部旋近时产生的引力波的谱应变振幅^[65]

利用我们的完整动力学方程, 还可以计算出各种质量的原初黑洞在不同类别的致密星内部旋近的具体轨迹。图3中绘制了质量为 $10^{-3} M_{\odot}$ 的原初黑洞初始时以开普勒速度在 1.4 倍太阳质量的奇异星(左图)和中子星(右图)表面沿赤道运动, 随后逐渐旋近的轨迹。此处用口袋模型描述奇异星, 而用 BSk 24 状态方程^[1]描述中子星。由于奇异星内部的密度和声速在不同半径处差别较小, 原初黑洞每一圈轨迹之间的间隔较为均匀; 而与之相比, BSk 24 状态方程里中子星壳层与核芯的密度差

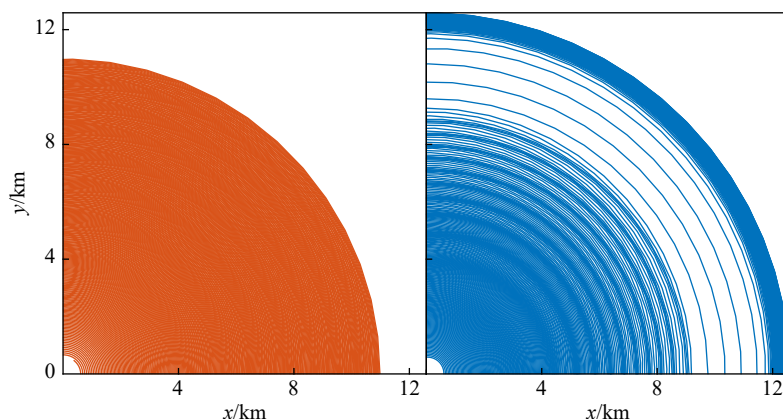


图3 (在线彩图) 质量为 $10^{-3} M_{\odot}$ 的原初黑洞在奇异星(左图)和中子星(右图)内部旋近的轨迹。为了清楚起见, 本图的两个子图均只展示了一个象限内的轨迹

①这一情形最初被提出是用于通过致密星的存活来限制原初黑洞占暗物质的组分^[61]。

别很大,且声速沿半径非单调变化,因此原初黑洞的轨迹开始时十分密集,随后变得很稀疏,最后再逐渐密集起来。这些区别不仅揭示了文献[65]中结果的成因,更进一步表明可以用原初黑洞在致密星内部旋近的不同轨迹特征区分不同的致密星结构。

2 奇异行星与奇异矮星的搜寻

正如前文中反复强调,在质量-半径关系序列上的高中心压强端,奇异星与中子星很难区分。一方面,在一到两倍太阳质量附近,奇异夸克物质状态方程与常见中子星状态方程对致密星半径的预言相当接近,而状态方程中参数的不确定性更能抹掉余下的差别,并且它们与观测都符合得较好[16, 27]。另一方面,尽管裸的奇异星表面强电场驱动的强烈正负电子对风与奇异夸克物质快速冷却的热辐射能够与中子星的表面性质所区别[66–68],但质量较大的奇异星在诞生后会从周围环境中自然而然地吸积物质,形成普通物质构成的壳层[8, 11–12],因此带壳层的奇异星和中子星的表面性质也非常相似[28, 67]。

着眼于质量-半径关系序列上的低中心压强端能够更好地克服这些困难。对于裸的奇异夸克物质天体而言,自束缚性使得行星质量的奇异夸克物质团块,即奇异行星能够稳定存在。与之相对,通常中子星物质的状态方程一般不能允许质量低于约0.1倍太阳质量的中子星稳定存在[69–71]。

