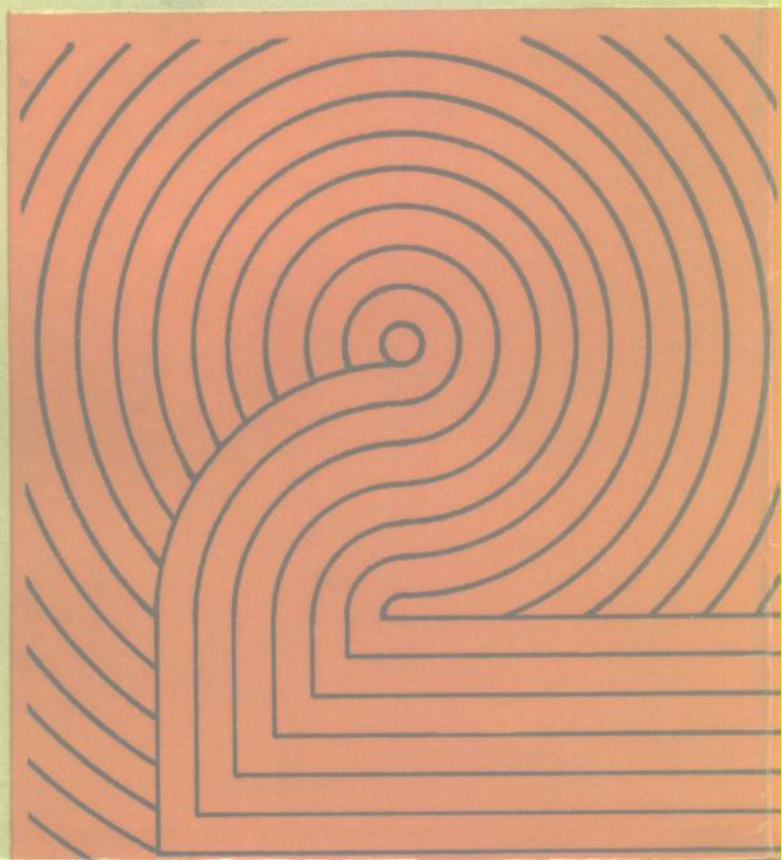


高等物理精编

相对论物理 热力学 统计物理

张家铝
曹烈兆 编著
陈兆甲

中国科学技术大学出版社



《高等物理精编》卷二

**相对论物理 热力学
统计物理**

张家铝 曹烈兆 陈兆甲 编著

中国科学技术大学出版社

1990·合肥

内 容 简 介

《高等物理精编》丛书共分五卷，内容涉及大学物理基础教学的各个方面。本丛书是在中国科学技术大学物理辅导班讲义的基础上进一步加工选编而成的，是教师们综合国内外先进教学经验并结合自己的教学、科研成果而撰写成的。它力图从更高、更新、更综合的角度来阐述基础物理内容，并强调实际动手能力。多年的实际检验表明它是一套行之有效的教材。

本卷内容包括：相对论物理、热力学、统计物理。

《高等物理精编》卷二

相对论物理 热力学/统计物理

张永霖 曹烈光 张兆甲 编著

责任编辑：高哲峰 封面设计：王瑞荣

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路99号)

中国科学院开封印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

开本：850×1168 1/32 印张：9.5 字数：250千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数 1-5000册

ISBN 7-312-00148-8/O·65 定价：3.80元

前 言

从1979年到1988年,由诺贝尔奖金获得者、著名物理学家李政道教授倡导,国家教委举办了中国-美国联合招考物理研究生项目(China-United States Physics Examination and Application Program),简称CUSPEA。这是一个在全国范围内挑选赴美攻读物理博士学位研究生的竞赛活动,它也是我们的高等教育从一个侧面显示力量走向世界的一个机会,国内各主要高等院校均曾积极投入。10年来,通过这种选拔,我国共派出赴美留学生915人。这些学生在美国几十所著名的大学里,在与美国的以及来自世界各地的大学学生的角逐中,勤奋好学,谦恭聪慧,成绩突出,表现非凡,引起了美国教授们和各界人士的惊讶和赞叹。

