

王天城 编著

大学物理学

新编

——相对论篇



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

04/337

2007

大学物理学新编

——相对论篇

王文诚 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学新编/王文诚编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2007. 12

ISBN 978-7-308-05645-8

I. 大… II. 王… III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 169354 号

大学物理学新编——相对论篇

王文诚 编著

策划组稿 王 镨

责任编辑 王 镨

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571-88925592, 88273066(传真)

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司

印 刷 浙江中恒世纪印务有限公司

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 4.625

字 数 200 千

版 印 次 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-05645-8

定 价 20.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

内 容 简 介

本书在大学物理水平上,用类比法引进四度时空的概念和最基本的张量知识,阐述相对论及其在物理学各个领域中的理论知识与应用。狭义相对论包括狭义相对论原理、相对论力学、相对论电磁学、相对论热学、相对论光学和相对论量子力学;广义相对论包括广义相对论原理、广义相对论实验验证、黑洞和广义相对论宇宙学等。

本书可作为物理专业和其他专业大学生学习大学物理的辅助教材和参考书,也可以供其他专业技术人员和物理教师阅读与参考。

前 言

自 1905 年爱因斯坦对狭义相对论作精辟陈述以来,人们对宇宙的认识、对微观世界的认识,都跟相对论理论分不开了。相对论和量子力学是近代物理学的两大支柱,它已在物理学的各个领域中得到广泛的应用,在人类生产力的发展上起到了不可估量的推动作用,比如原子能的发现与发展就是基于爱因斯坦的相对论的能量公式,这是大家所十分熟悉的。

然而真正研究相对论,那是理论物理工作者的事,因为它的标准的推导涉及到张量的计算和微分几何的知识,对一般人来说,不是那么容易接受的,而它的结论又是那么诱人,因而许多人往往对相对论十分感兴趣,却又觉得高不可攀,望而却步。本书旨在大学物理水平上对狭义相对论和广义相对论的那些结果,提供一个即使是非理论工作者也可以接受的阐述与推导,让更多的人能了解相对论知识。

相对论是物理学的一部分,它同样是基础学科,它与自然科学和人文科学都有密切的关系。学习相对论不仅能学到相对论的知识,而且能揭示科学发展的内在逻辑,让人们了解认识论的原则在科学发展中的伟大作用。爱因斯坦曾说过:“当我记起我在教学中所碰到的那些最有才能的学生,也就是那些不仅以单纯伶俐敏捷,而且以独立的判断能力显露头角的人们时,我们可以肯定地说:他们是积极关心认识论的。”这一点对后人开发人类的智能,培养创造性的思维,给予了一条光辉的启示。

本书统一用的是国际单位制(SI 单位制)。需要说明的是,

近年来出版的一些相对论著作,它们用的单位前后不统一,力学部分用的是国际单位,而电磁学部分因为原封不动地沿袭于过去的经典著作,用的却是高斯单位。这不适合当代学生的学习。现代教科书多是统一用国际单位制的。在广义相对论中作有关运算时,我们采用几何化单位制,最后用量纲法则将其还原为普通单位制(SI)。

本书是根据本人十多年来发表的有关论文、授课讲义、专业报告和有关资料编著的。它不是科普著作,也不是高精尖的专业课本。它只是一本大学物理学水平的相对论物理学,其内容涉及物理学的各个领域。特别是广义相对论部分,它为科普与专业之间架起一座桥梁,为广大的非理论物理专业的大学生,特别是师范类物理专业的大学生为扩大知识面,学习相对论,学点爱因斯坦的创造性的思维方法提供一个容易接受的学习平台,也为一般物理专业的大学生进入相对论专业的研究铺平道路。

由于本人学识不深,水平有限,书中一定有错误和不妥之处,恳望同仁赐教。

王文诚

2007.10

目 录

第一篇 狭义相对论

第一章 狭义相对论原理	3
§ 1 古典力学的相对性原理	3
§ 2 电磁学定律不遵从伽利略变换的古典相对性原理	5
§ 3 狭义相对论原理	8
§ 4 洛伦兹变换	9
§ 5 洛伦兹速度变换	14
§ 6 狭义相对论时空	15
第二章 狭义相对论力学	19
§ 1 狭义相对论四维时空	19
§ 2 物理定律的变换	23
§ 3 狭义相对论运动定律	24
§ 4 动量—能量及其变换	27
§ 5 相对论动能	28
§ 6 力的变换	29
§ 7 拉格朗日方程	31
§ 8 哈密顿方程	34
§ 9 中心轨道	35
第三章 狭义相对论电磁学	38
§ 1 电磁场量的相对性及其变换	38

