

902500

普通物理学

第五分册：近代物理学 学习指导书

★ 梁绍荣 王正清 史天一 王天泰 编



高等教育出版社

33

8824 J

T. 5

882500

33

330721

《普通物理学 (第五分册: 近代物理学)》

学 习 指 导 书

梁绍荣 王正清 史天一 王天泰 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是为使用师专及中学教师培训教材——梁绍荣等主编《普通物理学(第五分册:近代物理学)》的读者而编写的。其目的是根据师专、卫星电视教育、函授教育和成人业余自学的特点,指导学员学好本门课程。

本书是按教材结构和教学要求分章编写的。每章包括基本要求、重点难点分析、例题和自检检查题等部分。书末有自检检查题参考答案。

本书是通过中国教育电视参加中学教师培训的物理专业学员必备的辅助教材,也是函授院校学员和自学者使用本教材时的重要参考书,亦可供师专及教育学院的师生以及其他读者参考。

《普通物理学(第五分册:近代物理学)》

学习指导书

梁绍荣 王正清 史天一 王天泰 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

*

开本 850×1168 1/32 印张6.2 字数150 000

1989年10月第1版 1989年 月第1次印刷

印数0001—5 000

ISBN 7-04-002165-X/O·764

定价 1.75 元

前 言

这是《普通物理学（第五分册：近代物理学）》的学习指导书，其体例和前四本相似，仍是以章为单元编写的，头三篇和第五篇，每章分基本要求、重点难点分析和自检题三部分；第四篇因内容较新，写的较通俗，所以在指导书中仅讲其中每章的基本要求，同时作少量的说明；近代物理学的重点是前三篇。

本书的第1—4章由唐山师专、唐山教育学院王天泰同志执笔；第5—9及14章由宜昌师专王正清同志执笔；第10—13章由北京师大史天一同志执笔，全书由北京师大梁绍荣同志复核定稿。

本书在编写过程中，经过编者多次讨论和修改，最后才复核定稿。但由于编者水平有限，缺点、错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

一九八八·九。

目 录

第一篇 狭义相对论

第一章 狭义相对论时空观	(1)
第二章 相对论力学	(18)

第二篇 量子物理学基础

第三章 粒子和波	(26)
第四章 氢原子光谱和量子理论初步	(43)
第五章 多电子原子及分子光谱	(80)

第三篇 原子核物理学

第六章 原子核的基本性质	(118)
第七章 原子核的衰变	(126)
第八章 原子核结构模型	(142)
第九章 核反应	(149)

第四篇 粒子物理学

第十章 粒子物理学导论	(165)
第十一章 同位旋和奇异数	(169)
第十二章 对称性和守恒定律	(171)
第十三章 夸克模型和大统一理论简介	(173)

第五篇 固体物理学

第十四章 固体的基本性质	(175)
自检题答案	(190)

第一篇 狭义相对论

第一章 狭义相对论时空观

狭义相对论是关于时间空间概念的理论，对近代物理的发展起了重大作用。千百年来，经典的时空观在人们的头脑中已经根深蒂固，要改变这种旧观念十分困难，因为经典时空观对于低速宏观物体的情况无疑是正确的，而人们司空见惯的正是低速宏观物体的运动。但是，随着近代物理学的发展，理论和实验都证明，经典时空观对于物体高速运动的情况不再适用。大量的事实证明，如果将低速运动的规律应用到速度接近光速的范围，就会得出错误的结果。客观规律不以人们的主观意志而改变，人们要正确认识物体高速运动的规律，就必须改变旧的经典时空观，接受狭义相对论的时空观。这一观念的转变是正确认识狭义相对论的关键。

教材尽量避免读者感到困难的数学推导，采用浅显易懂的方式进行讲解，从实验事实的分析出发，着重剖析物理概念和规律，讲解狭义相对论的原理、洛伦兹变换、同时的相对性、长度缩短、时钟延缓、速度合成公式等内容。

一、基本要求

1. 正确理解爱因斯坦的两个基本原理：

- (1) 相对性原理；
- (2) 光速不变原理。

并且记住这两个基本原理的内容，能应用它们分析一些简单的相对论时空问题。

2. 记住洛伦兹变换公式

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right. \quad (5.1.1)$$

和

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right. \quad (5.1.2)$$

正确理解式中各物理量的意义，明确公式适用的条件，能熟练应用洛伦兹变换公式解决狭义相对论时空问题。

3. 正确理解同时的相对性、长度缩短和时钟延缓等相对论效应，记住以下公式

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (5.1.3)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (5.1.4)$$

