

现代物理系列专题选讲

宇宙与超弦

李元杰 编

华中理工大学出版社

宇宙与超弦

——现代物理系列专题讲座之一

李元杰 编

华中理工大学出版社

宇宙与超弦

——现代物理系列专题讲座之一

李元杰 编

责任编辑 周筠

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：5 字数：104 000

1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷

印数：1—4 000 定价：2.40元

ISBN 7-5609-0653-2/O·90

(鄂)新登字第10号

内 容 简 介

本书精选了现代物理的 10 个专题，包括：宇宙的创生；奇妙的黑洞；太阳黑子；现代熵概念；超导之谜；信息光学；非线性光学；量子霍尔效应；粒子与超弦；相因子物理。编者就这 10 个专题作了生动的描述和探讨，精采处引人入胜。此书可作为有志于科学事业的青年学生的课外读物，也可用作大学物理的补充教材或教学参考资料。

目 录

第一讲	宇宙的演化与创生	(1)
	东、西方的宇宙观	(2)
	杞人忧天的启示	(3)
	标准宇宙学	(5)
	宇宙的创生	(11)
第二讲	奇妙的黑洞.....	(14)
	什么是黑洞	(14)
	黑洞有些什么性质	(17)
	怎样探测黑洞	(19)
	黑洞是怎样形成的	(21)
	宇宙果真有黑洞吗	(25)
第三讲	白玉之瑕——太阳黑子.....	(27)
	太阳的构造	(28)
	太阳的磁场	(32)
	太阳黑子	(34)
第四讲	现代熵概念.....	(38)
	热学中的熵	(38)
	统计物理中的熵	(49)
	信息熵	(54)
	生物熵	(59)
	黑洞熵	(62)
第五讲	超导之谜.....	(65)

	超导现象及其主要特性	(65)
	超导的微观机制	(76)
	超导的意义及应用	(86)
第六讲	信息光学	(96)
	光栅的方位与空频	(96)
	阿贝成像原理	(101)
	信息光学的应用	(108)
第七讲	非线性光学	(113)
	强光下的极化	(113)
	谐波效应与位相匹配	(115)
	非线性效应	(117)
第八讲	量子霍耳效应	(121)
	量子霍耳效应现象	(121)
	强磁场中的二维电子系统	(125)
	Corbino 盘与霍耳电阻台阶	(129)
	量子霍耳效应的应用及分数量子霍耳效应之谜	(133)
第九讲	粒子与超弦	(134)
	从原子到夸克	(134)
	弦粒子	(137)
	高维空间的紧致	(140)
第十讲	相因子物理	(143)
	经典电磁理论中的势	(143)
	量子理论中的电磁势	(145)
	Aharonov-Bohm 效应	(146)
	相因子物理	(148)

第一讲 宇宙的演化与创生

人类生活在宇宙之中。在宇宙的演化过程中，产生了人。组成人体的元素，包括轻元素和重元素都是在宇宙演化的不同阶段形成的。现已确认，轻元素如 H、He 是在早期宇宙中形成的，而重元素如 C、O、Fe 等是在恒星演化过程中形成的。正是有了这些元素，才可能有我们人类，因此，宇宙与人类的关系是十分密切的。

人类不断认识宇宙、研究宇宙的过程，在人类科学技术发展史上占有特殊的地位。大家知道，正是通过对天体运行规律的观察与研究，建立了光辉的牛顿理论，牛顿理论使科学和技术得到了长期的发展，直至今天，它对科学和生产还有一定的指导作用。

宇宙还为现代科学研究提供了无法取代的实验场所。爱因斯坦的广义相对论就是在对宇宙天体进行观察的许多实验中得到验证的。今天的高能物理实验耗资惊人，而宇宙早期为高能粒子物理准备了十分理想的观察场所。尽管我们无法再看到宇宙早期壮观迷人的景象，但人们可以借助考古学的方法去研究早期、极早期宇宙中的粒子现象。人们甚至相信，只有穿过宇宙的殿堂，才能真正洞察微观世界。

总之，人类对宇宙的研究，过去硕果累累，未来也必将光辉灿烂。研究宇宙对于建立统一理论、沟通各个学科，乃至对人类的命运都是极为重要的。

东、西方的宇宙观

一、东方的宇宙观和宇宙模型

中国是东方文明古国，早在战国时期，就给宇宙下了一个定义。战国《尸佼》中记载：“天地四方曰宇，古往今来曰宙”。在《墨子》中也有“宇，蒙东西南北；久，合古今旦莫”的说法，意思是，宇指空间，宙指时间，宇宙指的是时空整体。

