

发现最大质量中子星影响深远

如果中子星可具有两倍的太阳质量,大多数曾经猜测的奇特致密物质状态是不会存在的。

中子星拥有宇宙中最致密的物质,它们是星核塌缩超新星爆发的残骸,将超过太阳质量(M_{\odot})的物质挤压至直径小于30km的球内。密度极高的这种物质不能在实验室内制备,对其属性的认识也具有相当大的不确定性。顾名思义,中子星主要成分可能是中子;这些中子在约 10^{15} g/cm^3 密度(几倍原子核密度)下挤在一起,形成中子星的前身星内绝大多数质子和电子通过逆 β 过程转变为中子。

理论家们曾推测,大质量中子星内高密度的核心区应该会出现一些奇特的物质状态:富含奇异夸克的夸克物质, K介子的玻色-爱因斯坦凝聚态,有相当一部分中子已转变成超子(带有奇异夸克的重子)的核物质,等等。然而这些猜测却因最近测定一颗中子星质量(即“称”中子星多重,简称“称重”)而否定。利用位于西弗吉尼亚 Green Bank 的国家射电天文台 100m 直径的望远镜, Demorest 及其合作者精确称重了迄今为止质量最大的中子星^[1]:处于双星系统中的脉冲星 J1614-2230 具有 $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ 的质量,此前中子星最大质量纪录只有 $1.67 \pm 0.01 M_{\odot}$ 。

1 排除某些奇特的核心

现在我们知道中子星可以重达两倍太阳质量,这意味着什么呢?这否定了许多先前设想的高密度情形下可能出现的奇特物质相。

给定任一状态方程,中子星就存在一个最大质量 M_{max} ,质量高于 M_{max} 的中子星将会塌缩成黑洞。一般说来,允许奇特物质相变的状态方程都预言了较小的 M_{max} 。奇特物质相变引入的额外自由度使得状态方程变软,星体更难抵抗引力的塌缩。

核物质和夸克物质都是由自旋为 1/2 的粒子组成的费米子体系;受泡利不相容原理的支配,密度增加导致粒子动量、能量增加。推测存在超子相或奇异夸克物质相的动机是:引入额外的自由度来缓解不相容原理带来的能量增加,以便降低体系的基态能量。引入介子的玻色-爱因斯坦凝聚也出于类似目的。

图 1 给出了各类状态方程预言的中子星的质量和半径的依赖关系以及相应的极限质量 M_{max} 。几乎所有与奇特物质状态方程对应的 M_{max} 都低于新测定的 J1614 质量,因此这些物态就被观测排除。部分奇异夸克物质状态方程给出的 M_{max} 刚好接近 J1614 质量;但是此时夸克之间的相互作用应该几乎像在强子之中那样强,而远非处于“自由”状态。另有一篇文章^[2]详细讨论了这一中子星质量记录的更多的天体物理意义。

2 精确称重

旋转中子星往往可沿磁轴方向附近产生射电辐射束,如果星体的磁轴和自转轴方向不一致,射电辐射束就会像灯塔一样扫过天空;所以对于一个位置合适的观测者而言,中子星看起来就是射电脉冲星,其脉冲频率就是星体的自转频率。

2003 年发现一颗双星中的脉冲星 J1614,它距离地球大约 3000 光年,具有非常稳定的 3.15ms 快速自转周期。这颗中子星跟一颗质量较小的白矮星相伴,以约 9 天的轨道周期围绕系统质心运动。

对于那些短轨道周期、高偏心率的双中子星系统(两颗子星都是中子星),人们可以依据轨道的广义相对论进动或衰减来精确测量其中中子星的质量。不少质量位于 $1.25 M_{\odot}$ 到 $1.4 M_{\odot}$ 之间的中子星质量就是这样测到的(见图 1 中的黄色横带,彩图见本期《物理》网刊,下同)。这一测量选择双中子星系统,因而所测得的质量值或许不具代表性。

