

中子星内部结构*

来小禹¹ 徐仁新^{2,†}

(1 湖北第二师范学院 物理与机电工程学院 武汉 430205)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

2019-07-19收到

† email: r.x.xu@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190902

The inner structure of neutron stars

LAI Xiao-Yu¹ XU Ren-Xin^{2,†}

(1 School of Physics and Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 中子星是宇宙中一类极端致密的天体，其平均密度超过饱和核物质密度。对这类天体的研究，可以帮助人们了解极端条件下的物理性质，特别是深化关于引力和强力的认识。文章介绍了脉冲星和中子星的概念，并重点阐述了中子星内部结构的不同模型，以及如何通过最大质量和潮汐形变量等观测来检验这些模型。未来发现更多的双中子星并合或中子星黑洞并合事件，有望最终揭开中子星内部结构之谜。

关键词 中子星，脉冲星，引力波，致密物态，伽马射线暴

Abstract Neutron stars are extremely compact objects with an average density higher than that of the saturate nuclear matter. Exploring the nature of such objects can help us to understand physics under extreme conditions, especially the gravitational and strong forces. This paper introduces the concepts of pulsars and neutron stars, as well as various models of the interior structure of the latter. More importantly, we shall show how to test such models observationally by determining various properties related to the equation of state, such as the maximum mass and tidal deformability. Detecting further merger events of binary neutron stars and/or neutron star-black hole binaries will certainly help to unveil the inner structure of neutron stars.

Keywords neutron star, pulsar, gravitational wave, equation of state of dense matter, gamma-ray burst

1 历史回顾

19世纪末、20世纪初，人们逐渐认识到：原子并非不可分割，而是由集中几乎所有质量且带正电的“核”及核外电子组成。1926年，著名统计物理学家福勒撰文推测：仅受原子核和电子体积所限，密度高达 10^{14} g/cm³以上的致密物质是有可能存在的。他还指出白矮星以电子气简并压为主抵抗自身的引力。1930年代初，钱德拉塞卡考虑到电子气的相对论能动量关系后发现：白矮星

质量过大、自身引力太强时，电子简并压将不能平衡引力；即白矮星存在极限质量(后称为“钱德拉塞卡极限”)。

在这一大背景下，朗道思考这样一个问题：若星体自身引力太强而不可避免地收缩，以致原子核逐渐靠近并最终连成一片(他形象地称之为“巨核”)，会发生什么？鉴于密度越来越高时电子费米能迅速增长，朗道认为电子跟质子“紧密”地集成一种中性的粒子时系统才会较为稳定^[1]，其后不久查德威克于同年宣布发现“中

* 国家自然科学基金(U1831104, 11673002)资助项目

子”^[2]。朗道这一“具有中子物质核心的恒星”的想法后来逐渐发展成为各式各样的“中子星”模型。1934年，巴德和兹维基^[3]指出超新星爆发之后可能残留中子星。1967年，休伊什的博士生贝尔发现了第一颗射电脉冲星^[4]，而人们很快就意识到它应该是理论上推测已久的中子星。之后，关于中子星的内部组成和辐射性质等方面的研究迅速展开，与中子星相关的天体物理研究也逐渐成为天文学的热点。

然而有一点值得反思：1930年代初人们认为包括质子、中子在内的粒子是基本的，而后来却发现它们其实由更基本的夸克所组成；以那时的学识为基础而构建的中子星模型能经得起时代的推敲吗？随着不断地深入认识物质结构，特别是20世纪60年代建立了强子结构的夸克模型，人们开始怀疑中子星的主要成分可能并非中子，甚至可能是夸克或者其他更奇特的粒子。望文而释义，认为中子星主要由中子构成，乃过于简化。虽然如此，但考虑到“中子星”这一称呼在人们认知过程中已经先入为主了，故而在不是特别强调星体内部结构的具体模型时，人们依然沿用“中子星”这个名字来泛指超新星爆发之后残留的脉冲星类致密天体。

