



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 35

现代天体物理 (下)

陆 焱 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 35

现代天体物理 (下)

陆 埏 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代天体物理. 下/陆埏主编. —北京: 北京大学出版社, 2014. 12
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25130-0

I. ①现… II. ①陆… III. ①天体物理学 IV. ①P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 273070 号

书 名: 现代天体物理(下)

著作责任者: 陆 埏 主编

责任编辑: 潘丽娜

标准书号: ISBN 978-7-301-25130-0/O · 1038

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> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 26.25 印张 500 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 130.00 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 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系” 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学经典的著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

天体物理与诺贝尔奖(代序)

天体物理学是天文学的一个分支.事实上,天文学和物理学是两个密切相关的学科.万有引力定律是物理学中的一个基本定律,但这个定律正是牛顿通过研究开普勒(Kepler J.)对太阳系行星轨道运动的天文观测所总结出来的三定律而发现的.其实,可以说整个经典力学的发展也与行星绕太阳运动和月球绕地球运动的天文观测密不可分.由此发展出来的“天体力学”已经成为经典力学中最成熟、最系统的一个样板.400年前伽利略首次利用望远镜观测天体,使天文学牢牢地建立在科学观测的基础上,成长为一门日益精确的科学.20世纪物理学中蓬勃发展起来的光谱学与望远镜结合进行天文观测,使深入研究天体的物质组分、内部结构与演化成为可能,从而在天文学科内形成了内容十分丰富、发展非常迅速的分支学科——天体物理.

从观测手段来说,人们不仅利用光学波段,而且从长波方向早已扩展到了红外乃至射电,从短波方向也扩展到了紫外、X射线乃至 γ 射线,形成了电磁波多波段甚至全波段的天文观测研究.不仅如此,人们还将观测手段从电磁波向其他领域扩展,打开了宇宙线(主要是带电粒子)、中微子等新的观测窗口,而且还在探索引力波等理论上已经预言而观测上尚未发现的可能手段.

从研究的天文对象来说,人们不仅研究了行星、恒星以及星系,而且还扩展到了整个宇宙.人们不仅研究了今天发生的天体物理过程,而且还追溯到了宇宙刚诞生不久的极早时期.

人类对宇宙的思索几乎可以说与人类的认识史一样古老.然而,宇宙毕竟是太复杂了,在人类的脑海中,宇宙学几千年来一直停留在哲学、思辨的抽象概念上.只是到20世纪初,爱因斯坦提出了广义相对论,宇宙学才得以真正成为一门科学.也正是在这个时候,物理学掀起了相对论、量子论和统计物理三大革命,把人类认识从宏观世界向小的方面发展到了微观世界,同时也向大的方面发展到了宇观世界.微观世界通常以普朗克(Planck M.)常数 h 为特征,而宇观世界通常以万有引力起主导作用(天体)或者以哈勃参数 H 为特征(宇宙)的两种不完全等价的表述来说明.今天,宇宙学已经不再只是一个抽象概念,而且已经成为

理解物理宇宙的一个总框架。

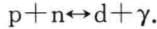
1917年,爱因斯坦在广义相对论基础上首次提出了一个具有现代科学意义的宇宙学模型。这里,他做了一个简化的假设,设想宇宙中物质分布是均匀各向同性的。有趣的是,爱因斯坦提出这个假设的时候,在天文观测上河外星系是否存在还没有定论,而银河系内的恒星分布却远非均匀各向同性。可是,此后不久,天文界便发生了一场关于观测到的星云状天体究竟是河内星云还是河外星系的的大辩论。1924年,哈勃(Hubble E. P.)又在仙女座大星云和三角座星云中观测到了造父变星,由此测定了它们的距离均在银河系以外,因而确认它们不是银河系内的星云,而是银河系外的星系。从而使天文学走出银河系,打开了极为丰富的星系世界。所谓星系是由几十亿至几千亿颗恒星与星际气体、尘埃物质组成的恒星系统。银河系也是一个星系,只是专指我们人类所在的那个星系。有意思的是,星系的分布是比较均匀的。虽然若干个星系乃至成百上千个星系可以构成一个星系群或星系团,但越是大的星系团,其分布越显得均匀。可见,观测上完全支持爱因斯坦的假设,这个事实已被称为宇宙学原理,它使宇宙学变得非常简单。宇宙几乎可以看做以星系或星系团作为“分子”的“均匀气体”。

