

高等院校理工科教材

# 近代物理与高新技术

吴 平 许秋生 杨雁南 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

高等院校理工科教材

# 近代物理与高新技术

吴 平 许秋生 杨雁南 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

**图书在版编目(CIP)数据**

近代物理与高新技术/吴平等编著. —北京:国防工业出版社, 2004.9

高等院校理工科教材

ISBN 7-118-03582-3

I. 近… II. 吴… III. 物理学—高等学校—教材 IV. 041

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079991 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17 388 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—5000 册 定价:25.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 前 言

物理学是研究物质运动最普遍、最基本规律的科学,因而大学物理课程一直是理工科各专业的一门重要的基础理论课。但在教学实践中,我们深切地感受到,大学物理作为一门历史悠久的课程,其内容主要还是 19 世纪以前的经典物理,而 20 世纪初发展起来并对当代高新技术的发展提供了巨大原动力的近代物理则涉及较少,已明显表现出与当今飞速发展的科学技术不相适应。随着科学技术的发展和新时期对人才要求的提高,在教学内容、课程体系和教学手段等方面的改革越来越显得迫切。

纵观物理学的发展,从 17 世纪到 19 世纪,物理学经过三次大的综合,先后建立起牛顿力学、热力学和麦克斯韦电磁场理论,构造起经典物理学的框架,为宏观领域和低速空间中的自然科学奠定了理论基础。因此,当时一些人认为物理学方面的问题已基本解决。1900 年英国物理学家开尔文展望 20 世纪科学时指出“在已经基本建成的科学大厦中,后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了”,但同时又指出“在物理学晴朗天空的远处,还有两朵小小的令人不安的乌云”,这两朵“乌云”指的是当时物理学无法解释的两个实验,一个是黑体单色辐射实验,另一个是迈克耳逊—莫雷实验。

实际上,19 世纪后期,已经开始显现出未来科学繁荣的曙光,科学家们发现了一系列新现象。1895 年,物理学家伦琴在探索阴极射线本性的研究中,意外发现了 X 光。在对 X 光的研究中,物理学家贝克勒尔发现了铀元素具有天然放射性,后来居里夫妇又发现了钍、钋、镭等同样具有天然放射性。1897 年英国物理学家汤姆逊在研究阴极射线的本质过程中证实了阴极射线是由带负电荷的粒子组成的,从而发现了电子。除此之外,前述的两朵“小小的乌云”——黑体辐射谱和迈克尔逊实验“零”结果等,都无法在经典物理学中得到解释,从而引发了 19 世纪与 20 世纪之交的物理学革命风暴,导致了量子论与相对论的建立,创立起新的物理学体系——近代物理学。

近代物理学将研究领域拓展到了微观和宇观领域,经过百年的发展,近代物理学的原理和方法已深入到自然科学、工农业生产、医疗卫生、日常生活等各个领域,以近代物理学为基础的高新技术迅速地发展起来,如半导体技术、大规模集成电路、光电子技术、核技术、空间技术、低温技术等,大大加快了科学技术的发展速度和人类文明的进程。因此,近代物理学的基本原理和方法已成为当代大学生不可缺少的知识构件,也是 21 世纪进行科学研究、知识创新、高新技术开发所必备的科学素质的一个重要部分。

本教材的编写是我们进行大学物理课程教学内容和课程体系改革的一部分,其指导思想是想通过介绍近代物理学基础——相对论和量子论,以及近代物理在高新技术中的应用,使学生们初步了解近代物理学和高新技术中的基本概念和方法、近代物理对高新技术的作用、当代高新技术的发展等,从而使课程内容具有现代气息,为学生们在科学技术飞速发展的今天立业创新打下基础。

本教材的内容包括相对论、电磁辐射的量子性、量子力学基础、激光物理与技术、红外

物理与技术、非线性物理、新能源、材料科学与技术,是大学物理经典部分的后续课程。因此,本教材不过多地涉及技术性细节,力求以普通物理的语言阐述,适当铺垫一些理论过程。教学中可以先讲授量子论的内容,其他各章内容相对独立,可以根据课时和需要,选择其中的章节或调整各章的顺序。在大学物理课程中如已讲授了相对论和量子论的内容,则可选择其他高新技术内容讲授。

本书是在 2000 年编写的校内讲义的基础上,经过教学实践应用并进行修改而完成的。在编写和出版过程中,得到了南京航空航天大学教务处和教材建设委员会的大力支持,在此表示衷心感谢。

本书的编写分工如下:吴平编写第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 8 章,许秋生编写第 1 章、第 6 章、第 7 章,杨雁南编写第 4 章。全书由吴平统稿。

