

天体物理概论
向守平编著
Reading Note

Renkun Kuang

September 19, 2019

Contents

1	绪论	3
1.1	天体物理学的研究对象	3
2	基本天体物理量及其测量	6
2.1	星等	6
2.1.1	视星等	6
2.1.2	绝对星等	6
2.1.3	光度	6
2.2	温度	7
2.2.1	色指数和色温度	7
2.2.2	有效温度	7
2.3	光谱型	8
2.3.1	天体光谱研究的开始与发展	8
2.3.2	恒星光谱的分类	9
2.3.3	不同光谱型谱线特征的成因	9
2.4	赫罗图	10
2.5	变星	10
2.5.1	脉动变星	10
2.5.2	爆发变星	10
2.6	天体距离的测定	10
2.7	恒星质量的测定	11
2.7.1	双星系统	11
2.7.2	质光关系	11
2.7.3	位力定理	11
2.8	恒星的年龄	11
2.9	小结	11
3	恒星的形成与演化	12
3.1	恒星的形成阶段	12
3.1.1	星云塌缩的条件和金斯判据	12
3.1.2	星云的快速收缩过程	12

3.1.3	星云的慢收缩过程—原恒星阶段	12
3.2	主序星阶段	12
3.3	恒星结构的基本方程	13
3.4	积分定理 (位力定理)	14
3.5	主序后的演化	14
3.5.1	小质量恒星的演化 ($M < 2.3M_{\odot}$)	14
3.5.2	中等质量恒星的演化 ($2.3M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$)	14
3.5.3	大质量恒星的演化 ($M > 8M_{\odot}$)	14

前言

21世纪将是我国天文学和天体物理学发展的黄金时期,国家需求和国际站争霸要培养和造就大批专业人才,也需要更多的公众了解和支持这一领域的发展。

Chapter 1

绪论

1.1 天体物理学的研究对象

每当我们仰望群星璀璨、银汉低垂的夜空,总会由衷地发出“感天地之辽阔、觉宇宙之无穷”的赞叹,心中也会同时涌起对宇宙奥秘求知的渴望。

伟大诗人屈原在他的不朽名篇《天问》中,就曾对天问道:

遂古之初,谁传道之? 上下未形,何由考之? 斡维焉系,天极焉加? 八柱何当,东南何亏? 九天之际,安放安属? 隅隈多有,谁知其数? 天何所沓? 十二焉分? 日月安属? 列星安陈? 这一连串的发问,集中反眨了亘古以来我们祖先对宇宙之谜不倦的求索。

按照我国目前的学科分类,天体物理学是天文学下属的一个二级学科.此外的一级学科远有天体测量学和天体力学。天体测量学是天文学最古老的分支,它的主要任务是精确测定天体的位置和运动,建立基末坐标参考系,确定地面点的坐标以及提供精确的标准时间服务。天体力学主要研究天体运动的动力学问题,其理论基础是牛顿力学(在高精度情况下需要应用广义相对论给出修正)。天体物理学的任务是应用物理学的理论、方法和技术,研究天体的形态、结构、化学组成、物理状态和演化规律。实质上,它是天文学和物理学交叉融合的产物,因而既可以说是天文学的一个分支,也可以说是物理学的一个分支。

天体物理学的内容十分丰富—按所研究的宇宙的不同层次,可以分为行星物理、太阳物理、恒星物理、星系物理和宇宙学等不同领域。按所接收到的辐射的能量,可以分为射电、红外、光学、紫外,高能(X射线,伽马射线)等不同波段;在引力场很强的情况下,要应用相对论天体物理;此外还有:宇宙化学,宇宙生物学,等离子体天体物理、核天体物理、中微子天体物理、粒子天体物理等专门分支。

恒星半径可以相差 10^6 倍,固有亮度(光度)可以相差 10^{10} 、密度可以相差 10^{25} 倍,但

恒星的质量大小相差只在 10^3 倍以内。质量大小的差异造成自身引力大小的差异,而正是引力主导了恒星一生的演化,这就使得不同质量的恒星走过完全不同的演化途径,并到达有着天壤之别的最后归宿。

