

在**解题**中学习 近代物理

王正行 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

在解题中学习近代物理

王正行 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

在解题中学习近代物理/王正行编著. —北京:北京大学出版社,
2004.9

ISBN 7-301-07717-3

I. 在… II. 王… III. 物理学 IV. 041

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 080627 号

书 名: 在解题中学习近代物理

著作责任者: 王正行 编著

责任编辑: 瞿 定

标准书号: ISBN 7-301 07717-3/O · 0605

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱 zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 mm×1240 mm A5 10.875 印张 312 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000 册

定 价: 17.00 元

自序

我写完《近代物理学》书稿并付梓至今,已经快十年了.在它出版的当时,我正在给北大技术物理系的学生讲近代物理,教材使用了一届.没有想到,世事沧桑,造化弄人.那一届讲完以后,我在国外的一位朋友叫我去给他帮忙,与他们合作研究核物质.这一走就是七年.虽然中间回来过短短的一段时间,但是心思已经不在这本书上.直到再回来,见到这本书的责编,她问我想不想再写一本题解,我告以稍后再说,其实是在推托.半年前我突然接到一个陌生的长途电话,是沈阳石油学院的王老师.他问我有没有题解,语气之恳切,实在让人难以推诿.恰巧那时还接到陈难先兄的电话,告诉我他夏天在瑞典遇到我过去的一位学生说起至今仍从我当年的讲课获益.想想我的点滴心得体会对别人也许还有帮助,可以用来助人.于是又有了现在这本《在解题中学习近代物理》.

其实,十多年前在物理学会的一次大会上,我在介绍自己讲近代物理的想法以后,山东师范大学的张恽慈教授就给我提过类似的建议.那次会上东南大学校长恽英教授要去了我的一张透明片,那也就是后来在《近代物理学》书中的第一张图.恽慈兄则建议我到各地办讲习班,介绍我的讲法和解题.我不敢有此奢望.一方面是当时担任一些行政上的职务,有太多杂事要做.更主要的,还是因为我所做的是一种改革的尝试,听听还可以,却未必能有多少人会跟着来做.

我们的大学教育受原苏联的影响太深,专业分得太细太窄,是职业教育而不是素质教育,不适应改革开放后人才培养的需要.系里要把力热电光原这五门课合并成一门普通物理课,我受命改革.因为是改革,道理虽然简单明白,做起来却不易.学校当然全力支持,主持教务的校长王义道教授亲自带着人来教室听我的课,教务部派来了年轻有为的卢晓东帮我辅导.系里也完全给我松绑,我想讲什么就可以讲什么.我当然还没有那么大胆,在近代物理部分把原来原子物理课

的基本内容全都保留下来.但是这毕竟与上面的参考大纲不完全一致.我一离开,这个改革也就终止,又回到原来的力热电光原五门课,近代物理部分又回到原来的原子物理课.我回来以后也金盆洗手,不想再炒冷饭,当然更不想又回过头去教原子物理这门课.

这么一本让我自由发挥的教材,居然印了六次,而且还在继续征订.拿出版社的行话来说,是“一直在走”.既然一直有老师和同学在用,当务之急,就是为它再写一本辅助的参考教材.说实在的,我相信,由于没有一本配套的辅助教材,肯定给老师和同学们增添了许多不应有的麻烦和不便.我想在这里说一句:实在对不住,难为各位了.

我希望本书能够自己站住,而不依托于另一本书.所以,虽然是为《近代物理学》写的辅助参考教材,但是本书是自给自足的,能够当作一本独立的教材来使用.在每一章的开头,对本章内容都有一个简单扼要的提要,列出了基本的概念和公式,并且给出公式的推导.在解题当中,还进一步穿插给出对一些重要问题的讲解、分析和讨论.而在每一章的结尾,还给出一些重要问题的进一步的讨论.所以,本书不是一本单纯的题解.说得比较确切一点,本书是在解题中讲解近代物理.

本书解答的习题,也就是我在《近代物理学》书末给出的习题,它们多数都是实际发生的物理问题.解答这些问题,不仅仅是为了加深学生对基本概念和公式的理解和把握,和训练学生的解题技能.在事实上,知道、熟悉和理解这些问题所涉及的物理现象及其特点,这本身就是学习近代物理的一个不可缺少的部分.我们常说,在一个新的物理现象中,一定包含了新的物理.物理学家的直觉思维,就是在这种过程中逐渐养成的.而这种在具体物理问题中来学习的方式,在一定意义上也就是杨振宁先生多次强调的渗透式的学习.