当时,人们认为宇宙应当是永恒的、静态的。但是,爱因斯坦却发现他的广义相对论场方程中不存在静态宇宙解。因为广义相对论场方程实际是引力场方程,只存在引力,不存在斥力,自然就不会有静态解。爱因斯坦为了得到静态宇宙解,就人为地在他的场方程中增加了一个宇宙常数 Λ 项。因为 Λ 是个常数,增加这一项不会影响广义相对性原理。但是,这一项却起着斥力的作用,因而可以有静态解。1922年,弗里德曼(Friedmann A.)指出爱因斯坦静态解是不稳定的,并求出了不带 Λ 项的爱因斯坦场方程的动态解(膨胀或收缩)。1929年,哈勃发现,越远的星系其光谱的波长越长,这种光谱红移(波长变长)现象表明宇宙不是静态的,宇宙在膨胀。这是天文学上最重要的发现。这个发现使爱因斯坦把他添加宇宙常数 Λ 项的做法看做是他一生中最大的错误。本来,他的原广义相对论场方程不存在静态宇宙解,正好是他对膨胀宇宙的自然预言。他却添加了 Λ 项,白白丢掉了本该属于他的这个重大预言,还对他的那个“原本简洁美妙”的场方程画蛇添足。

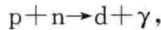
哈勃发现的宇宙膨胀告诉我们,回顾过去,宇宙必然曾经处在高温高密状态。可以把高温高密的极限情形(温度、密度均趋向无穷大)看做是宇宙诞生的状态。随着宇宙的膨胀,密度下降,温度也下降,宇宙将经历各种各样的状态。1946—1948年,伽莫夫(Gamow G.)等人就是根据这个思路,从宇宙的高温高密状态,根据宇宙膨胀,分析计算了宇宙各个时期的演化,特别是计算了宇宙早期的元素起源,并粗略估算出宇宙今天的背景温度约为5K(与现在的实测值2.725K基本一致)。伽莫夫的这个宇宙学说是非常明确的,可以实际定量计算

的,被称为大爆炸宇宙学,已得到了广泛的观测支持,成为了宇宙学的标准模型. 按此模型,可以给出宇宙各个时期的物理状态和演化过程,提供了各种可能的观测检验方案.

我们先来看看温度为 10^9 K 附近的宇宙,那时宇宙刚诞生约 3 分钟. 10^9 K 这样的高温,人类并不陌生,氢弹爆炸就发生在这种温度甚至更高温度下. 熟悉核物理的伽莫夫曾首先研究了这个问题. 那时宇宙中存在着质子(p)和中子(n),可以直接碰撞而生成氘核(记做 d,即 ^2H)并放出光子(γ). 10^9 K 温度的平均光子能量约为 100keV,远不足以使氘核分裂(氘核的结合能约为 2.2MeV,需要 2.2×10^{10} K 以上高温的平均光子能量才能使氘核分裂). 但是,在宇宙中光子数远高于质子、中子数(高出 $10^9 \sim 10^{10}$ 倍), 10^9 K 以上,背景光子中高能部分的光子已经为数足够多,已足以使氘核分裂为质子和中子,因此那时氘核的合成和分解过程是双向进行的:



当温度降到 10^9 K 以下时,高能背景光子已不足以使氘核分裂成质子和中子,过程开始单向进行:



氘核开始积累并进一步生成 ^4He . 从氘核积累到 ^4He 生成是一系列强作用过程,进行得非常迅速,几乎是瞬间进行的. 设 p_9 和 n_9 分别表示宇宙中 10^9 K 时的质子和中子数密度,我们就可以求出此时生成的按质量计的宇宙 ^4He 丰度(即 ^4He 的总质量与宇宙总质量之比). 因为基本上那时存在的全部中子在瞬间俘获了等量的质子数而转变成了 ^4He ,因此生成 ^4He 的总质量基本上就等于原有中子质量的 2 倍,而宇宙总质量就等于所有质子和中子质量的总和. 就是说, ^4He 丰度

