

930208

041  
4024

041  
4024

高等学校教学用书

# 近代物理教程

梁灿彬

主审

李鉴增 赵峥 编



041  
4024

高等学校教学用书

# 近代物理教程

梁灿彬 主审  
李鉴增 赵 峥 编

北京师范大学出版社

(京)新登字 160 号

高等学校教学用书

近代物理教程

梁灿彬 主审

李鉴增 赵 峰 编

责任编辑 李桂福

★

北京师范大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印刷

---

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.375 字数: 327千

1992年3月第1版

1992年3月第1次印刷

印数: 1—2 300

---

ISBN 7-303-01233-8/O · 149

定价: 4.25 元

## 内 容 简 介

全书共分十章,包括狭义相对论、广义相对论、量子论等基本理论及其在原子、半导体、激光、原子核、基本粒子、天体等领域的应用。与其它类似教材不同,该书增加了广义相对论与天体物理两部分,在广义相对论中主要介绍其物理思想、实验验证以及它同狭义相对论、牛顿力学的区别。天体物理部分则主要介绍宇宙论、黑洞等的主要结论。

全书贯彻循序渐进,少而精原则。考虑到不同层次学生的数学基础,努力做到知识性、趣味性与可读性相结合,主要讲清基本现象、基本概念和基本规律。

的  
的  
和  
理论  
应用  
余部  
天体  
以及  
介绍  
意介  
超新  
在  
则。考  
基本概  
数学指  
各领域  
合,向学  
趣,开发  
到此目  
少的缺,

## 前 言

为了在理工科大学中加强近代物理教学,使学生对近代物理的基本内容、研究方法以及当前的研究状况有一个基本的、较全面的了解,我们编写了这本教材,可作为理工科大学非物理类各专业和高等师范专科学校物理科的《近代物理》课教材。

全书共分十章,包括狭义相对论、广义相对论、量子论等基本理论及其在原子、半导体、激光、原子核、基本粒子、天体等领域的应用,各校可根据本专业的特点及要求,选讲其中的若干内容,其余部分可做为补充读物,由有兴趣的学生自学。

与其它类似教材的不同之处之一是我们增加了广义相对论与天体物理两章。在广义相对论部分主要介绍其物理思想、实验验证以及它同狭义相对论、牛顿力学的区别。在天体物理部分则主要介绍人们普遍关心的宇宙论,黑洞等的主要结论。此外,书中还注意介绍近代物理各分支的最新研究成果。如1987年的超导研究、超新星爆发的观测以及超弦理论等在书中都做了一些介绍。

在本书的编写过程中,我们注意贯彻循序渐进,少而精等原则。考虑到不同层次学生的数学基础不同,主要从讲清基本现象、基本概念和基本规律出发,抓住问题的物理本质,尽量避免繁琐的数学推导,并力图广泛介绍各基本理论的思路 and 主要结论及其在各领域的最新研究成果,努力做到知识性、趣味性与可读性相结合,向学生传授更多、更新、更广泛的知识,以激发学生的学习兴趣,开发学生的智力。当然,这仅是我们的主观愿望,是否能够达到此目的,要靠读者来检验。由于我们的水平不高,书中一定有不少的缺点和错误,恳请大家批评指正。

在本书正式出版之际，作者要特别感谢本书的主审——北京师范大学物理系梁灿彬教授。在本书的前身之一——《近代物理补充讲义》(1986年由北京广播学院印刷)的编写过程中，就曾经参考了他的《广义相对论与黑洞物理学》讲义，吸收了其中的某些观点和讲法，在这次改编过程中，他又给予了许多具体的指导和帮助，并亲自修改、改写了其中的若干章节。作者还要感谢为本书出版给予极大帮助的北京师范大学出版社的领导和李桂福编辑。

