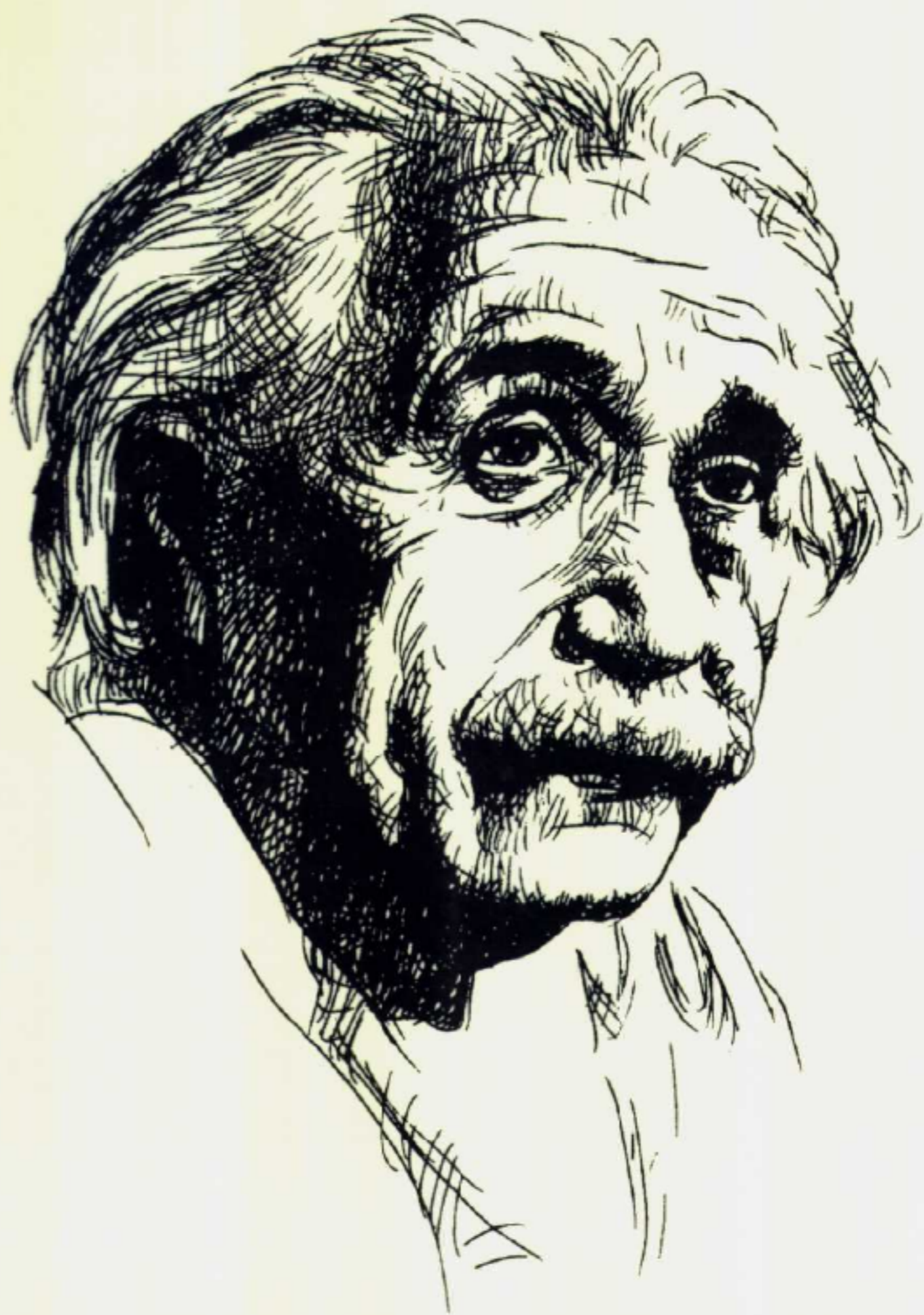


世界名人传记丛书

• SHIJIE MINGREN ZHUANJI CONGSHU •



# 爱因斯坦传

上册



〔美〕亚伯拉罕·派斯著

商务印书馆



---

世界名人传记丛书

# 爱因斯坦传

上册

〔美〕亚伯拉罕·派斯 著

方在庆 李勇 等译

商务印书馆

2004年·北京

图书在版编目(CIP)数据

爱因斯坦传/(美)派斯著;方在庆等译. - 北京  
商务印书馆,2004

(世界名人传记丛书)