虽然本书是与本人的《近代物理学》互相独立的另外一本教学用书,不过本书在内容的选择、问题的深度、体系的安排、题目的选择和符号的使用上,都与《近代物理学》保持一致,采取一致的章名和内容划分,使用同样的定义和符号.这样做,便于这两本书互相参考,使本书能够尽量适合更多读者与用者需要的同时,还能方便地把本书与

《近代物理学》配合起来使用. 我将那本《近代物理学》称为主教材, 本书中提到的《近代物理学》均指那本主教材.

各种物理常数, 在国际上, 每年都在作具体的调整和更新, 每一两年都有一次全面和系统的发布. 本书给出和用到的物理常数, 取自美国《物理学评论》2002 年 D66 卷第 1-I 期《粒子性质评论》. 在使用单位的习惯上, 过去惯用的埃($\text{\AA}$), 现在基本上已经被比它大十倍的纳米(nm)所取代, 在本书中已经把 $\text{\AA}$ 相应地换成了 nm .

考虑到使用本书的不仅仅是正在学近代物理的同学, 也还有教课的老师, 所以有一些文字是专门写给老师参考的, 同学们看了如果觉得不懂, 不必停下来, 越过去接着往下看就是了. 近代物理本是活的物理. 现在奉献给各位的这本书, 若能对你学习或讲授近代物理有一点帮助, 若能引起你对近代物理问题的兴趣和思考, 那我就感到这本书没有白写.

人生有限, 学海无边. 错误或不妥之处, 望识者不吝指正.

2004 年初夏作者自序于北京大学物理学院

目 录

1	引言.....	(1)
2	狭义相对论时空性质.....	(8)
3	狭义相对论质点力学.....	(24)
4	辐射的量子性.....	(50)
5	粒子的波动性.....	(74)
6	卢瑟福-玻尔原子模型	(96)
7	波动方程	(118)
8	氢原子和类氢离子	(140)
9	多电子原子	(152)
10	辐射场的统计性质.....	(171)
11	分子结构.....	(193)
12	固体.....	(205)
13	超流与超导.....	(222)
14	原子核.....	(239)
15	粒子物理.....	(260)
16	广义相对论的基本概念.....	(286)
17	天体和宇宙.....	(306)
18	结语.....	(333)

1 引 言

物理学是我们对物理世界的一种理性的了解和认识. 我们要通过观测和实验, 才能了解物理世界; 我们也要通过观测和实验, 才能检验和修正我们对物理世界的认识. 所以说, 物理学是以实验为基础的实验科学.

我们通过观测和实验, 获得了对物理现象的了解, 就产生了物理的现象学. 通过对物理现象的综合、分析、比较和联想, 我们可以建立一定的模型, 解释定量的关系, 这就是物理的唯象理论. 在唯象理论的基础上, 我们可以进一步建立以一些基本原理为基础的理论的逻辑体系, 或者称为理论的形式体系. 这就是通常说的基本理论. 物理理论的形式体系都采用一定的数学语言来表述, 具有一定的数学结构. 所以, 我们可以画出如下的关系:

实验 $\longleftrightarrow$ 唯象理论 $\longleftrightarrow$ 基本理论 $\longleftrightarrow$ 数学

在上述关系中, 前两部分是实验物理, 中间两部分是理论物理, 后两部分则是数学物理. 唯象理论是实验物理与理论物理的相交部分, 它反映了我们对物理世界初步的理解和认识; 而基本理论则是理论物理与数学的相交部分, 它反映了我们对物理世界深入的理解和认识. 所以, 我们对物理的学习, 包括实验、理论和数学三个部分, 既要学习实验物理, 也要学习理论物理, 还要学习有关的数学. 物理学的这三个部分是相辅相成不可或缺的.