战后,还是雷达科技人员把雷达技术应用于天文观测,揭开了射电天文学发展的序幕。

与光学望远镜类似,射电望远镜的基本技术指标有两项,即灵敏度 and 分辨率。前者主要取决于接收天线的有效面积及信号处理系统的信噪比;后者与光学望远镜一样,主要受到电磁波衍射的限制。分辨率 θ 与电磁波长 λ 和望远镜天线口径之间的关系为 $\theta = 1.22\lambda/D$

马克斯·普朗克射电天文研究所

FAST建成后,我国还将通过国际合作的方式,继续在贵州建造一台口径1000 m的超大型射电望远镜。

微波波段最重要的观测目标是宇宙微波背景辐射(见第7章)。1989年11月18日,COBE(Cosmic Background Explorer,即宇宙背景辐射探测器)卫星由NASA发射升空,并很快取得了许多重要的观测结果,其中最重要的是发现了宇宙背景辐射严格的黑体谱形式,从而确认了宇宙早期是一个热宇宙,为大爆炸宇宙理论提供了最关键的支持。此后,WMAP卫星发射,继续对宇宙微波背景辐射进行更精确的观测。这两颗探测卫星获得的大量数据,使宇宙学研究进入了精确宇宙学阶段。

Spitzer主要任务是对恒星和星系早期演化进行研究,并探测大红移的红外星系,以及“褐矮星”、暗伴星等低温天体,至今已取得许多观测成果。

FUSE远紫外光谱探测卫星,主要任务是研究宇宙中的元素丰度、星际介质和恒星大气,深入了解星系的化学演化。

爱因斯坦天文台(HEAO-Einstein)率先使用了掠射成像技术,构成第一代X射线望远镜,并得到了第一张X射线天体像,大大增进了我们对各类天体本质的了解。

Chandra X射线望远镜提供了亚毫角秒的天体像和光栅分光测量,其主要任务是以高分辨率证认宇宙中的X射线天体,并拍摄其X射线光谱。这对研究恒星晚期演化,特别是对于探测黑洞和宇宙暗物质有重要意义。

XMM-Newton是ESA发射的空间望远镜,它由3架X射线望远镜组成,每架长度为2.5m,直径90cm,具有很大的有效采光面积,同时还可以进行光学波段的观测。这两台X射线空间望远镜所得到的观测数据已到广泛采用。

康普顿 γ 射线空间天文台(CGRO)的主要任务是进行 γ 射线巡天观测,搜寻宇宙中的 γ 射线源,对较强的 γ 射线源进行高灵敏度,高分辨率的成像以及光变和光谱的测量。

中微子在恒星演化和宇宙演化中都起着重要作用,但由于中微子只参与弱相互作用和引力作用,故对它们的探测也是十分艰巨的工作,我们将在以后有关章节中介绍中微子的探测方法。

此外,天体发送信息的另一个独特的窗口——引力波(见第4章),其在地球上的直接探测也是多年来人们奋斗追求的目标,但看来这一任务比中微子探测更加艰巨,人类在2015年成功探测到引力波!
各个行星探测任务。

Chapter 2

基本天体物理量及其测量

2.1 星等

2.1.1 视星等

天体的视亮度与观测者所使用的观测方式以及观测波段有关。所以有目视星等、照相星等、仿视星等、光电星等、辐射星等、热星等；等等

2.1.2 绝对星等

在天文学和天体物理的研究中,问题往往是反过来,即由其他与距离无关的方法求得绝对星等后,再根据

$$m - M = 5 \lg r - 5$$

式,由绝对星等和视星等求出天体的距离。

实际观测中还有一个重要因素要考虑,即地球大气的消光改正。我们注意到,恒星(太阳也是如此)移动到接近地平位置时。星光就发暗发红,这是由于星光被地球大气吸收和散射的结果,称为大气消光。星光变暗变红使得视星等要变大一些,因此,为了得到准确的视星等值,必须进行大气消光的改正。天文工作者对此已有一套系统的处理方法。