$$Y = 2n_9 / (p_9 + n_9) = 2 / (p_9/n_9 + 1).$$

可见 ^4He 丰度完全决定于 10^9 K 时宇宙质子中子比(p_9/n_9). 可是, 10^9 K 时的质子中子比我们并不直接知道. 然而在 10^{10} K 以上时,中微子参与作用,它可将质子变中子,中子变质子,使两者之间处于热平衡. 热平衡状态下可以用玻尔兹曼(Boltzmann L.)分布来计算质子与中子数之比. 在 10^{10} K 以下,中微子不再参与作用,质子与中子数之比便不再变化. 然而,孤立存在的中子,可以不需要中微子的碰撞而自身进行 β 衰变而变成质子. 因此,我们只要在 10^{10} K 到 10^9 K 这段时间内做出 β 衰变修正,就可以从(p_{10}/n_{10})估算出(p_9/n_9),此值约为 7,从而获得宇宙的 ^4He 丰度约为

$$Y \approx 2 / (7 + 1) = 25\%,$$

而相应的氢(^1H)丰度约为 75%. 可见,在宇宙温度降到 10^9 K 以下时,宇宙物质主要就是 ^1H 和 ^4He 两种,按质量计, ^1H (质子)约占 75%, ^4He 约占 25%,其他元素微乎其微,如 ^2H 和 ^3He 含量在万分之一以下, ^7Li 甚至在十亿分之一以下. 宇

宙演化头几分钟以 ^2H , ^3He , ^4He , ^7Li 等原初轻核合成为特征的时代被称为原初核合成时代. 因为这些同位素都不是放射性的, 它们会一直保留到今天, 其数量就成为宇宙原初核合成时代留下的遗迹(考古文物). 当然, 今天在观测它们数量的时候, 还要特别小心作污染修正, 所谓“污染”是指在恒星形成后, 恒星内部核过程也会影响 ^2H , ^3He , ^4He , ^7Li 这几种核素的数量, 它们不仅可能增加数量, 也可能减少数量, 比如 ^2H 在恒星过程中也会因为合成 ^4He 而减少 ^2H .

自然界不存在原子量为 5 和 8 的元素, 再加之随着宇宙膨胀, 降温很快, 宇宙温度降到远低于 10^9K 时, 已经不再可能有进一步的元素生成. 作出污染修正后, ^1H 约占 75% 和 ^4He 约占 25% 的事实, 几乎将一直保持到今天, 并获得了今天观测强有力的支持, 成为宇宙最初 3 分钟所留下遗迹的铁证.

从物理学的角度看, 宇宙早期的物理状态远比现在简单, 是真正的“粒子气体”. 宇宙头 3 分钟时是真正的质子中子气体, 进行物理分析是最简单、也最可靠的. 从物理分析的结果与今天的观测事实之间高度相符也是对大爆炸宇宙学的一个确凿证据.

单个中子是放射性的, 它会衰变成质子(同时放出电子和反中微子), 它的寿命只有一刻钟. 正是在远短于一刻钟的宇宙头 3 分钟时, 尚有足够多的中子可以及时钻入 ^4He 内, 才为宇宙保存了大量中子, 因为 ^4He 核内的中子是稳定的、非放射性的. 人们也许会问, 大量中子怎么会在头 3 分钟内生成那么多 ^4He ? 做事不在于时间长短, 而在于效率高. 物理上所谓做事, 基础在于粒子碰撞, 宇宙早期高温高密状态, 正是碰撞极频繁的高效时期, 可以生成大量 ^4He 是不足为奇的.

当宇宙年龄远大于一刻钟以后, 未钻入 ^4He 的中子已经完全衰变掉了, 宇宙中将基本上只有带正电的质子和 ^4He 核两种物质(当然还有电子、光子、中微子这些小质量粒子). 宇宙温度又在不断下降. 这个时段是不会再生成任何元素的, 直到几亿年后, 恒星形成, 才会在恒星内部重新提供新的高温条件, 开始新的元素合成过程.

宇宙年龄从几分钟到几亿年, 宇宙物质基本上只维持在 ^1H 和 ^4He 两种以及极微量的 ^2He , ^3He , ^7Li , 期间只有一种重大变化, 那是发生在宇宙温度约 3000K 的复合时代的事, 即 ^1H , ^4He 从带电的原子核变到中性原子的过程. 高于约 3000K 时, ^1H , ^4He 处在原子核状态, 它们与电子组成等离子体, 与背景光子通过电磁作用频繁地碰撞而处于热平衡状态. 当降到约 3000K 以下时, ^1H , ^4He 俘获电子而变成中性原子, 从此背景光子便与它们脱离耦合, 不再作用, 宇宙变成透明的, 光子就在其中完全自由地运动, 不受任何变化. 3000K 时, 宇宙年龄约为 38 万岁, 称为复合时代. 那时, 光子从与 3000K 等离子体耦合成的热平衡状态中脱耦出来, 直到今天一直保持着当时的黑体辐射状态, 唯一的变化是随着宇宙膨

胀而光子波长被拉长到相当于今天 2.725K 的黑体谱. 因此, 当时 3000K 黑体谱的辐射, 今天变成了 2.725K 的黑体谱, 成了宇宙微波背景辐射. 这种背景辐射呈现出一种噪声的作用.