近代物理学的基础是我们对微观物理世界的一种理性的了解和认识. 学习近代物理, 同样也包括近代物理实验、近代物理理论和近代物理中所要用到的数学这三个部分. 近代物理实验教我们如何用实验的方法观察微观物理现象, 测量微观物理量, 实际具体地和定量地研究微观物理世界. 近代物理理论则帮助我们在头脑中形成一幅关于微观物理世界的具体清晰的物理图像, 以及用来描述这幅物理图像的物理概念, 把握相关物理量的定量关系, 并且用它们来分析和

预测微观物理现象.近代物理中所用的数学,则不仅是我们在用近代物理理论来分析和预测微观物理现象时必需的手段和工具,它本身就能使我们对微观物理世界有更深入的理解,能引导和推动近代物理理论进一步的发展.

举例来说,迈克耳孙-莫雷实验所表明的光速不变性(不依赖于惯性参考系的选择),属于微观高速领域的光波传播的现象学.菲茨杰拉德提出的物体在运动方向的收缩(洛伦兹收缩),以及洛伦兹找到的变换公式,则属于这方面的唯象理论.爱因斯坦在相对性原理和光速不变性原理的基础上,仔细和严格分析了同时的概念,从时空性质的角度赋予洛伦兹变换以深刻的物理含义.这样建立的狭义相对论,则是关于时空性质的基本理论,它是近代物理中一切理论的基础和出发点.

引力质量与惯性质量相等,这是牛顿早已在单摆实验中就发现的现象,它与开普勒的行星运动三定律,都属于万有引力的现象学.牛顿发现的万有引力定律解释了开普勒行星运动三定律,可以说是万有引力的一种唯象理论.爱因斯坦把引力质量与惯性质量相等作为一个基本原理,这样建立起来的广义相对论,则是关于万有引力的一种基本理论,它把万有引力归结为时空弯曲的几何效应,把我们对引力的认识提到了一个崭新的高度.

在实验室中对氢原子光谱进行实际的观测,我们可以看到氢原子光谱的线状特征,而这些谱线可以分成几个线系,并且能够用一个简单的里德伯公式来表示;这就是氢原子光谱的现象学.玻尔用卢瑟福的原子模型和三条假设对此给出了定量的解释,这是一个唯象的理论.后来建立的量子力学则是关于微观物理世界的基本理论,它的系统表述和应用要用到数学中的希尔伯特空间和群表示论.

狭义相对论、广义相对论和量子力学为我们提供了关于微观物理世界的一幅全新的物理图像,以及用来描述这幅物理图像的物理概念、相关物理量的定量关系,构成了我们理性地了解和认识微观物理世界的基础,是近代物理的基本理论.近代物理学就是在相对论和量子力学的基础上,研究微观粒子运动的基本规律和粒子间的基本相互作用,以及在這些基本规律和相互作用支配下物质结构各个层

次的性质、特点和规律的物理学。

作为一门基础课的近代物理学,主要是讲述近代物理各个部分的实验现象,以及相关的唯象理论,并在此基础上讲述相对论和量子力学的初步知识和概念.对于主修物理的学生来说,另外有专门的课程来系统和深入地讲述相对论和量子力学,学好近代物理学就为后续课程打好了基础.对于非主修物理的学生来说,近代物理学则构成了自己知识结构中很重要的一部分,既是为后续主修课程做准备,也是将来拓宽人生追求进入新领域的一个恰当基础。

我们学习近代物理学,就要了解和熟悉近代物理各个部分的现象学特点和规律,理解和掌握各个主要的唯象理论,并且初步地学会用相对论和量子力学的基本图像和概念来理解和分析一些简单的微观物理现象.为了这个目的,我们需要做近代物理实验,和上近代物理学的课程.而在近代物理学课程中,还要做许多习题.因为我们对微观物理现象的特点和规律了解和熟悉的程度,对有关唯象理论理解和掌握的好坏,以及运用近代物理学基本图像、概念和理论来分析一些简单问题的能力,都可以通过一些习题来检验和锻炼.所以,解題是学习近代物理学的一个重要方法,也是学习近代物理学的一个重要环节。

我们在这里选择了一些近代物理学的基本和典型的习题,逐一给出解答和讨论.我们假设读者已经学过或正在学习近代物理学,所以不再在这里系统地讲述,只是在每一章习题的开头列出有关的基本概念和公式、仪器和实验、重要的实例和现象以及基本公式的推导,并且有选择地在一些题目中作适当的讲解和讨论.在每一章的最后,则给出一个简短的小结.我们尽量使本书在内容上自给自足,在理论上自成体系.读者在这方面如果有什么问题,请参阅本书作者的《近代物理学》。