由于书中内容涉及面广,加之编者水平有限,经验不足,而且高新技术的发展日新月异,在书中一定有不少不妥和错误之处,敬请批评指正。

编 者  
2004 年 7 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 相对论和现代宇宙学          | 1  |
| 1.1 相对论运动学               | 1  |
| 1.1.1 爱因斯坦的“追光实验”        | 1  |
| 1.1.2 同时的相对性和时间膨胀        | 2  |
| 1.1.3 高速旅行可以长寿吗          | 5  |
| 1.1.4 运动的尺变短             | 5  |
| 1.1.5 光速能够超越吗            | 6  |
| 1.2 相对论动力学,质能关系式         | 7  |
| 1.2.1 质量随速度而变化           | 7  |
| 1.2.2 改变世界的方程——质能关系式     | 8  |
| 1.3 广义相对论简介              | 10 |
| 1.3.1 广义相对论基本原理          | 10 |
| 1.3.2 广义相对论的实践检验         | 13 |
| 1.3.3 光频的引力红移            | 14 |
| 1.3.4 双星的引力辐射            | 14 |
| 1.3.5 黑洞                 | 15 |
| 1.4 现代宇宙学                | 17 |
| 1.4.1 可观测宇宙的概貌           | 17 |
| 1.4.2 宇宙在膨胀——哈勃红移        | 18 |
| 1.4.3 早期宇宙的遗迹——3K 微波背景辐射 | 19 |
| 1.4.4 宇宙年龄的估计            | 21 |
| 1.4.5 牛顿的无限宇宙模型          | 21 |
| 1.4.6 爱因斯坦的有限无边宇宙模型      | 23 |
| 1.4.7 大爆炸宇宙学(宇宙学的标准模型)   | 24 |
| 1.5 恒星的诞生、演化及其归宿         | 26 |
| 1.5.1 星际物质和恒星的诞生         | 26 |
| 1.5.2 恒星的演化及其归宿          | 27 |
| 1.5.3 从“天关客星”到脉冲星的发现     | 28 |
| 1.6 太阳系和地球的起源与演化         | 29 |
| 1.6.1 太阳系概貌              | 29 |
| 1.6.2 太阳系的起源和演化          | 30 |
| 1.6.3 地球的起源和演化           | 30 |
| 第 2 章 电磁辐射的量子化           | 32 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 2.1 热辐射            | 32 |
| 2.1.1 描述热辐射的基本物理量  | 32 |
| 2.1.2 基尔霍夫定律       | 33 |
| 2.1.3 黑体的辐射定律      | 33 |
| 2.1.4 经典物理学所遇到的困难  | 34 |
| 2.1.5 普朗克公式        | 35 |
| 2.2 光电效应           | 36 |
| 2.2.1 光电效应的实验规律    | 37 |
| 2.2.2 光波动理论的缺陷     | 38 |
| 2.2.3 爱因斯坦光子假说     | 38 |
| 2.3 康普顿效应          | 39 |
| 2.3.1 康普顿实验        | 39 |
| 2.3.2 光子理论的解释      | 40 |
| 2.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论 | 42 |
| 2.4.1 氢原子光谱的规律性    | 42 |
| 2.4.2 玻尔的氢原子理论     | 43 |
| 2.4.3 玻尔理论的缺陷      | 45 |
| <b>第3章 量子力学基础</b>  | 46 |
| 3.1 微观粒子的波粒二象性     | 46 |
| 3.1.1 德布罗意假设       | 46 |
| 3.1.2 实物粒子波动性实验    | 46 |
| 3.1.3 德布罗意波的统计解释   | 47 |
| 3.2 不确定关系          | 48 |
| 3.3 波函数 薛定谔方程      | 49 |
| 3.3.1 波函数          | 50 |
| 3.3.2 薛定谔方程        | 51 |
| 3.4 一维无限深势阱        | 53 |
| 3.5 一维势垒 谐振子       | 55 |
| 3.5.1 一维势垒 隧道效应    | 55 |
| 3.5.2 谐振子          | 57 |
| 3.6 氢原子的量子力学处理方法简介 | 57 |
| 3.6.1 氢原子的薛定谔方程    | 57 |
| 3.6.2 量子化条件和量子数    | 58 |
| 3.7 电子的自旋          | 58 |
| 3.7.1 施特恩—格拉赫实验    | 58 |
| 3.7.2 电子的自旋        | 59 |
| 3.8 原子的电子壳层结构      | 60 |
| <b>第4章 激光物理与技术</b> | 62 |
| 4.1 激光的产生          | 62 |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 4.1.1 | 自发辐射、受激辐射和受激吸收 ..... | 62  |
| 4.1.2 | 粒子数反转 .....          | 64  |
| 4.1.3 | 激光器的基本结构和工作原理 .....  | 65  |
| 4.1.4 | 增益系数 .....           | 67  |
| 4.1.5 | 谐振腔的作用 .....         | 67  |
| 4.2   | 激光器的种类 .....         | 70  |
| 4.2.1 | 固体激光器 .....          | 70  |
| 4.2.2 | 气体激光器 .....          | 72  |
| 4.2.3 | 液体激光器 .....          | 74  |
| 4.2.4 | 半导体激光器 .....         | 75  |
| 4.3   | 激光器的纵模和横模 .....      | 75  |
| 4.3.1 | 谱线宽度 .....           | 75  |
| 4.3.2 | 激光的纵模 .....          | 76  |
| 4.3.3 | 激光的横模 .....          | 77  |
| 4.4   | 激光特性 .....           | 77  |
| 4.4.1 | 单色性 .....            | 78  |
| 4.4.2 | 方向性 .....            | 78  |
| 4.4.3 | 相干性 .....            | 79  |
| 4.4.4 | 能量集中性 .....          | 79  |
| 4.5   | 激光技术 .....           | 79  |
| 4.5.1 | 选模技术 .....           | 80  |
| 4.5.2 | 调 Q 技术 .....         | 81  |
| 4.5.3 | 锁模技术 .....           | 82  |
| 4.5.4 | 激光调制技术 .....         | 83  |
| 4.5.5 | 激光束偏转技术 .....        | 84  |
| 4.6   | 激光的应用 .....          | 85  |
| 4.6.1 | 激光加工 .....           | 85  |
