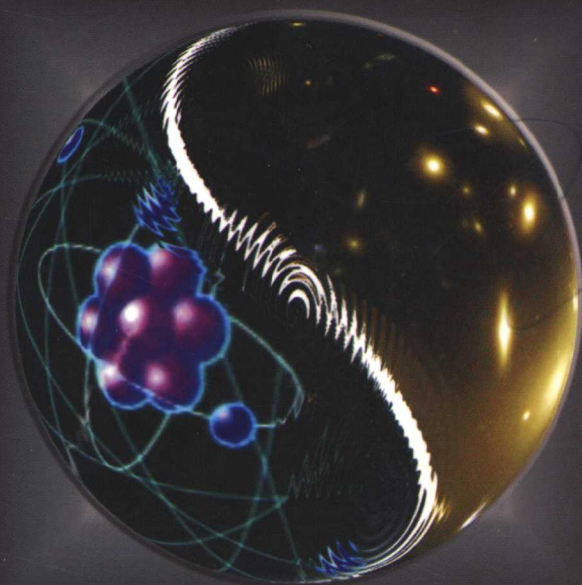


INTRODUCTION TO ASTROPHYSICS

天体物理导论

徐仁新 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

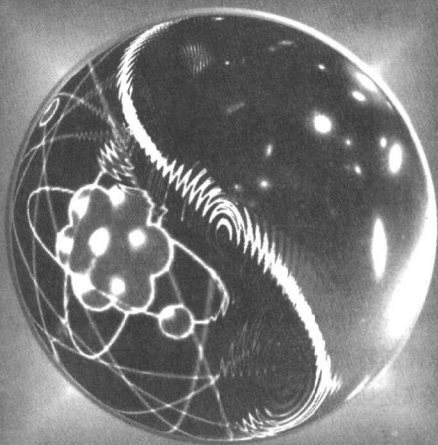
P14

4

INTRODUCTION TO
ASTROPHYSICS

天体物理导论

徐仁新◎编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

天体物理导论/徐仁新编著. —北京:北京大学出版社, 2006. 2
ISBN 7-301-09989-4

I. 天… I. 徐… III. 天体物理学-高等学校-教材 IV. P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 127281 号

书 名: 天体物理导论

著作责任者: 徐仁新 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-09989-4/O · 0673

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

排 版 者: 北京高新特打字服务社 82350640

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 32 开本 9.75 印张 250 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 17.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

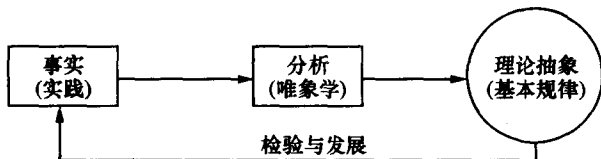
版权所有,翻版必究

前 言

学术界流行的不少术语,诸如类星体、黑洞、暗物质与暗能量、引力波、超新星、夸克星等等,都与“天体物理”分不开,这些名词已经或将要收入一般辞书之中。并且,天体物理领域内任何重大发现都自然地成为公众所关心的热门话题,激发他们求知的兴趣和无穷的梦想。那么,什么是天体物理学呢?研究天体物理的现实意义何在?

天体物理以“天体”为研究对象,其研究涉及宇宙的起源与演化、星系的形成与结构、恒星的结构与演化、行星系统的诞生与搜寻等。若干天体过程所表现的地面实验室无法与之相媲美的极端物理环境,为人们认识基本物理规律提供了绝佳的机会。越来越多的先进空间探测器以及电磁以外观测手段(宇宙线、中微子、引力波等)的实施,必将迎来 21 世纪天体物理学的黄金时代。

天体物理学可以看做物理学的一个分支,其研究方式类似于一般物理学所采用的手段。而物理学是研究宇宙间物质存在的基本组成形式以及它们之间基本相互作用规律的学问,其探索自然基本规律的过程,可以说总体上遵循以下程序:



举一个电磁学方面的例子来说明这个过程。人们以静磁、静电、电磁互感等**实验**为基础,通过对实验结果的**分析**而归纳出若干实验

定律(如 Coulomb 定律、Ampère 定律、Faraday 定律),最后由 Maxwell 总结抽象出电磁学的基本规律——Maxwell 方程组。当然,抽象的理论还将进一步在实践中应用、检验和发展。不过,在这样的意义上,天体物理学与一般物理学之间还是存在些区别的,这集中体现于获取实验事实的途径上。一般(狭义)物理学是以地面实验室物理过程为基础的;人们可以通过调节实验条件而获得不同的实验结果,因而这种研究方式是“主动式”的。然而天体物理学是以发生在遥远天体上的若干物理过程为依据的;这种研究只可能是“被动式”的。天体物理学之所以受到物理学家们的重视并且被视为对地面实验物理的重要补充,是因为天体可以具有实验物理学家在实验室内不能或很难创造的各种极端物理环境。例如脉冲星极冠区普遍具有约 10^{12} 高斯^①的磁场,这比目前实验室瞬间所能创造的最强磁场还要高 5 个数量级以上。

Newton 万有引力定律的发现可以看做天体物理研究中一个较早的成功典范,尽管当时还未流行“天体物理”这个名词。Tycho Brahe 测量行星的运动积累了大量而丰富的观测数据;Kepler 根据这些观测总结出行星运动的三大定律(轨道椭圆律,面积律,公转周期平方正比于轨道半长轴立方),是在做“唯象学”(phenomenology)研究;Newton 提出的万有引力^②(相距 r , 质量分别为 m_1, m_2 的物体间普遍存在着吸引力 $F \propto m_1 m_2 / r^2$)反映了引力现象的本质是服从于一种基本规律,它能够说明包括行星轨道公转在内的各种与引力有关的过程。难怪诗人 Pope 感叹道:“自然和自然规律为黑暗隐蔽:上帝说,让 Newton 来!一切即臻光明。”

不过在一定意义上,人们也认为天体物理学是天文学的一门

① 1 高斯(G) = 10^{-4} 特(T)。

② 关于 Kepler 定律和 Newton 万有引力定律之间逻辑上的互相推导,有兴趣的读者可以参阅张筑生编著《数学分析新讲》第七章, § 6(北京大学出版社,1990年)。

分支学科,或是天文学和物理学之间的交叉学科.按《中国大百科全书(天文卷)》的定义,天体物理学“是应用物理学的技术、方法和理论,研究天体的形态、结构、化学组成、物理状态和演化规律的学科。”

在作者看来,天体物理学具有两大职能.首先,它能够让我们了解人类所处的宇宙环境(人类自古就有这种天真的欲望),这对于破除迷信、建立正确的世界观是有帮助的.人是一种具有精神需求的动物.作为一个人,处在有幸成为感官功能齐全的生命活体的岁月里,而若不能够对这个“大千世界”的模样有个轮廓性的认识,实在值得遗憾.另一大职能体现在它的“物理”角色上,即检验、改善甚至发展物理学基本规律.许多极端的天体环境对于一般实验室物理学家而言是望尘莫及的,检验目前已知的“普遍”规律在天体条件下的正确性成了天体物理学家不可推卸的职责.当然,在极端条件下不能排除某些已有规律需要作部分甚至突破性的修正;完善和发现(新的)物理规律才是天体物理学的真正魅力.除了这两大方面的职能之外,以探测微弱天体信号为目的而发展起来的若干先进观测技术,也促进了现代科学技术的提高;它们的转化和应用推动着社会、国防以及军事等的现代化.因此,天体物理研究在国家长期战略中也占有重要地位.

这些职能奠定了天体物理课程在高等教育中的重要地位.事实上,天体物理课在发达国家高等教育中已经非常普遍,并且教学水平和质量也相当高;而我国的天体物理课状况与此相比,无论从“数量”还是“质量”上讲,都存在巨大差距.