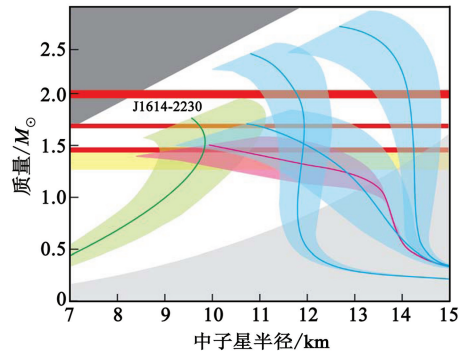


图 1 根据各类致密物质状态方程而预言的中子星质量对半径的依赖。不同的状态方程反映极度挤压下物质的不同相:中子星物质(蓝色),奇特强子物质(粉红色),奇异夸克物质(绿色)。每条线(及周围一片)的顶端表示相应类状态方程所允许的最大重量。红色的横条显示精确测得的某些中子星质量,而黄色的横带显示测得的双中子星质量范围。图中最上面的那个横条代表双星中的中子星 J1614-2230 的质量;最大质量不能超过此横条的状态方程被观测所否定。两灰色角落区域已经被其他的观测或理论限制所排除(本图据文献^[1]而绘)

射电天文学家在寻找更重的中子星时,一直关注像 J1614 那样的另类双星系统:它们的轨道太大太圆而不能很好地测量轨道的衰减或进动。取而代之的方法是利用广义相对论的另外一种观测效应,而这一效应直到 1964 年才被注意到。

那年,夏皮罗(Irwin I. Shapiro,并非 *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars* 一书作者之一 Stuart L. Shapiro)

指出,光线经过大质量星体传播时由于广义相对论效应而延迟(后称为夏皮罗延迟);他的观点很快被行星反射雷达信号实验验证。这一夏皮罗延迟不同于光线因引力而弯曲所致的光程增加效应。在双星轨道方位合适的条件下,当中子星发出的射电束靠近其致密伴星而穿过时,脉冲信号就要被延迟几微秒(见图2中的卡通轨道)。白矮星虽不如中子星致密,但其密度比太阳要高 10^5 倍。

很好地测量夏皮罗延迟在一个轨道周期中的变化即可推算伴星及脉冲星的质量。对于银河系中随机分布的,由脉冲星和白矮星组成的双星系统而言,地球上测量的夏皮罗延迟一般都很微弱。这种延迟信号的幅度正比于伴星质量,而信号峰值的尖锐度敏感地依赖于轨道平面法线方向与视线的夹角。当完全侧向观测轨道运动时,这个效应最强。

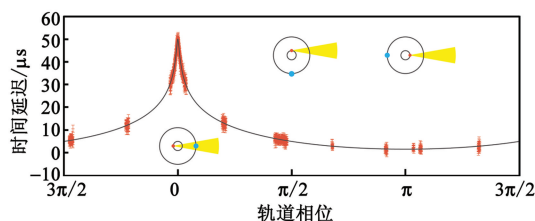


图2 因广义相对论效应,双星中中子星(卡通图中的红点)的射电脉冲束(黄色),在经过伴星(蓝点)引力场时到达地球的时间将被延迟。图为在脉冲星J1614-2230的9天轨道周期运动中测得的夏皮罗延迟;据此可以精确测定两颗子星的质量。此双星轨道几乎完全侧向地球。脉冲到达时间的延迟跟轨道相位有关;轨道相位的零点取为伴星最接近视线之时(因此也是延迟时间最长处)。图中绘制了拟合观测数据点的最佳理论曲线(本图引自文献[1])

