

# 从零 学相对论

梁灿彬 曹周键 著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

014011816

0412.1  
66

# 从零

Congling Xue Xiangduilun

# 学相对论

梁灿彬 曹周键 著



0412.1  
66



北航

C1699188



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书由我国相对论领域著名专家北京师范大学梁灿彬教授主笔撰写。本书用浅显而直观的几何语言,较少的数学公式,对狭义相对论与广义相对论的物理基础及前沿领域作了通俗、清晰而富有趣味的介绍,对广大理工科学生和教师理解相对论大有帮助。除了相对论基础知识,本书还详细讲述了光速为什么是极限速率、高速物体的视觉形象、相对论在全球定位系统(GPS)的重要作用、虫洞和时间机器(以及弑母悖论)等饶有兴味的专题。

本书可作为我国高等学校物理学类、天文学类各专业本科生及研究生的广义相对论课程教材,亦可供有关的科学研究人员和教师参考。各行各业的相对论爱好者(及优秀高中生)只要稍有微积分初步知识都可将本书选作从零起学习相对论的入门读物。

## 图书在版编目(CIP)数据

从零学相对论 / 梁灿彬,曹周键著. -- 北京:高等教育出版社,2013.10

ISBN 978-7-04-038121-4

I. ①从… II. ①梁… ②曹… III. ①相对论 IV. ①O412.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第169255号

策划编辑 忻蓓  
版式设计 于婕

责任编辑 忻蓓  
插图绘制 尹莉

特约编辑 张竹琪  
责任校对 杨雪莲

封面设计 于文燕  
责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 化学工业出版社印刷厂  
开 本 787mm×960mm 1/16  
印 张 16.25  
字 数 290千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2013年10月第1版  
印 次 2013年10月第1次印刷  
定 价 25.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 38121-00



# 前 言

我从1981年起,在美国芝加哥大学相对论组任访问学者两年,在该组“言必称几何”的浓郁学术气氛的耳濡目染之下学到了用整体微分几何研究广义相对论的先进方法,回国后立即开课推广。我在2000年、2001年出版了《微分几何入门与广义相对论》上、下册,2006年及2009年又与周彬博士合作修订为第二版,并扩充内容成为上、中、下三册,在国内相对论界乃至理论物理学界产生了一定的影响。我从1983年起至今从不间断地开设这方面的硕士、博士研究生系列课程,同时吸引了(并且正在吸引着)无数本科生选修和旁听,取得了良好的效果。我欣慰地看到在听课的研究生和本科生中都涌现出一大批“心领神会”的尖子生,而且这些知识对他们日后的研究工作发挥着重要的作用。然而,要用这种方法学习相对论,物理工作者必须过好微分几何这一关,具体来说就是至少大致读懂该书上册的前5章。我每次讲这5章时,总有许多物理听众由于感到格格不入或者拿不出足够的复习时间而先后掉队(撤退)。然而他们对第6章(用几何语言剖析狭义相对论)甚感兴趣,不少撤退了的听众又纷纷来听第6章,无奈由于缺乏前5章的基础而跟不上。前5章早已成为学习《微分几何与广义相对论》的拦路虎。

一年多前,我曾教过的一个学生张华在采访我之前在网上征集问题,征来的一个问题对我触动巨大。这个问题是:“有许多工科学生对相对论也感兴趣,他们希望了解这个领域,但往往不能花费大量时间在这上面,毕竟,三本书对于非物理专业的同学来说还是太耗费精力了,不管是物理专业还是非物理专业的学生,都是国家的栋梁,手心手背都是肉,梁老师是否会考虑为这些同学做些什么呢?”我清醒地知道,即使是物理专业的学生,也只有少数佼佼者能较好地读完这三册书。我的确应该设法为相对论爱好者(连“手心”带“手背”的“肉”)做些什么。经过大约一周的思考,我毅然决定把《电磁学拓展篇》的写作再次暂停(尽管此书早该出版,属于一拖再拖),立即着手写一本当时暂名为《趣味相对论》的书,基本宗旨是:①尽量用几何语言;②尽量通俗易懂。这两点宗旨表面上互相抵触,但经验使我自信有办法做到两者兼顾。1997年9月,我在系主任的支持下大胆地为北京师范大学物理系一年级新生开设了一门名为“趣味近代物理”的选修课(限于课时,后来成为“趣味相对论”),先用一种很容易接受的讲法带领学生“学一点点几何”,在此基础上就可以不用前5章而把第6章的主要

