

李政道和致密星天体物理

赖 东

(康奈尔大学;李政道研究所 200240)

李政道教授对基础物理学许多领域的贡献,尤其是粒子物理学和统计力学,是众所周知的。然而在他职业生涯的早期,他曾在恩里科·费米 (Enrico Fermi) 的指导下进行天体物理学研究。他的博士学位论文题目涉及白矮星——这是一种奇异的致密星体:我们的太阳和其他低质量恒星最终会变成白矮星。

一、主序星与恒星结构

恒星的许多特性可以根据其在 Hertzsprung-Russell (H-R) 图中的位置来讨论(图1)。当我们观察一颗恒星时,我们可以测量两个量:它的颜色或

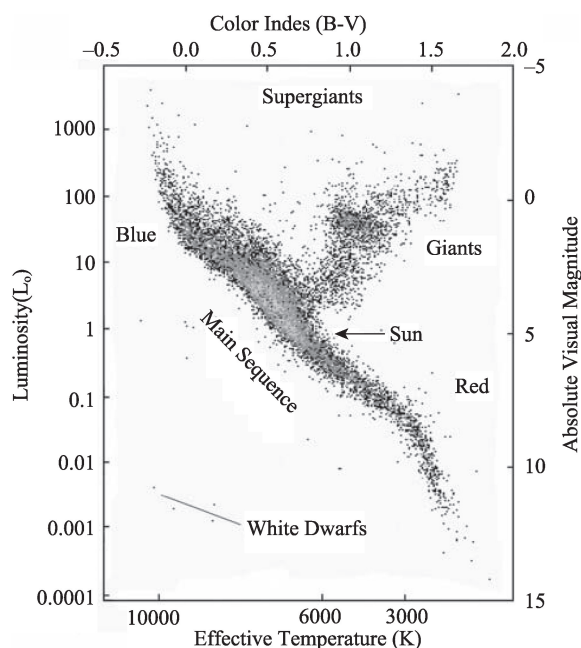


图1 恒星的 H-R 图,以天文学家 Ejnar Hertzsprung 和 Henry Norris Russell 的名字命名,显示恒星的绝对星等或光度与其表面温度之间的关系。太阳是典型的主序星。白矮星通常具有更高的表面温度(因此“白”),但光度要低得多(尺寸非常小,因此“矮”)

它发出的辐射光谱,以及它的亮度。从颜色上,我们可以使用黑体辐射定律来估计恒星的表面温度;从亮度和距离,我们可以得到恒星的光度,即单位时间的辐射能量输出。H-R 图是光度 L 和表面温度 T_s 的图。大多数星在这个图上是位于一个主序带上。恒星在主序带的位置是由它的质量决定的。主序星的质量范围很广,大约 0.1 到 100 个太阳质量。

为了支撑主序星抵抗其引力,恒星的中心部分必须有很高的温度,这样才有足够的气压与 T 成正比)和辐射压(与 T^4 成正比)。太阳的表面温度为 6000 K,但中心温度为 1500 万 K。事实上,所有的主序星都有大致相同中心温度。这样的温度 (15 MK) 是由恒星中的氢聚变来维持的,将氢核变成氦核。核反应产生的能量通过辐射转移(即光子传热)到表面。

因此,要了解主序星的内部结构,需要至少涉及四个部分的详细计算:(1)流体静力平衡(即压力平衡重力);(2)物质状态方程;(3)辐射能量传输;(4)核反应物理。到 1939 年,物理学家汉斯·贝特 (Hans Bethe) 解释了太阳中核聚变的详细链,完成了我们对主序星结构的基本认识。

二、白矮星

天文学家第一次认识到白矮星的存在可以追溯到 20 世纪初。最早的例子之一是天狼星 B,即天狼星的伴星:它的质量和表面温度与太阳相似,但它的光度小一千倍。这导致天文学家 Ernst Opik 推断其平均密度是太阳的 10^5 倍以上——这个结

果被亚瑟·爱丁顿 (Arthur Eddington) 认为是“不可能的”。

对白矮星的物理理解必须等到20世纪20年代量子力学的发展。根据量子力学,一个粒子(如电子)即使在零温度下也具有零点能量。密度越大,每个电子所占的体积越小,零点能就越大。白矮星里的电子的零点能量远大于经典粒子的能量,后者与温度成正比。事实上,白矮星是靠量子力学零点能压力(称为“简并压”)来支撑其重力的。

