

陈曙光 黄述熙 郑采星等 编

大学 物理

下 册

COLLEGE PHYSICS

湖南大学出版社

大学物理

(下册)

陈曙光 黄述熙 郑采星等 编

湖南大学出版社

1997年·长沙

内 容 简 介

本书是《大学物理》下册,包括狭义相对论、电磁学、量子物理基础及激光与固体能带四部分,书中利用相对论的基本思想阐述了场及场能量的概念,对电磁学的基本规律从相对论的角度予以统一阐述。在量子物理部分,给出了量子概念的产生、发展及量子力学创立与应用的思维脉络。本书可作为高等院校理工科各专业大学物理课程教材,也可供其它有关专业师生参考。

大学物理(下册)

Daxue Wuli

陈曙光 黄述熙 郑采星 等编

责任编辑 刘其斌

出版发行 湖南大学出版社

社址 长沙市岳麓山 邮码 410082

电话 0731-8821691 0731-8821315

经 销 湖南省新华书店

印 装 湖南省望城县湘江印刷厂

开本 850×1168 32开 印张 10 字数 242千

版次 1997年1月第1版 1998年1月第2次印刷

印数 6 001-10 000册

书号 ISBN 7-81053-056-9/O4·1

定价 25.00元(上下册)

(湖南大学版图书凡有印装差错,请向承印厂调换)

目 次

第四篇 相对论基础

12 狭义相对论	(3)
12.1 经典力学的相对性原理与时空观	(3)
12.2 狭义相对论的基本原理	(6)
12.3 狭义相对论的时空观	(7)
12.4 洛仑兹变换	(13)
12.5 相对论动力学	(18)
*12.6 相对论中动量——能量变换 力的变换	(22)
思考题	(24)
习 题	(25)

第五篇 电磁学

13 真空中的静电场	(29)
13.1 电荷的基本性质	(29)
13.2 库仑定律	(31)
13.3 电场与电场强度	(34)
13.4 高斯定理	(41)
13.5 电势	(47)
13.6 静电场能量	(57)
思考题	(64)
习 题	(65)
14 静电场中的导体和电介质	(69)
14.1 静电场中的导体	(69)
14.2 电容器 电容	(78)

14.3	静电场中的电介质	(83)
14.4	电位移矢量与高斯定理	(87)
14.5	有电介质时的静电场能量	(90)
*14.6	静电学的若干应用	(92)
	思考题	(94)
	习 题	(95)
15	稳恒电流	(99)
15.1	稳恒电流 电流密度矢量	(99)
15.2	欧姆定律 焦耳-楞次定律的微分式	(103)
15.3	电动势	(108)
15.4	有电动势的电路	(110)
15.5	温差电动势	(114)
	思考题	(115)
	习 题	(116)
16	稳恒电流的磁场	(119)
16.1	磁场 磁场的高斯定理	(119)
16.2	毕奥-萨伐尔定律	(122)
16.3	安培环路定理	(127)
16.4	磁场对载流导线的作用力	(133)
16.5	带电粒子在磁场中的运动	(141)
*16.6	电磁场的相对性	(147)
	思考题	(152)
	习 题	(152)
17	磁介质的磁化	(159)
17.1	磁介质的磁化 磁化强度矢量	(159)
17.2	磁场强度矢量 有介质时的安培环路定理	(162)
17.3	顺磁质与抗磁质	(166)
17.4	铁磁质	(168)
	思考题	(173)
	习 题	(173)

18 电磁感应	(175)
18.1 法拉第电磁感应定律	(175)
18.2 动生电动势	(178)
18.3 感生电动势	(182)
18.4 自感与互感	(189)
18.5 磁场的能量	(193)
思考题	(198)
习 题	(198)
19 电磁场与电磁波	(205)
19.1 位移电流	(205)
19.2 麦克斯韦方程组	(210)
19.3 电磁波	(212)
19.4 电磁振荡 电磁波的辐射和传播	(216)
思考题	(221)
习 题	(221)

