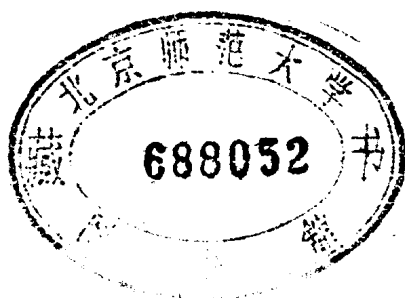


狭义相对论

美国麻州理工学院物理学导论丛书

(美) A. P. 弗伦奇著

张大卫 译



人民教育出版社

1979

内 容 提 要

本书是物理学的一套国际著名的改革教材——美国麻州理工学院物理学导论丛书的第二卷。该丛书共分六卷：1. 牛顿力学 2. 狭义相对论, 3. 振动和波, 4. 经典电磁学, 5. 电磁波和光学, 6. 量子物理导论, 皆由弗伦奇教授执笔编写。该丛书强调在基础物理教材中反映二十世纪物理学的成就, 突出科学思想及其发展和研究方法, 注重启发式教学。

本书共分八章：1. 对牛顿力学的偏离, 2. 光传播问题上的困惑, 3. 爱因斯坦与洛伦兹-爱因斯坦变换, 4. 相对论与长度和时间间隔的测量, 5. 相对论性运动学, 6. 相对论性动力学——碰撞与守恒定律, 7. 再论相对论性动力学, 8. 相对论与电学。内容取材新颖, 反映科学技术新成就。叙述深入浅出, 生动有趣。程度适合初学物理学的大学生水平。各章均有习题, 书后并附习题答案, 便于自学。

本书可作为大学理工科师生普通物理教学用的参考书, 也可供广大中学物理教师和相关科技人员进修提高使用。

A. P. French

SPECIAL RELATIVITY

THE M. I. T. INTRODUCTORY PHYSICS SERIES

Copyright 1968, 1966 by the Massachusetts Institute of Technology

W. W. Norton & Company · Inc · New York

狭 义 相 对 论

(美) A. P. 弗伦奇著 张大卫译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10.375 字数 248,000

1979年6月第1版 1980年1月第1次印刷

印数 00,001—19,000 册

书号 13012·0226 定价 0.91 元

序

麻州理工学院的教育研究中心(其前身是科学教学中心)的工作主要是针对在校大专本科学生的水平而致力于研究课程的改进,讲授方法和辅助手段,以及学习过程本身。该中心是麻州理工学院于1960年建立的,主任是已故的弗里德曼(Francis L. Friedman)教授。自1961年以来,国家科学基金会(National Science Foundation)一直是该中心的主要资助者;此外,该中心亦曾从凯特林基金会(Kettering Foundation)、壳牌石油公司基金会(Shell Companies Foundation)、维多利亚基金会(Victoria Foundation)、格兰特基金会(W. T. Grant Foundation)及宾基金会(Bing Foundation)得到慷慨的捐赠。

《麻州理工学院物理学导论丛书》(The M. I. T. Introductory Physics Series)是该中心研究工作的直接产物,拟编成一套篇幅不大的书,集合在一起,包罗基础物理学的各主要领域。该丛书力图强调在物理学理论的产生过程中实验和直觉之间的相互作用。这套丛书的各卷是想为入门课程(从着重经典物理的那些课程到包含相当份量原子物理和量子物理的那些课程)提供种种可能的基础。我们希望各卷在内容的深浅程度上和写作风格上取得一致,但并不拟使它们成为一个联系过于紧密的整体;相反,我们有意使每卷都各自具有相当大的独立性,从而每一卷均可作为各种不同课程结构的一个单独的部分来使用。

本卷是为对牛顿力学具有适度背景知识、对光学和电学的基本原理有一定了解的学生而编写的一本狭义相对论导论。讲述方法(对此特定水平)是传统的,因为它并不过份地倚托于电磁理论,

