

宇宙中最致密的物质(下)

刘雄伟¹ 徐仁新^{2*}

(1. 西华师范大学物理与天文学院 637002; 2. 北京大学物理学院 100871)

(续前)

中子星和恒星级黑洞都是由大质量恒星演化到最后引力坍缩而形成的,它们的密度超过每立方厘米1亿吨,是宇宙中最致密的天体。虽然同为致密天体,但是,它们的性质却迥然不同,探测方法也各有特色。

1. 最致密的天体——中子星与黑洞

1.1 中子星的基本性质

中子星的结构很简单,它就像一个质量和太阳差不多但半径仅十千米左右的超级巨大的原子。原子的外部是电子云,中子星的最外层则是由正常物质组成的大气,厚度为厘米量级;原子的中心是质子和中子组成的原子核,中子星里面是由大量中子和少量质子组成的、强相互作用主导的致密物质;原子核由质子和中子组成并通过核力而聚集,中子星主要靠引力束缚。

众所周知,当原子核里的质子越来越多时会逐渐变得不稳定,需要更多的中子加入,才能形成稳定的核结构。从元素周期表可以看出,大质量的原子核的中子占比会更偏多一些,比如铜、银、金的中子数与质子数之比分别为1.17、1.28、1.49。那么,是不是只要中子足够多,就可以让原子核无限大下去呢?答案是否定的。自然界原子量特别大的原子都不稳定,无论它有多少个中子,最终都会裂变成更小的原子核,形成更加稳定的结构。这些大原子量的元素,就是我们所熟悉的放射性核素。那么,为什么中子星不发生裂变呢?因为中子星有强大的引力,靠引力把中子和质子聚在一起的。原子核质量太小时引力太弱,只能依靠核力。中子星

由于质量大、密度高,其引力、电磁力、强相互作用力、弱相互作用力都有极端的表现,这四种基本作用力的共同作用决定了中子星的内部结构。如图1所示,中子星的表面是正常物质组成的薄薄的大气层。大气底部是由原子核和电子组成的外壳层,再往里是由原子核、电子、中子组成的内壳层,再往里就是中子星的主体——中子物质:几乎全部是中子,仅有极少量质子和电子。中子星的表层密度较低,越往里面密度越大,在内壳层底部密度就已经高达每立方厘米2亿吨,核心区域密度更高。至于中子星的核心区域是什么物质,还有不少争议,这体现了人类对强相互作用的认识的缺陷:不知道在密度这么高、压强这么大的情况下什么物质是最稳定的。一般认为中子星核心可能会出现夸克物质,就是主要由自由夸克组成的物质。夸克物质和中子物质的性质差异会影响中子星的一些性质和观测现象,是当今科学研究的前沿问题之一。

中子星要形成稳定的结构,就需要有足够大的压力跟引力相抗衡。一般认为,这就是中子的简并压;但如果核心是夸克物质的话,就是夸克简并压。由于夸克物质和中子物质在性质上的差异,它们能

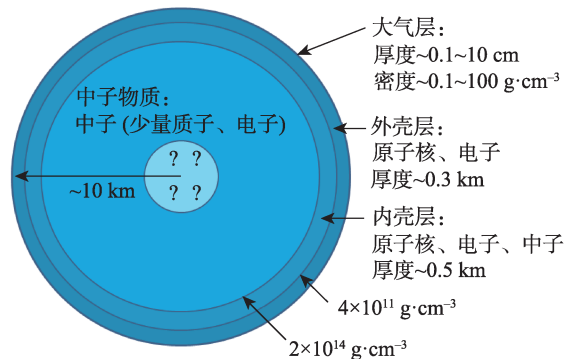


图1 中子星结构示意图

够产生的压力也有所不同,能够支撑的极限质量也不同,这样可以通过中子星极限质量的测量来区分它们的内部结构。一倍太阳质量的中子星,半径约为10千米,平均密度为每立方厘米几亿吨。质量更大的中子星半径更小,密度更大。研究表明,不管是中子物质还是夸克物质,中子星的极限质量很可能都不会超过三倍太阳质量。超过这个极限质量的致密天体,就会坍缩成黑洞。那么黑洞又是怎么回事呢?它跟我们普通的天体有什么不一样呢?

