



世纪普通高等教育基础课规划教材
教育部世行贷款教改项目成果

大学物理学

第3版



王建邦 主编

第二卷 近代物理基础



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





21世纪普通高等教育基础课规划教材
教育部世行贷款教改项目成果

大学物理学

(第二卷 近代物理基础)

第3版



机械工业出版社

本书根据教育部世行贷款教学改革项目的成果和教育部最新颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写而成。全书共两卷,本书为第二卷,主要内容有相对论、量子物理、激光、固体物理和核物理。

本书的一大特色,也是新的尝试是,除在叙述上力求深入浅出、概念准确,并以大量实例使内容更加生动、有趣外,还在讲述基本概念、基本原理和基本理论的同时,凸显教学内容中应用的物理研究方法。特别是,本书在每章编写一节“物理学思想与方法简述”,进一步简要介绍相关物理学的研究方法,提示读者应用这些研究方法的要点,同时挑选几种方法,要求学生自己通过归纳、总结、亲身体验和练习来掌握物理思想与方法,达到既增长知识,又培养能力与提升素质的教学目的,实现知识、能力与素质综合培养的目标。

本书与配套的《大学物理解题思路、方法与技巧》一书一并提供学生使用。

本书为高等院校理工科非物理专业大学物理基础课教材,也可作为高校物理教师、学生和相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 第二卷/王建邦主编.—3版.—北京:机械工业出版社,2010.8

21世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-31095-2

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第149021号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联

责任校对:李秋荣 封面设计:马精明

责任印制:杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2010年8月第3版第1次印刷

170mm×227mm·24.75印张·474千字

标准书号:ISBN 978-7-111-31095-2

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

第3版前言

教材是体现教学理念、课程内容、教学要求、教学模式的知识载体,又是指引导学生获取知识的方法和渠道。本书为适应大学本科非物理类专业对物理教学的基本要求,针对地方高校学生层次与认知规律,按集成“知识-能力-素质”于一体的指导思想,在多年教学改革实践及前两版的基础上,着眼于学生智慧和能力的培养进行修订。同时,为激发学生自主学习,引导思考,适度改变了前两版的撰写风格,在中学物理基础上、在有利学生阅读的同时,营造一种探索与创新氛围。

为了加强大学物理的基础地位,走出“一遇教学改革,物理教育就成为被削弱的对象”的怪圈,本书将大学物理分为“经典物理基础”与“近代物理基础”两卷,两卷自成体系,又相呼应,分两学期开设。按因材施教的个性化教育原则,本书有少部分内容适度超出教学基本要求,有少部分内容适度超出课堂教学所需,有少部分内容适度超出多数学生的接受能力。

本科专业教育教学计划是由相互作用、相互依赖的若干部分(要素)结合而成的、具有特定功能的系统。服务于人才培养的大学物理课程是构成专业教育教学计划的一个“要素”,本书一方面注意了传承大学物理知识结构的纵向关系,另一方面又考虑了大学物理与本科专业教育教学计划中相关课程交叉、渗透的横向关系。按系统论观点,本书部分调整了传统大学物理知识结构单元,突出作为自然科学基本规律、能长时期发挥作用的基础性内容;突出通过渗透、融合可伸向理工类院校非物理类专业或工程技术学科与课程的基础性内容。

例如,在“路论”与“场论”的关系中,“路论”是电类课程的核心,即“以电路分析为基础、以电路设计为主导、以电路应用为背景”。“场论”作为能量流、物质流及信息流的物理基础,本书彰显“场论”。第一卷在介绍质点-质点系-连续体力学后,以流速场承前启后、以真空电磁场为主、以电流场、能流场、标量场、引力场等为辅,开出场物理学,强调在不同物理问题中,场可以是一种方法、可以是一个函数、可以是一种物质。