第六篇 量子 and 激光

20 量子物理基础	(227)
20.1 黑体辐射和量子论的诞生	(227)
20.2 光电效应	(232)
20.3 康普顿效应	(238)
20.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	(242)
20.5 德布罗意波	(247)
20.6 不确定性关系	(253)
20.7 波函数 薛定谔方程	(256)
20.8 一维势阱 势垒	(261)
20.9 氢原子的量子力学处理	(267)
20.10 电子自旋 四个量子数	(271)
20.11 原子的电子壳层结构	(274)
思考题	(276)

习 题	(277)
21 激光	(281)
21.1 原子的激发和辐射	(281)
21.2 产生激光的条件	(283)
21.3 激光的纵模和横模	(288)
21.4 激光的特性及其应用	(290)
习 题	(291)
22 固体的能带结构	(293)
22.1 固体的能带	(293)
22.2 导体和绝缘体	(296)
22.3 半导体的导电机构	(297)
22.4 p-n 结	(300)
22.5 半导体应用简介	(302)
习 题	(304)
习题参考答案	(305)

第四篇

相对论基础

12 狭义相对论

自 17 世纪以来,经过众多科学家近三个世纪的不懈努力,以牛顿力学为代表的经典物理学取得了令人瞩目的成就,除了在高速和微观领域中少数几个问题上遇到的“小小麻烦”外,物理学能满意地解释与其有关的其余所有问题。当历史跨入 20 世纪的时候,许多物理学家相信:物理学这座大厦已经基本完工,剩下的工作不过是如何把这座大厦装修得漂亮点而已。然而,正是那几个“小小的麻烦”在物理学海域中掀起了滔天巨浪,迫使物理学家们对一些基本概念作深入仔细的思考,由此而产生的相对论和量子力学撑开了物理学的一片崭新天空,今天的量子力学成了人类开启微观世界的金钥匙,而相对论中的诸多原则,是所有物理规律必须遵守的共同规范。这一章我们讨论局限于惯性参考系中的相对论——狭义相对论。

12.1 经典力学的相对性原理与时空观

牛顿力学的研究对象是机械运动,而机械运动与参考系有关,只有选好了参考系,才有可能应用牛顿力学的基本规律来研究物体的机械运动,在解决实际问题时,我们往往希望选取比较方便的参考系,这自然带来一个问题:力学基本规律在不同参考系中形式都相同吗?

由于机械运动是物体位置随时间的变化,研究物体的机械运动必然离不开时间和空间的测量,时间和空间的测量是否和参考

系有关呢？

12.1.1 经典力学的相对性原理

为了回答第一个问题，我们不妨对力学部分作个简单回顾。记得在第二章里，我们把牛顿力学的基本规律归纳为牛顿三大运动定律，并指出：牛顿定律对所有惯性参考系都成立，换句话说：“牛顿力学的基本规律在所有不同的惯性参考系中都具有相同的形式，这一结论，称为牛顿力学的相对性原理。

历史上，力学的相对性原理并不是在牛顿力学创立之后才提出的。早在16世纪，为了解释地球虽然绕日运动但为什么又无法觉察到这一运动时，伽利略曾以大船作比喻指出：在一艘平稳地以匀速前进的船内作任何实验，如人的跳跃、水的下落、烟的上升、鱼的游动甚至蝴蝶和苍蝇的飞行，都和船静止不动时的情形完全一样，没有任何区别，因此，无法通过力学实验来判断船本身是静止还是在运动。究其深层原因，是因为支配一切力学过程的基本力学规律在所有不同的惯性参考系中都相同，在不同的惯性参考系中，相同的力学现象必然按相同的方式发生和演化。因此，上述结论实际上是力学相对性原理的又一表述形式。

