

脉冲星、中子星与夸克星

徐峰^① 岳友岭^② 徐仁新^③

①②博士, ③教授, 博士生导师, 北京大学物理学院, 北京 100871

关键词 脉冲星 中子星 夸克星

关于观测到脉冲星的本质目前存在两种看法: 中子星和夸克星。本文简述了脉冲星、中子星与夸克星的相关的研究历史以及这些天体的基本性质和可能观测表现, 展望了我国在此研究方向的发展前景。

脉冲星以其发射有规律的“时钟”信号为典型特征。它们的密度高于原子核密度, 表面磁场往往达到 10^8 T, 自转可快至毫秒周期。这些特点奠定了脉冲星在天文学及物理学研究中的重要地位: 它们既是人们探索宇宙的有效工具, 也是检验基本物理规律(如强引力场效应、微观强相互作用性质等)的重要场所。适逢 2007 年是脉冲星发现 40 周年, 谨撰此文予以纪念。

1 脉冲星研究的历史

让我们从相关研究的历史谈起。1932 年, Chadwick 发现中子; 这使人们终于明白了原子核的组成: 原子核是由质子和中子构成的。同年 Landau 敏锐地意识到, 在质量很大的恒星内部或许会出现一种密度接近原子核的致密物质。这种物质主要是由中子组成, 由它构成的星体即为后来所称的“中子星”。简单地讲, 中子星可以形象地看作一个巨大的原子核。1934 年, Baade 和 Zwicky 对于超新星的研究表明, 中子星或许可以在超新星爆发过程中产生。然而, 1939 年 Oppenheimer 和 Volkoff 的计算给出的中子星的质量上限与太阳质量相当, 但所具有的半径仅为 10 km 左右。我们知道, 星体的发光能力是与它的表面积成正比的; 因此当时最大的光学望远镜也不可能探测到来自中子星表面的热辐射。中子星研究从此开始降温, 但相关研究并未完全停止。甚至于 1967 年, 在脉冲星发现的前几个月, Pacini 还讨论了旋转磁化中子星的偶极辐射为超新星遗迹提供能源的可能性。

1967 年, Bell 和 Hewish 在研究射电波段星际闪烁时意外地发现了一种规则的周期性信号, 其周期约为 1 秒。发射这种周期性信号的天体就称为脉冲星。这一事件无疑是里程碑式的。人们很快意识到这种周期性起源于星体的自转。而在当时了解的天体中, 能够转得

如此之快的, 非中子星莫属。啊! 原来脉冲星就是早先在理论上预言的中子星。在 30 多年后人们才无意中在射电波段观测到来自中子星的周期性信号。在此之后, 关于脉冲星的时钟特性、辐射机制以及中子星内部结构等的研究迅速发展。在脉冲星领域中, 除了 Hewish 因发现脉冲星而获得 1974 年度诺贝尔物理学奖之外, Hulse 和 Taylor 由于利用脉冲双星系统间接证明引力波的存在于 1993 年获得诺贝尔物理学奖。图 1 表示了脉冲星辐射的几何, 射电辐射从磁极区发射。

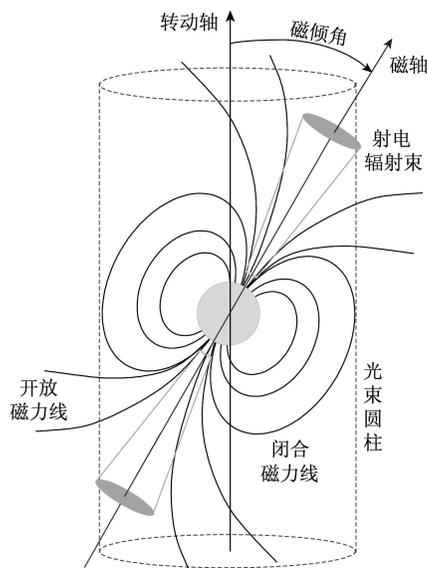


图 1 脉冲星辐射几何示意图

以上的科学历程可以称得上完美了: 早就预言存在的中子星其实可能就是 30 多年后观测到的脉冲星。然而, 人们关于强子内部结构的研究, 使得这一故事的后续发展似乎带有戏剧性。强子是指参与强作用的粒子, 包括质子、中子、 π 介子等。人们一度认为强子是基本的, 但强子分类的研究使部分学者怀疑强子可能是由更

