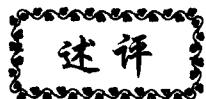


文章编号: 1000-8349(2008)03-0214-18



夸克物质与夸克星

岳友岭, 徐 峰, 来小禹, 徐仁新

(北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘要: 二十世纪六七十年代强子结构研究的进展使人们认识到了亚核子——夸克——的存在。随后, 实验和理论上关于夸克之间作用渐近自由性质的发现使学者们明确地提出了“夸克物质”的概念。理论上预言的这种物质是否真的存在将在很大程度上检验目前基本强作用的理论。夸克星就是夸克物质的可能存在形式之一。相关研究也是人们探索超核密度物质状态的重要途径。该文简述脉冲星、中子星及夸克星的研究历史, 总结了近年来夸克物质与夸克星研究的重要成果, 指出了夸克星与一般中子星的异同以及若干夸克星候选体。

关键词: 天体物理学; 夸克星; 脉冲星; 中子星

中图分类号: P145.6 **文献标识码:** A

1 研究简史

1926 年, Fermi 和 Dirac 先后提出了关于费米子的量子统计理论 (即“Fermi-Dirac”统计)。仅几个月后, Fowler 就应用了这一结果解决了当时天文学界已长期存在的“白矮星之谜”: 是电子简并压平衡了白矮星自身的引力^[1]。在 Fowler 工作的基础上, Chandrasekhar^[2] 于 1931 年考虑了相对论性能动量关系, 且计算发现白矮星存在一个极限质量 $0.91M_{\odot}$ (后来修正为 $1.44M_{\odot}$ ^[3], M_{\odot} 为太阳质量), 即现在所熟知的 Chandrasekhar 极限质量。Chandrasekhar 的这一研究表明: 电子气简并压抵抗引力的能力是有限的, 超过极限质量的白矮星不能稳定存在, 将不得不塌缩。1932 年, 继 Chadwick^[4] 发现了中子之后不久, Landau^[5] 猜测在超过 Chandrasekhar 极限质量的星核内部电子可能会与质子“紧密”地结合起来, 并形成密度与原子核密度相当的核心。Landau 对某些恒星的核心密度可能达到原子核密度的猜想是划时代的; 这类恒星即为后来所称的“中子星” (neutron star, 简称 NS)。1934 年, Baade 和 Zwicky^[6] 进一步指出中子星可能是超新星爆发的产物。Oppenheimer 和 Volkoff^[7] 于 1939 年较详细地计算了中子星模型, 发现中子星质量约为 1 倍太阳质量, 半径仅 10 公里左右。直接观测中子星表面热辐射在当时是不可

收稿日期: 2007-06-20; **修回日期:** 2007-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10573002, 10778611) 和教育部科学技术研究重大项目 (305001)

能的。表面热辐射的观测到 20 世纪 90 年代才实现, 要使用现代的 X 射线望远镜 (例如 ROSAT、CHANDRA、XMM-Newton)、十米级的地面光学望远镜 (例如 VLT、Keck) 或 HST。1939 年之后至 1967 年射电脉冲星的发现前, 中子星的研究进展比较缓慢。这期间, 中子星物质状态方程的计算从简单的 n 、 p 、 e 体系推广到了包含介子、超子等的情况。当发现了第一批 X 射线源后^[8], 也有学者讨论了这些源是中子星的可能性^[9,10]。

1967 年, Hewish 的学生 Bell^[11] 发现了第一颗射电脉冲星 (pulsar)。这一发现是十分偶然的, 因为当时观测的目的是研究行星际闪烁。实际上, 在此之前, 射电观测精度已经足够好, 可以更早发现脉冲星, 但是人们并没有想到脉冲星的存在。值得一提的是, 就在脉冲星发现前不久, Pacini^[12] 已经意识到中子星可能存在强的磁偶极辐射。脉冲星的发现使致密星的研究进入了一个新的阶段, 理论开始与观测结合起来。很快, Gold^[13] 指出脉冲星的周期其实就是快速旋转中子星的自转周期, 而不是发现初期所认为的白矮星或中子星的震荡周期^[11]。有关脉冲星时间特性、辐射机制、内部结构等各方面的研究从此迅速展开。1969 发现了周期突跳 (glitch) 现象^[14]。Hulse 和 Taylor^[15,16] 于 1974 年发现了第一个脉冲星双星 (pulsar-NS) 系统 PSR B1913+16, 并通过对该系统长期的观测, 间接证明了引力波的存在。1982 年发现了第一颗毫秒脉冲星^[17] PSR B1937+12, 周期 1.558 ms, 它保持最快脉冲星记录 20 多年, 直到最近 1.396 ms 的脉冲星被发现^[18]。1992 年发现有行星围绕脉冲星 PSR B1257+12 公转^[19], 这是人类发现的第一个太阳系外的行星系统。2004 年发现了第一个双脉冲星 (double-pulsar) 系统 PSR J0737-3039A/B^[20], 它的轨道周期比 PSR B1913+16 的更短, 引力波辐射更强。由于 PSR J0737-3039A/B 两颗星都是射电脉冲星而且几何位置特殊, 粒子流与磁层之间有明显的相互作用, 成为了研究磁层相互作用的良好系统。至今发现的脉冲星已经超过 1 700 颗^[21]。

几乎在脉冲星发现的同期, 微观物理学领域也获得重要进展。随着粒子物理学研究的进一步深入, 人们认识到强子是有结构的。1964 年, Gell-Mann^[22] 和 Zweig^[23] 各自独立地提出了强子由夸克组成的看法。虽然起初貌似与脉冲星研究不相关, 但是几年之后夸克模型就与中子星研究联系起来: Ivanenko 和 Kurdgelaidze^[24] 首先于 1969 年讨论了中子星内部出现夸克物质 (其基本组成为夸克而非强子) 的可能性。Itoh^[25] 在 1970 年尝试计算了由奇异夸克物质 (由 u 、 d 、 s 三味夸克组成的夸克物质; 因奇异数非零, 又称为奇异夸克物质) 组成的致密星 (即现在所称的奇异夸克星, 或简称奇异星¹⁾)。因为奇异夸克星是最可能存在的夸克星, 所以在称夸克星时一般即指奇异夸克星。因此夸克星和奇异星多数时候是同一概念。因为脉冲星一经发现即被认为是中子星, 而夸克星理论发展较晚, 所以在不专门讨论内部性质时, 人们已习惯将脉冲星类致密天体称为中子星。此时中子星并不专指普通中子星 (normal neutron star), 而是广义地包含普通中子星和夸克星。) 的流体静力学平衡状态。夸克星是几乎完全由夸克物质构成的, 与内部只有少量夸克物质的中子星截然不同。1971 年, Bodmer^[26] 讨论了奇异夸克物质的稳定性。1984 年, Witten^[27] 较详细地讨论了奇异夸克物质的可能存在形式: 宇宙早期的

1) 因为奇异夸克星是最可能存在的夸克星, 所以在称夸克星时一般即指奇异夸克星。因此夸克星和奇异星多数时候是同一概念。因为脉冲星一经发现即被认为是中子星, 而夸克星理论发展较晚, 所以在不专门讨论内部性质时, 人们已习惯将脉冲星类致密天体称为中子星。此时中子星并不专指普通中子星 (normal neutron star), 而是广义地包含普通中子星和夸克星。

夸克胶子等离子体 (quark-gluon plasma, 简称 QGP); 奇异星; 宇宙射线中的奇异滴 (strangelet, 即小重子数的奇异夸克团块, 见参考文献 [28])。他在前人研究的基础上强调这样一个大胆的猜想: 大块奇异夸克物质是最稳定的强相互作用体系。这一猜想的直接后果为: 奇异星是最可能存在的夸克星。如果 Witten 猜想成立 (虽然目前尚不能从理论或实验证实), 则奇异星比中子星更稳定; 当中子星中心密度达到夸克解禁密度时, 很可能整体相变而成为奇异星 [29]。有可能所有的脉冲星都是奇异星; 只是相变过程的细节是爆燃过程 (deflagration) 还是爆轰过程 (detonation) 尚不清楚 [30-32]。1986年, Haensel 等人 [33] 和 Alcock 等人 [34] 两个研究小组分别对夸克星的基本性质进行了计算。他们发现近极限质量的夸克星也可以具有半径约 10 km、质量约 $1.4M_{\odot}$, 与中子星非常接近。这也是致使中子星与夸克星难以区分的原因之一。

