

# 天文教育 II: 迈向奇点的致密星

刘荷蕾<sup>1</sup>, 徐仁新<sup>2,3</sup>

(1. 新疆大学 物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 新疆 830046; 2. 北京大学 物理学院天文系; 3. 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 奇点定理表明黑洞的形成是不可避免的, 但是大质量恒星在自引力主导下迈向黑洞之途并非“一帆风顺”。本文通过分析恒星内能与引力能的平衡, 一般性地讨论了从主序星到致密星(白矮星、中子星和黑洞)的演化过程, 半定量地阐述了星体每重子积累的内能( $\varepsilon$ )和半径( $R$ )的关系。在恒星奔向奇点( $R \rightarrow 0$ )的过程中, 会有三个阶段阻止其引力塌缩, 所对应每重子内能  $\varepsilon$  分别为:  $\sim \text{keV}$  (主序星)、 $\sim \text{MeV}$  (白矮星) 和  $\sim 10^2 \text{ MeV}$  (中子星)。对于黑洞而言,  $R \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow \infty$ 。最后简介了致密星的基本物理性质及其在现代天体物理研究中的地位, 以及恒星天文的教学实践。

**关键词:** 天文教育; 恒星; 致密星; 引力

**中图分类号:** P 1-4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0712(2025)08-0008-07

**【DOI】** 10.16854/j.cnki.1000-0712.250103

## 1 引言

为促进高校天文和天体物理的教育、给课程教学带来新视角, 本“天文教育”系列论文拟介绍一些核心天文概念, 并借此将若干有趣的知识点有机地串联起来, 从而激发学员的创造力。首篇论述了在物理学和天文学两个学术领域内各自发展出天体物理学科的必然性, 特别指出万有引力在其中扮演的关键角色<sup>[1]</sup>。作为续篇, 这里拟讨论一类最简单且常见的自引力客体——恒星; 它们近乎球对称, 通过半定量分析即易于把握其本质。当然, 这不意味着恒星的研究是过时的、平庸的。事实上, 这方面的相关研究历史悠久, 并且还是如今进入多信使天文学时代的热点课题<sup>[2]</sup>。

回顾认识引力的历程, 牛顿于 1687 年发表的《自然哲学的数学原理》是里程碑。牛顿提出的万有引力定律成功地统一了地表引力现象和天体的运行规律, 在广义相对论诞生前的二百多年间被广泛接受。爱因斯坦的广义相对论(1915 年)将时空的几何属性跟时空中的物质分布联系起来, 而身处第一次世界大战前线的施瓦西(K. Schwarzschild)在爱因斯坦论文发表一个多月后就得到了场方程的第一

个严格解: 真空爱因斯坦场方程静态球对称解。作为广义相对论的两大重要预言, 黑洞和引力波近年来获得了大量的直接观测证据<sup>[3-6]</sup>, 为广义相对论奠定坚实的实验基础。

黑洞, 俗称“看不见的天体”, 由惠勒(J. Wheeler)于 1968 年命名。不过, 早在 18 世纪, 英国教士米歇尔(J. Michell)和法国数学家拉普拉斯(P. Laplace)等人就基于牛顿引力讨论过类似的话题: 对于一颗密度与太阳相当、但尺度却大了几百倍的恒星, 虽然它发光能力可能很强, 但是发射的光线将被自身引力吸引而不能被我们看到。出于这个朴素的想法, 宇宙中最重的天体很可能是看不见的。根据牛顿力学和光微粒说可以得到质量为  $M$  天体的逃逸速度,  $v = \sqrt{2GM/R}$ , 其中  $G$  为引力常数, 若天体的半径  $R < r_s \equiv 2GM/c^2$ , 则  $v > c$ , 其中  $c$  为光速, 这意味着我们就不能看到该天体。然而, 广义相对论中黑洞的概念跟米歇尔的“暗星”(dark star)有本质区别: 前者为一种带有奇性的特殊时空区域, 在那里光和其他粒子都只能单向地向引力源方向运动, 而后者不受这些约束, 只是光线不能传递至无穷远。有趣的是, 对于静态球对称时空而言, 广义相对论描述的黑洞半径正好就是  $r_s$ ! 人们

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2024D01C52), 新疆维吾尔自治区重大科技专项子课题(2022A03013-3), 国家自然科学基金项目(12263006)资助

作者简介: 刘荷蕾(1987—), 女, 河南南阳人, 新疆大学物理科学与技术学院教授, 博士, 主要从事致密星、I 型 X 射线暴等研究工作。

通信作者: 徐仁新, E-mail: r. x. xu@pku.edu.cn

引文格式: 刘荷蕾, 徐仁新. 天文教育 II: 迈向奇点的致密星[J]. 大学物理, 2025, 44(8): 08-14.