教学内容现代化一直是大学物理课程教学内容改革的一个热点。以目前我国21个工科大类、69个专业为例,485门主要课程中,101门(含同名相近课程)或多或少涉及物理学原理与方法的延伸、拓展、“物化”与应用,其中依托近代物理基本原理的教学内容在不断增加,但专门介绍近代物理基本原理的课程不多,本书第二卷在大学物理层面上选编相对论、量子、激光、固体、原子核等基

础内容,意在加强近代物理向“材料、能源、信息”相关专业与课程的渗透。

为了帮助学生更好地掌握大学物理的基本内容,理论联系实际,加强能力培养,增强个性化学习,调动学习主动性,反复加强练习,本次修订中在部分章节“学习本章要求掌握”的栏目中,适当增加了方法论的要求;并将大部分例题与全部习题从两卷中剥离,单独编写《大学物理解题思路、方法与技巧》一书,作为教材一并提供学生使用,力求做到物理概念、原理与例题、习题的内在联系与衔接,以及教学内容与学生实际有机结合,浑然一体。

按128学时的教学时数,建议第一卷安排72学时,第二卷安排56学时,具体可根据学校情况而定。

清华大学张三慧教授审阅了第一卷(第1版),并认真修改,同时对全书的取材与布局提出了宝贵意见。中国科学技术大学张永德教授与太原理工大学冷叔桢教授分别审阅了第二卷(第1版)的第五、第六部分,提出了宝贵意见,使我们受益匪浅,在此对三位老先生一并表示衷心感谢。