和国内其他兄弟院校一样,中国科技大学也把CUSPEA看作是立足国内、走向世界的渠道之一,是总结自己经验、吸取外国长处,提高物理教学水平,培养有国际竞争能力的高水平大学生中的一个契机。几年来,结合我校教育改革,我们搜集了大量美国及其他西方国家教育方面的资料,研究了他们的教学计划、教学方法、课程设置、教材教学法、试题安排等。在此基础上,我们一方面重点地剖解了美国主要院校的研究生入学试题,其结果便是我校出版的7卷《美国物理试题与解答》;另一方面,我们集中钻研了美国及其他西方国家的流行教材,参考了近代的有关文献和试题,结合自己的实际经验和我校学生的特点,编写了一套讲义,在校的物理辅导班上付诸实践。10年来,中国科技大学共考取CUSPEA留学生219名,占全国总录取人数的23.9%;学校的物理教学水平普遍大为提高,其他学科也相应取得效益。

中国科技大学物理辅导班是教育改革的试验,它的目的是使有了一定大学物理基础的同学,经过强化培训,物理水平得到大范

围、大幅度的提高。因此这套讲义不同于一般的教材，它是在稍高层次上的一个精深循环。我们力求使它能新一些，融合进世界科技的最新发展，把物理前沿的课题或发现经适当加工或简化后作为基础物理的例题；宽一些，尽量打破物理各学科之间的界限而着重交叉衔接，综合地采用物理中的内容和手段；高一些，从更高的观点来统一地分析以前学过的种种物理规律和问题；实一些，强调灵活应用物理基本原理去分析解决具体的问题，注重实际动手能力。总之，这套讲义力图使我们的物理教学更物理化，更近代化，因而也就更国际化了。

这套丛书《高等物理精编》就是从我校物理辅导班的讲义中逃出来的一部分。它对一般理科大学的学生特别是打算深化自己物理知识的同学们是很好的参考资料，对志愿报考研究生或准备出国留学的同学是一本难得的复习精要，对物理教师和其他领域的物理工作者也会起到有益的借鉴作用。

本丛书是我国“改革、开放”政策的产物，是我国高等教育面向世界、面向未来、面向现代化的大潮中的一朵浪花。抛砖引玉，我们希望它能在促进我国物理教学的改革，提高物理教学水平，推动物理教材的更新和建设作出一定的贡献。当然，囿于水平和时间，错误或不当之处在所难免，我们随时准备听取读者诸君的宝贵意见。

本丛书共分5卷，各卷内容和作者分别为：第一卷，经典力学、电磁学、电动力学（程稼夫、胡友秋、尤峻汉）；第二卷，相对论物理、热力学、统计物理（张家铭、曹烈兆、陈兆甲）；第三卷，光学，原子物理（郭光灿、金怀诚、谢建平）；第四卷，量子力学、核物理、粒子物理（朱栋培、张永德、徐克尊、范扬眉、许咨宗）；第五卷，天体物理、电路分析、脉冲分析（周又元、仝茂达、马善贤）。

《高等物理精编》丛书编委会

1989年6月

目 录

前 言	(i)
-----	-------

第一篇 相对论物理

引 言	(3)
-----	-------

第一部分 狭义相对论及有关的物理问题

1 相对论中哪些观念发生了变化	(7)
2 力学规律与经典方程化成相对论形式的一般方法	(26)
3 粒子系统及热力学量的变换	(46)
4 相对论与电磁学	(59)
5 相对论对光学现象的基本影响	(69)
6 与光子运动有关的几个问题	(86)

第二部分 广义相对论的基本思想

1 引力和惯性力是无法区分的	(100)
1.1 局部惯性系——一种“真正”的惯性系	(100)
1.2 度规张量和引力势	(103)
2 物理定律的普遍形式及推求方法	(112)
2.1 广义协变原理	(112)
2.2 协变微分和物理定律的张量形式	(115)
3 时空弯曲与引力源的关系	(121)
3.1 引力场中时间和空间的度量	(121)
3.2 引力场方程	(126)

4 广义相对论的检验以及它所预言的特殊天体	(133)
4.1 史瓦西场中粒子的运动规律	(133)
4.2 由广义相对论预言的两种特殊天体	(147)
5 例题与思考题	(156)
简短结语	(166)