对天体物理学的综合性介绍是天体物理知识普及的第一步,也是本书的目的.本教材不求完备,但求系统、实用;某些公式和结论的推导和引申可以方便地从其他中外教材中获得.书中将尽可能地展示天体物理学家所共同关注的课题.希望它的出版能够对于我国高校物理类师生天体物理方面的教学具有一定的积极意义.

天体物理学课程与物理学其他课程之间的关系如何呢?

物理学课程可以按所研究的物理现象来分类(如热力学与统计物理),也可以按照研究对象来分类(如固体物理),天体物理学是按后一种方式划分的学科.正如固体物理研究包括固体的热、力、电磁等各种物理现象一样,天体物理是根据天文观测来研究发生在天体上的各种基本物理规律的一门学问.由于天体环境的特殊性,在天体物理研究中几乎会涉及所有物理现象.换句话说,从事任一物理领域研究的学者,如果乐意,总可以捕捉到适合其自身特点的天体对象来做相关的天体物理学研究.我们完全可以想象,若干天体过程生动地展现了基本物理规律,因此这门课的学习对于学生深化所学物理概念也是非常有帮助的.

天体物理学是一门蓬勃发展的学科.作者试图比较全面地介绍一些基本天体物理过程,并且能够反映当今研究的进展状况.本书将以若干天体物理过程(而不采取通常做法,即按照天文对象)为线索来阐述天体物理学,这算是一个新的尝试.其效果如何,还得看未来的教学实践.在选材上本书免不了会倾向作者的研究兴趣,恐有以偏概全之处,好在国内已经出版了不少有关的优秀教材(见参考文献),读者可以从那里得到补偿.作者经历有限、学识肤浅;书中任何错误和不当之处,诚望读者不吝指正.本教材中承用了其他一些教材中的示图,在此衷心致谢,并恕未一一列出.限于对天体物理整体认识的水平所限,笔者在编写本教材过程中受益于高校众多老师、同行的指点.系主任陈建生院士一直关心着本系的基础教学和教材建设,并对本书初稿提出若干有益的修改意见.李惕碛、陆埏、张家铝、周又元院士,戴子高、高崇寿、李向东、李宗伟、卢炬甫、彭秋和、尚仁成、尤峻汉、张双南、赵凯华、朱宗宏等教授在教学和教材的规划、选题、编写等方面提出许多中肯的建议.教材中不少内容得益于在教学和科研的过程中与本系范祖辉、刘富坤、刘晓为、吴鑫基、吴学兵、吴月芳、张华伟等教授的讨论.在多年的教研过程中与乔国俊教授关于教学法和教学内容方面的频繁

交流,使作者受益匪浅.在此诚表感谢!

最后,想与读者交流一点学研的体会.自古以来,做学问都需要刻苦钻研的精神和坚韧不拔的毅力.这样才能在某一领域或方向上赶超前人.除了勤奋与辛劳,必胜的信心也是成功者必备的.古人云:

**破釜沉舟,百二秦关终属楚;
卧薪尝胆,三千越甲可吞吴.**

谨以此语与读者共勉!自近代以来,中国从经济到科学等各个层面与西方发达国家都存在一定差距.这些年中,经济建设进步很大,但在科学技术作为其中很大一部分的整体实力上与西方发达国家的距离仍是比较明显的.要使我国科学界的地位在国际舞台上明显改善,这种“破釜沉舟、卧薪尝胆”的精神应该是需要的.