§ 2	电荷	42
§ 3	电荷密度与电流密度	43
§ 4	张量	46
§ 5	电磁场量及麦克斯韦方程的张量表述	49
§ 6	电荷守恒定律与麦克斯韦方程遵从狭义相对论原理的另一证明	53
§ 7	电磁场能量、动量和应力的变换	57
§ 8	标势与矢势	60
§ 9	带电粒子在电磁场中的运动方程	64
§ 10	带电粒子的拉格朗日方程	65
§ 11	带电粒子的哈密顿函数	66
第四章	狭义相对论光学	69
§ 1	光的二重性	69
§ 2	光行差	70
§ 3	多普勒效应	71
§ 4	光在运动平面镜上的反射	73
§ 5	光在运动媒质中的传播	74
§ 6	光子与物质的相互作用	76
第五章	狭义相对论热力学、统计力学	79
§ 1	压强	79
§ 2	热与热力学第一定律	80
§ 3	温度与熵	81
§ 4	一般的热力学系统	82
§ 5	统计力学	83
第六章	狭义相对论量子力学	84
§ 1	克林—戈登(Klein—Gordon)方程	84
§ 2	狄喇克方程	85
§ 3	自由电子的狄喇克方程的解、正电子理论	87

第二篇 广义相对论

第七章	广义相对论原理	91
§ 1	等效原理	91
§ 2	广义相对论原理	93
§ 3	广义张量介绍	94
§ 4	广义相对论引力场方程	98
§ 5	引力场的希瓦兹希德(Schwarzschild)解	99
§ 6	引力辐射与引力场的能量定律	103
§ 7	统一场论	105
第八章	广义相对论的实验验证	106
§ 1	水星近日点的进动	106
§ 2	光线在希瓦兹希德场中的偏折	109
§ 3	光谱线的引力红移	111
§ 4	雷达回波延迟	112
第九章	黑洞	114
§ 1	黑洞	114
§ 2	希瓦兹希德(Schwarzschild)黑洞	114
§ 3	恒星坍缩可能形成黑洞	120
§ 4	黑洞的分类	122
§ 5	黑洞动力学	123
§ 6	黑洞热力学	125
第十章	广义相对论宇宙学	129
§ 1	广义相对论以前的宇宙论	129
§ 2	膨胀宇宙的发现	130
§ 3	广义相对论膨胀宇宙学	131
§ 4	大爆炸——宇宙生成	134

第一篇

狭义相对论

第一章 狭义相对论原理

§ 1 古典力学的相对性原理

(1) 伽俐略变换 古典时空理论认为,时空是独立于物质之外的绝对时间与空间,而且是彼此孤立的。在一个惯性系 S 中观察到某一事件发生在 (x, y, z, t) ,那么在另一个惯性系 S' (S' 相对于 S 以速度 u 向 x 轴的正方向匀速运动,而且 $t=t'=0$ 时,原点 O' 与原点 O 重合, x' 轴与 x 轴重合, y' 轴与 y 轴平行, z' 轴与 z 轴平行,见图 1.1.1)中,观察到此事件是发生在 (x', y', z', t') ,它们之间的关系是:

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

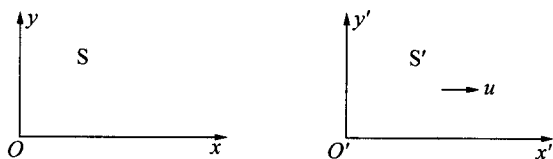


图 1.1.1

这就是伽俐略坐标变换。如果一物体运动,在 S 看速度是 (v_x, v_y, v_z) ,而在 S' 看速度是 (v'_x, v'_y, v'_z) ,它们之间的关系是

$$\begin{cases} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases} \quad \begin{cases} v_x = v'_x + u \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{cases} \quad (2)$$

这就是伽利略速度变换。

(2) 古典力学相对性原理 物理学家发现, 古典力学定律具有由一个惯性系通过伽利略变换, 变换到另一惯性系, 其形式不变的性质。古典力学定律的这个性质就叫做古典力学相对性原理。

