

恒星物理的发展*

韩占文[†]

(中国科学院云南天文台 国际超新星中心 昆明 650216)

2024-12-24收到

[†] email: zhanwenhan@ynao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250201

CSTR: 32040.14.wl20250201

The development of stellar astrophysics

HAN Zhan-Wen[†]

(International Center of Supernova, Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)

摘要 浩瀚的星空,既灿烂又深邃,宁静中蕴含神秘。人们看到的绝大多数星都是恒星,它们燃烧自身,点亮夜空的美丽。太阳是离我们最近的一颗恒星,是地球上生物的主要能量来源。文章将主要介绍恒星物理的研究方法和主要研究成果,还将介绍如何通过恒星认识宇宙,并试图回答人类在宇宙中是否孤独的问题。

关键词 天体物理, 恒星物理, 双星, 核素合成, 系外行星

Abstract The vast starry sky is magnificent and serene, profound and mysterious. Most of the stars we see are fixed stars, which illuminate the night sky's beauty by burning themselves. The Sun, the closest star to us, serves as the primary energy source for life on Earth. This article will mainly describe the research methods and key findings in stellar physics, explore how studying stars helps us understand the universe, and attempt to answer the question of whether humanity is alone in the cosmos.

Keywords astrophysics, stellar physics, binary stars, nucleosynthesis, exoplanets

1 恒星的元素构成和能量来源

夫琅禾费(Joseph von Fraunhofer)是一个玻璃匠的儿子,从小与玻璃结缘,长大后又在一个十分重视玻璃制作工艺的修道院接受训练。夫琅禾费1814年发明了分光仪。光先通过一个狭缝,再由准直镜变为平行光,打到棱镜上,棱镜使不同波长的光发生不同程度的偏折。夫琅禾费利用分光仪得到了太阳的光谱,并在太阳光谱中发现了574条黑线,被称为夫琅禾费线(图1)。基尔霍夫(Gustav Kirchhoff)在1859年证明这些黑线是太阳

光谱中的原子吸收谱线,从而人们可以通过光谱知道太阳包含哪些元素,并可进行相关物理分析,这开启了天体物理学的时代。

万物生长靠太阳,太阳的能量从哪里来一直困惑着科学家们。汤姆孙(Kelvin 勋爵, William Thomson)是一位英国物理学家,他在19世纪提出了热力学第二定律,即熵增加原理,绝对温度的单位K就是以Kelvin命名的。他研究了太阳的内部结构和热力学过程。亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz)是一位德国物理学家,他在19世纪提出了能量守恒定律,研究了太阳的热力学性质和能量传输机制。这两位科学家认为,太阳本身引力收缩释放引力能是太阳能量的来源。但据此估

* 国家自然科学基金(批准号:12288102)资助项目

算的太阳年龄只有地球年龄的百分之一。

20世纪初,相对论与量子力学诞生了。当人们对这两个划时代的理论充满疑惑时,爱丁顿爵士(Sir Arthur Eddington)通过日全食观测,发现光线如相对论预言的那样弯曲,让人们相信相对论是正确的,从而把爱因斯坦推上神坛。量子力学初期的量子概念一开始并不被认可,但一批年轻的物理学家不受成见的束缚,八仙过海,各显神通,发展出了全新的量子理论,在原子、电子、光子等微观粒子领域获得巨大成功。根据相对论的质能关系,当4个氢原子聚变为1个氦原子时,总质量变小,因而会有能量释放。但这种聚变需要克服原子核之间的势垒,而量子力学的隧道效应为之提供了可能。爱丁顿因此提出了新的太阳能来源机制。首先星云坍缩成太阳,释放引力能,太阳中心温度升高,这和汤姆孙与亥姆霍兹

的学说是一致的。当温度足够高时,隧道效应变强,氢聚变成氦,释放能量。太阳内部的气体压与辐射压阻止太阳的进一步坍缩,太阳因而达到一个平衡态。这样氢氦聚变理论解答了太阳年龄之谜。爱丁顿建立了恒星内部物质运动和能量传输的模型,给出了恒星的质量—光度关系,该关系与观测吻合,从而奠定了恒星结构与演化理论^[1]。