北京大学物理学院
徐仁新
2006年1月

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 地球与太阳系	(1)
1.1.1 地球的参数	(1)
1.1.2 一道几何题: 几何法测距	(2)
1.1.3 太阳系内天体	(3)
1.2 恒星与银河系	(6)
1.2.1 HR 图	(6)
1.2.2 非几何法测距: 物理测距法	(7)
1.2.3 银河系	(8)
1.3 星系世界	(11)
1.3.1 星系距离	(11)
1.3.2 星系空间分布	(12)
1.3.3 星系的形态分类——Hubble 分类	(12)
1.3.4 正常星系与活动星系	(13)
1.3.5 星系旋转曲线, 暗物质的存在	(13)
1.4 天体物理中的重大疑难问题	(16)
1.5 天文观测设备与展望	(17)
第二章 辐射——认识宇宙的重要窗口	(19)
2.1 热辐射, 黑体谱与线谱	(20)
2.2 典型的非热辐射——荷电粒子作加速运动时 产生的辐射	(24)
2.3 回旋辐射, 同步辐射, 曲率辐射	(25)
2.3.1 回旋辐射(cyclotron radiation): $\beta \ll 1$	(25)

2.3.2	同步辐射(synchrotron radiation); $\gamma \gg 1$	(27)
2.3.3	强磁场中荷电粒子的 Landau 能级	(30)
2.3.4	曲率辐射(curvature radiation)	(34)
2.4	Compton 散射与逆 Compton 散射	(35)
2.4.1	Compton 散射, Eddington 光度	(36)
2.4.2	逆 Compton 散射	(38)
2.5	韧致辐射	(39)
2.6	Cherenkov 辐射	(40)
2.7	传能与传能方程简介	(42)

第三章 磁化等离子体——99%以上宇宙正常

	物质的状态	(47)
3.1	天体磁场的普遍性	(47)
3.2	等离子体中的电磁作用	(50)
3.2.1	Debye 长度	(50)
3.2.2	等离子体频率	(51)
3.3	磁流体力学	(53)
3.3.1	磁流体力学方程组	(53)
3.3.2	Lorentz 力	(54)
3.3.3	感应方程	(57)
3.4	天体磁场起源的发电机理论简介	(58)
3.5	宇宙线及其加速过程	(61)

第四章 主序恒星——绝大多数肉眼所见的

	点点繁星	(65)
4.1	恒星演化概貌	(65)
4.2	恒星的形成	(67)
4.2.1	引力不稳定性	(67)
4.2.2	恒星形成过程	(69)

4.3	球对称恒星的引力平衡与平衡态附近的振荡·····	(71)
4.3.1	恒星的流体静力学平衡·····	(71)
4.3.2	周光关系·····	(72)
4.3.3	状态方程·····	(75)
4.3.4	多方球与 Lane-Emden 方程·····	(75)
4.4	恒星内部的核燃烧过程·····	(78)
4.4.1	核燃烧的条件·····	(78)
4.4.2	反应率与产能率·····	(82)
4.4.3	比铁轻元素的核合成过程·····	(82)
4.4.4	比铁重元素的核合成过程·····	(86)
4.5	主序恒星的结构方程·····	(88)
4.6	旋转恒星的平衡位形: Maclaurin 椭球·····	(89)
4.7	双星系统中恒星质量的测定·····	(91)
第五章	超新星——主序星临终前“回光返照” ·····	(94)
5.1	超新星简介及其观测特性·····	(94)
5.2	超新星爆发机制: 不稳定核燃烧·····	(96)
5.2.1	简并物质核燃烧是不稳定的·····	(96)
5.2.2	燃烧过程·····	(98)
5.2.3	超新星宇宙学·····	(102)
5.3	超新星爆发机制: 引力塌缩·····	(104)
5.3.1	导致铁核塌缩的因素·····	(106)
5.3.2	铁核塌缩的中微子过程·····	(107)
5.3.3	反弹激波与瞬时爆·····	(109)
5.3.4	延迟爆·····	(110)
5.4	超新星遗迹·····	(112)
5.5	超新星 SN1987A·····	(113)
第六章	吸积——致密天体的有效产能方式 ·····	(116)
6.1	天体物理中的吸积过程·····	(117)