J1614是迄今发现的最接近侧向轨道运动的脉冲星(图2)。观测数据显示,轨道平面的法线方向与视线方向的夹角为 $89.17 \pm 0.02^\circ$ 。观测到时延信号的强度和清晰度得益于两点:一是自然因素, $0.5M_\odot$ 白矮星伴星与同类双星中白矮星相比偏重(为这类双星中白矮星典型质量的3倍);另一是仪器因素,Green Bank新发明的脉冲星终端处理系统GUPPI于2010年3月才刚刚成功安装。通过对每个到达的脉冲进行超高速计算机处理,GUPPI使得望远镜的脉冲到达时间分辨率提高了4倍,矫正了因星际电子色散而带来的脉冲延迟。

图2绘制了测得的脉冲到达时间的夏皮罗延迟,此延迟为轨道相位的函数。轨道相位的零点选在白矮星最接近于脉冲束视线之时。Demorest等的大部分观测数据是在轨道“合”的位置(即从地球上看去两子星方位最接近)得到的,此时有最强并且变化最快的夏皮罗延迟。通过最佳拟合观测点可精确地给出两颗子星的质量以及轨道平面与视线之间的夹角。

3 中子星合并

除否定了大多数奇特物质相外,新的质量纪录还有其他重要意义^[2],包括可能揭开短暴(一类 γ 射线暴)的成因疑难

(参阅*Physics Today*,2005年第11期第17页)。有证据表明,短暴可能是两颗中子星合并成为黑洞的信号;但典型的短暴持续时间为一两秒钟,比这种合并的动力学时标长得多。

我们现在知道中子星的质量可大于 $1.8M_\odot$ 。Özel及其合作者指出两种可能延长暴发的机制:合并的系统可能首先被离心力支配,在大约一秒的时间内耗散并最终塌缩。另一种可能是黑洞很快形成了,但同时形成了一个高质量的吸积盘;吸积盘在一秒之内被黑洞所吞噬。

人们也指望在不远的将来能够利用地面探测器纪录中子星合并而产生的引力波信号。若能测得高于1000Hz的引力波信号,就可以揭示中子星合并更丰富的特征。然而,对于较低频敏感的LIGO探测器或下一代引力波探测器而言,我们又会得到什么样的信息呢?关于这一点,两倍太阳质量中子星的发现是令人鼓舞的。即使中子星存在奇特物质核心,它们的内部信息也不太可能通过合并潮汐瓦解过程产生的低于600Hz的引力波信号释放出来。目前否定了这类致密核心之后,Özel等人下了这样一个结论:即使在较低频段的引力波探测也“会在不久的将来精确给出中子星状态方程”^[2]。

参考文献

- [1] Demorest P, Pennucci T, Ransom S *et al.* *Nature*, 2010, 467: 1081
- [2] Özel F, Psaltis D, Ransom S *et al.* *Astrophys. J.*, 2010, 724: L199

译者点评 构成中子星的物质是密度最高的。学者们对这种物质感兴趣的原因有二:(1)认识与中子星相关众多极端天文现象的本质;(2)将中子星作为天体实验室来研究极高密度状态下物质的性质。其中后者涉及夸克之间的基本相互作用,与美国克莱数学研究所列举的“世纪奖金问题”之一(“Yang-Mills and Mass Gap”)相关。这两个原因导致中子星近八十年来学术上持续受关注。最近发现的两倍太阳质量中子星是一个里程碑,势将影响未来几年中子星研究。

其实,完全理想的“自由”粒子系是不存在的;但问题是:夸克之间的相互作用在几倍核物质密度下到底有多强?此问题的回答依赖于非微扰量子色动力学难题的解决。不过,如果那里的夸克之间作用足够强到可导致夸克成团,则得到比核物质还硬的夸克物质态。这种夸克物质不会因额外自由度的引入而软化。2009年的研究表明(见:Lai & Xu, 2009, *MNRAS*, 398:L31),夸克集团物质组成星体的极限质量很可能大于两倍太阳质量。所以,新发现的大质量中子星或是对夸克集团态的支持。

(北京大学物理学院 徐仁新、来小禹编译自

Physics Today, 2011, (1):12)