第二篇 热力学

0 引言	(171)
1 物态方程	(172)
1.1 热力学体系通常用五种变量来描述	(172)
1.2 一些体系的物态方程	(172)
1.3 一个重要的微分等式	(175)
1.4 状态方程的应用例子	(175)
2 内 能	(179)
2.1 热力学第一定律	(179)
2.2 功的计算	(179)
2.3 热量的计算	(180)
2.4 理想气体的热量和功的计算	(181)
2.5 热力学第一定律应用举例	(183)
3 熵	(186)
3.1 热力学第二定律	(186)
3.2 态函数熵 S	(188)
3.3 熵流和熵产生	(193)
3.4 基本微分式	(194)
3.5 熵增加的计算	(195)
3.6 理想气体的熵	(197)
3.7 应用举例	(197)
4 热力学函数及应用	(205)
4.1 热力学函数	(205)
4.2 由比热和物态方程求热力学函数	(208)
4.3 由特性函数求其它热力学函数	(210)

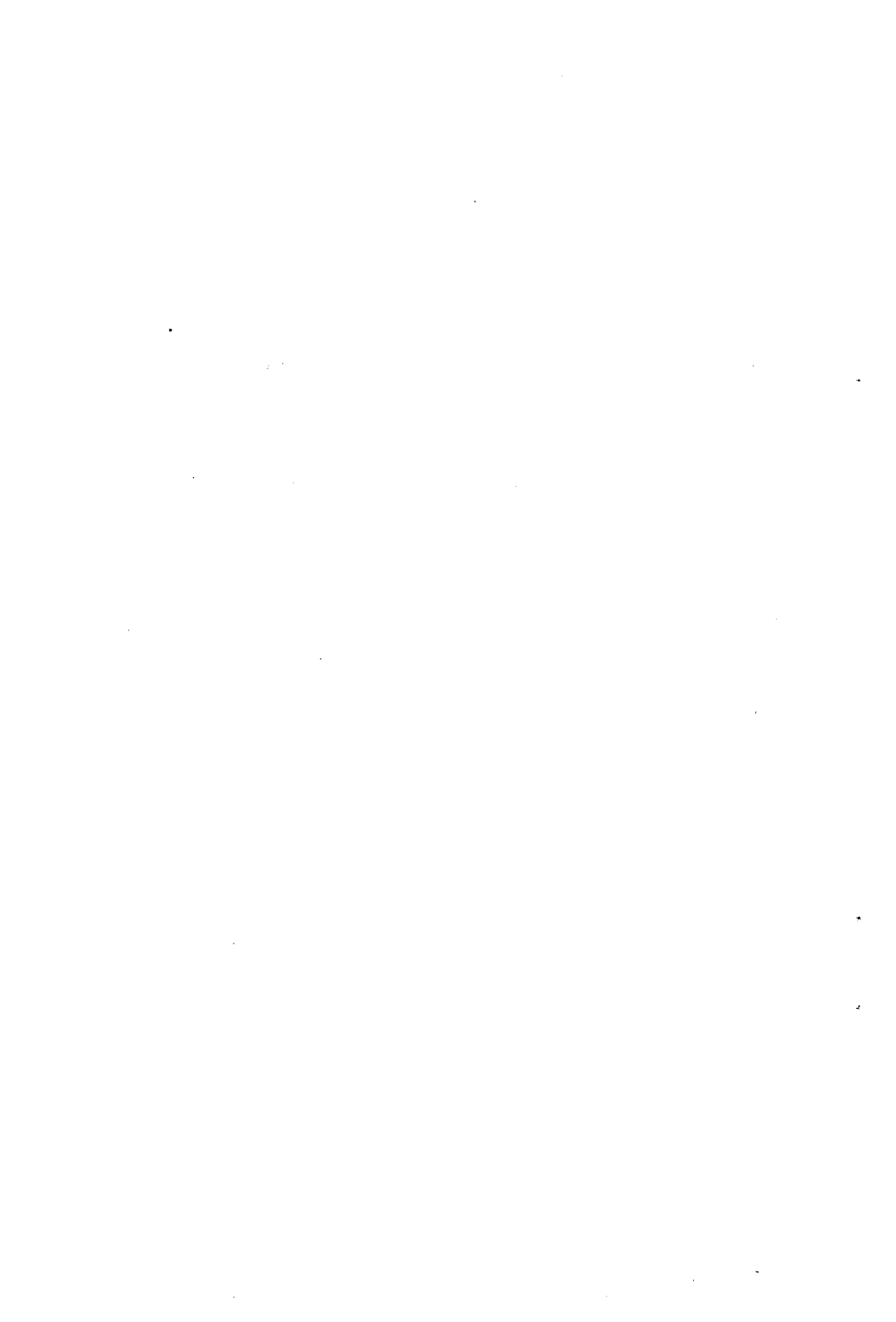
4.4	几个重要的公式	(211)
4.5	黑体辐射	(216)
4.6	应用举例	(217)
5	相变	(225)
5.1	相平衡条件	(225)
5.2	相变分类	(225)
5.3	过冷过热现象	(227)
5.4	朗道二级相变理论	(227)
5.5	汽、液相变中的几个问题	(230)
5.6	超导相变和超流相变	(231)
5.7	多元系复相平衡和相律	(233)
5.8	应用举例	(235)