称  $r_s$  为施瓦西半径,该处之外发出的光线才能够向外辐射.此外,施瓦西时空中受引力作用做圆周运动的检验粒子的轨道半径也不能像牛顿引力那样任意地小,有个最小值  $r_{ms} = 3r_s$ . 轨道半径小于最小圆轨道半径  $r_{ms}$  的检验粒子将很快坠落引力中心<sup>[7]</sup>.

如何形成黑洞?要知道,如果把地球这样质量的天体变成黑洞,就需要将它压缩到仅厘米大小!看来,在形成黑洞之前,星体的密度应该比较高.1939年,奥本海默(J. Oppenheimer)等人认为,球对称大质量恒星在其核燃料耗尽之后,恒星质量超过一定的极限,则中子之间的泡利斥力也难以抵挡星体的塌缩,此时星体物质将无限塌缩下去,从而导致时空奇点——黑洞的形成<sup>[8]</sup>.1965年,彭罗斯(R. Penrose)首次给出了奇点定理的证明:广义相对论框架下时空的奇点应该是普遍存在、不可避免的<sup>[9]</sup>.这表明黑洞很可能是大质量恒星演化的终点.

宇宙中是否真的存在黑洞呢?鉴于坚实的黑洞理论基础,天体物理学家们从未停止寻找黑洞的步伐.黑洞本身并不发光,天文学又是怎么看到黑洞的呢?答案还是源于引力:黑洞的超强引力吸引周围物质形成吸积盘,使得黑洞外部物质发出各种电磁辐射;这便于人们寻找黑洞.上世纪六七十年代,天文学家就开始在X射线双星系统中寻找黑洞候选体.特别地,2015年,人类首次探测到了两个黑洞相互绕转并合时产生的引力波信号:GW150914<sup>[3]</sup>.2019年,事件视界望远镜(EHT)得到人类的第一张黑洞照片<sup>[5]</sup>,轰动全球.自此,黑洞不再是数学家或者物理学家纯粹的理论演绎,而是可观测的实际存在.

为了表彰黑洞相关的重要研究,包括黑洞在广义相对论中的必然性及其真实存在,2020年诺贝尔物理学奖颁发给彭罗斯、根泽尔(R. Genzel)和格兹(A. Ghez),其中由后两位各自领导的研究小组在银河系中心发现了一个超大质量的致密天体,被人们普遍认为是一个大约400万倍太阳质量的黑洞.从20世纪上叶黑洞概念的提出到2020年黑洞研究者获得诺贝尔物理学奖,人类对黑洞的理解逐渐深刻.但是,更基本的问题还在等待我们去回答,例如:如何更好地理解黑洞内部的奇性?引力的本质到底是什么?时空的量子属性又如何?

本文将探讨引力在恒星演化过程中扮演的重要角色.众所周知,鉴于其不可屏蔽性,引力在宇观层次普遍存在.这直接导致一个似是而非的后果:

质量  $M$  的物体应该在尺度为零(即黑洞)时能量最低、才是最稳定的!当然,除了自引力外,物体还具有内能.内能的增加表现出来的“斥力”抗衡引力,从而避免物体无限收缩.通过如下的讨论,将会看到:因显著地积累内能,恒星“迈向”奇点的进程有可能被打断,从而表现出不同类型的致密星.

## 2 一颗奔向“奇点”的恒星

恒星的一生本质上就是与自引力抗争的一生.当星际介质中某些区域的质量足够大,以至于其向内的自引力大于向外的热压力时,该区域物质将不能稳定存在,从而引力收缩,最终形成恒星的前身——原恒星.原恒星温度较低,主要依靠收缩时释放的引力能来维持向外的辐射.收缩过程中温度逐渐增高;当中心温度升高到可以使氢发生热核聚变时,恒星便进入主序阶段(即夜晚看到的绝大多数点点繁星),维持热核反应供能的热压力与自引力的相对平衡.热核聚变停止后,恒星又以不同初始质量为界限,最终演化为白矮星、中子星和黑洞.形象地看,恒星就像人一样有生命周期,也有诞生、成长、老去直至死亡的过程,只不过恒星的寿命比人长得多,通常以“亿年”为单位来计算!

就球对称的自引力系统而言,除了主序星、白矮星、中子星和黑洞外,可否还存在其他类型至今乃未观测发现的星体?我们试图给出否定回答;为此,让我们做点简单的半定量计算.球对称自引力星体的引力相互作用能量为:

$$E_g = - \int_0^M \frac{Gm(r)dm(r)}{r} \simeq - \frac{GM^2}{R} \quad (1)$$

其中  $M$  和  $R$  分别是星体的质量和半径.对于密度均匀的情形,系统的引力势能为  $E_g = -0.6GM^2/R$ .由此可见,恒星的半径  $R$  越小,引力能越低、系统就越倾向稳定,即:  $R \rightarrow 0$  (奇点)时能量最低、最稳定!看来,恒星不得不奔向奇点.实际上,恒星内部压力会抵抗引力,阻止恒星奔向奇点;其本质是:当恒星收缩时内能增加.假设星体内部物质平均贡献每重子内能为  $\varepsilon$ , 质量为  $M$  的星体内总重子数为  $N \sim M/m_u \simeq 10^{57} M/M_\odot$ , 其中  $m_u \simeq 1\text{GeV}/c^2$  为原子质量单位、 $M_\odot$  为太阳质量,则总能量  $E$  为内能和引力能之和:

$$E(M) = \frac{M}{m_u} \varepsilon + E_g \simeq \left( \varepsilon - \frac{GMm_u}{R} \right) \frac{M}{m_u} \quad (2)$$

