



天  
体  
物



普通高等教育“十五”国家级规划教材

INTRODUCTION TO  
ASTROPHYSICS

INTRODUCTION TO

## 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 978-7-301-09989-6

I. 天… II. 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 978-7-301-09989-6/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://www.pup.cn> 电子邮箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

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

出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 32 开本 9.875 印张 250 千字

2006 年 2 月第 1 版 2007 年 8 月第 2 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,侵权必究

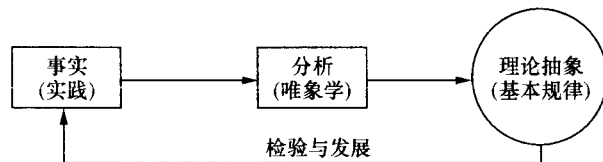
举报电话:010-62752024 电子邮箱:[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

## 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想象。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

八十年代以来天体物理学的飞速发展，使《天体物理导论》

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。李惕碚、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

<b>第一章 概论</b> .....	(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)
<b>第二章 辐射——认识宇宙的重要窗口</b> .....	(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)	4.3	球对称恒星的引力平衡与平衡态附近的振荡.....	(71)
2.3.3	强磁场中荷电粒子的 Landau 能级 .....	(30)	4.3.1	恒星的流体静力学平衡 .....	(71)
2.3.4	曲率辐射(curvature radiation) .....	(34)	4.3.2	周光关系.....	(72)
2.4	Compton 散射与逆 Compton 散射 .....	(35)	4.3.3	状态方程.....	(75)
2.4.1	Compton 散射, Eddington 光度 .....	(36)	4.3.4	多方球与 Lane-Emden 方程 .....	(76)
2.4.2	逆 Compton 散射 .....	(38)	4.4	恒星内部的核燃烧过程.....	(79)
2.5	韧致辐射.....	(39)	4.4.1	核燃烧的条件 .....	(79)
2.6	Cherenkov 辐射 .....	(40)	4.4.2	反应率与产能率 .....	(82)
2.7	传能与传能方程简介.....	(42)	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)
<b>第三章</b>	<b>磁化等离子体——99%以上宇宙正常</b>		4.5	主序恒星的结构方程.....	(88)
	<b>物质的状态 .....</b>	(47)	4.6	旋转恒星的平衡位形: Maclaurin 椭球 .....	(89)
3.1	天体磁场的普遍性.....	(47)	4.7	双星系统中恒星质量的测定.....	(91)
3.2	等离子体中的电磁作用.....	(50)	<b>第五章</b>	<b>超新星——主序星临终前“回光返照” ..</b>	(94)
3.2.1	Debye 长度 .....	(50)	5.1	超新星简介及其观测特性.....	(94)
3.2.2	等离子体频率 .....	(51)	5.2	超新星爆发机制: 不稳定核燃烧 .....	(96)
3.3	磁流体力学.....	(53)	5.2.1	简并物质核燃烧是不稳定的 .....	(96)
3.3.1	磁流体力学方程组 .....	(53)	5.2.2	燃烧过程.....	(98)
3.3.2	Lorentz 力 .....	(54)	5.2.3	超新星宇宙学 .....	(102)
3.3.3	感应方程.....	(57)	5.3	超新星爆发机制: 引力塌缩 .....	(104)
3.4	天体磁场起源的发电机理论简介.....	(58)	5.3.1	导致铁核塌缩的因素 .....	(106)
3.5	宇宙线及其加速过程.....	(61)	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)
<b>第四章</b>	<b>主序恒星——绝大多数肉眼所见的</b>		5.4	超新星遗迹 .....	(112)
	<b>点点繁星.....</b>	(65)	5.5	超新星 SN1987A .....	(113)
4.1	恒星演化概貌.....	(65)	<b>第六章</b>	<b>吸积——致密天体的有效产能方式 .....</b>	(116)
4.2	恒星的形成.....	(67)	6.1	天体物理中的吸积过程 .....	(117)
4.2.1	引力不稳定性 .....	(67)			
4.2.2	恒星形成过程 .....	(69)			

