

奇异夸克物质与奇异星*

徐仁新

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 脉冲星在 20 世纪 60 年代发现后不久,很快被证认为中子星(即“中子星模型”),然而在 20 世纪 80 年代,随着描述物质结构的夸克模型的发展,又提出了脉冲星是奇异星(“奇异夸克星”的简称)的可能性(即“奇异星模型”),这里对脉冲星的这两个模型分别做了评述。描述强作用的量子色动力学预言了夸克胶子等离子体的存在。奇异星可能是一种天然的、大块的、能长时间存在的夸克胶子等离子体,它的存在与否将直接关系到人们对强作用的理解。因此观测上肯定或否定奇异星的存在,必将对粒子物理学和天体物理学产生深远的影响。已有两次诺贝尔物理奖授予脉冲星研究学者;若能确认奇异星的存在,脉冲星界极有可能获第三次诺贝尔物理奖。本文综述了相关的研究及其最新进展,并论述了依据观测事实鉴别中子星和奇异星的三种可能途径。

小注 我将要讲的这个故事起源于 1995 年暑假的某日下午。那时我刚刚从乔国俊教授学习和研究射电脉冲星不久;我和不少人的看法一样,认为脉冲星就是中子星(丝毫没有其他“私心杂念”)。然而,那天北师大物理系张贴至我校的一张题为“奇异星”的演讲通知却将改变我的这一信念。主讲人是陆埏教授。尽管我当时曾经看过他写的某些科普文章或书籍,但还未目睹其个人风采。一是为如此愿,二是想知道这个从未听说过的“奇异星”到底是什么东西;于是我就骑着自行车来到了人数不多的讲演会场。陆老师那天的演讲非常成功;在以后的若干会议或其他交往中使我对奇异星研究兴趣倍增。1997 年获博士学位后,我也试图提一些关于奇异星的想法;下面将这些观点列出来,以庆祝陆老师的生日。

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。弱电作用和经典引力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)发展得还不够成熟。QCD 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,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(约为核物质密度的七倍,相应的温度为 $140\sim 180\text{MeV}$),因

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?进一步地说,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。这种物质据信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,了解我们生存的宇宙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会发生超新星爆发;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两千。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。关于夸克物质是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。若能确认夸克物质的存在,我们就可以进一步研究夸克解禁条件,从而改进人们对强作用的基本认识。

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 $\sim 3\text{GeV}/\text{fm}^3$)可能超过了格点 QCD 给出的相变临界密度。该实验得到的若干间接信号(如奇异粒子增长、 J/Ψ 反常压低、低质量轻子对增长)表明,在碰撞过程中可能已经形成了夸克物质。然而遗憾的是,至今还很难完全排除这些实验信号是强子间复杂的相互作用所致可能性;因此还不能完全肯定 SPS 已经产生了夸克物质相。欧洲核子中心的 SPS 实验现在已停止运行,该中心正计划和建造已经产生了夸克物质相。欧洲核子中心的 SPS 实验现在已停止运行,该中心正计划和建造 TeV 量级的 LHC 实验。另外,美国布鲁海文国立实验室目前正在进行着 RHIC 实验。RHIC 和 LHC 实验有望测量得到反映夸克物质存在的某些直接信号(如夸克物质发出的电磁辐射),因而给出夸克物质存在与否的较明确的实验结论。

* 国家自然科学基金(10173002)和国家重点基础研究专项基金(G2000077602)资助项目,本文根据收录于《21世纪100个交叉科学难题》(李喜先等主编)一书同名论文修改而成。

未来若能确认实验室产生出了夸克物质，这对于强作用基本理论 (QCD) 而言将具有重要意义。同时，相关研究还希望能够进一步回答若干粒子物理的基本问题，如真空的本质、色禁闭的物理根源、质量的起源，等等。

二、奇异星：天然的夸克物质？

另一种可能出现夸克解禁的天然场所是在恒星演化终结的致密残骸内部。在 20 世纪二三十年代，Chadwick 发现了中子后不久，Landau 就推测一种主要由中子构成的星体；后称为“中子星”。1934 年，Baade 和 Zwicky 进一步明确地指出，中子星有可能在超新星爆发过程中产生。然而，1939 年 Oppenheimer 和 Volkoff 的计算表明，中子星的质量不能太大。中子星质量上限大约与太阳质量相当，而半径却只有 10 千米左右。如果假设中子星的热辐射主要在光学波段，由于它的半径太小，当时世界上最大的光学望远镜也很难发现。至此，有关中子星的研究开始“降温”。这种状况一直持续到 1967 年，该年 Bell 和 Hewish 发现了射电脉冲星。从质量、半径、自转周期等方面的考虑，一般相信脉冲星很可能就是理论上预言的中子星。然而在 80 年代，随着描述强子结构的夸克模型的发展，人们又提出了脉冲星是由奇异夸克物质组成的可能性（即“奇异星”）；因为奇异星也能够拥有与中子星相近的质量和半径。

