

脉冲星与夸克星

Pulsars and Quark Stars

徐仁新/XU Ren-xin, 岳友岭/YUE You-ling

北京大学物理学院天文学系, 北京 100871

Astronomy Department, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

[摘要] 简要地回顾了脉冲星、中子星和夸克星的研究历史;总结了当前(特别是笔者所在研究小组)对于夸克星研究的进展并指出所面临的主要问题,特别讨论了区分普通中子星和夸克星的可能途径;给出了一些夸克星候选体以及未来可能的观测检验。

[关键词] 致密物质;脉冲星;夸克星;中子星

[中图分类号] P1, O41

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)09-0005-04

Abstract: Studies of pulsars, neutron stars, and quark stars are reviewed. After a brief introduction to the research history, recent achievements of quark stars are presented, with a focus of the work by the authors' group. Possible challenges, especially the ways to distinguish normal neutron stars and quark stars, are discussed. Quark star candidates are suggested, which could be tested by future observations.

Key Words: dense matter; pulsars; quark stars; neutron stars

CLC Numbers: P1, O41

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)09-0005-04

1 历史回顾

在已知的各种粒子之间的4种基本相互作用中,引力因其长期性和不可屏蔽性而在人类探索大尺度物理规律时占有极其重要的地位。一般认为,天体是引力束缚的宇观客体。恒星其实就是内部压力与引力互相平衡的一团热气体,它们需要中心核能源维持一定的高温状态。当耗尽核能源后而冷却时,恒星是否不可避免地引力塌缩呢?1926年,当英国物理学家Dirac关于新的量子统计(后称为“Fermi-Dirac”统计)的论文发表仅几个月后,Ralph Howard Fowler就撰文给予了否定的回答^[1]:费米(Fermi)子的量子简并压也可以抵抗引力。他的这一看法解决了当时天文学界曾经长期存在的“白矮星之谜”:白矮星其实为电子简并压平衡引力的天体。恰逢今年乃是Fowler提出上述思想80周年,谨撰此文予以纪念。

1931年,Chandrasekhar在Fowler工作的基础上,在刻画白矮星物态时考虑了相对论性能动量关系。他的数值计算发现,白矮星存在一个极限质量(约1.4M_⊙,M_⊙即太阳质量),即现在所熟知的Chandrasekhar极限质量。超过此极限质量的白矮星不能稳定存在。Chandrasekhar因这一工作而荣获1983年度诺贝尔物理学奖。然而在1932年,Chadwick发现中子后不久,Landau随即敏锐地意识到,超过Chandrasekhar极限质量的白矮星内部可能会出现一种密度与核物质密度相当的物质(中文翻译稿及评论见引文[2]的附录一)。这种致密物质主要由中子组成,由它为主构成的星体即后人所称的“中子星”。1934年,Baade和Zwicky进一步指出,中子星可以在超新星爆发过程中产生。但Oppenheimer和Volkoff于1939年的计算表明,中子星半径仅10 km左右。这使得直接观测中子星表面辐射在当时几乎是不可能的(实际上第一

次实现中子星热辐射的观测已经是20世纪90年代了);中子星研究由此也告一段落。当然,有关中子星的研究并未完全停止。比如,人们将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,也有学者讨论这些源是中子星的可能性。甚至在1967年,仅在脉冲星发现前几个月,Pacini还讨论了旋转磁化中子星的磁偶极辐射给超新星遗迹供能的可能性。

1967年射电脉冲星的发现无疑是这类探索的里程碑。诚然,这一重大发现是与Bell女士的细心分不开的。人们很快意识到脉冲星的周期其实就是快速旋转中子星的自转周期,而不是被发现初期所认为的白矮星或中子星的震荡周期。有关脉冲星时钟特性、辐射机制、内部结构等各相关方面的研究从此迅速开展。在脉冲星研究方面,除了Hewish因发现脉冲星而荣获1974年度诺贝尔物理学奖外,Hulse和Taylor则利用脉冲双星系统间接验证引力波的存在于1993年再度获奖。即使在近40年后的今天,脉冲星依然吸引着众多天体物理学家。