1965 年, Penzias A. A. 和 Wilson R. W. 观测发现宇宙微波背景辐射是高度各向同性的, 支持了爱因斯坦对宇宙物质分布高度均匀的假设, 支持了宇宙学原理. 后来, Mather J. C. (1990) 和 Smoot G. F. (1992) 通过 COBE 卫星观测发现, 微波背景辐射有十万分之一的非各向同性. 这一发现一方面证明微波背景辐射确实高度各向同性, 另一方面也测定了它有极微小的各向异性. 而这个各向异性正是今天所观测到的天体分布、宇宙结构的起源和种子. 关于宇宙微波背景辐射的观测研究已前后两次(1978, 2006) 获得了诺贝尔物理学奖.

随后, 宇宙继续膨胀, 温度继续降低, 在漫长的岁月中, 既没有元素合成, 也没有天体形成, 这里只有近似均匀的中性原子气体维持着宇宙的黑暗时代. 但是, 今天观测到的宇宙微波背景辐射微小的各向异性所暗示的当年中性原子气体中微小的非均匀性, 却正在悄悄地成长着. 比如某处气体密度稍稍高一些, 其内物质之间的距离会略略小一些, 万有引力会微微大一些, 它们会进一步收缩, 密度也进一步增长, 这种正反馈式的不稳定性会逐渐加快, 局部温度也会逐渐升高, 直到几亿年后, 开始形成第一代恒星以及其他天体. 宇宙就变得生机勃勃起来.

恒星形成后, 其内部的高温就开始了活跃的原子核过程. 这种过程不仅合成了许多元素, 而且也提供了巨大的能源. 作为恒星核过程的物质基础主要就是宇宙原初核合成时代留下的 75% 的质子和已经形成的 25% 的 ^4He 核. 贝特(Bethe H.) 指出, 恒星(主序星)核过程开始仍然是 ^4He 的合成过程. 这种过程可以通过两种途径实现: 一种是 pp 链; 另一种是 CNO 循环. 由于不存在自由中子, 这两种途径, 都必须经过一个弱作用过程. 因此, 弱作用过程成为恒星核合成的瓶颈, 保证了过程进行得足够慢, 保证了能量的缓慢释放, 保证了恒星(主序星)能长时期稳定存在. 对于 pp 链, $p+p \rightarrow d+e^+ + \nu_e$ 就是一个弱作用瓶颈. 恒星内部的核过程, 还可以合成 ^4He 以上直到铁元素. 当恒星内部有足够数量的 C, N, O 后, 通过 CNO 循环还可以继续合成 ^4He . pp 链和 CNO 循环均等效于 4 个质子合成 1 个 ^4He . 为此恒星能源的研究, 贝特获得了 1967 年度的诺贝尔物理学奖.

铁以上的元素就得在恒星晚期超新星爆发过程中合成. 总之, 几乎所有元素均能在恒星过程中产生. 1957 年, Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A. 和 Hoyle F. (B^2FH) 详细阐述了这个问题. 其中, Fowler 为此获得了 1983 年度的诺贝尔物理学奖. 但是恒星产生的 ^4He 却远少于实际测得的量, 宇宙中现存的 ^4He 极大部分均来源于宇宙的头几分钟. 因此, 宇宙元素起源可以通过宇宙早期有中子参加的强作用过程(快速)和后期无中子参加的由弱作用控制的恒星元

素合成过程(缓慢)得到了相当满意的解释。

恒星晚期的超新星爆发不仅提供了铁以上元素的生成,还可以产生大量的中微子和引力波,最后还可形成致密星(白矮星、中子星或黑洞)。无论从天文的角度,或者从物理的角度,内容均十分丰富。不仅研究中子星,人们还扩展而研究夸克星。夸克星是 u, d, s 三种夸克几乎等量存在的星体,具有很大的奇异量子数,因此也称为奇异星。显然,这既是天文又是物理的前沿问题。