本书选择的题目,绝大多数都需要算出数值的结果.也许有的读者会觉得没有必要,认为学物理重在理解,把物理图像和基本概念弄清楚就行了.学物理重在理解,要把物理图像和基本概念弄清楚,这当然是对的.不过,学物理与学数学不同.我们前面说了,物理学是以实验为基础的实验科学,为了与实验进行比较,理论必须给出数值的

结果。费曼曾经说过：“物理学的整个目的就是找出带小数点的数，否则你就什么也没有做。”费曼是20世纪的大物理学家，他对近代物理学有许多奠基性的贡献。他是量子力学的第三种形式——路径积分形式——的创始人；他早期研究过超流现象，是费曼涡旋的提出者；因为在量子电动力学中的开创性工作，特别是对重正化理论的贡献，他获得过诺贝尔物理学奖；他发明的费曼图大大简化了量子场论的计算程序，并且成为一种物理和直观的分析工具。在第二次世界大战期间他参与了美国研制原子弹的工作，后来又是美国第一次失事爆炸的航天飞机故障的发现者。费曼是美国人心中的民族英雄，他1988年去世时，美国人自发地排起了为他送葬的长长的队列。他上面的这句话，是他切身的体会和经验之谈。

理论的分析需要算出数值的结果，这还不仅仅是为了与实验测量进行比较。我曾经在美国劳伦斯伯克利国家实验室跟比尔·迈尔斯研究超高密度物质和致密星体。一天他拿来一份与我们的研究有关的论文预印本给我看，我在看过以后告诉他这篇文章是错的。这是美国某名校一位权威指导的博士论文，我看了以后就按照它给出的方法做数值计算。可是，我发现怎么算也得不到这篇文章给出的结果。我只是在自己的计算中找不出错以后，才去找这篇文章的错。所以，数值计算也是核对和检验理论的一个重要方法。这篇文章在求极值时，用了一些独立的约束条件，而这些条件在实际上并不互相独立。

物理学是精确和定量的科学，有关数量的一些直观和定量的概念是物理学中非常重要和不可缺少的一部分。我们做近代物理学的习题，不仅仅是为了训练解题的本领和技巧，也是为了获得近代物理学中有关物理量的直观和定量的概念。而且，本书选择的习题大多数都是关于实际发生的微观物理现象的，做这些习题，同时也就了解和熟悉了这些物理的现象学。这是学好近代物理学的基础。

以下是在近代物理学中最基本的物理常数(用国际单位制)，取自美国《物理学评论》2002年D66卷第1-I期《粒子性质评论》：

真空光速 $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$;

约化普朗克常数 $\hbar = 1.054\,571\,596(82) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

$$\text{玻耳兹曼常数} \quad k_B = 1.380\,650\,3(24) \times 10^{-23} \text{ J/K};$$

$$\text{阿伏伽德罗常数} \quad N_A = 6.022\,141\,99(47) \times 10^{23} / \text{mol};$$

$$\text{基本电荷} \quad e = 1.602\,176\,462(63) \times 10^{-19} \text{ C};$$

$$\text{万有引力常数} \quad G_N = 6.673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2.$$

括号中的数,是最后两位数的标准偏差.而在实际计算中,经常用到和需要记住的是下列组合常数

$$\hbar c = 197.326\,960\,2(77) \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

$$\approx 197.3 \text{ eV} \cdot \text{nm} = 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm},$$

$$\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c = 1/137.035\,999\,76(50) \approx 1/137.0,$$

$$e^2 / 4\pi\epsilon_0 \approx 1.440 \text{ eV} \cdot \text{nm} = 1.440 \text{ MeV} \cdot \text{fm},$$

$$G_N m_p^2 / \hbar c = 5.905 \times 10^{-39},$$

以及

$$u = 931.494\,013(37) \text{ MeV}/c^2 \approx 931.5 \text{ MeV}/c^2,$$

$$k_B = 8.617\,342(15) \times 10^{-5} \text{ eV/K} \approx 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K},$$

$$m_e = 0.510\,998\,902(21) \text{ MeV}/c^2 \approx 0.5110 \text{ MeV}/c^2,$$

$$m_p = 938.271\,998(38) \text{ MeV}/c^2 \approx 938.3 \text{ MeV}/c^2,$$

其中 α 是精细结构常数, ϵ_0 是真空介电常数, u 是原子质量单位, m_e 是电子质量, m_p 是质子质量.