第三篇 统计物理

0	引言	(243)
1	基本假设	(244)
2	系综法和几率法	(247)
3	玻尔兹曼分布、费米分布和玻色分布	(250)
4	配分函数	(260)
4.1	宏观参量的分类	(260)
4.2	配分函数	(261)
5	熵的性质	(272)
6	微观状态数	(277)
6.1	系统的微观状态数 \mathcal{N} 与热力学量的关系	(277)
6.2	负温度	(277)
7	关于非平衡态的统计理论	(283)
7.1	输运现象	(283)
7.2	碰壁数、泻流	(287)
7.3	布朗运动	(290)
7.4	涨落	(291)

第一篇 相对论物理

张家铝 编著



引 言

自从1905年爱因斯坦创立相对论以来，它在各个物理领域中的作用越来越明显了。很多问题如果不在相对论的背景下来讨论和处理，就不可能得到正确的结果。相对论不但是近代物理学的一门重要的基础理论，而且是现代物理学主要的基石之一。它与量子力学以及近代量子场论的联系构成了整个现代物理的基础。我们这里把用相对论来处理 and 阐述的物理内容称为相对论物理。

相对论通常有狭义相对论和广义相对论之分。对于狭义相对论，大家比较熟悉。所以，在这里我们只着重于讲清一些基本概念以及用它来处理问题的方法，而不去追求完整、系统的叙述。广义相对论是一种引力理论，目前大学课程中一般不要求掌握，但是它巧妙的构思、精美的数学形式和严谨的推理方法又往往启迪我们思考很多问题；而且目前国外试题中，这部分内容的题目也时有出现，所以我们感到有必要在这里对其基本思想和主要结果做一概括性的介绍。

我们知道，牛顿的伟大贡献之一就在于他把天体的运行规律和地面物体的运动规律统一了起来。他打破了过去认为的月界以上的星体都是走和谐圆轨道，而月界以下物体一定落回地面的错误观点，从而提出了万有引力定律。这里的所谓“万有”，其实就是指天地没有差别，无论是天体的运行还是落体的上下都应遵守共同的力学规律，并由同一种力引起。海王星的发现充分证明了万有引力定律及牛顿力学的正确性。但是随着电与磁的统一，逐渐暴露了牛顿力学与麦克斯韦电磁理论之间在时空观念上的不协调性。反映牛顿力学时空观的是伽利略变换，但是麦克斯韦方程不符合伽利略变换，电磁波在真空中的传播速度无论怎样测量都给出同一数值 c 。一些新的实验结果冲击着伽利略、牛顿以来所建

立的经典物理学体系。

为了解决新事实与旧理论之间的矛盾，爱因斯坦突破了洛仑兹等为代表的老一代理论物理学家所设置的框架，重新考察了物理学中一些最基本的概念，取得了成功。1905年他发表的题为《论动体的电动力学》一文，就完整地提出了狭义相对论的基本思想。