只有当内能与引力能匹配时,星体才能稳定存在(其实  $\varepsilon$  也是  $R$  的函数,由构成星体物质的状态

方程来决定. 不过, 在平衡态且  $R$  变化不大时,  $\varepsilon$  可近似当作常数. 严格来说, 作为引力束缚体系,  $E < 0$ , 然而  $|E|$  应该与  $|E_g|$  相当, 否则星体势必引力坍缩. 这里举一个例子: 受引力作用, 质量  $m$  的质点绕另一质量  $M \gg m$  的质点作半径为  $r$  的圆周运动, 此时系统内能 (即动能)  $GMm/(2r)$  是引力能绝对值  $GMm/r$  的一半, 即  $|E| = |E_g|/2$ . 由  $E \sim 0$ , 即得

$$R \simeq \frac{GM_u}{\varepsilon} \simeq 1.5 \text{ km} \frac{M}{M_\odot} \frac{1 \text{ GeV}}{\varepsilon} \quad (3)$$

容易看出, 当  $R = r_g$  时, 可以给出每重子贡献的最大内能  $\varepsilon_{\max} \sim 500 \text{ MeV}$ , 与中子星内部物质能够提供的  $\varepsilon$  相当. 这意味着中子星很可能是塌缩黑洞之前的最后状态. 下面将基于公式 (3) 解释, 在星际物质云团受自引力主导而迈向奇点的过程中, 将表现出主序星、白矮星、中子星等“亚稳态”, 最终才有可能迈入奇点、形成黑洞.

对于像太阳这样的主序恒星, 其半径  $R_\odot = 7.0 \times 10^5 \text{ km}$ , 利用公式 (3), 可以得到  $\varepsilon \approx 2 \text{ keV}$ . 此内能易于被理解为热运动的动能, 则太阳中心温度  $T_\odot \approx 1 \times 10^7 \text{ K}$ . 我们现在知道, 这将触发恒星内部通过核聚变并有效地释放能量来维持恒星内部如此高的温度状态并抵抗引力塌缩 (若无内部产能, 恒星因辐射必然降温). 恒星内逐渐从轻核到重核的某一级核聚变终止时, 星核必定收缩, 释放的引力能使恒星中心温度升高, 引发下一级核燃烧.

恒星核能源耗尽后将会怎样? 对于太阳质量恒星, 最终将形成碳氧白矮星. 白矮星因冷却而逐渐暗淡, 此过程十分缓慢, 可能需要 100 亿年左右 (和我们宇宙年龄相当).

英国物理学家爱丁顿最早认识到并研究白矮星极高的密度. 1926 年, 福勒 (R. Fowler) 首次将费米-狄拉克统计应用于理解白矮星, 提出电子之间的泡利斥力抵抗白矮星的自引力. 那时, 印度青年物理学家钱德拉塞卡 (S. Chandrasekhar) 注意到福勒白矮星模型的瑕疵: 大质量白矮星内部简并电子应该是相对论性的, 在计算状态方程时不能像福勒那样利用非相对论的能动量关系! 钱德拉塞卡发现: 随着白矮星质量增加, 电子逐渐趋近极端相对论性, 物态变软, 故而发现白矮星质量极限  $M_{\max} \approx 1.4 M_\odot$ . 论文于 1931 年发表, 后人称此质量极限为钱德拉塞卡极限. 可见, 白矮星主要由处于简并状态的电子动能贡献内能, 最大时为  $\varepsilon_{\text{Chandra}} \sim m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ , 由公式 (3) 可得到极限质量附近的白矮星半径:

$$R_{\text{wd}} \simeq 1.5 \text{ km} \frac{1.4 M_\odot}{M_\odot} \frac{1 \text{ GeV}}{0.511 \text{ MeV}} \sim 4 \times 10^3 \text{ km}$$

进而得到此时白矮星的平均密度  $\rho_{\text{Chandra}} > 10^8 \text{ g/cm}^3$ . 该密度远超过了我们熟悉的物质, 但还有更致密的!