12.1.2 牛顿力学的时空观与伽利略变换

至于时间和空间的测量，日常经验告诉我们：在任何惯性参考系中来测量两件事情的时间和空间间隔，所得到的结果总是完全相同，我们“当然”有“足够”的理由认为：时间和空间的测量与参考系无关，时间和空间是一种不依赖于观察者的绝对的东西。这一关于时间和空间的看法，称为绝对时空观。

利用时空测量的绝对性假设，不难找到惯性参考系之间时空坐标的变换关系：

设有两个不同的惯性参考系 S 和 S' ， S' 相对于 S 作匀速直线运动，速度为 v ，取其相对运动方向为公共的 xx' 轴方向， y' 与 y 、 z' 与 z 互相平行，记两坐标系完全重合时 $t=t'=0$ ，如图 12.1 所示。

我们分别在两个不同惯性参考系中来考察某一事件 P 。

在 S 系中考察,事件 P 发生的时空坐标是 (x, y, z, t) ; 在 S' 系中考察,该事件的时空坐标是 (x', y', z', t') 。由于时间间隔测量的绝对性,必有 $t=t'$, 同时,由于 y, y' 及 z, z' 方向无相对运动

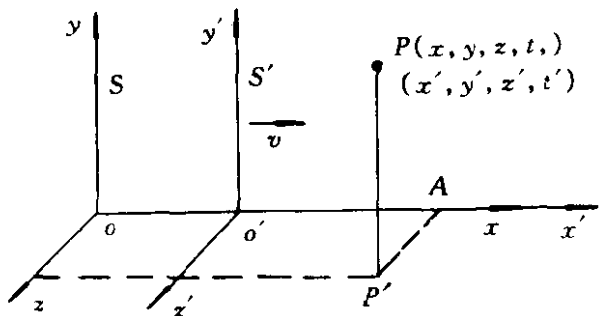


图 12.1 伽利略变换

因而 $y=y', z=z'$; 至于 x 和 x' 间的关系,应该这样来考察: x 即在 S 系中测得的 OA 的长度,应该等于在 S 系中测得的 $O'O$ 的长度再加上同在 S 系中测得的 $O'A$ 的长度。在 S 系中测 OO' , 其长度显然为 vt ; 而为了得到 $O'A$ 在 S 系中测得的长度,先要转到 S' 系中去,在 S' 系中, $O'A$ 的长度当然是 x' , 按照前面绝对时空观的假设,长度的测量与参考系无关,因此,在 S 系中测量, $O'A$ 的长度仍为 x' , 于是有 $x=x'+vt$, 综上所述,我们得到如下关系:

$$\begin{cases} t=t' \\ x=x'+vt' \\ y=y' \\ z=z' \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} t'=t \\ x'=x-vt \\ y'=y \\ z'=z \end{cases} \quad (12.1)$$

上述联系 S 和 S' 两个惯性参考系之间时空坐标的数学变换,称为伽利略变换。

将(12.1)式两边对时间求导可得:

$$\begin{cases} u_x=u_x'+v \\ u_y=u_y' \\ u_z=u_z' \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} u_x'=u_x-v \\ u_y'=u_y \\ u_z'=u_z \end{cases} \quad (12.2)$$

式中 $u_x = \frac{dx}{dt}, u_y = \frac{dy}{dt}, u_z = \frac{dz}{dt}; u_x' = \frac{dx'}{dt'}, u_y' = \frac{dy'}{dt'}, u_z' = \frac{dz'}{dt'}$ 。式(12.2)称为伽利略速度变换。

再对伽利略速度变换式两边求导得: $a_x' = a_x, a_y' = a_y, a_z' = a_z$,

写成矢量式即： $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ ，可见，在不同惯性系中来考察同一对象，其加速度总是相同。