隧道效应使氢聚变成氦成为可能,但氢聚变成氦的具体物理过程并不清楚。二战期间,曼哈顿工程洛斯阿拉莫斯实验室理论物理部主任贝特(Hans Bethe)的主要任务就是研究核裂变和核聚变。在一次火车旅途中他突发灵感,提出了“碳氮氧循环”的热核反应,碳、氮、氧在核反应中起催化剂的作用,将4个氢核聚变成1个氦核,并释放出正电子、中微子和能量。然而该反应需要较高的温度,在太阳中并不占主导。后来他又提出了质子—质子链反应,将氢核聚变成氦核。质子—质子链反应是太阳或更小质量恒星产生能量的主要过程(图2)^[2]。贝特因此获得了1967年诺贝尔物理学奖。

2 恒星的结构和演化

太阳发光发热,光芒万丈。这些能量来自其中心的稳定热核反应,4个氢原子核聚变形成1个氦原子核。太阳内部热核反应的产能功率为 3.86×10^{33} erg/s(即386亿亿瓦),每秒产生的能量相当于1千亿颗氢弹爆炸。我们在夜空中看到的星星大多都是恒星,这些恒星就是一个个太阳,通过自身内部的热核反应来发光发热。

一般来说,恒星的结构是稳定的,自身向内的引力和向外的压力相互制约,维持平衡。但不同类型的恒星向外的压力各不相同。大部分恒星都和太阳一样,主要靠气体压来抵抗引力,维持平衡。而白矮星引力太强,气体压不足以对抗引力,对抗引力的是电子简并压。关于白矮星的结

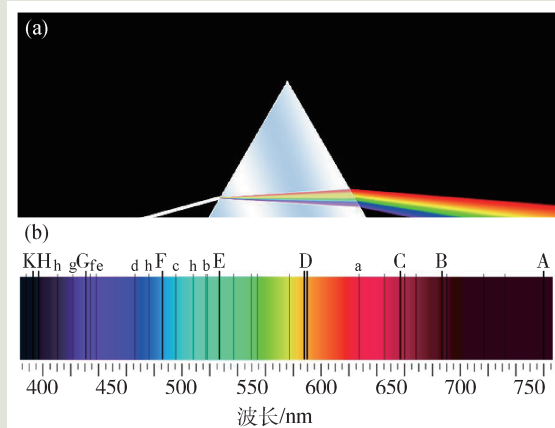


图1 夫琅禾费1814年发明了分光仪(a),发现了太阳光谱中的574条黑线(b)(修改自 <https://cn.wikipedia.org>)

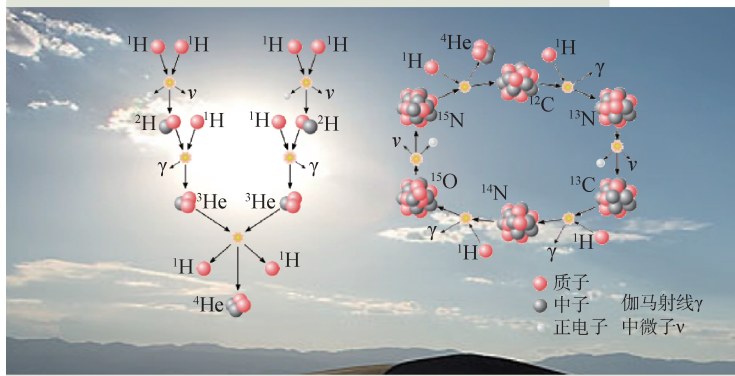


图2 贝特给出的太阳内部氢核聚变成氦核的热核反应过程

构,还有一个小故事。1930年,19岁的钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar)乘轮船去英国剑桥大学读书。在船上,他对白矮星的性质进行了重新计算。考虑到简并时电子运动速度极高,他假设电子遵循爱因斯坦狭义相对论而非牛顿力学。在牛顿力学的情况下,白矮星质量越大,其半径越大。而在爱因斯坦狭义相对论的情况下,白矮星质量越大,其半径越小。当质量大到某一个值时,半径趋于零,即白矮星存在一个质量上限!该上限(大约1.4倍太阳质量)称之为钱德拉塞卡质量极限,超过这个上限白矮星就会爆炸。钱德拉塞卡质量极限其实预示了中子星和黑洞的存在。他的这篇文章^[3]虽然只有两页,却影响深远,终结了统治天文学界两千年之久的亚里士多德宇宙观。亚里士多德认为宇宙宁静而完美,而钱德拉塞卡的工作表明,在引力主导的宇宙中,爆发与死亡是一个新常态。恒星爆发后形成中子星或黑洞。中子星的半径约为10千米,主要由中子简并压抵抗引力。黑洞的半径更小,质量与太阳相当的黑洞其半径只有3千米,引力更强,连光都无法逃逸出来。由于钱德拉塞卡在恒星结构与演化方面的贡献,他获得了1983年的诺贝尔物理学奖。