2.1.3 光度

恒星的实际亮度通常用光度来表示。光度定义为恒星整个表面发射的所有波段的总辐射功率(或总辐射流量)。它是恒星本身所固有的、表征其辐射本领的量。知道了恒星的绝对星等M后,就可以和太阳的参数相比,得到恒星的光度。

要注意的是,在视星等的讨论中我们知道,视星等有不同星等系统,故绝对星

等也应有相应的星等系统。严格说来,只有绝对热星等才与光度有(2.6)式这样的直接联系。总之,绝对星等是一个非常重要的天体物理量,它不仅直接联系到天体的光度,而且与视星等的观测结合起来,还可以得到有关天体距离的信息。

2.2 温度

2.2.1 色指数和色温度

我们不可能像在实验室里那样去直接测量恒星或其他天体的温度,而只能通过间接的办法进行。上面已经提到,恒星在不同波长处的亮度是不同的。

这其中的原因是,恒星发出的电磁辐射可以近似看成是黑体辐射,而黑体辐射有一个随波长而变的强度分布,即普朗克分布。同时,根据黑体辐射的韦恩位移定律,黑体辐射能量分布曲线最大值对应的波长与黑体温度之间的关系为

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

也就是说,表面温度高的恒星,其辐射能量主要位于短波区;表面温度低的恒星,其辐射能量主要位于长波区。因此恒星的色指数能告诉我们恒星表面的温度。

为了测出 λ_{max} ,可以用一系列波长不同但波长间隔很小的滤光片去逐个测试,但这样做的效率很低也没有必要。天文学家有一个简单快捷的办法,只需通过两三次测量就可以得出温度,这就是利用色指数。同一颗星在不同波段的测光星等之差称为色指数。这样定义的恒星表面温度称为色温度。

UBVRI测光波段

还需要指出,除了地球大气消光以外,星际红化和星际消光也可以影响到观测的恒星颜色和星等。星际红化是指,星际空间存在大量的气体和尘埃,它们对短波光线的散射很强烈,因而使恒星的色指数显得偏红;星际消光是指,这些气体和尘埃还会吸收或屏蔽光线,使得星光变暗。故在实际观测中,也要做星际红化和星际消光方面相应的改正。

2.2.2 有效温度

除了用色指数定义的色温度外,通常还把与恒星的光度 L 相同的绝对黑体的温度定义为恒星的有效温度,即

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

其中 R 为恒星的半径, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常量。显然,有效温度也就是辐射功率与恒星相同的等效黑体的温度。

2.3 光谱型

2.3.1 天体光谱研究的开始与发展

天体物理学的诞生,直接源于自19世纪早期开始的分光学、光度学与照相方法对太阳和恒星的研究。回顾天体物理学的发展史就可以发现,直到19世纪上半叶,尽管经典物理学已经取得了许多重大成就,但人们仍无法将物理学与遥远的天体联系起来。

天体分光学的创始人当属德国光学家弗朗和费(J. Fraunhofer)。虽然远在1666年牛顿就已经使白光透过棱镜分解为彩色光带(“光谱”),1802年英国物理学家沃拉斯顿(W. Wollaston)也曾将光线穿过光缝后再透过棱镜,观察到光谱中有黑线出现,但只有夫琅和费首先对日光和星光中的这些黑线做了系统的研究。

但是,在长达近40年的时间里夫琅和费的研究并没有得到学术界的认可。那时的物理学家们正在忙于争论光的粒子说和波动说,化学家们的注意力也正集中在道尔逊的原子论以及定比定律的争论上。夫琅和费自己又缺少打开太阳谱线神秘图谱的钥匙,他自己也不能明确肯定光谱线在化学分析中所起的作用。

关键性的突破是德国物理学家基尔霍夫(G. Kirchhoff)完成的,并由此奠定了天体物理学的基础。1859年他与化学家本生(R. Bunsen)合作,研究了火焰的光谱和电弧里金属蒸汽的光谱,发现炽热的固体或液体发射连续光谱,气体则发射不连续的明线光谱,并在此基础上发表了分光学上著名的基尔霍夫定律。