内容娓娓道来,特别是用几何语言对尺缩、钟慢、双子、车库佯谬进行剖析。这是一次“空前绝后”的成功尝试(“空前”是指从未有过这种课程,“绝后”是指一直没有时间再讲一次),大半学生基本听懂,约有 10% 的学生达到心领神会、言必称几何的美好境界。我相信,以此为基础,我可以写出一本既用几何语言又比较好懂的书。

本书虽然力求易懂,却并非科普著作,因为书中出现许多公式,要求读者有起码的一点微积分知识。书中对许多问题的深入细致、追根问底式的讨论也完全不是科普书的味道。书名《趣味相对论》容易被误解为科普书,所以后来放弃。本书共有 9 章,前 5 章讲狭义相对论,后 4 章讲广义相对论,都是从零开始,所以书名改为《从零学相对论》。我一直认为学习相对论有一条捷径(可惜有太多的人不走),就是尽早学习和使用几何语言。“从零学”还意味着要尽早学会最起码的几何语言。本书从第 2 章开始带领读者“学一点点几何”,以后各章就尽量用几何语言讲解。人们总以为几何语言难学,所以只顾砍柴,不愿磨刀。但是如果按本书的讲法去学,只要很少的磨刀时间就能砍大量的柴,何乐而不为?为了通俗易懂,全书不讲张量,以好懂得多的“线元”代替度规张量,强调“线元决定几何”。“线元”一词贯穿全书,几乎可说“一个线元吃到底”,居然连 GPS(全球定位系统)原理、史瓦西时空的最大延拓、嵌入图、虫洞和时间机器等复杂问题也能依靠线元讲清楚。本书虽然起点为零,却却不惜篇幅、不厌其烦地力图带领读者由浅入深地达到比较深刻的理解境界,以下四句可以作为本书的副标题:

#### 四维眼光,几何语言,从零学起,渐步登高。

虽然本书比《微分几何入门与广义相对论》的三册书在篇幅上小很多,但却包含了该书不曾涉及的许多方面的内容,而且多数都有详细讨论,例如:① 时序和因果关系(§3.6);② 高速运动物体的视觉形象(§4.4);③ 质点必须亚光速的论证(§5.9);④ 全球定位系统(GPS)的相对论修正(§8.6);⑤ 广义相对论的近代实验验证(§8.2, §8.5);⑥ 虫洞和时间机器(第 9 章)。此外,本书还多处添加了相对论史(重要历史事件和著名人物的“八卦”故事)的介绍。

为了适应不同读者,本书内容分为必读和选读两大部分,分别用宋体和楷体排印。必读部分自成体系,不会由于略去选读内容而影响后续必读内容的学习。各页的脚注(如果有的话)与选读内容类似,初次学习的读者不妨略去全部或部分选读和脚注内容。第 1 至第 5 章还配有一定数量的习题,对学好这 5 章颇有帮助,其中第 4 章的习题尤为重要,建议读者至少要做其中的多数题目。

相对论的几何语言包括两大方面:① 用时空图讨论问题;② 用 4 维矢量和张量讨论问题。为了大大削减入门难度,本书的几何语言只限于第①方面(在

这方面做了很大程度的发挥),这也许是本书的最大不足。一个明显的后果就是无法讲电磁场,因为一提电磁场就要涉及电磁场张量  $F_{\mu\nu}$ 。我们已经想好了补救办法:再写一本风格类似但一开始就介绍 4 维矢量和张量的书(不妨戏称为本书的“妹妹篇”)。用映射定义张量是最优雅的讲法,已经详述于《微分几何入门与广义相对论》上册,其唯一缺点是比较抽象,成为许多物理人的拦路虎。我们初步打算在待写的“妹妹篇”中用坐标变换的常用讲法介绍张量,在此基础上就可以充分自由地用张量语言讨论各种相对论问题。