以上的科学历程似乎非常完美:脉冲星就是30多年前早就预言的中子星。然而,与脉冲星发现同一时代的另一项微观领域的重要发现却使得人们对这一结论存疑。1964年,Gell-Mann和Zweig相互独立地提出了强子由夸克组成的思想(我国学者也在那个时代建立了类似的“层子”模型,只可惜因“文革”的影响没有得到进一步发展——笔者注)。仅几年之后,夸克模型就与脉冲星研究联系起来。Ivanenko和Kurdgelaidze于1969年讨论了中子星内部出现夸克物质(即由自由夸克等组成的物质)的可能性。不过,值得注意的是,夸克星几乎是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。{u, d, s}三味夸克物质因奇

收稿日期:2006-08-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10573002)

作者简介:徐仁新,男,北京海淀区北京大学物理学院天文学系,教授,主要从事脉冲星、天体夸克物质等粒子天体物理研究;

E-mail: r.x.xu@pku.edu.cn

异数非零, 又称为奇异夸克物质。Itoh 甚至在 1970 年尝试计算了奇异夸克物质组成的致密星(即现在所称的奇异夸克星, 或奇异星)的流体静力学平衡状态。1971 年, Bodmer 讨论了奇异夸克物质的稳定性。1984 年, Witten 较详细地讨论了奇异夸克物质的可能存在形式: 宇宙早期的夸克胶子等离子体态; 奇异星; 宇宙射线中的奇异滴(strangelet)。他同时也提出了一个大胆的猜想: 大块奇异夸克物质是最稳定的强作用体系。这一猜想的直接后果是认为奇异星是最可能存在的夸克星, 自然界很可能存在奇异星。遗憾的是, 目前尚不能从理论或实验角度肯定或否定 Witten 的猜想。所以, 夸克星存在的可能性至今尚不能完全被排除。

1986 年, Haensel 等和 Alcock 等分别对夸克星的基本性质进行了研究, 发现大质量夸克星可以达到半径约 10 km, 质量约 1.4 M_{\odot} , 与中子星非常相似。通常, 人们认为脉冲星就是中子星, 而往往忽略了夸克星。这纯属一种历史偶然。因为在脉冲星发现之时, 有关夸克的理论模型才刚刚提出, 根本来不及提出夸克星的概念。对夸克星的讨论到 20 世纪 80 年代才比较深入, 但此时中子星概念已经非常流行、先入为主。同时, 由于夸克星与中子星的一些性质非常类似, 早期以射电为主的观测研究对这两类天体不能起到明显的区分作用, 所以天文学家也往往不重视去研究脉冲星到底是中子星还是夸克星。将夸克星广义地归类于中子星的做法是十分牵强的, 因为夸克星的内部很可能根本没有一粒中子。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 射线卫星的运行使观测区分夸克星和中子星成为可能。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多种观测特征。很可能在接下来的二三十年内, 人们关于脉冲星结构的研究会有定论。

对脉冲星本质的研究涉及夸克星是否真实存在, 具有很高的学术价值。目前夸克物质仍然只是理论预言。若脉冲星就是夸克星, 无疑验证了这一预言。更重要的是, 原则上可以通过观测脉冲星的各种表现来获取夸克物质的性质, 进而丰富人们关于基本强作用的知识。此外, 若确认夸克星是大质量恒星演化的残骸, 势必很大程度上改善我们对于若干天体物理过程(如宇宙早期相变、超新星爆发、宇宙线等)的认识。

以下拟阐述夸克星的研究进展, 将介绍夸克星不同于中子星的若干性质及其特有的观测表现, 指出区分这两类天体的可能途径和一些夸克星候选体。

2 夸克物质与夸克星

20 世纪物理学的重要成就之一是建立了粒子物理标准模型。该模型认为, 自然界中的物质以基本 Fermi 子(包括夸克和轻子)及导致其间相互作用的规范玻色子(光子、 W 和 Z^0 、胶子和引力子)为基本单元。在这些基本相互作用中, 电弱统一相互作用已经被非常精确地检验, 在不涉及 Planck 尺度时, 引力可以很好地被广义相对论描述, 然而人们对于强相互作用的认识却相对贫乏。