1.2 黑洞的基本性质

黑洞,尽管我们也把它称作致密天体,但实际上呢,它和其他天体有本质区别:它并不像一般天体那样存在一个实质的表面,或者说一个星球的表面。众所周知,我们的地球有固态的表面,太阳有等离子体的表面,中子星有原子核和电子组成的表面。但是黑洞没有这样表面,它只是一个极度弯曲的时空区域。根据广义相对论的描述,天体的质量和能量会引起时空的弯曲:质量越大越集中,引起的时空弯曲就越厉害。黑洞的质量集中在非常小的区域,使得它附近的时空极度弯曲,任何物质包括光子进入到离黑洞很近的范围内就再也出不来!这个进去就出不来的范围的边缘称作黑洞的边界,也叫作黑洞的事件视界(简称“视界”)。黑洞的视界里面究竟是什么东西,我们经验上无从知晓。但根据理论推算,一般认为所有物质和能量进入黑洞视界里面都会不可避免地掉向它的中心,但坠入中心的物质最终会怎样我们还无法准确地描述。

对于我们观测者而言,黑洞只有质量、角动量和电荷是可以观测的。因此,我们将这三个参量称作黑洞的“三毛”。质量不为零,角动量和电荷都为零的黑洞叫作史瓦西黑洞(图2)。有质量和角动量,没有电荷的黑洞叫作科尔黑洞。有质量和电荷,没有角动量的黑洞叫作纽曼黑洞。质量,角动量和电荷都不为零的黑洞叫作科尔-纽曼黑洞。宇宙中现存的黑洞都有质量和角动量,但往往是电中性的,所以很可能是科尔黑洞。

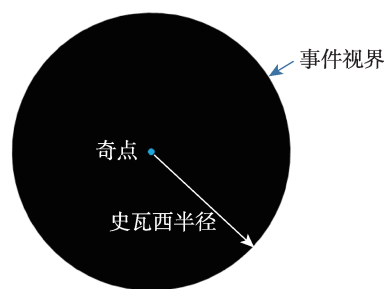


图2 史瓦西黑洞示意图

黑洞的视界半径与黑洞的质量成正比。例如,质量为一倍太阳质量的黑洞,视界半径约三千米;但质量跟地球相当的黑洞,视界半径仅约一厘米!由此可以看出,小质量黑洞的平均密度奇大,比中子星密度还高,但大质量黑洞的平均密度反而很小。有些星系中心的超大质量黑洞质量有上亿倍太阳质量,它们的平均密度甚至比水的密度还低。

2. 中子星和黑洞的探测

如果超新星1987A爆炸诞生的是黑洞,它根本就不发光。但如果是中子星,由于半径太小,其热辐射非常弱,这么远的距离人类最大的望远镜都很难看到它。那么,我们有没有办法发现并区分黑洞和中子星呢?

我们不能直接看到黑洞,但是有可能观测到由于它的存在而引起的其他效应。比如说周围的物质被它吸积的同时会发出强烈的辐射。2019年天文学家利用事件视界望远镜(EHT)拍到了室女A星系(M87)中心的超大质量黑洞,2022年又拍到了银河系中心超大质量黑洞(见图3),就是拍的黑洞周围的吸积物质所发出的光。黑洞周围的空间是弯曲的,会使经过的光线传播方向发生显著偏转,就像一个特殊的透镜一样,会使它背后的天体的图像发生扭曲、亮度发生变化,称作“引力透镜效应”。通过引力透镜效应的观测,我们也能够发现黑洞在宇宙当中的存在。如果黑洞附近有其他天体,他们就会在引力作用下互相绕转,通过观测这个邻近天体的运动我们也可以发现黑洞的存在。

