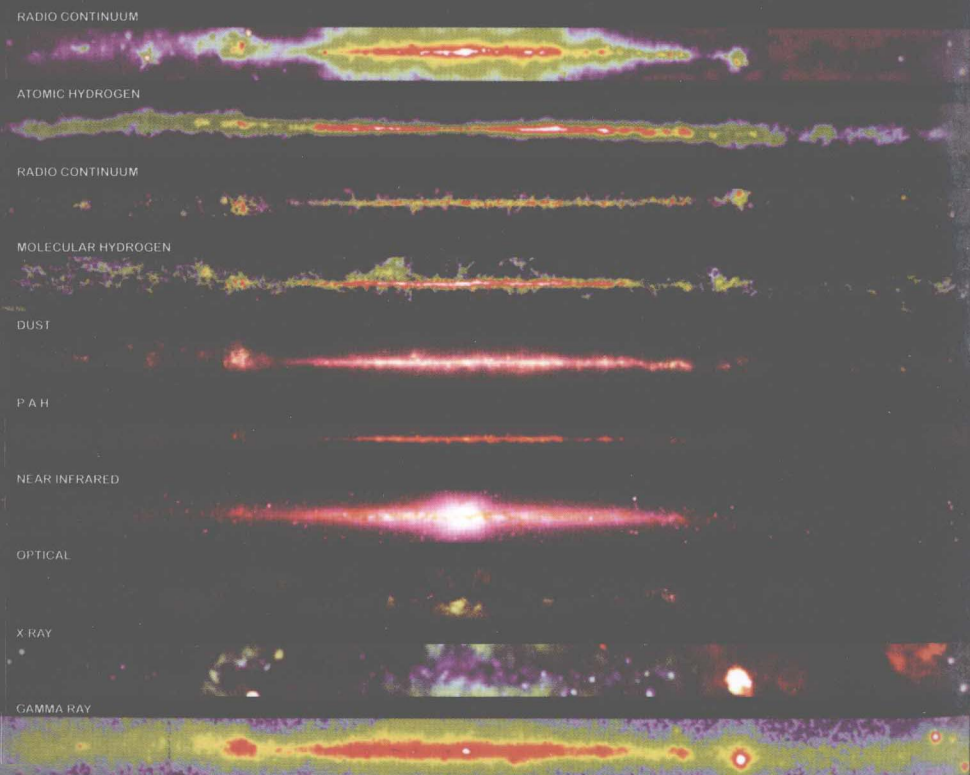


宇宙中的星系

第二版

L. S. SPARKE & J. S. GALLAGHER 著

邹振隆 译



中国科学技术出版社

宇宙中的星系

第二版

琳达·斯帕克 约翰·加拉格 著

邹振隆 译

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

宇宙中的星系/(美)斯帕克,(美)加拉格著;邹振隆译. —北京:
中国科学技术出版社,2010.2

ISBN 978-7-5046-5468-7

I. 宇… II. ①斯… ②加… ③邹… III. 星系-研究 IV. P15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 102867 号

著作权合同登记号:01-2008-5418

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京金信诺印刷有限公司

*

开本:889 毫米×1194 毫米 1/32 印张:15.375 字数:500 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:56.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内容简介

星系是气体转变为明亮恒星的地方,核反应给恒星提供能源,也产生了大多数化学元素。但是气体和恒星只是冰山的一角:暗物质才是星系的主要成分,我们知道它只是通过其引力的作用。我们今天所见恒星的年龄、化学组成和运动,以及它们结合在一起的形状告诉了我们每个星系过去的生命史。本书介绍星系从其在宇宙早期形成以来的天体物理学。第2版用最新的观测资料做了大量的说明。它包括关于星系团、 γ 射线暴和超大质量黑洞的新章节。有关大尺度结构和早期星系的章节做了彻底改写,以纳入诸如暗能量这类最新的发现。

作者们从恒星的基本性质和探索银河系开始,接着逐步推及近邻星系和可以看到星系早期阶段的遥远宇宙。然后他们讨论星系的结构和星系如何发展,并将它同宇宙的演化关联起来。本书也考察了跨越整个电磁谱观测星系的方法,并通过其对物质和光的引力作用对暗物质进行了探索。