编者

1991年7月

# 目 录

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第一章 狭义相对论         | 1   |
| § 1 狭义相对论的基本原理    | 1   |
| § 2 洛伦兹变换         | 7   |
| § 3 相对论运动学        | 16  |
| § 4 相对论质点动力学      | 28  |
| 习题                | 38  |
| 第二章 光的粒子性         | 42  |
| § 1 黑体辐射          | 42  |
| § 2 光电效应和爱因斯坦光子理论 | 52  |
| § 3 康普顿效应         | 59  |
| 习题                | 63  |
| 第三章 实物粒子的波动性      | 65  |
| § 1 德布罗意波         | 65  |
| § 2 波函数           | 72  |
| § 3 薛定格方程及其应用     | 76  |
| § 4 不确定关系         | 89  |
| 习题                | 94  |
| 第四章 原子结构          | 97  |
| § 1 玻尔理论          | 98  |
| § 2 量子力学对氢原子的处理   | 111 |
| § 3 多电子原子概述       | 124 |
| § 4 碱金属原子         | 133 |
| § 5 具有两个价电子的原子    | 138 |
| 习题                | 142 |
| 第五章 激光            | 145 |

|            |               |     |
|------------|---------------|-----|
| §1         | 光的自发辐射和受激辐射   | 145 |
| §2         | 激光的基本原理       | 150 |
| §3         | 激光的特性和应用      | 159 |
| §4         | 激光器简介         | 163 |
| §5         | 激光通讯          | 170 |
|            | 习题            | 176 |
| 第六章 固体导电理论 |               | 178 |
| §1         | 晶体            | 178 |
| §2         | 晶体的能带结构       | 183 |
| §3         | 导体、绝缘体和半导体    | 188 |
| §4         | P型半导体和N型半导体   | 191 |
| §5         | 半导体器件         | 193 |
| §6         | 超导电性          | 203 |
|            | 习题            | 213 |
|            | 资料: 超导体研究大事记  | 215 |
| 第七章 原子核物理  |               | 222 |
| §1         | 原子核的基本性质      | 222 |
| §2         | 放射性           | 229 |
| §3         | 原子核结构模型       | 246 |
| §4         | 原子核反应         | 252 |
| §5         | 重核的裂变         | 258 |
| §6         | 轻核的聚变         | 264 |
|            | 习题            | 268 |
| 第八章 粒子物理   |               | 270 |
| §1         | 高能粒子源         | 270 |
| §2         | 粒子的分类         | 273 |
| §3         | 粒子的特性和守恒定律    | 278 |
| §4         | 夸克模型          | 288 |
| §5         | 粒子的相互作用及其统一模型 | 293 |
|            | 习题            | 298 |



|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第九章 广义相对论基础        | 300 |
| § 1 广义相对论的数字基础     | 300 |
| § 2 广义相对论的建立       | 317 |
| § 3 广义相对论中物理定律的导出  | 323 |
| § 4 引力场的时间延缓效应     | 325 |
| § 5 爱因斯坦场方程和史瓦西解   | 328 |
| § 6 广义相对论的实验验证     | 330 |
| 第十章 天体物理学          | 338 |
| § 1 天文学基础知识        | 338 |
| § 2 宇宙研究简史         | 346 |
| § 3 宇宙学原理          | 349 |
| § 4 大爆炸宇宙论         | 352 |
| § 5 恒星的形成和演化       | 365 |
| § 6 史瓦西黑洞和克尔黑洞     | 373 |
| § 7 黑洞的搜寻和利用       | 381 |
| § 8 黑洞物理学简介        | 385 |
| 附录                 | 390 |
| I 习题答案             | 390 |
| II 一些物理常数          | 394 |
| III 电子组态           | 395 |
| IV 中性原子质量、半衰期、比结合能 | 397 |
| V 粒子简表             | 412 |

# 第一章 狭义相对论

爱因斯坦在 1905 年创立的狭义相对论,是在引力场可以忽略时,关于时间、空间和运动关系的理论。它把牛顿力学中对宏观低速运动物体的研究推广到高速运动物体,得到了一整套崭新的时空观,使人们对时空的认识出现了一大飞跃。狭义相对论(以及广义相对论)不仅同量子力学一起构成了近代物理的两大支柱,而且是现代工程技术不可缺少的理论基础,它的一切结论与观测及实验符合得非常好,经受住了客观实践的检验。