| 4.6.2 | 激光精密测量 .....         | 89  |
| 4.6.3 | 激光通信 .....           | 97  |
| 4.6.4 | 激光信息处理 .....         | 99  |
| 4.6.5 | 激光的军事应用 .....        | 105 |
| 4.6.6 | 激光在科学技术研究中的应用 .....  | 108 |
| 4.6.7 | 长度基准与时间基准的统一 .....   | 115 |
| 第 5 章 | 红外物理与技术 .....        | 117 |
| 5.1   | 红外辐射的物理基础 .....      | 117 |
| 5.1.1 | 基本辐射量 .....          | 117 |
| 5.1.2 | 黑体辐射规律 .....         | 120 |
| 5.1.3 | 非黑体的辐射 .....         | 123 |
| 5.2   | 常见的红外辐射源 .....       | 126 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.2.1 目标的辐射 .....            | 126 |
| 5.2.2 背景的辐射 .....            | 130 |
| 5.3 大气对红外辐射传输的影响 .....       | 131 |
| 5.3.1 大气的特性 .....            | 131 |
| 5.3.2 大气的组分 .....            | 134 |
| 5.3.3 大气的吸收 .....            | 134 |
| 5.3.4 大气的散射 .....            | 139 |
| 5.4 红外探测器 .....              | 140 |
| 5.4.1 红外探测器的性能参数 .....       | 141 |
| 5.4.2 红外探测器的分类及物理机理 .....    | 142 |
| 5.4.3 常用红外探测器及其特性 .....      | 146 |
| 5.5 红外系统结构 .....             | 148 |
| 5.5.1 被动系统 .....             | 148 |
| 5.5.2 主动系统 .....             | 148 |
| 5.6 红外技术的应用 .....            | 149 |
| 5.6.1 红外成像技术 .....           | 149 |
| 5.6.2 红外搜索跟踪和红外雷达 .....      | 151 |
| 5.6.3 红外制导 .....             | 151 |
| 5.6.4 红外侦察和红外夜视 .....        | 153 |
| 5.6.5 红外测温 .....             | 154 |
| <b>第6章 非线性物理</b> .....       | 155 |
| 6.1 非线性物理导论 .....            | 155 |
| 6.1.1 什么是非线性 .....           | 155 |
| 6.1.2 非线性演化方程 .....          | 156 |
| 6.2 混沌 .....                 | 159 |
| 6.2.1 确定论和概率论的描述 .....       | 160 |
| 6.2.2 有关混沌的基本概念 .....        | 161 |
| 6.2.3 工程系统中的混沌现象 .....       | 166 |
| 6.3 分形与分维 .....              | 168 |
| 6.3.1 相似性维数 .....            | 169 |
| 6.3.2 分形几何学 .....            | 170 |
| 6.4 孤波和孤立子 .....             | 170 |
| 6.4.1 孤立子的概念 .....           | 170 |
| 6.4.2 激光与生物大分子的相互作用 .....    | 171 |
| 6.5 自组织理论导论 .....            | 174 |
| 6.5.1 什么叫自组织 .....           | 174 |
| 6.5.2 耗散结构理论 .....           | 180 |
| 6.5.3 协同学(Synergetics) ..... | 182 |
| 6.5.4 本章结束语 .....            | 186 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第7章 新能源技术</b> .....          | 189 |
| 7.1 能源概况 .....                  | 189 |
| 7.1.1 能源分类 .....                | 189 |
| 7.1.2 能源的利用 .....               | 190 |
| 7.2 能源在人类社会发展中的作用 .....         | 190 |
| 7.2.1 能源使用状况对社会发展的影响 .....      | 190 |
| 7.2.2 能源与环境 .....               | 191 |
| 7.3 新能源开发简介 .....               | 193 |
| 7.3.1 核能 .....                  | 193 |
| 7.3.2 太阳能 .....                 | 196 |
| 7.3.3 风能 .....                  | 198 |
| 7.3.4 地热能 .....                 | 199 |
| 7.3.5 海洋能 .....                 | 200 |
| 7.3.6 氢能 .....                  | 201 |
| 7.3.7 生物质能 .....                | 201 |
| <b>第8章 材料科学与技术</b> .....        | 203 |
| 8.1 概 述 .....                   | 203 |
| 8.1.1 材料是人类进步的标志 .....          | 203 |
| 8.1.2 材料是科学技术进步的基础和先导 .....     | 204 |
| 8.1.3 新材料是当今世界重大科技决策的必然选择 ..... | 205 |
| 8.2 材料科学的物理基础 .....             | 205 |
| 8.2.1 固体结构 .....                | 205 |
| 8.2.2 晶体的结合类型 .....             | 214 |
| 8.2.3 固体的能带 .....               | 217 |
| 8.2.4 费米—狄拉克统计 .....            | 221 |
| 8.3 材料体系的分类 .....               | 223 |
| 8.3.1 晶体 .....                  | 224 |
| 8.3.2 非晶体 .....                 | 226 |
| 8.3.3 多晶体 .....                 | 232 |
| 8.4 新型材料 .....                  | 236 |
| 8.4.1 高性能半导体材料 .....            | 236 |
| 8.4.2 超导材料 .....                | 245 |
| 8.4.3 纳米材料 .....                | 250 |
| <b>参考文献</b> .....               | 262 |

