近代物理教学问题研究

张学龙　王新民　朱江　编著

黑 龙 江 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书对近代物理教学中的若干基本问题进行详尽和深入的讨论，特别对于教材中的重点和难点内容，从不同的角度或用几种方法阐述，对一些问题的处理尽可能多地给出不同层次的新方法．每章、每节自成体系，可以相对独立．

本书主要讨论和研究与下列四方面内容有关的问题：一、相对论，主要是狭义相对论；二、量子理论，包括光量子理论、前期量子理论和量子力学基础；三、原子物理学（含单电子原子和多电子原子的内容）；四、原子核物理学．

本书论及的问题与《近代物理学基础》课程相配合，密切联系师专系统的教学实际，但高于师专层次的教学要求，可供高等师范院校和其它相近专业的基础课教师参考，特别适用于师专、教育学院的教师和物理教材、教法专业的研究生参考．

序　言

目前高等师范专科学校普遍开设了“近代物理学基础”这门课程，教师对于教材内容的理解与讲授得法是至关重要的。张学龙、王新民、朱江同志，积多年来教学实践的经验与体会，撰写了这本与教材内容密切配合的教学参考书，是一项十分有益的工作。

该书对于教材中的若干问题进行了详尽和深入的讨论，这些问题大多数来自于作者在教学实践及研究中的体会。书中对不同的问题讨论方法不尽相同，有的问题是从不同的角度或用几种不同的方式进行阐述的；有的问题按深浅程度分层次区别处理；特别是对其它同类书籍中较少详细论述的问题作了相当全面地研讨。可以说此书是一本集对教材内容剖析与教学方法研究于一体的教学参考书。

作者在长期的教学实践中，认真钻研教材内容，开展教学研究，故此才能写出这本内容丰富、切实可用的教学参考书。该书对于高等师范院校从事近代物理课程教学的教师来说参考价值无疑是很高的；对于物理专业的大学生和物理教材教法专业的研究生来说也是一本受益匪浅的读物。

愿读者能从该书中得到收益和启迪，谨此为序。

李振亚

1991.12.

作者的话

随着科学技术的发展，以相对论和量子理论为两大基石的近代物理学日益重要。近十多年来，国外许多大学的工程专业将它列为必修课程，在我国不少专业的基础物理教学中，近代物理内容的比重逐渐增加，相当数量的工科院校还独立开设了这门课程。高等师范专科学校二年制的物理专业虽然不单独开设量子力学和相对论课程，但大多数学校已将过去的原子物理学课程扩展为近代物理学基础，其内容包括相对论、量子理论、原子物理、原子核物理和粒子物理简介五个部分。本书便是与这些内容有关的一本教学参考书。

作者根据自己的教学实践以及师专许多物理教师的看法，认为有必要就近代物理教学中的某些问题进行认真的研讨，进一步提高教学质量，以适应教学改革的需要。基于这种思想，我们将教学中积累的资料和教学中的经验与体会进行了加工整理，其中有的内容在全国师专近代物理研究会的学术年会上交流和讨论过，有些则参阅了国内外有关文献资料（其来源列在每一章末尾的“参考文献”中），更多的是作者撰写的教学研究论文的一部分。

本书围绕下列五章内容的有关问题进行讨论：第一章，相对论，主要是狭义相对论（因为“广义相对论”在近代物理基础课程中只作简单介绍）；第二章是量子理论，内容包括光量子理论、前期量子理论和量子力学基础；原子物理学占全书比重较大，用原子物理（一）和原子物理（二）作为

第三、四两章，分别讨论单电子原子与多电子原子；最后一章是原子核物理（含极少部分的粒子物理内容）。

本书论及的问题与《近代物理学基础》课程相配合，密切联系师专教学的实际，但高于师专层次的教学要求，力求对高等师范院校和其它相近专业的基础课教师、教材教法专业的研究生和大学本、专科学生都有参考价值。书中对难于理解的问题从几个不同的方面加以阐述；对似是而非的问题在明确概念、理顺逻辑关系的基础上进行分析讨论；对一些问题的处理，尽可能地给出多种新方法，其中有简便易行的也有理论层次较高的；对有关的学科前沿和新知识等也作了适当介绍。由于这是一本与教学紧密相关的参考书，有些问题的讨论难以深入，但愿能引起读者的进一步思考。同时，还有些值得讨论且很有趣的问题，因不宜单独列章而未能写入本书，这种忍痛割爱是为了保证本书有一个相对完整的结构体系。同样的目的，我们也直接引录了一些文献资料，籍此机会，谨向原作者表示诚挚的谢意。

本书第一、二章由张学龙编写；第三、四章由王新民编写；第五章由朱江编写。全书由张学龙、王新民负责统稿。书稿经吴祖嵋副教授认真审阅，并提出宝贵意见，李振亚教授在百忙中帮助审查并为本书作序，我们一并表示衷心的感谢。囿于学识，书中错误与不妥之处难免，恳请读者指正。