并且应用它们分析和计算问题。

4. 掌握相对论的速度合成公式

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2} \quad (5.1.5)$$

和

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} \quad (5.1.6)$$

二、重点、难点分析

1. 事件和时空点

相对论中的事件不是指通常意义上的事件。通常人们所说的事件是指历史上或社会上发生的不平常的大事情，而物理上所定义的事件是在某时刻、某地点发生的一个物理现象。

事件发生的时刻用 t 表示，事件发生的位置用 (x, y, z) 表示。一个事件用 t, x, y, z 四个数来描述，这四个数是一组时空坐标 (x, y, z, t) ，亦称为一个时空点。即一个事件用一个时空点来描述，另一个事件用另一个时空点来描述。

一个物理事件的发生，如一个粒子的衰变，某时刻某地点发出一个光信号，是客观存在，与观测者是否测量无关；对该物理事件发生的时刻和位置的描述则与观测者的测量有关，不同惯性系中的观测者对同一事件的时空描述是不同的。

2. 爱因斯坦的两个基本原理

爱因斯坦总结了前人的一系列实验，1905年，他在《论运动物体的电动力学》一文中提出了相对论的两个基本假设：相对性原理和光速不变原理。下面采用对话的形式帮助读者正确理解这两个基本原理。

甲：爱因斯坦相对性原理的内容是什么？

乙：相对性原理告诉我们：“所有物理规律在一切惯性系中皆

有各自的同一形式。”

甲：你能不能举个例子把这个原理讲得更明确些？

乙：可以。相对性原理实际上是说，在某一惯性系中成立的物理规律，在其它任何惯性系中都成立。同一个物理规律，如果用数学方程来描述，那么，用不同惯性系的坐标和时间写出来，

将有同样的形式。例如，对某一惯性系力学规律 $F = \frac{dp}{dt}$ 成立，

那么，对其它任一惯性系，这个规律都成立，其表达式可写成

$F' = \frac{dp'}{dt'}$ ，形式相同。

甲：这是不是说，在不同的惯性系中测量到的相应物理量都相同？

乙：不是。应当注意，相对性原理所说的“所有物理规律在一切惯性系中皆有各自的同一形式”，或者换句话说“一切惯性系都是等价的”，绝不是指在不同的惯性系中测量到的相应物理量都相同，教材后面将要讲同时的相对性、长度缩短和时钟延缓等相对论效应，到那时读者对这个问题就会更加清楚。

甲：我记得在力学中讲过伽利略相对性原理，爱因斯坦的相对性原理与伽利略相对性原理有什么不同？有什么关系？

乙：对于一切彼此相对作匀速直线运动的惯性系，伽利略相对性原理只阐明：描写运动的力学规律是等价的，并且仅仅在物体运动速度远小于光速的低速情况下等价；而爱因斯坦相对性原理则阐明：描写运动的一切物理规律（包括力学的、电磁学的等等）是等价的，并且在低速和高速情况下均等价。可见，后者是前者的推广，后者概括了前者，前者仅是后者的特殊情况。

甲：光速不变原理的内容是什么？

乙：光速不变原理阐明：“在真空中，对任何惯性系而言，光在各方向的速度都是 c ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)，与光源的运动状况无关。”

甲：根据教材第一分册讲过的经典力学的速度合成公式，我无论如何也理解不了光速不变原理。

乙：光速不变原理是全新的内容，时空观的修改就体现在这个原理中，由光速不变原理会得出系列与经典时空观格格不入的结论。你从经典力学的速度合成公式来看光速不变原理，出发点就错了。恰恰相反，在光速不变原理与经典力学的速度合成公式相矛盾时，你应当想，经典力学的速度合成公式是否有必要修改。因为光速不变原理这个从科学实验中抽取出来的规律，与已有的实验结果全都不矛盾。