ISBN 7-100-03882-0

I. 爱… II. ①派…②方… III. 爱因斯坦, A.  
(1879~1955)-传记 IV. K837.126.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 061389 号

所有权利保留。

未经许可,不得以任何方式使用。

世界名人传记丛书

爱 因 斯 坦 传

(全二册)

[美]亚伯拉罕·派斯 著

方在庆 李 勇 等译

---

商 务 印 书 馆 出 版

(北京王府井大街 36 号 邮政编码 100710)

商 务 印 书 馆 发 行

北京市白帆印务有限公司印刷

ISBN 7-100-03882-0/K·779

---

2004 年 4 月第 1 版

开本 850×1168 1/32

2004 年 4 月北京第 1 次印刷

印张 26 $\frac{1}{2}$  插页 5

印数 5 000 册

定价:45.00 元

*Abraham Pais*

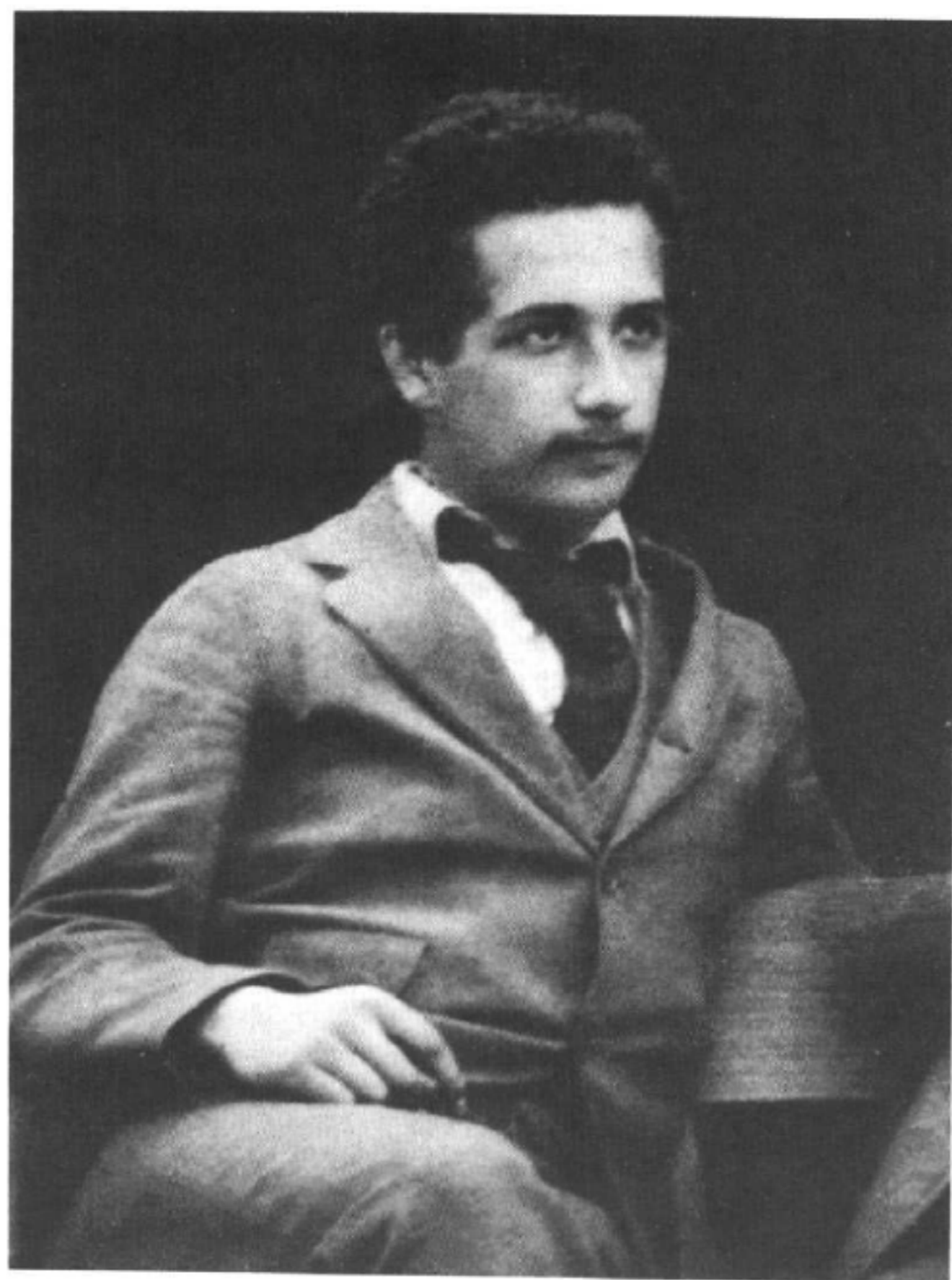
**'SUBTLE IS THE LORD ...'**

**THE SCIENCE AND THE LIFE OF ALBERT EINSTEIN**

© Oxford University Press 1982

经英国牛津大学出版社授权

简体中文版 2003 年 © 中国北京商务印书馆



Albert Einstein 1896.  
Aus einem Gruppenbilde der Naturitäts-  
Klasse der "Gewerbeschule" Aarau.

1896 年时的爱因斯坦

(爱因斯坦档案馆)

1896-12-27