中国古代的宇宙模型，主要有三说：

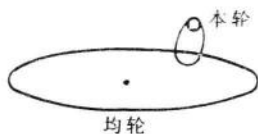
1. 盖天说 其基本观点为：“天圆如张盖，地方如棋局”。
2. 浑天说 其主要观点为：“浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡中黄，孤居于内”。这里鸡子指的是鸡蛋。
3. 宣夜说 该说则认为：“日月众星，自然浮生虚空之中，其行其止，皆须气焉”。

中国古代哲学思想十分丰富，形象又具有非常深刻的悟性。如民间传说中的盘古开天地就出自于“天地浑如鸡子，盘古生其中。万八千岁，天地开辟，阳清为天，阴浊为地，盘古在其中，一日九变。神于天，圣于地，天日高一丈，地日厚一丈，如此万八千岁，天数极高，地数极深，盘古极长，故天去地九万里”。这些话里，似乎有宇宙暴涨思想（“一日九变”），也有有限、膨胀演化的思想。与此同时，中国的哲学家还提出了时间和空间的无限性问题。如庄子讲：“有始也者，有未始有始也者，有未始有夫未始有始也者”，指出了时间的无限性。战国惠施曰：“至大无外，谓之大一，至小无内，谓之小一。”指的是空间的无限性。

二、西方的宇宙观

西方对宇宙的认识，大体上分成三个时期：

1. 地心说 古希腊毕达哥拉斯提出：天体作圆周运动，而地面物体作下落运动。以后，柏拉图建立了以地球为中心的同心球壳论，即天体分布在以地球为中心的同心球壳上。柏拉图的学生亚里士多德把球壳发展到 55 层。托勒密进一步提出均轮、本轮地心说（见图 1-1），即天体除绕地心作圆运动外，还绕其轨道作圆运动，称为本轮。在教会支持下，地心说对天文学的统治长达千余年之久。



2. 天体运行说 波兰天文学家哥白尼第一个冲破教会的禁锢，提出太阳中心的天体运行论。以后，伽里略、开普勒、牛顿也相继总结出行星的运动定律，证明了平方反比律与椭圆轨道的必然联系，使得对天体的定性观察走向定量的理论研究。

3. 星云起源说 德国学者康德提出，星系可在星云旋转运动中形成。这一时期，天体测量、天体力学、恒星天文学都取得了巨大成就，为现代宇宙学的建立作好了准备。

杞人忧天的启示

人类认识宇宙，首先是从认识天体开始的。而研究天体时，遇到的第一个问题是天体为什么不坠落？有趣的是，这个看起来与生产技术毫无关系的理论问题，后来却成为推动科学技术和生产发展的巨大力量。可以毫不夸张地讲，由于对这个理论问题的态度不同而造成了今天东、西方科技水平的巨大差距。

中国有句成语：“杞人忧天”，出自《列子》天瑞篇，上载“杞国有人，忧天地崩坠，身亡所寄，废寝食者”。唐代著名诗人李白云：“白云不照吾精诚，杞国无事忧天倾”，意思都是讲，

研究天体为什么不下坠是吃饱了饭没事干。

然而，西方却不然，他们把研究天体为什么不下坠作为重要的理论课题，并且成为人们探索自然奥秘的决心与动力。其结果，不仅认识、了解并掌握了自然的规律，更重要的是能运用自然规律为科学技术和生产服务，迅速推动了社会生产力的发展。

为了解释天体为什么不下坠，古希腊的亚里士多德提出了两界说，即以月亮为界线，月球以上称为神界，凡神界的天体均作圆运动；月球以下称为世俗界，凡世俗界的物体均作下坠运动。牛顿指出，月球不下坠是因为它有较大的横向速度，月球的横向初速度是第一推动者即上帝给的。后来，康德提出了演化论及万有斥力说，认为太阳系的气云在引力坍缩中，获得较大速度，再由斥力方向转为横向（见图 1-2）。



拉普拉斯反驳了康德的斥力说，指出如果斥力形成其横向速度，则天体绕太阳旋转的两个方向机会应均等，即从东向西旋转与从西向东旋转的行星数目相等。而实际上，

所有行星都自西向东绕太阳旋转。拉普拉斯证明，康德的理论至少在

$$\left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{37}\right] \times 100\% = \frac{137438953471}{137438953472}$$

的程度上是错误的。其中， $1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{37}$ 是 37 个绕行体系中至少有 1 个自东向西旋转的概率。拉普拉斯认为，横向速度是角动量守恒的反映。星云均收缩为盘状结构，太阳系、银河系、旋涡星系都是盘状结构，这证明拉普拉斯的观点是正确的。也许聪明的读者会问道，初始的角动量从何而来？现代物理学家十分巧