中子星的内部结构本质上依赖于夸克及其间的强相互作用。尽管人们已经建立了描述强作用的基本理论，即量子色动力学(QCD)，其高能渐近自由特征亦受到实验的精确检验，但是低能QCD的非微扰行为至今乃是一大挑战。类似于原子核，中子星物质的性质决定于QCD丰富的低能非微扰效应，且尚不能依据第一性原理的计算完全刻画。值得庆幸的是，引力波天文学窗口的打开，特别是双中子星并合事件GW170817的发现及其多信使观测，为人类最终彻底澄清中子星内部结构之谜带来了希望。

2 观测表现

主序恒星依靠自身内部核聚变产生的热压力来抵抗引力，从而维持相对平衡状态。当核能耗

尽、平衡被打破，恒星最终演化为几种不同状态，而中子星就是恒星演化的产物之一。这样形成的中子星的质量一般在1到2倍太阳质量之间，平均密度略大于2倍饱和核物质密度 $\rho_0 \approx 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ，而半径只有十几公里。

新生中子星的自转周期一般约十毫秒，之后由于磁偶极辐射等因素损失自转能而使得周期逐渐增加。因此，观测上一般都能给出一颗中子星的自转周期 P 及其时间导数 dP/dt (图1)。已知的大多数中子星的自转周期集中在0.1 s到1 s左右，而有些中子星的自转周期只有几毫秒。另外，中子星还具有很强的磁场，典型值为 10^{12} G 。一般认为是塌缩过程中的角动量守恒和磁通量守恒等因素导致中子星的快速自转和强磁场。

目前已知的大多数中子星在观测上都表现为脉冲星(图1)。脉冲星的字面意思即持续发出脉冲信号的星体，并且这种脉冲信号处于射电波段，所以也称为射电脉冲星。人们用射电望远镜观测脉冲星时，看到的是间隔规则的射电脉冲信号。周期性脉冲信号来自脉冲星的自转。脉冲星的自转轴与磁轴不一致——这一情形类似地球，存在磁倾角——而射电辐射沿着磁极附近的磁力线连续地发射出来，所以随着脉冲星的自转，它发出的射电辐射在宇宙中持续地扫过一片区域。如果

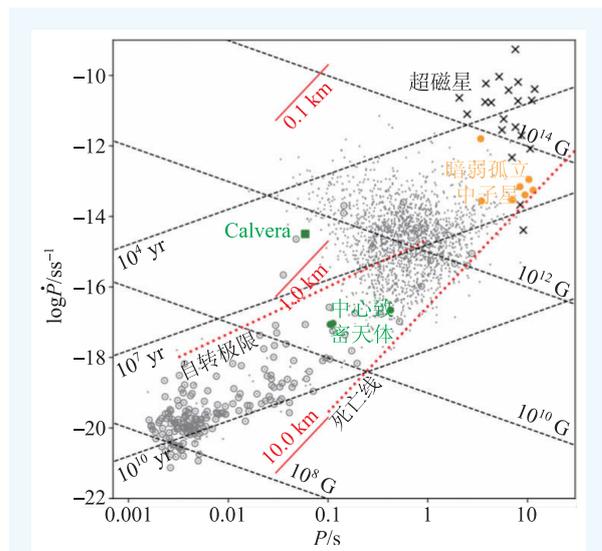


图1 各类脉冲星自转周期及其时间导数^[5]。图中黑点是脉冲星，圆圈表示在双星系统中

地球恰好位于这一区域中，人们就能接收到间隔规则的射电信号，这一间隔就是星体的自转周期。正是这一原因，脉冲星又被称作“宇宙灯塔”。

当然，并不是所有的中子星都表现为射电脉冲星。当星体的自转周期较大(一般认为此时中子星年龄较老)或者磁场较弱时就不能发出射电辐射了。因此一般也将中子星称为“脉冲星类天体”，它们在观测上可表现为射电脉冲星、X射线脉冲星、超磁星、暗弱孤立中子星(XDIN)、中心致密天体(CCOs)等(图1)。

3 可能的中子星内部结构

虽然人们对脉冲星类天体的观测已经有了多方面的认识，也积累了大量的观测数据，但是它们的内部结构目前依然是颇具争议的话题。尽管用“中子星”一词泛指，但其内部成分其实并非简单的中子气。中子星平均密度跟原子核相当。鉴于对低能强相互作用非微扰特性认识的不足，人们至今还很难依据QCD完整地计算出中子星内部物质状态及整体结构。一些基本问题尚未澄清：夸克可否解禁？奇异数是否起关键作用？因而，学者们从各自不同的角度推测出了多种中子星结构模型(图2)。