作　者

1991年初冬于苏州

目　录

第一章　相对论

相对论是本世纪物理学最大的成就之一。1905年，爱因斯坦（A. Einstein）提出狭义相对论的基本原理，建立了比经典理论适用范围更广、更准确的物理规律，揭示了质量与能量之间的内在联系。1916年，爱因斯坦又进一步创立了广义相对论，他从匀加速参照系与引力场等效的原理出发，提出了全新的引力理论和时空结构。

相对论所涉及到的基本物理概念，与日常生活经验以及由牛顿力学建立起来的观念和知识，往往在表面上看来有不少似乎是相悖的，这会给初学者带来许多困惑。本章先给出推导洛仑兹（H. A. Lorentz）变换关系式的几种简易方法，并用图示法和矩阵方法表示狭义相对论的基本内容，然后讨论狭义相对论时空观及运动学有关问题，最后一节论述广义相对论的两个问题。

§ 1.1　导出洛仑兹变换式的几种简易方法

洛仑兹变换是狭义相对论的基本内容。下面先用五种不同的简易方法导出两惯性系沿某一坐标轴相对运动时的洛仑兹变换关系，最后给出沿任意方向运动时的洛仑兹变换式。

一、方法1——空间各向同性

令惯性系K_2以匀速v_{12}相对于K_1沿X轴正向运动，假设它们之间的相互变换是线性的，即时空各部分都具有物理等价性，因而变换方程为

$$x_1=\alpha_{12}x_2+\alpha_{12}'t_2 \tag{1}$$

$$t_1=\beta_{12}x_2+\gamma_{12}t_2 \tag{2}$$

由于K_1系的原点（$x_1=0$）相对于K_2系以速度v_{21}沿x轴负向运动，K_2系描述K_1系的原点（$x_1=0$）有$x_2=-v_{12}t_2$，联系到（1）式可得 $\alpha_{12}'=\alpha_{12}v_{12}$。代入变换关系

$$x_1=\alpha_{12}(x_2+v_{12}t_2) \tag{3}$$

类似地，K_1系观测K_2系的原点（$x_2=0$）有 $x_1=v_{12}t_1$。代入（2）式并利用上述其它关系式可得$\gamma_{12}=\alpha_{12}$，因而

$$t_1=\alpha_{12}(\omega_{12}x_2+t_2) \tag{4}$$

式中$\omega_{12}\equiv\beta_{12}/\alpha_{12}$为$v_{12}$的函数。

若有惯性系K_3相对于K_1、K_2系的运动速度分别为v_{13}和v_{23}，则上述类似的方程对于（x_1，t_1）和（x_3，t_3）以及（x_2，t_2，）和（x_3，t_3）之间的变换也适用，即有

$$x_1=\alpha_{13}(x_3+v_{13}t_3) \tag{5}$$

$$t_1=\alpha_{13}(\omega_{13}x_3+t_3) \tag{6}$$

$$x_2=\alpha_{23}(x_3+v_{23}t_3) \tag{7}$$

$$t_2=\alpha_{23}(\omega_{23}x_3+t_3) \tag{8}$$

联列（3）～（8）式，消去x_1、t_1和x_2、t_2得下列两方程

$$x_3\left(\alpha_{23}+v_{12}\alpha_{23}\omega_{23}-\frac{\alpha_{13}}{\alpha_{12}}\right)+t_3(\alpha_{23}v_{23}+\alpha_{23}v_{12}$$

$$-\nu_{13}\frac{\alpha_{13}}{\alpha_{12}}) = 0 \tag{9}$$

$$x_3(\omega_{12}\alpha_{23}+\alpha_{23}\omega_{23}-\omega_{13}\frac{\alpha_{13}}{\alpha_{12}})+t_3(\alpha_{23}$$

$$+\omega_{12}\alpha_{23}\nu_{23}-\frac{\alpha_{13}}{\alpha_{12}}) = 0 \tag{10}$$

方程（9）和（10）对x_3和t_3的所有值都有效，即要求x_3和t_3的系数必须为零。由方程（9）中x_3的系数等式和方程（10）中t_3的系数等式解得$\omega_{12}\nu_{23}=\omega_{23}\nu_{12}$，因而

$$\frac{\omega_{12}}{\nu_{12}} = \frac{\omega_{23}}{\nu_{23}} = \text{常数}$$

在其余的两个系数等式中，利用这一结果容易得到比值ω_{13}/ν_{13}等于同一常数，该常数具有（速度）$^{-2}$的量纲，令其为c^{-2}，于是（4）式可写成

$$t_1=\alpha_{12}(\frac{\nu_{12}}{c^2}x_2+t_2) \tag{11}$$

对（3）式和（11）式分别微分后取二者之比值，得到由K_2系到K_1系的速度变换关系

$$u_1=\frac{u_2+\nu_{12}}{\nu_{12}u_2/c^2+1}$$

若令$u_2=c$，即有K_2中的速度c变换到K_1系具有相同的值，因而表明c为一不变速度。

不难看出，（3）式和（11）式即为洛仑兹变换的标准形式。因为K_1以速度$-\nu_{12}$相对于K_2运动，故有

$$x_2=\alpha_{21}(x_1-\nu_{12}t_1) \tag{12}$$

将（3）式和（11）式联列消去t_2，得下式

$$\alpha_{12}\left(1-\frac{v_{12}^2}{c^2}\right)x_2 = x_1 - v_{12}t_1 \qquad (13)$$