黑洞位置：银河系中心
 距离地球：二万七千光年
 黑洞质量：400万倍太阳质量
 视界半径：1200万公里

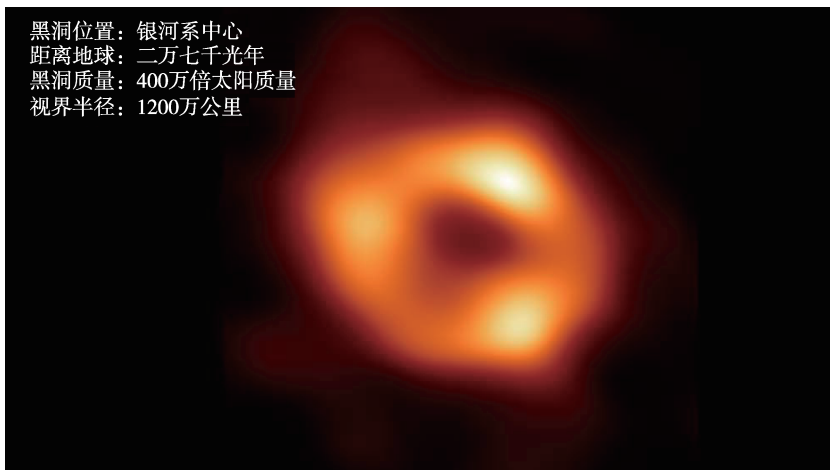


图3 事件视界望远镜(EHT)拍摄的银河系中心超大质量黑洞图像

黑洞的这些观测效应中子星也都可以有,但是中子星的观测和黑洞还是有细微差别的。中子星在吸积周围物质时也会发出强烈的辐射,但是辐射光子的能量分布和黑洞不一样,可以加以区分。中子星也可能出现引力透镜效应,但是由于中子星质量没有黑洞大,并且它附近的时空弯曲程度没有黑洞那么极端,所以也可以加以区分。中子星也可以和附近的天体互相绕转,通过测量可以得到它的质量,如果质量不超过3倍太阳质量,就可能是中子星,超过了就很可能是黑洞。

此外,中子星的表面热辐射虽然很弱,但是它表面有非常强的磁场和电场。中子星自转一般也非常快,这使得在中子星外感应出强电场,对荷电粒子加速到很高的能量进而产生非常强的辐射,其波长可以在射电波段。这样,我们就可以用射电望远镜观测到遥远的中子星的辐射了。这种辐射主要集中在中子星的磁极区域,像灯塔一样以旋转的辐射束的形式发出。只有当辐射束随着中子星的旋转扫过地球的时候,我们才能看见。中子星每旋转一圈,我们就看到一个脉冲信号,所以观测上把这种天体(中子星)叫作脉冲星(如图4)。人类发现的中子星大多数都是通过射电脉冲观测找到的。

历史上来看,1987A超新星爆炸发生不久,超新星遗迹还很浓密,对中心致密天体的遮挡还很严重,很难直接探测到致密天体的辐射。超新星爆发

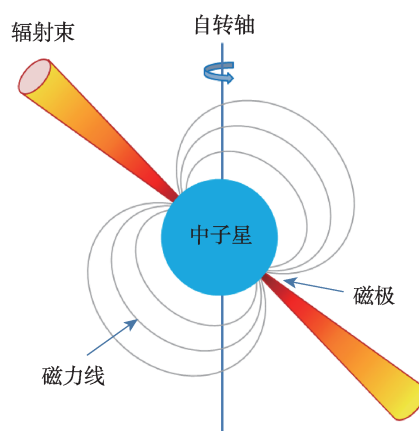


图4 脉冲星辐射的灯塔模型

后的这些年,天文学家曾尝试了各种观测手段,都没有直接观测到这个预期的致密天体。詹姆斯·韦布空间望远镜作为著名的哈勃空间望远镜的继任者,其独特的设计使得它有更强大的观测能力,并且可以在红外波段进行光谱观测(如图5)。当它对准1987A进行观测时,看到了遗迹气体里的氩和硫受到激发发出的特定频率的红外光线。而要激发出这些光线,理论上只能来自中心致密天体的高温热辐射或者强大的星风。当然,黑洞不可能会有这样的高温热辐射或者星风,故只可能是中子星了。因此,这个观测间接发现了1987A超新星遗迹中有一颗中子星。这也是人类第一次观测到这么年轻的中子星,对于我们认识超新星爆炸和中子星形成都有非常重要的意义。