本书是独立自足的,包含了必要的天文学背景知识和带有提示的课外作业,是天文学和天体物理学高年级大学生的理想读物。

Linda Sparke 是威斯康星(Wisconsin)大学天文学教授,美国物理学会会员。

John Gallagher 是威斯康星大学天文学 W. W. Morgan 讲席教授, *Astronomical Journal* 编辑。

策 划 赵 晖

责任编辑 赵 晖

责任校对 孟华英

责任印制 安利平

第二版序

本教材的主要对象是已经上过一两年本科水平物理课程的天文学和物理学三、四年级的大学生。我们希望有关领域的研究生和研究人员也认为本书可用作该领域的导论。具备某些天文学背景知识将有所帮助,我们已在第1章综述了必要的事实和概念,而且也给出了提供较充分讨论的参考书。本书提供了教师足够一学期课程的材料,教师可按教授进度对内容进行取舍。在读完全书之后,读者应当发现自己已经做好了研读 Binney and Tremaine 的 *Galactic Dynamics* 这类研究生教材和 *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 中那些评述文章的准备。

天文学不是像物理学一样的实验科学,它是像地质学或气象学这样的自然科学。我们看待宇宙必须按其本来的面貌,去推论偶然形成的星系怎样受物质基本性质的约束。有时我们只了解一般的知识,但并不具体。我们能估计太阳的热可从地球的海洋中蒸发多少水,并计算出每天的降雨量;风速近似能满足耗散大地和空气吸收的太阳能的需求。但我们不能从物理学原理,预报何时会刮风下雨。类似地,我们知道为什么恒星的质量不能比现实的过大或过小,但我们不能预言每种质量恒星诞生时的相对比例。其他明显的规则性,诸如星系光度同其中恒星轨道速度之间相当密切的关系,还没有得到恰当理解。但我们深信它们终将供出自己的秘密,正如氢燃烧恒星中的颜色-星等关系作为主序被揭示出来一样。初看起来星系天文学似乎是一堆完全无关的事实;但我们希望说明,正确的类比是气象学或植物学,而不是集邮。

我们已设法把相对来说比较困难或复杂难懂的材料放在每个小节的末尾。建议那些在初次阅读时对某些部分感到吃力的学生移到下一小节以后再回到这个麻烦的段落。教材中包含了一些习题。其目的主要是增强读者对计算的理解和对有关量量级的判断,而不是

数学上的要求。通常在课文中介绍的材料在习题中得到扩充；较仔细的读者可能会发现，同其余课文一起审视它们是有益的。

黑体符号用于矢量；斜体字（中译文亦用黑体）表示来自物理学的概念，或者读者将在本教材中再次看到的，或将在天文学文献中碰到的天文学专门术语。因为天文学家要处理大距离和长时标，他们使用不寻常的混合单位，这取决于要处理的问题；附录 A 列出了带转换因子的表。更令人困惑的是，我们许多人依然坚持厘米-克-秒单位制。对于电磁学公式，我们在课文相应处给出了它们同基于米和千克的国际单位制（SI）之间的转换。在其他情况下，读者将能借助附录 A 相当容易地在两种单位制之间进行转换。天文学家对于以哈勃常数 H_0 参数化的距离标度仍然有显著分歧。我们常常明显地指出光度、距离等等结果的不确定性，但我们在其他场合采用 $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。在需要年龄或者真的涉及大部分宇宙时，我们用 $\Omega_\Lambda = 0.7$ ， $\Omega_m = 0.3$ ，和 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 的标准宇宙学模型。

我们将用等号（=）表示数学上的相等，或者用于已知精度高于百分之几的测量结果；近似相等（ $\approx$ ）通常意味着 10%~20% 的精度，而 $\sim$ 意味着该关系成立不好于因子 2。除非明确指出，对数是指以 10 为底。本书以及一般的专业文献中误差范围用 $\pm$ 号表示，在图里用水平或垂直棒表示。遵循天文学的约定，它们通常是指假设 Gauss 分布（常常是真实随机误差的相当差的近似）计算出的 1σ 误差估计。对于那些更习惯 2σ 或 3σ 误差棒的人，这种做法使得不同作者结果之间的矛盾比事实上的情况显得更凸出。