甲：经典力学的速度合成公式也是经过实验验证的呀！

乙：不错。但是，仅仅在物体运动速度远小于光速的低速情况下得到了验证，在物体运动速度与光速可比的高速情况下并没有验证。

甲：这么说，经典力学的速度合成公式和光速不变原理是“矛盾”的，但又都是正确的。

乙：对。要解决这个“矛盾”，显然需要有一个更完善的公式把二者统一起来。完成这个任务的就是教材§ 5-1-4 将要讲到的狭义相对论的速度合成公式。

例题1. 观察者甲乘汽车以速度 v 通过站在路边的观察者乙的身旁时，有一光信号沿着甲运动的方向在他们的身旁通过。甲测得光相对于自己的速度为 c ，乙测得光相对于甲的速度为 $c-v$ 。甲乙两人测量所得的结果不同，应该怎样解释？

答：光相对于甲的速度是 c ，是甲的测量结果；光相对于甲的速度是 $c-v$ ，是乙的测量结果。两者都是实验事实。为了解释两者表现上的矛盾，关键在于，必须认为光相对于乙的速度也是 c ，即必须认为光在相对于乙静止的惯性系里的速度与光在相对于甲静止的惯性系里的速度相同，都是 c 。推广到一般，即在真空中，对任何惯性系而言，光在各方向的速度都是 c ，与光源的运动状

况无关。这就是爱因斯坦提出的光速不变原理。这个关键问题解决了，甲乙测量结果的表观矛盾就解决了。在乙看来，甲在追赶光，光相对于甲的速度就是光和甲两者的速度之差。甲相对于乙的速度是 v ，光相对于乙的速度是 c 。那么，光相对于甲的速度就是 $c-v$ 。

读者还可以进一步思考，若其它条件不变，而光信号沿着甲运动的相反方向在甲乙两人身旁通过，则乙测得光相对于甲的速度是多大？这里只给出结果： $c+v$ ，理由请读者自己说明。

这个例题实际上是对教材§ 5-1-2第一个问题（同时的相对性）中所举例子的补充说明，读者可以结合起来阅读。

3. 洛伦兹变换

洛伦兹变换是与相对论时空观相对应的时空坐标变换，洛伦兹变换公式是本章最重要的公式之一。读者必须正确理解并熟练应用之。

对于式 (5.1.1) 和式 (5.1.2) [教材上分别是式 (5.1.19) 和式 (5.1.20)]，应当注意它们的适用条件：

(1) 两惯性坐标系 S 和 S' 相应的坐标轴彼此平行， S' 系相对于 S 系沿 x 轴方向以速度 v 作匀速直线运动，且当 $t' = t = 0$ 时， S 系原点 O 和 S' 系的原点 O' 重合。

(2) 两组时空坐标 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') 是对同一物理事件时空测量的结果。 (x, y, z, t) 是相对于 S 系静止的观察者对某一物理事件测量的结果， (x', y', z', t') 是相对于 S' 系静止的观察者对同一物理事件测量的结果。

(3) S 系和 S' 系中的度量基准是一致的。 S 系中的钟和尺相对于 S 系静止， S' 系中的钟和尺相对于 S' 系静止。并且，各惯性系中的钟各自彼此校准，同步运行。这些钟遍布惯性系的空间各点。

为了简化题目和解答中的文字叙述，除对特殊情况加以说明

外，本章和下章所提到的 S 系和 S' 系都代表符合适用条件(1)的两个惯性系。

在相对论中，为使叙述简洁，还常常使用固有长度、固有时间间隔等概念，读者对这些概念应有正确的理解。

固有长度：在相对于物体静止的惯性坐标系中所测得的物体长度称为固有长度，也称为静止长度。

固有时间间隔：若某物体相继发生两个物理事件，则相对于该物体瞬时静止的惯性坐标系中的时钟测出的该两事件的时间间隔称为固有时间间隔，简称为固有时。若所测得的固有时间间隔是某物体的寿命，则称为固有寿命。

运用洛仑兹变换解决问题，教材§ 5-1-3中讲了五个例题，其中例题 1 除用洛仑兹变换讨论外，还运用相对论基本原理分析解决。两种解法中重点是要求读者掌握运用洛仑兹变换解题，而讲解另一种方法主要是为了对比两种解法，同时也为了使读者认识到洛仑兹变换实质上是建立在相对论基本原理的基础上，是相对论时空观的数学表达形式。例题 1、2、4 是对§ 5-1-2 中讲过的同时的相对性、时钟延缓和长度缩短等相对论效应的再讨论，只不过上节是运用相对论基本原理分析，这节是用洛仑兹变换求解。例题所得出的结论十分重要，我们归纳如下：