考虑简单的无质量MIT口袋模型 $P = (\rho - 4B)/3$,令 $P \rightarrow 0$,得到有限的密度 $\rho \rightarrow 4B$ 。在合理的天体物理参数下,奇异行星的密度高达 $\rho \sim 4 \times 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,远远高于普通物质构成的正常行星所能达到的最大密度。一颗围绕致密星公转的行星不能离致密星过于近,因为它会在潮汐瓦解半径

$$r_{\text{td}} \approx 5.1 \times 10^{10} \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho}{10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ cm} \quad (1)$$

处被致密星强大的引力场所瓦解。而对于奇异行星,潮汐瓦解半径 $r_{\text{td}} \approx 2.37 \times 10^6 \text{ cm}$ 非常接近于公转中心致密星的直径[72]。因此,如果观测发现一颗行星围绕致密星以轨道半径小于 $5.1 \times 10^{10} \text{ cm}$ 公转,即轨道周期 $T < 6100 \text{ s}$,那么它绝不可能是普通的行星,而必定是奇异行星[73]! 根据这一判据,系外行星PSR J1719-14 b很有可能是一颗奇异行星。对主星PSR J1719-14精确的脉冲星计时的结果表明PSR J1719-14 b约为木星质量,而密度却至少为 $23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。这一密度远远大于类木气态巨行星的典型密度($< 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) [74]。不过,由于仍然不是足够密近,除了奇异行星以外,PSR J1719-14 b也

有可能是一颗极小质量的氦或碳氧白矮星[75]。系统性地围绕脉冲星与白矮星公转的系外行星中搜寻奇异行星,找到脉冲星行星XTE J1807-294 b、XTE J1751-305 b、PSR 0636 b、PSR J14807-2459A b是奇异行星的候选体,而脉冲星行星PSR J1719-14 b、PSR J2051-0827 b与白矮星行星GP Com b、V396 Hya b、J1433 b、WD 0137-349 b、SDSS J1411+2009 b是奇异行星的潜在候选体[76]。

通常而言,围绕脉冲星公转的系外行星往往是通过脉冲星计时的方法发现的。脉冲星计时法对轨道周期更长的系外行星更敏感[73, 77]。与之相对,轨道周期越短的系外行星却越可能是奇异行星。这一矛盾促使人们考虑其它探测这种特殊行星系统的手段。由于非常小的潮汐瓦解半径,奇异行星可以旋近到离中心天体很近的距离上,从而发出很强的引力波辐射[78–80]。目前的引力波探测器能够探测到银河系内的地球质量奇异行星与致密星并合的信号,而下一代引力波探测器甚至能将探测极限拓展到兆秒差距量级(图4)。

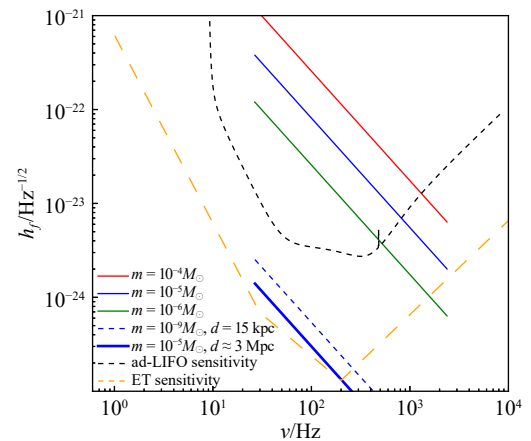


图4 (在线彩图) 奇异行星与奇异星并合产生的引力波的谱应变振幅[78]

在这种非常密近的旋近轨道上,奇异行星与中心天体之间引力以外的相互作用可能会比较重要,从而给匹配引力波波形模板带来困难。比如说,一旦奇异行星已经处在中心天体的光速圆柱半径以内,由于它在中心天体的磁层内切割磁力线耗散轨道能量,二者的并合会加快,辐射引力波的相位会提前[80]。为了判断磁场相互作用在怎样的情况下比较重要,图5中绘制了不同质量的奇异行星绕1.4倍太阳质量的磁陀星公转时在各引力波频率处磁场相互作用与引力波辐射的能量耗散率之比。图中磁陀星的表面磁场为典型的 10^{15} G 。可以注意到,奇异行星质量越小,磁场相互作用的能量耗散相对于引力波辐射越重要。而且随着奇异行星旋近,引力波频率上升,磁场相互作用的能量耗散率相对于引力波辐射功