由于我们的同事和学生的帮助、建议和提醒，本书有了重要改善。Eric Wilcots 在他的本科课程中对初稿进行了试用；我们的同事 Bob Bless, Johan Klapen, John Mathis, Lynn Matthews 和 Alan Watson 通读全书并给我们提出了详细的意见；Bob Benjamin 努力为我们校正了有关星际介质的内容。我们特别感谢许多同事花时间，为我们提供了图片或有关材料；并在图片说明中指出了提供者。Bruno Binggeli, Dap Hartmann, John Hibbard, Jonathan Mc-

Dowell, Neill Reid 和 Jerry Sellwood 为我们重新分析、重新运算并重新绘制了这些图片, Andrew Cole 对恒星的能量输出做了积分, Evan Gnam 做了轨道计算, Peter Erwin 就一些大型而复杂的图像给了我们协助。Wanda Ashman 把我们的草图转换为线条图。对于第 2 版, Bruno Binggeli 为我们改进了本星系群的肖像照, David Yu 帮忙绘制了一些复杂的图, Tammy Smecker-Hane 和 Eric Jensen 建议对习题做了有益的改变。在此表示感谢。

Linda Sparke 感谢威斯康星大学在 1996~1997 和 2004~2005 学年提供的带薪休假, 感谢 Terry Millar 和威斯康星大学研究生院, Vilas 基金, 和威斯康星 Alumni 基金的资助。她也感谢卡普坦天文研究所(荷兰格罗宁根大学)、斯特朗洛山和赛丁泉天文台(堪培拉澳大利亚国立大学)、伊萨克·牛顿数学研究所(英国剑桥大学)和叶凯士天文台(芝加哥大学)的所长、成员和学生在本书第一版写作期间给予的接待。她也同样感谢加拿大多米尼昂天体物理台, 德国加尔辛马克斯普朗克天体物理研究所、华盛顿卡内基学院天文台(加利福尼亚帕萨迪纳)在准备第二版时对我们的关照。我们两人特别感谢麦迪逊的同事在本书写作期间对我们的鼓励。Jay Gallagher 也感谢他的家庭对他写书的耐心和支持。

我们看来都缺乏能够准确阅读清样(强隐性遗传?)的基因。感谢许多热心的读者发现第 1 版中的错误, 勘误表已在网站上列出。第二版我们将继续这样做, 也希望提供机读形式的图: 请见我们主页(www.astro.wisc.edu/~sparke and [~jsg](http://www.astro.wisc.edu/~jsg))的链接。

目 录

第 1 章 导论	(1)
1.1 恒星	(2)
1.2 银河系	(27)
1.3 其他星系	(40)
1.4 膨胀宇宙中的星系	(49)
1.5 前星系时代	(54)
第 2 章 银河系	(61)
2.1 太阳邻域	(61)
2.2 银河系中的恒星	(70)
2.3 银河系自转	(94)
2.4 银河系气象学:星际气体	(101)
第 3 章 恒星的轨道	(119)
3.1 引力作用下的运动:为星系称重	(120)
3.2 为什么银河系中无碰撞:二体弛豫	(133)
3.3 盘星的轨道:本轮	(143)
3.4 无碰撞 Boltzmann 方程	(150)
第 4 章 我们的后院:本星系群	(161)
4.1 银河系的伴星系	(166)
4.2 本星系群中的旋涡星系	(180)
4.3 本群中的星系是怎样形成的?	(184)
4.4 本星系群中的矮星系	(196)
4.5 本星系群的过去和未来	(201)
第 5 章 旋涡星系和 S0 星系	(204)
5.1 星光的分布	(205)
5.2 观测气体	(220)
5.3 盘星系的气体运动和质量	(230)