本书由王建邦担任主编。参加本卷第3版修订工作的有:张旭峰(第五部分)、黄启宇(第六部分)、王建邦(第七部分)、杨军(第八部分)、刘兴来(第九部分)。

编 者
2010.3

目 录

第3版前言

第五部分 相对论基础 1

第十八章 狭义相对论 2

第一节 伽利略相对性原理 伽利略变换 2

一、伽利略相对性原理 3

二、伽利略变换 4

三、经典力学的绝对时空观（伽利略-牛顿时空观） 7

第二节 狭义相对论的基本原理 7

一、电磁学向伽利略-牛顿相对性原理提出的挑战 8

二、狭义相对论基本原理的内容 15

第三节 洛伦兹变换 17

一、洛伦兹变换的内容 17

*二、洛伦兹坐标变换的推导 19

三、相对论速度变换公式 21

第四节 狭义相对论的时空观 24

一、同时的相对性 24

二、时间延缓效应 27

三、长度的相对性 29

第五节 相对论的质量、动量和能量 32

一、相对论质量 32

二、相对论力学动力学方程 37

三、相对论动能 38

四、相对论质量和能量的关系 40

五、动量与能量的关系 42

第六节 物理学思想与方法

简述 43

*第十九章 广义相对论简介 45

第一节 惯性质量与引力质量 46

第二节 广义相对论的基本假设 48

一、爱因斯坦升降机的理想实验 48

二、直线加速参考系中的惯性力 49

三、等效原理 50

四、局域惯性系 51

五、广义相对性原理 52

第三节 广义相对论的检验 53

一、行星近日点的进动 53

二、光线在引力场中偏折 54

三、雷达回波延迟 55

第四节 有引力场的空间与时间 55

第五节 物理学思想与方法简述 56

第六部分 量子物理 59

第二十章 光（辐射）的波粒二象性 61

第一节 热辐射 普朗克的量子假设 61

一、热辐射的基本概念 62

二、基尔霍夫辐射定律 64

三、绝对黑体 65

四、绝对黑体的热辐射实验

定律	66	三、统计诠释对波函数提出的要求	110
五、经典理论的困难和普朗克的量子假设	69	第五节 物理学思想与方法	
第二节 光电效应	71	简述	111
一、光电效应的实验规律	71	第二十二章 薛定谔方程	112
二、光电效应与光的波动学的剧烈冲突	75	第一节 自由粒子的薛定谔方程	112
三、爱因斯坦的光量子论及其对光电效应的解释	76	一、方程的形式	112
* 四、多光子光电效应	79	二、方程的讨论	113
* 五、内光电效应	79	第二节 力场中粒子的薛定谔方程	115
第三节 康普顿效应	80	一、方程的形式	115
一、实验规律	80	* 二、算符与方程	117
二、X 射线实验结果的解释	81	第三节 定态薛定谔方程	118
三、简短的历史回顾	84	一、分离变量法	118
第四节 光的波粒二象性	85	二、定态的基本特征	120
一、爱因斯坦光量子关系式	85	第四节 一维无限深势阱中的粒子	121
二、单光子双缝干涉实验分析	86	一、一维无限深势阱模型	121
三、光子的不确定性关系	88	二、薛定谔方程及其解	122
第五节 物理学思想与方法		三、结果讨论——解的物理意义	124
简述	90	* 第五节 势垒与隧道效应	127
第二十一章 电子的波粒二象性	92	一、薛定谔方程	128
第一节 德布罗意假设	92	二、方程的讨论	129
* 第二节 德布罗意波		三、隧道效应的应用	131
实验证明	94	第六节 物理学思想与方法	
一、戴维孙 - 革末电子衍射实验	95	简述	132
二、电子显微镜	97	第二十三章 氢原子中的电子	134
第三节 不确定性关系	98	第一节 氢原子的玻尔模型	134
一、电子单缝衍射实验	99	一、玻尔模型的历史背景	134
二、不确定性关系的讨论	100	二、玻尔氢原子结构模型要点	137
第四节 波函数及其统计诠释	102	第二节 用薛定谔方程解氢原子问题	139
一、德布罗意平面波	102	一、玻尔模型的缺陷	139
二、波函数的统计诠释	104	二、氢原子的薛定谔方程	140
		第三节 量子数的物理解释	147

一、主量子数和能量量子化	147	第六节 激光器的工作原理	180
二、角量子数和角动量量子化	148	一、工作物质粒子数反转的实现	180
三、磁量子数和角动量空间量子化	150	二、谐振腔的振荡阈值条件	182
第四节 氢原子的波函数与概率密度	151	三、谐振腔的选频	183
一、低量子数的氢原子波函数	151	第七节 氦氖激光器	184
二、电子概率的径向分布	153	一、氦氖激光器的结构图	184
三、电子概率的角度分布	155	二、氦氖激光器的工作原理	185
第五节 物理学思想与方法简述	158	第八节 物理学思想与方法简述	188
第七部分 激光	161	第八部分 固体物理基础	191
第二十四章 激光原理	162	第二十五章 晶体结构与结合力	192
第一节 激光概述	162	第一节 晶体结构及其描述	192
一、激光的诞生	162	一、晶体的性质	192
二、激光器的分类	163	* 二、晶体结构的实验研究	197
第二节 原子的能级、分布和跃迁	165	三、空间点阵	200
一、原子在能级上的分布	165	第二节 布喇菲格子	203
二、原子能级跃迁	166	一、7个晶系	204
第三节 光的吸收与辐射	168	二、14种布喇菲空间点阵(空间格子)	204
一、自发辐射	169	第三节 晶体的结合力	206
二、受激吸收	169	一、影响晶体结合力的若干因素	206
三、受激辐射	169	二、晶体中粒子的结合力	209
第四节 爱因斯坦辐射理论	170	第四节 晶体的结合能	212
一、自发辐射系数 A	171	一、定义	212
二、受激吸收系数 B_{12}	172	二、经验原子对势	214
三、受激辐射系数 B_{21}	173	第五节 离子晶体的结合能	216
四、爱因斯坦系数 A_{21} , B_{12} 和 B_{21} 之间的关系	173	一、离子晶体的点阵结构	217
第五节 产生激光的基本物理条件	177	二、离子晶体的结合能	217
一、两对基本矛盾	177	三、离子晶体内势能的计算	218
二、解决矛盾的方法	178	第六节 物理学思想与方法简述	220
		第二十六章 晶格振动	222
		第一节 晶体的热学性质	222

