

近代物理学导论

(第一分册)

王志符编

云南民族学院物理系

一九八四年三月

近代物理学导论

目录

(全书 ≈ 25 万字) ($\approx 64 \sim 65$ 学时) ($\approx 50 \sim 65$ 学时适用)

(有“*”号的章节可略去不讲或当作自学)

前言

第一篇——近代物理学的理论基础

第一章——狭义相对论基础 (≈ 5 万字) ($10 \sim 12$ 学时习题30道)

- § 1-1 伽利略变换和经典力学的时空观
- § 1-2 在运动媒质中传播的光速
- § 1-3 爱因斯坦假设和洛伦兹变换
- § 1-4 相对论中的长度、时间和同时性
- § 1-5 多普勒效应
- * § 1-6 闵可夫斯基四维时空
- § 1-7 相对论动力学基础
- * § 1-8 电磁学规律的洛伦兹协变性
- * § 1-9 广义相对论简介

第二章 早期的半经典量子理论

(22万字) (8学时, 25习题)

- §2-1 热辐射的实验规律
- §2-2 普朗克(能)量子假说和黑体辐射公式
- §2-3 光电效应的实验规律
- §2-4 爱因斯坦光子假说和爱因斯坦方程
- §2-5 伦琴射线的产生和散射
- §2-6 康普顿效应
- §2-7 原子光谱的实验规律
- §2-8 玻尔的氢原子轨道模型理论
- * §2-9 索末菲椭圆轨道模型和一般量子化理论

第三章 量子力学的基本概念

(123万字) (8学时, 25习题)

- §3-1 德布罗意物质波假说
- §3-2 海森伯测不准关系
- §3-3 波函数及其物理意义
- §3-4 薛定谔方程及其求解的标准条件
- §3-5 一维势阱问题
- §3-6 势垒穿透和隧道效应
- §3-7 一维矩形周期势

* §3-8 线性谐振子

~~* §3-9 移固体查~~

第二篇 原子、分子和固体的量子理论

第四章 原子结构和原子光谱

(~10学时)

§4-1 氢原子和似氢离子

§4-2 碱金属原子轨道贯穿

§4-3 电子自旋和轨道运动的相互作用

§4-4 多电子原子

§4-5 磁场对原子的作用

§4-6 壳层结构和元素周期序

§4-7 线状伦琴射线光谱和伦琴吸收光谱

§4-8 原子激光

第五章——分子结构和分子光谱

(~6学时)

§5-1 分子的结合类型

§5-2 分子光谱和分子能级

§5-3 双原子分子转动能级和振动能级

§5-4 拉曼散射

§5-5 多原子分子简述

第六章——固体的结构

(~10学时)

§6-1 晶态和非晶态固体

§6-2 晶体中粒子的结合力和结合能

§6-3 晶体中粒子的热运动

§6-4 晶体的热膨胀和位错

§6-5 晶体中电子的能带结构 布里渊区

§6-6 电子在能带中的分布和运动

§6-7 费米—狄拉克统计 费米面

§6-8 导体、绝缘体和半导体

§6-9 $p-n$ 结和其它常用半导体器件

* §6-10 固体的磁性

* §6-11 超导电性简介

第三篇 原子核和基本粒子

*第七章——粒子物理学的研究方法和常用

(4~6学时)

§7-1 核辐射及其与物质的相互作用

§7-2 几种常用的(粒子)探测器和记录装置

§7-3 粒子加速器的原理和类型 (I)

§7-4 粒子加速器的原理和类型 (II)

§7-5 宇宙射线及其检测

第八章—原子核

(6~8学时)

§8-1 原子核的结构和基本性质

§8-2 核的自发衰变和核反应 反应能

§8-3 核子间的相互作用

§8-4 核模型简介

* §8-5 核动力技术简介

* §8-6 核天体物理学简介

第九章—基本粒子和物质结构的新层次

(4~6学时)