# 第 1 章 相对论和现代宇宙学

本章首先介绍狭义相对论的时空观,说明爱因斯坦质能关系式  $E = mc^2$  的来源以及相对论动力学规律;接着,简单介绍广义相对论;最后,介绍一些有关现代宇宙学的基本内容。

## 1.1 相对论运动学

### 1.1.1 爱因斯坦的“追光实验”

爱因斯坦自幼爱好学习,喜欢思考。据他自己回忆,5岁时,就对指南针为什么会指方向产生了兴趣,并且试图找出其中的原因。12岁时,开始思考欧几里得的平面几何。1895年他16岁,当时正在瑞士的阿劳州立中学学习,这时爱因斯坦已经了解到光是以  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$  的速度前进的电磁波。他想:“假如一个人能够以光的速度和光波一起跑,那会出现什么样的现象?光是电场和磁场不停的振荡、交互变化而推动向前的波,难道那时看到的只是在振荡着的电磁场而不是向前传播的电磁场,这可能吗?”爱因斯坦凭直觉判断:这不可能!摆脱这个疑难的唯一出路就是:人永远也不可能追上光。

1896年爱因斯坦进入瑞士苏黎世联邦工业大学学习,于1900年毕业。在这期间他学习上时常表现出“离经叛道”的性格,因此颇受教授们的责难。毕业后当了两年中学代课教师。1902年他被伯尔尼的一家瑞士专利局聘为3级技术员,同时业余从事物理学研究。1909年他当上了教授,从此将其毕生的精力都投入到物理学的研究中。

爱因斯坦研究问题的方式通常是先设想一个“理想实验”,然后凭直觉和丰富的想象力作出判断,这样的思维方式在他一生的研究中起到了极大的作用。比如对于“追光”这个假想,他就思考了长达10年之久。1905年是爱因斯坦取得丰硕成果的一年,他连续发表了数篇划时代的、充满创造的科学论文:“光量子理论”(3月)、“布朗运动理论”(5月)“狭义相对论”(special relativity)(6月)和“质能关系”(9月)。那一年,他才26岁。从1907年起到1915年,爱因斯坦历时8年创立“广义相对论”(general relativity)。他将时空与物质及其分布和运动联系起来,阐述引力的本质,深刻揭示时间、空间、物质、运动的统一,几何学和物理学的统一,使人类对于自然界特别是对时空的认识迈上新的台阶,为现代天体物理学和宇宙学的发展奠定了重要基础。1916年他提出关于“受激辐射的理论”该理论成为20世纪60年代崛起的激光技术的理论基础。1924年他还发展了“量子统计理论”。之后致力于“统一场论”的探索。大致上可以这么说,1905年以前,爱因斯坦主要从事热力学和统计物理方面的研究;1905年以后,他主要从事相对论、量子理论以及统一场论方面的研究。

