

100 题

近代物理百题

王一年 主编



近代物理百题

王
一
平

主
编

内 容 简 介

本书以简明扼要的文字介绍了近代物理百题,内容涉及量子、基本粒子、天体、生物、激光、半导体、超导、生物医学工程、相对论等诸题。

本书适合于具有专科以上的读者阅读。

目前,该书暂以试行本的方式出版,以期征求各有关方面的建议,待修改补充后正式出版。

目 次

洛伦兹变换	(1)
动尺缩短和动钟变慢	(3)
相对论速度变换	(4)
高速多普勒效应	(4)
质能关系	(5)
光子	(7)
电子和正电子	(10)
宇称	(12)
物质波	(13)
不定原理	(14)
量子力学	(16)
薛丁谟方程	(17)
不相容原理	(18)
多电子原子	(21)
固态晶体	(23)
光速	(25)
平面电磁波	(26)
塞曼效应	(27)
激光致冷	(29)
中微子	(31)
引力波	(32)
黑洞	(33)
契伦科夫辐射	(36)
暗物质	(37)

太阳	(38)
虚粒子	(42)
地球	(43)
太阳系的小天体	(46)
生态	(48)
外星生命	(50)
熵	(52)
核纪年	(56)
霍尔效应	(57)
超导	(58)
固体的能带	(60)
超导结	(62)
液晶	(64)
CT	(67)
核磁共振 CT	(69)
光纤	(71)
费米能级	(73)
全息术	(74)
掺杂半导体	(76)
PN 结	(78)
晶体管	(79)
MOS 晶体管	(81)
电路集成	(82)
磁盘	(84)
光盘	(85)
发光二极管	(87)
光敏二极管	(88)
CCD	(91)

电子服装	(92)
燃料电池	(93)
GPS 制导导弹	(95)
宽带无载波通信	(96)
电子自旋器件	(97)
X 射线	(99)
核子	(101)
核衰变	(103)
核力	(105)
裂变和聚变	(106)
激光	(109)
分子	(111)
原子团簇	(112)
纳米微粒	(113)
生物大分子	(114)
克隆	(116)
自由电子激光	(117)
广义相对论概念	(119)
宇宙	(122)
大爆炸宇宙	(122)
反粒子	(124)
基本粒子	(125)
隧道效应	(127)
扫描隧道显微镜	(128)
蝴蝶效应	(130)
孤立子	(131)
玻色子和费米子	(133)
声子和激子	(135)

加速器·····	(136)
同步卫星·····	(139)
磁悬浮列车·····	(140)
转基因植物·····	(141)
光合作用·····	(143)
细胞·····	(145)
细胞的自我复制·····	(147)
干细胞·····	(149)
宇航速度·····	(151)
航天飞机·····	(152)
巡航导弹·····	(153)
喷气发动机·····	(154)
静电·····	(155)
声纳·····	(157)
B超·····	(157)
磁流体发电·····	(159)
激光陀螺·····	(160)
红外探测·····	(161)
光缆·····	(162)
介观物理·····	(164)
粒子和宇宙·····	(165)
参考书刊·····	(167)
编后·····	(169)

近代物理和科技应用一百题

简 说

洛伦兹变换

任何物理事件都要用表示时空的参照系统才能定量描述。图 1 表示两个最简单的惯性系。 S' 是动系, S 是相对的静止系。前者沿后者以速度 v 沿 x 轴正向运动。按照日常生活的经验, 从 S 系看在 S' 系中一点, x' 应为 $x = x' + vt$ 。反过来, 从 S' 看 S 系应是 $x' = x - vt$ 。而 $t' = t$ 。表明时间不参与变换, 它是绝对的。

爱因斯坦(Einstein, 1879~1956)在 1905 年提出狭义相对论(special theory of relativity), 他的理论基于两个公设:

1. 在相对作匀速运动的参照系, 即惯性系之间, 物理定律的表现形式不变。

2. 自由空间(真空)中的光速 c 在所有的惯性系中是常数, 是物质运动速度的极限, 与光源的运动速度无关。

在 19 世纪末期, 为了证明光速是否与光源的运动有关, 曾设想存在着一种叫做以太(ether)的物质, 它无处不在, 它是光传播的载体。科学家们设计了不同的实验, 将地球当做以太中的船, 船上发出光, 则在地球绕太阳运动的不同位置, 会因地球的不同速度, 测出以太中不同的光速, 好比在河道中行船可以测定风速一样。但, 所有的这种寻找所谓“以太风”的实验都以失败而告终。

