

大学物理学学习指导书

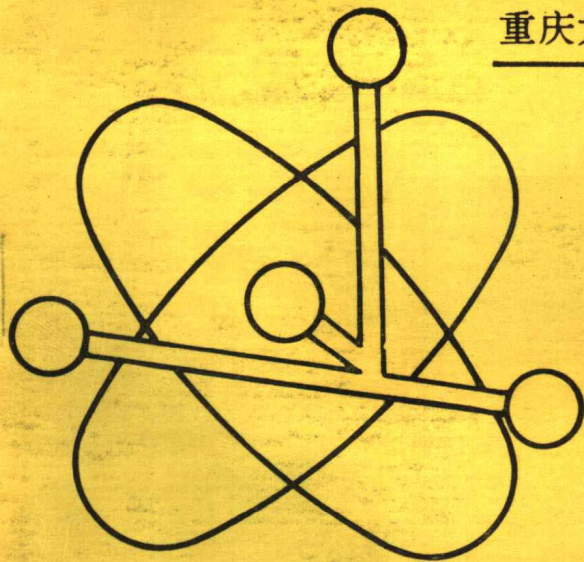
近代物理

JINDAIWULI

杨光富 杨明鲁

胡炳全 郑青松 编

重庆大学出版社



大学物理学学习指导书

近代物理学

杨光富 杨明鲁 编
胡炳全 郑青松

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书主要讲述了狭义相对论、光的量子性、卢瑟福-玻尔原子、量子力学基础、激光原理等内容，分六部分进行介绍：内容提要、知识系统图表、标准化习题（填空题、判断题、选择题）、计算及证明题、解题举例、习题答案。书中针对工科学生学习近代物理学时可能遇到的难点和疑点作了详尽的分析，对典型题进行了重点分析，帮助读者巩固所学知识，加深对概念、公式、定理的理解，提高理解问题、分析问题、解决问题的能力。

本书可供工院校、师范院校师生使用，也可供中学物理教师 and 自学者参考。

大学物理学学习指导书

近代物理学

杨光富 杨明鲁 编
胡炳全 郑青松

责任编辑 曾令维 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制一厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：2.25 字数：51 千

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数：1—20000

标准书号：ISBN 7-5624-0422-4 定价：0.90元
O.61

前 言

《大学物理学学习指导书》按内容分为《力学》、《热学》、《电磁学》、《波动学》、《近代物理学》五个分册。编写时既参照了工科高等院校大学物理学教学基本要求，又考虑了师范院校本科、专科及成人教育物理课程的需要；适合于工科院校、师范院校师生使用，亦可供中学物理教师 and 自学者参考。

本书集编者多年教学经验而成。各分册均包括《内容提要》(提纲挈领，概括全貌)、《知识系统图表》(勾画各部联系)、《标准化习题》、《计算及证明题》(习题量大，覆盖面广，题型较全)、《解题举例》(给出解题规范，启发解题思路)、《双数序号习题答案》，共六章。这几部分实为学好物理并顺利通过考试之必须。本书的构思是作者在长期的教学实践中提炼出来的，实践证明，符合学生实际，深受学生欢迎。我们愿将本书奉献给读者。

全书五册由重庆大学杨光富、重庆师范专科学校杨明鲁主编，杨光富对全书进行了统稿。作者分工如下：

《力学》：金属东 袁昭林

《热学》：朱世德 顾国均

《电磁学》：朱世德 潘必凯 刘贵权

《波动学》：唐 南 黄永贤 王新领

《近代物理学》：胡炳全 郑青松

德阳教育学院池培之副院长提供了不少宝贵建议，在此
亦诚鸣谢。

编 者

1991. 元旦

目 录

第一章 内容提要	1
§ 1-1 狭义相对论	1
§ 1-2 光的量子性	7
§ 1-3 卢瑟福-玻尔原子	10
§ 1-4 量子力学基础	13
§ 1-5 激光原理	17
第二章 知识系统图表	21
第三章 标准化习题	25
§ 3-1 填空题	25
§ 3-2 判断题	30
§ 3-3 选择题	32
第四章 计算及证明题	46
第五章 解题举例	52
第六章 双数序号习题答案	63
§ 6-1 第三章双数序号习题答案	63
§ 6-2 第四章双数序号习题答案	65

第一章 内 容 提 要

§ 1-1 狭义相对论

一、伽利略牛顿绝对时空观

设有二惯性系 K 和 K' ， K' 相对于 K 沿 x 轴正向以速度 v 作匀速直线运动，二系各轴对应平行且在 $t'=t=0$ 时二系原点重合，则 P 质点在 K 系及 K' 系中的时-空坐标 (x, y, z, t) 及 (x', y', z', t') 呈如下关系：