## 《世界名人传记丛书》出版说明

广大读者,特别是青年读者,爱读传记书,渴望从中吸取营养,鞭策和激励自己的人生,世界名人传记更是青年们钟爱的读物。这些名人都是历史人物中的佼佼者,他们中的大多数都曾站在时代的风口浪尖上奋力拼搏,或以其深邃的思想睿智推动了世界文明的进步,或以其叱咤风云的政治生涯深刻地影响了历史的进程,或以其在自然科学领域的巨大成就造福于人类。当然,任何名人或伟人都与普通人一样受到历史的局限,存在着这样或那样的不足。

商务印书馆历来重视传记书的翻译出版工作。80年代以来,此项译事更加有计划地进行,在翻译界和读书界的鼎力支持与协助下,已经以专著或通俗读物单行本形式出版百余种。但由于这类传记过去以单行本印行,难见系统,不便于读者研读查考。因此,我们决定先从过去已出版的这类书中,选择各个时代、各个国家、各个民族中有代表性的名人的传记编印成这套《世界名人传记丛书》,同时也陆续增加一些新选题。采用原译本排印,译文未能重新校订,体例也不尽统一;原来译本可用的序跋均予保留,个别序跋有所修订。增补的新译本,我们当力求其更富于科学性和知识性,保持现有选本内容翔实和文字生动的特点,从而更好地满足读者的需要。

商务印书馆编辑部

# 献 给

乔纳森(Jonathan)和丹尼尔(Daniel)

“没有宗教的科学是跛子，没有科学的宗教是瞎子。”爱因斯坦在解释他的个人信仰时曾这样写道：“一个宗教信仰者的虔诚，在于他从不怀疑那些既不需要也不可能具有理性基础的超越个人的目的和目标的意义。”他不是祷告者，也不做礼拜，却生活在一个深刻的信念——一个不可能具有理性基础的信念之中：一定存在着等待发现的自然规律。他毕生追求的，就是去发现这些规律。关于他的实在论和乐观主义，他自己说得很明白：“上帝难以捉摸，但他并不邪恶”（*Raffiniert ist der Herrgott aber boshaft ist er nicht*）。当一个同事问他这句话是什么意思时，他回答说：“大自然隐藏她的秘密，是因为她本性高傲，而不是凭什么狡黠的手段”（*Die Natur verbirgt ihr Geheimnis durch die Erhabenheit ihres Wesens, aber nicht durch List*）。



