



徐仁新

夸克物质与奇异星

8

徐仁新，1967年4月生于江苏高邮，教授。1997年7月获北京大学理学博士学位后留校任教；在从事物理学和天体物理学教学工作的同时做粒子天体物理研究。首次提出了射电脉冲星是裸奇异星的可能性，指出可以依据表面特征从观测上认证奇异星的存在。

探索物质的基本组成及其间基本运动规律是人类的本能追求。20世纪的重要成就之一是建立了粒子物理标准模型。它认为三代轻子（以不参与强作用为特征）和夸克是物质的基本组成单元，除引力以外它们之间还存在着弱电作用和强作用。引力和弱电作用已有较完善而精确的理论描述，但较有希望成为强作用基本理论的量子色动力学（QCD）发展得还不成熟。QCD的特征之一是强子中夸克色禁闭。并且理论上推测，在温度或重子数密度足够高的条件下，强子中的夸克可能会游离出来（渐进自由，为QCD另一特征），形成一种新的物相——夸克胶子等离子体态（又称为“夸克物质”相）。例如，在零重子化学势情形下的格点QCD计算结果显示，当能量密度约为 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ 时（约为核物质密度的7倍，相应的温度为 $140\sim 180\text{MeV}$ ），囚禁在强子内的夸克和胶子将会解禁。我们能在实验上发现夸克物质吗？进一步，在什么条件下一般强子物质会解禁成夸克物质？对于这些问题的回答，

必将有助于人们完善和发展有关强作用的理论。实际上，目前高能重离子碰撞实验的中心目标就是企图在实验室内制造出夸克物质。据信这种物质还曾出现于大爆炸最初几微秒的早期宇宙，并且有可能正存在于恒星演化终结的某种残骸内部。

另一方面，了解我们生存于其中的宇宙的状况也是人类的天真欲望。这方面一个很基本的问题是，恒星是如何“生老病死”的？星际分子云内物质的引力塌缩、吸积和准静态收缩使得其中心达到氢核燃烧的点火温度，导致主序恒星的形成。在随后的漫长岁月里，恒星通过消耗其核能源而静静地发光。质量较大的恒星在核能耗尽时不可避免地将发生超新星爆发；在向星际喷发各种新形成的重元素的同时，理论上认为还可能遗留一种致密残骸——中子星或奇异星。天文观测确实已经找到了这类残骸的典型样本——射电脉冲星。到目前为止，观测发现脉冲星类天体的总数近2000。它们到底是中子星还是奇异星？要回答这个问题，我们必须弄清楚在超新星爆发时（或之后的吸积、转动减慢过程中）有无夸克解禁的相变过程发生。

主动的物理实验和被动的天文观测向来是人类理解和发现基本物理规律的主要手段。关于夸克物质能否存在以及相应的相变条件等问题，人们确实也是通过高能重离子碰撞的实验室研究和恒星演化最终残骸的天体物理研究这两方面来探索的。目前，这两方面的研究现状有一个共同点：寻找确切的观测特征（或证据）以表明夸克物质是否存在。若能确认夸克物质存在，我们就可以进一步研究夸克解禁的条件，从而改进人们对强作用的认知。

一、高能重离子碰撞：夸克物质的实验室寻找

一种产生高能量密度导致夸克解禁的方法是利用从高能加速器得到的相对论性重离子进行碰撞。若碰撞中心的能量密度超过 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ ，就有可能形成一个以游离态夸克和胶子构成的火球。然而，这种夸克物质相只能存在极短的时间；单个夸克或胶子因色禁闭不能逃出火球，在到达探测器之前它们早已组合成强子（色单态），火球最终转变成若干强子。因此，人们必须通过仔细定量分析这些强子来提取信息，以确定在碰撞过程中是否曾经形成过夸克物质相。

美国和欧洲均拥有用于该项研究的相对论重离子加速器。例如，欧洲核子中心SPS定靶实验产生的中心能量密度（依据一定模型估计达 $\sim 3\text{GeV}/\text{fm}^3$ ）可能超

表面就不存在电中性。计算表明, 夸克表面存在 $\sim 5 \times 10^{17} \text{V/cm}$ 的电场, 并随高度的增加而降低; 在 $\sim 1000 \text{fm}$ (费米) 高处此电压与单极感应电压 ($\sim 10^{11} \text{V/cm}$) 相当。

中子星核心也可能存在夸克物质 (也有模型认为中子星核心无夸克相), 但这个夸克相的观测表现是间接的。然而, 若能确认奇异星的存在, 这将比较明确地支持存在天然夸克物质的结论。特别地, 若能寻求到裸露夸克表面存在的确切信息, 我们就得到了天然夸克物质存在的直接证据。

三、发现奇异星的可能途径

关于自然界中存在的脉冲星类天体是中子星或奇异星, 不外乎四种可能性: ①它们都是中子星; ②部分是中子星, 其余为奇异星; ③它们都是奇异星; ④部分或所有的这类天体既非中子星, 亦非奇异星。若只有前3种可能性, 一个极其重要的课题是如何确认一颗脉冲星类天体是中子星还是奇异星, 即怎样观测区分中子星和奇异星。这是奇异星观测证认的中心问题。本文不讨论第4种可能性。

早先的研究认为奇异星的中微子发射率要比中子星高, 同龄的奇异星温度面要比中子星低; 似乎可以通过测量天体表面的热温度来区分它们。然而进一步的研究表明, 中子星和奇异星的热演化只在诞生后约30年内才可能有较明显的差别; 这使得几乎不可能通过测定热温度来鉴别它们。下面着重介绍作者认为较有希望发现奇异星的三种途径。