当质量大于钱德拉塞卡极限时会怎么样? 早在 1932 年, 朗道 (L. Landau) 就提出巨核的猜测: 引力塌缩将原子核挤成一片形成一个“巨核” (gigantic nucleus), 即中子星原型. 也就在同年稍晚一些, 查德威克发现中子. 1934 年, 巴德 (W. Baade) 和兹维基 (F. Zwicky) 提出超新星爆炸之后可能残留中子星. 1939 年, 奥本海默和沃尔科夫 (G. Volkoff) 基于广义相对论框架内的流体静力学平衡方程, 得到了近乎理想中子气组成星体的极限质量仅约  $0.7 M_\odot$ . 然而, 发现中子星却是将近 30 年之后的事. 1967 年, 剑桥大学休伊什 (A. Hewish) 的博士研究生贝尔 (J. Bell) 发现了脉冲星. 随后进一步的研究让人们相信, 脉冲星就是旋转中子星.

从现代物理的观点看, 质量超过钱德拉塞卡极限时, 处于量子简并态的高能电子将与原子核中的质子通过弱相互作用转化为中子:  $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ , 最终成为中子星. 一般认为中子星与白矮星类似, 主要靠中子简并压抗衡引力 (需注意: 极端密度条件下, 核子间的强相互作用、星体的快速自转以及广义相对论效应均可影响自引力的抗衡).

粗略地讲, 核子之间的距离约为 fm, 根据海森伯不确定性关系可以估算该情形下的特征能量为:  $\varepsilon \sim \hbar c / \Delta x \sim 100 \text{ MeV}$ . 利用公式 (3), 得到中子星的半径:

$$R_{\text{ns}} \simeq 1.5 \text{ km} \frac{1.4 M_\odot}{M_\odot} \frac{1 \text{ GeV}}{100 \text{ MeV}} \sim 10 \text{ km}$$

进而得到中子星的密度  $\rho_{\text{ns}} > 10^{14} \text{ g/cm}^3$ , 相当于原子核的密度, 这是当今宇宙中最致密的物质! 但中子星的主要成分果真是中子吗? 基于粒子物理标准模型的研究 (如 Witten 猜想等) 表明, 部分天文学家认为脉冲星可能是奇异星而非传统意义上的中子星. 脉冲星到底是中子星还是奇异星? 至今还是个严肃的开放性科学问题.

中子星也有一个质量上限, 大约为  $\sim 2-3 M_\odot$ , 人们把此极限质量称为奥本海默极限. 超过这一质量极限的中子星, 中子简并压也抵挡不住星体的塌缩, 这时星体将继续塌缩, 形成黑洞. 由公式 (3) 知,  $R \rightarrow 0$  时,  $\varepsilon \rightarrow \infty$ , 即黑洞. 从上述的逻辑分析来看, 大质量恒星演化至晚期受引力主导而塌缩成黑洞是不可避免的!

可见,引力主导的星体最终“走向奇点”.通过以上关于内能和引力能平衡的分析,不难发现:若途中稳定存在的星体越致密,则每个重子积累的内能就越高.图1形象地给出了自引力星体迈向黑洞的历程:一颗自引力束缚星体在半径( $R \rightarrow 0$ )收缩过程中,内部每重子内能( $\varepsilon$ )逐渐增加,直至 $\varepsilon \rightarrow \infty$ .这期间的临时逗留阶段包括主序星、白矮星和中子星,终点是黑洞.对于主序星,每重子内能 $\varepsilon \sim \text{keV}$ ;对于白矮星,每重子内能 $\varepsilon \sim \text{MeV}$ ,量级上对应于电子静能;对于中子星,每重子内能 $\varepsilon \sim 10^2 \text{ MeV}$ ,位于强力的非微扰能区.不过,它们每重子的内能均满足 $\varepsilon < \varepsilon_{\text{max}} < \sim \text{GeV}$ .对于黑洞, $R \rightarrow 0$ ,每重子内能 $\varepsilon \rightarrow \infty$ .当然,一颗星体能否完全经历这些阶段依赖于其初始质量,只有质量足够大的恒星(一般认为初始质量超过约十倍太阳质量)才能最终演化成为黑洞.

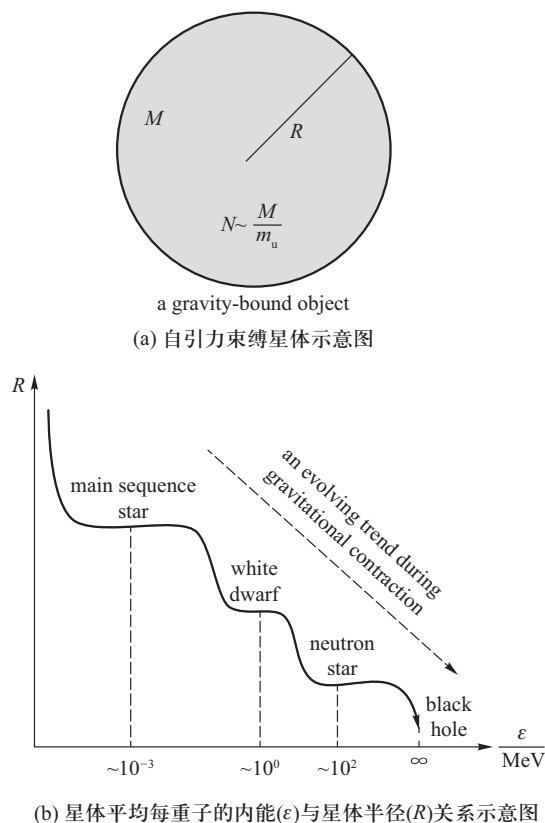


图1 星体引力能与内能的平衡

一般统称白矮星、中子星和黑洞为致密天体.下一节,简介这类天体的基本特征.