20世纪70年代起, 人们注意到了因夸克之间吸引作用, 夸克物质的 Fermi 面很可能是不稳定的。类似于低温金属中电子的超导态 [35], 夸克物质也可能处于色超导 (color-superconducting, 简称 CSC) 状态 [36]。20世纪90年代关于色超导的讨论逐渐展开 [37,38], 德色味锁相 (color-flavor locked phase, 简称 CFL), 两味色超导相 (two-flavor color-superconductivity phase, 简称 2SC) 等不同的色超导态也被提出 (见参考文献 [39] 及其引文)。如果色超导存在, 则会产生一系列后果, 比如影响夸克星的冷却性质、转动不稳定性、解禁密度、磁场等。然而基于脉冲星类天体各种观测特征, 作者所在的研究小组提出了“冷夸克物质处于固态相”的猜想 [40]。夸克物质成固态的一种比较可能的机制如下: 在低温高密情形, 夸克可能因它们之间强的相互作用致使若干夸克在位形空间凝聚成团; 当温度足够低以致热动能远低于夸克团之间的作用能时, 物质即呈现固态 [40]。因这种固体类似于人们日常生活中的固体, 故称为普通固体 (normal solid)。如果假设色超导能隙存在空间调制 (即破坏空间平移对称性), 最近的计算表明 [41] 色超导物质也可以具有刚性 (可能为中子星壳层物质刚性的 20~1 000 倍); 这样的超流态也可以看作为一种固体, 称为超固体 (supersolid)。不少天文观测现象可能与夸克星的固态相联系。

计算表明夸克星表面有电子层, 厚度几 pm, 表面电场可达 $10^{17} \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$, 并很快衰减 [34]。人们起初一度认为夸克物质表面以外一般都有普通物质壳层, 并且脉冲星的磁层与辐射依赖于此壳层 [34]。这样的夸克星与中子星表面不可区分。然而进一步的研究发现壳层的存在对于脉冲星磁层和辐射并不是必需的。裸奇异星是可能存在的, 并能够形成磁层并产生射电辐射 [42]。显著的表面性质差别可能为观测区分裸奇异夸克星与中子星提供有效途径。

由于以上的历史, 当前脉冲星类天体的内部结构模型主要分为两大类: 普通中子星 (normal neutron star) 和夸克星 (quark star)。两者具有不同的质量-半径 ($M-R$) 关系 (参考 4.1 节)。因量子色动力学 (quantum chromodynamics, 简称 QCD) 在低能的高度非微扰特性, 人们至今尚不能从理论上证明 Witten 猜想是否成立, 此外也不能严格计算得到夸克解禁的临界密度。因此, 我们还不能从基本理论出发直接论证普通中子星和夸克星两种模型中哪一类星体是实际存在的。地面的重离子对撞实验经过多年努力, 虽倾向于夸克胶子等离子体存在 [43,44], 但还需进一步的研究。如何从观测上区分普通中子星和夸克星? 这是当今天体物理研究中的重要问题之一。就目前一般观测特征而言, 脉冲星类致密天体是普通中子星还是夸克星这一问题并没有定论, 争论颇多 [45-47]。下面分几个部分对夸克星的研究进展进行介绍。

2 夸克物质及其唯象描述

粒子物理标准模型认为物质由基本费米子 (夸克和轻子) 和传递相互作用的规范玻色子

(光子、 W^\pm 、 Z^0 、胶子甚至引力子)组成。已知的四种基本相互作用中, 电弱理论非常成功; 引力理论也较完善, 仅 Planck 尺度的引力还不明了; 我们对强相互作用的理解则相对较少, 还存在众多问题没有解决。

QCD 被普遍地认为是描述强相互作用的潜在理论框架。QCD 认为夸克带有分数电荷 ($+2|e|/3$ 或 $-|e|/3$) 和色荷 (红、绿、蓝三种), 夸克之间的作用为色作用, 即强相互作用。目前已知夸克之间的强相互作用有两个基本性质: 渐近自由 (asymptotic freedom) 和色禁闭 (color confinement)。渐近自由是指在高能量极限下, 夸克之间的强作用几乎可以忽略; 色禁闭指低能标下带色夸克只能被囚禁在无色的强子内部。QCD 理论能够很好地证明实验上的渐近自由特性^[48-52], 因为还没有任何实验探测到带色粒子, 所以倾向于认为色禁闭是成立的。处于色禁闭的无色荷体系称为色单态 (或称“白色”)。由于 QCD 的不完善以及实验上的困难, 夸克物质 (特别是低温高密的夸克物质) 是否存在以及是否可由对撞机实验产生还没有明确结论, 所以通过对夸克物质的研究发展出多种唯象模型。MIT (麻省理工) 的口袋模型 (Bag model)^[53,54] 是比较简单且流行的一种唯象模型。

值得注意的是, 色禁闭目前还只是基于已有实验观测的推论, 并没有严格的理论和实验证明。如果色禁闭不是绝对的, 则可能产生一系列后果, 比如带色夸克物质。在超新星爆发形成夸克星的过程中, 夸克星由于初始转动速度可以很快, 以致可能碎裂并甩出夸克物质团块^[55]。由于信息传播速度不能超过光速, 碎裂过程中无法保证每一团块都为色单态, 于是就有可能产生带色的夸克星或夸克团块^[55]。

渐近自由和色禁闭这两个基本特性决定了强作用体系的两种物态: 低能量密度下 (温度 T 和重子化学势 μ_B 都较低) 的强子相和高能量密度下 (T 或 μ_B 较高) 的夸克胶子等离子 (QGP, 或称为“夸克物质”) 相 (见图 1、2)。夸克物质的存在是强作用渐近自由性质的一个直接后果: 在较高能标下, 夸克和胶子间的作用足够弱而不再囚禁于强子内, 成为自由粒子。因此, 推测在高温 (例如宇宙的早期) 或高密 (例如在致密星内部) 时可能出现夸克物质; 在低温且低密的情况下, 夸克结合为强子。但是强子相变为夸克胶子等离子体 (或其逆过程) 在什么温度和密度下发生还不清楚。由于对 QCD 理解不完善, 现在的 QCD 相图 (见图 1、2) 也只能是定性地画出。具体参数如特征的相变温度、压力等难以准确给出。

强作用物质也可能类似于普通物质, 有多种相存在。除强子相和夸克胶子等离子体外, 对相图上可能存在的其他的 QCD 相有很多看法。对于中间态, 有多种的模型, 比如色味锁相、两味色超导相、色味锁相 $-K^0$ (CFL- K^0)、色自旋锁相 (color-spin locked phase, 简称 CSL) 等 (见图 1、2, 参考文献 [56])。首先被提出的是出现价夸克的凝聚。类似于低温超导 BCS 理论^[35] 中电子在动量空间的凝聚, 低温高密的夸克物质因夸克间的吸引作用也可能导致夸克 Fermi 海失稳。因为夸克形成的“Cooper”对是带色的, 故称为色超导^[39,57]。实验测得夸克流质量推荐值为: $u(1.5 \sim 3.0 \text{ MeV})$ 、 $d(3 \sim 7 \text{ MeV})$ 、 $s(95 \pm 25 \text{ MeV})$ ^[58]。各种夸克质量并不相等, 而且 s_c 夸克质量较大, 这就决定了色超导主要有两种可能形式: 两味色超导相和色味锁相。色味锁相出现于重子化学势 μ_B 高于几倍奇异夸克质量 ($\mu_B \geq 300 \text{ MeV}$) 的情形, 此时可近似认为 u 、 d 、 s 夸克静质量可以忽略, 三种夸克都参与凝聚; 而两味色超导相发生在 μ_B 较小时, 此时 s 夸克质量不能忽略 ($\mu_B < m_s$), 只有 u 和 d 夸克参与凝聚^[59] (见图 1)。

因为电磁相互作用耦合常数 $\alpha \approx 1/137$, 所以可以做微扰计算。量子电动力学 (quantum electrodynamics, 简称 QED) 的计算结果与实验符合得很好。但是 QCD 耦合常数是跑动 (变化)

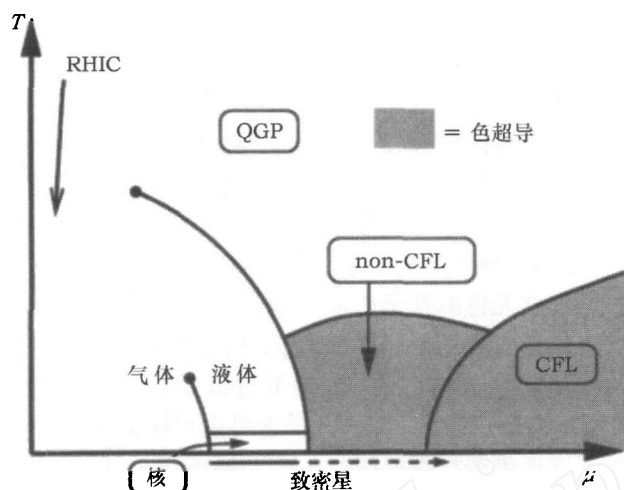


图1 考虑了色超导的 QCD 相图^[60]

横轴 μ 为重子化学势 (即 μ_B)，纵轴 T 为温度。在低温和低化学势时为强子态，高温或高化学势时为夸克胶子等离子体。低温高化学势 (即高密度) 一般认为是色超导态。色超导态有两种可能相：化学势较高时，三味夸克质量近似为零，均参与凝聚，夸克物质为 CFL；化学势较低时，三味夸克质量非零，s 夸克质量较大，仅 u、d 夸克参与凝聚，夸克物质为非色味锁相 (non-CFL)。非 CFL 可能为两味色超导相、色味锁相 $-K^0$ 、CSL 等^[56]。讨论较多的是两味色超导相。