量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)被普遍地认为是描述夸克间强相互作用的潜在理论框架, 类似于带电物体之间存在电磁作用。QCD 认为, 带色荷的夸克之间存在强作用。电荷只有 1 种, 而色荷却有 3 种, 取名为红、绿、蓝。无色荷体系称为色单态或“白色”。该理论能够证明实验上发现的强作用渐近自由(asymptotic freedom)特性(被 Gross, Wilczek, Politzer 于 1973 年在非 Abel 规范理论基础上证明。这 3 位学者同获 2004 年度诺贝尔物理学奖——笔者注)。渐近自由是指在高能量极限下, 夸克之间的强作用越来越弱, 几乎消失。因为还没有一个实验探测到带

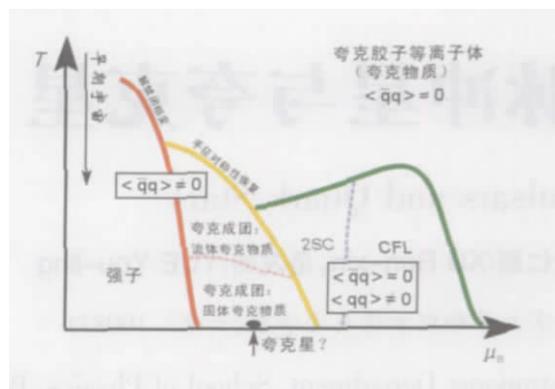


图 1 可能的 QCD 相图^[3]。横轴 μ_b 为重子化学势, 纵轴 T 为温度

Fig. 1 Schematic illustration of QCD phase diagram^[3]

色粒子, 人们一般也认为带色夸克只能囚禁在无色的强子内部, 即色禁闭(color confinement)。值得注意的是, 色禁闭目前还只是基于已有实验的设想, 尚没有严格理论证明。基于渐近自由, 在高能情形下可以用微扰论处理 QCD, 相应的理论即微扰 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, 因数学上的复杂性, 目前 LQCD 尚主要集中于计算接近零重子化学势的高温情形。但不幸的是, 我们感兴趣的致密星内部却是高重子化学势、低温的。

渐近自由和色禁闭这 2 个基本特性决定了强作用体系的 2 种物态: 低能量密度下(温度 T 和重子化学势 μ_b 都较低)的强子气相和高能量密度下(T 或 μ_b 较高)的夸克、胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP; 或“夸克物质”)相(见图 1)。可见, 夸克物质的可能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, 人们推测在高温(例如宇宙的早期)或高密(例如在致密星内部)环境下也许会出现夸克物质。在低温且低密的情况下, 夸克结合为强子。然而不清楚的一个关键问题是: 在什么样的 T 和 μ_b 时强子会相变为 QGP (或反之)。但由于发生相变时的严重非微扰因素, 学者们至今还不能根据 QCD 得出确切的相变参数。实验研究相变参数并发现夸克物质也许是不得已的一种努力。事实上, 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。但是由于夸克解禁后会很快强子化, QGP 存在的时间极短, 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。计划于 2007 年运行的下一代对撞机 LHC (The Large Hadron Collider)也将致力于寻找 QGP。

由此可见, 一种明智的选择是以实验为出发点研究 QCD 相图。除了地面实验外, 天体所能够提供的极端环境也是非常珍贵的。类似于一般物质的状态, 强作用物质也许并不能简单地归结于两相。人们首先意识到的是, 类似于低温超导中电子在动量空间的凝聚, 低温高密的夸克物质因夸克间强吸引作用也可能导致夸克 Fermi 海不稳, 出现价夸克的凝聚($\langle qq \rangle \neq 0$)。这样凝聚的夸克携带色荷, 故称为色超导(color-superconducting, CSC)。事实上 CSC 可能有 2 种形式: 两味色超导相(two-flavor color-superconductivity phase, 2SC)和色味锁相(color-flavor locked phase, CFL)。后者出现于重子化学势远高于奇异夸克质量的情形; 而 2SC 发生在 μ_b 较小时, 只有上、下夸克参与凝聚。