奇异星的形成需要有两个必要条件：① 致密残骸内部的密度和温度能够达到夸克解禁闭的临界值；② 大块的奇异夸克物质是最稳定的。对于第一个条件，格点 QCD 已给出的夸克解禁密度 ($\sim 1\text{GeV}/\text{fm}^3$) 不能适用于研究具有高重子化学势 (μ_B) 的致密星。对于 $\mu_B \neq 0$ 的情形，因相互作用的复杂性，目前还不能通过做格点 QCD 计算来给出夸克解禁的临界温度和密度。不过，我们还是可以对致密星中相变临界密度做如下一种简单估计：核子在数密度大于 $-(4\pi R_N^3/3)^{-1}$ 情况下将互相重叠；取核子特征半径 $R_N = 1\text{fm}$ ，此密度 (约为 $0.24\text{fm}^{-3} = 224\text{MeV}/\text{fm}^3$) 不足核物质密度的两倍。因此，当物质密度高于两倍核物质密度时强子的核边界很可能会消失，从而使得夸克解禁闭，最终形成夸克物质。因中子星中心密度一般大于三倍核物质密度，所以人们较普遍地认为中子星核心可能存在夸克物质。

对于第二个条件，目前还不能从 QCD 的第一性原理论证它能否满足；但种种迹象表明它很可能是允许的。核子中解禁出来的夸克只有上、下两味，它们的费米能可达到 500MeV，超过奇异夸克的禁止质量 (约 150MeV)。夸克味在弱作用下可以不守恒；两味夸克物质通过弱作用将最终转变成三味奇异夸克。这样，在两味夸克物质中引入新的奇异夸克自由度，就有可能降低系统的总能量。实际上，基于强作用唯象模型 (口袋模型) 的计算也表明，大块奇异夸克物质在很大的强作用参数空间内确实是稳定的。

有了这两个条件，奇异星才可能通过暴发过程产生。奇异物质的形成过程可以分成两步：① 正常核物质在强作用时标 ($\sim 10^{-23}\text{s}$) 内解禁闭而形成两味夸克物质；② 在弱作用时标 ($\sim 10^{-8}\text{s}$) 内，解禁的夸克之间通过弱作用达到化学平衡，形成三味的奇异夸克物质。由于第二步将释放大量能量，核物质很可能通过超声速爆轰模被奇异化；最终形成奇异星。

类似于中子星，奇异星也有质量上限，并且与中子星质量上限相近。处于质量极限附近的中子星和奇异星的半径无明显差别。这些给观测上区分中子星和奇异星带来了困难。然而，奇异星与中子星的结构特征还是有些差别的。① 具有大约 (或小于) 1.4 倍太阳质量的奇异星内部的密度分布基本上为常数，其中心密度不到表面密度 ($\sim 4 \times 10^{14}\text{g}/\text{cm}^3$) 两倍，且表面密度在约 1 费米的尺度上迅速降至零；而一般中子星中心密度为内壳层密度的十倍以上，且密度在约 300 米厚的外壳层和大气层中逐渐降至零。② 因奇异星内部密度近似均匀分布，其质量 M 与半径 R 之间存在近似关系： $M \propto R^3$ ；而对于中子星，其相应的近似关系却截然不同，为 $M \propto R^3$ 。③ 与中子星的表面相比，奇异星的夸克表面除了密度特性不同外，电学特性也不一样。由于奇异夸克质量大于上、下夸克质量，处于弱作用平衡的奇异夸克物质中奇异夸克数目相对较少，而上、下夸克数目几乎相等。因此，为了保持整体电中性，奇异夸克物质还含有少量电子。因夸克是由强作用和电磁作用束缚的，而电子只由电磁作用束缚 (其束缚能力远小于强作用力)，所以在夸克表面，电子的分布要比夸克弥散。这样，在夸克表面就不存在电中性。计算表明，夸克表面存在 $\sim 5 \times 10^{17}\text{V}/\text{cm}$ 的电场，并随高度的增加而降低；在 ~ 1000 费米高远处此电压与异极感应电压 ($\sim 10^{11}\text{V}/\text{cm}$) 相当。

若只满足解禁条件，中子星核心也可能存在夸克物质 (称为混杂星)；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。特别是，若能寻找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。这是奇异星观测认证的中心问题。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，同龄的奇异星温度因而比中子星低；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) 粘滞性差异。奇异夸克物质的体粘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。任何由无粘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。组成实际天体的介质或多或少地存在粘滞性，因此它们都有一定抑制旋转模发生的能力。定性地说，粘滞度愈高，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。Kluźniak 和 Gondek 的计算发现，对于体积变化时标与弱作用弛豫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 ($ud \leftrightarrow us$) 将导致振荡能的耗散。据此结论而计算得到的奇异夸克物质的体粘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

和奇异夸克物质粘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粘滞系数和体粘滞系数, Madsen 发现, 新形成的奇异星能够具有小于 3~5 毫秒的自转周期, 而新形成的中子星则不能。若发现一颗周期为 1 毫秒左右的正常脉冲星(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 暴发的位置发现了一颗周期为 2.14 毫秒的光学脉冲星。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), 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论证奇异星的存在。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)射电脉冲星是裸奇异星, 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(彗星类天体撞击或磁重联)能够较自然地解释软 γ 重复暴发源的极超 Eddington 辐射(例如 SGR 0526-66 在 1979 年 3 月 5 日暴发的峰值流量比 Eddington 光度高七个量级, 要求中子星表面具有 $\sim 10^{17}$ G 的磁场, 远强于临界磁场)。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 射线波段观测了八颗脉冲星类天体, 发现都没有谱线辐射特征。这暗示它们很可能是裸奇异星。新发现 1E 1207 这颗星的 0.7 和 1.4keV 两条吸收线很可能是强磁场中 Landau 能级间的回旋谱线。

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缺的一种基本相互作用。无论是在实验室还是在天空中发现夸克

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, 相信在我们进入 21 世纪不久就可能对强作用的理解迈上一个新的台阶。

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十年, 但也在特定的条件和环境下取得了可喜的进步。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?