基本的粒子组成的。1964年, Gell-Mann 和 Zweig 各自独立地提出强子是由更深层次的夸克^{*}组成的。仅在几年之后, 夸克这一概念就影响到了中子星结构的研究。在非常高的密度下, 囚禁于质子、中子内部的夸克会获得自由吗? 由夸克为基本组分而构成的物质称为“夸克物质”。1969年, Ivanenko 和 Kurdgelaidze 讨论了中子星中心区域出现夸克物质的可能性, 而几乎完全由夸克物质构成的星体则称为夸克星。人们相信一种特殊的夸克物质——奇异夸克物质——是比较稳定的, 它由几乎等量的上夸克、下夸克、奇异夸克组成。相应地, 由奇异夸克物质组成的星体称为奇异夸克星(简称奇异星)。Itoh 于 1970 年就尝试计算了奇异星的流体静力学平衡。

来自微观物理的进展更增加了人们对于夸克物质存在的信心。Gross, Wilczek, Politzer 三位学者于 1973 年在非 Abel 规范理论基础上证明强作用具有渐近自由的特性, 即夸克之间的相互作用随着温度或密度的极端增加而越来越弱。这一特性同时也得到众多高能实验的肯定。可见, 无论是实验还是理论上都确认了“渐近自由”的存在; 而夸克物质正是渐近自由的必然结果。为寻找夸克物质, 相对论重离子对撞实验就是企图创造足够高温条件以产生夸克物质。此外, 天体环境中夸克物质的证认和探测也是不能忽视的。关于天体夸克物质的研究被 Witten 于 1984 年的工作显著地推动。他曾经详细讨论了奇异夸克物质可能存在的三种形式: ①宇宙早期的夸克胶子等离子体; ②奇异星; ③宇宙射线中的奇异滴(strangelet)。

1986年, Haensel 为首的欧洲研究小组和 Alcock 为首的 MIT 研究小组分别详细计算了奇异夸克星的结构。他们的研究发现极限质量夸克星半径约 10 km, 质量还是与太阳质量相当, 与中子星的情况十分类似。显然, 夸克星也能够转得足够快而表现为脉冲星。一般认为脉冲星就是中子星, 这似乎是一种历史的偶然。其实, 脉冲星到底是中子星还是夸克星, 这一问题还有待进一步探讨, 也是一个非常具有科学价值的问题。值得一提的是, 因夸克物质涉及人们对于夸克间基本作用的理解, 哪怕能够确认一颗夸克星的存在, 其影响也将是非常深远的。无论是中子星还是夸克星, 极限质量附近的半径都较小, 只有 10 km 左右。图 2 形象地比较了将它们“置”于地表时的大小。



图 2 “位于地表”的中子星与夸克星

2 是中子星吗?

人们传统认为脉冲星就是中子星。中子星的物质密度会随深度的增加而递增, 内部结构分层。在最外层, 为了满足与星际介质的压力平衡, 中子星的表面存在一层由正常物质构成的大气, 其厚度为 0.1 ~ 10 cm, 密度为 0.1 ~ 100 g/cm³。尽管构成大气元素丰度尚难确定, 但这层大气的性质将决定中子星在 X 射线波段热辐射谱的行为。类似于恒星大气研究, 原则上可以通过观测中子星热谱中吸收线的位置与强弱确定大气元素丰度。中子星具有强引力场, 吸收线会出现红移, 红移量是 M/R 的函数(M : 中子星质量, R : 半径); 而若主要是压力致宽, 则线宽是 M/R^2 的函数。因此, 如果能够测得谱线的红移及致宽就能够得到中子星的质量和半径。若能成功, 这对于确定超核密度物质的状态具有极其重要意义。