的，低能标下会大于等于 1，高能标下会变小趋于零。微扰的方法只在高能标下适用。学者们至今还不能根据 QCD 得出确切的相变参数。基于渐近自由，在高能情形可以用微扰论处理 QCD，即微扰 QCD (pQCD)；它在解决若干高能物理问题 (尺度 0.1 fm) 时是非常成功的。但是对于中低能问题 (尺度 ≈ 1 fm)，QCD 的非微扰效应就非常突出了。一种考虑非微扰效应的方式是将时空格点化数值求解 QCD，即格点 QCD (LQCD)。然而因为计算上的复杂性，一般要用 Monte Carlo 方法，所需要的计算量很大。目前 LQCD 尚主要集中于计算接近零重子化学势的高温情形，即对撞机所制造的 QGP。而致密星内部却是高重子化学势、低温的。因存在所谓的“符号”问题，尚不能通过 pQCD 来计算。现有计算机的计算能力尚不足以解决这一问题。同时，对撞机实验也无法实现低温高密的状态，所以通过天体物理角度研究夸克星就成为理解这一问题的最有效途径。通过对众多脉冲星类天体的研究，能确定夸克星是否存在。进一步地，如果能确定夸克星在 QCD 相图中的位置，我们对 QCD 相图理解将更加完善。

除了上面提到的色超导态外，还可能出现夸克成团 (quark clustering) 相^[40,59]。在量子场论中，无质量 Fermi 子的 Lagrange 密度具有手征对称性。这导致无质量 Fermi 子的螺旋度 (helicity，指自旋在运动方向的分量) 守恒。由于夸克的质量非零，手征对称性会发生破缺。在高能极限下，夸克的质量可以忽略，近似为零，夸克-反夸克的真空期望值为零 ($\langle \bar{q}q \rangle = 0$)。但是在低能极限下，手征对称性自发破缺，此时 $\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$ ，即发生海夸克凝聚。类似于低温超导，在海夸克凝聚的真空只能激发质量明显非零的价夸克。u、d 夸克的流质量为几 MeV。但在较低能标时，由于夸克与真空的作用，其质量明显增加。此时的夸克又称为“穿衣夸克” (dressed quark)。在 QCD 相图上手征对称性破缺和夸克囚禁 (或手征对称性恢复和夸克解禁) 不一定同时出现^[59]。如果这两种相变真的不同时发生，则可能在两味色超导相与强子相之间出现另外的物质相：夸克成团相 (见图 2)。在夸克解禁但手征对称性破缺的地带，

穿衣夸克 (dressed quark) 可能携带约 300 MeV 的质量, 原则上可以自由运动。但夸克间耦合却非常强, 可能会出现位形空间的一种凝聚, 即夸克成团。这种成团某种程度上类似于核子层次上的 α 集团^[59]。此时已经不是色超导态了。由若干夸克聚集而成的团块在夸克物质内部运动时波包较小而不互相重叠, 那么就可以近似为经典粒子, 从而可用经典理论处理。当温度降到足够低时, 夸克集团的热运动能量可能会远小于它们之间的相互作用能, 流体夸克物质就会相变成为固体夸克物质^[59](见图 2)。

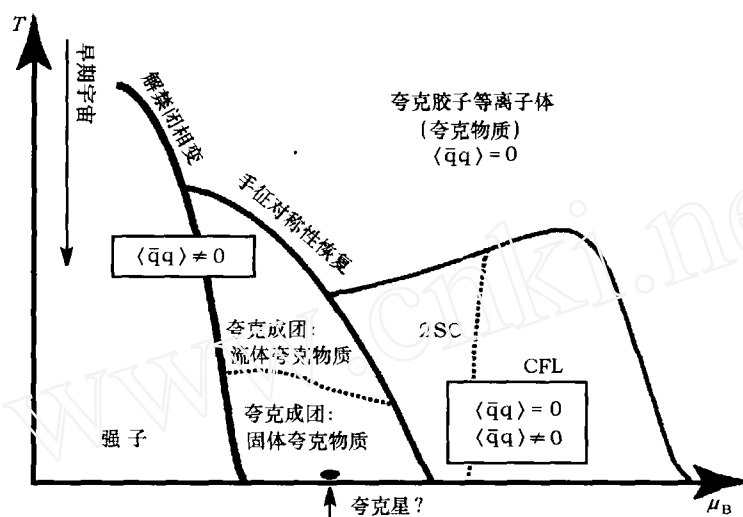


图 2 同时考虑了夸克成团和色超导的 QCD 相图^[59,61]

横轴 μ_B 为重子化学势, 纵轴 T 为温度。手征对称性恢复和夸克解禁如果不同时发生, 则可能在两味色超导相和强子相之间存在夸克成团相。在较高温度时为流体, 在较低温度时可能为固态, 也即夸克星的可能存在状态。

进一步地, 若夸克集团的磁矩非零 (这是很可能的, 因为夸克磁矩非零), 当固体夸克星温度降到居里温度以下时, 很可能发生自发磁化^[59], 与铁磁性是类似的。这是脉冲星强偶极磁场起源的一种简单解释。

寻找夸克物质已经是目前国际上一些重离子对撞实验的首要目标, 比如欧洲核子研究中心 (CERN) 的铅束项目 (Lead Beam Programme) 和 Brookhaven 国家实验室 (BNL) 的相对论重离子碰撞 (Relativistic Heavy Ion Collider) 等实验。但是由于夸克解禁后会很快强子化, 夸克胶子等离子体火球存在的时间极短。虽然已有实验倾向于夸克胶子等离子体是存在的^[43,44], 但是现在尚不能明确地作出在对撞过程中夸克是否解禁的结论。最近 RHIC 的实验^[62,63] 表明: 温度 $T \simeq 2T_c$ ($T_c \simeq 200$ MeV, 为夸克解禁临界温度) 时, QGP 的性质可以用理想流体动力学很好地描述^[64]。这表明此时 QGP 内夸克之间的耦合是很强的, 完全不同于以前推测的渐近自由, 而是强耦合等离子体 (strongly-coupled quark gluon plasma, 简称 sQGP)。这种强耦合或许有利于夸克的成团。2008 年计划开始运行的下一代对撞机 LHC (The Large Hadron Collider)^[65] 在寻找夸克物质方面会有更大的进展。

除了地面实验外, 在天文观测上寻找夸克物质存在的证据也已展开。已经有若干观测表明, 夸克物质是可能存在的。我们将在第 4 章详细讨论。

3 夸克星的基本特征

夸克星有许多不同于中子星的性质,有些可能用来区分两者。这里作简要介绍,包括表面性质、质量-半径关系、转动周期及辐射等。

夸克星与中子星的表面性质不同。由于u、d、s夸克质量不同,达到平衡时,三味夸克数量略有差异,有少量电子存在($n_e/n_q \approx 10^{-4}$)。因电子不受强力束缚,一部分会跑到夸克星外,在夸克星表面形成电子层,厚度为几pm。夸克星表面电场可达 $10^{17} \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 并随高度增加指数衰减^[34]。一般认为电子层可以支撑起普通物质壳层,其质量小于 $10^{-5} M_\odot$ ^[34]。如上所述,夸克星与中子星表面性质类似,从辐射上就难以区分。但是还有另一种可能,奇异星表面无壳层,表面为夸克表面,即裸奇异星^[42]。因为超新星爆发时光度很高,壳层无法形成。同时,由于脉冲星有很强的粒子外流,除非在高密星际介质环境中,否则很难吸积星际介质。因此壳层很难形成,裸奇异星很可能存在。裸奇异星可以和中子星一样产生磁层和射电辐射^[42]。但由于表面不同,在辐射上会有所区别。如果固体夸克物质是存在的,夸克星很可能是固态^[40],通过脉冲星的辐射特性、时间特性可以表现出来。固态的夸克星表面很可能发射出黑体谱^[66]。

两者质量半径关系不同。夸克星可以拥有比较小的半径 R 和质量 M ,且夸克星质量较小时($M < M_\odot$)满足 $M \approx R^3$ 。夸克星的质量原则上可以接近于零。当质量很小(重子数 $A < 10^4$)时,为奇异滴。夸克星密度几乎为常数($\rho \approx 4\bar{B}$, \bar{B} 为MIT口袋模型中的口袋常数),尤其是小质量时。对于质量为 $1.4M_\odot$ 的夸克星,其中心密度也只是表面密度的两倍左右^[34]。而中子星表面为普通物质,与内部密度相差几个量级。中子星存在一最小质量($0.1 \sim 0.2M_\odot$),小于最小质量的中子星是不存在的(根据不同质量,会是白矮星、褐矮星、行星等)。小质量中子星满足 $M \approx R^{-3}$ (参考4.1节)。这是夸克星与中子星之间的另一个重要区别。两者极限质量相近,都为 $2M_\odot$ 左右,中子星略大一些。在特征质量($1.4M_\odot$)附近,它们的半径相差不大,所以区分起来比较困难,但是在小质量时,半径相差明显,可以通过X射线观测明显区分。