强子星(hadron star)内部无游离夸克，而中心密度足够高时会形成具有夸克物质核心的混合/混杂星(hybrid/mixed star)。几乎完全由夸克物质构成的致密星称为夸克星(quark star)。以奇子(strangeon)为基本单元构成的奇子星有别于通常

的中子星和夸克星。强子星和混合/混杂星是引力束缚的，这两类致密星都拥有由原子核和电子等组成的壳层(crust)，而夸克星和奇子星的表面是强作用自束缚的，原则上可以不具有壳层。表面直接裸露的夸克(奇子)星称为裸夸克(奇子)星。对以上模型的进一步阐述如下。

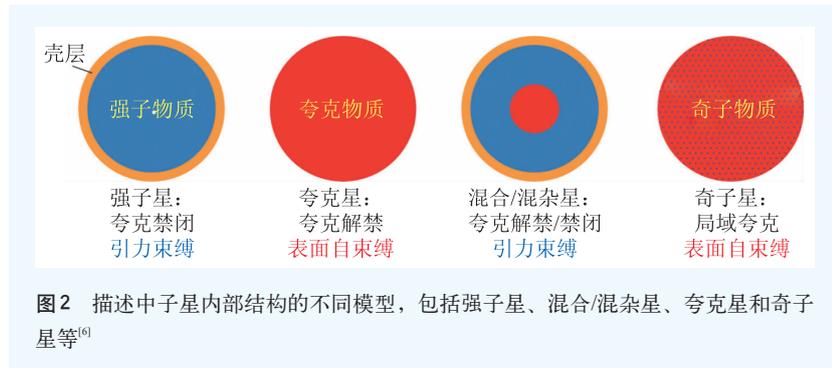
3.1 中子星和混合/混杂星

中子星为典型的强子星，内部的主要成分是中子；中子星的前身星中绝大多数电子和质子通过逆 β 过程转变为中子。

中子星从表面到中心，随着密度的不断增加，具有不同的组成，大致分为壳层和核心。中子星的壳层，总厚度约为1 km，分为外壳层和内壳层。外壳层密度约从 10^6 g/cm^3 开始，主要成分是重原子核和相对论性简并电子气。随着密度的增加，电子的费米能升高， β 平衡导致原子核逐渐富中子。密度达到中子滴密度(约 $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$)时，过丰的中子从原子核内游离出来。当密度进一步增加至接近核物质密度时，原子核中几乎所有的质子都转变为中子。以富中子的原子核、自由中子和电子等组成的区域称为中子星的内壳层。内壳层中的中子因强作用而结合成库珀对，形成超流中子流体。

在内壳层之下，密度达到饱和和核物质密度的中心区域叫做中子星的核心，也是中子星的主体，其质量超过中子星总质量的90%。这个区域已经不存在原子核了，主要包含超流中子流体，以及少量电子和质子。在接近中心的内核区域，密度超过2—3倍核物质密度，可能会出现 π 介子、K介子或者超子物质。

以上的讨论以强子为基本自由度。值得注意的是，在密度超过2—3倍核物质密度的核心区域，强子可能不再是基本自由度了。此时由于密度太高，直观地看，强子显著地相互重叠、表面



可能消失,即出现解禁的夸克。

关于星体的中心区域可能出现的夸克自由度,目前主要有两种看法。一种看法认为那里存在一阶相变,强子相与夸克相之间由密度不连续的间断面分开,这类星体称为混合星。另一种看法是,星体核区的夸克和强子有可能在宏观尺度上共存,密度连续变化,这类中子星称为混杂星。当然,无论是混合星还是混杂星,其壳层与中子星的壳层一样,都由富中子核和电子气构成。