狭义相对论的发展在物理学上引起的变革是极其深刻的。它从根本上改变了经典力学旧的时空观念，并在系统地阐明物质运动和时间空间关系的基础上，建立了一种全新的时空观念。这两种时空观虽然在 $v \ll c$ 时没有明显差别，但是当运动体的速度 v 接近光速 c 时，它们之间的不同就变得异常突出和明显了。所以用牛顿力学去描述 β 蜕变中高速运动的电子、宇宙射线中的 μ 子以及加速器中的高能粒子，都要出现不可克服的矛盾。对于这些接近光速的粒子的行为，相对论是必不可少的。

爱因斯坦狭义相对论确立后，得到了广泛的实验验证，其中著名的质能关系式 $E = mc^2$ 更成为打开核能源宝库的钥匙。这充分显示了狭义相对论的光辉成就和理论的正确性。但是狭义相对论在解决引力问题上却是无能为力的。根据它所计算的水星运动轨道，并没有克服牛顿力学在这个问题上的失败。水星轨道的剩余进动是每百年 $43''$ ，而狭义相对论的计算值只相当于此数值的 $1/6$ 。而且狭义相对论所揭示的物理规律只能在所谓惯性系中才能成立，但是由什么决定这类惯性系呢？当时并不清楚。

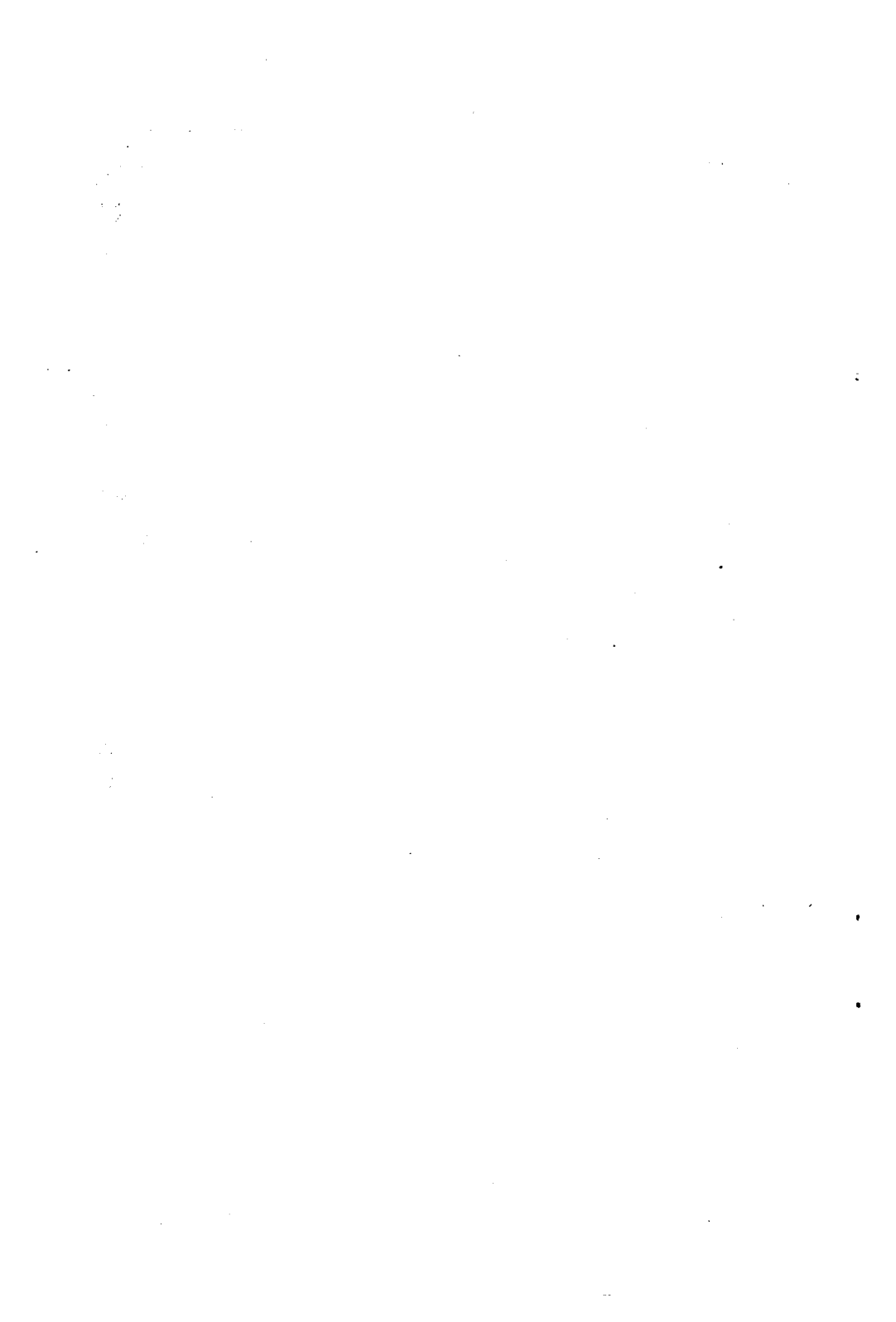
从1907年开始，爱因斯坦致力于更加普遍的相对论理论的研究，他也像在建立狭义相对论时一样，抓住了一个人所共知的事实，即惯性质量同引力质量之比是与物性无关的常数来进行探讨。经过多年努力，他终于在1915年建立了一个在本质上与牛顿引力理论完全不同的引力理论，这就是广义相对论。