本书第二作者、中国科学院应用数学研究所副研究员曹周键是前面提到的“趣味近代物理”课选修生中鹤立鸡群的第一名,在本科期间又听全了我的硕士生、博士生系列课程,是我在毕生教学中遇到的最优异的学生之一。我们在这次合作写书中有过无数次讨论,我自己百思不解的若干问题跟他讨论后都受到重要启发,经过讨论往往迎刃而解。书中对不少问题的独特理解都包含着他的重要贡献,他的加盟使得本书质量得以明显提高。

笔者曾邀请北京师范大学物理系裴寿镛教授和中国科学院数学研究所吴小宁副研究员审阅过本书第 7 章的初稿,他们提出的意见和建议对该章的修改起到了重要作用。此外,北京师范大学相对论组博士生韩愈和广州大学本科杨锦波也曾应邀阅读过本书的部分重要章节,他们也都提出了很好的修改意见。笔者在此要对他们深表谢意。

梁灿彬

2012 年 10 月 11 日于北京

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

第 1 章 狭义相对论的引入 .....	1
§ 1.1 相对性原理 .....	1
§ 1.2 麦克斯韦电磁理论的挑战 .....	3
§ 1.3 洛伦兹变换 .....	7
第 1 章习题 .....	12
第 2 章 学一点点几何 .....	13
§ 2.1 线元与几何 .....	13
§ 2.2 闵氏几何 .....	15
§ 2.3 球面几何 .....	17
§ 2.4 曲率 .....	18
§ 2.5 测地线 .....	18
第 2 章习题 .....	21
第 3 章 相对论的几何表述 .....	22
§ 3.1 世界线和时空图 .....	22
§ 3.2 惯性观者、参考系和坐标系 .....	27
§ 3.3 光速不变的 4 维表述 .....	30
§ 3.4 固有时与坐标时的区别和联系 .....	33
§ 3.5 时空图中的坐标轴 .....	34
§ 3.6 时序和因果关系 .....	36
§ 3.7 何谓几何语言? 何以要用几何语言? .....	41
第 3 章习题 .....	44
第 4 章 趣味运动学效应 .....	45
§ 4.1 尺缩效应和车库佯谬 .....	45
4.1.1 尺缩效应 .....	45
4.1.2 车库佯谬 .....	47
§ 4.2 钟慢效应 .....	48
4.2.1 通常的钟慢效应 .....	48
4.2.2 用洛伦兹变换讨论尺缩钟慢[选读] .....	50
4.2.3 不同比钟方式有不同结果 .....	54



4.2.4	多普勒频移 .....	57
4.2.5	钟慢尺缩效应的实验验证 .....	57
§ 4.3	双子效应(佯谬) .....	60
4.3.1	双子效应的戏剧性描述 .....	60
4.3.2	双子效应的几何剖析 .....	61
4.3.3	双子“悖论”的长期论战 .....	62
4.3.4	双子效应的实验验证 .....	68
§ 4.4	高速物体的视觉形象 .....	72
§ 4.5	用几何语言导出洛伦兹变换[选读] .....	84
第 4 章习题 .....		86
<b>第 5 章</b>	<b>相对论质点力学 .....</b>	<b>88</b>
§ 5.1	动量和动量守恒 .....	88
§ 5.2	力的定义 .....	90
§ 5.3	动能 .....	93
§ 5.4	能量和能量守恒 .....	95
§ 5.5	对“质能相当性”的述评 .....	98
§ 5.6	结合能和质量亏损 .....	101
§ 5.7	质能动关系式 .....	103
§ 5.8	光子及其能量和动量 .....	104
§ 5.9	质点为何必须亚光速? .....	105
第 5 章习题 .....		106
<b>第 6 章</b>	<b>广义相对论初步 .....</b>	<b>108</b>
§ 6.1	引力的实质是时空的弯曲 .....	108
§ 6.2	弯曲时空的物理定律 .....	113
§ 6.3	等效原理 .....	114
§ 6.4	潮汐力与测地偏离 .....	118
§ 6.5	爱因斯坦场方程 .....	122
<b>第 7 章</b>	<b>恒星演化和黑洞 .....</b>	<b>126</b>
§ 7.1	引力是天体物理学的主角 .....	126
§ 7.2	恒星演化 .....	128
7.2.1	恒星的形成 红巨星 .....	128
7.2.2	白矮星 .....	130
7.2.3	中子星 .....	133
7.2.4	超新星 .....	135