尽管狭义相对论也可以用来讨论引力场可以忽略时的非惯性系中的问题,但本章只研究物体在惯性系中的运动。

## § 1 狭义相对论的基本原理

### 1.1 经典物理的一个两难问题

大家知道,在牛顿力学中有一个重要的原理,这就是伽利略**相对性原理**。它的内容是:在任何惯性参考系中力学定律都是相同的。这一原理能否推广到整个经典物理?人们发现,它在麦克斯韦的电磁理论中遇到了问题。麦氏理论的一个伟大成果是预言电磁波的存在,并证明电磁波在真空中的速度与真空中的光速  $c$  相同,从而揭示了光的电磁本性。根据相对性原理,既然电磁场在某一惯性系中满足麦氏方程,在所有惯性系中也应满足,因而光波在所有惯性系中的速率都应  $c$ ;然而,由熟知的经典速度合成公式可知,如果光波对某惯性系的速率为  $c$ ,对其它惯性系就不会是  $c$  (因为各惯性系间有相对速度),这就构成一个两难问题。

看来,在经典物理的框架中,我们只容许在以下两种可能中选择一个。

选择 (i): 相对性原理只适用于力学而不适用于电磁学。也就是说,存在一个特殊的惯性系,在该惯性系中,麦克斯韦电磁场理论成立,光在真空中的速度是  $c$ ; 而在其它的惯性系中,光在真空中的速度都不是  $c$ 。这个特殊的惯性系在历史上叫“以太系”。

选择 (ii): 相对性原理对力学、电磁学等一切物理规律都适用,经典力学的速度合成公式永远成立,但麦氏理论不正确。应该存在(但有待寻找)一个不同于麦氏理论的电磁理论,它在所有惯性系中的方程都有相同的形式。

为判断选择 (i) 正确与否,美国物理学家迈克尔孙和莫雷自 1881 年开始做了一个有名的实验,用迈克尔孙干涉仪测定地球相对于以太系的速度。如果以太系存在,由于地球在绕太阳转动,地球与以太之间可能有相对运动,这就使光相对于地球的速率不是  $c$ 。设以太系相对于地球的速度为  $v$ ,当光与  $v$  同向时,光对地球的速率  $u = c + v$ ; 当光与  $v$  反向时,光对地球的速率  $u = c - v$ ; 当光与  $v$  垂直时(如图 1-1,此图可看作对地面的俯视图),则光相对于地球速率  $u = \sqrt{c^2 - v^2}$ (所谓光与  $v$  垂直,是地

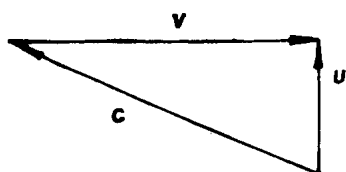


图 1-1 光相对于以太和地球的速度

球观者所看到的、即应是  $u$  与  $v$  垂直,既然假设地球与以太之间有相对速度  $v$ ,光相对于以太的速度  $c$  就不与  $v$  垂直,根据相对速度公式  $c + v = u$ ,即得图 1-1)。为了判明光相对于地球的速率是否真有此种不同,迈克尔孙和莫雷设计了图 1-2 所示的实验。令光从光源  $S$  发出,经一个  $45^\circ$  放置的半透明镜面  $M$  后一半透射(光 1)、一半反射(光 2)。光 1 被镜  $M_1$  反射回  $M$ ,又被  $M$  反射而进入望远镜  $T$ ;