一、晶体的摩尔热容	223	第五节 物理学思想与方法	
二、固体的热传导	225	简述	274
三、热膨胀	225	第二十八章 能带论基础	276
第二节 一维晶格振动	227	第一节 固体能带的形成	277
一、一维无限长弹簧振子链		一、固体中的离子实与价电子	277
模型	227	二、电子能带的形成	277
二、原子振动的运动学描述	228	* 第二节 固体中电子的波	
三、原子振动的动力学描述	228	函数	279
四、耦合振动方程的解	230	一、近似处理方法	280
第三节 格波	233	二、晶体中电子的波函数——布洛	
一、格波的物理意义	233	赫函数	281
二、 k 的取值范围	233	第三节 固体的能带结构	284
三、玻恩-冯卡门边界条件	234	一、满带、导带和空带	284
四、格波与原子振动	236	二、导体、绝缘体及半导体的	
第四节 物理学思想与方法		能带	289
简述	236	* 第四节 固体能带理论基础	291
第二十七章 物质的电磁性质	239	一、克朗尼格-朋奈模型	292
第一节 电介质及其极化	239	二、求解周期场中定态薛定谔方	
一、分子(原子)的电		程的基本思路	292
结构	240	三、数学处理与结果讨论	293
二、电介质极化的微观机理	242	第五节 物理学思想与方法	
三、极化面电荷	243	简述	302
四、电极化强度	244	第二十九章 半导体	304
* 第二节 电介质的特殊效应	249	第一节 本征半导体	304
一、压电效应	249	一、元素半导体	305
二、铁电体	253	二、化合物半导体	307
第三节 磁介质及其磁化	255	第二节 掺杂半导体	309
一、物质磁性的起源	255	一、施主型杂质与 N 型	
二、磁介质磁化的微观机理	258	半导体	309
三、磁化面电流	261	二、受主型杂质与 P 型	
四、磁化强度矢量	262	半导体	311
五、磁场强度矢量	265	第三节 杂质能级的计算	313
六、磁介质的磁化规律	267	一、类氢模型	313
第四节 磁性材料	270	二、类氢施主杂质能级的计算	313
一、磁性材料的分类	270	* 三、晶体中电子有效质量的物理	
二、铁磁性材料的磁化规律	271	意义	314
三、铁磁性材料的磁化机理	273	第四节 PN 结	316

一、PN 结的空间电荷区	316	第四节 放射性衰变的一般规律	348
二、内建电场 (自建电场)	317	一、指数衰变规律	348
三、接触势垒	318	二、放射性衰变中的几个重要物理量	350
四、PN 结的整流效应	318	第五节 原子核反应	354
第五节 物理学思想与方法 简述	321	一、实验	355
第九部分 原子核物理	323	二、核反应的一般表示式	355
第三十章 原子核	324	三、核反应的类型	356
第一节 原子核的基本特征 及其组成	324	四、核反应过程的守恒定律	357
一、原子核的电荷和电荷数	324	第六节 重核的裂变及应用	358
二、原子核的质量和核子数	325	一、获取原子能的物理基础	358
三、原子核形状、大小与密度	332	二、原子核裂变	360
四、核力的基本性质	334	三、链式反应和反应堆	364
第二节 原子核的结合能	335	第七节 轻核聚变	365
一、质量亏损	335	一、基本的聚变反应过程	366
二、核结合能	337	二、受控热核反应	367
三、比结合能	338	第八节 物理学思想与方法 简述	368
第三节 原子核的衰变与 放射性	340	附录 电子的自旋	370
一、 α 衰变	341	物理名词索引 (中英文对照) ...	372
二、 β 衰变	343	参考文献	383
三、 γ 衰变	347		