3.2 夸克星和奇子星

20世纪60年代建立了强子结构的夸克模型,使人们知道质子和中子是由更基本的夸克组成的。夸克共有六味;在中子星内部的密度范围内,除了上(u)和下(d)两味外还可能出现奇异味夸克(s)。因此,星体内部不仅可能发生夸克解禁,而且u和d夸克还可能通过弱相互作用产生s夸克。20世纪80年代,威腾根据前人的研究提出了一个猜想^[7]:认为由数量近乎相等的u、d和s夸克组成的夸克物质比⁵⁶Fe更稳定。虽然这一猜想还无法被严格证明,但是如果忽略夸克之间的相互作用和质量差别,那么我们可以基于简单的物理图像来理解其原因:三味夸克物质比两味(u和d)的核物质多了一种味道自由度(s),所以当夸克的数密度相近时,前者的费米能比后者低因而更稳定。如果威腾猜想成立,即三味夸克物质更稳定,那么它就可能会出现于星体内部。因为这种夸克物质是带奇异数的,所以夸克星也称“奇异夸克星”或简称“奇异星”。

刚开始建立的夸克星模型,将星体比作一个重子数为 10^{57} 量级的巨大强子,利用MIT袋模型得到压强与密度的关系。然而,对于几倍核物质密度的物质而言,那里夸克之间的相互作用是不可忽略的,涉及丰富的低能QCD效应。由于理论上的困难,人们目前只能借助一些唯象模型去描述。

鉴于相关能标依然处于非微扰QCD范畴(与

核物质类似),因此一种改进夸克星模型的看法认为:致密星中物质的构成单元可能并非夸克,而是类似强子的、带有奇异数的“夸克集团”^[8]——也称为“奇子”(为strange nucleon的合成词)。奇子星不同于中子星和夸克星,但它们之间也有相似之处:与中子星相似的是,奇子星的构成单元是类似强子的奇子,而不是游离态夸克;与夸克星相似的是,奇子星也是在强相互作用下表面自束缚的星体,即星体表面的密度仍然达到甚至高于核物质密度,而不是像引力束缚的中子星那样必须具有壳层。

4 观测检验

如何对脉冲星类天体内部结构的各类模型给出观测检验,无疑是天体物理学家拟解决的重大问题。原则上可以利用中子星在射电、X射线及 γ 射线丰富的观测表现来区分,但这些研究往往不跟中子星内部结构直接关联,所得到的结论大多是模型依赖的。

连接星体微观属性和宏观结构的一个重要桥梁是星体的物态方程。物态方程给出物质内部压强 P 和质量密度 ρ 之间关系 $P=P(\rho)$,它包含了星体结构的重要信息:星体物质的基本构成单元是什么粒子,以及这些粒子之间的相互作用如何描述。若同一个密度下对应的压强较大,则称为物态方程较“硬”;反之,则较“软”。

不同的脉冲星内部成分和结构,甚至同一种结构中运用不同的相互作用理论,都会给出不同的物态方程。比如,对于中子星模型而言,组成星体的物质是中子、质子、电子和 μ 子,或是除此之外还有介子或者超子,将给出不同的物态方程;对于夸克星模型而言,用MIT袋模型描述,还是用加入修正项的袋模型描述,或者加入色超导或色味锁相,也将给出不同的物态方程。

对星体宏观性质的观测,原则上能给出对物态方程的限制。这些宏观性质中,星体最大质量和潮汐形变量是两个重要的观测量,可以对星体

的内部结构给出干净的动力学约束。

4.1 最大质量

将广义相对论下的流体静力学平衡方程(即 Tolman—Oppenheimer—Volkoff 方程, 简称 TOV 方程)与物态方程结合, 可以计算出某一给定中心密度时星体的质量和半径。图 3 所示的质量半径曲线中, 每一条曲线表示在同一种物态方程下取不同中心密度得到的质量和半径。给定物态方程时, 随着中心密度的增大, 质量一般也增大, 直到增大到最大值, 对应于质量半径曲线上的最高点; 若中心密度进一步增大, 星体是引力不稳定的, 即内部的压强将无法抵抗引力塌缩。这一最大质量记为 M_{TOV} 。