### 3 从白矮星到黑洞

白矮星、中子星以及黑洞是主序恒星演化最终

的状态.决定恒星命运的主要因素是初始质量:一般认为低于 $8 M_{\odot}$ 的恒星最终演化为白矮星,更大质量的恒星会演化为中子星或者黑洞.致密星内部已经停止了热核燃烧,向外辐射的能量完全依靠残留的热能等提供;随着热能的消耗逐渐冷却,因此致密星又称之为冷星.致密星提供的极端物理环境使得它们被誉为理想的“宇宙实验室”<sup>[10-11]</sup>,是粒子物理标准模型演绎的场所之一.另一个演绎场景是关于宇宙学的<sup>[12]</sup>.

#### 3.1 白矮星

白矮星主要靠电子简并压抵抗引力塌缩.鉴于温度远低于Fermi温度,故零温理想电子气状态方程可较好地描述白矮星内部物质状态.基于费米-狄拉克统计得到费米动量: $p_F = (3\pi^2)^{1/3} \hbar n^{1/3}$ ,其中 $n$ 为电子数密度.对于小质量白矮星,较低的 $n$ 使得 $p_F \ll m_e c$ ,简并电子是非相对论的,此时的压强可表示为

$$P_e^{\text{NR}} = \frac{\hbar^2}{5m_e} (3\pi^2)^{2/3} n^{5/3} \approx 10^{13} \left( \frac{\rho}{\mu_e} \right)^{5/3} \text{ dyn/cm}^2 \quad (4)$$

这里的电子数密度 $n$ 和物质质量密度 $\rho$ 满足 $n = \rho / (m_u \mu_e)$ ,其中 $\mu_e$ 为重子数与电子数之比.对于较大质量的白矮星,密度接近或超过 $10^7 \text{ g/cm}^3$ 时,简并电子的动能可与静能相比,则相应的相对论性电子气压力近似为

$$P_e^{\text{ER}} = \frac{1}{4} (3\pi^2)^{1/3} \hbar c n^{4/3} \approx 10^{15} \left( \frac{\rho}{\mu_e} \right)^{4/3} \text{ dyn/cm}^2 \quad (5)$$

以上(4)式和(5)式分别描述白矮星物质在非相对论(低密度)和极端相对论(高密度)极限情形下的近似状态方程.

白矮星引力场不算很强,那里的广义相对论效应不显著.将简并电子气状态方程跟如下的牛顿引力流体静力学平衡方程:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2} \quad (6)$$

进行联立数值求解,可得到白矮星的质量半径关系曲线.计算表明,因高密情形物态趋软,太重的白矮星不能稳定存在;白矮星的最大质量约为 $1.4 M_{\odot}$ .1931年,钱德拉塞卡在福勒关于白矮星理论研究的基础上考虑了电子气的相对论效应,发现白矮星应该存在极限质量;他也因这个发现为主获得1983年度的诺贝尔物理学奖.

在赫罗图上,白矮星位于主序带的左下方,是银河系内超过百分之九十以上的主序恒星演化的最终阶段.根据白矮星表面大气成分的不同,白矮星被划

分为 DA(富氢)、DB(富氦)、DF(富钙)、DP(强磁场)等不同类型。当白矮星处在双星系统中时,会通过吸积伴星物质释放引力能而产生辐射。我们观测到的新星或者 Ia 型超新星等现象均跟这类双星系统有关。

### 3.2 中子星

1967 年,英国剑桥大学休伊士教授在指导他的博士研究生贝尔(J. Bell)研究类星体在射电波段的行星际闪烁时意外地发现第一颗脉冲星 PSR B1919+21,后被证认为中子星。1974 年,休伊士因这一发现等贡献获得诺贝尔物理学奖,而贝尔则因对发现脉冲星的重要贡献获得 2018 年基础物理学突破奖。1975 年,赫尔斯(R. Hulse)和泰勒(J. Taylor)公布发现了一颗处于双星系统中的脉冲 PSR B1913+16。随后,对 PSR1913+16 进行了数十年的跟踪计时观测,很好地检验了爱因斯坦的引力理论。1993 年,赫尔斯和泰勒因该发现并检验了强引力场中的广义相对论效应、间接证明引力波的存在而获得诺贝尔物理学奖。脉冲星研究因其重要性而荣获两次诺贝尔物理学奖。未来,脉冲星研究的重要性还很可能体现在如下三个方面:脉冲到达时间的计时观测,以发现低频引力波、检验广义相对论、测量周期不规则改变等;脉冲星相关的各类爆发现象的观测,以揭示其辐射过程、辐射区结构、能源机制;中子星质量的普查,以推断中子星物质的状态方程、中子星前身星的演化及超新星爆发机制。类似于白矮星,中子星也存在极限质量,即奥本海默质量。