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

这就是伽利略时-空变换式。由它容易导出质点在 K ， K' 系中速度 (u_x, u_y, u_z) 和 (u'_x, u'_y, u'_z) 间的变换式：

$$\begin{cases} u'_x = u_x - v \\ u'_y = u_y \\ u'_z = u_z \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} u_x = u'_x + v \\ u_y = u'_y \\ u_z = u'_z \end{cases}$$

在伽利略变换式下，所有力学规律在一切惯性系中都是等价

的,这就是著名的伽利略相对性原理。伽利略原理内涵:①仅力学规律在各惯性系中具有全同形式,在一惯性系内不能借助力学实验测定该系对它系之运动;②伽利略时空变换与速度变换同伽利略原理相对应;③伽利略原理是低速机械运动规律的总结。

在伽利略变换下,不同惯性系测得同一物体的长度是相同的;同一事件经历的时间间隔亦同。这就是伽利略牛顿绝对时空观。另应指出,在伽利略变换下各惯性系测同一质点的质量相同。

二、狭义相对论的基本原理

1. 实验基础——迈克尔逊-莫雷实验

此实验试图测量地球相对于“以太”的运动。应用伽利略速度合成公式预测有干涉条纹的可观察得到的移动。但迈-莫实验的零结果指证伽利略速度变换式不适用于高速领域,必须建立新的时空观。

2. 狭义相对论的基本原理

(1) 光速不变原理。其内涵为:①真空中光速对一切惯性系均为 c ,与光源和观察者运动状态无关;②它与伽利略速度变换式直接矛盾,从而否定了绝对时-空观。

(2) 爱因斯坦相对性原理。其内涵为:①在各惯性系中所有物理定律(不仅是力学定律)都是相同的;②对所有物理定律都不存在优越的参照系。

三、相对论效应

1. 长度收缩

设一根棍的本征长度为 L ,在沿棍长方向以速度 v 运动

的参照系中的观察者测得该棍的长度 $L' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} L$ 。因

$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ ，故本征长度是各种测量中可能测得的最大长度。

2. 时间膨胀

设 K 系中同地发生两个事件，其时间间隔为 Δt ，称为本征时间；则在相对 K 系以速度 v 运动的 K' 系中测得此二事件的时间间隔 $\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t$ 。这就是时间膨胀效应，显然

本征时间间隔是各种测量中可能测得的最短时间间隔。

3. 同时性的相对性

在 K 系中异地同时发生的两个事件，在 K' 系中的观察者并不认为是同时发生的，他测得此二事件的时间间隔为 $\Delta t' = \frac{v^2}{c^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{L}{v} \neq 0$ ，其中 L 是 K 系中二同时事件发生地间的本征长度。这就是同时性的相对性。

综上所述，由狭义相对论基本原理建立起来的相对论时空观确认：时间是相对的，空间也是相对的，它们的量度与参照系的选择有关。时-空和物质运动紧密相连，时空亦不是分离的。

四、洛伦兹变换与相对论速度变换

1. 洛伦兹时空坐标变换式

由狭义相对论基本原理出发，可建立惯性系 K 与 K' 之间的时-空坐标变换式：

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

或

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

上列二式称洛伦兹时空坐标变换式。它反映了同一事件在两个惯性系中时空坐标变换关系。

2. 洛伦兹速度变换公式

质点 P 相对于 K 系的速度 (u_x, u_y, u_z) 与相对于 K' 系的速度 (u'_x, u'_y, u'_z) 间有如下变换关系:

$$\left\{ \begin{array}{l} u'_x = \frac{u_x - v}{1 - u_x v / c^2} \\ u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - u_x v / c^2} \\ u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - u_x v / c^2} \end{array} \right.$$

或

$$\begin{cases} u_x = \frac{u'_x + v}{1 + u'_x v / c^2} \\ u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + u'_x v / c^2} \\ u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + u'_x v / c^2} \end{cases}$$

洛伦兹速度变换式易由洛氏时空坐标变换得出。

3. 伽利略时空变换是洛氏变换的低速极限

当 $\frac{v}{c} \ll 1$ 时, 可由洛氏时空坐标变换得到伽利略时空坐标变换, 由洛伦兹速度变换得到伽利略速度变换。故可说伽利略相对性原理是爱因斯坦相对性原理的低速极限。

五、相对论动力学

1. 相对论质速关系式

在相对论中质量也是一个与参照系选取有关的相对量。

质量 m 与速度大小的关系为 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, 式中 m_0 为静系中测得的物体的质量, 称静止质量; m 为物体相对于观察者以速度 v 运动时的质量。由此可知: ①物体质量随速度的增大而增大; ②物体的运动速度不能超过光速 c ; ③速度为光速的物体其静质量必为零。