12.1.3 牛顿定律在伽利略变换下的不变性

以牛顿第二定律为例进行说明。设有前述两个不同的惯性参考系 S 和 S' ，在 S 系中有 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 成立，经伽利略变换后，参考系由 S 变至 S' ，同时 \mathbf{F} 、 m 、 \mathbf{a} 分别变成 \mathbf{F}' 、 m' 、 \mathbf{a}' 。由于 $\mathbf{F} = \mathbf{F}'$ ， $m = m'$ ， $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ ，因此有 $\mathbf{F}' = m'\mathbf{a}'$ 。可见，牛顿定律是伽利略变换的不变式，这一结论，通常被认为是牛顿力学相对性原理的第三种表述形式。

值得注意的是，前两种表述没有任何附加条件，而这第三种表述方式是以时空测量的绝对性假设为前提导出来的，因而，严格说来，第三种表述形式并不与前两种形式等价，这种逻辑上的区别，在相对论中会看得更清楚。

12.2 狭义相对论的基本原理

时空的测量真的是绝对的吗？虽然在日常生活中我们已经多次证明时空的测量与参考系无关，但日常生活中的所有测量都是在宏观低速情况下进行的，一旦从低速领域跨进高速领域，我们就没有理由也不应该将低速情况下得到的结论随便推广。19 世纪末的物理学恰恰碰上了这种情况。进入 19 世纪后，物理学的研究范围逐渐向高速领域的深处扩展。至 19 世纪末，麦克斯韦完成了对电磁学工作的全面总结并预言有一种叫做电磁波的东西，该预言旋即被赫兹的实验证实，麦克斯韦还指出：光波是一种特殊频率的电磁波，并算出光在真空中的传播速度为 $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这一速度是相对于真空中哪个参考系而言的呢？

按照伽利略变换，如果在真空中某参考系 S 上光的传播速度是 c ，那么，在其它与 S 存在相对运动的参考系上，光的传播速度

不可能仍然是 c , 结果到底是多少, 可以通过实验来检测。人们“理所当然”地认为: 实验结果应与伽利略变换保持一致。然而, 令人遗憾的是, 不管在真空中哪个惯性参考系中, 也不管沿着什么方向, 我们测得的光速总是那个恒定不变的常数 c 。这一结果显然和伽利略变换矛盾。我们被迫在光速不变和伽利略变换之间作一选择, 进行选择的依据当然只能是现有的实验结果, 因此, 我们不得不认为: 在真空中的任何惯性参考系上, 光沿任意方向的传播速度都是 c , 这一假设, 称为光速不变原理。由于光速不变和伽利略变换不相容, 而伽利略变换又是绝对时空观的直接结果, 因此, 可以预期: 受到光速不变原理的约束, 时空的测量很可能不再与参考系无关。

光速不变使我们推测出时空的测量不再与参考系无关, 同时也隐示着电磁学基本原理与参考系无关, 因为真空中光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是由电磁学基本原理推出来的。如果电磁学的基本原理与参考系有关, 一般情况下不会由它们推出一个与参考系无关的东西, 除非是一种偶然巧合, 否则, 我们有理由认为: 电磁学基本规律在所有不同惯性参考系中形式都相同。这样, 不仅牛顿力学的基本规律与参考系无关, 电磁学的基本规律也与参考系无关, 我们还可将这一结论进一步推广并将其上升为公设: 所有物理规律在所有不同的惯性参考系中形式都相同, 这一结论, 称为相对性原理。

光速不变原理和相对性原理是爱因斯坦在创立狭义相对论时提出的两大基本假设, 在此基础上形成的理论体系把物理学带入了一个生机勃勃的新历史纪元。

12.3 狭义相对论的时空观

12.3.1 “同时”的相对性

所谓“同时”, 意指两件事情的时间间隔为零。由于光速不变原

理和时空测量的绝对性假设互相矛盾,因而,承认光速不变原理将导致如下结论:在一个惯性参考系中同时发生的两件事在另一惯性参考系中未必仍然同时。

考察如下实验:一车厢沿 S 系 x 轴正向以速度 v 运动,车厢中部有一灯泡,从灯泡发出的光讯号向前后两个方向传播并被装在车厢前后两端的接收器 A 、 B 接收到,如图 13.2 所示。取 S' 系固定在车厢上,我们分别在 S 和 S' 系中来考察 A 接收到光讯号与 B 接收到光讯号这两件事情,看看它们是否是同时发生的。