广义相对论的建立使爱因斯坦找到了一种能与麦克斯韦电磁理论相应的引力理论。在电磁理论中，带电体将使其周围时空的电磁性质发生变化，即形成电磁场。而电磁力就是通过空间各点

都存在的电磁场作用于其他荷电质点上的，它不是超距作用。广义相对论也完全抛弃了牛顿引力中的超距作用概念。它认为物体质量和能量的存在将使其周围时空发生弯曲，而引力场实际就是这种时空弯曲的体现。这有如在绷紧的塑料薄膜上放一个重物，会引起膜面的下陷(弯曲)一样，薄膜上放置的其他小球，将滚向重物，从而造成了重物“吸引”其他小球的印象。

广义相对论建立不久就得到了一些观测的证实，引力红移、光线弯曲、水星近日点的进动构成了它的三大经典验证。爱因斯坦还应用广义相对论构造了一个有限无边的静态宇宙模型，这对于今日宇宙学的研究也是很有价值的。

广义相对论的建立是人类智慧的光辉结晶，也是物理观念上的一项最有价值的创造。它的发现是与爱因斯坦的名字紧紧连在一起的，也可以说是爱因斯坦个人思考的结果。由于一般情况下，引力场都很弱，所以它的实际应用远没有狭义相对论广泛。在60年代以前广义相对论的进展是不大的。1963年类星体发现以后，才使人们看到宇宙中可能存在着集中大量物质并具有强引力场的天体，从而大大地提高了人们对广义相对论的兴趣。其后，3 K微波背景辐射、中子星及其他一些高能天体现象的发现，更促进了广义相对论研究的进一步开展。目前广义相对论仍是最好的引力理论，它在天体物理研究中的地位也愈来愈重要了。



第一部分

狭义相对论及有关的物理问题

1 相对论中哪些观念发生了变化

我们知道，经典时空观的最显著特点就是：(1)时空是分离的，时间是绝对的。(2)时间尺度和空间尺度与物质运动无关。由此推得的伽利略变换也就集中反映了这一时空观的特点。

根据伽利略变换，当惯性参考系 Σ' 以匀速 v_0 相对于另一惯性参考系 Σ 运动时(图1.1)，任一点相应的直角坐标和时间将

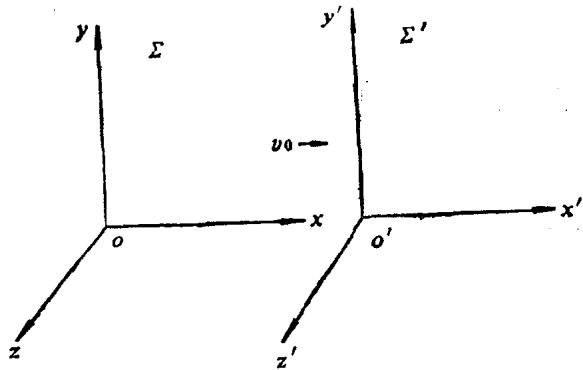


图 1.1 两个相对作匀速运动的坐标系

满足如下的变换关系：

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + v_0 t, \\ y &= y', \\ z &= z', \\ t &= t'. \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