谈到恒星结构与演化,就不得不提及著名的赫罗图(Hertzsprung—Russell Diagram)。赫罗图是恒星物理研究的里程碑,其地位类似于化学研究中的元素周期表。赫罗图是由两名科学家赫茨普龙(Ejnar Hertzsprung)和罗素(Henry Norris Russell)独立完成的^[4, 5]。赫罗图的横轴是恒星的温度(用颜色表示),纵轴是恒星的光度,不同类型的恒星分布在赫罗图的不同位置(图3)。例如主序星分布在从左上角到右下角的一个条带上,右上角主要是红巨星和红超巨星,左下角主要是白矮星。赫罗图其实表示的是不同质量恒星的演化轨迹(图3中黄色线)。

在恒星结构与演化理论中^[6],我们需要求解下面几个方程:质量守恒方程(质量等于密度乘以体积)、动量守恒方程(牛顿第二定律)、能量转移方程(对流、辐射、热传导)、能量变化方程(热核

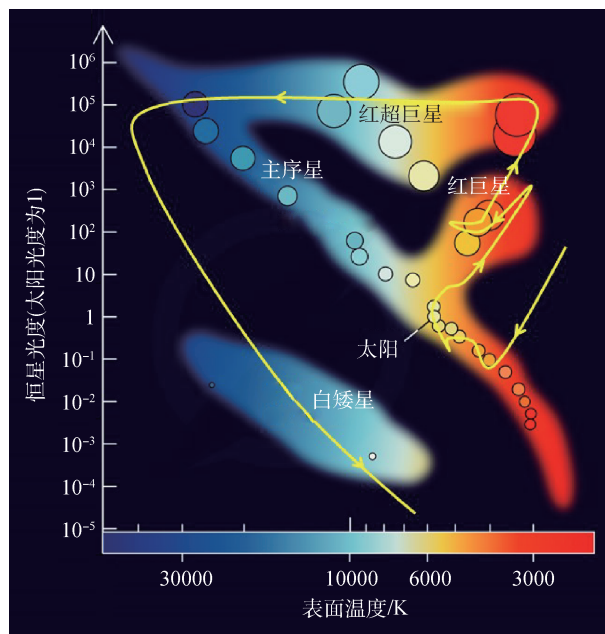


图3 恒星在赫罗图上的分布示意图。横坐标为恒星的温度(用颜色表示),纵坐标为恒星光度(以太阳光度为单位),黄色线代表太阳的演化轨迹(修改自 <https://www.savemyexams.com>)

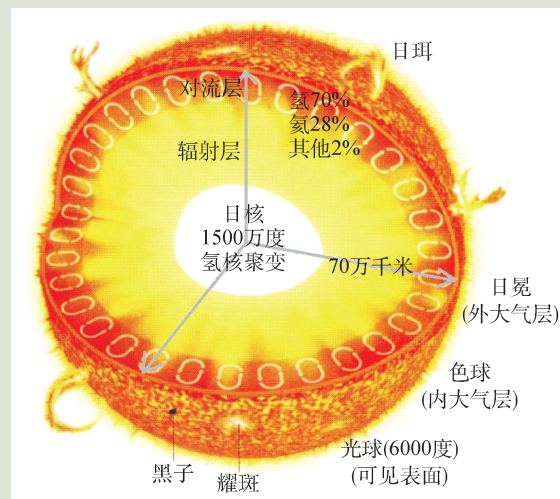


图4 太阳的结构

反应、中微子能量损失、热状态变化)、化学组成变化方程(热核反应把一种元素变为另一种元素)。通过求解这些方程,我们可以得到恒星内部各个物理量,如温度、亮度、密度、压强、半径,并得到这些物理量随时间的变化,从而对恒星的一生有一个相对完备的认识。

例如,通过计算机求解恒星结构与演化的基本方程组,我们可以得到太阳的结构(图4),模拟

太阳的一生(图3和图5)。46亿年前,太阳由星云坍缩形成。在经历约46亿年的中心氢燃烧后,演化到了太阳当前的状态。再过50亿年,太阳将演化为一颗红巨星。红巨星继续演化10亿年,其外壳抛射成为美丽的行星状星云,内核变为一颗白矮星,并将一直冷却下去。太阳属于中小质量恒星,其演化结局是一颗白矮星。