爱因斯坦虽然对 Λ 项的添加表示了后悔,但一言既出,驷马难追,人们依然频频想着它。在天文学的发展史上,这个 Λ 项曾三起三落,它一直活在人们的心中。宇宙年龄出问题了,想到它;哈勃常数出问题了,想到它;类星体出问题了,想到它。特别是 1998 年 Riess A. G., Schmidt B. P. 等人的高红移超新星研究组和 1999 年 Perlmutter S. 等人的超新星宇宙学研究组,分别用 Ia 型超新星经过诸多校正后作为“标准烛光光源”进行观测,他们都发现那些远的 Ia 型超新星的亮度比预期得更暗(即更远)。从而,他们发现了宇宙不是在减速膨胀,而是在加速膨胀,只有通过加速膨胀,才能达到“更远”、“更暗”。这是一件轰动整个天文界和物理界的大事。万有引力是人们熟知的事实,万有引力将星系与星系之间拉住,对于宇宙膨胀起着阻力的作用,因此,在万有引力作用下的宇宙,其膨胀只能是减速的。然而,观测到的却是加速膨胀。实际上,Riess, Schmidt 和 Perlmutter 等人就是用包含爱因斯坦 Λ 项的场方程来处理他们的观测数据,他们明确得出了 $\Lambda \neq 0$ 的结果。正是这个具有斥力性质的 Λ 项,推动了宇宙作加速膨胀。

究竟怎样来理解宇宙的加速膨胀呢?按照不带 Λ 项的广义相对论场方程,宇宙膨胀的加速度 \ddot{R} 可以表述为

$$\ddot{R} = -\frac{4}{3}\pi G\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right)R,$$

这里, G 是引力常数, R 是宇宙的尺度(距离), ρ 是宇宙物质密度, p 是宇宙物质的压强,所有这些量都是正的,而右式前面有一个负号,表明宇宙膨胀的加速度 \ddot{R} 是负的,即减速膨胀。但是,观测到的宇宙是加速膨胀,不是减速膨胀。如果没有 Λ 项,除非宇宙物质的压强 p 是负的,而且负得很大,使整个括号内变为负,那么负负得正,可以得到加速膨胀。负压强的物质究竟是什么?没有人知道。比如,考虑一盒气体。将它降到绝对零度,所有分子速度为零(或具零点能),压强为零;将它升至无穷高温,所有分子速度为光速,相当于光子气体,压强为 $+\frac{1}{3}\rho c^2$,可见任何温度下气体压强总在 0 与 $+\frac{1}{3}\rho c^2$ 之间,不可能是负的。通常,这种具有负压强的假设中的物质被称为“暗能量”,这是真空中的一种设想中的物质。其实,如果原场方程带有 Λ 项,它就相当于提供了一种负压强的物质,可以说, Λ 所代表的“物质”就是“暗能量”中特殊的、不随时间变化的一种(常数)物

质,有趣的是,至今所做的各种观测基本上均符合爱因斯坦的这个宇宙常数 Λ ! 爱因斯坦添加了 Λ 项,白白地丢掉了“存在宇宙膨胀”的预言,可是现在看来,这个 Λ 项也许是一个更重要的“对宇宙加速膨胀或暗能量”的预言! 正由于爱因斯坦研究的都是一些很基本的东西,无论他要添加的或是废弃的,都含有非常重要的意义! 宇宙加速膨胀的发现使 Perlmutter, Riess, Schmidt 获得了 2011 年度的诺贝尔物理学奖。

如上所述,现代宇宙学已经从宇宙极早期,从粒子物理、核物理、原子物理,从宇宙背景辐射,从恒星和星系形成,一直到宇宙加速膨胀的研究中,取得了相当全面的认识. 宇宙学已经为整个天体物理学提供了一个相当清晰的研究框架. 有意思的是,宇宙学,特别是大爆炸宇宙学,不仅对整个宇宙的演化提供了相当好的解释,而且也从观测与理论比较中,特别是在一些关节点上,引发了一些重大的补充和发现. 比如,宇宙演化早期的暴胀过程和晚期的加速膨胀过程,不仅是对大爆炸宇宙学的重大补充和发现,而且也为通向“新物理”指明了可能方向和途径。