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	(122)
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	(131)
<b>第七章 白矮星——恒星演化残骸之一</b> (137)		
7.1	Fermi 子星的研究历史	(138)
7.2	白矮星物质的状态方程	(142)
7.2.1	非相对论(NR)极限情形	(143)
7.2.2	极端相对论(ER)极限情形	(144)
7.2.3	一般情形	(145)
7.2.4	BPS 状态方程	(146)
7.3	Fermi 子星的极限质量 ——Chandrasekhar 质量	(147)
7.3.1	半定量考虑	(147)
7.3.2	白矮星结构模型与 Chandrasekhar 极限质量	(149)
7.4	白矮星的结构与冷却	(151)
7.4.1	大气模型	(151)
7.4.2	冷却模型	(153)
7.5	行星状星云与白矮星的形成	(155)

## 第八章 脉冲星、中子星与夸克星——恒星

<b>演化残骸之二</b>		(158)
8.1	脉冲星类致密星及其形成、冷却	(160)
8.1.1	各类脉冲星类致密星	(160)
8.1.2	中子星的形成与冷却	(162)
8.2	中子星与奇异星模型	(165)
8.2.1	质量-半径关系	(165)
8.2.2	中子星的结构	(168)
8.2.3	强磁场中的物质与中子星表层	(172)
8.2.4	奇异星的结构	(174)
8.3	转动供能脉冲星(rotation-powered pulsars)	(178)
8.3.1	磁偶极辐射与相关观测量( $\mu_{\perp}$ 主导)	(179)
8.3.2	单极感应	(180)
8.3.3	旋转磁偶极导电球产生电四极场( $\mu_{\parallel}$ 主导)	(181)
8.3.4	脉冲星辐射轮廓与唯象模型	(185)
8.3.5	脉冲星辐射模型	(187)
8.3.6	脉冲星制动指数问题	(188)

## 第九章 黑洞——广义相对论预言的天体

9.1	相对论简介	(192)
9.1.1	平直时空——狭义相对论	(192)
9.1.2	弯曲时空——广义相对论	(195)
9.1.3	物质分布决定时空结构——Einstein 场方程	(197)
9.2	Schwarzschild 黑洞	(198)
9.2.1	Schwarzschild 解	(199)
9.2.2	Schwarzschild 时空结构	(200)
9.2.3	Schwarzschild 时空的主要特性: $r_{\text{ms}}, z, \Delta\alpha$	(203)
9.3	其他类型的黑洞, 黑洞转动能的提取	(205)
9.4	黑洞的量子效应	(207)

9.5	黑洞的观测证认 .....	(210)
<b>第十章</b>	<b>宇宙<math>\gamma</math>射线爆发源——仅次于“大爆炸”的现象</b> .....	(213)
10.1	历史和基本观测事实 .....	(213)
10.2	相对论火球模型 .....	(217)
10.3	能源机制 .....	(220)
10.4	研究展望 .....	(221)
<b>第十一章</b>	<b>星系——组成宇宙的基本单元</b> .....	(223)
11.1	星系的宇宙学红移 .....	(223)
11.2	引力透镜现象 .....	(224)
11.3	活动星系与活动星系核 .....	(227)
11.4	AGN 的超大质量黑洞吸积图像 .....	(229)
11.5	星系中心的黑洞 .....	(232)
<b>第十二章</b>	<b>宇宙——可观测的一切</b> .....	(235)
12.1	宇宙学的基本观测事实 .....	(236)
12.1.1	大尺度上的均匀性 .....	(236)
12.1.2	Hubble 膨胀 .....	(236)
12.1.3	轻元素的丰度 .....	(237)
12.1.4	微波背景辐射 .....	(237)
12.2	宇宙学原理与 RW(Robertson-Walker)度规 .....	(238)
12.3	宇宙膨胀动力学 .....	(241)
12.4	宇宙的热力学演化 .....	(243)
12.4.1	真空自发破缺相变 .....	(243)
12.4.2	暴胀及其后果 .....	(247)
12.4.3	脱耦与背景辐射 .....	(249)
12.4.4	早期核合成 .....	(251)

12.5	暗物质与暗能量 .....	(254)
12.5.1	宇宙学常数 .....	(254)
12.5.2	暗物质与暗能量 .....	(255)
<b>附录一</b>	<b>Landau: “论恒星的理论”</b> .....	(262)
<b>附录二</b>	<b>粒子物理标准模型简介</b> .....	(269)
<b>附录三</b>	<b>粒子天体物理简介</b> .....	(279)
<b>附录四</b>	<b>地外文明与太阳系外行星系统</b> .....	(282)
<b>附录五</b>	<b>数、单位制与常数</b> .....	(285)
	<b>正文索引</b> .....	(289)
	<b>参考文献</b> .....	(296)