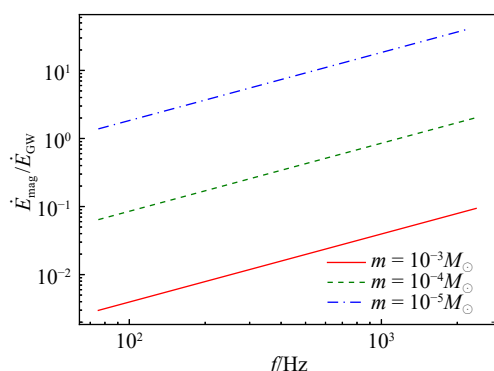


图 5 (在线彩图) 质量为 $10^{-5} M_{\odot}$ (点划线)、 $10^{-4} M_{\odot}$ (点线) 和 $10^{-3} M_{\odot}$ (实线) 的奇异行星绕典型磁陀星公转时不同引力波频率阶段磁场相互作用与引力波辐射的能量耗散率之比

率之比也逐渐增高。这说明对于中小质量的奇异行星，尤其是在旋近晚期，考虑它们与中心天体的磁场相互作用是非常重要的，否则可能会误导引力波波形模板的匹配。

带有普通物质壳层的奇异夸克天体的质量-半径关系相较于裸的奇异星(奇异行星)序列，尽管在高中心压强端的表现类似(此时壳层的厚度与质量相较于奇异夸克物质核芯的半径与质量几乎可以忽略不计^[12])，但在低中心压强端有极为显著的差别。在低中心压强端，裸的奇异行星的密度几乎恒定为 $\rho \sim 4 \times 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，故其质量正比于半径的立方。而此时，在带壳层的奇异星中，沿着中心压强减小的方向，普通物质壳层对星体质量的贡献逐渐增加^[12]。在质量-半径关系曲线(图 6)上，便是从左上端点向下移动，直到这一序列的质量极小处(a 点)。对于普通的中子星而言，中心压强更小的星体构型，即质量极小处右侧的序列根据传统的 BTM 判据^[81]是不能稳定存在的^[82]。然而，对于带壳层的奇异夸克天体而言，a 点右侧一直到终点 c 点的序列都是稳定的，这是因为奇异夸克核芯的存在稳定了这些星体构型^[13-14, 83-84]。这一系列特殊的奇异夸克天体被称为奇异矮星。

从稳定性上而言，奇异矮星是奇异物质假说中特有的天体，因此证认奇异矮星的存在能够确信地证明奇异物质假说。从图 6 中可以发现，奇异矮星比同等质量的白矮星半径更小。这一致密性判据，可以用于在白矮星样本中辨别潜在的奇异矮星。系统性地，在蒙特利尔白矮星数据库^②中搜寻奇异矮星，找到 LSPM J0815+1633、LP 240-30、BD+20 5125B、LP 462-12、WD J1257+5428、2MASS J13453297+4200437、SDSS J085557.46+053524.5 是奇异矮星候选体，它们的半径显著地比同质量的白矮星要小^[85]。