5.4	插曲:盘星系的序列.....	(238)
5.5	旋臂和星系棒	(242)
5.6	盘星系的核球和中心	(254)
第 6 章	椭圆星系	(260)
6.1	测光	(261)
6.2	恒星的运动	(274)
6.3	星族和气体	(287)
6.4	暗物质和黑洞	(295)
第 7 章	星系群和星系团	(299)
7.1	星系群:盘星系的家園.....	(300)
7.2	富星系团:S0 和椭圆星系的领地	(314)
7.3	星系形成:自然,培育,还是并合?	(324)
7.4	星系际暗物质:引力透镜.....	(326)
第 8 章	星系的大尺度分布	(339)
8.1	今天的大尺度结构	(340)
8.2	均匀宇宙的膨胀	(350)
8.3	观测最早的星系	(360)
8.4	结构的生长:从小开始.....	(370)
8.5	结构的生长:团,壁和洞	(382)
第 9 章	活动星系核和星系的早期历史	(392)
9.1	活动星系核	(393)
9.2	活动星系核中的快速喷流,微类星体和 γ 射线暴	(412)
9.3	星系际气体	(419)
9.4	第一批星系	(427)
附录 A	单位和转换	(439)
附录 B	参考书目	(444)
附录 C	问题提示	(449)
索引		(457)

第1章 导 论

星系在天空中显现为横跨成千上万光年的巨大发光云团；参见 1 下面 1.3 节的照片。每一个星系都包含着百万至万亿颗恒星；引力将恒星束缚在一起，使它们不能在空间自由运动。本章将介绍为理解星系如何组成所需要的天文信息。

星系几乎所有的发光都来自它们的恒星。本章 1.1 节概述了关于恒星的知识，这些知识如何得来，以及我们可能在何处出错。我们将讨论基本的观测数据，并根据恒星演化理论描述恒星的生命史。按照地球上的标准，即便是最近的恒星也显得很暗。准确测量它们的发光需要细心，往往还需要精致的设备和程序。本节最后将介绍恒星测光知识：星等系统、滤光片带通和颜色。

1.2 节介绍我们自己所在的星系——银河系，它具有“飞碟”般的特征形状：带中央核球的扁平圆盘。除恒星以外，银河系和其他星系还包含气体和尘埃；我们将回顾发现这些气体和尘埃的过程。本节末尾将介绍天文学家用以确定恒星在银河系中位置的一些坐标系。1.3 节对其他种种星系进行描述，并讨论如何测量其中光的分布。只有星系最明亮的核心才能超过夜天的光辉，而星系大部分的光来自其暗弱的外部；星系的测光甚至比恒星更难。

20 世纪最重大的发现之一是宇宙并非静态，而是处于膨胀之中；星系全都在离开我们，并且彼此退行。我们的宇宙在并不太远的过去曾经有一个开端——大爆炸：宇宙大约只比地球老 3 倍。1.4 节将讨论宇宙的膨胀，以及它如何影响我们从星系接收到的光。最后，1.5 节将概述大爆炸后头几百万年发生的事情，以及宇宙早期的历史如何影响我们今日之所见。

1.1 恒星

1.1.1 星星明,星星亮……

2 关于比太阳更远的恒星的所有信息,我们都是从观测它们的电磁辐射,主要是光谱的紫外、可见和红外部分得出的。一颗恒星发出的光主要决定于它的表面积、外层温度和化学组成(每种原子的相对数目)。我们还可以通过比较间接的方法知道恒星的质量、年龄和内部化学成分,因为这些因素制约着它们的表面条件。随着破解和解释星光带给我们的信息,在地球实验室获得的关于物质和辐射特性的知识形成了我们关于恒星结构理论的基础。

恒星的光度是每秒发出的能量,以瓦或每秒尔格量度。它的视亮度或流量是观测者的望远镜上每秒每平方米(或平方厘米)接收到的总能量,单位是 Wm^{-2} 或 $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 。如果恒星在所有方向以相等亮度发光,我们就可以用平方反比定律从距离 d 和测量到的流量 F 估计其光度 L :

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}. \quad (1.1)$$

通常,我们并不准确地知道距离 d ,所以在以后的计算中必须记住,我们估计的光度 L 同 d^2 成正比。太阳的总或热光度是 $L_{\odot} = 3.86 \times 10^{26} \text{W}$, 或 $3.86 \times 10^{33} \text{erg/s}$ 。恒星的光度差别很大:最亮的比太阳亮 1 百万倍,而我们观测到的恒星可以暗到 $10^{-4} L_{\odot}$ 。