五十多年来,得益于世界各大射电望远镜如澳大利亚 Parkes 64 m 射电望远镜、美国 Arecibo 305 m 射电望远镜、中国 FAST 500 m 射电望远镜等的巡天工作,脉冲星的观测和理论都取得了重要进展。目前发现的脉冲星超过四千颗,其观测属性非常丰富。一般认为中子星周围具有偶极磁层结构,中子星周围磁层中的等离子体随星体的自转发射多波段的、各向异性的辐射。如果射电束刚好扫过地球,人们就能接收到此脉冲信号,故脉冲星又被称作宇宙灯塔。根据脉冲星的自转周期和周期导数可将其分为毫秒脉冲星(周期范围 1.4~30ms)和普通脉冲星(周期范围 $\geq 30$ ms);根据其供能机制不同可分为转动供能脉冲星、吸积供能脉冲星、磁供能脉冲星和热供能脉冲星等。一般认为  $\gamma$  射线脉冲星辐射由自转能提供, $\gamma$  射线辐射来自于磁层;而对于 X 射线脉冲星,其能量来源可能为自转能、吸积能、热能或磁能。

反常 X 射线脉冲星(AXP)因其自转周期较长(超过 $\sim 5$  s)、自转减慢的能量不足以提供 X 射线

辐射的能量而倍受到关注。目前普遍认为反常 X 射线脉冲星来自具有超强磁场的中子星,磁场的衰减很可能为 X 射线辐射供能。软  $\gamma$  射线暴(SGR)是释放能量  $10^{40-41} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$  的高强度短暴源。人们认为 SGR 与 AXP 一样,其辐射能量主要由自身的磁能提供。

暗 X 射线孤立中子星(XDINS)和中心致密天体(CCO)一般属于热供能脉冲星。XDINS 观测不到射电辐射,但观测到光学紫外超现象,即它们在光学/紫外波段的辐射是数倍于据 X 射线黑体辐射而推测的结果。XDINS 的软 X 射线辐射光度为  $\sim 10^{30-32} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大于自转能损。人们怀疑 XDINS 可能来自热能和磁供能,由磁星通过磁场衰减演化形成;不过目前发现的 XDINS 只有 7 颗左右,尚不能为理论研究提供足够多的样本。CCO 位于超新星遗迹中心附近,没有射电和光学辐射且磁场较弱,热 X 射线辐射光度为  $\sim 10^{33-34} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大于其自转能损率。目前观测到约 10 颗 CCO,对于其起源和演化需要更多的观测样本来进行研究。

值得期待的是,我国有世界上口径最大的 500 m 射电望远镜 FAST,还有位于新疆奇台县正在建设的世界上口径最大的 110 m 全可动射电望远镜 QTT,通过其将来的巡天观测,人们或将对脉冲星有更多的发现。

中子星作为宇宙中最致密的天体,其观测涵盖多波段和多信使(电磁波、引力波、中微子和宇宙线)的特性,但人们对中子星最内部的物态方程却知之甚少;相关研究应该能够深化人们对引力及强力的认识。1984 年,威腾(E. Witten)提出 u、d、s 三味夸克组成的奇异夸克物质可能是物质的真正基态,从而改变人们一直认为 $^{56}\text{Fe}$ 是最稳定的观点。在此猜想下,中子星的本质也可能是奇异夸克星(组分为游离的夸克)或者奇子星(以类似核子的夸克集团作为基本单元)<sup>[2]</sup>。脉冲星的本质到底是什么?这还需要由脉冲星、伽马暴、快速射电暴、引力波、千新星、X 射线暴等更多观测来证认。

### 3.3 黑洞

黑洞本身是电磁辐射难以观测的天体,人们尚无法寻获黑洞视界存在的直接证据。但是,天文观测可通过借助吸积过程产生的 X 射线辐射、绕转恒星轨道运动、引力透镜效应以及致密天体合并引力波事件等间接证据对黑洞进行研究。