不同的物态方程将得到不同的质量半径曲线以及不同的 M_{TOV} 。人们一般认为, 星体内部若出现超子或者奇异夸克物质, 会导致较小的 M_{TOV} 。原因是, 超子和奇异夸克物质的 s 味道自由度使得体系的能量降低, 进而导致压强降低、物态变软。如果某种物态方程对应的 M_{TOV} 小于已知的脉冲星质量, 那么这种物态方程就可以被排除。因此, 人们总试图观测发现更大质量的脉冲星, 来排除已有的物态方程。

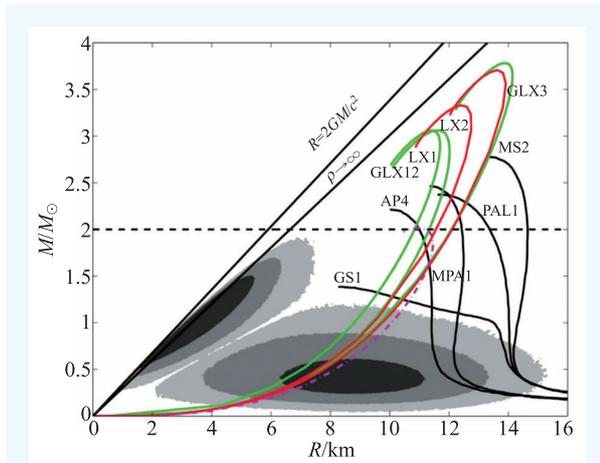


图 3 不同物态方程对应的不同质量半径曲线^[12]。观测限制双星 4U 1746-37 中致密星质量和半径于图中深灰色区域(置信度达 68%)。彩色虚线为夸克星模型给出, 彩色实线由奇子星模型给出, 而黑色曲线根据传统中子星模型得到

一般在双星系统中通过轨道参数或者其他一些手段来测量脉冲星的质量。PSR J1614-2230 的质量为 $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$, 最近又发现 PSR J0740+6620 的质量达 $2.17 \pm 0.11 M_{\odot}$ (68% 置信区间)^[9]。这已经排除中心出现超子的中子星模型和某些夸克星模型(图 3)。不过, 奇子星具有比较硬的物态方程, 其最大质量甚至可以超过三倍太阳质量^[10, 11], 经受住了观测的检验。

值得补充说明的是, 图 3 中的理论曲线是对于无自转星体得到的。考虑星体刚性自转后, 星体的最大质量 M_{max} 会比图 3 中的 M_{TOV} 高。这是因为一个转动的星体可以依靠额外的离心力来对抗引力坍缩, 从而可以支撑更大的质量。特别地, 对于传统中子星来说, 较差自转比刚性自转情形下能支撑的质量更大(见 4.3 节)。

4.2 潮汐形变

LIGO 发现的第一个引力波事件 GW150914, 标志着人类进入了引力波天文学的新时代, 之后发现的双中子星并合引力波事件 GW170817^[13], 则为人们研究中子星内部结构提供了新的机遇。引力波时代解决的第一个重大基本问题, 或许就是这个跟非微扰 QCD 相关的中子星结构之谜。

双中子星互相绕转时, 会因为辐射引力波而逐渐靠近, 称为双星并合过程的旋进阶段。在旋进后期, 星体本身的大小不能被忽略, 星体会因为伴星的存在而发生潮汐形变。反映星体潮汐形变能力的无量纲量为 λ , 它与物态方程有关。 λ 越小的星体, 在同一外场下的潮汐形变量越小, 即星体越难在外场作用下产生形变; 反之, λ 越大的星体, 越容易在外场作用下产生形变。观测方面, 从引力波信号可以得到对 λ 的限制, 原因是潮汐形变的存在使得双星轨道运动显著地偏离质点近似的结果, 而这一偏离可以从旋进阶段的引力波信号中提取。是故, 双中子星并合的引力波信号可以用来限制脉冲星类天体的物态方程。

不同物态方程预言不同的潮汐形变能力。对于传统中子星而言, 考虑相同质量的星体, 如果

其物态较软, 则会在较小半径时达到引力平衡, 这样的星体更致密, 也更难以在外场作用下产生形变, 即 λ 较小; 反之, 如果其物态较硬, 则会在较大半径时达到引力平衡, 这样的星体致密程度较低, 更容易在外场作用下产生形变, 即 λ 较大。将以上论述和4.1节的论述结合可知, 软的物态预言较低的 M_{TOV} , 但是 λ 也较小; 而硬的物态可以给出大的 M_{TOV} , 但是 λ 也较大。