例如, 实验证明, 在 S 系看质点运动遵从牛顿第二定律 $F = ma$, 在 S' 系来看, 因为 $F' = F$, $ma' = m \frac{dv'}{dt'} = m \frac{d(v+u)}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$, 所以仍然有 $F' = ma'$, 形式完全一样。

又例如, 在 S 系中观察到两个质点在 x 轴方向弹性碰撞, 发现满足动量守恒与动能守恒定律, 即

$$\begin{aligned} m_1 v_{10} + m_2 v_{20} &= m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ \frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

那么在另一个惯性系 S' 中看, 当然也是弹性碰撞, 这时由 (2) 把 (3) 式变换到 S' 中有

$$\begin{cases} m_1 (v'_{10} + u) + m_2 (v'_{20} + u) = m_1 (v'_1 + u) + m_2 (v'_2 + u) \\ \frac{1}{2} m_1 (v'_{10} + u)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v'_{20} + u)^2 = \frac{1}{2} m_1 (v'_1 + u)^2 \\ \quad + \frac{1}{2} m_2 (v'_2 + u)^2 \end{cases}$$

简化后得

$$\begin{aligned} m_1 v'_{10} + m_2 v'_{20} &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ \frac{1}{2} m_1 v'^2_{10} + \frac{1}{2} m_2 v'^2_{20} &= \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \end{aligned}$$

仍然满足形式与(3)完全一样的动量守恒与动能守恒定律。这也就是古典力学相对性原理。

§2 电磁学定律不遵从伽利略变换的古典相对性原理

(1) 光的传播定律 大家知道,光波就是电磁波,它遵从电磁学定律。这里最简单的就是光在真空中的传播定律,电磁理论指出,光在真空中的传播速度为 $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$ (常数),而且各向同性。比如在 S 系中,真空中光讯号在某一方向 (α, β, γ) 发出,那么光速是

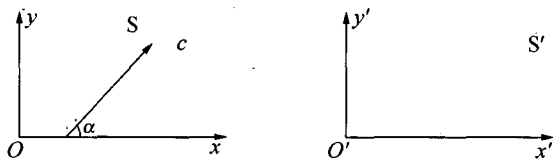


图 1.1.2

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{c^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma)} = c$$

且与方向角无关,即各向同性。如果通过伽利略变换,变换到 S' 系,则有

$$v' = \sqrt{v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2} = \sqrt{(c \cos \alpha - u)^2 + c^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos^2 \gamma} \neq c$$

而且与方向角 α 有关。也就是说,在 S' 看来,光在真空中的传播速度不是 c ,而且各向异性。可见,光传播定律不遵从伽利略变换的古典相对性原理。

(2) 绝对静止的参照系不存在 电磁学定律不遵从古典相对性原理,有两种解释:一是电磁学定律还未找到标准形式,如果找到标准形式,它就满足相对性原理;二是相对性原理不是普

遍规律。但是众所周知,电磁学定律是实验总结出来的,而且也被实践所证实,故不能认为它的形式不标准,所以,唯一可能的是相对性原理不是普遍规律。

又,如果说相对性原理不是普遍规律,那么电磁学定律不满足相对性原理,电磁学定律就应该存在一个绝对标准形式。或许客观世界存在一个绝对静止的参照系,也就是历史上曾假设过的以太物质。在此物质的参照系中,电磁学定律具有标准形式,比如在此参照系中,光在真空中的传播速度是 c ,且各向同性,而对运动的参照系,光速却应与运动有关。也或许光传播定律的标准形式只是在相对于光源静止的参照系中才能成立,而当光源运动时,光速则与光源运动有关。

根据这两种可能的解释,人们开始寻求绝对静止参照系。迈克耳逊—莫雷(Michelson - Morley 1887)实验就是为此而设计的。当时,人们想象世界充满一种绝对静止的物质以太,光在以太中传播速度为 c ,地球在以太中运动。在地球上,沿着运动方向上的光速与垂直于运动方向上的光速应不是一样的,也都不是 c ,这样就可以用干涉仪测量这两个方向上的光的光程差,测得地球相对于以太的速度,从而就可以确立以太这个绝对静止的参照系。但实验失败了!如果春天做这个实验失败,可能是由于春天地球的绝对速度正好是零,所以测不出,那么秋天地球的绝对速度就不应是零,因为地球绕太阳公转,秋天与春天它相对于太阳的速度正好相反。可是,秋天去做这个实验仍然失败了!这是否是因为地球运动时空气把以太带着一起运动的缘故呢?答案是否定的:菲索用实验证明,折射率近于 1 的空气,不可能带动以太一起运动,这一点也被光行差实验所证实。那么,这是否是因为光在以太中的速度与光源速度有关呢?于是,人们又设计了观察双星实验。比如双星 A 与 B 相互环绕做圆周运动,见图 1.1.3,如果光速与光源运动有关,那么地球 E 上接收 A 在 P 点发出的光信号所需的时间要短于接收 A 在 R