---

7.2.5 脉冲星 .....	136
§ 7.3 奇点、视界和黑洞 .....	138
§ 7.4 黑洞无毛定理 .....	143
§ 7.5 黑洞的搜寻 .....	149
<b>第 8 章 史瓦西时空 .....</b>	<b>156</b>
§ 8.1 史瓦西真空解 .....	156
§ 8.2 广义相对论的实验验证 .....	160
§ 8.3 引力钟慢和引力红移 .....	161
8.3.1 引力钟慢效应 .....	161
8.3.2 引力红移 .....	167
§ 8.4 水星近日点进动 .....	168
§ 8.5 星光偏转 .....	172
8.5.1 理论预言值和日全食观测 .....	172
8.5.2 用星光偏转检验引力理论[选读] .....	175
8.5.3 牛顿引力论对星光偏角的推导[选读] .....	177
8.5.4 雷达回波的时间延缓[选读] .....	178
§ 8.6 相对论在 GPS(全球定位系统)中的应用 .....	181
§ 8.7 史瓦西时空的最大延拓 .....	195
8.7.1 奇点和奇性 .....	195
8.7.2 克鲁斯科尔坐标系 .....	196
8.7.3 克鲁斯科尔最大延拓 .....	199
8.7.4 黑洞、白洞和视界 .....	204
§ 8.8 伯克霍夫定理 .....	205
§ 8.9 恒星的引力坍缩和史瓦西黑洞 .....	206
<b>第 9 章 虫洞和时间机器 .....</b>	<b>212</b>
§ 9.1 嵌入图 .....	212
§ 9.2 虫洞 .....	217
9.2.1 史瓦西虫洞 .....	217
9.2.2 可穿越虫洞 .....	219
§ 9.3 时间机器 .....	221
9.3.1 把虫洞转化为时间机器 .....	221
9.3.2 弑母悖论 .....	224
9.3.3 物理学允许时间机器吗? .....	227
<b>附录 A 单位制、量纲和公式转换 .....</b>	<b>229</b>

---

A.1 单位制基本知识 .....	229
A.1.1 基本单位和导出单位 .....	229
A.1.2 量纲式和量纲 .....	232
A.2 几何单位制 .....	234
A.2.1 几何单位制 .....	234
A.2.2 几何单位制公式转换为国际单位制公式 .....	235
习题答案 .....	238
参考文献 .....	240
索引 .....	243

# 第 1 章 狭义相对论的引入

相对性原理是牛顿力学的一个重要出发点。然而,麦克斯韦(以下简称麦氏)的电磁理论问世之后,相对性原理曾一度遭遇过严峻的挑战,最终导致狭义相对论的诞生。因此,要介绍狭义相对论的引入动机,有必要讲清以下三个问题:

1. 什么是相对性原理?
2. 麦氏电磁理论为何曾一度对相对性原理提出过严峻挑战?
3. 上述挑战如何诱发爱因斯坦创立狭义相对论?

## § 1.1 相对性原理

“温故而知新”。要介绍相对论,首先复习一点牛顿力学。牛顿力学的一个出发点是(伽利略的)相对性原理,它要求所有惯性系平权,就是说,要求同一物理定律在所有惯性系中有相同的数学表达式。这是一个很强的原理,实质上是一个“管定律的定律”——想要成为定律就必须服从这个原理的要求。为了解释“物理定律在所有惯性系中有相同数学表达式”一语的准确含义,我们从介绍“事件”概念开始。“事件”概念非常直观,一声咳嗽、两车相撞以及炸弹爆炸都是实际发生的事件。每个实际事件都要占据空间的一个小区域,而且要持续一小段时间。物理学中的事件概念则是实际事件的模型化,即认为每一事件发生在空间的一点和时间的一瞬(一个时刻)。甚至,不论有没有什么(有意义的)事情发生,空间的一点和时间的一瞬的结合都叫做一个事件(event)。如果两件事情在同时同地发生(例如某人在咳嗽的同时眨了一下眼),则认为是同一事件。全体事件的集合称为**时空**(spacetime),因此事件也称为**时空点**(spacetime point)。