可以借助手征对称性的概念认识 QCD 相图上不同位置处的

真空性质。我们知道,无质量 Fermi 子的螺旋度(helicity,即自旋沿运动方向的分量)是守恒的。这一守恒性,在量子场论中又称为手征对称性。具体地讲,无质量 Fermi 子的 Lagrange 密度具有手征对称性;但若 Fermi 子质量非零,则手征对称性破缺。QCD 研究发现,夸克-反夸克的真空期望值在高能极限下为零($\langle qq \rangle = 0$),而低能极限下非零($\langle qq \rangle > 0$)。后者又称为海夸克凝聚。类似于超导体(一种理解超导体完全排磁性(Meissner 效应)的方式是认为超导体中因电子动量空间凝聚而使光子获得质量;那里激发电子(电磁场)被严重抑制,故排磁——笔者注),在海夸克凝聚的真空只能激发质量明显非零的价夸克(上、下夸克的流质量只有~10 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)——笔者注),手征对称性破缺。一些计算还发现,随着能标的增高,海夸克凝聚逐渐减弱且夸克间耦合强度也降低,这表明手征对称性得到一定程度的恢复。

研究发现,在 QCD 相图上手征对称性恢复和夸克囚禁可能不一定同时出现。如果这 2 种相变真的不同时发生,在夸克解禁但手征对称性破缺的地带夸克物质会有怎样的性质呢?在此情形下,穿衣夸克可能携带~300 MeV 的质量,原则上可以自由运动,但夸克间的色耦合却非常强。类似于核子层次上 a 集团的概念,会不会出现夸克成团呢?这种成团是夸克在位形空间的一种凝聚。目前似乎并不能完全排除这一可能性。由若干夸克聚集而成的团块在夸克物质内部运动时波包小而不互相重叠,很像经典粒子。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。我们猜测,可能存在的一些夸克星也许就是由这种固体夸克物质构成的。进一步地,若夸克集团的磁矩非零,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。这也许是脉冲星强偶极磁场的一种简单起源。

由于实验上的困难,夸克物质(特别是低温高密的夸克物质)目前还很难由对撞机实验产生。于是,夸克星就成为了人们研究夸克物质的不可忽略的重要天体实验室。以上对于 QCD 相图的讨论只是定性的、唯象的,显然,我们需要对夸克星更多的观测特征进行研究,以使得 QCD 相图得到进一步的检验和改善。

3 夸克星的天体物理研究 I——结构特征

如果认为是夸克星(而不是正常中子星)于超新星爆发过程中形成,也许能够解决当今的“引力塌缩型超新星爆发疑难”。人们普遍认为,观测到的脉冲星是大质量恒星演化到晚期发生超新星爆发后遗留的产物,然而不幸的是,至今不少超新星爆发模拟计算往往不能实现这个过程。这一疑难存在已久,至今没能很好地解决。已有的模拟计算都认为形成正常中子星。但如果形成的是奇异星又会怎样呢?因夸克物质高的热导率,裸奇异星表面温度很高,达~30 MeV,可能会在星体表面以外很快形成一主要由光子、轻子对(如 e^+) 为主构成的低重力丰度的相对论性火球。我们的计算发现,此膨胀火球对外围物质的做功有可能抛射前身星(即超新星爆发之前的大质量恒星)包层,导致超新星的成功爆发。若这一膨胀是非球对称的,或许也同时提供了观测到的 γ 射线长爆的火球。

星体夸克表面的存在可能不但有助于超新星的成功爆发,而且还方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,它可能类似于金属表面的热辐射。因为在夸克表面附近电子处于连续态,所以肯定不会像中子星那样产生原子谱线。Chandra 和 XMM-Newton 2 颗卫星对 RX J1856-3754 的 X 射线观测得到了极好的黑体谱(没有原子谱线),这对于夸克星模型或许是一个支持。