爱因斯坦认为用图 1 所示的惯性系统描述物理事件时, 它们之间的时空变换关系可依据前述两个公设导出如下的洛伦兹

(Lorentz, 1853~1928)变换:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad y' = y \quad z' = z \quad (1)$$

这是用 S 系的时空变量表示 S' 时空变量的结果。反过来则为:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad y = y' \quad z = z' \quad (2)$$

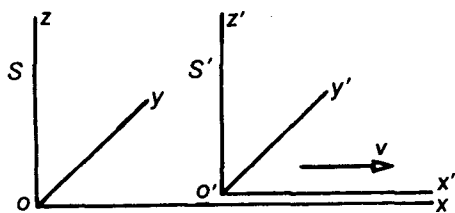


图 1 惯性系

其中, c 是真空中光速, v 是 S' 系沿 S 系的 x 轴正向, 相对于 S 系的速度, 且 $v < c$ 。这种变换与日常生活的观念最显著不同的地方在于: $t \neq t'$, 即不存在绝对的两个系统内不变的时间; 而且, 时间与空间有

密切的线性关系。

设当两个坐标系重合时为 $t = t' = 0$, 从原点沿 $+x$ 发出一个光信号, 则在 t 时间经过的距离是 $x = ct$ 。将此值代入式(1), 即得 $x' = ct'$ 。表明光速不变。可见, 此变换与第二公设一致。麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879)曾证明了光波是电磁波。这个结果也说明电磁场的规律在 Lorentz 变换下的不变性, 与第一公设一致。

动尺缩短和动钟变慢

狭义相对论的重要推论是运动尺的缩短和运动时钟的变慢。

从洛伦兹变换(1), 对于在 S 和 S' 系, 沿 x 轴的一段两端分别为 1、2 的两点, 且 $x_2 > x_1$ 不难得出

$$x_2' - x_1' = \frac{(x_2 - x_1) + v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

令 $x_2' - x_1' = L_0$ 表示在 S' 系中尺的固有(proper)长度, 它相当于在 S' 系中沿 x' 轴置一长 L_0 的尺, 又在 S 系中对它两端同时测量, 即令 $t_2 - t_1 = 0$ 则在 S 系中相应的长度是 $x_2 - x_1 = L$, 而

$$L = L_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)} \quad (1)$$

由于 $v < c$, 根式的值小于 1, 故 $L < L_0$ 。这表明运动的尺在相对静止的 S 系中测量时, 长度缩短了。这个结果在历史上称为 Lorentz-Fitzgerald 收缩。在狭义相对论之前曾作为假设提出过。

又从洛伦兹变换(2)可得

$$t_2 - t_1 = \frac{(t_2' - t_1') + \frac{v}{c^2}(x_2' - x_1')}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

在分子上令 $\Delta t_0 = t_2' - t_1'$, 它是在运动系 S' 中相应的时差。但应在同一地点测量, 使 $x_2' - x_1' = 0$ 。再令 $\Delta t = t_2 - t_1$, 则得

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad (2)$$

式中, 由于 $v < c$ 故 $\Delta t > \Delta t_0$, 这表明在相对静止系 S 中, 运动系 S' 的对应时段膨胀了。即运动系 S' 中的一个时段在静止系 S 中观测时, 变慢了。 Δt_0 又称固有(proper)时, 或称原时。这相当于在 S' 系中的单个时钟经历的时间, 和 S 系中的两个校准了的钟对比的结果。

相对论速度变换

可由洛伦兹变换(1)和(2)通过求微分(dx, dy, dz, dt)和(dx', dy', dz', dt')获得速度 $u(u_x, u_y, u_z)$ 和 $u'(u_x', u_y', u_z')$ 的相对论变换关系:

$$\begin{aligned}u_x' &= \frac{u_x - v}{1 - (v/c^2)u_x} & u_y' &= \frac{u_y \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 - (v/c^2)u_x} \\u_z' &= \frac{u_z \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 - (v/c^2)u_x}\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}u_x &= \frac{u_x' + v}{1 + (v/c^2)u_x'} & u_y &= \frac{u_y' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 + (v/c^2)u_x'} \\u_z &= \frac{u_z' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 + (v/c^2)u_x'}\end{aligned}\quad (2)$$