夸克星除了质量和半径都可以比较小之外,还可能具有更短的自转周期。由于中子星的表面速度不能超过Kepler速度,其自转周期下限约为 $0.5M_1^{1/2}R_6^{-3/2}$ ms^[67],其中 $M_1 = M/M_\odot$ 、 $R_6 = R/(10^6 \text{cm})$,对于 $M = 1.4M_\odot$ 、 $R = 10 \text{km}$ 的中子星来说,周期 P 下限为0.6ms。由于转动不稳定性和星体变椭等因素,实际值会更高一些。Zheng等人^[68]考虑了由于夸克物质内部相互作用产生的粘滞,计算了r模不稳定性(r-mode instability)对转动的影响。发现对于 $M = 1.4M_\odot$ 、 $R = 10 \text{km}$ 的奇异夸克星,最小稳定周期是1.78ms,比较早的计算结果(2.5ms)更接近观测值。注意到转动最快的脉冲星(PSR J1748-2446ad)的周期为1.4ms^[18],说明还可能有另外的因素没有考虑。当然,也有可能这颗星是小质量的。对于低质量夸克星,其 P 可以更小,甚至小于0.1ms。如果能够找到一颗 $P < 0.5 \text{ms}$ 的脉冲星,就可以确定是夸克星而非中子星。我国将要建设的500米射电望远镜FAST(Five Hundred Meter Aperture Spherical Telescope)会很大程度上提高脉冲星搜索的灵敏度。如果亚毫秒夸克星确实能够形成,FAST就可能发现它们。此外,低质量夸克星引力波的辐射效率也比较低;引力波探测器LIGO的探测上限可能用来限制脉冲星的质量^[69]。

因为只有双星系统中的中子星/夸克星的质量才能比较准确地测量,现在只有7颗中子星/夸克星的质量误差较小($\leq 0.005M_\odot$),质量范围 $1.25 \sim 1.44M_\odot$ ^[70]。最低质量 $1.25M_\odot$

已经比 Chandrasekhar 极限小。是否有可能观测到更低质量的源呢? 如果测得质量小于 $0.2M_{\odot}$ 的脉冲星, 则普通中子星理论就很难成立了。

4 观测进展

夸克星与中子星的一些性质非常类似, 并且两者都可以表现为脉冲星。早期观测以射电波段为主, 对这两类模型难以区分。到了 20 世纪 90 年代, 脉冲星研究状况开始有所改变; 特别是众多高性能 X 射线卫星 (ROSAT、RXTE、BeppoSAX、Chandra、XMM-Newton 等) 的运行使测量夸克星和中子星的谱和半径都成为可能, 从而有可能区分两者。同时, X 射线波段时间特性的测量也更加精确。现代光学和红外望远镜 (VLT、Keck、HST、Spitzer 等) 的观测也有效推进了中子星和夸克星研究。X 射线和 γ 射线的观测发现了几类新的脉冲星类天体: X 射线爆发源, 反常 X 射线脉冲星 (anomalous X-ray pulsar, 简称 AXP) [71,72], 软伽马射线重复暴 (soft gamma ray repeater, 简称 SGR) [72-74], 中心致密天体 (central compact

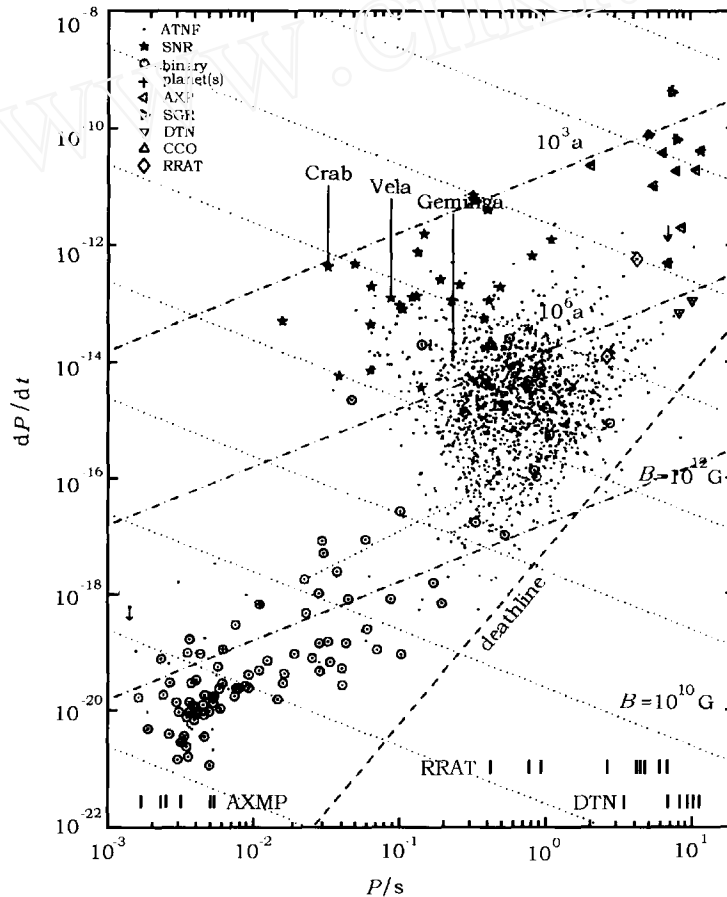


图 3 脉冲星的 $P-\dot{P}$ 图

横轴为周期, 纵轴为周期导数 (即 \dot{P})。数据取自 ATNF Pulsar Catalogue [82] 以及参考文献 [18, 76, 78, 79, 83-85]。AXMP、DTN 和 RRAT 的 \dot{P} 大部分没有测出, 图下方的竖线指示它们的周期。

objects, 简称 CCO) [75,76] 和暗热中子星 (dim thermal neutron star, 简称 DTN), 也称孤立中子星 (isolated neutron star, 简称 INS), 或 X 射线暗弱孤立中子星 (X-ray dim isolated neutron star, 简称 XDIN) [77,78], 吸积毫秒脉冲星 (accretion-driven millisecond X-ray pulsar, 简称 AMXP) [79]。

这几类脉冲星类天体基本上都是射电宁静的 (但已有两颗 AXP(XTE J1810-2197 和 1E 1547.0-5408) 观测到了射电辐射 [80,81])。它们有明显的 X 射线辐射, 并各自有不同的性质。脉冲星研究已经不仅限于射电波段, 所以脉冲星 (pulsar) 这一概念已经由最初的射电脉冲源 (pulsating radio source) 扩展到更广泛的含义。因此称它们为脉冲星类天体更为适合。这几类脉冲星类天体的数量都不多, 说明它们的寿命可能比较短, 会较快地演化成射电脉冲星或其他类型的脉冲星类天体。它们也有可能就是十分特殊的。图 3 给出了脉冲星的 $P-\dot{P}$ 图, 标出了几类脉冲星类天体的位置。

下面指出一些夸克星候选体的观测与模型研究, 包括 SAX J1808.4-3658、RX J1856-3754 和 PSR B0943+10。

4.1 SAX J1808.4-3658

SAX J1808.4-3658(以下简称 SAX1808) 是一颗吸积毫秒脉冲星, 周期 $P = 2.5 \text{ ms}$ [86]。处于一个小质量 X 射线双星系统中, 轨道周期 2 h [87]。Li 等人 [88] 对 SAX1808 的研究表明, 其半径较小, 很可能是一颗夸克星。吸积脉冲星的半径 R 、磁层半径 r_m 和共转半径 r_{co} 应满足以下关系: $R \leq r_m \leq r_{co}$, 进而 $R \leq r_m(\dot{M}_{\max}) < r_m(\dot{M}_{\min}) \leq r_{co}$, 其中 $r_m(\dot{M}_{\max})$ 和 $r_m(\dot{M}_{\min})$ 分别为吸积率最大和最小时的磁层半径。可得:

$$R < 27.6 \left(\frac{F_{\max}}{F_{\min}} \right)^{-2/7} \left(\frac{P}{2.49 \text{ ms}} \right)^{2/3} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1/3} \text{ km}, \quad (1)$$

其中 F_{\max} 和 F_{\min} 为 X 射线高态和低态的流量。公式 (1) 在质量-半径 ($M-R$) 关系图上, 给出一条 $R \propto M^{1/3}$ 曲线 (见图 4 中虚线), SAX1808 只能位于曲线左边半径较小的区域内 (见图 4)。