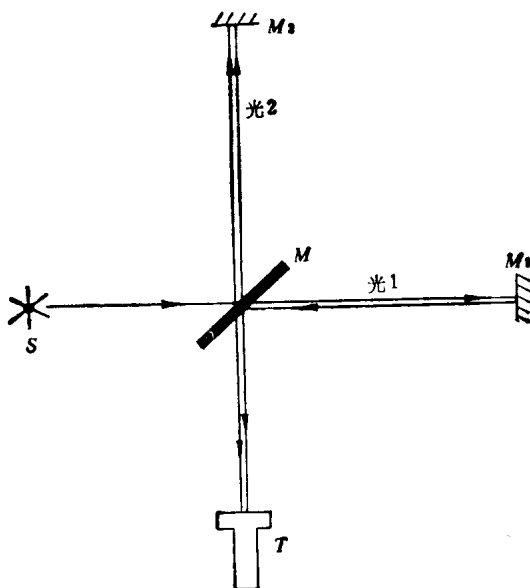


图 1-2 迈克尔逊-莫雷实验

光 2 被镜  $M_2$  反射后经  $M$  透射也进入  $T$ ，使两光发生干涉，干涉花样取决于光程差，而光程差又取决于光速。设光 1 与以太速度  $v$  平行，则光 1 从  $M$  到  $M_1$  再回到  $M$  的时间为

$$t_1 = \frac{L_1}{c+v} + \frac{L_1}{c-v} = \frac{2L_1}{c(1-v^2/c^2)}$$

其中  $L_1$  是  $M$  与  $M_1$  的距离。光 2 从  $M$  到  $M_2$  再回到  $M$  的时间为

$$t_2 = \frac{2L_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L_2}{c(1-v^2/c^2)^{1/2}}$$

其中  $L_2$  是  $M$  与  $M_2$  的距离。两光到达  $T$  的时间差

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} \left[ \frac{L_2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} - \frac{L_1}{(1-v^2/c^2)} \right]$$

决定着干涉花样。将整个仪器水平旋转  $90^\circ$ ，时间差就变为

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{2}{c} \left[ \frac{L_2}{(1 - v^2/c^2)} - \frac{L_1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right]$$

将  $\Delta t' - \Delta t$  用牛顿二项式定理展开,忽略掉  $v^2/c^2$  的高阶项得:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{L_1 + L_2}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

只要  $v \neq 0$ , 旋转后的干涉花样就应有改变。但多次实验都没有发现任何改变,说明  $v = 0$ 。这表明,地球虽然绕太阳运动,但它与以太系之间没有相对速度。为了维持以太系的存在,有人只好假定以太被地球拖着一同运动(从而  $v = 0$ ),但这又与其它实验(如“光行差实验”,略)矛盾。因此选择 (i) 遇到了严重困难。另一方面,接受选择 (ii) 就意味着修改麦氏电磁理论,这方面的努力也遭到失败(由修改后的理论预言的电学现象被实验所否定)。于是,经典物理在 19 世纪末遇到了一个两难问题。许多物理学家曾提出多种理论,但都得不到满意的解释。究其原因,关键就在于所有这些理论都没能跳出经典时空观的框架。

## 1.2 同时的相对性

对于上述两难问题,爱因斯坦以惊人的洞察力提出了一个不同于选择 (i) 和 (ii) 的革命性的解决方案。他经过许多年的反复思考,对“绝对同时性”提出了质疑,这成了他解决这个两难问题的突破口。他认为,只要否定了绝对同时性,麦氏理论和相对性原理是可以同时共存的。

绝对同时性是指,对某个观者(参考系)同时发生的两个事件,对其他观者也一定同时发生。这与人们的直觉完全一致。但是,爱因斯坦指出,当问题涉及到高速运动时,这是不正确的。他用以下爱因斯坦火车的例子说明这一点。

设火车以匀速  $v$  向右行进的过程中,发生两次雷击,分别都打在火车和地上,留下四个永久性的记号,分别用  $A$ 、 $B$  和  $A'$ 、 $B'$  表示,如图 1-3 所示,令火车与地面上的观察者  $C$  和  $C'$  位于