习题 1.1 ① 用单位 $\text{J} \cdot \text{m}$ 表示 $G_N m_p^2$ 的值. ② 用单位 $\text{MeV} \cdot \text{m}^2$ 表示 $\hbar^2/m_p$ 的值. ③ 结合上面两个结果给出用单位 m 表示的 $\hbar^2/G_N m_p^3$ 的值. ④ 结合①与②的结果给出用 MeV 作单位的 $G_N^2 m_p^5 / \hbar^2$ 的值.

解 ① 用组合常数 $G_N m_p^2 / \hbar c$ 和 $\hbar c$, 都取 4 位有效数字, 有

$$G_N m_p^2 = \frac{G_N m_p^2}{\hbar c} \cdot \hbar c = 5.905 \times 10^{-39} \times 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$= 1.165 \times 10^{-36} \text{ MeV} \cdot \text{fm},$$

再代入 $\text{MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$ 和 $\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$, 就得

$$\begin{aligned} G_N m_p^2 &= 1.165 \times 10^{-36} \times 1.602 \times 10^{-13} \text{ J} \times 10^{-15} \text{ m} \\ &= 1.866 \times 10^{-64} \text{ J} \cdot \text{m}. \end{aligned}$$

② 在分子和分母都乘以 c^2 , 用组合常数 $\hbar c$ 和 $m_p c^2$, 取 4 位有效数字, 并代入 $\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$, 就可得到

$$\frac{\hbar^2}{m_p} = \frac{(197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm})^2}{938.3 \text{ MeV}} = 4.149 \times 10^{-29} \text{ MeV} \cdot \text{m}^2.$$

③ 用组合常数改写, 并代入 $\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$, 就可得到

$$\begin{aligned} \frac{\hbar^2}{G_N m_p^3} &= \frac{\hbar c}{G_N m_p^2} \frac{\hbar c}{m_p c^2} = \frac{1}{5.905} \times 10^{39} \times \frac{197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{938.3 \text{ MeV}} \\ &= 3.561 \times 10^{22} \text{ m}. \end{aligned}$$

④ 结合①与②的结果, 再代入 $J = \text{MeV} / (1.602 \times 10^{-13})$, 有

$$\begin{aligned} \frac{G_N^2 m_p^5}{\hbar^2} &= (G_N \cdot m_p^2)^2 \cdot \frac{m_p}{\hbar^2} = \frac{(1.866 \times 10^{-64} \text{ J} \cdot \text{m})^2}{4.149 \times 10^{-29} \text{ MeV} \cdot \text{m}^2} \\ &= 3.270 \times 10^{-74} \text{ MeV}. \end{aligned}$$

若用组合常数改写, 可得到

$$\begin{aligned} \frac{G_N^2 m_p^5}{\hbar^2} &= \left(\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} \right)^2 \cdot m_p c^2 = (5.905 \times 10^{-39})^2 \times 938.3 \text{ MeV} \\ &= 3.272 \times 10^{-74} \text{ MeV}. \end{aligned}$$

它与前面的结果在第 4 位数有差别, 这是由于计算只取 4 位有效数字, 两种算法在这一位的误差不同.

我们上述的算法与通常的算法不同. 通常的算法, 是把每个物理量的数值代进去做计算, 数值计算量大, 而且还要换算单位. 现在运用组合常数, 既减少了数值计算的次数, 还省去了不必要的单位换算, 大大提高了工作效率, 也减少了出错的机会. 此外, 我们知道, 误差在数值计算中是传递的. 减少计算的次数, 也就减少了误差累计的次数. 上述④的两种算法, 后一种采用组合常数, 累计误差就比前一种小. 还有, 用组合常数, 也可以减少记忆物理常数的数量. 比如, 我们记住了组合常数 $e^2/4\pi\epsilon_0$ 就可以应付绝大多数实际计算的需要, 而不必分别记住基本电荷 e 和真空介电常数 ϵ_0 .