夸克星可以拥有比较小的半径 R 和质量 M (原则上质量可

以接近于零),且小质量夸克星满足 $M \propto R^3$ 。但中子星最小质量约 0.1 M_{\odot} ,且小质量中子星满足 $M \propto R^{-3}$,这是夸克星与中子星之间的另一个重要区别。最近观测一些脉冲星类天体的热 X 射线辐射,发现它们辐射半径似乎都比 10 km 小。例如 RX J1856-3754 的辐射半径仅 4.4 km。这也许对小质量夸克星是一个支持。小质量夸克星可能在白矮星的 AIC(accretion induced collapse)过程中形成。它们除了质量和半径都比较小之外,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 ($M_1=M/M_{\odot}$, $R_6=R/10^6$ cm),对于 $M=1.4M_{\odot}$, $R=10$ km 的中子星来说,周期 P 下限为 0.6 ms。由于转动不稳定性与星体变扁等因素,实际值会高一些。已观测到的射电脉冲星的最短周期为 1.4 ms。对于低质量夸克星,其 P 可以更小,甚至小于 0.1 ms。如果能够找到一颗 $P < 0.5$ ms 的脉冲星,或许就可以断言脉冲星本质上就是夸克星。我国将要建设的 500 m 射电望远镜 FAST(five hundred meter aperture spherical telescope)会在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 是有可能发现它们的。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 的探测上限或许可以限制脉冲星的质量。

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,变化幅度 $P/P \sim (10^{-9} \sim 10^{-6})$ 。这一个有趣的现象称为脉冲星的自转周期突跳(glitch),它可以被理解为固体夸克星上发生的星震。由于转动,星体的平衡位形是椭球形的。随着转动周期的增加,椭球的扁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扁率,而是积累弹性阻碍形变。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 也同时突然减小。同时,固体夸克星星震将伴随着能量释放。震幅越大,释放能量越强烈。这可能是某些软 γ 射线重复爆巨耀斑的能量来源。这种爆发如果发生在比较远的距离上,还可能用来解释 γ 射线短爆。尽管夸克星是否为固体目前还很难定论,但观测到的某些射电脉冲星进动现象或许是个间接证据。

4 夸克星的天体物理研究 II——磁层辐射

尽管发现脉冲星至今已近 40 年,但尚不非常清楚其磁层中如何产生各种波段的电磁辐射。人们为此建立了有关脉冲星磁层辐射的多种模型。其中真空间隙这类模型具有一定的合理性,因为它们能够自然地解释脉冲星射电辐射中观测到的一种特殊现象——漂移子脉冲。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,依赖于在脉冲星表面粒子的束缚能可否足够高。有计算表明,中子星表面一般很难达到足够高的束缚能。而夸克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到可以形成真空间隙。值得注意的是,裸奇异星可能出现 2 个区域的真空间隙:核区间隙与环区间隙。建立在这个基础上的模型能够较好地解释双漂移子脉冲、多波段辐射等现象^[49]。

假设脉冲星的自转能量损失全部因磁偶极辐射造成,可以估计其表面磁场:

$$B = 6.4 \times 10^{19} \sqrt{P \dot{P} / \sin \alpha} \text{ G}$$

其中取星体转动惯量为 10^{45} g·cm²,这是人们估计脉冲星磁场的常规方法。但是实际上,脉冲星都是倾斜转子,并不是理想的磁偶极子。当磁倾角 α 非零时,脉冲星的总磁矩可以表示为: $\mu = \mu_{\parallel} + \mu_{\perp}$,其中 $\mu_{\parallel} = \mu \sin \alpha$, $\mu_{\perp} = \mu \cos \alpha$ 。相应地,总的自转能损率实际上由两部分组成:磁偶极辐射能损率(E)和单极感应导致的粒

寻找宇宙中的暗物质

Detecting Dark Matter in the Universe

毕效军/BI Xiao- Jun

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

[摘要] 宇宙中存在暗物质已经得到大量天文观测的证实, 但关于暗物质粒子的本质我们仍旧一无所知。为了理解暗物质的性质, 许多暗物质探测实验正在展开。直接探测实验探测的是暗物质粒子与探测器物质碰撞所留下的信号, 而间接探测实验则寻找暗物质湮灭的产物, 如高能伽马射线、高能中微子、正电子和反质子等。理解暗物质所产生的这些信号需要我们对暗物质的微观粒子的性质, 同时也需要了解暗物质在星系或星系团中的分布形式等宏观性质。随着更大规模、更高灵敏度的实验不断投入运行, 暗物质之谜有可能在不久的将来得以破解。