天文学中的长度通常用小角公式来测量。例如,如果到我们的距离为 d 的一对双星在天空显示的张角为 α

$$\alpha(\text{弧度}) = D/d. \quad (1.2)$$

通常我们以角秒来量度角 α : 1 角秒(1")是 1 角分(1')的 1/60, 1 角分是 1 度的 1/60。长度通常以地球的平均轨道半径,即天文单位(1AU 约为 1.5 亿千米)给出。另一种单位是秒差距,定义为,当 $D=1\text{AU}$ 和 $\alpha=1''$, 则 $d=1\text{pc}=3.09 \times 10^{33}$ 千米或 3.26 光年。

我们可以用两颗恒星互相绕转的轨道来计算它们的质量。如果

这两颗恒星在天空中可以清楚分开,我们就能用(1.2)式来测定它们之间的距离。我们可以从它们谱线的多普勒频移求出恒星彼此绕转的速度,见1.2节。3.1节中的牛顿万有引力方程就给出它们的质量。从地球和其他行星的轨道求出太阳的质量是 $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ 或 $2 \times 10^{33} \text{ g}$ 。

恒星的质量范围比它们的光度范围小得多。最重恒星的质量约为 $100 M_{\odot}$ 。恒星是一个核聚变反应堆,比该质量大的气体球燃烧会非常猛烈以至在短期内炸掉自己。最轻的恒星约 $0.075 M_{\odot}$ 。质量更小的天体中心绝不会变得足够热,以至不能启动恒星生命的主要核反应(将氢变为氦)。

问题 1.1 证明单位质量太阳产生的能量是一个平均人(1w/kg)的万分之一。

恒星的半径很难直接测量。太阳的半径 $R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$,但是当用一台普通望远镜看来,没有一个恒星显示为一个圆盘。即使是最大的恒星张角也只有约 $0.05''$,即一角秒的二十分之一。我们能干涉仪困难地测量近星的半径;在食变双星中,通过测量轨道大小和交食时间估计两颗星的半径。最大的恒星(红巨星)的半径约比太阳大1000倍,而仍然在燃烧核燃料的最小的恒星半径约为 $0.1 R_{\odot}$ 。

恒星是炽热的致密气体球,其光谱近似于温度从刚低于3000K到100000K的黑体谱,由于恒星外层(或大气)中原子和分子的吸收和发射有所改变。黑体是一种理想的辐射体或完美的吸收体。在温度为 T 时,一个半径为 R 的黑体的光度 L 由Stefan-Boltzmann方程给出:

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4, \quad (1.3)$$

式中常数 $\sigma_{\text{SB}} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。对于光度为 L ,半径为 R 的恒星,我们定义有效温度 T_{eff} 为相同半径,辐射相同总能量的黑体的温度。这个温度通常接近恒星‘表面’,即光球上气体的平均值。这是光能够逸入空间的那一层。太阳的有效温度是 $T_{\text{eff}} \approx 5780 \text{ K}$ 。

问题 1.2 用 1.3 式从光度和有效温度估计太阳半径 $R_{\odot}$ 。证明表面引力加速度 g 比地球上约大 30 倍。

问题 1.3 猎户座红超巨星参宿四 $T_{\text{eff}} \approx 3500\text{K}$, 直径为 $0.045''$ 。假设距离 $d = 140\text{pc}$ 。证明其半径 $R \approx 700 R_{\odot}$, 光度 $L \approx 10^5 L_{\odot}$ 。

4

我们一般并不测量一颗恒星发射的全部光, 而只测量一个给定波长或频率间隔内发射的光。我们这样定义单位波长的流量 F_{λ} , 使 $F_{\lambda}(\lambda)\Delta\lambda$ 等于波长 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 之间接收到的光能。因为其大小同测量的典型精度相合, 光学天文学家一般以 19 世纪光谱学家 Anders Ångström 命名的单位来量度波长: $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$ 或 10^{-10}m 。流量 F_{λ} 的单位是 $\text{Wm}^{-2}\text{\AA}^{-1}$ 或 $\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{\AA}^{-1}$ 。单位频率的流量 F_{ν} 可类似定义: $F_{\nu}(\nu)\Delta\nu$ 是频率 ν 和 $\nu + \Delta\nu$ 之间接收到的能量, 所以 $F_{\lambda} = (\nu^2/c)F_{\nu}$ 。射电天文学家通常以 Janskys 作单位来测量 F_{ν} : $1\text{Jy} = 10^{-26}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ 。视亮度 F 是对所有频率或波长间隔的积分:

$$F \equiv \int_0^{\infty} F_{\nu}(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} F_{\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (1.4)$$