在关于“狭义相对论”的两篇论文中,爱因斯坦回答了自己提出的关于“追光疑难”的问题,并且导出著名的质能关系: $E = mc^2$ 。爱因斯坦认为:解决上述问题的关键在于人们应该正确的认识时间和空间。此前大家都相信:宇宙中存在一个“绝对的时间”和一个“绝对的空间”,两者互不关联。比如,一个人(甲)出门去旅行,离家时与在家的孪生兄弟(乙)约好,在某日几点几分几秒甲在飞机上与乙通话,到时候联系果然分秒不差。于是大家就凭经验得出结论:场面上的与飞机上的两个时钟都以同样的快慢计时,它们所测量到的时间与各自的运动状态无关,因此时间是“绝对的”。再比如,在某地的一座体育场里乙正参加 100m 的比赛,此时甲乘坐的飞机恰好经过体育场的上空。当乙跑完 100m 时,甲也认为乙跑了 100m。在甲看来,地面上 100m 长的跑道是不会自动伸缩的。所以空间也是“绝对的”。爱因斯坦认为:这种观点是错误的!大家之所以都没有发现其中的错,是因为飞机的速度  $u$  太慢了。如果飞机的速度  $u$  接近于光速  $c$ ,即在高速运动的世界里,一切都会变得十分陌生。

### 1.1.2 同时的相对性和时间膨胀

我们以乙所在的家作为静止参考系并在上面建立一个坐标系,记为  $S$  系,乙所记录的某“事件”的时空坐标为  $(x, y, z, t)$ , (见图 1-1)。一架沿  $x$  轴正向以速度  $u$  飞行的飞机作为运动参考坐标系,记为  $S'$  系。坐在飞机中的甲记录的在飞机上发生的“事件”,该“事件”的时空坐标为  $(x', y', z', t')$ 。凭日常经验,他们观测同一个“事件”记录下来的时空坐标之间应该满足下列“伽利略变换”关系:

$$\begin{cases} \text{在乙看来, } x = x' + ut' \\ \text{在甲看来, } x = x' - ut \\ \text{而 } y = y', z = z' \text{ 特别是 } t = t' \end{cases} \quad (1-1)$$

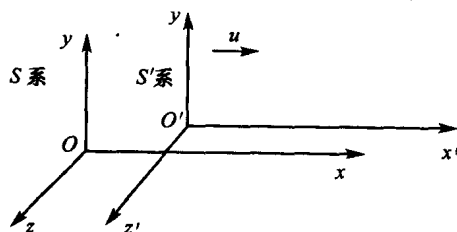


图 1-1 两个相互作用匀速运动的惯性参考(坐标)系  $S$  和  $S'$ ,  $t = t' = 0$  时, 它们的原点  $O$  和  $O'$  重合(图上为看清楚起见,将  $x'$  轴比  $x$  轴画得偏高一些, 实际上两者是重合的)

爱因斯坦认为:这个变换是错误的!虽然甲、乙两人都使用同一厂家生产的标准钟,而且在分手时对准了,但是在高速飞行一段时间后,在乙看来,甲的钟已变慢了。同样,在甲看来,乙的钟也变慢了。要想证明这一点,必须在两人分开的距离不断增大时约定一种“对钟”的办法。爱因斯坦指出:惟一可靠的办法是用光信号(即无线电电波)来完成“对钟”。假定光的速率对乙来说等于  $c$ ,对甲来说也等于  $c$ ,而且都是各向同性的,即光的速率与光源的运动无关。这个假定被爱因斯坦提出来作为建立狭义相对论的一个基本原理,称之为光速不变原理。即

在任何惯性系中,光在真空中的速率都相等。

爱因斯坦还提出了另一个假定作为狭义相对论的另一个基本原理,称之为爱因斯坦相对性原理(狭义相对性原理),即对于物理规律而言,所有惯性系都是等价的,不存在任何一个特殊的(例如“绝对静止”的)惯性系。

由上述两个基本假定可以推导出取代伽利略变换的相对论的时空坐标变换关系“洛伦兹变换”。它的表达式如下:

$$\begin{cases} x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ t' = \frac{t - \frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (1-2)$$

式(1-2)反映了在两个彼此相对运动的惯性系中,同一事件的两个时空坐标之间的变换关系。设  $S$  系中先后发生了两个事件,在该系测得它们的时空坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1, t_1)$  和  $(x_2, y_2, z_2, t_2)$ 。那么在  $S'$  系看来,发生上述两个事件的时间间隔  $\Delta t'$  由式(1-2)的第二式可以得到