而是着重讲运动学和动力学问题。不过，最后一章还是讨论了相对论所能提供的有关电学和磁学之间关系的一些见解。本书的主要材料曾作为普通物理学课程的一部分对麻州理工学院的一、二年级学生成功地使用过；然而，就本书的深度和广度而论，亦可作为一本自成体系的相对论导论供程度更高的学生使用。

同此丛书的其他各卷一样，本书得力于学生和教师的思想、批评和建议的地方颇多。在教师当中，华盛顿大学的弗里德兰德(M. W. Friedlander)教授、圣地亚哥州立大学的梅茨内尔(A. W. K. Metzner)教授及麻州理工学院的外斯(Rainer Weiss)教授的仔细评论尤其使著者获益匪浅。

在此，我谨向塔夫茨大学的忒斯曼(Jack R. Tessman)教授表示特殊的感激之情，他不仅曾投身于这套物理学导论丛书的开创工作，而且对本书的贡献特别重要。此外，他还同著者一起于1963~1964年间用本书的初稿在麻州理工学院进行了试教。再者，后来的写作和重写，著者也都同他作过仔细的讨论，而且采纳了他提出的许多修改意见。尤其要指出的是，论及相对论与电学的最后一章，主要是根据忒斯曼教授的精辟透彻的分析编写而成；关于这些分析，读者请参阅 *Am. J. Phys.*, **34**, 1048-1055(1966)和 *Am. J. Phys.*, **35**, 523-527(1967)，其中对电磁学的包括加速场在内的主要结果都作了推导。

著者对在本卷准备工作中给予宝贵协助的史密斯(M. K. Smith)教授和罗斯(James A. Ross)博士亦致以谢忱。

弗伦奇(A. P. French)

麻州坎布里奇

1968年2月

目 录

序	Ⅶ
第一章 对牛顿动力学的偏离	1
§ 1-1 牛 顿	3
§ 1-2 “极限速率”	5
§ 1-3 光 子	10
§ 1-4 光子的能量-动量关系	12
§ 1-5 物质与辐射: 能量的惯性	15
§ 1-6 能量、动量及质量	20
§ 1-7 新动力学是否正确?	24
§ 1-8 在恒力下的运动	27
§ 1-9 “拆开的爱因斯坦箱子”	28
§ 1-10 若干评注	30
习题	31
第二章 光传播问题上的困惑	37
§ 2-1 光的本性	38
§ 2-2 光以太	39
§ 2-3 恒星的光行差	41
§ 2-4 经过改进的光行差实验	45
§ 2-5 斐索对曳引系数的测定	47
§ 2-6 迈克耳孙-莫雷实验的序曲	50
§ 2-7 迈克耳孙-莫雷实验	52
§ 2-8 结语	59
习题	61
第三章 爱因斯坦与洛伦兹-爱因斯坦变换	64
§ 3-1 引言: 收缩假设	64
§ 3-2 爱因斯坦对相对论的再次阐释	66
§ 3-3 伽利略和牛顿的相对论	68

§ 3-4	牛顿定律的变换	70
§ 3-5	爱因斯坦与 c 的普适性	72
§ 3-6	第二公设与观测证据	74
§ 3-7	同时性的相对性	77
§ 3-8	洛伦兹-爱因斯坦变换	78
§ 3-9	再谈洛伦兹变换	84
§ 3-10	闵可夫斯基图: 空-时	85
§ 3-11	空-时不变量	87
	习题	89
第四章	相对论与长度和时间间隔的测量	92
§ 4-1	观测者	93
§ 4-2	点事件及其变换	95
§ 4-3	时间的测量	98
§ 4-4	洛伦兹收缩	100
§ 4-5	时间膨胀	105
§ 4-6	利用宇宙线介子观测时间膨胀	106
§ 4-7	时间膨胀实验的另一解释	109
§ 4-8	再谈时间和长度的测量	111
§ 4-9	利用光激励器进行的迈克耳孙-莫雷实验	115
§ 4-10	相对论是真正相对的	117
§ 4-11	空-时间隔与因果性	122
	习题	125
第五章	相对论性运动学	130
§ 5-1	速度的变换	130
§ 5-2	来自快速运动源的辐射	133
§ 5-3	运动介质中的光: 曳引系数	137
§ 5-4	横向运动: 恒星的光行差	138
§ 5-5	多普勒效应	140
§ 5-6	再论多普勒效应	149
§ 5-7	多普勒效应与时间膨胀	152
§ 5-8	对以太的新探寻	156
§ 5-9	观看运动的时钟及其他物体	159