设想在 S 系一速度 $u_x = c$, $u_y = u_z = 0$, 由(1)得:

$$u_x' = \frac{u_x - v}{1 - (v/c^2)u_x} = \frac{c - v}{1 - (v/c^2)c} = c \quad u_y' = u_z' = 0$$

又一次得到了光速不变。并且从表示洛伦兹变换的图可见, 上两式的 x 方向速度表达式, 就常识而言分母应是 1。而相对论认为分母不是 1, 这说明沿 x 轴的速度加减和常识不同。

高速多普勒效应

声波的多普勒(Doppler)效应, 人们在日常生活中都能体验到。但在光波, 即电磁波的情形, 应该考虑到相对论效应, 而有其特殊性。如图 2 所示, S 是光波波源, O 是观察者。当波源以速度 v 运动时, 设它自身发出的波频率是 f_0 , 这是相对于波源静止的观察者测得的频率。当 S 以速度 v 运动时, 按洛伦兹变换, 观测到

的频率 f 是

$$f = f_0 = \frac{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 - (v/c)\cos\theta}$$

其中, θ 是波源的运动方向和观察者与波源联线的夹角。如果, 观察者正对着波源, 则 $\theta=0$ 而上式成为

$$f = f_0 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

此时, $f > f_0$ 。

如果, 观察者背对波源, 则 $\theta=180^\circ$ 而

$$f = f_0 = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$$

此时, $f < f_0$ 。

如果在横向观察, 则 $\theta=90^\circ$ 而

$$f = f_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$$

也得 $f < f_0$ 。这最后一个结果在非相对论情况是不会出现的, 因为光速是速度的极限。如认为光速是无限大, 则 $f = f_0$ 。此时, 前述 Lorentz 变换成为伽里略 (Galileo 1564 ~ 1642) 变换: $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$ 。

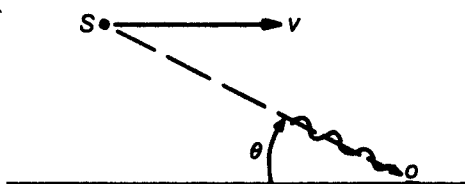


图 2 多普勒效应

质能关系

相对论的变换关系和过去在低速运动得出的规律是不相容的。例: 设在动系 S' 中有一个一定质量的物体只沿 y' 轴以速度 u_y' 运动, 它的动量是 $p_y' = m'u_y'$ 。这个动量在相对于 S' 系静止的 S 系中应该是 $p_y = mu_y$, 但是, S 系和 S' 系的 y 方向速度表达式,

应为

$$u_y = \frac{u_y' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 + (v/c^2)u_x'}$$

在 S' 系中不存在速度的 x' 分量, 即 $u_x' = 0$ 。于是, $u_y = u_y' \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ 。如果 $m = m'$, 则 $p_y \neq p_y'$ 。可见, 只有 $m = m' / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, 才能得到 $p_y = mu_y = m' u_y' = p_y'$, 满足相对论的第一公设, 而动量守恒规律的形式不变。

爱因斯坦认为, 不是在高速条件下动量定律不成立, 应该是物体的质量随速度改变。他认为在惯性系中, 有一个运动质量 m 和静止质量 m_0 的差别, 它们之间的关系是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (u^2/c^2)}} \quad (1)$$

这里, u 是物体的速度, 不是坐标系之间的相对速度。照(1), 前例 S' 系中的 m' 应为 $m_0' / \sqrt{1 - (u_y'^2/c^2)}$; 而 S 系中的 m 应为 $m_0 / \sqrt{1 - ((v^2 + u_y^2)/c^2)}$ 。此物体在 S' 系中静止, $u_y' = 0$; 由速度变换关系知 $u_y = 0$, 就得到(1)。据此, 如物体以光速运动, 则它的静止质量 m_0 应为 0, 才能使其运动质量 m 是有限值。

按力学原理, 物体的动能是外力使它从 0 速度达到一定速度 u 所作的功。在一维情形是

$$\begin{aligned} K &= \int_0^u F dx = \int_0^u \frac{d}{dt}(mu) dx = \int_0^u d(mu) \frac{dx}{dt} \\ &= \int_0^u (n du + u dm) u = \int_0^u (mu du + u^2 dm) \end{aligned}$$