② <https://www.montrealwhitedwarfdatabase.org/>

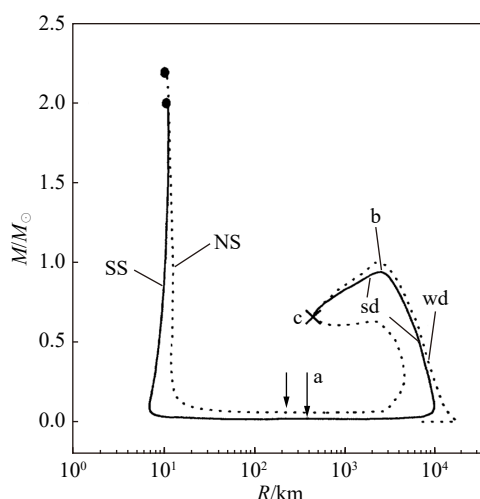


图 6 带壳层的奇异星(SS)、奇异矮星(sd)和普通中子星(NS)、白矮星(wd)的质量-半径关系曲线^[13]

正如双白矮星并合事件能够被未来的引力波探测器所观测到^[86]，奇异矮星的并合事件也能产生可观测的引力波信号。内部结构的差异使得奇异矮星拥有与白矮星不同的潮汐形变参数，因此未来的引力波探测将有助于区分并合的奇异矮星与白矮星，进而对奇异物质假说进行检验^[87-88]。

3 总结与展望

致密物质的状态方程是核天体物理研究的重要课题，而它们构成的致密星由于其丰富的天文现象更是天体物理研究的前沿。基于奇异夸克物质假说，奇异夸克物质才是强相互作用物质的真正基态，而观测到的脉冲星的物理实质则是奇异星而非传统意义上的中子星。然而，一般的观测现象很难区分奇异星与中子星。因此，通过奇异夸克物质天体有别于普通天体的独特性质特征或许能更好地检验奇异夸克物质假说。奇异星的壳层坍塌能够驱动快速射电暴，而双奇异星并合与单个奇异星的星震都能产生引力波辐射。在质量-半径关系序列上的低中心压强端，奇异物质假说预言了特殊的奇异行星和奇异矮星的存在，而目前的大样本搜索已经确认了一些奇异行星和奇异矮星的候选体。未来通过引力波对奇异行星与奇异星的并合事件的观测将成为检验奇异夸克物质假说的独特手段。在观测上，这将表现为密近的行星质量天体与太阳质量天体的并合。如果仅通过并合前旋近的引力波信号，可能还无法判断行星质量天体是奇异行星还是原初黑洞；不过并合前的旋近阶段结束后，奇异行星会直接与奇异星并合而产生引力波的铃宕，而原初黑洞则会进一步在致密星内部旋近，发出携带有致密星

内部结构信息的引力波辐射。

当下核物理实验与理论计算仍然难以决定强相互作用物质的真正基态^[1-3]。由于夸克禁闭现象，如果夸克物质的平均每重子能量比强子物质高的话，夸克物质核芯的表面理应发生强子化生成强子物质壳层，这一壳层通过相变与夸克物质衔接^[89]。在此情形下纯夸克星的存在是存疑的，而这种“混杂星”的结构也与奇异星不同——后者的普通物质壳层通过强电场而非相变与夸克物质核芯所间隔。遗憾的是，目前的理论手段很难自洽地同时完整处理强子物质、夸克物质以及之间的相变^[1-3, 89]。究竟夸克物质如何在致密星内部出现仍然有待进一步探索。

目前的观测仍不能对上述情形下定论。我们希望未来的射电探测能够关注密近行星对脉冲星计时的影响，同时通过多波段观测对给出的奇行星和奇异矮星候选体进行进一步的研究。下一代望远镜与引力波探测器有望为奇异夸克物质假说这一物理基本问题的研究提供帮助。