图5 詹姆斯·韦布空间望远镜

3. 中国在相关领域的研究

科学的重大发现和突破需要有强大的科学设备作为支撑。近年来,我国投入了大量人力和物力加强科学设施的建设。比如,在贵州深山建设了世界最大、灵敏度最高的单天线射电望远镜—中国天眼 FAST(如图6)^[1],在川西高原建设了世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙射线探测装置——高海拔宇宙线观测站 LHAASO(如图7)^[2],在太空中有以探测中子星、黑洞以及伽马射线暴为主要科学目标的“慧眼”硬 X 射线调制望远镜等。正在建设的还有中国巡天空间望远镜 CSST,在太空探

测引力波的天琴计划和太极计划等。

值得骄傲的是,中国天眼 FAST 在开放运行四年来,已发现了超过 1000 颗脉冲星,超过同一时期国际其他望远镜发现脉冲星数量的总和,其中不少是极难以发现的毫秒脉冲星和脉冲星双星。此外,FAST 还在发现最短轨道脉冲双星、捕捉纳赫兹引力波信号的初步证据等方面取得了突破性进展。高海拔宇宙线观测站 LHAASO 在银河系内发现大量超高能宇宙加速器,并记录到能量达 1.4 千万亿电子伏的伽马光子。这是人类观测到的最高能量光子,突破了人类对银河系粒子加速的传统认知。LHAASO 还在天鹅座恒星形成区发现了一个巨型



图6 中国天眼 FAST



图7 高海拔宇宙线观测站 LHAASO

超高能伽马射线泡状结构,国际上首次认证了能量高于1 亿亿电子伏特的宇宙线的起源天体。显然,LHAASO 开启了超高能伽马天文学的新时代。致密天体的诞生和演化都常常伴随着极端剧烈的天体物理现象,是高能宇宙线的重要来源,LHAASO 的探测结果将帮助科学家更加深入地研究致密天体。

这些强大的科学设备必将助推我国科技的蓬勃发展,也将为人类认识宇宙和物质世界的奥秘做出卓越的贡献。

4. 总结和展望

詹姆斯·韦布空间望远镜以其卓越的观测能力证实了超新星 1987A 中诞生的致密天体不是黑洞,而是一颗中子星。由于这是第一次发现这么年轻的中子星,为我们进一步了解中子星的基本性质提供了前所未有的机遇。

严格来讲,这颗致密天体应该叫中子星类致密天体,原因是我们并没有观测证实它一定以中子物质为主构成。理论上还存在其他可能,比如星体内部主要成分为夸克物质或奇子物质^[3,4],该问题的答案涉及在如此高密度环境下的强相互作用物质的基态到底是什么。坦率地讲,我们目前还很难给出肯定的回答。

虽然同为致密物质,中子物质和夸克物质很可能只存在于中子星内部,但奇子物质却可能以小块形态自由地穿梭于宇宙空间^[5]。科幻小说《三体》里

三体文明建造了一种强大的探测器——水滴。它的表面极度光滑,可以完全反射光线,且强硬到可以穿透地球上的任何物质。理论上讲,奇子物质可能就具有“水滴”的这些性质!奇子物质有没有可能真实存在或者我们有一天可以用它造出地球版的“水滴”呢?

其实,有关宇宙中物质的奥秘还有很多,比如占了宇宙物质总量大多数的暗物质以及驱动宇宙加速膨胀的暗能量。天文观测虽然发现了它们的存在,但我们对它们的性质却知之甚少。它们的本质究竟如何?和致密物质有没有什么关系?对人类有什么影响?我们又能否利用它们呢?这些迷人的未解之谜,正等待着未来的科学家们去探索。

参考文献

- [1] Han, J. L. 等, The FAST Galactic Plane Pulsar Snapshot survey: VI. The discovery of 473 new pulsars[J], RAA, 2025, 25, 014001 (arXiv:2411.15961)
- [2] Cao, Z. 等, Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources[J], Nature, 594 (7861), 33-36
- [3] Liu, X. W. 等, The missing compact star of SN1987A: a solid quark star? [J], MNRAS, 2012, 424, 2994-2998
- [4] Lai, X. 等, Bulk Strong Matter: the Trinity[J], Advances in Physics: X, 2023, 8(1), 2137433
- [5] 夏铨君、高勇、徐仁新:《奇异物质与奇异星》,北京大学出版社(2024)

注:

* 基金项目:科技部 SKA 专项项目 (2020SKA0120100);中国科学院先导战略项目 (XDB0550300)