大家知道,诺贝尔奖包含物理学奖、化学奖、生理学/医学奖、文学奖以及和平奖五项,是以瑞典著名化学家、硝化甘油炸药发明人阿尔弗雷德·贝恩哈德·诺贝尔的部分遗产(3100 万瑞典克朗)作为基金创立的. 这个奖以基金每年的利息或投资收益授予世界上在这些领域对人类做出重大贡献的人. 1901 年是诺贝尔奖首次颁发的年份. 诺贝尔奖包括金质奖章、证书和奖金. 1968 年,在瑞典国家银行成立三百周年之际,该银行捐出大额资金给诺贝尔基金,增设“瑞典国家银行纪念诺贝尔的经济科学奖”,1969 年首次颁发这个奖,人们习惯上称这个额外的奖项为诺贝尔经济学奖. 不过,我们这里主要只讨论天文学或天体物理学. 上面已经看到,诺贝尔奖本身并没有设立天文学奖. 因此,天文学或天体物理学要获得诺贝尔奖,必须与物理学竞争去争取获得诺贝尔物理学奖。

1901 年首发的诺贝尔物理学奖是由于发现伦琴射线(俗称 X 光)而授予伦琴(Röntgen W. C.)的,这是 20 世纪物理学开创性时代的极有代表性的一个事件. 20 世纪的物理学,充满着出色的发现和发明,划时代的科学家、划时代的科学思想,一个接着一个涌现出来. 有分量的诺贝尔奖也就一个接着一个颁发. 1913 年起,一位天文学家海尔(Hale G. E.)被频频提名为诺贝尔物理学奖的候选人,却频频落选. 海尔设计、建造了一台又一台先进的望远镜,并且在太阳光谱的研究上做出了重大贡献,首次发现太阳上存在磁场. 海尔是那个时期天文学界最杰出的代表人物,为什么诺贝尔奖频频落选呢? 那时诺贝尔物理学奖的评委中间,存在着激烈的大物理与小物理之争,这是指奖励对象的物理只包括狭义物理,还是也包括天体物理、大气物理等更广范围? 最有代表性的一件事是,当 1923 年海尔再一次被提名为诺贝尔物理学奖候选人时,一位名叫阿伦尼乌斯

(Arrhenius S.) 的诺贝尔物理学奖评委所说的话：“天体物理发展太快，以致几乎已覆盖了整个天文学，而诺贝尔奖并没有设天文学奖，因此天体物理也不应获诺贝尔物理学奖。”从此，几乎将天体物理完全排斥在诺贝尔物理学奖之外，以致使诺贝尔物理学奖的头三分之二个世纪(1901—1966)内，天体物理学家无人获奖，甚至发现极为重要的宇宙膨胀现象的哈勃(Hubble E. P.) 也被排斥在获奖范围之外。有趣的是，20世纪40年代起，贝特(Bethe H.) 又频频被提名为诺贝尔物理学奖候选人，但也频频落选。贝特是一位理论物理学家，他在理论物理领域有非常广泛而且深入的研究，是一位极高产的物理学家。他在核物理、原子物理、量子电动力学以及固体物理等方面均作出了重要工作。他还是第一个成功解释氢原子的 Lamb 移动的人(Lamb 移动的发现者 Lamb W. E. 曾为此获得了1955年度的诺贝尔物理学奖)。此外，他还参与了曼哈顿计划和氢弹制造。但是，从基本意义和原创意义的角度来看，他的成就当首推在恒星的核能源的研究方面。他的频频落选大概也与排斥天体物理有关。直到上个世纪60年代，更多更多的物理学家频频提名他为诺贝尔物理学奖候选人，诺贝尔物理学奖评委于1967年才终于以奖给他“对核反应理论研究的贡献，特别是他对恒星能源的发现”为由颁奖。似乎想告诉大家，这是奖给他对核反应理论研究的，因而是个纯物理的奖项。但是，诺贝尔奖主要应奖给原创性成果，而贝特的主要原创性成果是在恒星能源上，因而仍为天体物理。贝特获奖实现了天体物理零的突破。这一突破，对于天体物理，犹如打开了一个闸口，此后天体物理几乎隔三(年)差五(年)就会频频获奖。从表1可以看出，从1901至1966年，三分之二个世纪，一个天体物理学家也没有获得过诺贝尔奖，而从1967至2011年这44年间却有多达18位天体物理学家获得了诺贝尔物理学奖！可见，天体物理正处在何等快速发展的年代！