参考文献：

- [1] WEBER F. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2005, 54(1): 193.
- [2] WEBER F, HO A, NEGREIROS R P, et al. *International Journal of Modern Physics D*, 2007, 16(2-03): 231.
- [3] HAENSEL P, POTEKHIN A Y, YAKOVLEV D G. *Neutron Stars I: Equation of State and Structure*[M]. New York: Springer, 2007: 12.
- [4] WITTEN E. *Phys Rev D*, 1984, 30(2): 272.
- [5] BODMER A R. *Phys Rev D*, 1971, 4(6): 1601.
- [6] FARHI E, JAFFE R L. *Phys Rev D*, 1984, 30(11): 2379.
- [7] TERAZAWA H. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1989, 58(10): 3555.
- [8] ALCOCK C, FARHI E, OLINTO A. *The Astrophysical Journal*, 1986, 310: 261.
- [9] HAENSEL P, ZDUNIK J L, SCHAEFER R. *Astronomy and Astrophysics*, 1986, 160(1): 121.
- [10] XIAOYU L, RENXIN X. *Strangeon and Strangeon Star*[C/OL]// *Journal of Physics Conference Series: volume 861 Journal of Physics Conference Series*. 2017: 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/861/1/012027.
- [11] HUANG Y F, LU T. *Chin Phys Lett*, 1997, 14(4): 314.
- [12] HUANG Y F, LU T. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, 325: 189.
- [13] GLENDENNING N K, KETTNER C, WEBER F. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(18): 3519.
- [14] GLENDENNING N K, KETTNER C, WEBER F. *The Astrophysical Journal*, 1995, 450: 253.
- [15] WANG Q D, LU T. *Phys Lett B*, 1984, 148(1-3): 211.
- [16] ÖZEL F, FREIRE P. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2016, 54: 401.
- [17] ANNALA E, GORDA T, KURKELA A, et al. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 907.
- [18] YUAN W L, LI A, MIAO Z, et al. *Phys Rev D*, 2022, 105(12): 123004.
- [19] YANG S, PI C, ZHENG X, et al. *Universe*, 2023, 9(5): 202.
- [20] DU Yilun, LI Chengming, SHI Chao, et al. *Nuclear Techniques*, 2023, 46(4): 040009. (in Chinese)
(杜轶伦, 李程明, 史潮, 等. *核技术*, 2023, 46(4): 040009.)
- [21] FRIEMAN J A, OLINTO A V. *Nature*, 1989, 341(6243): 633.
- [22] PIZZOCHERO P M. *Phys Rev Lett*, 1991, 66(19): 2425.
- [23] YUAN Y F, ZHANG J L. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, 335: 969.
- [24] YUAN Y F, ZHANG J L. *Astronomy and Astrophysics*, 1999, 344: 371.
- [25] ZHOU X, WANG L, ZHOU A. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, 119(862): 1367.
- [26] POTEKHIN A Y, ZYUZIN D A, YAKOVLEV D G, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 496(4): 5052.
- [27] SAGUN V, GIANGRANDI E, DIETRICH T, et al. *The Astrophysical Journal*, 2023, 958(1): 49.
- [28] ALFORD M G, HAN S, SCHWENZER K. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2019, 46(11): 114001.
- [29] POSTNIKOV S, PRAKASH M, LATTIMER J M. *Phys Rev D*, 2010, 82(2): 024016.
- [30] LI C M, ZUO S Y, YAN Y, et al. *Phys Rev D*, 2020, 101(6): 063023.
- [31] SU L Q, SHI C, HUANG Y F, et al. *Phys Rev D*, 2021, 103(9): 094037.
- [32] BAUSWEIN A, OECHSLIN R, JANKA H T. *Phys Rev D*, 2010, 81(2): 024012.
- [33] ZHOU E, KIUCHI K, SHIBATA M, et al. *Phys Rev D*, 2022, 106(10): 103030.
- [34] RAITHEL C A, MOST E R. *Phys Rev D*, 2023, 108(2): 023010.
- [35] YIP C W, CHU M C, LEUNG P T. *The Astrophysical Journal*, 1999, 513(2): 849.
- [36] ANDERSSON N, JONES D I, KOKKOTAS K D. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 337(4): 1224.
- [37] CHUGUNOV A I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 371(1): 363.
- [38] STAYKOV K V, DONEVA D D, YAZADJIEV S S, et al. *Phys Rev D*, 2015, 92(4): 043009.
- [39] ZOU Z C, HUANG Y F, ZHANG X L. *Universe*, 2022, 8(9): 442.
- [40] LORIMER D R, BAILES M, MCLAUGHLIN M A, et al. *Science*, 2007, 318(5851): 777.
- [41] THORNTON D, STAPPERS B, BAILES M, et al. *Science*, 2013, 341(6141): 53.
- [42] LI L B, HUANG Y F, ZHANG Z B, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, 17(1): 6.
- [43] LI X J, DONG X F, ZHANG Z B, et al. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(2): 230.
- [44] HU C R, HUANG Y F. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, 269(1): 17.
- [45] GENG J J, HUANG Y F. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(1): 24.
- [46] GENG J J, LI B, LI L B, et al. *The Astrophysical Journal*, 2020, 898(2): L55.