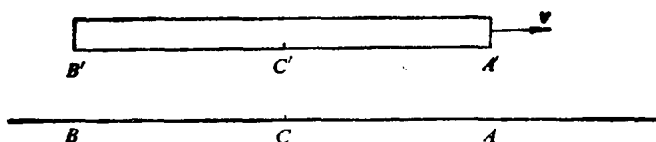


图 1-3 爱因斯坦火车

自身参考系上两个记号的中点,即  $AC = BC$ ,  $A'C' = C'B'$ 。当雷击在  $A$  和  $A'$  时,这两点是重合的;同样,  $B$  和  $B'$  也重合。如果观者  $C$  看到两个雷击是同时发生的,则在  $A$  和  $A'$  重合,  $B$  和  $B'$  重合时,  $C$  和  $C'$  也重合。这里的两个雷击同时发生,是指由  $A$  和  $B$  发出的光同时得到  $C$ 。

由于光信号的传播需要一定的时间,火车观者  $C'$  在向右运动,则从  $A$  和  $A'$  发出的信号只有在通过  $C'$  后才能到达  $C$ ,即先到  $C'$  后到  $C$  点;同样,从  $B$  和  $B'$  发出的信号则先到  $C$  点后到  $C'$  点。由于两光同时到  $C$ ,则一定不同时到  $C'$ ,因而  $C'$  看到这两个事件不同时发生,而是先击中  $A$  和  $A'$  点,后击中  $B$  和  $B'$  点。另一方面,若火车观者看见光信号同时到达  $C'$ ,认为这两个事件同时发生,则  $A$  和  $A'$  发出的信号到达  $C$  时将落后于  $B$  和  $B'$  发出的信号,即地面观者认为雷电先击中  $B$  和  $B'$  点,后击中  $A$  和  $A'$  点。

这个例子说明,同时是相对的,对某一参考系是同时发生的两个事件,对另一参考系不一定是同时的。当问题只涉及低速运动时,同时的相对性很不明显,所以人们由直觉而得的经验总认为同时是绝对的。由于经典物理中的速度合成公式是绝对同时性的产物,因此它只能是一个正确的速度合成公式在低速情况下的近似。

基于对绝对同时性的否定,爱因斯坦对经典物理的两难问题提出了不同于上述两种选择的第三种选择,

选择 (iii): 相对性原理对力学和电磁学都正确, 麦氏理论是电磁现象的正确理论, 不正确的只是经典物理的速度合成公式。存在一个新的速度合成公式, 它能保证任何参考系中光在真空中的速度都是  $c$ 。

在上述选择的基础上, 爱因斯坦在 1905 年发表著名论文《论运动物体的电动力学》, 宣告了狭义相对论的诞生。

### 1.3 狭义相对论的基本原理

原理是从实践中总结、推广而得出的一种假设, 它作为新理论的基础, 不能用旧理论来证明, 而只能看由它推出的一切结论能否经得住实践的检验。

以下两条原理是建立狭义相对论的基础。八十多年来科学技术的实践证明, 在引力场可以忽略时, 狭义相对论的一切结论都同实验符合, 这也就间接证明了这两条基本原理的正确性。

#### (i) 相对性原理

其表述为: **在任何惯性参考系中, 一切物理定律都具有相同的形式。**

这个原理最初是由伽利略在研究力学现象时提出的。爱因斯坦则把它推广到一切物理现象。这说明麦克斯韦的电磁场理论对所有惯性系都成立, 不存在任何优越的“以太”参考系。企图在某一参考系中进行物理实验以求出它相对于“以太”参考系的速度是不可能的, 也是没有意义的。

#### (ii) 光速不变原理

其表述为: **真空中任何方向的光速对任何惯性系都是  $c$ , 与光源的运动情况无关。**

尽管光速不变原理与经典力学的速度合成公式相矛盾, 但它同实验相符合, 迈克尔孙-莫雷实验等许多实验都是这个原理的坚实的理论基础。

光速不变原理和相对性原理是两条互相独立的原理, 满足相

对性原理只说明物理规律在各个惯性系中的表现形式相同，并无任何速度不变的结论。实际上有许多理论(例如牛顿力学)承认相对性原理，但不承认光速不变。而狭义相对论则同时承认这两个原理，并把它作为自己理论的出发点。