这里，我们将按年度、按项目和按获奖人来分类讨论诺贝尔奖的情况。1967至2011的44年中，按年度计，共有9个；按项目计，共有12个；按人计，共有18人。这是因为有的情况是两个项目共享一个年度奖，有的一个项目又可以由2或3人合得。比如1974年度是由“综合孔径技术”和“脉冲星的发现”两个项目共享的。虽然这两个项目均属天体物理，但毕竟不是同一个项目。又比如，1978年度是由“宇宙微波背景辐射的发现”(Penzias A. A. 和 Wilson R. W.) 和“低温物理领域的发明和发现”(Kapitza P. L.) 两个项目分享的，前者属“天体物理”，而后者属“低温物理”，两个项目的性质完全不同。为什么把这两个项目放在一起？也许是因为宇宙微波背景辐射是2.725K，就“温度”而言属低温范围？可两者所研究的物理是十分不同的！所以，在讨论天体物理的时候，并没有把Kapitza的工作放进来。再比如，2002年度的诺贝尔物理学奖是由三个人合得的，但Davis Jr. R. 和 Koshiba M. 研究的均是宇宙中微子，而Giacconi R. 研究的是宇宙X射线源，前两个可以作为一个项目，它与后者却明显不同，虽均属于天体物理。

表 1 天体物理: 诺贝尔物理学奖: 9 个年度、12 个项目、18 个人

1967 年	Bethe H.	核反应理论研究,特别是恒星能源的发现
1970 年	Alfvén H.	磁流体力学中的基本工作和发现
1974 年	Ryle M.	综合孔径技术
	Hewish A.	脉冲星的发现
1978 年	Penzias A. A. , Wilson R. W.	宇宙微波背景辐射的发现
1983 年	Chandrasekhar S.	恒星结构与深化的理论研究
	Fowler W. A.	宇宙中化学元素起源的理论和实验研究
1993 年	Hulse R. A. , Taylor J. H.	发现一种新类型脉冲星,开辟了引力研究新的途径
2002 年	Davis Jr. R. ,Koshiha M.	宇宙中微子的观测
	Giacconi R.	宇宙 X 射线源的发现
2006 年	Mather J. C. , Smoot G. F.	宇宙微波背景辐射黑体谱和各向异性的发现
2011 年	Perlmutter S. , Riess A. ,Schmidt B.	宇宙加速膨胀的发现

诺贝尔奖是基础学科中最具代表性的一个国际奖项. 虽然也存在着不少争议,不公平和不公正的问题也不乏其例,但大体上还是可以用来作为学科评价的一个参照. 为什么天体物理中获得诺贝尔奖的项目集中在“恒星”、“宇宙学”和“新的观测窗口”这三个领域内(见表 2)? 因为诺贝尔物理学奖主要奖励那些在具有基本物理意义的课题上做出原创性成果的工作,而恒星和宇宙学中所研究的课题确实大多是天体物理中物理意义十分基本、十分突出,也十分深刻的. 显然,恒星能源(获奖人 Bethe)、元素起源(获奖人 Fowler)以及恒星的结构与演化(获奖人 Chandrasekhar S.)均具有极为深刻的物理意义. 脉冲星(获奖人 Hewish A., 其实,第一个发现脉冲星的是他的学生 Jocelyn Bell)是通过周期非常稳定的射电脉冲观测而被发现的,很快被证认为旋转中子星(甚或可能是奇异夸克星). 中子星其实是一个巨型(像太阳一样重)原子核,更确切地说,是一个巨型原子(因为它实际上还包含有电子,是一个电中性体),但不是卢瑟福(Rutherford E.)原子(因为电子不是在绕核轨道上运行),而应是汤姆逊(Thomson J. J.)原子(电子存在于核的内部). 在原子物理时代,汤姆逊首先提出,一个原子应当是一块带正电的物质中分散镶嵌着等量负电荷的若干个电子,类似于一块葡萄干夹心蛋糕. 后来,在卢瑟福发现原子核后,汤姆逊的这个模型就被电子绕核模型所取代. 有趣的是,到了中子星的层次,又回到了汤姆逊模型. 这是一种全新类型的恒星,不仅观测特征十分独特,脉冲周期高度稳定,它的物态特征也与一般恒星十分不同. 两个中子星组成的双星脉冲星 PSR1913+16 被 Taylor J. H. 和