他将太阳的谱线和实验室里各种元素的谱线相比较,立即证认出太阳中有许多地球上常见的元素,如钠、铁、钙、镍等。基尔霍夫的发现打破了天体和地球之间的神秘界限,证明人们熟知的化学元素存在于天体上,就如存在于地球上那样。如果说牛顿力学实现了天体运行规律和地面物体运动规律统一,则基尔霍夫的发现实现了天体和地球物质成分的统一。

自基尔霍夫之后,天体光谱的研究获得了迅速的发展。1863到1864年间,英国天文爱好者哈根斯(W. Huggins)和意大利教士塞西(A. Secchi)分别用分光镜研究恒星。他们的研究在性质上是互补的:塞西用低色散度摄谱仪观测了许多恒星,目的是做光谱的分类;哈根斯用高色散度摄谱仪只观测少数亮星的光谱,目的在分析恒星的物质组成。1865年哈根斯证认出一恒星的元素谱线,例如钠,铁,钙,镁,铋等,并根据谱线的多普勒效应测定了一些恒星的视向速度。例如他于1868年发现,天狼星是以大约每秒29英里的视向速度离开我们而去。这一开伸性的研究具有极其重大的意义:自那以后,天文学家不仅可以测量天体速度在地球上的投影部分(即速度的模向部分,称为自行),而且可以测量沿视线的径向部分,后来哈勃正是利用这一方法发现了宇宙的膨胀。1869年英国天文学家洛基尔(N. Lockyer)在太阳日珥光谱中首次发现氦线,之后到1895年才由英国化学家

雷姆察 (W Ramsay) 在地球上发现了氦,这可以说是宇宙物质成分统一论的一个巨大成就。

恒星的光谱为我们提供了有关恒星各方面特征的丰富信息,例如表面温度、光度、化学成分、质量、直径、磁场、自转乃至表面气体压力及运动状况等等,因而人们常把光谱比喻为人的指纹或生物基因的DNA。通过对恒星光谱的系统研究我们甚至可以了解恒星一生的演化过程。大多数恒星的光谱特征是连续谱背景上有许多吸收线,少数恒星兼有发射线或只有发射线。

由于恒星内部对光线几乎是不透明的,所以这些谱所反映的,只是关于恒星表面很薄一层气体(大气)的信息,这一薄层的厚度通常不及恒星半径的千分之一。最初天文学家曾简单地把恒星大气再分为两层来解释恒星光谱,底层气体炽热而稠密,产生连续光谱;上层较冷且稀薄,其中的原子吸收来自底层的辐射,因而产生吸收线。现在我们知道,恒星大气中的各种原子及分子都同时在发射和吸收光子,这是一个非常复杂的过程,需要用专门的**辐射转移理论**来描述。

恒星大气辐射转移的总结果是,大多数恒星的大气中,原子分子在一些波长处发出的辐射强度弱于相应的吸收强度,所以外部观测者就看到连续谱背景上有一系列吸收线。只有在少数的恒星大气中结果是相反的,此时观测者就看到明亮的发射线。

天文学家将拍摄到的恒星光谱与实验室测得的各种元素谱线进行对比,就可以确定恒星的化学组成,根据谱线的强度还可以确定各元素的丰度。

恒星的光谱特征主要与恒星外层的温度有关,温度差别影响到恒星外层各种元素原子的电离和激发状态,这种影响明显的反映到恒星的光谱之中。

2.3.2 恒星光谱的分类

在对自然现象(包括社会现象)的本质做出深入了解之前,先对大量观测调查数据进行统计分类,从中发现某些具有启示意义的规律性,这是许多研究工作者常采用的办法。

元素周期表的发现就是这样一个成功的例子。恒星光谱的分类也是如此,尽管在开始这项工作时人们并不了解恒星的真实结构和演化,但后来的研究表明,恒星的光谱分类是揭示恒星奥秘的先驱性工作,它也是发现赫罗图(见2.4节)的基础,而赫罗图在恒星物理的研究中起着举足轻重的作用。