一个黑体越热, 它的光就越蓝: 在温度 T , F_{λ} 的峰值出现在波长

$$\lambda_{\text{max}} = [2.9/T(\text{K})]\text{mm}. \quad (1.5)$$

对于太阳, 它相应为黄光, 大约在 $5000\text{\AA}$; 人体、地球大气和望远镜未制冷的部分, 主要是红外辐射, 在约 $10\mu\text{m}$ 处。

1.1.2 恒星光谱

图 1.1 显示了许多常见恒星种类的 F_{λ} , 按从最冷到最热的顺序排列。最热的恒星最蓝, 它们的光谱显示出高电离原子的吸收线; 冷星主要辐射的光在红和红外波长, 有中性原子或分子的吸收线。19 世纪的天文学家按中性氢 HI 的 **Balmer** 线强度对恒星进行分类, A 型星有最强的谱线, B 型星次之, 等等; 许多分类后来已经不用。19 世纪 80 年代, 哈佛的 Antonia Maury 认识到, 当分类按 OBAFGKM 的顺序排列时, 所有谱线, 而不只是氢线的强度沿着这个序列连续变化。1911~1949 年期间在哈佛大学天文台进行了首次大规模分类: 在 **HD 星表** 及其补编中包括了几乎 400000 颗恒星。我们现在知道,

Maury 的光谱序列是按表面温度降低的顺序来排列恒星的。每一型又分为若干亚型,从 0 最热,到 9 最冷;我们的太阳是一颗 G2 型星。近来,这个系统中又增加了一个 L 型,以表示红外观测者发现的非常冷的恒星。天文学家常把这个序列起始处的恒星称为“早型”,而将靠近末端的恒星称为“晚型”。

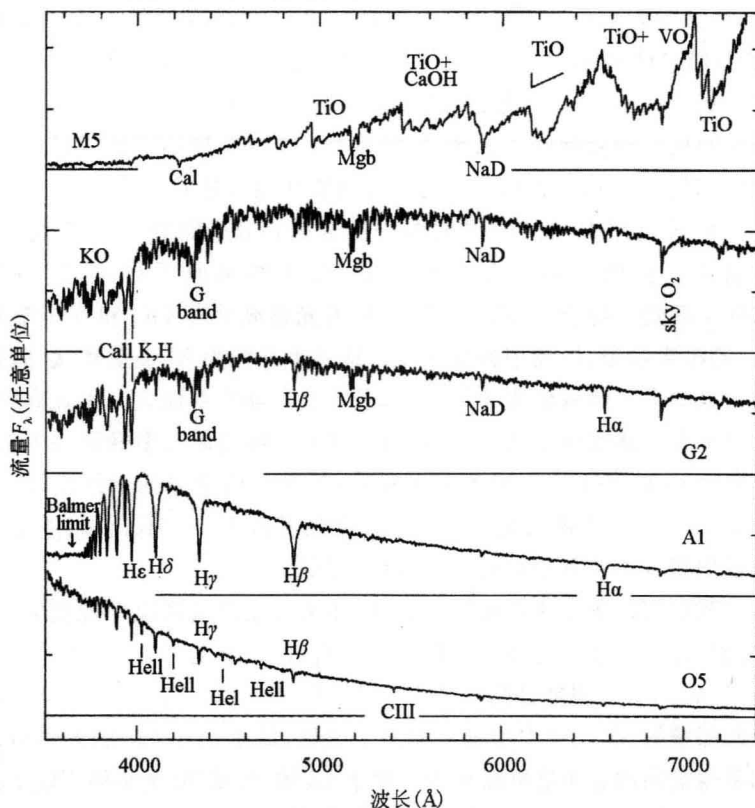


图 1.1 化学组成与太阳大致相同的主序星的光谱。按表面温度增加的顺序从上至下排列,恒星的光谱型为 M5, K0, G2, A1 和 O5—G. Jacoby et al., 光谱库

O 型星的温度超过 30000K。图 1.1 显示,最强的谱线是 HeII (一次电离氦)和 CIII(二次电离碳)的谱线;氢的 Balmer 线相对弱,因为氢几乎完全电离了。较冷的 B 型星的光谱有较强的氢线,也有