§9-1 人类对物质基本组成的探索

§9-2 基本粒子的分类

§9-3 基本粒子的相互作用 (及其统一理论简介)

§9-4 对称性和守恒定律

§9-5 夸克模型简介

§9-6 物质结构的新层次

前言

近代物理学，大体说来，是相对于本世纪以前，以牛顿力学、热力学、和麦克斯韦电磁学理论为核心的经典物理学而言的。本世纪末，相当一部分物理学家认为物理学的殿堂已基本完成。尽管当时已发现一些经典理论所不能解释的实验现象，如光速测定、黑体辐射、光电效应、原子光谱、伦琴射线和放射性等）引起一些人的注意或困惑，但也有人把它们看做是无关宏旨的“天边的两朵乌云”。本世纪以来，理论上先后提出了普朗克的量子概念、爱因斯坦的相对性理论，以及玻尔的定态和能级假说，德布罗意物质波假说，最后形成量子力学的完美的理论体系；实验上对原子光谱、分子光谱和放射性衰变、核反应、固体结构等作了大量深入的研究。人们逐渐认识到，在物理学领域中，除开经典物理学宏伟的殿堂以外，还有许多前而未知的广阔天地。这些内容，笼统地说，都属于近代物理学的范畴。其研究对象，包括各种聚集态物质（气、液、固、等离子、超导等）的微观结构，以及原子、分子、原子核、基本粒子……等物质结构各个层次的性质，相互作用及其运动变化的规律。它的两大理论支柱是相对性理论和量子力学理论。近代物理学的出现，不仅是在一些基本物理概念上（包括时间、空间、质量、能量、相互作用和守恒性、微粒性和波动性、连续性和不连续性、以

至物理规律的全定性或统计性、……等)引起了十分深刻的、有的甚至是革命性的变革,内容非常丰富;还推动了一些相关学科(如化学、生物、天文……等)和新兴技术(如电子和电标、高能、激光、遥感、宇航……等)的发展,形成了一些新的边缘科学。并且到今天它还在不断地扩展新的领域。使得物理学在本世纪中一直处于主导或带头学科的地位。

本课程作为物理专业的一门基础物理课,主要从实验的角度出发,对狭义相对论、早期半经典量子理论、量子力学的基本概念,以及原子、分子、固体的量子理论,和原子核、基本粒子的结构、性质等作一初步的介绍。

第一篇 近代物理学的理论基础

第一章 狭义相对论基础

相对论是本世纪物理学最伟大的成就之一。它标志着物理学的重大发展。对一些基本的物理概念引入了深刻的变革。狭义相对论从运动物体的电动力学(电磁波的传播速度与运动参照系的关系)出发,提出了新的时空观,建立了高速运动物体的力学规律和电动力学规律,揭露了质能与能量的内在联系,广义相对论从加速参照系与引力场等效的原理出发,提出新的引力理论,

进一步探索了引力场中的时空结构。相对论是许多基础科学，以及现代工程技术科学所不可缺少的理论基础。本章只对狭义相对论作简略的介绍。

§ 1-1 伽利略变换和经典力学时空观

力学的相对性原理

在力学中我们讲过：牛顿运动定律适用的参照系称为惯性系，而一个参照系是不是惯性系，只能通过观察和实验来判断。还讲过：相对于已知惯性系作匀速直线运动的任何参照系也都是惯性系，牛顿定律对这样的参照系同样适用。也就是说，力学现象对一切惯性系来说，都遵从同样的规律；或者说，在研究力学规律时一切惯性系都是等价的。这就是力学的相对性原理。这一原理是伽利略 (G. Galileo) 在实验基础上总结出来的，理论分析和三百多年来的大量实践都表明，它明确反映了物质和运动的客观性。