恒星的一生跟我们人的一生非常相似(图5),经历孕育期(星云中恒星形成阶段)、童年期(原初恒星阶段)、青年期(主序星阶段)、老年期(巨星阶

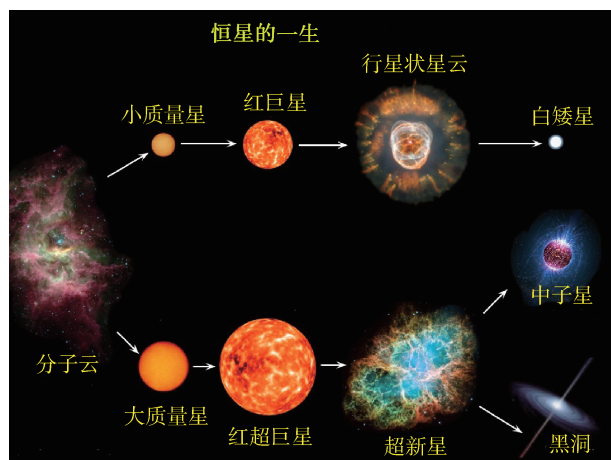


图5 恒星演化示意图

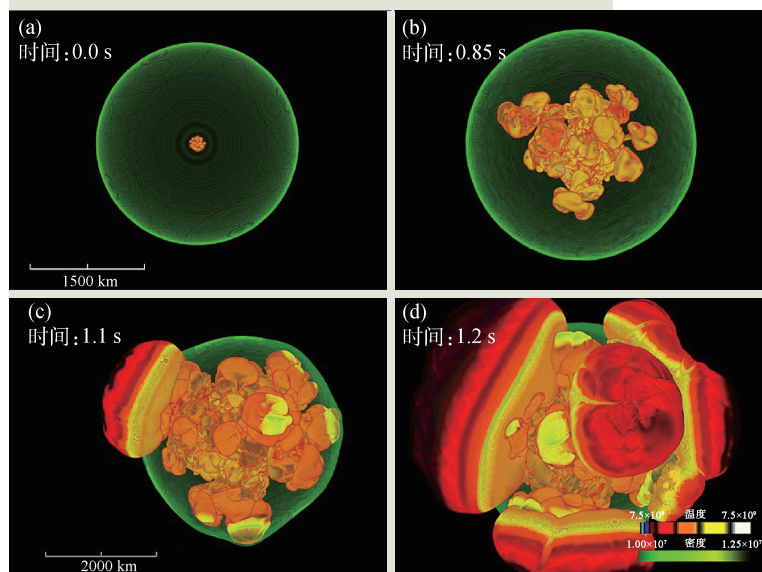


图6 当碳氧白矮星的质量达到钱德拉塞卡质量极限(约 $1.4M_{\odot}$)时,发生失控的热核反应,产生热核爆炸。热核爆炸超新星的亮度是太阳亮度的约100亿倍,且性质惊人的一致,是测量宇宙学距离的理想标尺。利用这个标尺,科学家们发现宇宙在加速膨胀,推论出了暗能量的存在^[11, 12](见第5节。图修改自 <https://en.wikipedia.org>)

段)和死亡(行星状星云或超新星爆发)等过程。小质量恒星,也就是质量小于等于 $8M_{\odot}$ 的恒星,最终将演化形成白矮星;更大质量的恒星将通过超新星爆炸形成中子星或者黑洞。

3 超新星爆炸与元素核合成

古代天文学家发现,天空中有时会突然多出一颗星,即“新星”。比如,远在公元前14世纪的商代甲骨卜辞中就记载着出现于天蝎座 α 星附近的一颗新星:“七日己巳夕……新大星并火”。《宋史·天文志》中记载:“景德三年四月戊寅,周伯星见,出氐南,骑官西一度,状如半月,有芒角,煌煌然可以鉴物”。到了近代,哈特维希(Ernst Hartwig)于1885年在仙女座星云(M31)中发现了一颗新星^[7],而1919年伦德马克(Knut Lundmark)测出M31到地球的距离约70万光年(注:现代的观测结果为250万光年)^[8]。这就意味着哈特维希发现的新星比正常恒星亮几亿倍,从此产生了“超新星”的概念。超新星是恒星生命晚期产生的爆炸现象,爆炸时其亮度在几天内增加千万倍到百亿倍。