1980 年代以来的数值计算表明, 上世纪在轨 X 射线卫星的谱分辨率都太低, 因而不能分辨这些吸收线。新设计的 X 射线卫星(美国和欧洲分别建造的 Chandra 卫星和 XMM-newton 卫星)提高了谱分辨率, 探测这些吸收线就成为它们重要的科学目标。这两颗高性能 X 射线卫星于本世纪初升空。但遗憾的是, 人们至今尚未像预期的那样从中子星的热辐射谱中毫无疑问地鉴别出原子吸收谱线。不少中子星的辐射谱可以用黑体谱很好的拟合。这些观测结果不是原先中子星模型所期望的。

中子星从大气层之下到密度为 4×10^{11} g/cm³ (即“中子滴密度”)处的范围内, 物质由原子核与电子组成, 称为外壳层。外壳层温度一般低于其熔点而呈现固态, 其内部的原子核和相对论简并电子气体处于 β 平衡。

* 20 世纪最伟大的成就之一是建立了粒子物理标准模型; 根据它可以理解目前绝大多数的实验现象。该模型认为自然界是由包括电子和夸克在内的基本费米子组成的, 它们之间存在着规范相互作用。可见, 电子与夸克是处于同一层次的, 而不是如 1930 年代所认为的那样“电子与质子、中子等为同一层次的基本粒子”。

随着密度的增加, 电子的 Fermi 能相应地升高, 原子核内的中子含量也逐渐增加。当密度高于中子滴密度后, 部分中子便会从原子核中游离出来。当密度进一步增加到接近核物质密度时, 原子核内大多数质子中子化而呈游离态, 原子核的界限消失。中子滴密度与核物质密度之间这个由富中子核、自由中子、电子组成的区域称为内壳层。内壳层中的自由中子因强作用而结合为 Cooper 对, 处于超流态。旋转超流中子形成涡线 (vortex line) 结构; 它们可以钉扎 (pin) 在富中子核之上。中子星模型认为, 观测到的脉冲星自转周期突然跳跃 (glitch) 现象就与涡线和原子核之间的钉扎与去钉扎 (unpin) 过程有关。

密度接近或高于核物质密度时, 物质以自由中子为主 (以及少量质子、电子等) 构成。有可能中子处于超流态而质子处于超导态。该区域是中子星的主体部分, 称为中子物质区。密度继续增高达到 2 至 3 倍核物质密度后, 依据现有的致密物质的知识很难准确地推测相应的物质状态。人们猜测在此区域可能会出现夸克物质相、 π 或 K 等介子的凝聚相、超子物质相等。这个区域称为中子星的核。

根据以上的介绍我们知道, 中子星具有与太阳相当的质量。大部分物质是以流体形式存在的, 只有约 10^{-5} 倍太阳质量的壳层为固态。众所周知, 具有刚性的固体可以具有长期的进动。详细计算发现, 由于内部流体与壳层之间存在强的耗散作用, 中子星难以长期进动。然而, 观测上至少发现一颗射电脉冲星 (PSR B1828-11) 存在明确的进动证据。这对于中子星模型也是一个挑战。这些疑难在夸克星模型中是否存在呢?

3 是夸克星吗?

尽管人们习惯性地认为脉冲星是中子星, 其实另一种可能性至今未能被完全排除: “脉冲星是夸克星”。不过, 也有文献中将夸克星看作一种特殊的中子星。这一看法诚然无可厚非, 但容易产生误解; 因为夸克星的组分中很可能不存在一粒中子。

说到夸克星, 不得不提及量子色动力学 (quantum chromodynamics, QCD)。它被认为是描述夸克之间强相互作用的潜在理论框架。类似于电磁相互作用中电荷的概念, 夸克带有三种色荷, 分别称为“红、绿、蓝”。这其实也是该理论框架被称为量子“色”动力学的原因。强相互作用具有两个重要性质: 高能极限下的渐近自由和低能极限下的色禁闭。前者已经得到 QCD 的证明, 而后者尚不能。基于渐近自由, 在高能情况下可以用微