再由(1)可得 $m^2 c^2 - m^2 u^2 = m_0^2 c^2$, 两边取微分得 $2mc^2 dm = m^2 2u du - u^2 2m dm = 0$, 即 $mu du + u^2 dm = c^2 dm$ 。这就是上面积分的被积式。由此得

$$K = \int_{m_0}^m c^2 dm (m - m_0) = E - E_0 \quad (2)$$

其中, $E = mc^2$ 是质量为 m 的物体的总能量, $E_0 = m_0 c^2$ 是它的静止能量, 而动能是两者之差。将(2)中总能量的根式在 $v \ll c$ 的条件下展开, 会得到 $K \approx (1/2) m_0 u^2$ 。与牛顿(Newton 1642~1727)力学的动能表达式一致。

光量子

光量子(light quantum)简称光子(photon), 是电磁辐射的量子(quantum)。

它的出现基于两个重大的研究结果: 黑体辐射和光电效应。

具有一定温度的物体会向四周散热, 叫做热辐射, 同时物体的颜色也随温度而变化。物体温度越高, 辐射越强。因为, 温度越高光谱中最强的辐射频率越高, 物体的颜色就从红, 到白, 到蓝。太阳的光和热就这种以电磁波的方式传到地球。不同的频率, 热效应也不同, 相对来说, 红光的热效应应强。物体不仅能发光也能吸收光, 它显示某种颜色, 是因为它吸收了除此以外的其他频率的电磁波。一般说来, 发射本领大的物质也是吸收本领大的物质。理论分析证明, 一种理想的“黑体”能百分之百地吸收投射到它上面的电磁波, 而在同样的温度下, 它所发出的热辐射也比任何其他物体强。对于黑体, 不论其组成的材料如何, 他们具有在相同温度下发出同样形式的光谱。因此, 研究黑体辐射, 有很大的理论和实践意

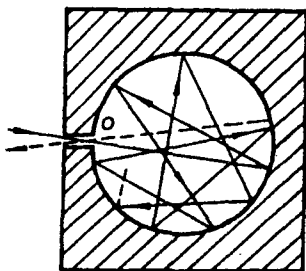


图3 黑体

义。然而,实际上的黑体是一个开了一个小孔的空腔,如图 3 所示。这个小孔可认为是一个黑体的表面。任何辐射投到小孔上,都有进无出,100%地被吸收。如将空腔加热,就有热辐射从小孔出来。这样就可研究黑体的辐射特性。1859 年, H. G. kirchhoff (1824~1887)证明,黑体与热辐射达到平衡时,辐射能量密度 $E(\nu, T)$ 随频率 ν 变化曲线的形状和位置只与黑体的绝对温度 T 有关,而与空腔的形状及组成的物质无关。1983 年 W. Wien(1864~1928)提出了一个说明这种变化的公式,除低频部分外和实验结果符合良好。1900~1905 年间 J. W. S. Rayleigh(1842~1919)和 J. H. Jeans(1877~1946)又导出一个公式,在低频部分与实验相符,但在高频,当 $\nu \rightarrow \infty$ 时引起发散,成为当时有名的“紫外灾难”如图 4 所示。

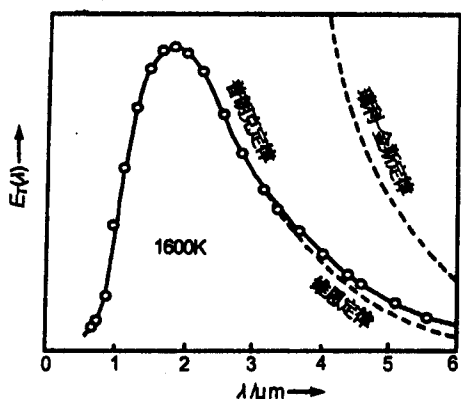


图 4 黑体辐射曲线

1900 年 10 月 19 日, Kirchhoff 的学生普朗克 (M. Planck, 1858~1947) 提出了一个完整的黑体辐射能量密度按频率分布的表达式, 达到了和实验完全相符的结果, 见图 4。他的公式是为了凑合实验数据而猜出来的。但在低频部分和高频部分和前此的公式一

致, 即

$$E(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 (e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (1)$$