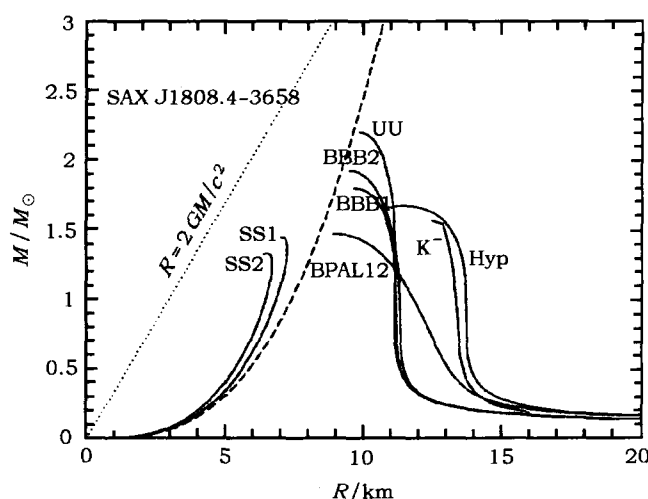


图 4 Li 等人 [88] 对 SAX J1808.4-3658 半径的限制

观测限制这颗星的 M 和 R 要位于虚线的左边, 即 R 要比较小。SS1 和 SS2 是两种夸克星模型, 其他实线为中子星模型。只有夸克星的模型是符合要求的。

在这一区域内只有夸克星模型是可能的, 而中子星模型都位于半径较大的区域内。

4.2 RX J1856-3754

ROSAT 卫星在 20 世纪 90 年代初首次测到了中子星 (RX J1856-3754, 简称 RX1856) 的热辐射 [77,89], 随后共探测到 7 颗 DTN [78]。Chandra 和 XMM-Newton 的观测得到的 DTN 的小半径和黑体谱特征, 都是对夸克星模型的有力支持 [90,91]。星体夸克表面的存在不但有助于超新星的成功爆发 [92], 而且还便于夸克星的观测证认。固体裸奇异星的热辐射不同于中子星, 它可能发出类似于金属表面的热辐射 [93]。因为在夸克星表面附近电子处于连续态, 所以不会像中子星那样产生原子谱线。Chandra 和 XMM-Newton 两颗卫星对 RX J1856-3754 的 X 射线观测得到了极好的黑体谱, 没有任何谱线 [91], 这对于夸克星模型是一个支持 [66,90]。RX J1856-3754 的辐射半径仅 4.4 km [91]。最近 XMM-Newton 对 RX1856 观测指出它有 7 s 的周期 [85]。这样长的周期所给出的极冠面积很小, 远小于 4 km, 所以将观测到的半径解释为极冠半径是不适合的。这对小质量夸克星也是一个支持。

4.3 PSR B0943+10

最近的 X 射线波段观测给出 PSR B0943+10 的极冠区面积比经典辐射模型要小一个量级以上 [94]。这一结果对经典模型提出了挑战, 因为中子星的半径一般为 10 km 或更大, 不会小于 10 km。所以不能给出小的极冠区半径。实际上, 这一结果可以用小质量夸克星来理解 [95]。因为小质量夸克星半径较小, 相应的极冠区的半径也较小。星体半径的变化会影响到极冠区的电势降 (potential drop), 决定了其能否表现为脉冲星。在考虑了磁倾角的效应之后, 重新计算得到的极冠区的最大电势比假定磁倾角为零的情况增大了约两个数量级 [95]。计算表明最大电势差仍可达到 10^{12} V, Ruderman-Sutherland 真空间隙模型 [96] 仍然能很好工作。据此分析, PSR B0943+10 可能是一颗质量约 $0.02M_{\odot}$ 的夸克星, 半径约为 2.6 km [95]。

4.4 红外观测与吸积盘

红外观测发现 AXP 4U 0142+61 周围存在吸积盘 [97], 支持了以前的推测: 吸积盘在脉冲星类天体周围可能非常普遍。最近的观测指出多颗脉冲星类天体的红外和光学辐射比 X 射线谱外推得到的要强: 如 RX1856 [98,99]、RX J0720.4-3125 [100,101]、RX J1605.3+3249 [102,103]、XTE J1810-197 [104] 等。这说明它们并不是孤立的, 周围可能存在吸积盘。研究夸克星的周围环境和吸积物理成为与观测对比研究中亟待解决的问题。通过研究星周环境, 盘的形成与演化, 行星的形成 [105], 来理解众多类型脉冲星类天体的辐射性质, 爆发现象的产生 (见 5.2 节), 各个类型之间是否存在演化关系及如何演化, 有可能确定脉冲星类天体是中子星还是夸克星。射电观测发现了 RRAT (rotating radio transient) [83] 等新类型的脉冲星类天体。它们的脉冲并不是长时间都有, 而是平均几百至几千个周期内随机出现的一个射电脉冲。这些间歇现象有可能是吸积和辐射不稳定性造成的 [106], 如果在这些天体周围观测到吸积盘, 则是对吸积模型的支持。

5 理论研究进展

5.1 超新星与夸克星形成

较大质量 ($M \simeq M_{\odot}$) 的夸克星可能在超新星爆发过程中形成。由于重子物质相变为夸克物质要放出能量, 所以有助于超新星的爆发, 同时可能产生伽马暴 (gamma-ray burst,

GRB) [31,92,107-109]。奇异星内非轻子反应 (nonleptonic interaction) $u+d \leftrightarrow u+s$ 对夸克星的震动有很强的粘滞阻尼, 衰减时标典型值为几十毫秒。这与伽马暴的上升时标相近, 可能是伽马暴的产生机制 [107,110]。如果初始形成奇异星且有较强的较差自转, 则会通过发电机 (dynamo) 过程使磁场变强, 通过磁重联过程能量释放形成火球 (fire ball), 产生伽马暴 [111]。超新星爆发过程中, 中微子带走绝大部分能量, 早期研究先注意到中微子, 认为超新星是中微子驱动的 [31]。以光子和正负电子对形式释放能量虽然较少, 由于与物质的碰撞截面比中微子大, 形成的激波完全可以抛出外面的物质壳层。所以超新星爆发很可能是光子驱动的 [92,112], 而非中微子驱动的。超新星爆发如果形成色味锁相夸克星, 其表面发射系数在 $10 < T < 30$ MeV 温度范围内可超过 $10^{43} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ [113]。裸夸克表面以光子和正负电子对形式释放能量可达到 $10^{44} \sim 10^{45} \text{ J}$ [92], 形成轻子 (e^\pm) 为主的火球, 使超新星能成功爆发。超新星爆发形成的火球很可能不是球对称的, 这会给中心形成的脉冲星一个踢速度 (kick velocity)。脉冲星的踢速度分布与伽马暴的能量分布具有很好的相似性 [114]。这可以理解为超新星爆发过程中的非各向同性会形成喷流, 产生伽马暴, 同时造成脉冲星的踢速度 [115,116]。

小质量夸克星的形成过程还不清楚。一种可能是在白矮星的 AIC (accretion induced collapse) 过程中形成 [67]。超新星爆发形成夸克星的过程中, 可能发生碎裂并甩出夸克物质团块 [55], 即小质量夸克星。Ouyed [29] 应用了中子星相变为夸克星的思想, 提出了夸克新星 (quark nova) 模型 [117]。指出中子星在中心核收缩形成夸克星同时, 抛出物质密度比较大的壳层。一部分物质回落相变成夸克物质。此过程释放的能量可达 10^{46} J , 可能与一部分伽马暴的形成有关。形成的中心夸克星质量可以小于 $0.3M_\odot$ 。这个过程中抛出的一部分物质回落形成吸积盘, 则可能产生行星。PSR B1257+12 可能就是这样一个行星系统 [105]。观测也表明 PSR B1257+12 的 X 射线辐射区面积比理论所得极冠区面积要小 [118], 说明它也可能是小质量的。来自球状星团中脉冲星类天体的一个研究很值得关注 [119]: 为使球状星团中出现符合观测数目的这类天体, 作者认为必须假设脉冲星类天体可以通过电子俘获超新星爆发 (AIC) 而形成。

5.2 星震与周期突跳

正常情况下, 脉冲星自转周期 P 随着转动能量的损失缓慢地增加, 但偶尔周期却突然减小 [14,123], 变化幅度范围 $\Delta P/P = \Delta \Omega/\Omega \approx 10^{-9} \sim 10^{-6}$ 。这一个有趣现象称为脉冲星的自转周期突跳 (glitch) [124]。在常规中子星模型中, 周期突跳现象与中子星的内壳层中超流中子涡丝 (vortex) 跟原子核的钉扎 (pin) 和去钉扎 (unpin)、再钉扎 (repin) 过程有关。在原子核足够稀疏 (即 Wigner-Seitz 元胞较大) 时, 钉扎束缚能可以通过完整的量子力学来计算。然而近期相关计算 [125] 支持在大部分内壳层内存在钉扎的假设。这些计算结果对于中子星周期突跳模型显然是不利的。

脉冲星的自转周期突跳现象可以自然地理解为固体夸克星上发生的星震过程 [120] (见图 5)。由于转动, 星体的平衡位形是 Maclaurin 椭球形的 [120]。随着转动周期的增加, 椭球的椭率将逐渐减小而趋于球形。但因固体夸克星中存在很强的剪切应力, 它不会像流体星那样很快减小椭率, 而是积累弹性能阻碍形变。当内部应力达到某临界值后, 固体夸克星就会破碎从而产生星震。转动惯量 I 因此突然减小。因角动量守恒, P 也随之突然减小。同时, 固体夸克星星震将伴随着能量释放。还有一种可能是, 在吸积系统中, 吸积到固体夸

克星表面的物质也会使应力增加。计算表明, 星震能量释放可以达到 10^{41} J, 可能是 SGR 巨耀斑 (giant flare) 的能量来源^[126]。这种爆发如果发生在比较远的距离上, 还可能用来解释伽马暴中的短暴^[126]。