§ 5-10	加速运动	163
§ 5-11	孪生子佯谬	165
习题		170
第六章	相对论性动力学——碰撞与守恒定律	177
§ 6-1	对弹性碰撞的两种看法	179
§ 6-2	对非弹性碰撞的两种看法	183
§ 6-3	对守恒定律的进一步说明	187
§ 6-4	光子的吸收和发射	188
§ 6-5	穆斯堡尔效应	192
§ 6-6	光子火箭	195
§ 6-7	粒子的产生	196
§ 6-8	散射	205
§ 6-9	再论多普勒效应	212
习题		215
第七章	再谈相对论性动力学	220
§ 7-1	能量-动量不变量及其应用	220
§ 7-2	能量和动量的洛伦兹变换	223
§ 7-3	四维矢量	228
§ 7-4	相对论性力学中的力	230
§ 7-5	相对论性粒子的磁力分析	236
§ 7-6	力的一般变换; 作用与反作用	238
习题		243
第八章	相对论与电学	246
§ 8-1	库仑定律	248
§ 8-2	作用在运动电荷上的磁力	250
§ 8-3	引进相对论性处理	252
§ 8-4	库仑定律的变换	253
§ 8-5	作用在静止检验电荷上的力	255
§ 8-6	作用在运动检验电荷上的力	263
§ 8-7	线电荷分布产生的场	269
§ 8-8	磁场与相对论	274
§ 8-9	载流导线作用在运动电荷上的磁力	276

§ 8-10 再论磁力与洛伦兹收缩.....	281
§ 8-11 两根载流导线间的力.....	284
§ 8-12 电磁测量的单位和单位制.....	286
习题.....	289
结束语	292
参考书目提要	296
习题答案	300
索引(英汉对照)	305
译后记.....	307

在实验哲学中，我们应该把从现象经归纳而推得的命题视为精确真实或近于真实的……直至发现其他现象，使之更为精确或容有例外之前，都应如此视之。

牛顿，《原理》(1686 年)

相对论的兴起是由于实际需要，是由于旧理论中的严重和深刻的矛盾已经无法避免了。新理论的力量在于：仅用几个非常令人信服的假定就一致而简单地解决了所有这些困难……旧力学只对低的速度成立，从而成为新力学的极限情形。

爱因斯坦和英费尔德，
《物理学的进化》(1938 年)

第一章 对牛顿动力学的偏离

当你看见或听到“相对论(*relativity*)”这个词时，你首先想到的是什么呢？很可能，你想到了爱因斯坦(*Albert Einstein*)的名字，或者方程 $E=mc^2$ ，你头脑中也许还会出现这样的景象：一位宇宙旅行者在太空遨游了多年之后返回地球时，他依然是很年青的。爱因斯坦称之为狭义相对论(*special theory of relativity*)的东西对人们的思想曾产生了巨大的冲击，这种说法是毫不过分的，直到这一理论发表了六十余年后的今天，它的影响仍然在起作用。爱因斯坦等人在 1900 年前后建立的这一理论已被正当地看作是我们在描述和阐释物理世界的漫长道路上曾经迈出过的最大的一步。不过，相对论的基本思想却象伽利略和牛顿的力学一样古老。粗略地讲，这一思想断言，物理定律在各种不同的参照系中都是相同的。那么，爱因斯坦究竟做了什么致使他的名字几乎成了