伽利略变换

在经典力学中，对上述原理有一个数学表达式，称为伽利略变换。

设有两惯性系 S 与 S' ，相对作匀速直线运动。在每一惯性系中各取一直角坐标系。为方便起见，令这两坐标系的各对应轴相互平行 (图 1-1) 并设 S' 相对于 S 以速度 u 沿 x 轴正方向运

动，并且在两坐标系的原点 O 与 O' 重合时取时间 $t = t' = 0$ 。
现在自 S 、 S' 对同一质点 P 的运动进行观测。设在任一时刻 t

(照普物82年本 第三卷 P.104 图20-1绘制)

(占版面 1/3页)

图1-1 伽利略变换

(或 t')，自 S 系和 S' 系分别测得 P 的坐标为 (x, y, z) 和 (x', y', z') 。从图1分析，可得：

① 要注意到，这里应用的是经典力学的时空观。

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} x = x' + vt \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (1-1)$$

上式就是按经典力学自 S 和 S' 两惯性系观察同一件事的坐标变换关系，称为伽利略坐标变换式。在这里要注意特意写出的这一假定： $t' = t$ 。在经典力学中，这是一丁隐含的假定，并且总认为这是毫无疑问的。

质点 P 在运动，把 x, y, z 和 x', y', z' 对时间分别求导，可得伽利略速度变换式：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - u \\ \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{dt} \end{array} \right. \quad \text{即} \quad \left\{ \begin{array}{l} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{array} \right. \quad (1-2)$$

上式是速度的各分量之间的变换公式，它和力学中讨论过的相对运动的速度变换公式是完全一致的，将 (1-2) 式对时间再求导一次，可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2x'}{dt'^2} = \frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{d^2y'}{dt'^2} = \frac{d^2y}{dt^2} \\ \frac{d^2z'}{dt'^2} = \frac{d^2z}{dt^2} \end{array} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{array}{l} a'_x = a_x \\ a'_y = a_y \\ a'_z = a_z \end{array} \right. \quad (1-3)$$

或用矢量式写出，即

$$\vec{a}' = \vec{a} \quad (1-4)$$

上式表明，对同一物体，自不同的惯性系所观察到的加速度是相同的。这一事实也常说成是：物体的加速度在伽利略变换下是不变的。要注意到，式 (1-2) 和 (1-4) 所示的结果是按伽利略变换式 (1-1) 得到的。

如果自 S 和 S' 考察质点 P 受力的情况，则根据牛顿定律有

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad (\text{对 } S \text{ 系})$$

$$\vec{F}' = m \vec{a}' \quad (\text{对 } S' \text{ 系})$$

据式 (1-4), 可得

$$\vec{F}' = \vec{F} \quad (1-5)$$

即, 自不同的惯性系来观察, 质点的受力情况, 以及质点运动的经典力学方程 (牛顿第二定律), 是完全相同的。或者说, 牛顿定律 $\vec{F} = m \vec{a}$ 对伽利略变换是不变的。所以常把伽利略变换下的不变性说成是力学相对性原理在经典力学中的数学表述。但以后将会看到, 这二者是有本质区别的。

例题 1-1 以两质点的弹性正碰 (对心碰撞) 为例, 检验动量守恒定律和能量守恒定律对伽利略变换的不变性。

解 设 S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 $+x$ 轴向运动。自 S 及 S' 观察, 质点 m_1 、 m_2 在碰撞前后的速度各为 $\vec{v}_{20}$ 、 $\vec{v}'_{10}$ 、 $\vec{v}'_{20}$ 和 $\vec{v}_1$ 、 $\vec{v}_2$ 、 $\vec{v}'_1$ 、 $\vec{v}'_2$ 因各 $\vec{v}$ 、 $\vec{v}'$ 皆沿 x 、 x' 轴, 如图 1-2 所示。根据动量守恒和能量守恒定律, 对 S 系有:

用前书 p. 106 图 20-2 照描。

瓶图 1/4 页

图 1-2 自不同惯性系观察两质点的弹性正碰

$$\begin{cases} m_1 v'_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ \frac{1}{2} m_1 v'^2_{10} + \frac{1}{2} m_2 v^2_{20} = \frac{1}{2} m_1 v^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v^2_2 \end{cases}$$

题(1-2), 有 $V' = V - u$, 或 $V = V' + u$ 代入上式, 得:

$$m_1(V'_{10} + u) + m_2(V'_{20} + u) = m_1(V'_1 + u) + m_2(V'_2 + u)$$

$$\frac{1}{2}m_1(V'_{10} + u)^2 + \frac{1}{2}m_2(V'_{20} + u)^2 = \frac{1}{2}m_1(V'_1 + u)^2 + \frac{1}{2}m_2(V'_2 + u)^2$$

整理可得

$$\begin{cases} m_1V'_{10} + m_2V'_{20} = m_1V'_1 + m_2V'_2 \\ \frac{1}{2}m_1V'_{10}{}^2 + \frac{1}{2}m_2V'_{20}{}^2 = \frac{1}{2}m_1V'_1{}^2 + \frac{1}{2}m_2V'_2{}^2 \end{cases}$$

可见, 自 S' 系观察到的守恒定律与自 S 系观察到的守恒定律具有完全相同的形式, 也就是说, 动量守恒定律和能量守恒定律对伽利略变换是不变的。

经典力学的时空观

前已指出, 在经典力学中隐含着 $t' = t$ 这一基本假定。因此有 $\Delta t' = \Delta t$, 即在经典力学中, 认为不论自哪一惯性系来测量时间间隔, 所得的结果都是一样的。换句话说, 如果各惯性系中用来测量时间的标准相同, 比如都用某一原子的特征单色谱线的振动周期为时间的基本单位, 那么任何事件所经历的时间就有绝对不变的量值, 而与参照系 (或观测者) 的相对运动无关。

另外, 如果自 S 系和 S' 系测得某两质点的距离各为:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

$$\Delta r' = \sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2}$$

应用伽利略变换，可得

$$\Delta r' = \Delta r。$$

(1-6)

就是说，如果各了参照系中用来测量长度的标准相同，比如都用某一原子的特征单色谱线的波长为长度标准，那么空间任何两点间的距离也是具有绝对不变的值，而与参照系的选择或观测者的相对运动无关。

用牛顿的话来说：“绝对的真实的数学时间，就其本质而言，是永远均匀地流逝着，与任何外界事物无关。”“绝对空间就其本质而言，是与任何外界事物无关的，它从不运动，并且永远不变。”②这就是经典力学的时空观，也称为绝对时空观。按照

② 见牛顿：《自然哲学的数学原理》

这种观点，时间和空间是彼此独立、互不相关，并且独立于物质和运动之外的（不受物质或运动的影响的）某种东西。或者说，空间距离和时间间隔的测量值都是各不相关，具有绝对不变的大小，并且是与观测者的相对运动状态无关的。这种绝对时空观可以形象地比拟如下：把空间比作盛有宇宙万物的一了无形的永不运动的框架，而把时间比作独立的不断流逝着的流水。实际上，如果没有 $t' = t$ （或 $\Delta t' = \Delta t$ ）这一假定，伽利略变换就不能成立。反过来，只要从 $\Delta t' = \Delta t$ 和 $\Delta r' = \Delta r$ 出发，就可直接推导出伽利略变换式。所以可以说，绝对时空的假定（或默认）正是伽利略变换的基本前提。但是应该注意到，力学相对性

原理却没有绝对时空这一前提。这就是二者的区别所在，不能把它们完全等同起来。

按照伽利略变换，不同惯性系中的观测者可测得的时间间隔 Δt 和空间距离 Δr 都是绝对的不变量；在经典力学中又把物体的质量看做是不随观测者的相对运动状态而变的常量。所以时间、长度和质量这三个基本物理量在经典力学中都具有绝对的意义而与参照系（或观测者）的相对运动无关。