扰理论处理强相互作用体系, 相应的理论被称为微扰 QCD。这种理论在处理高能实验结果时是相当成功的, 但对于中低能情况, 夸克间的相互作用变强, 微扰理论便不适用了。原则上可以将时空离散化利用格点 QCD 理论数值求解。但由于计算的复杂性, 目前格点 QCD 只适用于高温接近零重子密度的情形, 而我们所感兴趣的致密星内部却是低温、高重子密度的。因此在处理中低能或高重子密度情形时, 人们不得不借助唯象模型或有效 QCD 模型。

虽然理论和实验方面都不能得出明确的结论, 但是人们还是可以从实验出发唯象地推测低温夸克物质的一些可能性质。人们首先意识到, 类似于低温超导态中电子在动量空间的凝聚, 在冷夸克物质中因夸克之间强作用导致的吸引或许致使费米面附近夸克凝聚, 从而表现为“色超导态”。然而值得提醒的是, 存在一种与这种动量空间凝聚相竞争的位形空间凝聚: 夸克之间强的吸引作用导致夸克结成团块。为阐述这一竞争, 可以用如下一个著名的实验来类比。⁸⁷Ru 在低温下坡色-爱因斯坦凝聚实验成功的关键一点是对温度的控制: 如果控制不好, ⁸⁷Ru 原子就会凝聚在一起成团。可见在该实验中存在动量与位形空间凝聚的竞争。如果夸克星内部位形空间凝聚占优, 就会形成大量夸克集团。如果热运动动能低于夸克集团之间的相互作用能, 夸克星将会固化。尽管这一“固态夸克星”的想法还不能够被排除, 但因很难实现低温高密的环境而不能在地面实验室检验。然而宇宙空间中的致密天体恰恰具有这样一种环境, 这为研究夸克物质在低温高密时的性质提供了不可多得的机会。

夸克星的结构其实很简单, 不像中子星那样分为很多层, 其密度分布大致为常数。只要质量不是太大, 夸克星中心密度不到表面密度 (约 10^{14} g/cm³) 的两倍, 且表面密度会在约 1 fm 的尺度上速降为零。这是由于整个星体是强相互作用约束的体系, 夸克由于色禁闭效应不可能逃离表面太远。星体内部除了夸克之外还存在电子。因电子只受比强相互作用弱得多的电磁约束, 所以它们分布比较弥散, 在夸克表面之外有一定延伸。因所有夸克和电子保持电中性, 这样就不可避免地在夸克表面形成很强的电场 (约 10^{17} V/cm)。这一强电场的存在将一定程度上阻碍原子核与夸克物质之间的强作用, 从而使得夸克星表面以上撑起一个最大质量约 10^{-6} 倍太阳质量的壳层。如果夸克星果真具有这样一个壳层, 那么它的辐射特征 (包括热辐射和非热辐射) 将与中子星很难区分。然而, 因夸克星诞生时具有强大的中微子和光子辐射场, 且拥有强磁场并快速自转, 一般情况下

很难形成这种壳层。

没有壳层、表面直接裸露于星际空间的奇异星称为裸奇异星。裸奇异星表面粒子具有强的束缚能;而脉冲星某些射电辐射特征可能表明表面粒子束缚能远比中子星高。如果进一步认为其内部的夸克物质呈现固态,那么这种固体裸奇异星的表面辐射特性或许应该类似于金属,电子处于连续态。至今没有明确探测到原子谱线可能就反映了这一属性。固态奇异星类似刚体,可以表现出长期进动。另外,当固态奇异星内部应力积累到一定程度时或许发生应力迅速释放,从而导致星震。固态奇异星星震会导致两种后果:转动惯量的突然改变和能量(包括弹性能和引力能等)的快速释放。前者可能与观测到的自转突跳(glitch)有关,而后者可以解释一类天体(软 γ 射线重复暴)巨大高能射线耀斑现象。