在 S' 系中考察:光讯号沿前后两个方向传播,速度都是 c ,传播的距离相同,因而,光讯号同时到达 A 和 B , A 接收到光讯号和 B 接收到光讯号这两件事情是同时发生的。

在 S 系中观察:根据光速不变原理,向前后两个方向传播的光讯号其速度仍然是 c !但在 S 系中观察,车厢以速度 v 向前运动,因此,向前传播的光讯号到达车厢前端 A 时,光讯号实际

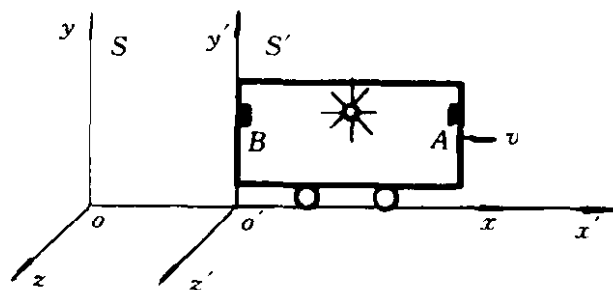


图 12.2 同时的相对性

走过的路程比车厢的半长度长;而向后传播的光讯号到达接收器 B 时光讯号实际走过的路程比车厢的半长度短,显然,在 S 系中考察, A 、 B 分别接收到光讯号这两件事不再是同时发生的。

上述结果正如我们预料的那样,“同时”是相对的!因此,当我们说两件事情是同时发生的时候,我们必须指明是相对于哪个参考系而言。

12.3.2 时间间隔测量的相对性 时间膨胀

“同时”是相对的,时间间隔的测量当然也应该是相对的。

考察如下实验:车厢沿 S 系的 x 轴正向以速度 v 运动,车厢顶部有一反射镜,其正下方装有一个光讯号发生兼接收装置 G , G

发出的光讯号经镜面反射回来后又被 G 接收到。取 S' 系固定在车厢上,如图 12.3 所示。我们分别在 S 和 S' 系中来考察 G 发出和接收到光讯号这两件事情的时间间隔。

S' 系:设在 S' 系中,车厢高度为 h ,光沿竖直方向传播,被反射后仍沿竖直方向回到 G 。因此, G 发出和接收到光讯号这两件事情是在同一地点发生的,其时间间隔为: $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ 。

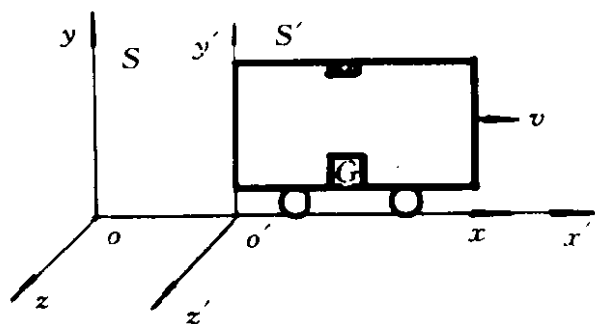


图 12.3

S 系:在 S 系中观察:车厢高度仍为 h (因无 y 和 y' 方向的相对运动),但由于车厢以速度 v 沿 x 轴正向运动,在 G 发出光讯号至 G 接收到光讯号的这一段时间间隔里, G 本身已经向前运动了一段距离,因此, G 发出和接收到光讯号这两件事不再是在同一地点发生的,从 G 发出经镜面反射后又能被 G 接收到的光讯号绝不可能再象 S' 系中观察到的那样沿竖直方向的路径传播。