- [47] DAI Z G, WANG J S, WU X F, et al. *The Astrophysical Journal*, 2016, 829(1): 27.
- [48] KURBAN A, HUANG Y F, GENG J J, et al. *The Astrophysical Journal*, 2022, 928(1): 94.
- [49] NURMAMAT N, HUANG Y F, GENG J J, et al. arXiv: 2211.12026.
- [50] ZHANG Y, GENG J J, HUANG Y F. *The Astrophysical Journal*, 2018, 858(2): 88.
- [51] GENG J, LI B, HUANG Y. *The Innovation*, 2021, 2: 100152.
- [52] AMIRI M, ANDERSEN B C, BANDURA K M, et al. *Nature*, 2020, 582(7812): 351.
- [53] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 119(16): 161101.
- [54] GUERRA CHAVES A, HINDERER T. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2019, 46(12): 123002.
- [55] ZHOU E P, ZHOU X, LI A. *Phys Rev D*, 2018, 97(8): 083015.
- [56] KOKKOTAS K D, SCHMIDT B G. *Living Reviews in Relativity*, 1999, 2(1): 2.
- [57] KOKKOTAS K D, APOSTOLATOS T A, ANDERSSON N. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 320(3): 307.
- [58] ANDERSSON N. *Universe*, 2021, 7(4): 97.
- [59] SULLIVAN A G, ALVES L M B, MÁRKA Z, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023(9): 262083734.
- [60] KRÜGER C J, KOKKOTAS K D, MANOHARAN P, et al. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2021, 8: 166.
- [61] CAPELA F, PSIRKOV M, TINYAKOV P. *Phys Rev D*, 2013, 87(12): 123524.
- [62] PANI P, LOEB A. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2014, 2014(6): 026.
- [63] HOROWITZ C J, REDDY S. *Phys Rev Lett*, 2019, 122(7): 071102.
- [64] GÉNOLINI Y, SERPICO P D, TINYAKOV P. *Phys Rev D*, 2020, 102(8): 083004.
- [65] ZOU Z C, HUANG Y F. *The Astrophysical Journal*, 2022, 928(2): L13.
- [66] USOV V V. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(2): 230.
- [67] XU R X, QIAO G J, ZHANG B. *The Astrophysical Journal*, 1999, 522(2): L109.
- [68] AKSENOV A G, MILGROM M, USOV V V. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2003, 343(3): L69.
- [69] BLINNIKOV S I, NOVIKOV I D, PEREVODCHIKOVA T V, et al. *Soviet Astronomy Letters*, 1984, 10: 177.
- [70] BLINNIKOV S I, IMSHENNIK V S, NADEZHIN D K, et al. *Astronomicheskii Zhurnal*, 1990, 67: 1181.
- [71] YIP C M, CHU M C, LEUNG S C, et al. *The Astrophysical Journal*, 2023, 956(2): 115.
- [72] WANG X, HUANG Y F, LI B. Searching for Strange Quark Planets[C/OL]//RUFFINI R, VERESHCHAGIN G. The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting. On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity. Singapore: World Scientific, 2023: 3118.
- [73] HUANG Y F, YU Y B. *The Astrophysical Journal*, 2017, 848(2): 115.
- [74] BAILES M, BATES S D, BHALERAO V, et al. *Science*, 2011, 333(6050): 1717.
- [75] HORVATH J E. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(7): 813.
- [76] KURBAN A, GENG J J, HUANG Y F, et al. *The Astrophysical Journal*, 2020, 890(1): 41.
- [77] PERRYMAN M. *The Exoplanet Handbook*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 103.
- [78] GENG J J, HUANG Y F, LU T. *The Astrophysical Journal*, 2015, 804(1): 21.
- [79] KURBAN A, GENG J J, HUANG Y F. GW Emission from Merging Strange Quark Star-strange Quark Planet Systems[C/OL]//LI A, LI B A, XU F. American Institute of Physics Conference Series: volume 2127 Xiamen-CUSTIPEN Workshop on the Equation of State of Dense Neutron-Rich Matter in the Era of Gravitational Wave Astronomy. New York: AIP Publishing, 2019: 020027.
- [80] ZHANG X L, ZOU Z C, HUANG Y F, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 531(4): 3905.
- [81] BARDEEN J M, THORNE K S, MELTZER D W. *The Astrophysical Journal*, 1966, 145: 505.
- [82] ALFORD M G, HARRIS S P, SACHDEVA P S. *The Astrophysical Journal*, 2017, 847(2): 109.
- [83] DI CLEMENTE F, DRAGO A, CHAR P, et al. *Astronomy and Astrophysics*, 2023, 678: L1.
- [84] GONÇALVES V P, JIMÉNEZ J C, LAZZARI L. *European Physical Journal A*, 2023, 59(11): 251.
- [85] KURBAN A, HUANG Y F, GENG J J, et al. *Phys Lett B*, 2022, 832: 137204.
- [86] ZOU Z C, ZHOU X L, HUANG Y F. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(9): 137.
- [87] WANG X, KURBAN A, GENG J J, et al. *Phys Rev D*, 2021, 104(12): 123028.
- [88] PEROT L, CHAMEL N, VALLET P. *Phys Rev D*, 2023, 107(10): 103004.
- [89] ZHANG X L, HUANG Y F, ZOU Z C. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2024, 11: 1409463.