虽然黑洞看起来很神秘,但刻画黑洞却很简单,只需要三个参数:黑洞的质量( $M$ )、电荷( $Q$ )和

角动量( $J$ )。黑洞外部的观测者只能探知到黑洞  $M$ 、 $Q$ 、 $J$  这三个观测量,形象地称之为黑洞的“无毛定理”。从这个意义上讲,黑洞又是宇宙中最简单的一类天体。1971年,霍金证明了黑洞的面积定理,指出黑洞的表面积随着时间的推移只增加不减少。美国物理学家贝肯斯坦(J. Bekenstein)猜想黑洞的面积是热力学意义上的熵,黑洞面积不减定理类似于热力学中的熵增原理。难道黑洞也可以定义温度?霍金一开始对此提出了质疑:如果黑洞有温度就应该有热辐射,但黑洞不允许任何物质通过它的视界逃出来!然而,霍金进一步的研究发现黑洞在量子物理学框架中确实可能有热辐射。在量子力学中,真空中充满着虚粒子对,这些虚粒子对可以自发地产生和消灭。假定黑洞捕获虚粒子对中的其中一个粒子,剩下的一个表现为从黑洞中辐射出来。这种自发辐射现象被称为霍金辐射。该辐射相当于一个温度为  $T$  的黑体,其中  $T = \hbar c^3 / 8\pi G M k$ 。对于太阳质量的黑洞,霍金辐射温度只有  $\sim 10^{-7}$  K,远低于宇宙微波背景辐射的温度( $\sim 3$  K)。霍金辐射温度公式被刻在了霍金的墓碑上,以纪念霍金继爱因斯坦后在空间和时间理解上做出的贡献。

黑洞按照质量可以分为以下几类:超大质量黑洞、恒星黑洞和原初黑洞。原初黑洞被认为产生于早期宇宙介质涨落,那时高于平均质量密度的区域有可能会自行塌缩成黑洞,也可能成为未来更大质量黑洞的种子。原初黑洞质量的大小从  $1\mu\text{g}$  到  $\sim 10^4 M_\odot$  不等。按照霍金蒸发理论预言,质量  $\sim 10^{12}\text{kg}$  的黑洞是宇宙当前寿命内霍金辐射蒸发后可能幸存下来的质量最低的原初黑洞,但至今还没发现这类微型黑洞存在的直接证据。

恒星级黑洞是大质量恒星演化晚期的产物,质量在  $\sim (3-10)M_\odot$  左右。首个被证认的恒星级黑洞天鹅座 X-1 (Cygnus X-1) 是通过精确测量 X 射线双星系统轨道运动、推算出致密星质量下限来断定的;若大于  $3 M_\odot$ ,基本上可以断定致密星是黑洞。

超大质量黑洞质量从几百万到几十亿倍太阳质量;相对于恒星级黑洞而言,这类黑洞的形成和成长伴随着星系的形成和演化,但具体过程的细节尚未定论。目前,人们认为超大质量可能形成于大量恒星聚集的一个非常致密的区域,也可能通过物质不断吸积至种子黑洞形成,也可能通过小黑洞并合而成,其中暗物质还可能扮演关键角色。正常物质被黑洞吸积时会释放引力势能;人们可以通过黑洞周围 X 射线辐射来研究强引力场中的各种效应。

## 4 教学实践

在天文教育中,“恒星”无疑是一个关键的知识。不少“天文学”或“天体物理”教材围绕恒星知识点这一核心话题展开:在铺垫了时空基准、辐射和测量等内容后,系统性地阐述包括太阳在内恒星的属性,再介绍恒星作为基本单元的星系,直至探讨整个宇宙。例如《当代天体物理学导论》一书分如下四个部分<sup>[13]</sup>:“天文学的工具”“恒星的性质”“太阳系”和“宇宙中的星系”,其中第二、三部分论述了恒星。再如,《天文学教程》共 16 章<sup>[14]</sup>,其中第 5 至 12 章介绍太阳系与恒星。

尽管这些教材的具体内容有所侧重,但都涵盖了重要的知识点。在介绍恒星时,一般将致密星作为主序星演化后的产物而纳入并分别阐述。为了强调球对称自引力星体的统一性、不同阶段的差异性,本文从星体内能与自引力能平衡的角度一致地描述了主序星、白矮星、中子星和黑洞。此外,包括伽马暴、快速射电暴、双星并合引力波事件等发生在宇宙学尺度上的恒星物理过程模糊了传统教材“恒星”与“星系”这两个学科方向之间的界限。鉴于致密星在多信使天文学的重要性,我们也做了些新的尝试<sup>[7]</sup>:12 章的内容中,有 7 章跟恒星有关;其中第七至十章各自独立地介绍了白矮星、中子星、黑洞和伽马暴。

如何逻辑上简洁地把握球对称星体的一般属性?无疑,这种概述有助于深刻理解天文教学中绝大部分的内容。我们的尝试是依据(2)式来展开的,它本质上体现了自引力体系的负热容属性<sup>[15]</sup>。对于受自引力束缚的多粒子体系,位力定理(virial theorem)指出系统处于平衡态时总动能为引力势能之半。对于质量确定的系统,失去能量导致半径减小、引力能绝对值增加,但粒子的运动动能也将随之增加。可见,自引力系统输出能量后内部粒子动能不减反增,即负热容系统。这一结论定性上也适用于描述恒星,据此可以统一地理解从主序星到黑洞的演化历程。希望本文所提供的思路在未来教学中具有参考和借鉴作用。