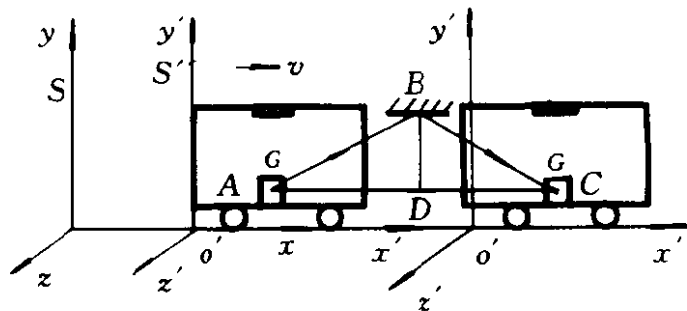


图 12.4 时间间隔的相对性

如图 12.4 所示,虽然 G 发出的光线有无数条,但经历一段时间间隔后又能被 G 接收到的则只有 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 这一条。设 S 系中观察到的 G 发出和接收到光讯号这两件事情的时间间隔为 Δt ,则 $AC = 2AD = v\Delta t$;又由于光速不变,因而有: $AB = BC = c \frac{\Delta t}{2}$;对 $\triangle ABD$ 有: $AB^2 = BD^2 + AD^2$,代入相应数值,并考虑到 $BD = h = \frac{1}{2}c\Delta t'$ 有: $(\frac{1}{2}c\Delta t)^2 = \frac{1}{2}(c\Delta t')^2 + (\frac{1}{2}v\Delta t)^2$,由此解得:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (12.3)$$

式中 $\Delta t'$ 是在 S' 系中观察到的两件事情的时间间隔, 在 S' 系中考察, 两件事是在同一地点发生的, 这样的时间间隔称为本征时或固有时。由(12.3)式可知: 在所有时间间隔中, 本征时最短, 其它参考系中测得的同样两件事情的时间间隔都比本征时长。如果借用钟的快慢来说明这种时间测量上的关系即: S 系中的观察者觉得: S' 系上那些相对于他运动的钟变慢了, S' 系上一段较短的时间相当于 S 系上一段较长的时间, 这种效应, 称为时间膨胀。

值得注意的是: 时间膨胀是一种相对效应, 在 S' 系中观察那些静止于 S 系上的钟, 同样会觉得它们走慢了。

例 12.1 宇宙射线中的 π 介子进入大气层时可衰变并产生叫 μ 子的基本粒子, μ 子相对于地面的速度是 $0.998c$, 实验室测得静止 μ 子的平均寿命为 $2.2 \times 10^{-6} \text{s}$, 试问: 8000 m 高空中由 π 介子衰变释放出的 μ 子能否飞到地面?

解 在地面上测得的 μ 子静止时的寿命即本征时, 若 μ 子相对于地球以 $0.998c$ 的速度运动, 地球上的观察者测得 μ 子的“存活”时间为:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = 3.54 \times 10^{-5} \text{ s}$$

能通过的距离为 $\Delta l = v\Delta t = 1.06 \times 10^4 \text{ m} > 8000 \text{ m}$, 因此, μ 子能够飞到地面。

12.3.3 长度测量的相对性 长度收缩

在日常生活中, 我们经常进行各种长度测量, 长度测量应该遵循什么规则呢?

仍设有前述两惯性参考系 S 和 S' , S' 固定在待测

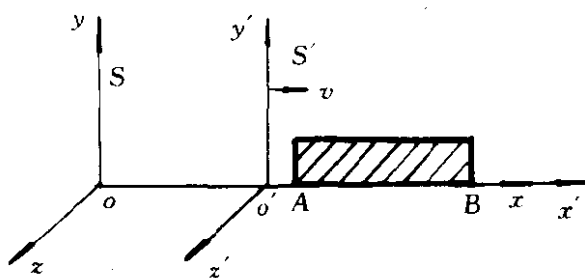


图 12.5 长度测量