1. 黏滞性差异

奇异夸克物质的体黏滞系数比中子物质高, 因而奇异星能够比中子星自转得更快。任何由无黏滞介质组成的旋转天体都存在旋转模不稳定性。该不稳定性的发生将导致引力辐射, 带走自转角动量和自转能, 最终使得天体自转减慢。当成实际天体的介质或多或少地存在黏滞性, 因此它们都有一定抑制旋转模发生的能力。定性地说, 黏滞度愈高, 天体抑制旋转模的能力愈强, 因而天体可能拥有的最大自转速率也就愈大。王青德和陆垓的计算发现, 对于体积变化时标与弱相互作用时标相近的奇异夸克物质, 密度的变化引起的非轻子反应过程 ($ud \rightarrow ds$) 将导致强能量的耗散。据此结论而计算得到的奇异夸克物质的体黏滞系数明显大

于中子物质的值。基于这一事实, Madsen 认为中子物质和奇异夸克物质黏滞性的差异可以表现在中子星和奇异星可能拥有的最大自转速率上。通过比较这两种物质的剪切黏滞系数和体黏滞系数, Madsen 发现, 新形成的奇异星能够具有小于 $3\sim 5 \text{ms}$ 的自转周期, 而新形成的中子星则不能。若发现一颗周期为 1ms 左右的正常脉冲星 (即非吸积再加速形成的毫秒脉冲星), 这颗脉冲星很可能就是奇异星。最近有人宣称在超新星 SN1987A 爆发的位置发现了一颗周期为 2.14ms 的光学脉冲星。若此发现能够被进一步证实, SN1987A 的残骸可能不是中子星而是奇异星。

2. 质量-半径关系

因奇异星的质量-半径 ($M-R$) 关系与中子星的明显不同, 所以通过测量脉冲星的 $M-R$ 关系有可能区分中子星和奇异星。一方面, 理论上根据奇异夸克物质和中子物质的各种状态方程, 通过数值积分 TOV 方程, 可以得到不同的状态方程所对应的 $M-R$ 关系。另一方面, 对于吸积 X 射线脉冲星, 其吸积盘内半径必然大于其本身半径, 且小于共转半径。这些限制使得观测上能够给出吸积脉冲星的质量和半径的可能存在区域 (此区域又称为观测上确定的 $M-R$ 关系)。李向东等人将观测给出的 $M-R$ 关系与理论计算得到的关系作对比发现, 对于某些吸积 X 射线脉冲星 (如 SAX J1808.4-3658), 根据奇异夸克物质状态方程算得的 $M-R$ 关系倾向于与观测吻合。因此, 他们认为这些吸积脉冲星可能是奇异星。然而 Glendenning 认为, 此方法不能完全排除这些吸积脉冲星是中子星的可能性。

3. 表面特征

目前文献中讨论的奇异星分两种: 带壳奇异星 (一般就称为“奇异星”) 和裸奇异星。早先普遍认为一些可能为奇异星的天体 (如射电脉冲星) 是带壳奇异星。然而我们的研究表明宇宙中现存的奇异星很可能是没有壳层的, 即裸奇异星。裸奇异星与中子星的表面截然不同, 因此可以利用这一差别来证认奇异星的存在。据研究, 我们认为目前可能有三类裸奇异星存在的迹象。

(1) 夸克表面的粒子束缚能几乎无穷大, 因此裸奇异星一定存在 Ruderman-Sutherland (RS) 型真空放电过程。然而大量的计算表明, 中子星表面的粒子束缚能一般不足够高到形成这种过程。而在观测上, RS 模型在解释不少射电脉冲星观测事实方面却是很成功的 (如漂移子脉冲现象)。如果认为 (至少部分)

对脉冲星是裸奇异星，这一矛盾就很容易解决。

(2) 裸奇异星表面的某些能量释放过程（替星类天体撞击或磁重联）能够自然解释软 γ 重复爆发源的极超 Eddington 辐射（例如 SGR 0526-66 在 1979 年 3 月 5 日爆发的峰值流量比 Eddington 光度高七个量级）。

(3) 裸奇异星的表面和磁层中不存在原子或离子，所以不可能产生原子能级跃迁或质子回旋谱线。而目前不少中子星大气辐射传能数值计算却给出谱线辐射特征。最近 Chandra 和 XMM 卫星在 X 射线波段观测了 8 颗脉冲星类天体，发现都没有原子谱线辐射特征。这暗示它们很可能是裸奇异星。

四、结 论

目前人们正试图从粒子物理实验和天体物理观测两方面搜寻夸克物质。尽管已经取得了若干有意义的进展，但尚未最后成功。这是 21 世纪粒子物理和天体物理学家所共同面临的一个挑战。

强作用是人类了解较少的一种基本相互作用。无论在实验室还是在宇宙中发现夸克物质，对于我们更好地理解强作用都是有极其重要的意义的。随着实验室内更高能重离子碰撞机的运行，以及性能更好的空间天文望远镜升空对脉冲星类天体的进一步观测，相信在不久就可能对强作用的理解上一个新的台阶。

同时，脉冲星也是非常值得人们研究的一类天体。已有两次诺贝尔物理学奖授予直接从事脉冲星研究的学者。相信，对于脉冲星的进一步研究还将会帮助我们理解更多的自然界的秘密。我国学者研究脉冲星的起步约晚了 10 年，但在特定的条件和环境下取得了可喜的进展。值得注意的是，除了理论研究，我国的脉冲星实测研究亦已起步。今后有关脉冲星理论和观测研究的主旋律之一将是探讨和研究脉冲星的本质：它们到底是中子星还是奇异星？