2. 相对论动力学的基本方程

牛顿第二定律 $F = ma$ 在洛伦兹变换下不是不变的, 即不满足爱因斯坦相对性原理, 故 $F = ma$ 不适合于高速领域。

相对论动力学的基本方程是 $F = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$, 它在洛

伦兹变换下是不变的。

3. 质能关系式

由相对论动力学基本方程, 应用动能定理可知物体的相对论动能 $E_k = mc^2 - m_0c^2$, 即 $mc^2 = E_k + m_0c^2$, 其中 m 、 m_0 分别为物体的动质量和静质量. 我们有理由据此定义 $E = mc^2$ 为物体的总能量, 它含动能 E_k 和静能 m_0c^2 ; 定义 m_0c^2 为物体的静止能量. 在低速极限下 $E_k = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right]$

$= m_0c^2 \times \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots - 1 \right] \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$, 得经典力学动能公式. 由此可知相对论动力学在低速极限下回复为牛顿经典力学. 故相对论原理自身自洽且系经典力学的发展提高.

今将相对论动力学及牛顿动力学诸量比较列于表 1-1-1 中.

表 1-1-1

公 式 名 称	相对论动力学	牛顿动力学
质 量	$m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$	$m = m_0$
动 量	$P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$P = m_0 v$
基本方程	$F = \frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt} v + ma$	$F = m_0 a$
动 能	$E_k = mc^2 - m_0c^2$	$E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$
质-能关系	$E = mc^2$	
能量-动量关系	$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$ $E = pc$ (光子)	$E_k = \frac{p^2}{2m_0}$

§ 1-2 光的量子性

一、黑体辐射和普朗克量子论

1. 热辐射的描述

热辐射是一种电磁辐射,从广义来讲也是一种发光现象。在单位时间内物体单位表面积辐射出的波长在 $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ 间的电磁波能量 dE_λ 与 $d\lambda$ 的比值称为该物的单色辐出度,记为 $M(\lambda, T) = \frac{dE_\lambda}{d\lambda}$;在单位时间内物体单位面积辐射出的各种波长的电磁波能量的总和称为总辐出度,记为 $E(T)$ 。显然 $E(T) = \int_0^\infty M(\lambda, T) d\lambda$ 。

物体在热辐射的同时也要吸收外界入射的电磁波。温度为 T 的物体吸收某一波长范围内电磁能量的能力用单色吸收比 $a(\lambda, T)$ 来表示,它与单色反射比 $r(\lambda, T)$ 有如下关系: $a(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1$ 。一般情况下, a 和 r 都是小于1的纯数。

2. 绝对黑体及其实验定律

一个反射比恒为零吸收比恒为1的理想物体叫绝对黑体。在实验室中用不透明材料制成一个带小孔的空腔,因光线进入小孔后极难反射出来,故可当作人工黑体。

(1) 基尔霍夫定律 任何物体的单色辐出度与其单色吸收比之比都等于绝对黑体的单色辐出度

$$M_o(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{a(\lambda, T)}$$

故研究黑体辐射规律对研究一般物体的热辐射至关重要。实验研究给出了黑体单色辐出度在不同温度下随波长变

化的精密曲线。据此总结出黑体辐射的如下两条重要实验定律。

(2) 维恩位移定律 每条 $M_0(\lambda, T) - \lambda$ 曲线都有一单峰, 相应波长 λ_m 与温度 T 成反比: $\lambda_m T = b$, 其中 $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

(3) 斯忒藩-玻尔兹曼定律 每条 $M_0(\lambda, T) - \lambda$ 曲线下的面积即黑体的总辐出度与温度 T 的四次方成正比: $E_0(T) = \int_0^\infty M_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

3. 经典理论不能解释黑体辐射的 $M_0(\lambda, T) - \lambda$ 曲线, 特别是由经典理论导出的瑞利-金斯分布出现了著名的“紫外发散灾难”, 使经典物理学陷入困境。

4. 普朗克量子论及黑体辐射公式

普朗克为了解释黑体辐射的 $M_0 - \lambda$ 实验曲线, 提出了著名的能量子理论, 并据此导出了与实验拟合得极好的普朗克黑体辐射公式。

(1) 普朗克量子论 ①黑体壁由带电谐振子构成, 频率为 ν 的谐振子具有最小能量 $h\nu$ 的整数倍能量 $E_N = N h\nu$, 其中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 是普朗克常数, $N = 1, 2, 3, \dots$; ②谐振子从能量为 E_{N_1} 的状态跃迁到能量为 E_{N_2} 的状态时发射出 $\varepsilon = E_{N_1} - E_{N_2} = (N_2 - N_1) h\nu = n h\nu (n = 1, 2, 3, \dots)$ 的能量子, n 称为量子数。