§ 1-2 在运动媒质中传播的光速

绝对参照系的探索

由于经典力学认为时间和空间都与观测者的相对运动无关，是绝对不变的，所以可以设想，在所有惯性系中一定存在一个与绝对空间相对静止的参照系，即绝对参照系。但力学相对性原理指明，所有的惯性系对力学现象都是等价的。因此，不可能用任何力学方法来判定在不同的惯性系中究竟哪一个是绝对静止的。那么是不是能用其它方法（比如电磁学方法）来判定呢？

根据麦克斯韦电磁学理论，凡做加速运动的电荷，必然以电磁波的方式向外辐射能量。电磁波在真空中的传播速度即光速 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \approx 2.997925 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，是一常数。当时（十九世纪后半叶）按经典电磁理论认为电磁波，是在所谓以太中传播，而以太则是充满整个宇宙空间的一种弹性媒质。当物体

运动时(如水或空气的流动,或地球的光日运动)是否会拖着以太一同运动,当时有两种完全相反的看法。以赫兹(H. Hertz)为代表的一些物理学家,认为以太会完全被运动物体所拖动,而以洛伦兹(H. A. Lorentz)为代表的另一些物理学家,则认为以太完全静止不动,并且不参与物体的运动。而较早的菲涅耳(A. J. Fresnel)则认为以太会受到运动介质的部分拖动,设运动介质的速度为 u ,则以太的速度应为 αu ,这个介质的 α (α 称为拖动系数)并且 $\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$,式中 n 为介质的折射率。如果洛伦兹的看法成立,就可把以太看做绝对空间或绝对参照系的代表。这些看法究竟谁是谁非,当然只能通过实验观察来检验。为此目的而设计安排的实验中最主要的有菲索实验和迈克耳孙-莫雷实验,通过对这些实验的结果的分析,就可判断绝对参照系是否存在。

菲索实验

1859年菲索(A. Fizeau)设计了一个实验,用来测定在定向流动的水中传播的光速。他的实验装置如图1-3所示。

(用每图光中, p. 515 图14.9 描绘)

(约佔5~6行版面)

图1-3 菲索实验

自光源 S 射来的单色光分成两束分别穿过 A 、 B 两管经 M_1 反射回来又穿过 B 、 A 两管经 M' 反射会聚于 S' ,形成干涉条纹。实

实验安排得使两束光的光程完全相等，并在两管中充满了以高速 u 流动着的水。当水自A管上口流入而经B管下口流出时（如图），不难看出光束（1）在A、B两管中的传播方向都与水流方向相反，而光束（2）的传播方向则与水流方向相同。今 n 表示水对这单色光的折射率，则这单色光在静水中的光速即 $c_1 = c/n$ 。

如果按洛仑兹的观类，以太完全不受流水的拖动，则光束（1）、（2）在A、B两管中都以同一光速 c_1 传播，到达 S' 相遇时应无任何时间差，也没有任何位相差，与管中的水静止不动或把水流方向反转时，所得的干涉条纹应该完全相同，没有任何条纹移动。

另一方面，如果按赫兹的观类，以太完全受到流水拖动，即管中的以太也以高速 u 随流水一同流动，那么按经典的速度合成公式，可得光束（1）、（2）在管中相对于管壁的传播速度即分别为 $c_1 - u$ 和 $c_1 + u$ 。今 l 表A管或B管的长度，两光束分别到达 S' 时的时间差即

$$\Delta t = \frac{2l}{c_1 - u} - \frac{2l}{c_1 + u} = \frac{4lu}{c_1^2 - u^2}, \quad (1-7)$$

即两光束在 S' 处相遇时的位相差应为

$$\delta = 2\pi\nu\Delta t = \frac{8\pi\nu lu}{c_1^2 - u^2} \quad (1-8)$$

由上式即可求出干涉条纹的位移。