双中子星并合的引力波事件GW170817给出了 λ 的上限^[13], 排除掉了许多太硬的传统中子星物态模型。而另一方面, 对大质量脉冲星的质量测量给出的 M_{TOV} 下限又排除了较软的中子星物态模型。换句话说, 太软的中子星物态无法使星体的质量超过两倍太阳质量, 而太硬的中子星物态又无法满足GW170817的 λ 限制。所以, 结合观测给出的 M_{TOV} 的下限和 λ 的上限, 可以将中子星的物态方程限制在非常小的范围内^[14]。

然而, 对于夸克星和奇子星而言, 虽然也遵循 M_{TOV} 更大/小则 λ 也更大/小这一趋势, 但是定量上又与中子星有很大区别。中子星(包括混合/混杂星)是引力束缚的, 即表面密度接近零; 而夸克星和奇子星是自束缚的, 即夸克或者奇子被强相互作用束缚在一起, 星体的表面密度依然可以高达核物质密度。因此, 质量相同时, 夸克星或奇子星比中子星更致密, 即 λ 更小。研究发现, 奇子星模型在很大参数范围内, 可以同时满足 M_{TOV} 明显超过两倍太阳质量和 λ 小于GW170817给出的上限^[15]。

4.3 伽马暴与千新星

双中子星并合事件的最终产物到底是黑洞还是中子星, 涉及人们关于中子星结构的理解。如果中子星的物态足够硬, 如奇子星模型所阐述的那样, 则并合的最终产物可以是长寿命中子星, 甚至永远稳定存在(并合后产物的总质量 $M_s < M_{\text{TOV}}$); 如果 M_s 比刚性旋转的最大质量 M_{max} 低, 即 $M_{\text{TOV}} < M_s < M_{\text{max}}$, 则并合中子星存在百秒之后坍缩成黑洞; 如果 M_s 低于较差自转时的极限质量 $M_{\text{diff, max}}$,

即 $M_{\text{max}} < M_s < M_{\text{diff, max}}$, 则在10—100 ms内耗散较差自转后塌缩成黑洞; 若 $M_s > M_{\text{diff, max}}$, 则并合后迅速形成黑洞。肖笛等^[16]在本刊也归纳了这些过程(参见文献[16]的图8)。

并合产物是否对伽马暴(GRB)火球供能, 将影响GRB的观测表现。比如, 观测发现GRB触发几百秒后的X射线闪或持续约 10^4 — 10^5 s的平台等现象, 可能跟并合产物(即GRB中心引擎)的再活动有关。若产物为黑洞则难以造就这种再活动, 而一定时间段内存在的中子星则能够释放自身能量。此外, 并合产物若是中子星, 则还将供能千新星(kilo-nova)火球, 以至于降低对喷射物的高不透明度的要求^[17, 18]。若产物是黑洞, 则不能长期供能千新星火球, 因而要求喷射物具有极高的不透明度(如合成大量镧系元素以增加不透明度)。

值得一提的是, 中子星和奇子星的千新星过程是不一样的。中子物质是两味(u和d)夸克极其不对称的状态, 而奇子物质是三味(u、d和s)对称态。它们都是荷质比极低的, 不存在显著的电子(无论是自由态还是束缚态), 因而不能有效地贡献不透明度。但它们也都可通过弱作用产生大量电子而造就不透明状态: 由两味不对称的中子物质转变为两味对称原子核(中子千新星), 或由三味对称的奇子物质转变为两味对称原子核(奇子千新星)。从这个意义上来讲, 两者并无本质差异。

5 总结与展望

第一颗中子星的发现距今已五十余年, 而发现的脉冲星总数已接近三千, 且在电磁波段积累了丰富的观测数据。一方面, 由于对低能强相互作用非微扰性质认识的不足, 理论上很难对中子星的内部物质给出明确的描述; 但另一方面, 中子星作为一种极端天体实验室, 或帮助人们探索几倍核物质密度的物质状态这一非微扰QCD问题。