一个简单的数量级计算可以揭示白矮星奇怪的质量-半径(M-R)关系(图2)。星体中心的压力为 $P_g \sim GM^2/R^4$ 。星体中电子的平均距离约为 $n^{-1/3}$, 所以电子的零点动量是 $p \sim \hbar n^{1/3}$, 其中 $n \sim M/(m_p R^3)$ 是电子密度, $\hbar$ 是普朗克常数, m_p 是质子质量。电子简并压是 $P_e \sim n(p^2/2m_e)$ (假设电子是非相对论性的)。从 $P_g = P_e$, 我们得到 $R \sim M^{-1/3}$, 即白矮星随着其质量的增加而变小! 事实上, 如果质量变得足够大, 电子将变得极端相对论性, 简并压变成 $P_e \sim n p c$ 。再次将 P_g 和 P_e 相等, 我们得到质量渐近为常数 $M_{ch} \sim m_p (\hbar c / G m_p^2)^{3/2}$ 。精确计算得出 $M_{ch} = 1.45$ 太阳质量(对于CO白矮星)。白矮星的最大质量称为钱德拉塞卡极限, 最早由天体物理学家钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar) 在20世纪30年代推导出来。

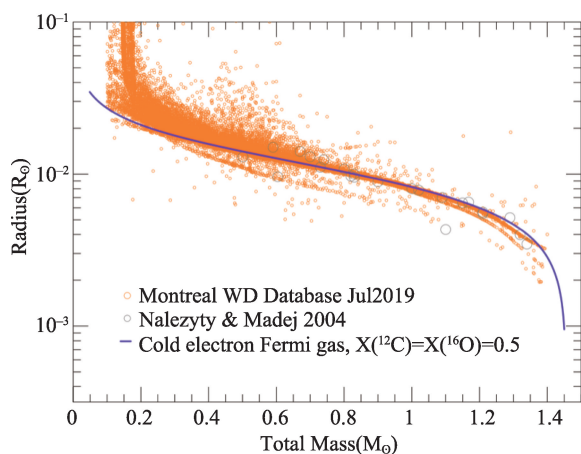


图2 白矮星的质量-半径关系

(摘自 <http://cococubed.asu.edu/code-pages/coldwd.shtml>)

三、李政道对白矮星的研究

1950年,李政道在 *Astrophysical Journal* 发表了一篇论文题为“Hydrogen Content and Energy Production Mechanism in White Dwarfs”。这是基于他在芝加哥大学博士学位的工作。这是一个白矮星结构的开创性研究,因为它首次考虑到有限温度效应。虽然白矮星内部是简并的(即电子零点能量远大于热能),它的外层密度低,是非简并的。确定白矮星中心温度以估计核反应作为能源在当时是一个重要的问题。

为了实现这一目标,李政道首先研究了物质在广泛的条件下的状态方程,从非简并的外层到高度简并的内层,从部分电离到完全电离和压力电离。更重要的是,该论文首次包括电子热导率的固体物理计算,而且这个计算在广泛的条件下都有效——这对于确定白矮星的内部温度分布非常重要。有了这些物理信息,李政道进行了对不同质量和成分的白矮星的平衡状态的数值计算(见图3)。通过这些计算,他证明了没有白矮星可以靠内部的氢核燃烧稳定地生存。因此他得出结论:尽管事实上白矮星的外层以氢为主,它的内部的氢含量可以

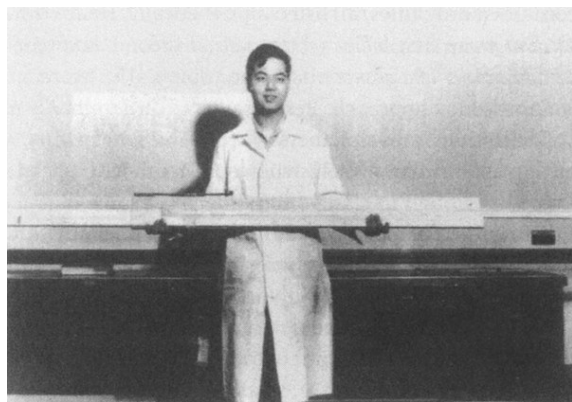


图3 李政道在芝加哥大学。李在2010年APS和AAPT联席会议上的讲话中回忆到:在博士期间有一次费米问他太阳中央的温度是多少,李回答说:“一千万度。”费米问:“你怎么知道的?”李告诉他:“我已经查过了”。费米问他是否自己核实了,李回答说:“这很复杂,对这些方程进行积分并不那么容易。”费米建议李构建了一个巨大的专用计算尺,可以对辐射传递方程求解……在接下来的几周里李制作了一个6.7英尺长的计算尺