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - \frac{u}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (1-3)$$

如果  $\Delta t = 0, \Delta x \neq 0$  由式(1-2)和式(1-3)知道  $\Delta x' \neq 0, \Delta t' \neq 0$  即  $S$  系中不同地点同时发生的两个事件,在  $S'$  系中观察,上述两个事件一定在不同地点先后发生。这表明同时是相对的。

洛伦兹变换的逆变换是

$$\begin{cases} x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ t = \frac{t' + \frac{u}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad (1-4)$$

式(1-2)与式(1-4)的差别仅仅在于把  $u$  变成  $-u$ ,表示地面上的乙看甲沿  $x$  轴正向以

速率  $u$  运动;反过来,飞机上的甲看乙是沿  $-x'$  方向以速率  $u$  运动的,这一对称性表明运动是相对的。重要的是:时间快慢也是相对的。双方都认定对方的钟(运动钟)走得比自己的钟(静止钟)慢。这可以简单说明如下:

设地面上乙钟处于  $S$  系的圆点位置,飞机上甲钟处于  $S'$  系的圆点位置,  $t = t' = 0$  时,它们的原点  $O$  和  $O'$  重合,即初始时刻,甲钟在两个相对运动惯性系中的时空坐标分别为:  $t = 0, x = y = z = 0$  和  $t' = 0, x' = y' = z' = 0$ 。随着时间流逝,地面上的乙看飞机上甲钟的位置  $x$  是越来越大,由式(1-2)中的第二式,可以看到飞机上甲钟的读数  $t'$  随着  $x$  的增大,与  $t$  相比越来越小。所以地面上的乙认为甲钟走得慢了,即  $t'$  读数小了;反之,飞机上的甲看地面上乙钟的位置是  $x'$ ,  $x' < 0$ , 且  $|x'|$  越来越大,于是由式(1-4)中的第二式,可以看出地面上乙钟的读数  $t$  随着  $|x'|$  的增大,与  $t'$  相比也越来越小,所以甲也认为乙钟变慢了。

下面用爱因斯坦光钟(见图 1-2)理想实验可以更直观地说明“运动钟变慢”的现象。

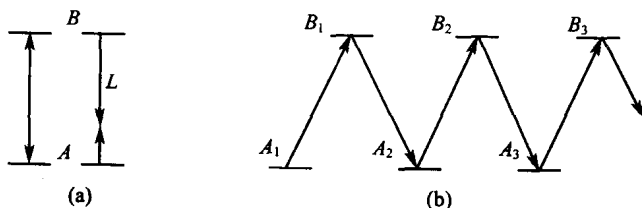


图 1-2 用爱因斯坦光钟说明运动钟变慢

(a) 在  $S'$  系观察; (b) 在  $S$  系观察。

这个“钟”是用两块相距为  $L$  的反射镜  $A$  和  $B$  制成,光子在它们中间来回反射,由  $A$  发出经  $B$  再返回  $A$  作为该实验中先后连续发生的两个事件,这两个事件的时间间隔就作为“钟”计时的基本单位。当钟对观察者甲静止时,说明这个钟放在甲的手里。在甲( $S'$ 系)中观察,发生上述两个事件的时间间隔  $\Delta t' = 2L/c$  (见图 1-2(a))。应当注意:在  $S'$  系中,这两个事件是在同一地点先后发生的,称惯性系中同一地点先后发生的两个事件之间的时间间隔为原时(又叫固有时)。此处的  $\Delta t'$  正是这两个事件的原时。但是在乙( $S$ 系)看来,钟是沿着镜面方向运动的,光子跑的路径是较长的折线,因此,发生同样的两个事件光子要用较长的时间  $\Delta t$  才能从  $A_1$  经  $B_1$  再回到  $A_2$  位置(见图 1-2(b))。在  $S$  系中,上述两个事件是在不同地点先后发生的。根据直角三角形关系  $(c\Delta t/2)^2 = (u\Delta t/2)^2 + L^2$  容易得到

$$\Delta t = \frac{2L}{c\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} > \Delta t' \quad (1-5)$$

于是在地面上的乙认为:光子往返一次所经历的时间  $\Delta t > \Delta t'$ , 即运动时间膨胀了。而表明“甲的钟”由于运动变慢了,称这个效应为运动的钟时间延缓。从式(1-5)还可以看出:原时最短。请注意:运动时间膨胀(或者运动钟变慢)是一种相对效应。其中的奥妙全在于“光速不变”这个性质。