[关键词] 暗物质; 直接探测; 间接探测

[中图分类号] O572.2, P159

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)09-0008-05

Abstract: The existence of dark matter in the universe has been confirmed by a lot of astronomy observations. However, we do not know the properties of dark matter yet. In order to learn the nature of dark matter, many experiments searching for dark matter are taking data or are under construction. By direct detection the experiments look for the signal when the dark matter particles scatter off the nuclei of the detector material; by indirect detection the experiments look for the annihilation products of dark matter, such as the high energy gamma rays,

收稿日期: 2006-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575111)

作者简介: 毕效军, 男, 北京市玉泉路 19 号中科院高能物理研究所, 副研究员, 主要从事粒子物理和宇宙学、天文学的研究;

E-mail: bixj@mail.ihep.ac.cn

子外流能损率(E_{out})。因为这两部分的能损率对转动角频率的依赖程度不同, 理论上就会得到在 1 至 3 之间变化的制动指数 n (定义为 $n = -\frac{d \log E_{\text{out}}}{d \log \nu}$)。因为观测上的困难, 至今只有 6 颗脉冲星有可靠的制动指数观测值。这 6 个值在 1.4~2.9 之间。

脉冲星是否带有单极电荷? 这是一个非常基本的问题。遗憾的是在脉冲星研究的近 40 年来, 人们似乎并没有意识到这一重要而又基本的问题及其隐含的深远意义。通过对脉冲星磁层及整体电路的研究, 我们得到这样一个结论: 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, 脉冲星很可能携带单极电荷 $Q_c \sim 10^{-3} R_0^3 B_{12} / P^2$ 库仑 (R_0 为以 10^6 cm 为单位的脉冲星半径, B_{12} 为以 10^{12} G 为单位的脉冲星极区磁场, 自转周期 P 以 s 为单位); 若实际带电荷多于或少于 Q_c , 则环间隙加速区的大小将有所改变。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。

5 总结

以笔者所在研究小组的工作为主, 我们综述了夸克星的研究进展状况。关于观测到的脉冲星的本质, 目前主要存在两种看法: 中子星和夸克星。遗憾的是至今尚不能完全排除其中任何一种观点。中子星和夸克星具有不同的性质, 也许通过对脉冲星类天体更多的观测特征的研究、分析, 人们终将有希望对这两种看法作出选择。如果能观测证认夸克星的存在, 对于我们深入理解粒子的基本强相互作用和进一步认识相关天体物理过程都将具有深远意义。关于这方面研究的更多内容, 可参阅引文^[6]。

有关脉冲星组成认识上的不确定性, 根本原因是 QCD 低能

的高度非微扰特性。指望通过 QCD 计算来明确地给出超核密度物质的组成和性质也许是不现实的。因此, 强调和倡导在脉冲星结构研究方面重视观测表现和唯象研究是很有必要的。然而, 如果 QCD 处在低能情形则很难得到确切的结论。是否会影响到人类对于自然界的审美观? 如果真的不能根据 QCD 算出众多的低能现象, 我们觉得也不必奇怪, 如同人们算不清湍流和混沌运动, 但它们确实在自然界中普遍发生着, 并且是符合美学标准的。

最后值得一提的是, 天体物理过程往往是异常复杂的, 从观测现象中提取所需要的反映物理本质的信息常常不是一个容易达到的目标。这就要求相关学者具有正确的科学观和严谨求实的学风, 切忌捕风捉影式地片面追求科学目标(这样的反面例子还不算少)。

参考文献(References)

- [1] FOWLER R H. On dense matter[J]. MNRAS, 1926, 87: 114-122.
- [2] 徐仁新. 天体物理导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [3] XU R X. 1E 1207.4-5209: a low-mass bare strange star?[J]. MNRAS, 2005, 356: 359-370.
- [4] QIAO G J, LEE K J, WANG H G, et al. The inner annular gap for pulsar radiation: gamma-ray and radio emission [J]. ApJ, 2004, 606: L49-L52.
- [5] QIAO G J, LEE K J, ZHANG B, et al. A Model for the Challenging "Bi-drifting" Phenomenon in PSR J0815+09 [J]. ApJ, 2004, 616: L127-L130.
- [6] WEBER F. Strange quark matter and compact stars[J]. Prog Part Nucl Phys, 2005, 54: 193-288.

(责任编辑 胡春华)