每一个行当都有它自己的一些诀窍. 可以说, 使用组合常数做计算, 以及我们在这里所列出的几个组合常数, 就是在前沿做实际工作的近代物理学家们在他们的工作中逐渐积累的经验的结晶. 我是在美国每天与比尔交流讨论的计算中, 在他的写字台上看到和跟

他学会用这些组合常数的。

在科学和技术中使用的物理常数和数据,影响到测量和计算结果的精度,从而对实际问题甚至对基本理论都会产生影响。大家知道,牛顿自己在晚年的回忆录中说,他在 1665 到 1666 年间因为逃避瘟疫而回乡的期间,通过将把月球保持在其轨道上的引力和物体在地球表面上所受的重力进行比较,而发现了万有引力定律。但是在事实上,牛顿的《自然哲学的数学原理》在 1687 年才出版。牛顿为什么把他的发现推迟了二十多年才发表?有一种解释说,牛顿早年得到的地球半径的数据不够精确,算出的重力加速度误差较大。后来他得到了较精确的数值,算出的结果与月球绕地球转动的向心加速度确实满足平方反比关系,才拿出来发表。尽管对这件事现在有不同的看法,但是这个说法表明物理常数和数据之重要,并不亚于基本理论本身。

物理学发展到了今天,对于物理常数和数据的测量、分析、评价和推荐已经成为近代物理中一个极端重要和庞大的部分,成为许多科学家终身的职业,成为国际间科学团体和政府部门相互协调和配合的一个领域。在美国纽约的布鲁克海文国家实验室设有美国国家核数据中心,定期发布他们的推荐值。中国在北京原子能研究院也设有中国国家核数据中心,提供他们测量、分析、评价和推荐的数值。美国《物理学评论》每隔一两年会在当年的 7 月份发布一本详尽的粒子性质评论,其中包括各种基本物理常数和数据。当然,对于一般目的的使用来说,只取几位有效数字,每年发布的数值不会有什么重大差别。但是作为教师和作者,就应当尽量提供最新的结果。急于想知道当前最新推荐值的读者,可以到国际互联网上查询。比如访问 <http://physics.nist.gov/constants> 和相关的网址,可以得到 CODATA(国际科学技术数据委员会)的推荐值。

2 狭义相对论时空性质

重要的仪器和实验

- 迈克耳孙干涉仪：用半透明反射镜把一束光分成相干的两束，使它们分别沿互相垂直的两臂走过一段距离后又反射回来再重新汇合发生干涉的装置。

- 迈克耳孙-莫雷实验：用迈克耳孙干涉仪来测量地球相对于以太的速度的实验。可参考习题 2.1 和 2.2。

- 爱因斯坦光子钟：使光束垂直投射到一个反射镜上再反射回来，从而根据光速和光走过的路程来确定时间的计时装置。

重要实例的现象学

- 地面上的 μ 子流：在地面上测到的由宇宙射线在大气上层产生的 μ 子流。 μ 子的固有寿命是 $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$ ，在此期间它以光速飞行也只能飞过 660 m，而地球大气层的厚度是 100 km。这说明飞行中的 μ 子寿命延长了。可参考本章小结一开头的讨论。

- π 介子的寿命：参考习题 2.3 以及习题 2.4 后面的讨论。

- 双胞胎效应：两台对准的原子钟，一台拿到飞机上绕地球飞行一圈后，比地面上静止的另一台慢了约 10^{-7} s 。

- X 射线脉冲星的蚀：在一个双星体系中，有一颗星是发射 X 射线的脉冲星，它被另一颗星遮住就发生蚀。如果它发出的 X 射线速率（光速）与它的运动速度有关，就会观测到蚀开始和结束的快慢不同。但是没有观测到这种不同。

- π 介子的 γ 衰变：以接近光速飞行的 π 介子，在飞行中衰变，它向前方发出的 γ 射线（波长极短的光）相对于 π 介子的速度是光速，而相对于地面的速度测到也是 c 。

- 高能直线加速器中的电子：参考习题 2.5 和 2.6。

熟悉和记住这些现象及其特征,有助于我们理解相对论的时空性质和形成正确的物理图像.以上实验和现象可以参考《近代物理学》或别的教材.