根据超新星爆发的物理机制,超新星主要分为核坍缩型超新星和热核爆炸型超新星两类。大质量恒星演化时,中心经历了氢到氦、氦到碳氧、最后到铁的核合成,这些核合成产生能量,维持着恒星的生命。恒星演化到晚期时,中心变成了铁核,铁是最稳定的核素,无法继续燃烧。当铁核增长到钱德拉塞卡质量极限时,铁核内部的压力不足以抵抗自身引力,发生坍缩,形成一颗中子星或者黑洞^[9]。坍缩释放的引力能将恒星的外壳炸开,产生核坍缩型超新星。中小质量恒星演化到晚期,变成碳氧白矮星。如果其处于双星系统,这颗白矮星可能从它的伴星得到物质,白矮星质量增加。当质量增加到钱德拉塞卡质量极限时,内部的压力不足以抵抗自身引力,白矮星收缩,温度升高至碳

燃烧的点火温度，触发失控式的热核爆炸，产生热核爆炸型超新星(图6)^[10-12]。

超新星产生重元素，驱动宇宙的化学演化。宇宙大爆炸产生氢、氦和少量的锂。恒星这个“炼丹炉”把轻元素烧成了重元素，从氢到氦到碳氧一直到铁^[13]。恒星“炼丹”过程中产生能量，维持着恒星的生命。但要想产生比铁重的元素，如金、银、铂等，需要输入能量。超新星爆炸产生的能量，烧制出了比铁重的元素。图7展示了宇宙中化学元素的来源及其随时间的演化^[14]。

4 双星演化与特殊天体的形成

自然界中成双成对是个普遍现象，恒星也不例外。宇宙中约一半的恒星是双星，双星中的两个子星在万有引力的作用下围着共同质心相互绕转。正是由于双星的存在，恒星世界变得丰富多彩^[15]。

如果双星中两个子星的距离比较近，其演化进程中会发生物质交流现象(图8)。主星(质量大的子星)演化比伴星(质量小的子星)的快，演化过程中主星自身膨胀。当主星膨胀到其表面到达内拉格朗日点(内拉格朗日点是指两个子星之间连线上一个位置点，在该位置点，物质受到的两子星引力和离心力达到平衡)时，主星表面的物质会在伴星的引力作用下，通过内拉格朗日点，被拉到伴星上(图8)。稳定的物质交流过程会把主星的整个外壳转移到伴星，只剩下一个核，产生一个长轨道周期的双星。很多情况下物质交流过程是一个正反馈过程，即物质从主星流向伴星导致主星快速膨胀，物质交流变得越来越快。由于失稳的物质交流过程太快，伴星无法接纳吸收主星的物质，导致共有包层系统的形成。在该系统中，主星的核和伴星在一个共有包层中相互绕转，在

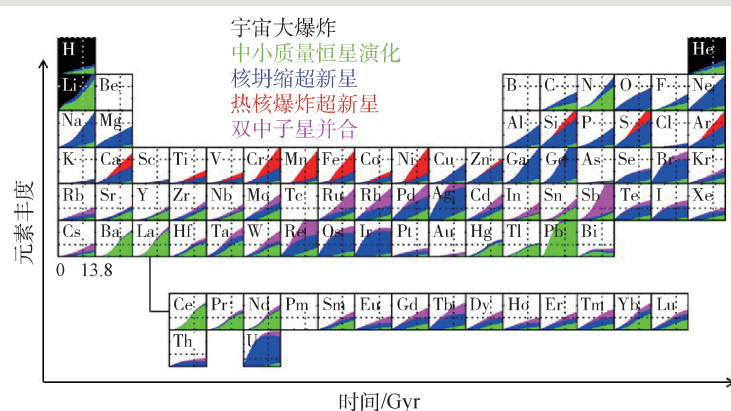


图7 宇宙中元素丰度随时间的演化，其中每个小方格的横坐标是宇宙年龄(0—13.8 Gyr)，不同颜色代表不同天体物理过程的核合成。黑色代表宇宙大爆炸，绿色代表中小质量恒星的正常演化，蓝色代表大质量恒星演化晚期的核坍缩爆炸超新星，红色代表中小质量恒星演化晚期的热核爆炸超新星，紫色代表双中子星并合^[14]