Hulse R. A. 于 1974 年发现. 由于脉冲星的周期和周期变率可以高精度测定, 这个双星脉冲星的观测数据不仅间接提供了引力波存在的精确证据, 而且提供了高精度研究广义相对论的一个理想实例, 并且也得以精确验证了广义相对论. 为此, Taylor 和 Hulse 于 1993 年拿下了脉冲星的第 2 个诺贝尔奖. 在恒星领域内, 还有没有再获诺贝尔奖的可能? γ 射线暴是一个十分重要的候选者, 它是一个除宇宙大爆炸外最猛烈的爆发现象. 从一个偶然发现的误导信号, 现在已经发展成一门多波段的重要学科, 成就十分显著, 而且它已经获得了 2011 年度号称“东方诺贝尔奖”的邵逸夫奖. 另外, 黑洞也是一个获奖候选者. 当然, 黑洞不仅在恒星层次, 在星系层次也是重要的候选者.

表 2 三大类: 恒星(脉冲星是致密恒星)、宇宙学、新窗口

分 类	获奖人	项 目
恒 星	Bethe H.	恒星能源(1967)
	Fowler W. A.	元素的恒星起源(1983)
	Chandrasekhar S.	恒星结构与演化(1983)
脉 冲 星	Hewish A.	脉冲星(1974)
	Hulse R., Taylor J.	双星脉冲星(1993)
宇 宙 学	Penzias A. A., Wilson R. W.	微波背景辐射的发现(1978)
	Mather J. C., Smoot G. F.	微波背景辐射黑体谱与各向异性(2006)
	Perlmutter S., Schmidt B., Riess A.	宇宙加速膨胀的发现(2011)
新 窗 口	Alfvén H.	磁流体力学(1970)
	Ryle M.	综合孔径(1974)
	Davis R. Jr., Koshiha M.	宇宙中微子(2002)
	Giacconi R.	X 射线天文(2002)

在宇宙学领域内, 还有没有再获诺贝尔奖的项目? 暗物质的发现应当是一个指日可待的获奖候选者. 虽然从粒子层次发现暗物质还有待努力, 但暗物质在天文学上的发现应视为已被确认, 发现者(特别是从星系旋转曲线发现暗物质的先驱人物 Rubin V. 等人)获奖的可能性很大. 如能在粒子层次发现暗物质, 自然必在获奖之列. 引力波的间接检验, 已在双星脉冲星的观测研究中获得过诺贝尔奖. 如能直接观测到引力波, 那将是一个新的观测窗口, 自然更当获奖. 现在, 引力透镜现象天文学上已经发现很多, 爱因斯坦环、爱因斯坦弧这种特征性的引力透镜现象已见不少, 这类现象在宇宙学的研究中十分重要, 将来也有可能获奖. 虽然作为暗能量所反映出来的宇宙加速膨胀已经获得诺贝尔奖, 但暗能量本身并没有直接获奖. 暗能量的研究还有丰富的前景.

行星也是一个热门的领域. 行星科学的基本意义在哪里? 显然, 它的最重要的基本意义在于它是宇宙中可以提供生命(甚至人类)存在的唯一场所. 目前所

知地球是唯一的一个例子. 当然, 宇宙中像地球那样的行星一定很多. 但是, 远处的行星是很难观测的. 行星本身不发光, 但它又十分靠近一个强光源(恒星, “太阳”), 光学观测几乎不可能. 只有在遮挡或部分遮挡强光源(恒星)等的情况下, 才可能实现某种直接观测. 现在, 极大部分对太阳系外行星的观测, 都来自对恒星的直接观测中所反映出来的行星对恒星的影响. 可喜的是, 至今人们已经发现了近千个系外行星, 而且也第一次发现了处于可居住带的行星. 有望不久的将来, 在行星研究中揭开生命起源的神秘面纱.

现在人们已经在学科发展的前景、科研方向的选择、教学内容的取舍上, 从上述分析中得到了不少启发. 《现代天体物理(上、下)》是由国家出版基金支持, 由北京大学出版社出版的“中外物理学精品书系”中属于“前沿系列”的一本著作, 是一本约请了好几十位活跃在天体物理前沿的作者撰写的著作. 在内容的选择和取舍过程中无论从全局或者重点这两个方面, 我们都借鉴了上面的分析, 也考虑了意义的深刻性和前沿的活跃度. 由于水平有限, 不足之处, 在所难免, 还望读者不吝指正. 本书若能对读者有所裨益, 就是我们的荣幸了.

陆 垝

中国科学院紫金山天文台

2012年9月21日