本书标题的同义语呢？答案是：他曾带领我们把相对论的概念应用于全部物理经验，而不仅仅应用于有限范围的现象。特别是，他断言，涉及高速运动——确切地说，以光速的数量级进行的运动——的过程毋需置于分开的范畴。可是，他所提出的统一观点导致了若干惊人的推论。有些推论似乎违背了我们的直觉和常识，诸如惯量随速度增加或孪生子佯谬这些不见于经典理论的现象。正是这类现象使得相对论的爱因斯坦表述如此地引人注目，以致给与它也许在整个物理学史上都是无与伦比的魅力和公众爱好。

我们已经说过，相对论的观念早在爱因斯坦之前就已存在，并体现在牛顿力学之中。但是，在牛顿之后约 200 年，人们才认识到：倘若坚持牛顿力学的全部基本特征，某些观测到的效应（多数是颇为细小和微妙的效应）就简直不能予以解释。在历史上，要求对基本观念进行修正的这些困难事实首先出现在电磁现象中，特别是光的传播方面。然而，很快就明白了（主要是通过爱因斯坦的工作），受到影响的不仅是名为电动力学的这个特殊领域，而是整个动力学。

从最小量的事实资料推得最深刻最深远的一类结论是爱因斯坦的特点，也是他伟大的征象。当然，一些较渺小的人也曾屡次试图做出同样的事情，但是与当世爱因斯坦这样的人不同，他们的“宏伟结论”或“推广”通常是错误的。究其实质，爱因斯坦在建立狭义相对论时只使用了一条前提假设，即无论怎样观测，光在真空中由一点到另一点的传播时间总是等于这两点的相对距离除以普适速度 c ，同观察者的实验室相对于空间可显有的速度毫不相关。从这一结果出发来展开相对论并不困难（爱因斯坦已证明这个途径是可行的），而且在逻辑上也是清晰和令人信服的。关于这种做法，我们将在适当的时候予以介绍。在此我们仅想指出：这种做法先是由光学入手，尔后对运动学进行修正，最后示明应当如何来改

写粒子的动力学。可是在今天，我们已经能够求助于同以极高速运动的粒子动力学有关的大量直接证据。这些证据从一开始就使我们明白，对于电子之类我们所熟悉的粒子，要想得到在一切速度下均可接受的动力学描述，就必须对牛顿的方案加以修正。在这开篇第一章，我们将尽快地讲述这一修正动力学的部分内容。从某种意义上说，这种讲法只是一次尝试，肯定是不够严密的。但是，看到若干关键性的结果至少可以不依赖于相对论的大部分形式体系而提出，可能会获得一些既有趣味又有价值的东西。

然而，我们的第一项任务还是回顾我们将要修改的东西，因为，不做到这一点，我们就无法对旧动力学和新动力学之间的关系即二者的异同进行充分的评价和理解。

§ 1-1 牛 顿

牛顿力学研究粒子在力作用下的运动。一个粒子可被视为一个质点，它的运动是由该质点在空间中的位置作为时间的函数来描述的。假定空间和时间这两个独立的概念已很熟悉，尽管难以给它们下一个适当的定义。牛顿虽然相信有绝对空间，但他也认识到人们无法描绘出物体在绝对空间运动的路径。于是，我们只好相对于别的物体来确定一物体的位置。“因此，”牛顿在《原理》一书中写道，“我们使用相对的而非绝对的位置和运动。”¹⁾

但是，尽管位置和速度是相对的，我们还是遇到了显然是绝对的或基本的量即加速度。牛顿动力学抓住了加速度 a ，并且把它同粒子所在环境施加的力 F 联系起来。这是极富有成果的一个步

1) 见 Sir I. Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World (Principia)*, translated by A. Motte, revised by F. Cajori, Univ. California Press, Berkeley, 1962. (中译本：牛顿，《自然哲学之数学原理》，1957年商务版，第12—13页，此处译文略有改动。)