第五部分

相对论基础

本书把大学物理分为经典物理基础和近代物理基础两卷。

经典物理学是何时诞生的呢？爱因斯坦曾认为：“伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，标志着物理学的开端。”杨振宁则选择了牛顿发表他的《自然哲学的数学原理》的1687年。诗人蒲柏在西敏斯特大教堂著名的“拟牛顿墓志铭”中写道：

大自然及其法则深藏在黑夜里。

上帝说：“派牛顿去吧！”

于是，一切就都在光明之中。

实际上，20世纪以前的200余年，物理学在两大领域取得了巨大成功：一是由牛顿建立的经典力学（1687年），包括热力学与经典统计力学；二是由麦克斯韦建立的经典电磁学（1864年），包括光学。它们能够解释宏观的力学和电磁学现象，并在历史上分别诱发了18世纪以蒸汽机、内燃机的应用为中心的“工业革命”、19世纪以电和电磁波应用为中心的“电气革命”。

20世纪初，物理学发生了两次革命，深刻地改变了人们对物理世界的理解。爱因斯坦创建的相对论以及始于普朗克的能量子假设的量子力学，已成为近代物理学的两大支柱。当物体在高速运动时，其中牛顿力学的成功（如蒲柏诗句），用英国诗人斯夸尔爵士的诗来说：

但这并不久长。

魔鬼大喝一声：“派爱因斯坦去！”

于是，一切恢复原样。

第十八章 狭义相对论

狭义相对论（简称相对论）是爱因斯坦于1905年创建的。这个理论涉及力学、热学、电磁学、原子和原子核物理学以及粒子物理学等乃至整个物理学领域。在狭义相对论中，爱因斯坦以“相对性原理”和“光速不变原理”为基础，提出了新的时空观和物质观，并从两个原理出发，进一步派生出其他所有的主要原理。人们初次接触常常会感到相对论有些难懂，原因是它不合常理，它的结论似乎违背常识。因为，作为人们直觉基础的日常经验，仅局限于对低速运动的通常大小物体的观察，其中遇到的速率比光速小得多，如地球卫星的轨道速率不到 $10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，就比光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 小得多。对于物体以接近于光速的速率运动，人们并没有任何经验。因此，在学习狭义相对论时，经验将受到挑战，大多数基本物理概念必须修改。建议学习本章时，作好这样的思想准备：始终要抓住狭义相对论的两个基本原理，无论这些论据把你引向何方，也不能有任何怀疑。

学习本章要求掌握

- 狭义相对论基本原理
- 洛伦兹变换及其应用
- 相对论的质量、动量与能量

第一节 伽利略相对性原理 伽利略变换

在本书第一卷第一章已指出，从某种意义上讲，一切运动都是相对的，或者确切地说，运动的描述是相对的。例如，登上月球的人认为，地球是运动的；而地球上的人看到月球在运动。雨天，你会在窗前看到窗外雨丝如帘，并在你的面前垂下，而在行驶的汽车中，你又会见到雨丝的帘幕似乎迎风飘起，真所谓“横看成岭侧成峰、远近高低各不同”。所以，人们看到的现象，或者对物体运动的描述，往往随观测的角度而异；考察或描述任何一个物体的运动，都是相对于观察者所选择的特定参考系而言的。

一、伽利略相对性原理

按以上分析，为了描述物体的机械运动，方便的做法是选择适当的参考系。而且，在运动学中，相对于任何参考系的运动都是在坐标系中描述。作为实验观测，总希望选择一个最容易取得数据和进行分析的坐标系。那么，不同观测者选择不同参考系，对同一物体运动的观测结果有什么关系呢？会不会有人只承认自己看到的是真的，根本否认还有其他可能性呢？会不会“公说公有理、婆说婆有理”，没有是非标准呢？例如，人造地球卫星的运动，若以地球为参考系，运动轨道是圆或椭圆；若以太阳为参考系，运动轨道却是以地球公转轨道为轴线的螺旋线。这里有一个必须明确的概念：那就是物理规律（定律）应当是描述自然界中与观测者无关的客观存在。例如，早在1632年，伽利略在匀速运动的封闭船舱里仔细地观察了力学现象，他发现在船舱中察觉不到物体的运动规律和地面上有任何的不同。