妙地将这个初始条件变换为一个边界条件去处理，我们将在宇宙创生说中进一步讨论这一问题。

人类正是通过研究天体为什么不下坠，找到了牛顿力学三定律，它们是宏观低速运动的基本定律。令人深思的是，这一重大理论成果，并非从研究力学机械或生产技术中来，而是从“杞人忧天”中来。由此给了我们一个极为重要的启示：绝不能一味强调应用，而忽视对基础理论的研究，否则要吃大亏、上大当。

标准宇宙学

一、宇宙学原理

长期以来，人们对宇宙实测的结果，可以简要归结如下：

1. 在大于 10^8ly 天区范围内，星系分布、射电源计数和微波背景辐射等基本上是均匀和各向同性的。
2. 物理学实验具有明显的可重复性，表明以宇宙为背景的实验条件和环境具有可重复性。
3. 宇宙不存在任何中心，这也是哥白尼原理的推广。

根据以上观测及经验，物理学家总结出一条结论：在宇宙尺度上，任何时刻的三维空间都是均匀、各向同性的。这个结论称为宇宙学原理。从宇宙学原理出发，在任何天体上都将看到与地球上的观测者所看到的一样的宇宙演化图景。正是有这样一个共同的宇宙演化图景，才有普适的“宇宙时”。

二、常曲率空间

宇宙是有限的还是无限的？这是宇宙学中至今仍争论不休的问题。德国诗人海涅曾在诗中感叹：“对这一问题，一个白痴才会期望有一个回答”。著名的奥勃斯悖谬——夜黑问题，就是

关于宇宙有限与无限的讨论，奥勃斯指出，如果天体分布是均匀的，则星星的数目 n 与距地球径向距离 r 的平方成正比，而星星发光至地面的亮度 I 与 r 之平方成反比，如果宇宙无限，则夜晚的星空如同白昼一样。倘若宇宙是有限的，那么有限之外又是什么呢？

在古希腊，亚里士多德认为，有限之内是物理空间，有限之外是神灵世界。中国的张衡也认识到有限的困难，他无可奈何地讲：“过此而往者，未之或知也”。牛顿持无限观，他同莱布尼兹只是在星星属于有限还是无限部分这一点上有分歧。康德和中国的杨慎提出二律背反论，认为这个问题不可能有自治的答案。杨慎讲：“天有极乎，极之外何物也？天无极乎，凡有形必有极”。导致人们无法摆脱困境的共同逻辑是，大家都认同一个准则：有限必有界，有界必有限；无限必无界，无界必无限。是否存在一种无界却有限的空间呢？现代宇宙学可以给我们一种有限无界的几何，使我们摆脱困境。

由广义相对论原理可知，物质能使时空发生弯曲，因为宇宙物质分布均匀且各向同性，所以，宇宙一定对应一个常曲率空间。常曲率空间的一个明显例子是：在三维平直空间中的一个二维球面，它是一个二维常曲率空间。球面上，各点的曲率都相同，记为 k ，曲率半径即为球半径 R 。球面方程可以写成

$$x^i x^i = R^2 = \frac{1}{k} \quad (i=1, 2, 3) \quad (1.1)$$

式中 $x^i x^i = x^2 + y^2 + z^2$ ， $x^1 = x$ ， $x^2 = y$ ， $x^3 = z$ 。球面上，线元长度的平方为

$$dS^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

以上结论容易推广到三维超球面。考察一个四维时空间，其中有一个三维超球面，它是一个三维常曲率空间。尽管在纸上我

们无法画出这个三维超球面，但是用代数方程却能十分容易地写出这个常曲率的三维空间

$$x^\mu x^\mu = \frac{1}{k} \quad (\mu=1, 2, 3, 4) \quad (1.2)$$

三维球面上的线元平方为

$$d\sigma^2 = dx^\mu dx^\mu = dx^i dx^i + (dx^4)^2 \quad (1.3)$$

利用 (1.2) 和 (1.3) 式，得到

$$d\sigma^2 = dx^i dx^i + \frac{k(x^i dx^i)^2}{1 - kx^i x^i} \quad (1.4)$$

再变换到球坐标，有

$$d\sigma^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (1.5)$$

(1.5) 式表示时间 t 固定时三维空间的线元平方。若考虑时间变化，需乘一时间因子 $a^2(t)$ ，即

$$d\sigma^2 = a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right] \quad (1.6)$$