### 1.1.3 高速旅行可以长寿吗

科普书上常常有这样的说法:如果甲乘高速飞船去遨游太空,当他回来时要比在家的孪生兄弟乙显得年轻。这句话的根据是洛伦兹变换,这种说法基本上是对的。因为人体组织的生命过程是由原时(固有时间)所决定的。例如,人的心脏可以当作一个钟,钟变慢也就是心脏跳动的频率降低,而人一生的寿命决定于他心跳的总数,从物理学的观点看,当一个宇航员以接近于光速的速度离开地球后又回到地球上时,固有时间最短就必然使得他与同龄人相比要衰老得慢些,所以高速旅行确实可以延年益寿。然而,当宇航员相对于地球匀速运动时,地球也相对于宇航员做匀速运动,因此在宇航员看来地球上的人也应该衰老得慢些,这就是所谓的“双生子佯谬”。对于这个问题可以这样说明:宇航员在其整个航程中,必须改变速度和航向才能最终回到地球上,这就使得他的地位与地球上居民的地位并不对称。因为对于宇宙其它天体(如FK4 惯性系)而言,宇航员明显失去了地球上的观察者那种惯性系的特点,即飞船在改变速度和航向时便不再是惯性系了。因此只能认为是宇航员最终回到地球上,而不能认为是地球离开宇航员后又回到宇航员身边,地球才始终是惯性系。欲详细分析就超出了狭义相对论的范畴,而要涉及“广义相对论”,这留待以后再谈。不过“运动的钟比静止的钟走得慢”这个结论已经被许多实验所证实。

再看  $\mu^-$  子衰变为电子  $e^-$  和两个中微子  $\nu$  的过程:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \nu_e \quad (1-6)$$

设  $N_0$  个  $\mu^-$  子静止在实验室,开始按指数规律衰变:  $N' = N_0 e^{-t'/\tau_0'}$ 。  $N$  是  $\mu^-$  子在时刻  $t'$  留下的数目,  $\tau_0'$  称为平均寿命,它可以看作是一个“标准钟”的计时单位。在相对  $\mu^-$  子静止的参考系中,实验测得

$$\tau_1' = 2.197 \times 10^{-6} \text{s (原时)} \quad (1-7)$$

另一方面,来自高空的宇宙线中有许多  $\mu^-$  子,它们的能量很高,即有的  $\mu^-$  子速度  $u$  接近于光速  $c$ , 1963 年测量到速度为  $u = 0.9952c$  的  $\mu^-$  子衰变,其规律为  $N = N_0 e^{-t'/\tau_0}$ 。其中  $\tau_0$  是运动  $\mu^-$  子的寿命。实验测得  $\tau_0 > \tau_0'$ , 且比值  $\tau/\tau_0'$  符合式(1-5)所给出的关系:

$$\frac{\tau_0}{\tau_0'} = \frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.9952)^2}} = 10.22$$

这表示“运动的钟”的速度减小为原来的  $1/10$ , 即  $\mu^-$  子的“运动寿命”(实验室里测量的运动  $\mu^-$  子的寿命)比其“静止寿命”长得多了。

### 1.1.4 运动的尺变短

如图 1-3 所示,这幅漫画说的是一个人在骑着自行车高速前进,看起来人和车轮都沿运动方向变扁了,这种现象叫做洛伦兹收缩。下面根据洛伦兹变换来证明这种现象的会发生。

设  $S$  系中,在同一时刻  $t$  测量高速运动的一把尺子(该尺子静止在运动坐标系  $S'$  中)的位置,记其两端的坐标分别为  $x'$  和  $x_2$ ,则在  $S'$  系中它们对应的坐标为

$$x_1' = \frac{x_1 - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, x_2' = \frac{x_2 - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

两式相减得

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (1-8)$$

我们知道  $x_2' - x_1' = L_0$  是位于  $S'$  系的甲测到的静止尺子的长度,称尺子在相对于其为静止的惯性系中测得的长度叫做尺子的静长或原长(或固有长度)。于是在  $S$  系的观察者乙看来,这把运动尺子的长度是

$$L = x_2 - x_1 = L_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} < L_0 \quad (1-9)$$

$L$  比  $L_0$  缩短了,即尺子在其运动方向上的长度变短了。由式(1-9)还可以看出,原长最长。必须强调:上述推导的条件是在  $S$  系中对一把运动尺子两端坐标的测量必须是同时进行的。还应当注意:尺子长度变短是一种测量的相对论效应,它只发生在沿尺子运动的方向上,垂直于运动方向上的长度测量与参照系无关(这个结论可以由火车钻洞的假想实验得出)。而且,运动尺子变短,也只有通过测量才能被发现,用眼睛看并不一定就显得短些。因为“测量”、“观测”的概念和“看”、“照相”并非一回事,前者由同时发射的光子决定,后者由同时接收到的光子所描绘。通常我们是用眼睛去看“测量”,由于光子的速度并不是无穷大,那样运动尺子两端同时发出的光一般不能同时到达我们的瞳孔;反过来说,同时进入我们瞳孔的光一般不可能是同时发出来的,那么运动的物体在人们看来就不一定显现出沿运动方向收缩了。关于洛伦兹收缩在观察上的复杂性,直到 1959 年才被指出。特雷尔(J·Terrell)曾证明若运动物体对观察者的张角很小时,其外观形状与静止时相比变化不大,但由于光行差效应,物体将转过一个角度。对于张角很大的运动体,因为不同部分呈现的转动不同,物体的形状也会发生改变,而且由于物体射向观察者的光线还要经受多普勒频移的影响,其颜色和亮度也将表现出与原来不同。