HeI(中性氦)线;温度低于 11000K 的 A 型星足够冷,使其大气中的氢差不多是中性的,它们有最强的 Balmer 线,和一次电离金属(例如钙)的谱线。注意在波长短于 $3800\text{\AA}$ 处流量明显降低;这称为 **Balmer 跃变**。类似的 **Paschen 跃变**出现在 $3^2/2^2$ 倍波长,即约 $8550\text{\AA}$ 处。

6

在 F 型星中,氢线比在 A 型星中弱,中性金属谱线开始出现。G 型星(如太阳)冷于约 6000K。最突出的吸收特征是一次电离钙(CaII)的“H 和 K”线以及 $4300\text{\AA}$ 处 CH 的 G 带。这些名称是 1815 年 Joseph Fraunhofer 起的,他在太阳光谱中发现了一些强吸收线,将它们从红到蓝标以从 A 到 K 的记号。中性金属的谱线,例如中性钠(NaI)在 $5890\text{\AA}$ 和 $5896\text{\AA}$ 的一对谱线比在较热的恒星中强。

在 K 型星中,我们主要看到中性金属和分子例如 TiO(氧化钛)的谱线。在低于 $4000\text{\AA}$ 的波长处,金属线吸收了许多光,造成 **4000 $\text{\AA}$ 跃变**。冷于 4000K 的 M 型星的光谱显示出 TiO 和 VO(氧化钒)的深吸收带,以及中性金属线。这并不是因为 M 型星富钛,而是因为这些分子吸收红光非常有效,且大气足够冷得使它们不致离解。L 型星表面温度低于 2500K,它们大气中的钛和钒大多凝聚为尘粒,所以 TiO 和 VO 带比 M 型星弱得多;铯等中性金属的谱线出现,而钠 D 线变得非常强而宽。T 型星表面温度低于 1400K;它们的光谱显示出很强的水和甲烷线,类似巨行星的大气。

我们可以测定这些矮星的质量,办法是在双星系统中观测它们,并同演化模型进行比较。这样的工作表明,对于主序 M5 型星, $M \approx 0.15 M_{\odot}$, 对于测量过的一个 L0-L1 型双星, $M \approx 0.08 M_{\odot}$ 。计数太阳邻域的 M、L 和 T 型矮星的数目表明,低于 $0.3 M_{\odot}$ 的天体对银河系薄盘内的总质量贡献很少。冷于 L5 的“恒星”质量小得不能支持核心的氢燃烧。它们不是真正的恒星,而是**褐矮星**,随着在它们自身引力作用下缓慢收缩而冷却。在头 100Myr 的时间内,一个给定的褐矮星能够从 M 冷却到 L,甚至 T 型;在其晚期生命中,温度只是缓慢降低。

星系的光谱是**复合的**,由不同温度恒星的光混合而成。较热的恒星贡献了大部分蓝光,在银河系这样的星系光谱蓝区观测到的谱线,通常是 A、F 或 G 型星的谱线。O 和 B 型星很少,所以对可见光

贡献不多,除非星系有新近的恒星形成暴发。在光谱红区,我们看到来自较冷的 K 型星的谱线,它们产生了该星系红光的大部分。所以一个像银河系这样的星系的光谱蓝区显示氢的 Balmer 线吸收,而在红区中存在 TiO 带。

测量谱线相对于附近波长流量的相对强度,要比在一个宽波长范围测量 $F_\lambda(\lambda)$ 容易得多。星际空间中的尘埃和地球大气的吸收和散射对恒星蓝光的影响比红光大;蓝光和红光在望远镜和摄谱仪中的传播也不同。实际上,恒星的温度往往可以通过将其光谱中观测到的吸收线深度同恒星大气模型的预言相比较来估计。这是光穿过温度和化学组成给定的恒星大气的传播方式的一种计算机计算;它已经用仔细测量过 F_λ 的恒星进行了标定。