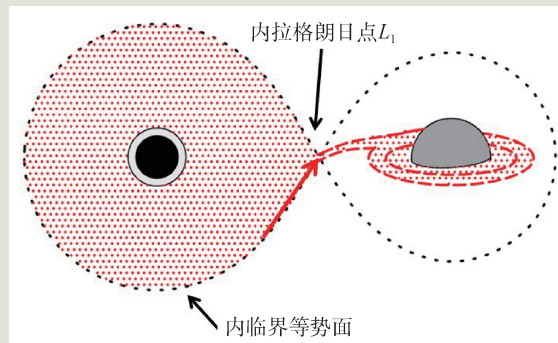


图8 双星物质交换示意图

摩擦力的作用下两子星迅速旋进，并在旋进过程中释放轨道能。释放的能量如果把共有包层抛射掉，则该系统演变为短周期双星。如果共有包层不能被抛射掉，两子星并合，则形成一个快速自转的单星。

双星演化产生了各种各样的特殊天体。双星演化产生X射线双星，通过X射线双星，人类第一次证实了黑洞的存在。双星演化产生热核爆炸超新星，通过这类超新星，科学家发现宇宙加速膨胀，推论出了暗能量的存在。双星演化产生双黑洞、双中子星、双白矮星，它们是地面和空间引力波探测器的观测对象。双星演化还产生毫秒脉冲星、新星、大陵五伴谬星、吸血鬼恒星、热亚矮星、双极行星状星云等，这些天体都是我们认识宇宙的重要探针。

5 如何通过恒星认识宇宙

我们总是假设,物理定律是普适的。对恒星的研究,其实就是将地球上的物理定律用于天体的一个过程,也是一个“物理”与“天体物理”相互促进的过程。我们用牛顿力学、热力学统计物理、核物理、原子物理、电磁学、相对论等来解释天体的观测结果,对观测进行预言,对物理定律进行验证,从而增加对物理规律的深入理解。例如,通过行星的运动,牛顿发现了万有引力定律。赫歇尔(William Herschel)1781年通过望远镜观测到双星相互绕转,说明万有引力定律不但在太阳系内适用,对其他天体同样适用。Georges Rayet等多位科学家在1868年日全食时从太阳谱线中发现了一种新元素,被命名为“氦”(希腊语“太阳”的意思),后来“氦”在地球上也被找到。

对恒星的研究使我们认识到宇宙很大。以前有地心说、日心说,后来通过观测恒星的运动,认识到恒星都在绕着银河系中心运动。银河系是宇宙的孤岛吗?我们的宇宙到底有多大?夏季的夜空,在银河旁边的仙女星座,有一个肉眼可见的星云。这个仙女座大星云是银河系的一部分还是在银河外?这引发了1920年的大辩论(Shapley—Curtis 辩论)。哈勃(Edwan Hubble)于1925年发现了仙女座大星云中的造父变星^[16],才使得大辩论有了结论。造父变星是一类红巨星,周期性的膨胀和收缩,其亮度也会周期性的变化。越大的红巨星越亮,其亮度变化的周期也越长,即对造父变星而言,存在一个周期—亮度关系。通过测量造父变星的光变周期,就得到了其本身的亮度。天文学上测距离常用的方法是标准烛光法,同样亮度的天体,离我们越远,观测到的“视”亮度就越暗(与距离的平方成反比)。知道造父变星本身亮度后,根据“视”亮度就可以反推其距离。通过造父变星测距发现,仙女座大星云远在银河系外面,是另外一个星系,从而科学家“发现”了宇宙。现代的观测表明,仙女座大星云距我们250万光年,银河系的大小只有10万光年左右,仙女座大星云这个星系其实比我们银河系大很多。

暗物质成为一个研究对象也是起源于对恒星的观测。20世纪70年代,鲁宾(Vera Rubin)测量了邻近的仙女座星系(M31,即仙女座大星云)中恒星的运动速度^[17]。按照牛顿的万有引力定律,在距离星系中心越远的地方,恒星的运动速度应该随着距离的增加而减慢,就像太阳系中那样,离太阳远的行星比离太阳近的行星的运动速度慢一些。但鲁宾的观测表明,处于星系外围的恒星的运动速度并没有变小。维持大的速度需要大的引力,而可见物质并不足以产生这么大的引力。因此,人们推断,星系中有一种不可见的物质,即暗物质,为这些恒星提供引力。暗物质的概念虽然很早就被提出,并有一些观测证据,但并未引起人们的重视,鲁宾的高精度光谱观测让科学家们相信,暗物质确实存在。