骤, 因为人们发现, 粒子有一个恒定不变的属性——它的惯性质量 m ——可以通过公式 $F=ma$ 把粒子的加速度和力联系起来。如果 F 的量值可由一个明显的力的定律给出, 如在万有引力的情形, 那么经典力学就取得了物理理论的地位, 从而牛顿定律也不再仅仅是以 m 和 a 表示的 F 的一个定义了。¹⁾

即便力的定律没有明显地给出或已知, 我们仍有一个牛顿力学的关键陈述——线动量守恒。把惯性质量看作物体的一个恒定不变的属性, 人们就能够验证(而这是力学的实验基石之一): 只要外力的影响可忽略不计, 两个或多个相互作用着的物体的动量 mv 之和为一常量。若为方便起见, 用单一矢量 p 来表示动量, 则我们知道, 在经典力学中对于一给定粒子比值 p/v 代表单一的不变量。

最后, 当我们越过了牛顿方案的严格界限时, 还得到了能量守恒原理。如果给出任何特定的力的定律, 则我们会发现, 力对任一粒子所做的功反映在相应的动能的改变上:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (1-1)$$

再者, 以这种方式赋予粒子的能量可以转化为其他形式的能量, 例如, 使粒子在介质中静止下来, 就会释放出热能(即热)。我们对能量守恒是如此坚信不移(因为存在大量的内在一致的证据), 以致我们会毫不踌躇地认为, 在上述例子中加热的量度就相当于碰撞前粒子动能的量度; 不过当然, 我们要有理由忽略因辐射、声、机械变形等等而显著丧失能量的可能性。

可见, 空间与时间, 力、加速度及惯性质量, 动量与能量这些概

1) 见 A. Einstein, "Physics and Reality," *J. Franklin Inst.*, **221**, 249—382(1936); reprinted in *Einstein's Ideas and Opinions*, Crown, New York, 1954. (中译文: 爱因斯坦, "物理学和实在", 《爱因斯坦文集》第一卷, 1976年商务版, 第351—352页。)另见 N. Austern, *Am. J. Phys.*, **29**, 617(1961).

念构成了经典力学的基础。现在让我们看看这个结构经历了大约 200 年表观上无瑕疵的存在之后所已经出现的一些裂隙吧。其中多数(但不是全部)都同具有极高速率的粒子的运动有关。

§ 1-2 “极限速率”

按照牛顿力学的方程, 可以给予一客体的速度在原则上没有上限。例如, 设想一个量值等于地球表面重力的恒力持续地作用在一个物体上。物体的加速度将永远等于 9.8 米/秒^2 。如果物体从静止开始加速, 那么在一年以后它的速率约为 $3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$ (亦即等于光在真空中的速率), 两年以后的速率约为 $6 \times 10^8 \text{ 米/秒}$, 等等。(请读者用一点时间亲自验证这些数字。)如果客体很小, 那么人们可以很容易想象一个比 mg 大许多倍的力会更迅速地——也许只须几分钟甚或几秒钟的时间——使客体的速度作这样的增加。即便作用力不是恒定的, 我们也能算出为使一个质量为 m 的物体以任一特定速率 v 运动所需要做的功, 这个功等于物体获得的动能 K , 而 $v = (2K/m)^{1/2}$ 。但是, 当人们试图使粒子的速率增加到上述那么大的数值时, 却观察到对牛顿力学的预言的巨大偏离。我们将把这一现象看作是经典力学并非对所有动力学情势都适用的第一个明显的例证。