## 5 小结

自 20 世纪 30 年代以来,人们将广义相对论和量子力学应用到恒星演化后期,预言了不同质量的恒星在耗尽其热核能源后,会塌缩成为性质完全不同的致密天体。自此,人们对白矮星、中子星和黑洞有了全新的、全局的认识。

本文扼要地分析了从主序星到致密星(即白矮星、中子星和黑洞)的过程,阐述每重子内能随星体半径的变化关系,表明越致密星体的每重子内能就越高!当然,恒星的半径越小就越稳定,恒星不得不奔向奇点;只是残留质量不够大时,会“半途而废”成白矮星或中子星.中子星物态看来属于非微扰量子色动力学范畴的难题,渴望在多信使天文学的今天来澄清.

多信使天文学时代的到来促使我们正处在研究致密星的黄金时代.除了致密物态的疑难问题,关于黑洞仍存在很多未解之谜.例如,根据理论推算,银河系应该存在着上千万个恒星级黑洞,而观测只证认了二十多个恒星级黑洞的存在.对黑洞这样的强引力系统,人们预言可能会体现引力的量子效应,但目前看来观测上尚难以企及.目前已经观测到恒星质量黑洞和超大质量黑洞;是否有中等质量黑洞呢?但至今观测上没有发现这类黑洞存在的确切证据.此外,黑洞和引力的本质又是什么?这些问题可能与引力波、 $\gamma$ 射线暴、超新星、暗物质和暗能量等的探测息息相关.我们期待着年轻的同行们在好奇心的驱使下揭开自然神秘的面纱!

## 参考文献:

- [1] 徐仁新.天文教育 I:万有引力与天体物理[J].天文学报,2021,62(1):101-108.
- [2] 夏铖君,高勇,徐仁新.奇异物质与奇异星[M].北京:北京大学出版社,2024.
- [3] Abbott B P, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 116(6): 061102.
- [4] Abbott B P, et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral[J]. Phys. Rev. Lett., 2017, 119(16): 161101.
- [5] Akiyama K, et al. Imaging the Schwarzschild - radius - scale structure of M87 with the event horizon telescope using sparse modeling[J]. APJ, 2017, 838(1): L1.
- [6] 邵立晶. GW170817: 爱因斯坦对了吗? [J]. 物理, 2019, 48(9): 568.
- [7] 徐仁新. 天体物理导论[M]. 北京:北京大学出版社, 2006.
- [8] Oppenheimer J, Snyder H. On continued gravitational contraction[J]. Phys. Rev., 1939, 56(5): 455.
- [9] Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities[J]. Phys. Rev. Lett., 1965, 14(3): 57.
- [10] 来小禹, 徐仁新. 中子星内部结构[J]. 物理, 2019, 48(9): 554.
- [11] 李柯伽, 徐仁新. 脉冲星与脉冲星计时阵[J]. 物理, 2024, 53(8): 507.
- [12] 穆哈诺夫. 宇宙学的物理基础[M]. 皮石 译. 北京: 科学出版社, 2023.
- [13] 卡罗尔, 奥克利. 当代天体物理学导论[M]. 姜碧涛, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2023.
- [14] 胡中为, 孙扬. 天文学教程(上、下)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
- [15] 向守平. 天体物理概论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2008.

## Astronomy education II: compact stars going towards the singularity

LIU He-Lei<sup>1</sup>, Xu Ren-xin<sup>2,3</sup>

(1. School of physical science and technology, Xinjiang University, Urumuqi, Xinjiang 830046, China;

2. Department of astronomy, Peking University, Beijing 100871, China;

3. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Beijing 100871, China)

**Abstract:** It is clear from the singularity theorem that the formation of black holes is inevitable in the Universe, but the path from massive stars to black holes cannot be “smooth” under their own gravity. By analyzing the balance between the internal and gravitational energy of stars, the process from main sequence star to compact star (white dwarf, neutron star and black hole) is discussed in general, and the semi-quantitative relationship between the accumulated internal energy per baryon ( $\varepsilon$ ) and the stellar radius ( $R$ ) is also presented. During a star’s journey towards the singularity ( $R \rightarrow 0$ ), there are three stages that prevent it from gravitational collapse, corresponding to the internal energy per baryon of  $\varepsilon \sim \text{keV}$  (main-sequence stars),  $\sim \text{MeV}$  (white dwarfs) and  $\sim 100 \text{ MeV}$  (neutron stars). For black holes,  $R \rightarrow 0$ ,  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Finally, the basic physical properties of compact stars and their impact on the modern astrophysics, as well as the education of stellar astronomy, are briefly reviewed.

**Key words:** astronomy education; star; compact star; gravity