最后，我们可写出四维时空的线元为

$$dS^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right] \quad (1.7)$$

(1.7) 式描述了宇宙的几何，称为 Robertson-Walker 度规。利用 (1.7) 式计算径向固有距离，则

$$d = a(t) \int_0^r \frac{dr}{(1 - kr^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.8)$$

当 $k=1$ 时

$$d_+ = \frac{a(t)}{k} \arcsin(\sqrt{k} r)$$

径向坐标存在上限 $r_{\max} = 1/\sqrt{k}$ ，所以对应 $k=1$ ，宇宙空间是有

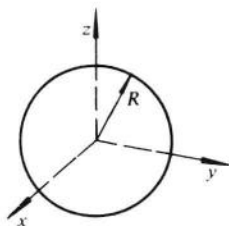


图 1-3 球面方程
 $x^i x^i = R^2$

限的。

当 $k = -1, 0$ 时

$$d = \frac{a(t)}{\sqrt{-k}} \arctg(\sqrt{k} r)$$

$$d_0 = a(t) r$$

径向坐标可以取任意大的值，宇宙是无限的。由此看到，宇宙空间的有限或无限是由空间曲率 k 的正负性确定的。

简单小结如下：

$$k = \begin{cases} 1 & \text{宇宙三维空间是有限无边的} \\ -1, 0 & \text{宇宙三维空间是无限无边的} \end{cases}$$

三维空间中的一个二维球面就是一个有限无边的模型。我们可以想象，如果有一个二维的生物生活在这个二维球面上，它将如何认识自己的宇宙呢？首先，它测量了自己的宇宙面积，显然这是一个大小有限的量 $4\pi r^2$ ， r 是球半径；其次，它沿着球面前进，希望发现宇宙的边界，然而，它始终找不到边界。于是，它给自己的宇宙下了一个结论：这是一个封闭的、有限无边的宇宙。人类生活在一个三维超球面的宇宙之中，当曲率 k 为正时，我们也会发现自己的宇宙空间是一个封闭的、有限无边的空间。

三、膨胀收缩与有限、无限的关系

我们假定宇宙的半径为 $R(t)$ ，由于宇宙演化十分缓慢，可以将 R 在 t_0 附近展开为

$$\begin{aligned} R(t) &= R(t_0) + R'(t_0)(t-t_0) + \frac{1}{2}R''(t_0)(t-t_0)^2 \\ &= R(t_0) \left[1 + H(t-t_0) - \frac{1}{2}qH^2(t-t_0)^2 \right] \end{aligned}$$

其中， $H = \frac{R'}{R}$ 称为哈勃常数， $q = \left| \frac{R''}{RH^2} \right|$ 称为减速因子。如果 H

>0 ，则宇宙是膨胀的。天文观测发现了星光的红移，证实了宇宙正处在膨胀之中（见图 1-4）。图中，星球 A 、 B 都随宇宙膨胀远离地球 E 而去，我们称 A 、 B 星光的红移为宇宙学红移。

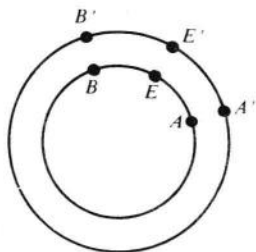


图 1-4 宇宙的膨胀

一方面，引力作用使天体收缩并相互接近或保持一定距离；另一方面，宇宙膨胀使天体相互远离。可以用二个速度 $v_s = HR$ 和 $v_g = 2GM/R$ 来表示膨胀及收缩因子。如果 $v_s > v_g$ ，则宇宙将会膨胀到无限，反之则有限。取宇宙物质密度为 ρ_0 ，于是 $M = \frac{4\pi}{3}R^3\rho_0$ ，代入条件 $v_s > v_g$ ，得到

$$HR > \frac{8\pi G}{3}R^2\rho_0 \quad (1.9)$$

记 $\rho_c = 3H^2/8\pi G$ ，称为临界密度，(1.9) 式可以简单表示为

$$\rho_0 < \rho_c \quad (1.10)$$

即当 $\rho_0 < \rho_c$ 时，宇宙是无限的，它将永远无止境地膨胀下去。反之， $\rho_0 > \rho_c$ 时，宇宙是有限的。目前，最新测量的结果为 $\rho_0 = 0.3\rho_c < \rho_c$ ，似乎宇宙是无限的。然而，对减速因子观测的结果是 $q \approx 1$ ，而只要 $q > \frac{1}{2}$ ，就可以证明宇宙是有限的！这个矛盾使人们努力去寻找所谓下落不明的质量，瑞士科学家兹威基发现，用光度法和动力学法测量宇宙质量，两者竟相差 400 倍。比如，按开普勒定律旋涡星系的速度 v 应与距离的平方根成反比，即 $v \propto 1/\sqrt{r}$ 。而实际观测的 v 与 r 的关系则如图 1-5 所示，在远处有相同的线速度。这说明存在数量可观的不可视物质，称为暗物质。1983 年，距银河中心 $2 \times 10^5 \text{ly}$ 的 R_{15} ，其视向速度达 $465 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，估计银河质量至少比光学观测质量大 10 倍。换言之，宇