由于电子的质量与其电荷相比非常之小, 所以它很容易被加速到很高的速率, 比我们日常见到的速率要高出许多个数量级。因此, 例如, 在真空管的两个电极之间只需加上 100 伏的电压, 从阴极飞出的电子(若是从静止出发的话)就能以大约 6,000 千米/秒的速度到达阳极(如果两个电极相距几毫米, 则加速度约为 $10^{15}g$)。甚至在这些条件下, 牛顿力学仍能对情势应裕自如。但是, 如果引起电子加速的电压不是数百伏而是数百万伏, 那么修正动力学的必要性就变得显眼地明显了。这种情况可以用已摄成影片的一

项实验来加以说明。该实验探究了动能直到 15 兆电子伏的电子的速率和动能间的关系。¹⁾

实验装置的示意图如图 1-1 所示。这个实验旨在直接测定电子行经直线加速器 (简称 *linac*) 的飞行时间。通过作为直线加速器的注射器 (injector) 的范德格喇夫起电机 (Van de Graaff generator) 的纯静电作用, 电子可以获得直至 1.5 兆电子伏的能量; 然后它们进入加速器的真正加速部分即漂移管系列 (series of

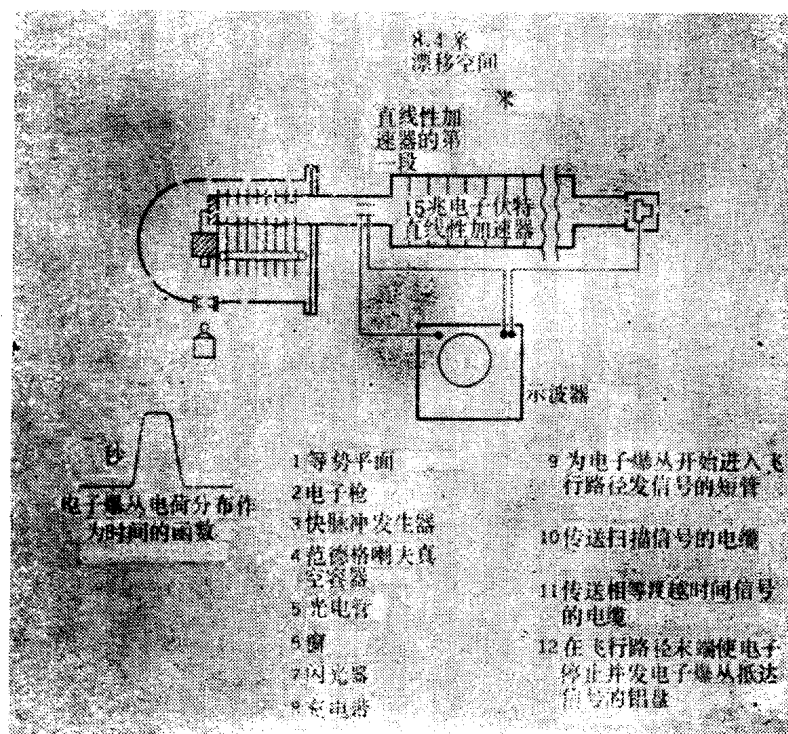


图 1-1. 测量高能电子飞行时间的装置的示意图

(据 W. Bertozzi 的“极限速度”实验)。

1) Film, *The Ultimate Speed*, by W. Bertozzi, Education Development Center, Newton, Mass., 1962. 关于完整的描述, 见 W. Bertozzi, *Am. J. Phys.*, **32**, 551—555 (1964).

drift tubes), 并在飞行路径 AB 上计时。运用直线加速器的射频系统, 电子能够获得直至 15 兆电子伏的较高能量。影片的主要部分描述了利用这个装置所进行的一次观测; 由于仅开动了直线加速器的第一段 (紧靠 A 点后的那一段), 电子只获得 4.5 兆电子伏的能量。然而, 即使是在这后一情形, 电子通过整个距离 AB 时的速率也几乎是恒定不变的, 稍后我们即将看出这一点。