6.1.1	双星演化及其中的吸积过程	(117)
6.1.2	致密天体吸积能够高效地释放能量	(121)
6.1.3	吸积释放能量产生的光子一般在 X 射线或 γ 射线波段	(122)
6.2	球对称吸积——零角动量情形	(123)
6.2.1	静止介质的吸积	(123)
6.2.2	运动介质的吸积	(124)
6.3	轴对称吸积——非零角动量情形	(124)
6.3.1	一般分析	(126)
6.3.2	各类吸积盘模型简介	(128)
6.3.3	α 盘的稳定性	(130)
6.4	磁化中子星的盘吸积与柱吸积	(130)
第七章 白矮星——恒星演化残骸之一		(136)
7.1	Fermi 子星的研究历史	(137)
7.2	白矮星物质的状态方程	(141)
7.2.1	非相对论(NR)极限情形	(142)
7.2.2	极端相对论(ER)极限情形	(143)
7.2.3	一般情形	(143)
7.2.4	BPS 状态方程	(145)
7.3	Fermi 子星的极限质量 ——Chandrasekhar 质量	(146)
7.3.1	半定量考虑	(146)
7.3.2	白矮星结构模型与 Chandrasekhar 极限质量	(148)
7.4	白矮星的结构与冷却	(150)
7.4.1	大气模型	(150)
7.4.2	冷却模型	(151)
7.5	行星状星云与白矮星的形成	(154)

第八章	脉冲星、中子星与夸克星——恒星	
	演化过程之二	(157)
8.1	脉冲星类致密星及其形成、冷却	(159)
8.1.1	各类脉冲星类致密星	(159)
8.1.2	中子星的形成与冷却	(161)
8.2	中子星与奇异星模型	(164)
8.2.1	质量-半径关系	(164)
8.2.2	中子星的结构	(167)
8.2.3	强磁场中的物质与中子星表层	(171)
8.2.4	奇异星的结构	(173)
8.3	转动供能脉冲星(rotation-powered pulsars) ...	(177)
8.3.1	磁偶极辐射与相关观测量(μ_{\perp} 主导)	(178)
8.3.2	单极感应	(179)
8.3.3	旋转磁偶极导电球产生电四极场(μ_{\parallel} 主导)	(180)
8.3.4	脉冲星辐射轮廓与唯象模型	(184)
8.3.5	脉冲星辐射模型	(186)
8.3.6	脉冲星制动指数问题	(187)
第九章	黑洞——广义相对论预言的天体	(190)
9.1	相对论简介	(191)
9.1.1	平直时空——狭义相对论	(191)
9.1.2	弯曲时空——广义相对论	(194)
9.1.3	物质分布决定时空结构——Einstein 场方程 ...	(196)
9.2	Schwarzschild 黑洞	(196)
9.2.1	Schwarzschild 解	(197)
9.2.2	Schwarzschild 时空结构	(198)
9.2.3	Schwarzschild 时空的主要特性: $r_{\text{ms}}, z, \Delta\alpha$	(201)
9.3	其他类型的黑洞, 黑洞转动能的提取	(203)
9.4	黑洞的量子效应	(205)

9.5	黑洞的观测证认	(207)
第十章	宇宙γ射线爆发源——仅次于	
	“大爆炸”的现象	(211)
10.1	历史和基本观测事实	(211)
10.2	相对论火球模型	(215)
10.3	能源机制	(218)
10.4	研究展望	(219)
第十一章	星系——组成宇宙的基本单元	(221)
11.1	星系的宇宙学红移	(221)
11.2	引力透镜现象	(222)
11.3	活动星系与活动星系核	(225)
11.4	AGN 的超大质量黑洞吸积图像	(227)
11.5	星系中心的黑洞	(230)
第十二章	宇宙——可观测的一切	(233)
12.1	宇宙学的基本观测事实	(234)
12.1.1	大尺度上的均匀性	(234)
12.1.2	Hubble 膨胀	(234)
12.1.3	轻元素的丰度	(235)
12.1.4	微波背景辐射	(235)
12.2	宇宙学原理与 RW (Robertson- Walker) 度规	(236)
12.3	宇宙膨胀动力学	(239)
12.4	宇宙的热力学演化	(241)
12.4.1	真空自发破缺相变	(241)
12.4.2	暴胀及其后果	(245)
12.4.3	脱耦与背景辐射	(247)
12.4.4	早期核合成	(249)