Searching for Strange Quark Objects

ZOU Zecheng¹, HUANG Yongfeng^{1,2,†}, ZHANG Xiaoli³

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, China;

3. Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Dense strange quark matter (SQM) composed of up, down, and strange quarks may be the absolute ground state of strong-interaction matter. Based on this SQM hypothesis, pulsars may actually be strange stars. Strange stars are different from conventional neutron stars in features such as mass-radius relationship and cooling rate, but current astronomical observations cannot discriminate between them unambiguously yet. Strange stars can power fast radio bursts and gravitational-wave bursts. The ultimate stability of SQM enables self-bound planetary-mass SQM clumps, *i.e.* strange planets, to exist stably. A strange planet, being very dense, can revolve around a central object in a very close orbit with a period shorter than 6 100 s. By contrast, a planet made up of normal matter shall be tidally disrupted at such a short distance. Therefore, these close-in planetary systems would strongly evidence the existence of strange planets once they were discovered. Moreover, strange dwarfs can stably exist under the SQM hypothesis. Future multiwavelength and multimessenger astronomical observations may help clarify the nature of dense matter.

Key words: dense nuclear matter; strange star; fast radio burst; gravitational wave; nuclear astrophysics

Received date: 30 Nov. 2023; **Revised date:** 23 Jun. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12233002, 12041306); National SKA Program of China (2020SKA0120300); National Key R&D Program of China (2021YFA0718500)

† Corresponding author: HUANG Yongfeng, E-mail: hyf@nju.edu.cn