其中, $h = 6.626 \, 196 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 称为 Planck 常数; $k = 1.380 \, 622 \times$

$10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, 称为 Boltzmann 常数。同年 12 月 14 日他又提出: 电磁辐射能量的交换只能是量子化的, 即 $E = nh\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, (1) 也就是在这种设想下导出的。他因为阐明这个光的量子理论而获得 1918 年的诺贝尔物理奖。

将光束照射在金属表面上, 会使电子从金属中脱出。这种现象, 叫做光电效应。如图 5 所示。利用光电效应做成的器件, 叫光电管。光电效应的实验规律不能用光的波动理论来解释。1905 年, Einstein 提出光子假说, 用以解释光电效应。

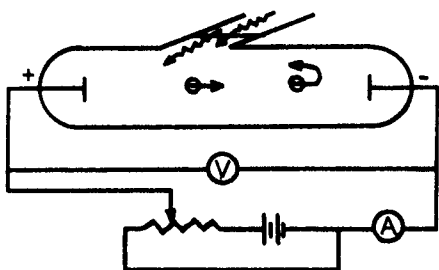


图 5 光电效应

假说, 用以解释光电效应。1916 年 R. A. Millikan (1868~1953) 比较仔细地测量了光的频率和逸出的电子能量之间的关系, 验证了 Einstein 的光电效应量子公式, 并精确测定了 Planck 常量。当光束和物质相互作用时, 其能流并不象波动理论所想象的那样, 是连续分布的, 而是集中在一些叫做光子的粒子上。光子的能量 E 正比于它的频率 ν , 即 $E = h\nu$ 。这里, h 是 Planck 常量。Einstein 发展了 Planck 的能量量子化的假说, 将其从局限于谐振子的发射或吸收机制, 改为辐射能本身一粒一粒地集中存在。他的公式是

$$h\nu = eV_0 + A \quad (2)$$

其中, V_0 是所谓反向遏止电压。它是在图 5 中的反向使光电流为零(电子转头)时的电压。而 A 是金属的逸出功。即电子从金属内部逸出表面应消耗的能量。

进一步奠定光子理论的一个现象是康普顿(A. H. Compton, 1892~1962)效应。照经典电动力学的理论, 带电粒子对光的散射过程不会改变光的频率。1922 年 Compton 认为如果电磁辐射是

光量子,经过散射后光子的频率会降低,且与散射角度有关。他认为这是一种完全的弹性散射。如图 6 所示,依照能量和动量的守恒,他发现被散射的光子波长会移动由下式表示:

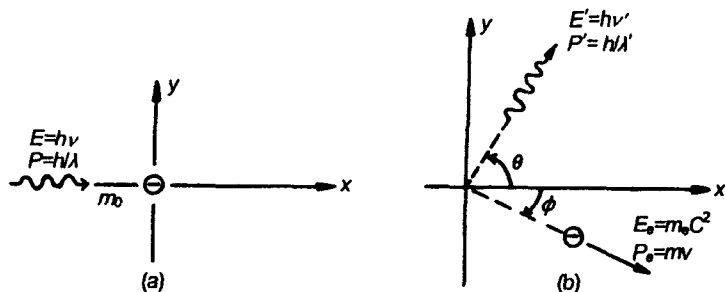


图 6 康普顿效应

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) \quad (3)$$

图 6 中,(a)是散射前,(b)是散射后的示意。Compton 使用的是 X 射线($\lambda=0.7 \times 10^{-10} \text{ m}$)对石墨散射,射线的能量是 $1.8 \times 10^4 \text{ eV}$,比碳原子外层电子的束缚能大几个数量级。可将这些电子近似看做自由电子。图上指出光子的动量是 $p=h/\lambda$ 。因为,若认为光子的运动质量是有限值,则由 $p=mc=E=mc^2/c=h\nu/c$,考虑到,对于波动 $\lambda=c/\nu$,故得 $p=h/\lambda$ 。

电子和正电子

电子(electron)被认为是所谓“第一代”基本粒子,因为它是最初发现的原子的组成部分之一。它具有负电荷 $e=1.602\,192 \times 10^{-19} \text{ 库伦}$,和质量 $m=9.109\,56 \times 10^{-31} \text{ 千克}$ 。它属于所谓“轻子”(lepton),具有 $1/2$ 的自旋量子数。它是在 1895 年由 J. J. Thom-