2.3.3 不同光谱型谱线特征的成因

Saha Equation能给出详细的解释。大致思想是:处于激发态的原子占中性原子的比例,以及中性原子的绝对数量,共同决定谱线的强度。当温度从0K升高,

激发态原子的比例上升, 谱线增强; 但温度高到一定程度(临界)之后, 由于中性原子被电离数量减少, 尽管比例上升, 谱线强度还是下降。

2.4 赫罗图

如果知道一颗恒星在赫罗图上的位置, 就知道了它的半径。

2.5 变星

2.5.1 脉动变星

造父变星的周光关系

2.5.2 爆发变星

近年来, 哈勃宇宙望远镜发现了许多大红移(遥远距离)的超新星, 对它们的观测结果表明, 宇宙在加速膨胀。这就是我们在宇宙学部分将要讨论的宇宙学常数或宇宙暗能量问题的观测基础。

总之, 超新星SN1987A已成为检验超新星理论的绝好太空实验室, 至今仍然受到各国天体物理学家的密切关注。它本身及周围的一切细微变化, 仍时刻处在各种观测设备的严密监测之中。

2.6 天体距离的测定

1. 三角视差法
2. 分光视差法
3. 威尔逊-巴普法 (有无物理原理上的解释?)
4. 主星序重叠法

5. 变星测距

2008年, Ia型超新星能够测量到的宇宙学距离已达宇宙学红移 $z \geq 1$, 宇宙加速膨胀的观测事实正是由此而发现的

6. 行星状星云
7. HII区
8. 球状星团

9. 旋涡星系、椭圆星系以及它们的谱线宽度

10. 最亮的星系

11. 哈勃关系

宇宙距离阶梯

2.7 恒星质量的测定

2.7.1 双星系统

2.7.2 质光关系

有无理论解释质光关系

2.7.3 位力定理

2.8 恒星的年龄

2.9 小结

只有在 $0.1M_{sun} - 100M_{sun}$ 质量范围内才能够形成恒星,主要原因是,如质量太小,则核反应无法开始,也就形成不了恒星;而如质量过大,则恒星寿命太短,几乎还没有形成稳定的星体结构,恒星就坍缩了。

Chapter 3

恒星的形成与演化

3.1 恒星的形成阶段

3.1.1 星云塌缩的条件和金斯判据

但实际上气体的压力一般是不能忽略的,气体的压力产生于气体分子的随机热运动,这种随机热运动对于引力收缩来说是一种抗衡。因此,星云塌缩的必要条件是,自身引力必须要大于气体的压力。这一条件的具体表述是英国天文学家金斯(J Jeans)在1902年研究星系形成问题时提出的,它表明,并不是所有的气体星云都可以形成恒星(以及星系),只有满足一定物理条件时才能形成。这一理论也称为金斯引力不稳定性理论,它至今仍是研究恒星以及星系等天体形成过程的理论基础。

3.1.2 星云的快速收缩过程

3.1.3 星云的慢收缩过程—原恒星阶段

3.2 主序星阶段

库仑势垒, 麦克斯韦-波尔兹曼速度分布以及量子隧道效应, 最终使得发生氢核聚变的温度降低到700万度左右。在恒星上要实现并维持这一温度, 以使核反应持续进行, 依靠的是恒星自身的引力。只要引力足够强, 就可以把核反应物质约束在一起。但在地球上, 这一温度就显得太高了, 没有任何容器可以承受近千万度的高温。因此, 要实现地球上人工控制的持续核聚变, 只有利用超强磁场把等离子体约束起来, 这种装置称为“托卡马克”。最近我国科学家已在这方面取得了世界领先的成就, 但距离实际应用还有很长的路要走。

由于中间过程的不同, 中微子携带走的能量也不同 (所以可以通过中微子的能

量知道具体在进行哪个核反应?) ,这就使得最后辐射的能量也有所差异。计算表明,当温度逐渐升高时,氢核聚变也逐渐由pp-1为主过渡到pp-3为主。

3.3 恒星结构的基本方程

1. 质量方程

2. 流体静力学平衡方程

3. 光度方程 (能量方程), 反映了光度随半径的变化率

4. 能流方程 (能量输运方程)