7

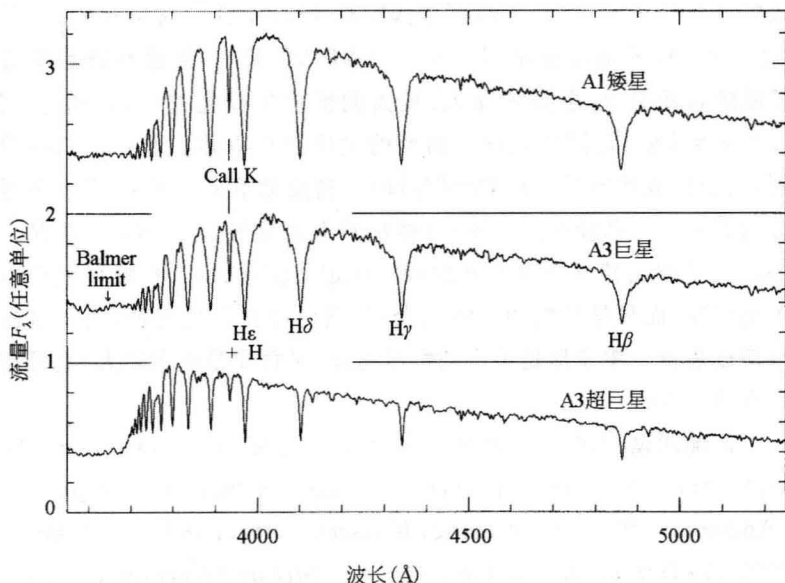


图 1.2 A1 型矮星, A3 型巨星和 A3 型超巨星的光谱: 最亮的恒星有最狭窄的谱线(G. Jacoby et al., 光谱库)

恒星光谱中的谱线也给予我们有关表面引力的信息。图 1.2 显示了 3 种恒星的光谱, 全都分类为 A 型星是因为其吸收线的一般强度相似。但是 A 型矮星的 Balmer 线比在巨星和超巨星中的宽, 因

为其光球中的原子更紧地挤在一起：这叫做 **Stark 效应**。如果我们用模型大气来计算一颗恒星的表面引力，而且我们也知道了它的质量，那么我们就可以求出它的半径。对于大多数恒星来说，表面引力和太阳相比差一个因子 3；这些恒星构成主序，称为矮星，尽管其中最热的也非常大而亮。

所有主序星正在将其核心的氢燃烧为氦。对于任何特定的光谱型，这些恒星具有几乎相同的质量和光度，因为它们有几乎相同的结构：最热的恒星最重，最亮，最大。主序星的半径在 $0.1R_{\odot}$ 和大约 $25R_{\odot}$ 之间，粗略地有

$$R \sim R_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{0.7} \quad \text{和} \quad L \sim L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}, \quad (1.6)$$

式中，对于 $M \leq M_{\odot}$ ， $\alpha \approx 5$ ，对于 $M_{\odot} \leq M \leq 10 M_{\odot}$ ， $\alpha \approx 3.9$ 。对于 $M \geq 10 M_{\odot}$ 的最重恒星， $L \sim 50 L_{\odot} (M/M_{\odot})^{2.2}$ 。巨星和超巨星有较低的表面引力，也更加膨大；最大的恒星半径超过 $1000 R_{\odot}$ 。图 1.3 告诉我们，它们比同样光谱型的主序星亮得多。下面我们将看到，它们代表着恒星生命的晚期阶段。白矮星不是主序星，但有高得多的表面引力和较小的半径；白矮星只有地球般大小， $R \approx 0.01 R_{\odot}$ 。如果我们根据其核聚变产能的特性来定义恒星，那么白矮星就根本不是恒星，而只是星核的灰渣或余烬；它已经耗尽核燃料，正在慢慢冷却成黑色。中子星是更小的恒星遗迹，尽管质量比太阳大，直径却只有约 20km。

延伸阅读：大学本科水平的恒星导论，参见 D. A. Ostlie and B. W. Carroll, 1996, *An Introduction to Modern Stellar Astrophysics* (Addison - Wesley, Reading, Massachusetts); and D. Prialnic, 2000, *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution* (Cambridge University Press, UK)。

一条给定谱线的强度，取决于形成该谱线的恒星层的温度，也取决于各种元素的丰度。通过将各种谱线的强度同热气体中的计算值进行比较，Cecelia Payne - Gaposhkin 在 1925 年证明，太阳和其他恒星主要由氢组成。按质量计，太阳的表面层约有 72% 的氢，26%