借助于惯性系能够对事件进行定量描述。在很多情况下可认为地球在做惯性运动,所以地球可近似地看作惯性参考系,称为**地球参考系**或**地面参考系**。设  $A$  是相对于地球静止的一点(称为地面系的一个空间点),如果  $A$  点在某一时刻  $t$  发生了一个事件,记作  $p$ ,则  $p$  可用如下方式表为

$$p = (t, A)。 \quad (1-1-1)$$

上式表明事件  $p$  的发生时刻是  $t$ ,发生地点是  $A$  点。请注意  $p$  与  $A$  的区别。 $p$  是

事件(时空点),  $A$  是空间点, 在其上可以发生一连串不同的事件, 各事件的区别在于发生时刻不同,  $p$  只是其中之一。鉴于初学者(甚至不少非初学者)存在着混淆时空点和空间点的“常见病”, 本书特意用小写斜体字母(如  $p$ )代表时空点(事件), 用大写正体字母(如  $A$ )代表空间点。

为了定量地刻画  $A$ , 还有必要引入坐标系。设  $O$  是地面参考系的一个空间点, 以它为原点建立一个相对于地球为静止的直角坐标系, 记作  $\{x, y, z\}$  系, 便可给空间点  $A$  赋予 3 个空间坐标  $x_A, y_A, z_A$ , 可表为  $A = (x_A, y_A, z_A)$ , 从而把式(1-1-1)具体化为

$$p = (t, x_A, y_A, z_A)。 \quad (1-1-1')$$

去掉下标  $A$ , 可以一般地把任一事件  $p$  表为

$$p = (t, x, y, z)。 \quad (1-1-2)$$

把  $t$  称为时间坐标, 就可以说每一事件  $p$  有 4 个时空坐标。于是我们就有了一个 4 维坐标系, 称为地面参考系内的一个惯性坐标系, 记作  $K$ , 也记作  $\{t, x, y, z\}$ , 即  $K$  与  $\{t, x, y, z\}$  同义。

设有一列火车在地面上匀速直线平动, 则火车系也是惯性参考系, 也可以类似地建立火车参考系内的一个惯性坐标系, 记作  $K'$  或  $\{t', x', y', z'\}$ , 此系对同一事件  $p$  又赋予另外 4 个时空坐标:

$$p = (t', x', y', z')。 \quad (1-1-3)$$

在  $t$  上加撇似乎画蛇添足, 因为在牛顿力学(以及人们的生活经验)中, 同一事件的发生时刻与坐标系无关, 总有  $t' = t$ 。不过还是写成  $t'$  为好, 因为不久将会看到在相对论中  $t'$  一般不等于  $t$ 。

同一事件的两组坐标  $t, x, y, z$  和  $t', x', y', z'$  当然应有某种关系, 这一关系称为坐标变换式, 取决于两个惯性坐标系之间的关联方式。图 1-1 示出一种最简单的关联方式(本书称之为最简关联), 满足如下条件: ① 两系空间坐标轴对应同向; ②  $K'$  系的空间坐标轴相对于  $K$  系以速率  $v > 0$  沿  $x$  轴正向匀速平动; ③ 空间坐标原点  $O$  和  $O'$  在  $t' = t = 0$  时重合(相遇)。在这种情况下不难证明两系坐标的变换关系为(证明见力学教科书)

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z。 \quad (1-1-4)$$

上式就是著名的伽利略变换式。由此又不难推出质点的速度变换式。由于本书把字母  $v$  专用来代表两系之间的相对速度, 质点的速度只好改用字母  $u$  代表。质点的运动对应于一连串(相继发生的)事件, 质点在每一时刻  $t$  位于某空间点

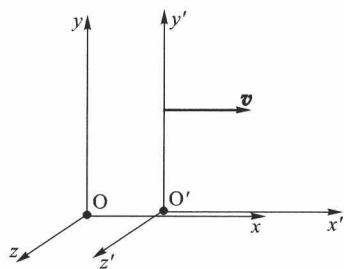


图 1-1 有最简关联的两个惯性坐标系



$(x, y, z)$  就是一个事件, 所以质点的空间坐标  $x, y, z$  都是  $t$  的函数, 可记作  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ , 于是质点的速度  $\mathbf{u}$  的分量依次为

$$u_x = \frac{dx(t)}{dt}, \quad u_y = \frac{dy(t)}{dt}, \quad u_z = \frac{dz(t)}{dt}, \quad (1-1-5)$$