需要强调的是，伽利略做实验的船舱是作匀速直线运动的船舱，是惯性参考系。今天来看，在这样的参考系中，牛顿运动定律是适用的。以伽利略当时所观察到的船舱中的力学现象，可以进一步归纳出如下两种表述：

1) 一切彼此作匀速直线运动的惯性系，用于描述机械运动的力学规律时是完全等价的。

2) 在一个惯性系中做任何力学实验，都不能确定该惯性系是处于静止还是在作匀速直线运动。也就是说，这个系统的运动状态必须由别的参考系来确定。

注意：在1)中所说的“等价”，不是指不同惯性系观测到的力学现象相同，而是指力学现象服从的力学规律相同。因此，要把力学现象的描述和力学规律本身区别开来。

以上两点，就是伽利略相对性原理的不同表述。简而言之，伽利略相对性原理就是：对于所有的惯性系，经典力学定律（牛顿定律、运动定理、守恒定律等）的数学表达形式都相同。

广义地说，相对性原理是自伽利略、牛顿和爱因斯坦以来的许多物理学家长期探索、反复思考、仔细实践所得到的一个基本结论，是物理学家用作探索自然、构造物理量、建立新理论的依据和基本出发点之一，已成为人类认识自然界的一种信念。因为，它能使人们超越从不同角度（即参考系）认识问题的局限性，注意寻求不同参考系对观测量之间的变换关系，以及在时空坐标变换过程中的那些不变量。从这个角度讲，相对论包含两方面的内容：

1) 物理定律的“相对性原理”。

2) 不同惯性系之间物理量的“变换关系”。

所以，伽利略相对性原理连同下述的伽利略变换也可以称为伽利略-牛顿相对论。

二、伽利略变换

一个参考系在数学上可以抽象成一种坐标系。在质点运动学的范畴内，描述质点运动状态就是要在参考系中给出质点的空间位置（矢量）和速度（矢量）。既然力学规律在所有惯性系中是等价的，而运动的描述却是相对的，两者是如何统一起来的呢？伽利略变换就是这样一种数学工具，利用它既可描述不同惯性系中位矢、速度的不同表述，又可描述不同惯性系之间力学规律的等价形式。其具体的数学表述包括以下三个要点：

1) 时空坐标变换

看图 18-1，在相对地面作匀速直线运动的车箱中，一乘客向着车头方向掷小球。此时，地面上乘客的朋友看着火车在他面前开过。假定他俩都测量小球的速度，依据相对性原理，他们观测的结果是不相同的。为了定量讨论这一差别，以图 18-2 为例，设两个笛卡儿坐标系 $S(Oxyz)$ 和 $S'(O'x'y'z')$ 相对应的坐标轴相互平行，且 S' 系相对 S 系以速度 u 沿 Ox 轴的正方向运动。图中以 r 表示在 S 系中观测到某质点 P 的位置矢量， r' 表示质点相对于 S' 系的位置矢量。在相对论中，把在某一时刻处于某一位置 P 发生的事情泛指为一事件，特别是用三个空间坐标和一个时间坐标描述某一事件。在测量长度和时间时，设想测量用尺和测量用钟均已同一惯性系中校准了。由于时间、空间的均匀性（详见第三节），参考系的原点和时间的起点都可任意选择。为了简单而又不失普遍性，通常的方法是选择坐标原点 O 与 O' 重合时作为计时起点，并用 t 和 t' 分别表示自 S 系和 S' 系观测一事件发生的时间坐标，则起始时刻 $t = t' = 0$ ，由于同一事件在不同参考系中有各自的时空坐标 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') ，那么，两时空坐标之间有什么关系呢？这就是伽利略变换首先要解决的问题。