随着引力波窗口的开启, 人们已经进入了包括电磁波、引力波、中微子等在内的多信使天文

学时代。双中子星并合引力波事件 GW170817 为人们研究中子星内部结构提供了新的机遇, 此过程中的引力波和电磁波辐射均包含了与中子星内部结构相关的重要信息。基于 GW170817 单个事件, 人们已经限制了中子星极限质量和潮汐形变

能力, 并否定了一些中子星模型。未来, 随着更多双中子星并合事件的发现以及电磁波段探测技术的提高, 加上数值相对论模拟^[19]计算的改进, 甚至中微子信号的成功探测^[20], 相信终将揭开这个跟非微扰 QCD 相关的中子星结构之谜。

参考文献

- [1] Landau L. Sov. Phys., 1932, 1: 285
- [2] Yakovlev D G, Haensel P, Baym G *et al.* Physics-Uspokhi, 2013, 56: 289
- [3] Baade W, Zwicky F. Phys. Rev., 1934, 45: 138
- [4] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D *et al.* Nature, 1968, 217: 709
- [5] Li Y Y, Wang W Y, Ge M Y *et al.* ApJ, 2018, 854: 165
- [6] Lai X Y, Xu R X. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, 861: 012027
- [7] Witten E. Phys. Rev. D, 1984, 30: 272
- [8] Xu R X. ApJ, 2003, 596: L59
- [9] Cromartie H T, Fonseca E, Ransom S M *et al.* 2019, arXiv: 1904.06759
- [10] Lai X Y, Xu R X. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2009, 398: L31
- [11] Lai X Y, Xu R X, Gao C Y. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2013, 431: 3282
- [12] Li Z S, Qu Z J, Chen L *et al.* ApJ, 2015, 798: 56
- [13] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 161101
- [14] Annala E, Gorda T, Kurkela A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 172703
- [15] Lai X Y, Zhou E P, Xu R X. Eur. Phys. J. A, 2019, 55: 60
- [16] 肖笛, 耿金军, 戴子高. 物理, 2019, 48(9): 545
- [17] Lai X Y, Yu Y W, Zhou E P *et al.* RAA, 2018, 18: 24
- [18] 俞云伟. 物理, 2019, 48(9): 581
- [19] 周恩平. 物理, 2019, 48(9): 573
- [20] 徐东莲. 物理, 2019, 48(9): 593

 **欧普特科技**
GOLDEN WAY SCIENTIFIC
北京欧普特科技有限公司

Golden WAY SCIENTIFIC 专心/专注/专业

二十年的默默耕耘, 风雨兼程, 铸就了欧普特人“专心”、“专注”、“专业”的风格和品质, 孜孜不倦地对创新和品质的追求, 让欧普特具备了全线覆盖低、中、高、超高功率激光光学元件的加工生产和检测能力。伴随中国激光行业的蓬勃发展, 欧普特愿与您共同进步, 砥砺前行, 为中国光电事业的发展 and 进步共同尽一份心力和责任。

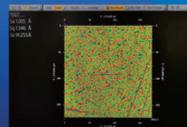
精密光学元件

1. 球面透镜
2. 柱面&非球面透镜
3. 光学棱镜
4. 反射镜(玻璃&金属)
5. 光学窗口
6. 偏振&消偏元件
7. 滤光片
8. 光栅

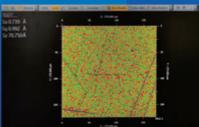


激光器件

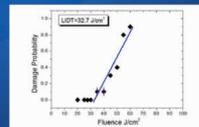
1. 扫描场镜(紫外-红外)
2. 线扫镜头
3. 紫外远心镜头
4. 中继镜
5. 扩束镜



(熔石英基材, 直径50.8mm光学窗口)



(单晶硅基材, 1070nm高反膜)



关注二维码



北京市朝阳区酒仙桥东路
1号M7栋东五层



www.goldway.com.cn
Email: optics@goldway.com.cn



Tel: +86-(0)10-8456 0667
Fax: +86-(0)10-8456 9901