能量从恒星内部传送到外部, 主要有辐射 (透明度大时)、对流 (不透明度大时) 和热传导三种方式。恒星通常是由气体构成, 故热传导的作用并不重要。但严格的理论分析表明, 无论是哪种能量输运方式, 都必须保证恒星内部的温度分布不随时间改变。

5. 物态方程

$$P = F(T, \rho, X, Y, Z)$$

X, Y, Z 分别为氢, 氦, 重元素各自密度占恒星总密度的比例, $X+Y+Z=1$ 物态方程给出的压力与其他物理量之间的关系一般是相当复杂的。当恒星内部的密度达到一定界限时, 除了通常的气体压力 (离子、电子等粒子所产生) 和辐射压以外, 还会出现一种量子效应造成的压力, 即所谓的**简并压力**。我们知道, 像电子、质子和中子这样的粒子称为费米子, 它们的自旋量子数是 $1/2$ 的奇数倍。对于费米子而言, 有一个重要的量子力学原理即**泡利 (Pauli) 不相容原理**: 对一个由费米子组成的系统, 不能有两个或两个以上的粒子处在同一个量子态。

例如, 当一个自旋 $1/2$ 的电子处于动量为 p 的量级上时, 只能允许另一个自旋为 $-1/2$ 的电子处在这一能级上; 其余的电子就要被排斥。

这种费米子之间的排斥力就称为简并压力。

这可以理解为, 在简并气体里由于较低的能级很快被占满了, 故大多数粒子的能量远大于它们在普通气体里的能量。这一高的能量也相当于高的动量, 因此由粒子动量交换所产生的压力远超过通常气体的压力, 这就是简并压。

我们下面会看到, 对于热且密度低的恒星, 粒子是非简并的, 故压力主要是气体压力 (离子, 电子) 和辐射压。而对于冷且密度高的恒星, 费米子发生简并, 如白矮星是电子简并, 中子星是中子简并, 此时压力 = 气体压 + 辐射压 + 简并压, 并有可能主要是简并压。

我们还可以从下面的简单分析来理解简并压的产生。(原书P93)

简并是量子效应, 而量子效应的一个主要特征是: 粒子的波动性变得非常

显著，表征粒子波动性的一个重要参量是粒子的德布罗意波长。假设电子被限制在边长为 L 的容器内，它必然在容器内形成驻波，因而其最大德布罗意波长只能是 $2L$ ，如果容器减小，那么其德布罗意波长也要跟着减小(？只是最大德布罗意波长要减小，不一定真实的德布罗意波长就要减小？)。

后面对平均德布罗意波长进行估算。

原书P95，量子统计理论推导出非简并情况下，粒子服从麦克斯韦分布；简并情况下，粒子服从费米分布。

五个方程五个未知数，方程组是封闭的，可以由数值计算方法求解。

前面估计了太阳中心的压强，现在估计太阳中心温度 P99

3.4 积分定理（位力定理）

根据位力定理我们可以得到一个重要的结论，恒星是一个负热容系统。

恒星的能量由于辐射而失去一部分，但温度却上升了，即表现出负的比热。这是典型的负热容系统，是有引力介入时的热力学特征。

普通恒星一般由非相对论气体构成，减少的引力能一半变成了内能，一半变成了辐射能。

3.5 主序后的演化

恒星在主星序上停留的时间,取决于恒星中心区域的氢燃烧的时间。中心区域的氢燃烧完之后,恒星就会离开主星序。本质上,这一时间是由恒星的初始质量所决定的。我们已经知道,质量不同的恒星,进入主星序的位置是不同的。同时,不同质量的恒星,主序之后也将经历不同的演化进程。在赫罗图上看来,它们将经由不同的演化路径而到达不同的归宿。

3.5.1 小质量恒星的演化 ($M < 2.3M_{\odot}$)

3.5.2 中等质量恒星的演化 ($2.3M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$)

3.5.3 大质量恒星的演化 ($M > 8M_{\odot}$)

3.6 超新星