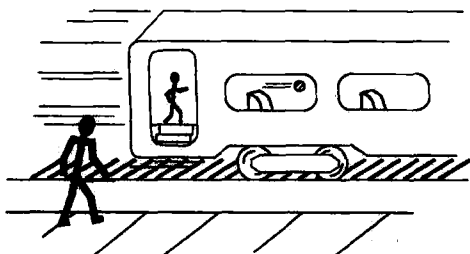


图 18-1

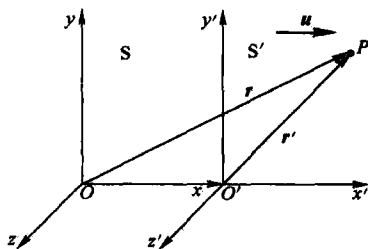


图 18-2

在经典力学中,人们用统一不变的尺子测量空间距离。因此,按空间解析几何,在时刻 t , 图 18-2 中点 P 在两个惯性系中的空间位置坐标有如下关系

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (18-1)$$

此外,在爱因斯坦提出狭义相对论之前,人们认为时间的量度是绝对的,与参考系的选择无关,即 $t' = t$ 。从以上两个时、空测量的前提出发,点 P 的两种时空坐标按以下两式变换

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \quad (18-2)$$

或

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + ut \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \right\} \quad (18-3)$$

式 (18-2) 与式 (18-3) 就称为伽利略(时空)变换,两式给出了一事件在两惯性系 S' 和 S 中时空坐标之间的变换关系。

2) 速度变换(速度加法定理)

运动学的一个基本问题是速度的变换,按速度定义式,图 18-2 中点 P 在 S' 系中的速度分量值可表示为

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'}, \quad v'_y = \frac{dy'}{dt'}, \quad v'_z = \frac{dz'}{dt'} \quad (18-4)$$

在 S 系中的速度分量值可表示为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (18-5)$$

将式 (18-3) 或式 (18-2) 分别对时间求导得速度分量值的变换关系

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v'_x + u \\ v_y &= v'_y \\ v_z &= v'_z \end{aligned} \right\} \quad (18-6)$$

式 (18-6) 也可以写成矢量形式

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{u} \text{ 或 } \mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u} \quad (18-7)$$

式 (18-6) 与式 (18-7) 表示,在不同惯性系中质点的速度不同,这种不同又统一在伽利略变换之中。

以图 18-3 为例, 在静止于实验室的放射性样品中, 有两个电子沿相反的方向射出。由实验室观察者测得每个电子的速度为 $0.67c$ (c 为真空中光速)。根据式 (18-6) 或式 (18-7), 可求一个电子 (如 e_2) 相对另一个电子 (e_1) 的速度, 方法是:

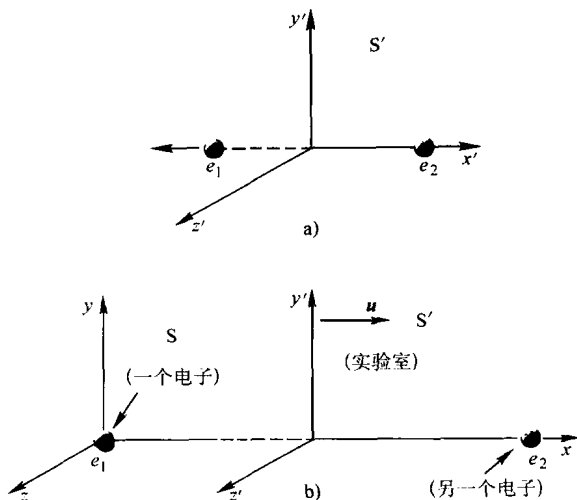


图 18-3

先将一个电子 (e_1) 选作 S 系, 实验室选作 S' 系, 在图 18-3b 中, 电子 (e_2) 相对 S' 系的速度值 v'_x 为 $0.67c$, 沿 x' 正方向运动, 相对于 S 系, S' 系的速度值 u 是 $0.67c$, 也沿 x' 正方向运动。然后按式 (18-6) 电子 (e_2) 相对于电子 e_1 (S 系) 的速度是