基本概念和公式

- 异地对钟: 对准两个在不同地点的钟,特别是对准两个在有相对运动的不同惯性参考系的钟,是相对论物理的核心,也是从物理上理解相对论的关键.在这种对钟的操作中,光速不变性又是关键中的关键.

- 同时的相对性: 在静止(运动)参考系中不同地点对准了的两个钟,从运动(静止)参考系来看并没有对准,这就是同时的相对性.

- 爱因斯坦膨胀: 从静止参考系看来,运动参考系中,时间膨胀,过程延缓,运动的时钟变慢了,飞行的钟走过的时间 T_0 , 静止的观测者测到的是 T ,

$$T = T_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

- 长度的相对性: 测量一段距离的长度,要在同一时刻纪录这段距离两端的坐标.由于同时是相对的,在一个参考系是同时的,在另一参考系并不同时,这就是长度相对性的物理根源.

- 洛伦兹收缩: 从静止参考系看来,运动参考系中的尺子缩短了,在运动参考系中的一段距离 L_0 , 静止的观测者测到的是 L ,

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

- 洛伦兹变换: 同一个事件在两个有相对速度 v 的不同惯性参考系 S 与 S' 中时空坐标的变换关系.当相对速度沿 x 轴时有

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

- 闵可夫斯基空间: 由三维实空间坐标 (x, y, z) 和一维虚时坐标 ict 构成的四维赝欧几里得空间.

- 四维不变量,类空与类时间隔,因果性条件:

$$s^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2.$$

上述公式定义的四维间隔 s 不依赖于惯性参考系的选择,称为四维

不变量或不变长度. $s^2 > 0$ 的间隔称为类空间隔, $s^2 < 0$ 的间隔称为类时间隔, $s^2 = 0$ 的间隔称为类光间隔. 由于间隔是四维不变量, 它的属性不会因为洛伦兹变换而改变. 但是, 属于类空间隔的两件事, 它的时间先后次序可以通过适当的洛伦兹变换而颠倒过来. 所以, 有因果关系的两个事件, 要用类时或类光间隔分开. 这就是因果性条件. 对于用类空间隔分开的两个事件, 它们的因果关系问题需要作进一步的分析, 参阅下一章习题 3.17 之后的讨论.

以上各个公式需要记住, 也可以从闵可夫斯基空间中坐标轴的转动直接写出来, 见下面的推导. 速度叠加公式可以同样地推出, 也可以从洛伦兹变换公式推出, 不必记.

● **公式的推导** 相对论基本公式的推导, 主要有物理、解析和几何三种方法. 物理的推导运用物理思维, 或者说直观思维和形象思维, 这有助于读者在头脑中形成一幅直观和形象的图像, 有助于直觉思维的养成, 可以参阅《近代物理学》. 解析的推导运用解析方法和逻辑推理, 这有助于训练读者逻辑思维的能力, 养成严谨的作风, 读者可以在一般的电动力学教科书或关于相对论的书中找到. 我们在这里给出几何的推导, 这种推导运用闵可夫斯基空间中的几何方法, 有助于读者在头脑中形成一幅直观和形象的几何图像, 同时又训练了逻辑推理的能力.

设开始时坐标系 S' 的原点与 S 的原点重合, S' 相对于 S 有恒速 v . 这时从原点发出的光, t 时刻到达 (x, y, z) , 这称为一个事件 $P(x, y, z, t)$. 从光速不变性, 有 P 点在 S' 系与 S 系的时空坐标之间的关系

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = s^2.$$

对于光, $s=0$. 如果这个关系不只限于光, 而是普遍成立的, P 是任何一个事件的时空点, 这就意味着时空坐标 (x, y, z, ict) 构成一个四维空间——闵可夫斯基空间, 上式则表示 P 点与原点之间的四维间隔 s 的不变性. 事件 P 在时空中的发展和演化, 相应于这个四维空间中的一条曲线, 称为这个事件的世界线.

① 洛伦兹变换. 当 S' 与 S 的相对运动沿 x 轴时, 我们可以只考虑空间坐标 x 和时间坐标 $w=ict$, 这就成为在 $w-x$ 平面上的平面几