### 1.1.5 光速能够超越吗

如图 1-4 所示,设想某运动员跑步的速度奇快,现在让他到一辆以速度  $u$  (设  $u = 0.9c$ ) 运行的列车( $S'$ 系)顶上,与  $u$  同方向跑出  $v' = 0.9c$  ( $S'$ 系)的速度,问地面上  $S$  系中的观察者测到他的速度  $v = ?$

过去的回答很简单:由伽利略变换式(1-1)立即得出

$$v = v' + u = 0.9c + 0.9c = 1.8c$$

然而,爱因斯坦根据追光理想实验断言:上面的计算大错特错。根据洛伦兹逆变换式(1-4),对于匀速运动( $v = x/t, v' = x'/t'$ )有

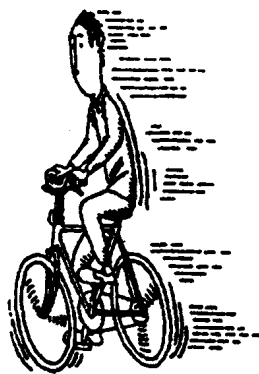


图 1-3 一个骑自行车高速前进的视觉形象

$$\nu = \frac{\nu' + u}{1 + \frac{\nu' u}{c^2}} \quad (1-10)$$

再以具体数值  $\nu' = u = 0.9c$  代入上式, 即得  $\nu = 0.9945c$ 。由此可见, 从地面上看, 这个运动员的速度  $\nu$  只在列车速度  $0.9c$  的基础增加  $0.0945c$ ,  $\nu$  比光速  $c$  还差  $5.5\%$ 。进一步加大  $\nu'$  或  $u$ , 能否使  $\nu$  超过  $c$  呢? 比如说, 令  $\nu' = c$ , 则

$$\nu = \frac{c + u}{1 + cu/c^2} = c$$

该结果表明  $\nu$  不能超过  $c$ 。若假设  $u$  也等于  $c$ , 仍有

$$\nu = \frac{c + c}{1 + c^2/c^2} = c$$

因此, 从上述“相对论的速度相加定律”可以得出结论: 一切物体的运动速度都不能超过光速, 光速是物质运动(信号或能量传播)速度的极限。

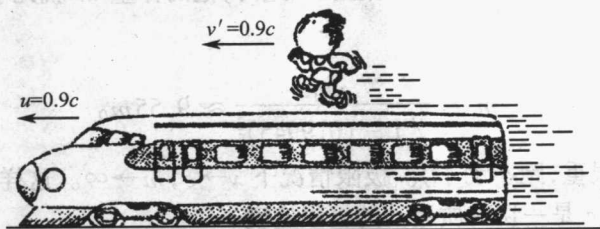


图 1-4 一个运动员在高速列车顶上飞跑

## 1.2 相对论动力学, 质能关系式

上节介绍了狭义相对论的“运动学”, 它着眼于时间—空间中观察到的现象, 本节将讨论狭义相对论的“动力学”, 这将涉及运动规律更本质的原因。

### 1.2.1 质量随速度而变化

爱因斯坦在建立狭义相对论时, 提出两个“相对论原理”: 一个是上节详细讨论过的“光速不变原理”, 一个是“相对性原理”。后者的意思是: 一切描写运动规律的方程式在两个相互作用匀速运动的惯性系( $S$  系和  $S'$  系)内具有相同的形式, 差别只是将坐标从  $(x, y, z, t)$  换为  $(x', y', z', t')$ 。这个原理听起来十分自然, 不像“光速不变原理”听起来很令人惊异, 但两者是密切结合而不可分割的。因为, 坐标转换必须用洛伦兹变换而不能用伽利略变换。爱因斯坦提出“相对性原理”好比是“画龙”, 提出“光速不变原理”才是他的“点睛”之“笔”。

将这两个原理一结合, 爱因斯坦马上发现: 电磁学中的麦克斯韦方程是经得起考验的(这在当时的实验中已被证实了), 但是牛顿力学在高速运动的世界里却行不通。必须对牛顿运动方程从根本上进行改造。已知动量  $p$  为