(a) 同时的相对性

若两个事件在某一惯性系中是异地同时事件，则在其它惯性系中观测这两个事件一定不是同时事件。

(b) 时钟延缓

任何一个惯性系中的观察者观测相对于他运动的时钟都走得慢些。换句话说，一个物理过程所经历的时间间隔是相对的，固有时间间隔是最短的。

这一相对论效应用公式表示，即

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

式中 $\Delta t'$ 为固有时间间隔。

(c) 长度缩短

任何一个惯性系中的观察者观测相对于他运动的物体都沿其运动方向缩短。换句话说，运动物体的长度缩短是相对的，固有长度是最长的。

这一相对论效应用公式表示，即

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

式中 l_0 为固有长度。

例题2. 两个事件，对某一惯性系 S' 来说是同时发生的。问在下列两种情况中，它们对另一惯性系 S 是否也是同时发生的？

(I) 两事件在 S' 系不同地点 (x'_1, y'_1, z'_1 与 x'_2, y'_2, z'_2) 发生 (S' 和 S 两惯性系在 x 方向有相对运动)；

(II) 两事件在 S' 系相同的地点发生。

答：设 S' 系相对于 S 系沿 x 方向以速度 v 匀速运动，则由洛伦兹变换

$$t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2} x'_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t_2 = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2} x'_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left[(t'_2 - t'_1) + \frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1) \right]$$

上式中， $t'_2 - t'_1$ 是 S' 系测量到的两事件的时间间隔，依题意， $t'_2 - t'_1 = 0$ ； $t_2 - t_1$ 是 S 系测量两事件的时间间隔。

(I) 因为 $x'_1 \neq x'_2$ ，所以 $t_2 - t_1 \neq 0$ ，即两事件从 S 系测量不同同时发生；

(II) 因为 $x'_1 = x'_2$ ，所以 $t_2 - t_1 = 0$ ，即两事件从 S 系测量同

时发生。

例题3. 如图5-1-1所示，一把直尺相对于S系静止，直尺与x轴夹角为 θ ，今有一观察者以速度 v 沿x轴运动，他测得的直尺与x轴的夹角是多少？

解

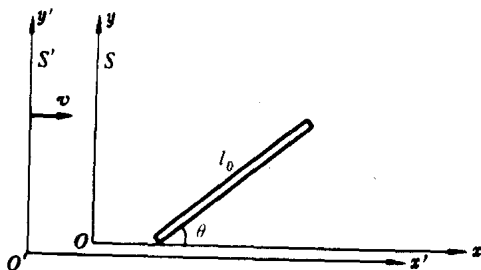


图 5-1-1

如图5-1-1所示，设直尺长 l_0 ， l_0 是在S系测得的固有长度；观察者相对于 S' 系静止， S' 系以速度 v 沿x轴相对S系运动。则由洛伦兹变换知，

$$\begin{aligned}\Delta y' &= \Delta y = l_0 \sin \theta \\ \Delta x' &= \Delta x \sqrt{1 - v^2/c^2} = l_0 \cos \theta \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ \operatorname{tg} \theta' &= \frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \frac{l_0 \sin \theta}{l_0 \cos \theta \sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ &= \operatorname{tg} \theta / \sqrt{1 - v^2/c^2}\end{aligned}$$

所以，观察者测得的直尺与x轴的夹角为

$$\theta' = \operatorname{tg}^{-1}(\operatorname{tg} \theta / \sqrt{1 - v^2/c^2})$$

例题4. 如图5-1-2，一短跑运动员在地球上以10s的时间跑完100m，在飞行速度为0.98c的飞船中观察者看来，这个运动员跑了多长时间和多长距离？

解

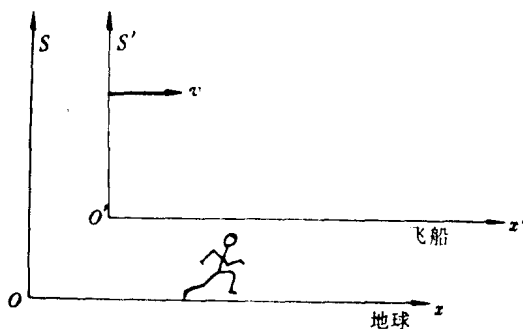


图 5-1-2

设运动员在 S 系中沿 Ox 轴正方向跑, S' 中

$$\begin{aligned} x'_2 - x'_1 &= \frac{(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ &= \frac{100 - 0.98c \times 10}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} \\ &= -1.48 \times 10^{10} \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t'_2 - t'_1 &= \frac{(t_2 - t_1) - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ &= \frac{10 - \frac{0.98c}{c^2} \times 100}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} \\ &= 50.25 \text{ (s)} \end{aligned}$$