12.5 暗物质与暗能量	(252)
12.5.1 宇宙学常数	(252)
12.5.2 暗物质与暗能量	(253)
附录一 Landau: “论恒星的理论”	(260)
附录二 粒子物理标准模型简介	(266)
附录三 粒子天体物理简介	(276)
附录四 地外文明与太阳系外行星系统	(279)
附录五 数、单位制与常数	(282)
正文索引	(286)
参考文献	(293)

第一章 概 论

1.1 地球与太阳系

1.1.1 地球的参数

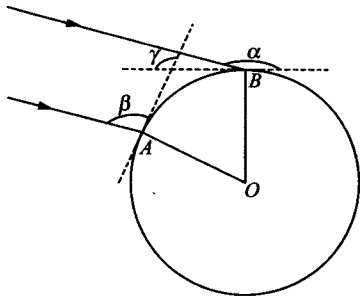
我们脚下的这颗星球称为地球(图 1.1), 它几乎是球形的, 基本参数约为: 半径 $R=6.4 \times 10^3$ km, 质量 $M=6 \times 10^{24}$ kg, 自转周期 $P=24$ h. 这些数据是如何得到的呢? 一种可能的方法如下.



图 1.1 从月球“地平线”上升起的地球

几何法定地球半径 R

如图 1.2, 在地球上选两点 A, B , 量出间距 \widehat{AB} . 选 A, B 及地心 O 所在平面内的一颗遥远的恒星, 并分别于 A, B 点测量这颗星与地平面之间的夹角 α 和 β . 利用几何关系(如图 1.2) $\widehat{AB}/R = \alpha - \beta$, 我们就能得到地球的半径了(提示: $\gamma = \beta + (\pi - \alpha)$).

图 1.2 地球半径 R 的计算

利用万有引力定地球质量 M Newton 的万有引力定律认为,相距 r 、质量为 m_1, m_2 的两质点间存在吸引力 $F = Gm_1m_2/r^2$, 其中 G 为引力常数. 地表测得的引力加速度应为 $g = GM/R^2$; 若已经测得了地球半径 R , 据 g 就能够得到 M 了. 此外, 也可以由人造卫星的公转周期 T 与高度 h 推算地球质量

$$M = \frac{4\pi^2}{G} \frac{(R+h)^3}{T^2}.$$

选好参照物定地球自转

由遥远某一颗恒星两次通过天顶的时间间隔可以定出地球的自转周期 P . 不过, 问题是: 太阳两次通过天顶的时间间隔与 P 一样吗? 若不一样, 与 P 差多少? (请读者思考)

1.1.2 一道几何题: 几何法测距

如图 1.3, 为了测量河对岸建筑物的距离, 可采用三角视差法. 此法的特点之一是: 在一定测量精度下, 测量距离越远所需要的基线长度越长. 这种测距方法在天文学上有重要应用. 若用地球直径为基线, 可测得地月间距为 3.8×10^5 km; 进而得到月球的质量 $\approx 1.4 \times 10^{22}$ kg、半径 $\approx 1.7 \times 10^3$ km. 人们目前所能采用的最长基线为地球的公转直径, 为 2 AU. AU 是英文中天文单位 (astronomical unit) 的缩写, 为地球与太阳间的平均距离, 1 AU 约 1.5×10^8 km. 天文学中一个重要的距离单位是秒差距 (pc), 它是图 1.3 中 $\overline{AB} = 2 \text{ AU}$, $\alpha = 1''$ ($1^\circ = 60'$, $1' = 60''$) 时所对应的距离. 另一个常用距离单位是光年 (l. y.), 是光在真空中一年所行走的