尽管夸克星是否为固态目前还很难定论, 但观测到的某些脉冲星进动现象或许是个间接证据^[127-130]。GCR T J1745-3009^[131] 可能是一颗快速旋转的夸克星, 具有约一个小时的进动周期^[128]。PSR B1828-11 可能是一颗小质量夸克星 ($M \simeq 10^{-3} M_{\odot}$), 受一颗夸克行星作用产生受迫进动^[129]。

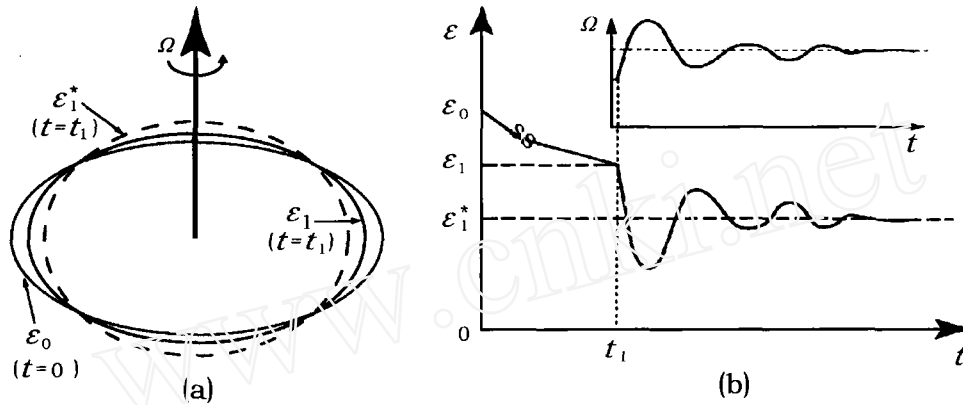


图 5 星震引起周期突跳的示意图

由于自转, 脉冲星近似为 Maclaurin 椭球^[120]。假设 $t=0$ 时星体处于平衡位形, 椭率为 ε_0 , 无内部应力。到达时间 t_1 时, 平衡位形为 ε_1^* 。但由于固体夸克星有内部应力, 实际椭率为 ε_1 (大于 ε_1^*)。如果应力达到临界应力, 则星体破碎产生星震, 从而回到平衡位形 ε_1^* 。考虑到有初始动能, 星体会在平衡位形 ($\varepsilon = \varepsilon_1^*$) 附近作震动。如果阻尼较小, 则星体会在平衡位形 ($\varepsilon = \varepsilon_1^*$) 附近作若干次震动, 相应的 Ω 也会随之变化。如果阻尼较大或过阻尼, 则只慢慢趋于平衡位形, 这可能是慢周期突跳 (slow glitch)^[121,122] 的产生原因。

5.3 辐射

尽管发现脉冲星至今已 40 年, 但尚没有一种模型同时清晰地解释磁层中各种波段的电磁辐射。人们建立了有关脉冲星磁层辐射的多种模型。其中真空间隙^[96] 这类模型是较早提出的, 并且沿用至今, 因为它们能够使人们自然地理解脉冲星射电辐射中观测到的一种特殊现象——漂移子脉冲^[96,124]。真空间隙模型认为在脉冲星表面附近存在火花放电 (sparking), 通过雪崩方式产生正负电子对。这些过程能否实现依赖于粒子 (主要是铁原子) 在脉冲星表面的束缚能是否足够高。有计算表明, 中子星表面铁原子在强磁场中形成的“分子链”^[96] 难以达到足够高的束缚能^[132]。而夸克星则没有这一问题。夸克星表面附近的夸克受强相互作用束缚, 电子也受非常强的电磁束缚, 它们的束缚能都足够高, 可以形成真空间隙^[42]。同时夸克星对于脉冲星 ($\Omega \cdot B < 0$) 和反脉冲星 (anti-pulsar, $\Omega \cdot B > 0$)^[96] 都能产生放电过程^[42]。值得注意的是, 裸奇异星可能出现两个区域的真空间隙: 核区间隙与环区间隙^[133,134]。建立在这个基础上的模型能够较好地解释双漂移子脉冲^[135]、多波段辐射等现象。

脉冲星是否带有单极电荷? 这是一个非常基本的问题; 但是在脉冲星研究的近 40 年来, 这一基本的问题并没有被提及。为了使得临界磁力线电势与无穷远星际介质电势相等以闭合整体磁层电路, 脉冲星必须携带单极电荷 $Q_c \simeq 10^{-3} R_6^3 B_{12} / P^2$ ^[136,137], 其中 $R_6 = R / (10^6 \text{ cm})$,

$B_{12} = B/(10^8 \text{ T})$ ，自转周期 P 以秒为单位；若实际带电荷大于(小于) Q_c ，则环间隙加速区的范围将变小(变大)。脉冲星单极电荷必然提供额外的与半径平方成反比的加速电场，这对于脉冲星磁层中粒子的加速可能有重要意义^[136,137]。

对脉冲星表面 X 射线辐射的观测可以得到其温度，同时对周期的观测可以得到 P 和 \dot{P} 来估计年龄。从而可以从冷却模型来限制中子星与夸克星模型。Zheng 等人^[138] 计算了色超导相的奇异夸克星的热演化。考虑了 r 模不稳定性后，部分转动能会转变为内能，从而使奇异夸克星的冷却变慢，尤其对于处于色味锁相的夸克星，中微子等其他冷却机制被压低， r 模不稳定性产热可以使夸克星维持较高的表面温度超过几百万年^[138]。这与观测是相符合的。Yu 和 Zheng^[139] 考虑了带壳层的奇异星的热演化，发现处于两味色超导相和色味锁相的奇异星在转动变慢的过程中，其壳层物质会解禁成夸克物质。这一过程中释放的能量可以加热壳层，从而维持较高的温度，色味锁相比两味色超导相更有效。这使得夸克星年龄在 $10^5 \sim 10^6$ 年时仍可具有约 10^6 K 的温度。

6 作为宇宙线的夸克物质

在 Witten 提出的三种夸克物质可能存在形式中，我们较多讨论了夸克星。对撞机所造就的夸克物质类似于宇宙早期的夸克胶子等离子体。下面简单地讨论夸克物质的第二种可能形式：宇宙线中的夸克物质，即奇异滴。

奇异滴为小质量的夸克物质团块，重子数约为几十至几千。奇异滴与星际介质中的粒子碰撞会失去表面电子，从而带有一定量电荷，但荷质比 (Z/A) 较小。带电奇异滴可以被加速到较高的能量，从而表现为高能宇宙线。如果这些高能宇宙线能穿过地球大气层，则可能在地面探测到。奇异滴是否能到达地表，取决于其在大气中的传播特性。考虑了奇异滴与大气原子核碰撞导致奇异滴的分裂后^[140]， $A_0 \geq 3000$ 或 $\gamma_0 \geq 140$ 的奇异滴可以到达海平面。如果仅考虑双奇异星合并^[141]产生的奇异滴，流量有 $1 \sim 10 \text{ m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{sterad}^{-1}$ ，但高能部分 ($\gamma_0 \geq 140$) 流量很小。如果考虑其他过程，如脉冲星磁层加速等^[142]，流量可能足够大从而可以观测到。夸克新星过程中的激波亦可将粒子加速到能量超过 $10^{18.6} \text{ eV}$ ，形成极高能宇宙线^[143]。Cheng 和 Usov^[142] 考虑奇异滴在脉冲星磁层中的加速，结果表明能量约为 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ eV}$ 的奇异滴流量约为 $25 \text{ m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{sterad}^{-1}$ 。

α -磁谱仪 (AMS) 的运行结果显示有一个低 Z/A 的事件^[144]。如果这一事件是真实的并不是噪音，则很可能是奇异滴。如果 AMS-02 探测到更多的此类事件，则是否存在夸克物质也会有一比较明确的结果。更多关于宇宙线的内容可参考文献 [28,145]。还有一些夸克物质的其他可能表现，可参考文献 [56] 中的表 3。

7 总结与展望

虽然自 Landau 预言中子星至今已有 70 余年，发现脉冲星也已 40 余年，人们对于脉冲星、中子星和夸克星的认识也有大量的积累，但是谈到中子星的确切内部结构，仍然还有诸多疑问，观测与实验给出的限制还不够。

本文介绍了最近对夸克星研究的进展，指出了现在脉冲星研究的基本问题：如何区分中

子星和夸克星这两种模型? 我们总希望有一种统一的模型, 但是至今尚不能完全排除其中任何一种观点。虽然如此, 人们对脉冲星的了解还是更进了一步。观测使人们认识到越来越多种类的脉冲星类天体。某些脉冲星类天体可能是夸克星。它们的辐射性质与观测表现各不相同。中子星和夸克星具有不同的性质, 通过对脉冲星类天体更多的观测、研究与分析, 有望对这两种看法作出选择。如果能从观测上证实夸克星的存在, 对于我们深入理解基本强相互作用和进一步认识相关的天体物理过程都将是十分有利的。此外天体物理过程十分复杂, 从观测数据中提取反映物理本质的信息也不是轻而易举的。由于观测数据有限, 我们仍然不能对脉冲星类天体是中子星还是夸克星的问题作出定论。今天, 我们正处于这样一个关键时期: 一方面夸克星与中子星的理论研究已经比较深入, 另一方面多种探测手段给出了脉冲星类天体非常丰富的观测特征。很可能在接下来的二三十年内, 关于脉冲星是中子星还是夸克星的争论会有一个最终答案。