所以, 在飞船中的观察者测得, 运动员在 50.25s 时间内沿 x 轴反向跑了 $1.48 \times 10^{10} \text{ m}$ 距离。

读者可能产生一个疑问: 按照相对论的结论, 不是运动尺度收缩吗? 为什么地球上运动员跑了 100 m, 飞船上的观察者测得

的距离大小是 $1.48 \times 10^{10} \text{ m}$? 这不是变长了吗? 原因很简单: 运动

尺度缩短 $l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$, 有一个前提条件, l 是与尺相对运动的观察者同时测量尺两端的结果。而例题 4 不符合这个前提, 飞船上的观察者是先测起跑点的坐标, 后测终点的坐标。

4. 相对论速度合成公式

在物体高速(速度可以和光速 c 相比)运动时, 经典的伽利略速度合成公式不再适用。教材运用洛伦兹变换得出了相对论的速度合成公式:

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}$$

和

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2}$$

在以上二式中, v 是 S' 系相对于 S 系沿 x 轴匀速直线运动的速度, u' 是在 S' 系测出的物体沿 x 轴的速度, u 是在 S 系测出的物体沿 x 轴的速度。

应当注意, 我们在这里讨论的速度 u' 和 u , 都是物体相对于观察者的速度。讲得具体些, u' 是 S' 系中静止的观察者测出的物体相对于他自己的速度, u 是 S 系中静止的观察者测出的物体相对于他自己的速度。

还应注意, 当 $v \ll c$ 、 $u' \ll c$ 时, 上边第一式退化为 $u = u' + v$; 当 $v \ll c$ 、 $u \ll c$ 时, 上边第二式退化为 $u' = u - v$ 。即相对论速度合成公式退化为伽利略速度合成公式。可见, 相对论速度合成公式是伽利略速度合成公式的推广, 而伽利略速度合成公式是相对论速度合成公式在低速情况下的近似。

教材 § 5-1-4 的例题 1 告诉我们, 光相对于任何惯性系的传播速度都是 c 。这个由相对论速度合成公式得到的结果是必然的。

因为相对论速度合成公式是由洛仑兹变换导出的，而洛仑兹变换就是在光速不变原理和相对性原理的基础上导出的。

教材中所讨论的问题是光在真空中传播的问题。由光速不变原理，光在真空中的传播速度与惯性系的选择无关，但当光在介质中传播时就不同了。请看下边的例题。

例题 5 设折射率为 n 的介质相对于观察者以速度 v 运动，从观察者看来，光在介质中沿介质的运动方向传播时的速度是多少？

解：光在静止介质中的速度为

$$u' = \frac{c}{n}$$

介质又相对于观察者以速度 v 运动。由相对论速度合成公式，光相对于观察者的速度为

$$\begin{aligned} u &= \frac{u' + v}{1 + vu'/c^2} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \cdot \frac{c}{n}} \\ &= \frac{c}{n} \left(1 + \frac{nv}{c} \right) \left(1 + \frac{v}{cn} \right)^{-1} \end{aligned}$$

通常，介质的运动速度比光速小得多，即 $v \ll c$ ，因而因子

$\left(1 + \frac{v}{cn} \right)^{-1}$ 可以展开成级数，并略去高次项，得

$$\left(1 + \frac{v}{cn} \right)^{-1} = 1 - \frac{v}{cn}$$

因此，

$$\begin{aligned} u &= \frac{c}{n} \left(1 + \frac{nv}{c} \right) \left(1 + \frac{v}{cn} \right)^{-1} \\ &= \frac{c}{n} \left(1 + \frac{nv}{c} \right) \left(1 - \frac{v}{cn} \right) \end{aligned}$$