点发出的光信号所需的时间,由于多普勒效应,地球接收到 A 在 P 点的光信号偏紫,接收到 A 在 R 点发出的光信号要偏红。这样,人们就会发现偏紫到偏红和偏红到偏紫的周期不一样。例如,假设双星 A 绕 B 周期是 10 天, P 与 R 到地球 E 的距离为 1 光年, A 在 P 点于 1999 年 1 月 10 号发出光信号。如果光速与光源速度有关,那么地球上收到此光信号(偏紫)所需的时间比 1 年要短,假设短 1 天,那就是 2000 年 1 月 9 号收到。5 天以后,1999 年 1 月 15 号, A 在 R 点发出光信号,地球上收到此信号(偏红)所需时间应比 1 年要长,假设长 1 天,那就是 2000 年 1 月 16 号收到。又过 5 天,1999 年 1 月 20 号, A 又在 P 点发出光信号,地球上收到此信号(偏紫)应是 2000 年 1 月 19 号。由此,人们在地球上观察,应发现偏紫到偏红是 7 天,而偏红到偏紫是 3 天。但是,观察结果否定了这种假设,说明光速与光源运动无关。

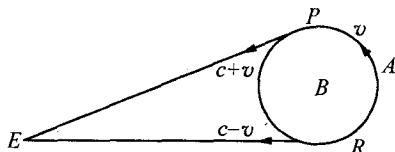


图 1.1.3

还有一件事也说明光速与光源速度无关。公元 1054 年发生过一次非常著名的超新星爆发事件,爆发残骸就是现在金牛座中的蟹状星云。假使光速与光源速度有关,那么向着地球飞来的物质 A 发出的光的光速应是 $c+v$,而背着地球飞去的物质 B 发出的光的光速应是 $c-v$,这样我们一定是先看到 A 发出的光,再经过几十年以后才能看到 B 发出的光。这样一来,一定在几十年中都能看到这颗超新星爆发时所产生的强光。但实际上,却如同我国宋史的记载“岁余稍没”那样,即一年多强光就消失了。这说明光速确实与光源速度无关。

以上事实说明电磁学定律存在绝对形式的假设不成立。

§3 狭义相对论原理

既然事实否定了电磁学定律存在绝对形式的思想,那么就应当确信相对性原理是物理学的普遍规律。因为客观规律应是不以人的意志为转移的,所以物理定律就不应随参照系的不同而不同。这就是确信相对性原理是物理学的普遍规律的基本依据。爱因斯坦就这样说过,他相信莱布尼兹的话,现象世界存在着“先定的和谐(一种预先永远确定了和谐)”。

当然,爱因斯坦创立狭义相对论,除了他的哲学思想指导外,还有实验观察的依据。他这样说过,他创立相对论是由于他深信物体在磁场中所感生的电动力不过是一种电场罢了,斐索和光行差现象也引导他提出相对论。

总结以上实验,爱因斯坦提出了狭义相对论原理:①一切惯性系对物理定律都有同样的描述(叫相对性原理);②真空中光速对一切惯性系都是常数 c (叫光速不变原理)。

按照经典观点,光速不变与相对性原理是相互矛盾的,光速不变是光学(电磁学)的,相对性原理是经典力学的。它正表明电磁学与牛顿力学的不对称。但是如果站在更高一个层次来看,它们只存在表面的抵触,本质上却是同一回事,就是我们不但不能用力学方法,也不能用电磁学或光学方法发现任何惯性系相对于绝对静止参照系的绝对运动。假如光速与观察者速度有关,那么就可以找到测得光速为极值的观察者,此观察者就可以认为是最优越的参照系,即绝对参照系。爱因斯坦就曾这样表述过:“全部物理现象具有这样的特征,即它们不为绝对运动的引进提供任何依据,或者用比较简短但不那么精确的话来说,没有绝对运动。”

既然电磁学定律也应遵从相对性原理,那就意味着伽俐略