忽略不计。

根据当今我们的理解,白矮星没有任何核能源。它不像主序星那样具有平衡状态,而是不断在演化。一颗主序星在耗尽其氢燃料后,它的核心会收缩并变得更热,但它的外包层半径将涨大,成红巨星。当中心温度达到一定程度时(几亿开尔文),核心最终会经历氢燃烧转化为碳和氧,而外包层变得未绑定(unbound)并且“漂移”掉。这个CO核心(大约0.6太阳质量的质量)最初是很热的,但是部分简并。随着时间的推移,这个CO冷却下来,变成一颗我们观察到的白矮星;并且逐渐地,在10到100亿年后,它逐渐消失于无形。在这种演化的图像中,我们很自然地可以理解白矮星内部没有任何氢。

四、当代致密星体的研究

李政道对白矮星的研究是对致密星内部结构的第一次详细研究之一。从他的工作中我们已经可以看到,要破译致密星的内部结构,需要物理学不同分支的详细知识和技能,包括核物理学、凝聚态物理学、统计物理学、流体力学,以及计算物理学。

白矮星只是恒星三种可能的最终状态之一;另外两种是中子星和黑洞。这三种统称为致密天体。他们“致密”的特点是逃逸速度 $V_{\text{esc}}=(2GM/R)^{1/2}$ 与光速相当:白矮星 $V_{\text{esc}}/c \sim 0.01$,中子星 ~ 0.5 ,黑洞 ~ 1 。根据我们目前的理解,决定恒星最终命运的主要参数是它的质量。所有低于临界值(约8个太阳质量)的恒星最终都会变成白矮星,而质量更大的恒星将成为中子星或黑洞,甚至可能成为完全瓦解。

致密天体在现代天体物理中扮演着越来越重要的角色。它们直接与一些最极端的宇宙中的环境相关——这些环境是无法在陆地实验室达到的。它们已经在所有电磁波波段,从无线电到伽马射线,被观察到了,也在引力波中被探测到了。它

们与某些宇宙中观测到的最猛烈、最具爆炸性的过程息息相关,从超新星,伽马暴爆发到仍然神秘的快速无线电爆发。它们的高密度和强磁场使我们能够探查在不寻常条件下的凝聚态物理和核物理,它们强大的重力场提供了一个天然的测试广义相对论的场所。就像李政道在1950年一样,对致密天体的研究可以让天体物理学家探索广泛的极端条件下的物理学。

五、孤子星(Soliton Stars)

20世纪80年代后期,与R. Friedberg和Y. Pang一起,李政道发起了一项对孤子星的一系列研究。这是从他对场论中的非拓扑孤子解的研究的拓宽。通过非拓扑孤子解,他们证明引力场与其他非线性物质场之间的相互作用可以导致几种新型稳定星体:玻色子或费米子孤子星。这些孤子星与普通的致密星完全不同,它们的质量可能有几个太阳质量到 10^{15} 太阳质量。多年来,许多物理学家已经探索了各种由相干场组成的星体的结构。

自然界中是否存在这样的孤子星(或相关的天体)?我们不知道。远离孤子星的引力场与一个普通的恒星或黑洞很相似。一种可能的探索方法是通过双星合并过程中发出的引力波。最近被LIGO检测到的双黑洞合并的结果没有发现任何对黑洞的预测偏差。未来二十年,空间引力波探测器将能够探测到更低频率的引力波,从而探测超大质量黑洞是否是孤子星。记得在20世纪90年代中期作者在加州理工学院做博士后时,Kip Thorne对于使用引力波探测孤子星的可能性非常热情。也许未来我们可以发现孤子星。

作者简介:赖东,美国康奈尔大学天文系教授,李政道研究所讲席教授(访问),1987年入选CUSPEA计划。