这里时间具有特殊的地位，在上述伽利略变换时它是不变的。任何过程所经历的时间间隔在所有惯性系中都是相等的，即 $t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1$ 。而且任何量尺的长度也都相等，并且有

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2}.$$

由此得到的速度变换关系是

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v'_x + v_0, \\ v_y &= v'_y, \\ v_z &= v'_z. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

即：绝对速度 = 相对速度 + 牵连速度。这一变换关系对于通常低速运动的物体是完全适用的，但是当把它用于光的传播速度上就给出了明显荒谬的结果。

如果光线也符合伽利略速度变换规则，那么如图1.2所示的小

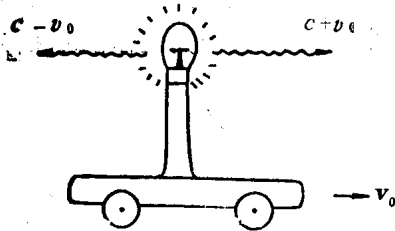


图 1.2 运动的小车

车在以速度 v_0 运动时，其上的灯泡所发出的光的传播速度对地面而言将不再是各向同性的了。沿运动方向光的传播速度似应为 $c + v_0$ ，而逆着小车运动方向传播的光线，其速度又将变为 $c - v_0$ 。但实际情形并非如此。

1887年迈克尔逊曾设想用精确的光学实验测量运动体光速的各向异性，但始终没有成功。相反地，他的实验却直接证明了：真空中光速是不和其他任何速度相叠加的，它在一切惯性参考系中都应等于一个普适常数 $c(3 \times 10^{10} \text{cm/s})$ 。这就是著名的光速不变原理。近代很多天体现象都进一步证明了这一原理的正确性。例如，超新星爆发，岁余消失就表明光速是不遵从伽利略速度变换规则的。否则这一遥远天体爆发时，它抛射的碎片所发出的光将以不同速度传播。向着我们运动的碎片，其光应先到，而垂直于我们视线的碎片，其光要后到。这就使得我们观测到强爆发的时间将持续25年以上，但实际只有1年左右。

伽利略速度合成规则的失效以及麦克斯韦电磁方程在伽利略变换下不具有不变性的事实，表明了经典时空观念是有其局限性的，这也就促发了人们寻求新的时空观的激情。1905年爱因斯坦在总结前人研究成果的基础上，系统地分析了当时光学和电磁学中经典时空观相矛盾的一些结果，从而提出了狭义相对论的基本原理。

狭义相对论所根据的基本原理有两条。其一是上面的光速不变原理。它表明，在任何惯性参考系里，真空中信号的传播速度都相同，即光在真空中的传播速度总是各向同性的，与光源的运动无关。其二是爱因斯坦的相对性原理。根据这一原理，在所有惯性参考系中，一切自然定律都应该具有相同的形式。也就是说，表示物理定律的各种方程在由一个惯性系到另一个惯性系的时间和空间的变换中，是保持形式不变的，即用不同惯性参考系的坐标和时间所写出的物理方程应有着同样的形式。因此在各个惯性参考系中所做的一切物理实验都应给出相同的结果，这些结果无法确定惯性系本身的运动情况。狭义相对论的这两条基本原理，要接受似乎并不困难，但是由它们给出的推论都改变了牛顿以来物理学的基础，导致了物理观念上一系列极其深刻的变化。

在叙述这些变化之前，我们还需对惯性参考系说几句话。经典力学中，牛顿第一定律表明了自然界中一定有惯性参考系存在，牛顿还给出了所谓绝对时间和绝对空间作为最基本的惯性系。在狭义相对论中，并不需要绝对时间和绝对空间的概念，但是其中惯性系的含义还是与经典力学中大体相同的，即在这类参考系中，一个自由运动的质点将保持静止或匀速直线运动状态。在实用上通常可以取地球参考系作为一个惯性系。更精确些可以选取以太阳系平均静止的点作为基准来构成一个惯性参考系。目前所使用的最好的实用惯性系是所谓FK4参考系。它是选取1535颗星体所组成的体系的平均不动的状态来作为参考物的。FK4是一个代号，最初只选了几百颗星来参与平均。几经扩大，才达到