4 展 望

关于观测到的各种脉冲星类天体本质的看法,目前主要有两种:中子星和夸克星。这一问题至今尚未得到明确解决,根本原因是 QCD 低能的高度非微扰特性。因此,无论是最终彻底地肯定还是否定夸克星的存在均具有重要学术意义,必将一定程度上改善人们对于夸克之间强作用基本性质的认识。

脉冲星以其特有的脉冲性质、极端的物理环境而受到天文及物理两类学者的青睐。历史上两次诺贝尔物理学奖授予该领域学者也从一个侧面反映了脉冲星研究的重要性。如果未来脉冲星明确地被证认为夸克星,第三次诺贝尔物理学奖授予脉冲星学者是有可能的。

由于历史原因,我国学者开展脉冲星研究比国际同行晚了约 10 年,但也在个别方向上做出有特色的工作。长期以来,由于观测条件的制约,国内学者对脉冲星往往作非观测研究。然而令人高兴的是,随着我国经济的发展、国力的增强,脉冲星观测研究近年来已经开展。脉冲星观测是新疆 25 米射电望远镜的重要课题之一,北京密云 50 米射电望远镜也将要开展脉冲星研究。特别值得一提的是,我国将于 2013 年在贵州建造国际上单口径最大的射电望远镜——“500 米口径射电望远镜”FAST。脉冲星研究也是 FAST 主要科学目标之一,除了射电以外,我国包括 HMXT(硬 X 射线调制望远镜)等在内的高能卫星项目的启动,也预示者我国脉冲星观测的美好明天。科学是由实验推动的,脉冲星研究也不例外。观测与理论研究的同等发展必将使我国向脉冲星研究强国迈进!

(2007 年 4 月 10 日收到)

Pulsar, Neutron Star and Quark Star

XU Feng^① YUE You-ling^② XU Ren-xin^③

①② Ph.D., ③ Professor, Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract Neutron stars and quark stars are currently two kinds of speculated subjects when one is modeling observed pulsars. After a brief introduction to the related history, the characters and possible observational features of these objects are focused on. A future perspective on the pulsar research in China is presented.

Key words pulsars, neutron stars, quark stars

(责任编辑:温文)

自然信息

喷洒生长因子, 指导干细胞分化

研究人员一直在努力探讨诱使邻近干细胞沿不同路线分化的方法。如今,美国加利福尼亚州的科学家报导,利用独特技术——喷墨印相术,向这一目标迈进了一步。

宾夕法尼亚州的细胞生物学家朱莉·菲利普(Julie Phillippi)和其同事利用定做的印相机,指导干细胞同时发育成

两个谱系。先将含有能刺激骨细胞专化的生长因子——骨形态形成蛋白(BMP)的微滴,在细胞外基质层面上喷成方格型,再把成熟肌干细胞移植到整个基质层的表面上。三天内,方格内长出的细胞,从形态到生化,都与在 BMP 的邻近处生长的细胞不同,这说明方格内的细胞,已转向骨细胞谱系;而无 BMP 的方格外的细胞,独自生产肌球蛋白重链蛋白质,说明仍坚持肌细胞发展路线。

菲利普领导的小组,进行了多种复杂形式的实验,其中包括了交替生长因

子层和细胞外基质层的不同组合。2006 年底正在实验的是,检验喷墨印相法补片置于伤口,然后喷洒生长因子,促进小鼠自身细胞愈合穿孔。

生物学家们曾利用喷墨印相机,把细胞和分子喷成特别的图型,对从肌发育到晶体学的各种情况进行研究。英国曼彻斯特大学的材料科学家布赖恩·德比(Brian Derby)认为,此项工作的要点在于特制机器的技术性能。他说:“菲利普是表明喷墨印相术不仅实际而且有用的第一人”。

[范宗理据 Science, 2006-12-22]