## § 2 洛 伦 兹 变 换

相对论中的有一个基本概念是**事件**。一个实际的事件总是发生在空间中的某一区域  $\Delta V$ ，并在某段时间  $\Delta t$  内完成的，但当  $\Delta V$  和  $\Delta t$  都很小时，可以近似认为事件发生在空间的某一点和时间的某一瞬间。这种理想化了的事件就可由三个空间坐标(例如  $x, y, z$ ) 和一个时间坐标  $t$  来描写。今后提到事件时总是指这种理想化的事件。

同一事件在不同坐标系中有不同的坐标，两组坐标之间的关系叫做坐标变换。不同的理论有着不同的坐标变换。

### 2.1 伽利略变换

按照伽利略(及牛顿)的时空观，时间与坐标系无关，同一事件在不同的坐标系中有相同的时间坐标，因此只需找出同一事件在两个坐标系中空间坐标的关系。

在图 1-4 中，设两个惯性坐标系  $K$  和  $K'$  的  $x$  轴重合， $y, z$  轴分别平行， $K'$  系相对于  $K$  系以速度  $v$  沿  $x$  正方向运动。选择两系原点重合时为计时起点 ( $t = t' = 0$ )。由图不难看出，同一事件  $P$  在两个坐标系中的坐标  $x, y, z$  和  $x', y', z'$  之间有以下关系：

$$\begin{aligned} x' &= x - vt, \\ y' &= y, \\ z' &= z, \end{aligned} \tag{1.1}$$

再加上前面的假设



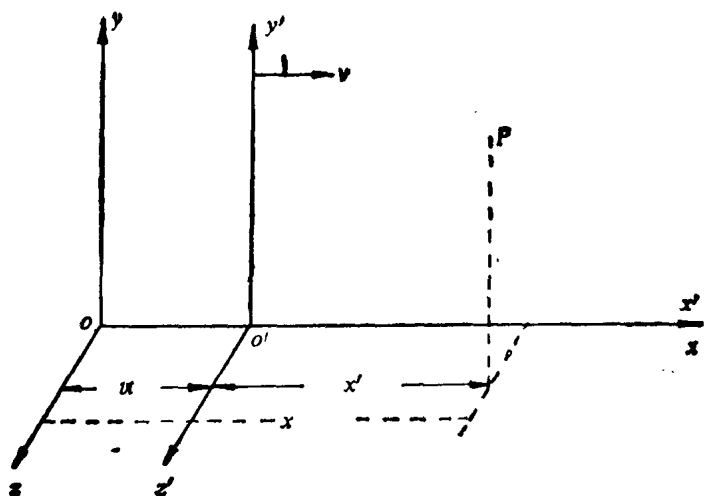


图 1-4  $K'$  系相对  $K$  系以速度  $v$  向右运动

$$t' = t,$$

这四个式子就组成了一套坐标变换,称之为伽利略变换。

将前三个式子两边分别对  $t' = t$  微分,得:

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = u_x - v$$

$$u'_y = u_y,$$

$$u'_z = u_z,$$

写成矢量形式,即

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{v}, \quad (1.2)$$

其中  $\mathbf{u}$  和  $\mathbf{u}'$  分别是质点相对于  $K$  和  $K'$  系的速度。(1-2) 式便是经典力学中的速度合成公式。虽然大量实验已证明,它在低速情况下的正确性,但它却同光速不变原理相矛盾,说明它不适用于高速运动情况。下面我们从狭义相对论的两个基本原理出发,推出一个反映狭义相对论时空观的坐标变换——洛伦兹变换。

## 2.2 洛伦兹变换

• • •