暗能量是恒星物理研究另一重要贡献。前面我们提到,双星演化产生热核爆炸超新星。这类超新星特别亮,是太阳亮度的100亿倍,相当于整个银河系的亮度。这类超新星来自达到钱德拉塞卡质量极限的碳氧白矮星的热核爆炸,亮度非常单一。经过一些经验关系对其亮度进行标定,可以把其亮度标定的非常精确。这样,通过这类超新星,利用标准烛光法,距离可测得又远又准。科学家们的初衷是,通过这类超新星测距,并将结果与宇宙学模型进行比对,来证明宇宙减速膨胀。但两个相互竞争的团队惊奇的发现,宇宙在加速膨胀^[11, 12]。这意味着有一种未知的能量在驱动宇宙加速膨胀。暗能量是什么,我们还不清楚,随着观测精度的提高,暗能量的神秘面纱最终会被揭开。

6 另外一个地球

地球在宇宙中是唯一的吗?还有另外的地球吗?为了回答这个问题,麦耶(Michel Mayor)和奎洛兹(Didier Queloz)通过提高光谱仪的稳定性和精度,利用多普勒效应测量恒星的视向运动速度,在1995年发现了绕类太阳恒星转动的系外行星,飞马座51b^[18]。所谓的多普勒效应就是,当光源向我们运动时,谱线向短波方向移动(蓝移);当

光源远离我们而去时,谱线向长波方向移动(红移)。如果一颗和太阳类似的恒星(类太阳恒星)具有行星,在万有引力的作用下,恒星和行星二者会绕共同的质心转动。通过光谱仪测量出这颗恒星的谱线的移动,由多普勒效应可以反推其运动速度,再通过开普勒第三定律可反推出行星的存在。飞马座51b就是这样被发现的(图9)^[18, 19]。

另外一种常用的搜寻系外行星的方法是掩食法(凌星法)(图9)。行星绕恒星公转时,在恒星前面经过,会挡住一部分恒星的光,使观测到的恒星亮度下降。通过观测恒星的周期性的亮度变暗,可以反推出行星的存在,并反演行星的性质。由于掩食时恒星的光会透过行星的大气,科学家通过比较掩食时和非掩食时的恒星光谱,甚至可以分析出行星大气的化学成分。搜寻系外行星的方法还有很多,例如直接成像法、微引力透镜法等(图9)^[19]。从1995年到现在,科学家们发现了近6000颗系外行星,绝大部分都是利用多普勒效应或行星掩食得到的。

并不是所有的行星都适合生命存在,行星与恒星之间的距离会直接影响到行星上的温度,这就会直接影响到行星的宜居性。距恒星太近,温度太高,距恒星太远,温度太低。另外行星不能太大,大的行星是气态行星。行星也不能太小,太小无法留住其大气。寻找宜居行星,或者说与地球类似的行星,仍然任重道远。

7 展望

宇宙浩瀚而丰富,充满了值得我们不断探索的精彩与惊喜。光是我们认知宇宙的主要手段,而恒星作为绝大部分光的来源,成为探索宇宙的重要探针。因此,恒星物理也成为天体物理学中起步最早、基础最为坚实的领域。尽管恒星物理的基本框架已基本确立,取得了诸多重要进展,但要真正理解恒星,并借此揭示宇宙的奥秘,我们仍有很长的路要走。

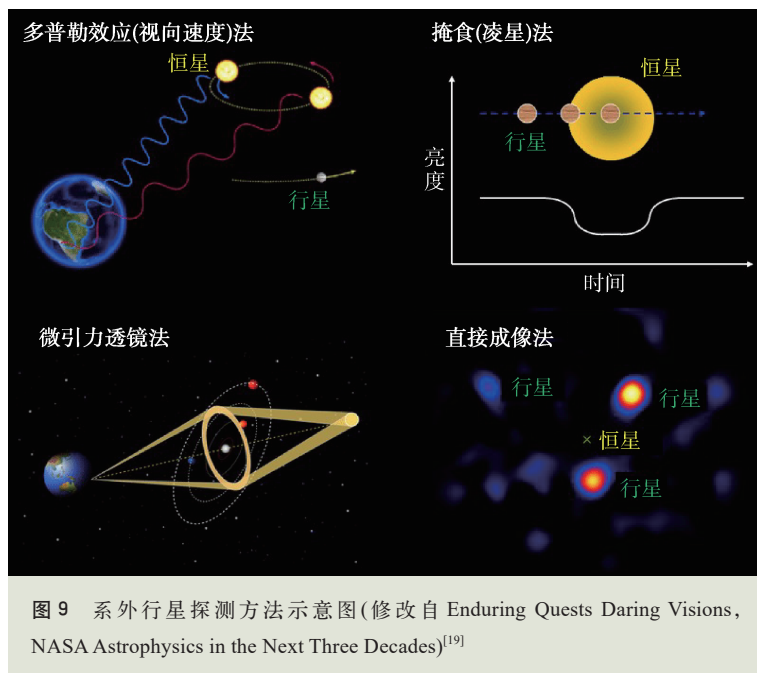


图9 系外行星探测方法示意图(修改自 Enduring Quests Daring Visions, NASA Astrophysics in the Next Three Decades)^[19]