$$v_x = v'_x + u = +0.67c + 0.67c = +1.34c$$

此结果超过光速。

3) 加速度变换

按加速度定义式, 将式 (18-6) 对时间求导数, 得到两惯性系间加速度变换公式

$$\left. \begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned} \right\} \quad (18-8)$$

其矢量形式为

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} \quad (18-9)$$

从以上两式来看, 在 S 系和 S' 系中观测同一质点的加速度是相等的, 换句话说, 在伽利略时空坐标变换里, 对不同的惯性系, 加速度是个不变量。同时, 在经典力学中, 物体质量 m 也是与参考系无关的常量。因此, 牛顿第二运动定律在 S 系和 S' 系中有相同的数学形式 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{F}' = m\mathbf{a}'$ 。可以证明, 力学中的

其他基本规律经伽利略变换后，其数学形式也保持不变。这就是伽利略相对性原理。

按以上介绍，式(18-9)表示加速度对伽利略变换保持不变。现今物理学将经过某种操作(变换)后物理量或规律保持不变的性质，称为变换不变性。**不变性的本质是什么？**本质是自然界中与观测者无关的客观规律，本质是相对性原理。因为相对性原理要求一个正确的物理定律不能以任何方式取决于某个特殊的或具体的参考系(详见下一章第二节)。

以动量守恒定律为例，在一个惯性系中观测的动量 p 也许不等于在另一个惯性系中观测的动量 p' ，但动量守恒定律必定在每个惯性系中都有相同的数学形式。把握这一物理思想非常重要，因为，按相对性原理，人们不必拘泥于观察或描述问题的某一特定角度，而自觉地去探索变换关系及变换中的不变量(或不变性)，从而把人们的认识推进到宇观世界和微观世界。事实上，不论人造卫星的运动，还是月球、地球的运动，都应遵守相同的运动规律。

三、经典力学的绝对时空观(伽利略-牛顿时空观)

以上导出式(18-2)和式(18-3)有两个前提：一是可以用统一不变的尺子测量空间距离。无论在行驶的车上还是在实验室，度量长度的方法彼此都一样，换句话说，长度的量度和参考系无关，长度是伽利略变换的不变量，简称这种空间为绝对空间，用牛顿的话说：“绝对空间，就其本性而言，与外界任何事物无关，而永远是相同的和不动的”。二是在所有参考系中的时间流逝完全相同，即同样的事件无论在哪个惯性系中观测，经过的时间都一样，时间间隔是伽利略变换的另一不变量。牛顿认为：“绝对的、真正的和数学的时间自己流逝着，并由于它的本性而均匀地与任何外界对象无关地流逝着。”因此，伽利略变换式(18-2)与式(18-3)中蕴含着经典力学的时空观。简而言之，时间测量和空间测量均与参考系的运动状态无关，时间与空间也互无关系。

在牛顿的那个年代，绝对空间与绝对时间的概念与客观事实相符。选择绝对时空观，既是人们对空间和时间概念的理论总结，又与牛顿的力学体系相容。由于时间、空间是物理现象演出的大舞台，也是表述物理规律最基本的要素，它们当然要成为物理学深入研究的对象。由于绝对时空观在物体或参考系的速度远小于光速时还是高度准确的，从这个意义上讲，绝对时空观是伽利略、牛顿的一种明智的选择，总之，绝对时空观，在运动学中体现在伽利略坐标变换式。

第二节 狭义相对论的基本原理

狭义相对论的一个引人注意之处是，它几乎是由爱因斯坦单枪匹马搞出来