电子是从安装在范德格喇夫加速器的负高压端的电子枪系统以间隔约为 3×10^{-9} 秒的短爆丛 (short bursts) 的形式释放出来的。位于 A 和 B 的两个绝缘电极在爆丛通过时拾取电信号。这些脉冲由做成等长的电缆送到阴极射线示波器。因此, 该两电信号从两电极到达示波器所用的时间是相等的, 于是, 出现在示波器 (图 1-2) 上的两个脉冲为测量电子爆丛从 A 到 B 所用的时间提供了真实的量度。例如, 在图 1-2 中, 这个时间 (t) 约为 3.3×10^{-8} 秒 (水平标度的每一大格约等于 10^{-8} 秒)。经测量, 在 A 和 B 之间的飞行路程 (l) 为 8.4 米。于是, 根据速度 v 的基本定义, 我们有

$$v = \frac{l}{t} \approx \frac{8.4}{3.3 \times 10^{-8}} \approx 2.5 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

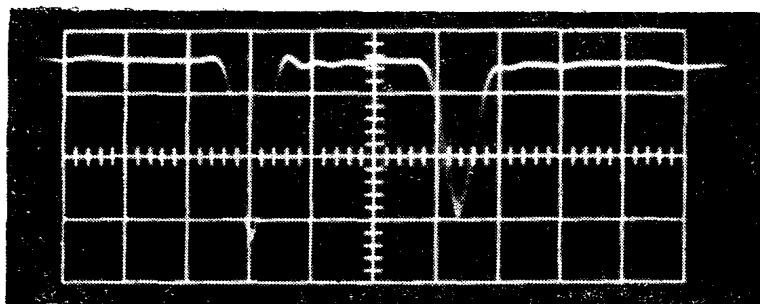


图 1-2. 示波器的扫迹。扫迹上的两个脉冲是由电子爆丛通过一段 8.4 米长的飞行路径的起点和终点时引起的。(据影片“极限速率”复制。)

这个测量是对于由范德格喇夫机经 0.5 兆伏 (500,000 伏) 加速的

电子进行的。

在表 1-1 中, 我们摘要列出了整个实验的结果。对这些结果最粗略的考察表明, 它们根本不是假定牛顿力学适用所应出现的那种情况。首先, 动能增大到 30 倍应当意味着速度增大到 5.5 倍(因为按照经典力学, $v \sim K^{1/2}$)。但是, 实际上速率只增加了 15%。在 1.5 兆电子伏和 4.5 兆电子伏之间的速度 v 的增加在实验精度内刚刚能够探测到。因此, 人们会问道: 电子是否真的获得了由公式 $K = qV$ 给出的能量? 该公式在 V (加速电压) 仅为 100 伏的数量级时成功地描述了所获得的动能; 式中 K 和 q 分别为电子的动能和电荷。影片通过对位于 B 点的电子的能量的直接量热学测量回答了这个问题。毫无疑问, 电子确实具有数值为 qV 的能量。

表 1-1:

动 能 K , 兆电子伏	飞 行 时 间 t , $\times 10^{-8}$ 秒	电 子 速 度 v , $\times 10^8$ 米/秒	v^2 , $\times 10^{16}$ 米 ² /秒 ²
0.5	3.23	2.60	6.8
1.0	3.08	2.73	7.5
1.5	2.92	2.88	8.3
4.5	2.84	2.96	8.8
15	2.80	3.00	9.0

在图 1-3 中, 我们绘出实验结果同经典力学预期结果的比较。这是一幅 v^2 对 K 的关系图。按照经典力学, 我们应当有

$$v^2 = \frac{2K}{m} \quad (1-2a)$$

代入电子的质量数值, 得

$$v^2 (\text{米}^2/\text{秒}^2) = 3.5 \times 10^{17} K (\text{兆电子伏}) \quad (1-2b)$$

我们知道, 这个公式在电子能量约为 1 千电子伏或更少些时具有很高的精度; 但是我们看到, 即使是对于直线性加速器实验的最低能量(0.5 兆电子伏), 方程(1-2)所预言的 v^2 的数值也是偏高的,