同理, 质点相对于  $K'$  系的速度  $\mathbf{u}'$  的分量为

$$u'_x = \frac{dx'(t')}{dt'} = \frac{dx'(t)}{dt}, \quad u'_y = \frac{dy'(t')}{dt}, \quad u'_z = \frac{dz'(t')}{dt}.$$

利用式(1-1-4), 注意到  $v$  为常数 ( $dv/dt=0$ ), 使得

$$u'_x = u_x - v, \quad u'_y = u_y, \quad u'_z = u_z. \quad (1-1-6)$$

上式就是牛顿力学中的速度变换式, 是伽利略变换式的必然结果。

现在就可以说明“物理定律在所有惯性系中有相同数学表达式”的准确含义。以牛顿第二定律为例。谁都知道此定律在  $K$  系的表达式为  $\mathbf{f} = m\mathbf{a}$ , 问题是: 若以  $m', \mathbf{f}', \mathbf{a}'$  依次代表  $K'$  系测得的质量、力和加速度, 是否也有  $\mathbf{f}' = m'\mathbf{a}'$ ? 如果此式成立, 就说牛顿第二定律在两系有相同的数学表达式。由于牛顿力学默认  $m' = m$ ,  $\mathbf{f}' = \mathbf{f}$ , 所以只需验证  $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ , 为此只需验证两者的各分量相等。而这是很容易的, 因为

$$a'_x = \frac{du'_x}{dt'} = \frac{d}{dt}(u_x - v) = \frac{du_x}{dt} = a_x, \quad [\text{其中第二步用到式}(1-1-6)]$$

再由式(1-1-6)一望而知  $a'_y = a_y$ ,  $a'_z = a_z$ , 所以  $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ 。可见牛顿第二定律服从相对性原理。

事实上, 牛顿力学的每一个定律都服从相对性原理, 因此都是定律。

然而“好景不长”, 因为麦氏在 1873 年发表的电磁理论曾一度对相对性原理提出过严峻的挑战。详见下节。

## §1.2 麦克斯韦电磁理论的挑战

麦氏在前人工作的基础上于 1873 年发表了一套电磁理论, 其中的麦氏方程可被看作电磁场的演化方程。麦氏理论的一个伟大成果是预言了电磁波的存在(麦氏方程容许波动解), 并证明了电磁波在真空中的传播速率与真空中的光速  $c$  相同(波动解的波速为  $c$ ), 从而揭示了光的电磁本性。既然相对性原理是“管定律的定律”, 麦氏方程(如果想要成为定律)就必须服从, 亦即在任一惯性系中都应取相同的数学表达式, 从而导致“电磁波相对于任一惯性系的速率都为  $c$ ”的结论。然而, 设电磁波沿某惯性系的  $x$  方向以速率  $c$  传播, 根据速度变换式(1-1-6), 该电磁波相对于另一惯性系的速率就不为  $c$ , 因为两系之间有相对

速度。于是出现如下局面：

① 麦氏方程 + ② 相对性原理  $\Rightarrow$  光速对各系皆为  $c$ 。 (1-2-1)

[与伽利略变换推出的速度变换式(1-1-6)矛盾!]

上式似乎表明,如果①和②都成立,就会推出矛盾[与速度变换式(1-1-6)矛盾]。于是麦氏理论与相对性原理似乎互不相容。物理学似乎只能在以下两种选择中做一抉择。

**选择 A** 相对性原理只适用于力学而不适用于电动力学。存在一个特殊的惯性系,麦氏方程在该系成立,真空中的光波相对于该系的速率为  $c$ ;在其他惯性系中麦氏方程不成立,真空光速不为  $c$ 。这个特殊的惯性系在历史上称为“以太(ether)系”。洛伦兹是坚持这一选择的代表人物。