有关脉冲星内部组成的不确定性, 根本原因是低能 QCD 的高度非微扰特性。通过 QCD 计算给出超过原子核密度物质的组成和性质现在还不能实现。因此, 在脉冲星结构研究方面重视观测表现和唯象研究都是很有必要的。因为对撞机所能造就的夸克物质也与致密星中的夸克物质有较大的区别, 所以致密星研究是与重离子对撞实验互为补充的理解强相互作用的重要手段。更多关于夸克星研究内容及其进展可参考文献 [56,57,146-148]。

参考文献:

- [1] Fowler R H. MNRAS, 1926, 87: 114-122
- [2] Chandrasekhar S. ApJ, 1931, 74: 81-82
- [3] Lee T D. ApJ, 1950, 111: 625-640
- [4] Chadwick J. Nature, 1932, 129: 312
- [5] Landau L D. Phys. Z. Sowjetunion, 1932, 1: 285-288
- [6] Baade W, Zwicky F. Physical Review, 1934, 45: 138
- [7] Oppenheimer J R, Volkoff G M. Phys. Rev., 1939, 55(4): 374
- [8] Giacconi R, Gursky H, Paolini F R, et al. Phys. Rev. Lett., 1962, 9(11): 439-443
- [9] Salpeter E E. ApJ, 1964, 140: 796-800
- [10] Zel'Dovich Y B. Soviet Physics Doklady, 1964, 9: 195
- [11] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D, et al. Nature, 1968, 217: 709-713
- [12] Pacini F. Nature, 1967, 216: 567-568
- [13] Gold T. Nature, 1968, 218: 731-732
- [14] Radhakrishnan V, Manchester R N. Nature, 1969, 222: 228-229
- [15] Hulse R A, Taylor H J. Bulletin of the American Astronomical Society, 1974, 6: 453
- [16] Hulse R A, Taylor J H. ApJ, 1975, 195: L51-L53
- [17] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. Nature, 1982, 300: 615-618
- [18] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. Science, 2006, 311: 1901-1904
- [19] Wolszczan A, Frail D A. Nature, 1992, 355: 145-147
- [20] Lyne A G, Burgay M, Kramer M, et al. Science, 2004, 303: 1153-1157
- [21] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, 2007
- [22] Gell-Mann M. Phys. Letters, 1964, 8: 214-215
- [23] Zweig G. CERN Reports No. 8182/TH.401 and No. 8419/TH.412, 1964, (unpublished)
- [24] Ivanenko D, Kurdgelaidze D F. Lettere al Nuovo Cimento, 1969, 2:13
- [25] Itoh N. Progress of Theoretical Physics, 1970, 44: 291-292
- [26] Bodmer A R. Phys. Rev. D, 1971, 4(6): 1601-1606

- [27] Witten E. *Phys. Rev. D*, 1984, 30: 272-285
- [28] 张昊, 徐仁新. *天文学进展*, 2005, 23(2): 144-168
- [29] Olinto A V. *Phys. Lett. B*, 1987, 192: 71-75
- [30] Horvath J E, Benvenuto O G. *Phys. Lett. B*, 1988, 213: 516-520
- [31] Benvenuto O G, Horvath J E. *Physical Review Letters*, 1989, 63: 716-719
- [32] Benvenuto O G, Horvath J E, Vucetich H. *Int. J. Mod. Phys.*, 1989, A4: 257-265
- [33] Haensel P, Zdunik J L, Schaefer R. *A&A*, 1986, 160: 121-128
- [34] Alcock C, Farhi E, Olinto A. *ApJ*, 1986, 310: 261-272
- [35] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. *Phys. Rev.*, 1957, 108(5): 1175-1204
- [36] Barrois B C. *Nuclear Physics B*, 1977, 129: 390-396
- [37] Alford M, Rajagopal K, Wilczek F. *Physics Letters B*, 1998, 422: 247-256
- [38] Rapp R, Schäfer T, Shuryak E, et al. *Physical Review Letters*, 1998, 81: 53-56
- [39] Rajagopal K, Wilczek F. *At the Frontier of Particle/Physics Handbook of QCD*, Shifman M, ed., World Scientific, 2000 Chap. 35
- [40] Xu R X. *ApJ*, 2003, 596: L59-L62
- [41] Mannarelli M, Rajagopal K, Sharma R. *Phys. Rev. D*, 2007, 76(7): 074026
- [42] Xu R X, Qiao G J. *Chinese Phys. Lett.*, 1998, 15: 934-936
- [43] Adcox K, Adler S S, Ajitanand N N, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 88(2): 022301
- [44] Heinz U, Jacob M. *ArXiv Nuclear Theory e-prints*, 2000, nucl-th/0002042
- [45] Özel F. *Nature*, 2006, 441: 1115-1117
- [46] Alford M, Blaschke D, Drago A, et al. *Nature*, 2007, 445: 7-8
- [47] Özel F. *Nature*, 2007, 445: 8
- [48] Taylor R E. *Rev. Mod. Phys.*, 1991, 63(3): 573-595
- [49] Kendall H W. *Rev. Mod. Phys.*, 1991, 63(3): 597-614
- [50] Friedman J I. *Rev. Mod. Phys.*, 1991, 63(3): 615-627
- [51] Gross D J, Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30(26): 1343-1346
- [52] Politzer H D. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30(26): 1346-1349
- [53] Chodos A, Jaffe R L, Johnson K, et al. *Phys. Rev. D*, 1974, 9(12): 3471-3495
- [54] Farhi E, Jaffe R L. *Phys. Rev. D*, 1984, 30(11): 2379-2390
- [55] Qiu C X, Xu R X. *Chinese Physics Letter*, 2006, 23: 3205-3207
- [56] Weber F. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2005, 54: 193-288
- [57] Alford M. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2001, 51: 131-160
- [58] Yao W M, et al. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2006, 33: 1-1232
- [59] Xu R X. *MNRAS*, 2005, 356: 359-370
- [60] Alford M. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 2004, 30: 441-499
- [61] Xu R X. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2005, 5: 353-358
- [62] Baym G. *Proceedings of the 16th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM 2002)*, Nantes, France, July 18-24, 2002, *Nuclear Physics A*, 2002, 698
- [63] Satz H. *Proceedings of the 15th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM 2001)*, Stony Brook, New York, January 15-20, 2001, *Nuclear Physics A*, 2003, 715: 3-19
- [64] Shuryak E. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2004, 53: 273-303
- [65] <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>, 2007
- [66] Xu R X. *ApJ*, 2002, 570: L65-L68
- [67] Xu R X. *Advances in Space Research*, 2006, 37: 1992-1995
- [68] Zheng X, Yang S, Li J. *ApJ*, 2003, 585: L135-L138
- [69] Xu R X. *Gravitation and Astrophysics: on the occasion of the 90th year of General Relativity (Proceedings of the VII Asia-Pacific International Conference)*, Chen C M, Hsu J P, eds., World Scientific, 2007 159-167
- [70] Stairs I H. *Science*, 2004, 304: 547-552
- [71] Fahlman G G, Gregory P C. *Nature*, 1981, 293: 202-204