(2) 普朗克黑体辐射公式 普朗克在能量子假设基础上应用统计物理方法得到了黑体单色辐出度公式:

$$M_0(\lambda, T) = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} / (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)$$

它与实验曲线拟合得很好。

普朗克量子理论为后来的量子力学奠定了基础。

二、爱因斯坦光子理论、光的波粒二象性

1. 爱因斯坦光子理论

爱因斯坦认为，一束频率为 ν 波长为 λ 的单色平面光波其波矢量 $\mathbf{k} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{n}$ ($\mathbf{n}$ 是光传方向单位矢)，是由被称为光子的粒子流构成，光子在真空中以光速 c 传播，其能量 $\epsilon = h\nu$ ，质量 $m_\phi = \frac{h\nu}{c^2}$ ，动量 $\mathbf{p} = m_\phi \mathbf{c} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n}$ (或 $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$)，这就是爱因斯坦光子理论的核心内容。

2. 光的波粒二象性

光在近代物理发展中占有重要地位。爱因斯坦以光速不变原理建立了相对论。就其本质而言，光的干涉衍射等大量实验表明光是一种服从麦克斯韦电磁理论的电磁波；另一方面本世纪初进行的黑体辐射光电效应及康普顿散射等实验表明光显示出爱因斯坦光子理论所描述的粒子性。因此光具有波粒二象性。光的波粒二象性可由爱因斯坦关系式说明：

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = h\nu \\ \mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n} \quad (\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}) \end{array} \right.$$

ϵ 和 $\mathbf{p}$ (p)反映粒子性， ν 和 λ (k)反映了波动性。

三、光电效应、康普顿散射

1. 光电效应

频率在某一下限以上的光投射到金属上即有电子逸出金属表面的现象称为光电效应，逸出的电子称为光电子。本世纪初列别捷夫、米立根等总结了光电效应的实验规律。但经

典物理理论不能解释这些规律。

爱因斯坦认为，能量为 $h\nu$ 的一个光子进入金属后立即被金属中的某个电子吸收，若此能量能克服金属表面对电子的束缚就能逸出金属表面而成为光电子。按能量守恒，应有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

其中 $\frac{1}{2}mv^2$ 是光电子的动能； A 为金属的逸出功，仅由金属类别确定。上式称为光电效应方程。当 $\frac{1}{2}mv^2=0$ 时 $\nu_0 = \frac{A}{h}$ 是光电效应的红限频率。爱因斯坦理论能完整地解释光电效应的全部实验规律。

2. 康普顿散射

X射线经过石墨等轻元素后的散射规律是由康普顿-吴有训发现并总结的，经典光学不能解释这些规律。后来康普顿用光子理论完满地对康普顿散射进行了解释并得到了与实验一致的定量结果。康普顿认为，X射线光子与石墨中的自由电子（外层电子）发生完全弹性碰撞，散射光子损失能量，波长变长。由能量守恒和动量守恒可得波长改变量与散射角关系为

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

此公式与实验结果完全一致。

§ 1-3 卢瑟福-玻尔原子

一、卢瑟福原子模型

卢瑟福在 α 粒子散射实验的基础上建立了卢瑟福原子模

型：第 Z 号元素的原子，其正电部分带有 $+Ze$ 的电荷集中了原子的几乎全部质量，分布于线度为 $10^{-14}\sim 10^{-15}\text{m}$ 的极小区域内，称为原子核，核外有 Z 个电子绕之运动有如行星之绕日运行，电子到核的距离量级为 10^{-10}m 。

二、氢原子光谱的实验规律

十九世纪末人们已发现氢原子（最简单的原子）光谱有大部分，一部分为连续谱，一部分为线状谱。线状谱有如下两个重要规律：

$$\text{巴尔末公式： } \tilde{\nu} = R_H \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right] \quad (n=3, 4, 5, \dots)$$

$$\text{广义巴尔末公式： } \tilde{\nu} = R_H \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

$$\begin{cases} m=1, 2, 3, \dots \\ n=m+1, m+2, \dots \end{cases}$$

其中 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ 是谱线波长的倒数叫波数， $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{m}^{-1}$ 是黎德伯常数。

三、玻尔的氢原子理论

经典物理曾试图在卢瑟福原子模型基础上设想电子绕核作匀速圆周运动来解决氢原子光谱问题，但其所得结论是：
①氢原子只有连续光谱；②氢原子必将极快地“崩塌”，均与实验结果矛盾，这说明经典理论用于原子范围就遇不可克服的困难。玻尔把量子论用于氢原子，成功地解决了上述困难。

1. 玻尔假设

①定态假设，氢原子只能处于一些不连续的稳定态称为