**选择 B** 相对性原理对力学、电动力学等一切物理范畴都适用(能“管”所有物理定律),但麦氏电磁理论不正确。应该存在一个不同于麦氏理论的电磁理论,它在所有惯性系中的数学表达式都有相同形式(惯性系之间的坐标变换仍默认为伽利略变换)。

以上讨论给读者这样的印象:相对性原理与麦氏理论水火不容,必须放弃其中一个。这是一个“硬碰硬”的问题:相对性原理和麦氏理论都非一般地“硬”,放弃哪一个都非常困难。历史上的确有过许多尝试,但都陷入理论上无法自圆其说或者与某些实验事实不符的困境<sup>①</sup>。于是物理学家遇到了一个两难问题。不过,如果更仔细地思索,就会发现相对性原理与麦氏理论并非真的势不两立,因为在导致矛盾的讨论中还涉及第三者——由伽利略变换推出的速度变换式(1-1-6)。人们之所以认为相对性原理与麦氏理论水火不容,是因为他们心中默认速度变换式(1-1-6)。假若允许对此式做适当修改,矛盾仍有希望消除。(打个生活中的比喻:去掉第三者仍有希望恢复夫妻关系的和谐。)可是速度变换式(1-1-6)似乎是更“硬”的东西,因为它是伽利略变换的推论,而伽利略变换是既合情合理又久经考验的公式,还能有错!?! 然而,独具慧眼的爱因斯坦在反复思考后竟然发现这一公式的确有一个错误。问题恰恰出在伽利略变换式(1-1-4)的第一式  $t' = t$  身上。此式的含义是:如果一个惯性系认为某事件在时刻  $t$  发生,则另一惯性系也认为该事件在时刻  $t$  发生。这同每个人的生活经验完全吻合,可以称为“时间的绝对性(与坐标系之类的人为选择因素无

<sup>①</sup> 关于这方面的历史(特别是史上有名的实验)请参阅其他教材,例如 Resnick (1968), 张元仲 (1994)。历史上有名的实验是迈克尔孙(Michelson)和莫雷(Morley)在1887年的干涉仪实验,旨在测定地球相对于以太的速度,但得到的是“零结果”。由于发明这种干涉仪以及所做的多次光学实验,迈克尔孙荣获1907年的诺贝尔奖,是美国获此殊荣的第一人。

关)”,由此又可推出“同时性的绝对性”,含义如下。设  $p_1, p_2$  是两个事件,在惯性系  $K$  的时空坐标分别为

$$p_1 = (t_1, x_1, y_1, z_1), \quad p_2 = (t_2, x_2, y_2, z_2)。$$

如果  $t_1 = t_2$ ,我们就说  $p_1$  和  $p_2$  对  $K$  系而言是同时事件。再设  $K'$  系给  $p_1, p_2$  赋予的时空坐标为

$$p_1 = (t'_1, x'_1, y'_1, z'_1), \quad p_2 = (t'_2, x'_2, y'_2, z'_2),$$

则由“时间的绝对性”[式(1-1-4)的第一式]自然有  $t'_1 = t_1, t'_2 = t_2$ ,于是由  $t_1 = t_2$  得到  $t'_1 = t'_2$ ,可见对  $K$  系为同时的两事件对  $K'$  系也是同时的。这就是“同时性的绝对性”的含义。牛顿力学坚持(默认)伽利略变换,因此在牛顿力学中同时性是绝对的,而且人们从生活经验出发也对此深信不疑。然而爱因斯坦在反复思考后认为“同时性的绝对性”并非无懈可击,他构想出如下反例。

一列火车  $A'B'$  在地面上匀速直线地飞驰而过。假定地面系发现车头  $A'$  和车尾  $B'$  同时遭受雷击(图 1-2)。爱因斯坦认为,对火车系而言,这两个事件并非同时事件,理由如下。