- [72] Woods P M, Thompson C. Compact stellar X-ray sources, Lewin W H G, van der Klis M, eds., Cambridge astrophysics series. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006 547-586
- [73] Mazets E P, Golentskii S V, Ilinskii V N, et al. Nature, 1979, 282: 587-589
- [74] Laros J G, Fenimore E E, Klebesadel R W, et al. ApJ, 1987, 320: L111-L115
- [75] Leibowitz E M, Danziger I J. MNRAS, 1983, 204: 273-287
- [76] Pavlov G G, Sanwal D, Teter M A. Young Neutron Stars and Their Environments, Camilo F, Gaensler B M, eds., 2004, vol. 218 of *IAU Symposium* 239-246
- [77] Walter F M, Wolk S J, Neuhäuser R. Nature, 1996, 379: 233-235
- [78] Haberl F. 5 years of Science with XMM-Newton(Proceedings of the 2005 EPIC XMM-Newton Consortium Meeting), MPE Report 288, Briel U G, Sembay S, Read A, eds., 2005 39-44
- [79] Wijnands R. Trends in Pulsar Research, Lowry J A, ed., 2006, astro-ph/0501264
- [80] Camilo F, Ransom S M, Halpern J P, et al. Nature, 2006, 442: 892-895
- [81] Camilo F, Ransom S M, Halpern J P, et al. ApJ, 2007, 666: L93-L96
- [82] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. Aj, 2005, 129: 1993-2006
- [83] McLaughlin M A, Lyne A G, Lorimer D R, et al. Nature, 2006, 439: 817-820
- [84] Kramer M, Lyne A G, O'Brien J T, et al. Science, 2006, 312: 549-551
- [85] Tiengo A, Mereghetti S. ApJ, 2007, 657: L101-L104
- [86] Wijnands R, van der Klis M. Nature, 1998, 394: 344-346
- [87] Papitto A, Menna M T, Burderi L, et al. ApJ, 2005, 621: L113-L116
- [88] Li X D, Bombaci I, Day M, et al. Physical Review Letters, 1999, 83: 3776-3779
- [89] Stocke J T, Wang Q D, Periman E S, et al. Aj, 1995, 109: 1199-1203
- [90] Drake J J, Marshall H L, Dreizler S, et al. ApJ, 2002, 572: 996-1001
- [91] Burwitz V, Haberl F, Neuhäuser R, et al. A&A, 2003, 399: 1109-1114
- [92] Chen A, Yu T, Xu R. ApJ, 2007, 668: L55-L58
- [93] Zhang X L, Xu R X, Zhang S N. Young Neutron Stars and Their Environments, Camilo F, Gaensler B M, eds., 2004, vol. 218 of *IAU Symposium* 303-304
- [94] Zhang B, Sanwal D, Pavlov G G. ApJ, 2005, 624: L109-L112
- [95] Yue Y L, Cui X H, Xu R X. ApJ, 2006, 649: L95-L98
- [96] Ruderman M A, Sutherland P G. ApJ, 1975, 196: 51-72
- [97] Wang Z, Chakrabarty D, Kaplan D L. Nature, 2006, 440: 772-775
- [98] Walter F M, Matthews L D. Nature, 1997, 389: 358-360
- [99] Pons J A, Walter F M, Lattimer J M, et al. ApJ, 2002, 564: 981-1006
- [100] Motch C, Zavlin V E, Haberl F. A&A, 2003, 408: 323-330
- [101] Kaplan D L, van Kerkwijk M H, Marshall H L, et al. ApJ, 2003, 590: 1008-1019
- [102] Kaplan D L, Kulkarni S R, van Kerkwijk M H. ApJ, 2003, 588: L33-L36
- [103] Motch C, Sekiguchi K, Haberl F, et al. A&A, 2005, 429: 257-265
- [104] Camilo F, Ransom S M, Peñalver J, et al. ApJ, 2007, 669: 561-569
- [105] Keränen P, Ouyed R. A&A, 2003, 407: L51-L54
- [106] Li X D. ApJ, 2006, 646: L139-L142
- [107] Wang Q D, Lu T. Physics Letters B, 1984, 148: 211-214
- [108] Dai Z, Peng Q, Lu T. ApJ, 1995, 440: 815-820
- [109] Xu R X, Dai Z G, Hong B H, et al. ArXiv Astrophysics e-prints, 1999, astro-ph/9908262
- [110] Madsen J. Phys. Rev. D, 1992, 46: 3290-3295
- [111] Dai Z G, Lu T. Physical Review Letters, 1998, 81: 4301-4304
- [112] Paczyński B, Haensel P. MNRAS, 2005, 362: L4-L7
- [113] Ouyed R, Rapp R, Vogt C. ApJ, 2005, 632: 1001-1007
- [114] Cui X H, Wang H G, Xu R X, et al. A&A, 2007, 472: 1-3
- [115] Huang Y F, Dai Z G, Lu T, et al. ApJ, 2003, 594: 919-923
- [116] Cen R. ApJ, 1998, 507: L131-L134

- [117] Ouyed R, Dey J, Dey M. *A&A*, 2002, 390: L39–L42
- [118] Pavlov G G, Kargaltsev O, Garmire G P, et al. *ApJ*, 2007, 664: 1072–1078
- [119] Ivanova N, Heinke C O, Rasio F A. *ArXiv e-prints*, 2007, 0711.3181
- [120] Zhou A Z, Xu R X, Wu X J, et al. *Astroparticle Physics*, 2004, 22: 73–79
- [121] Shabanova T V. *MNRAS*, 2005, 356: 1435–1439
- [122] Peng C, Xu R X. *MNRAS*, 2007, 384: 1034–1038
- [123] Reichley P E, Downs G S. *Nature*, 1969, 222: 229–230
- [124] Lyne A G, Graham-Smith F. *Pulsar astronomy*. Cambridge astrophysics series. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006
- [125] Pizzochero P M. *ArXiv e-prints*, 2007, 0711: 3393
- [126] Xu R X, Tao D J, Yang Y. *MNRAS*, 2006, 373: L85–L89
- [127] Stairs I H, Lyne A G, Shemar S L. *Nature*, 2000, 406: 484–486
- [128] Zhu W W, Xu R X. *MNRAS*, 2006, 365: L16–L20
- [129] Liu K, Yue Y L, Xu R X. *MNRAS*, 2007, 381: L1–L5
- [130] Haberl F, Turolla R, de Vries C P, et al. *A&A*, 2006, 451: L17–L21
- [131] Hyman S D, Lazio T J W, Kassim N E, et al. *Nature*, 2005, 434: 50–52
- [132] Usov V V, Melrose D B. *Australian Journal of Physics*, 1995, 43: 571–612
- [133] Qiao G J, Lee K J, Zhang B, et al. *ApJ*, 2004, 616: L127–L130
- [134] Qiao G J, Lee K J, Wang H G, et al. *ApJ*, 2004, 606: L49–L52
- [135] McLaughlin M A, Lorimer D R, Champion D J, et al. *Young Neutron Stars and Their Environments*, Camilo F, Gaensler B M, eds., *IAU Symposium*, 2004, 218: 127–128
- [136] Xu R X, Cui X H, Qiao G J. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2006, 6: 217–226
- [137] Cui X H, Yue Y L, Xu R X, et al. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2006, 6: 287–290
- [138] Zheng X, Zhou X, Yu Y. *MNRAS*, 2006, 371: 1659–1662
- [139] Yu Y W, Zheng X P. *A&A*, 2006, 450: 1071–1075
- [140] Wu F, Xu R X, Ma B Q. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2007, 34: 597–605
- [141] Madsen J. *Physical Review D (Particles and Fields)*, 2005, 71(1): 014026
- [142] Cheng K S, Usov V V. *Phys. Rev.D*, 2006, 74(12): 127303
- [143] Ouyed R, Keränen P, Maalampi J. *ApJ*, 2005, 626: 389–395
- [144] Choutko V, AMS-01 Collaboration. *International Cosmic Ray Conference*, 2003 1765–1768
- [145] 吴飞, 徐仁新. *天文学进展*, 2003, 21(2): 139–151
- [146] Xu R X. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2006, 6: 279–286
- [147] Weber F. *Pulsars as astrophysical laboratories for nuclear and particle physics*. Bristol, U.K.: Institute of Physics, 1999
- [148] Glendenning N K. *Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity*. New York: Springer-Verlag, 2000

Progress in the Research of Quark Star

YUE You-ling, XU Feng, LAI Xiao-yu, XU Ren-xin

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

Abstract: During the 1960s and 1970s, hadrons were suggested to have substructures, i.e. quarks. In the 1970s, asymptotic freedom was found in deep inelastic scattering experiments and soon proved by theory, which inspired the idea of quark matter. Does quark matter exist? To prove the existence of quark matter or not will put considerable constrain on current theory of strong interaction. Quark star is one of the possible existences of quark matter. Studying of quark star is an effective way to understand superanuclear physics. The history of pulsar, quark star and neutron star is briefly reviewed in §1. We introduce the development of quark star theory in the early stage and the recent development of color-superconducting. The relation between pulsar, neutron star and particle physics is also presented. The difficulties to distinguish quark stars and neutron stars are mentioned. In §2, we present phenomenological description of quark matter. Phase diagrams considering color-superconducting and quark-clustering are shown. Possible color-superconducting phase such as color-flavor locked phase and two-flavor color-superconducting phase are discussed. The highly non-perturbation property of quantum chromodynamics and the difficulty in lattice quantum chromodynamics are discussed. Possible evidences for quark matter from heavy ion collider experiments are mentioned. In §3, we summarized the general properties of quark stars and their differences from neutron stars, including the surface electron layer, the idea of bare quark star, the mass-radius relation, and the upper limit of spin period. Recent research progresses in the study of quark star are summarized in §4 and §5. Possible ways to distinguish between quark star and normal neutron star are discussed, i.e. by featureless spectrum, low mass and small radius, and spin period less than 0.5 millisecond. Several quark star candidates are suggested, i.e. the accretion-driven millisecond X-ray pulsar SAX J1808.4-3658, RX J1856-3754 which has quite good featureless black body spectrum, and PSR B0943+10 which is likely to have small radius. Infrared emission and possible existence of accretion disk around newly-discovered pulsar-like stars are also introduced. Theoretical works including possible formation scenarios of quark stars and the connection to supernova and gamma-ray burst, the glitch phenomenon and star quark model, and quark star surface property are presented. Finally, a short introduction of recent work on quark matter as cosmic rays is given in §6.

Key words: astrophysics; quark star; pulsar; neutron star