比较（12）和（13）式，有

$$\alpha_{12}\alpha_{21} = \frac{1}{1-v_{12}^2/c^2} \qquad (14)$$

按照空间的各向同性，即使倒转x轴的方向，方程的形式仍然相同。取$x_1\to -x_1$，$x_2\to -x_2$，$v_{12}\to -v_{12}$，$\alpha_{12}\to \alpha_{21}$，$\alpha_{12}$是$v_{12}$的函数，则$\alpha_{21}$也是$v_{21}(=-v_{12})$的函数，则类似（3）式可得

$$-x_1 = \alpha_{21}(-x_2 - v_{12}t_2)$$

与（3）式比较可以看出$\alpha_{12}=\alpha_{21}$，所以（14）式为

$$\alpha_{12} = \frac{1}{\sqrt{1-v_{12}^2/c^2}} \qquad (15)$$

如果认为c为无限大，则$\alpha_{12}=1$，上述变换就是伽利略（G.Galileo）变换。事实上，实验表明c为一有限值且等于光的速度。因而，我们得到的便是洛仑兹变换。

二、方法2——时空测量

设坐标系K′相对于K的速度v恒定。选取v的方向作为x轴与x'轴的正向(两轴重合，如图1－1所示)，xoy面与$x'o'y'$面始终重合，因此，无论x、y、t和x'、y'、t'取何值，$z=0$和$z'=0$总同时成

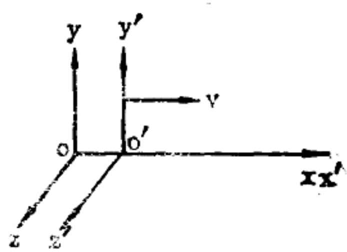

图1－1

立。于是有$z'=\alpha z$或$z=\alpha z'$，两式中的α为同一常数，因为z与z'之间的相互变换是对等的，从而解得$\alpha=\pm 1$。由于z轴与z'轴指向相同，则应取$\alpha=1$，即得

$$z'=z \tag{16}$$

考虑zox面与$z'o'x'$面始终重合，同理可得

$$y'=y \tag{17}$$

yoz面与$y'o'z'$面始终平行，取和K'系原点相重合的一点（即$x'=0$），这点相对于K系坐标为x，在t时刻有$x=vt$。可见，在空间同一点上$x-vt=0$与$x'=0$同时成立，根据相对性原理和初始时刻（$t=t'=0$）坐标系K'和K的原点重合可知，从一惯性系到另一惯性系的变换必须是线性齐次的，因此有

$$x'=\gamma(x-vt) \tag{18}$$

式中γ为一与x、t无关的常数。假设在K'系和K系原点重合时，即$t=t'=0$时刻发出一闪光，按照光速不变原理，有

$$x=ct,\quad x'=ct' \tag{19}$$

再利用（18）式

$$t'=\gamma\left(1-\frac{v}{c}\right)t \tag{20}$$

同理，t'时刻空间某点与K系原点重合（$x=0$），该点相对于K'系的坐标为$x'=-vt'$，即$x=0$和$x'+vt'=0$同时成立，从而有

$$x=\gamma'(x'+vt') \tag{21}$$

式中γ'也是与x'、t'无关的常数。再由（19）式联列得

$$t=\gamma'(1+v/c)t' \tag{22}$$

静止长度为l_0的棒固定在K'系中，其两端坐标差$x_2'-$

$x_1' = l_0$，在K系中同一时刻测棒两端坐标，按（18）式，应为

$$x_2 = \frac{x_2'}{\gamma} + vt, \quad x_1 = \frac{x_1'}{\gamma} + vt$$

即 $$x_2 - x_1 = \frac{1}{\gamma}(x_2' - x_1') = \frac{l_0}{\gamma}$$

若棒固定在K系中有，$x_2 - x_1 = l_0$，利用(21)式可得在K′系中测得的以同样速度v运动的棒长为

$$x_2' - x_1' = \frac{1}{\gamma'}(x_2 - x_1) = \frac{l_0}{\gamma'}$$

棒相对于两参考系的速度相同，根据相对性原理，在K′和系K系中测得的以同样速度运动的棒长应相等，因此有$\gamma' = \gamma$。于是由（20）、（22）两式解得

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \tag{23}$$

由于两坐标系的x、x'轴正向相同，故γ不取负值。综上所得（16）、（17）、(18)、(20)和(23)式即为洛仑兹变换式。

三、方法3——时钟同步

这种方法不作变换是线性的假设，但根据狭义相对性原理，我们假定：（1）在所有惯性系中光的速度都相同；（2）某惯性系中匀速运动的时钟相对于与惯性系同步的时钟，其快慢之比恒定，比值仅依赖于时钟在惯性系中的运动速度，而与其运动方向或惯性系无关。注意，这后一假定也是狭义相对性原理的一个直接结果。

设惯性系K′（T'，X'）相对于惯性系$K(T, X)$以匀速v沿X正向运动，两惯性系的坐标轴互相平行，在$T = T' =$