以  $A$  和  $B$  分别代表地面系发现雷击车头时

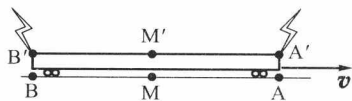


图 1-2 爱因斯坦列车的雷击同时性问题

以  $A'$  和  $B'$  在地面上留下的印记。(忽略火车高度,认为此时  $A'$  与  $A$  重合,  $B'$  与  $B$  重合。)以  $M$  代表  $AB$  段的中点。所谓“地面系认为两个雷击事件同时发生”,是指车头和车尾遭雷击时所发的光同时传到  $M$  点<sup>①</sup>。再以  $M'$  代表火车的中点,随着火车向前行进,  $M'$  点迎着车头而背离车尾运动,理应先收到车头来光后收到车尾来光,就是说,车头和车尾发出的光并不同时到达  $M'$ ,所以火车系认为“雷击车头”和“雷击车尾”这两个事件并不同时。爱因斯坦就是这样出人意料地提出了对“同时性的绝对性”的质疑,从而也就是对伽利略变换式(1-1-4)中的  $t' = t$  做出了否定,并以此为突破口创立了狭义相对论。相对论的第一篇(奠基性)论文发表于 1905 年,题为《论运动物体的电动力学》[见爱因斯坦等(1980)]。在这篇论文中,爱因斯坦首次提出了狭义相对论的两个基本假设,介绍如下。

**假设 1(相对性原理)** 所有惯性系平权,任何物理定律(而不只是力学定律)在所有惯性系的数学表达式都有相同的形式。

**假设 2(光速不变原理)** 真空中的光速沿任何方向、对任何惯性系都是  $c$ ,

<sup>①</sup> 设某人坐在  $M$  点,则他“收到车头来光”与“收到车尾来光”这两个事件都发生在他身上,同时与否有明确意义。爱因斯坦正是巧妙地利用“发生在同一个人身上的两事件的同时性”这一已知概念来给“发生在不同地点的两事件的同时性”下定义。

与光源的运动情况无关。

**注记 1** 伽利略的相对性原理只适用于牛顿力学定律,爱因斯坦的相对性原理则适用于所有物理定律。由前面的讨论可知,为此必须找出一组新的坐标变换来代替伽利略变换,这组新的坐标变换叫做洛伦兹变换,见下节。

**注记 2** 假设 2 的关键内容是“光速对任何惯性系都是  $c$ ”,而关键的关键是“惯性系”一词。用非惯性系测量光速的结果完全可以不是  $c$ 。

### [选读 1-1]

用今天的眼光看问题(“事后诸葛亮”),麦氏方程组当然是物理定律,所以假设 1 保证它在任何惯性系都有相同表达式,而由此自然导出光速(电磁波速)沿任何方向、对任何惯性系都是  $c$ ,所以假设 2 应看作假设 1 的推论而不是独立的假设(其实历史上早就有人提出过类似问题并引起过讨论)。至于假设 2 的最后一句话,即“与光源的运动情况无关”,今天看来也是多余的,因为,既然光速沿任何方向、对任何惯性系都是  $c$ ,它当然与光源的运动情况无关。但是,从历史上讲,选择 B(见第 4 页)的支持者们构造了各种各样的、不同于麦氏理论的电磁理论,它们的共同点是:光相对于光源的速率为  $c$ ,相对于惯性系的速率则取决于光源相对于该系的速度。所以,这些理论认为光速与光源的运动情况有关。后来的双星实验(1913 年)及其他实验否定了这一结论。但是爱因斯坦提出上述两个假设是在 1905 年,那时人们对于光速是否与光源有关还极为重视,也许正是这个原因使爱因斯坦在假设 2 中添加了最后一句关于光速与光源的运动情况无关的话。论文中的原话是这样的:“下面我们……引入进一步的假设(笔者注:指假设 2)——一个乍看起来与前一假设势不两立的假设(笔者注:从伽利略变换看来当然势不两立)——光在真空中以速度  $c$  传播,这一速度不依赖于发射体的运动性质。”

[选读 1-1 完]

### [选读 1-2]

关于火车遭受雷击的讨论,笔者曾不止一次地被问及一个有趣的问题。本选读用对话方式介绍这一问题及其答案,其中乙代表笔者。

甲 如果站在火车系上看问题,则  $M'$  并无运动,正如地面系认为  $M$  无运动那样。把在地面系上的思辨过程照样搬到火车系上,岂非  $M'$  也同时收到车头、车尾来光?

乙 不能照搬。地面系认为车头发光和车尾发光是同时事件,而我们不敢说火车系也认为这两个事件同时(事实上有待证明的正是它们并不同时)。可