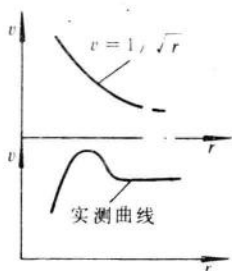


图 1-5 旋涡星系 $v-r$ 关系

宙中约 9/10 的物质是暗物质。如果把暗物质加进来，则宇宙的质量密度 ρ_0 将大于临界密度 ρ_c 。

四、标准宇宙学和暴涨宇宙学
标准宇宙学认为，我们生活的宇宙具备以下几个特征：

1. 宇宙在一次大爆炸中产生，先膨胀后收缩，交替演化。
2. 宇宙是有限无边的，也是封闭弯曲的。

闭弯曲的。

标准宇宙学给出了宇宙的寿命和年龄，宇宙的寿命 $T = 8 \times 10^{10} \text{a}$ ，宇宙现在的年龄是 $t_0 = 7.5 \times 10^9 \text{a}$ ，实验测得的有关数据是：

地球的年龄 $(3.4 - 4.5) \times 10^9 \text{a}$

银河系年龄 $6.6 \times 10^9 \text{a}$

星系团年龄 $(8 - 18) \times 10^9 \text{a}$

这些结果同标准宇宙学的估计相符。此外，关于微波背景辐射 3K 及 He 丰度等，实验测量结果与理论估计值也符合得比较好，标准宇宙学获得了极大成功。但是它也存在着许多不足和困难，比如平直性、视界及磁单极困难，还有奇点困难。

80 年代初古斯提出一种宇宙暴涨模型。他认为宇宙在极早期，即大爆炸后 10^{-35}s ，曾经历过一个指数膨胀阶段，称之为暴涨阶段。暴涨模型十分成功地解决了平直性、视界及磁单极的困难。暴涨阶段是否真实存在？这是人们颇为关注的问题，于是许多学者在理论上寻找宇宙的暴涨解。1983 年，瓦尔德在爱因斯坦方程中加上宇宙常数项，得到一个指数暴涨解。同年，林德提出混沌暴涨，他引入了一个膨胀场 φ ，并得到一种幂律暴

涨。1988年，米吉克和斯特恩·夏伯斯引入曲率平方项，同年，梅耶达在高维时空中考虑了曲率平方项，证明在4维时有指数暴涨解，而在四至十维之间，有幂律暴涨。从此人们对宇宙早期的研究进入了高维时空，并对曲率的高次项进行了修正。

宇宙的创生

标准宇宙学还有一个重大困难，即奇点困难。若宇宙一直收缩下去，则它不可避免地要集中成为一个几何点，而这显然是荒谬的。另外，宇宙在大爆炸中产生，涉及到一个初始条件的问题。比如，前面提到了初始角动量，即宇宙的第一推动者，似乎是它给出了宇宙的初始条件，才演化出今天的宇宙。自古以来，物理学家无法回答这个问题，于是神学家便大作文章，鼓吹上帝的存在。他们在圣经中吓唬人们：“某些人对上帝创造天地之前说三道四，上帝为那些胆敢追究如此高深命题的人准备好了地狱”。

80年代，物理学家开始尝试用物理方法回答这一问题。英国剑桥大学霍金提出：宇宙创生于“无”。“无”是什么？是真空，即闵可夫斯基空间。那么时空间又从何而来？霍金认为时空也是从无到有的。实际上，世上的东西几乎都是从无到有，宇宙早期并无人类，人类是在宇宙演化的特定时间与空间中产生的；有机分子也是从无到有。诸如此类的例子，俯拾皆是。特别值得一提的是，中国古代的哲学思想家对从无到有的论述十分精辟，比如道家就有“道生一，一生二，二生三，三生万物。”的说法，道家还讲：“天下万物生于有，有生于无”。所谓道生一，意指一是由规律自身自然而然地产生的，道就是规律本身。

物理学家认为，时空概念的存在是有条件的，当 $t < t_p$, $l <$