进入新时代,从地面到太空,大量新型观测设备投入使用,新的观测技术不断涌现,计算能力显著提升,人工智能也开始在天文学中发挥重要作用,恒星物理迎来了前所未有的发展机遇。例如,光干涉技术的进步大幅提升了光学观测的空间分辨率,使得恒星不再是传统意义上的“点源”,而逐渐显现为“面源”。可以想象,随着光干涉技术的进一步发展,我们有望像观测太阳一样清晰地解析其他恒星。此外,LAMOST等光纤多目标望远镜的投入使用,为我们提供了数千万计的恒星光谱数据,推动了恒星研究从“逐一观测”进入“批量分析”的新时代,使许多以往难以解决的问题逐渐变得可以解决。与此同时,引力波与中微子探测技术的突破,以及射电、红外、光学、紫外、X射线和伽马射线等多波段观测设备的广泛应用,使得恒星物理的“多信使”研究逐步成为新常态。在理论与数值模拟方面,过去的恒星理论往往只能考虑基本物理过程,许多复杂机制被忽略或简化。然而,随着计算能力的巨大提升,恒星磁场、对流、三维结构及双星相互作用(如物质交换与共有包层演化)等领域的研究必将取得突破性进展。

在天文学的整体框架中,研究层次可分为行星、恒星与星系宇宙学,而恒星在其中起着承上

启下的关键作用：它是行星的宿主，也是构成星系的基本单元。利用恒星揭示宇宙的奥秘，是摆在我们面前的重要任务。宇宙这个神秘的知识宝库，蕴藏着无尽的宝藏，等待着我们的下一代人去发掘、去探索。

参考文献

- [1] Eddington A. The Internal Constitution of the Stars. Cambridge: Cambridge University Press, 1926
- [2] Bethe H. Physical Review, 1939, 55:434
- [3] Chandrasekhar S. Astrophysical Journal, 1931, 74:81
- [4] Hertzsprung E. Publications of the Astrophysical Observatory in Potsdam, 1911, 22:63
- [5] Russell H. Popular Astronomy, 1914, 22:275
- [6] Kippenhahn A, Weigert A, Weiss A. Stellar Structure and Evolution. Springer, 2012
- [7] Hartwig E. Astronomische Nachrichten, 1885, 112:355
- [8] Lundmark K. The Relations of the Globular Clusters and Spiral Nebulae to the Stellar System. PhD Thesis at the Observatory of Uppsala University, 1920
- [9] Lieb E, Yau H. Astrophysical Journal, 1987, 323:140
- [10] Liu Z, Ropke F, Han Z. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23:082001
- [11] Schmidt B *et al.* Astrophysical Journal, 1998, 507:46
- [12] Perlmutter S *et al.* Astrophysical Journal, 1999, 517:565
- [13] Burbidge E, Burbidge G, Fowler W *et al.* Reviews of Modern Physics, 1957, 29:547
- [14] Kobayashi C, Karakas A, Lugaro M. Astrophysical Journal, 2020, 900:179
- [15] Han Z, Ge H, Chen X *et al.* Research in Astronomy Astrophysics, 2020, 20:161
- [16] Hubble E. Astrophysical Journal, 1929, 69:103
- [17] Rubin V, Ford W. Astrophysical Journal, 1970, 159:379
- [18] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378:355
- [19] Kouveliotou C. Enduring Quests Daring Visions (NASA Astrophysics in the Next Three Decades). 2014, <https://arxiv.org/pdf/1401.3741>

慕尼黑上海光博会
LASER World of PHOTONICS CHINA

2025年3月11日至13日
上海新国际博览中心-3号入口厅

慕尼黑上海光博会 🔍

20周年盛典 致敬追光者!

扫码即刻注册参观

激光器与光电子 激光智能制造 检测与质量控制 光学元器件及材料 生物医学光子学 光学制造 集成光子学 红外技术与应用