## 中文版序

爱因斯坦在欧洲度过了青壮年，晚年定居美国，他只是在中年时出访过其他一些地方。43岁那年，爱因斯坦携他的第二位妻子到过东方。在这次远行中，他们到了上海和香港。诸如此类的接触有助于唤醒爱因斯坦对孔夫子学说持久的钦佩。

尽管爱因斯坦与其他文化的直接接触有限，却一生都强烈地希望全世界各国人民和谐共存。他常常表达这样的观点：科学能够在促进民族之间的共同理解方面起到重要作用。在一篇题为《科学的共同语言》的论文中，他写道：“如果我们真诚而热情地期望安全、幸福和人们才能的自由发展，我们并不缺少接近这种状态的手段。”这意味着：“科学概念和科学语言的超国家性质，是由于它们是由一切国家和一切时代的最好的头脑所建立起来的。”

科学永远是爱因斯坦的主要献身对象，而人类的命运也是他的主要关心对象之一。本书试图对这位世纪伟人的诸方面做出公正的评述，但愿它能有助于激发我的不同年龄的中国朋友们自由地发挥他们各自的才华。

亚伯拉罕·派斯

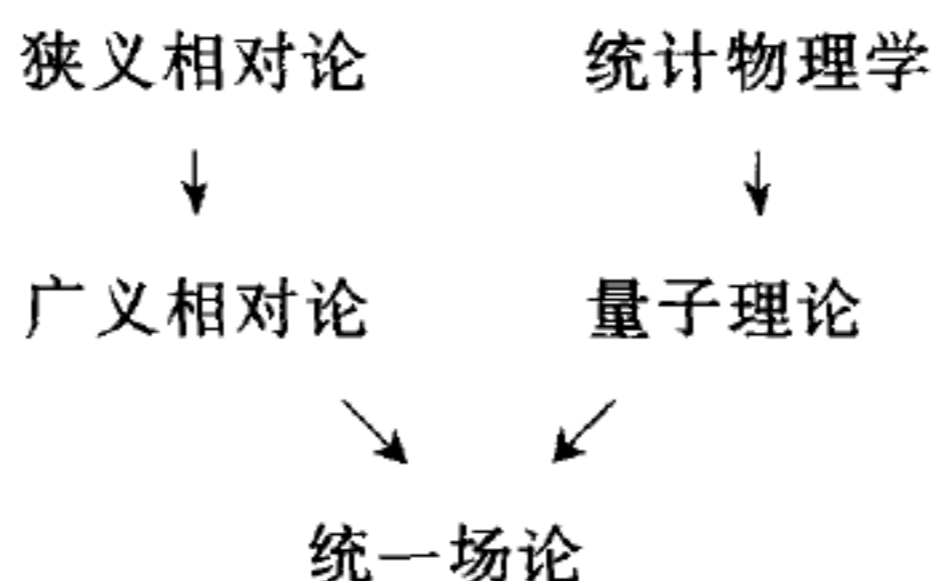
## 致 读 者

打开本书的目录,看到那些带星号的条目,你会发现这几乎完全是一部关于爱因斯坦的科学之外的(nonscientific)传记。翻开第一章,你可以不费气力地浏览全书;你可以读到作者的一些个人琐忆和为此进行的一般性评价的努力。

我的主要目的是要提供一部阿尔伯特·爱因斯坦的科学传记。我将尽力说明爱因斯坦时代的物理世界的概念,以及他如何改造它们,并留下了哪些科学财富。我想写的是一段开放的历史,说它开放,是因为爱因斯坦的著作为我们留下了一些未解决的原则问题。它们的答案,正是当今物理学所主要追求的目标。有些问题的讨论,不能离开数学细节,但我尽量将它们减到最低限度,凡是可能的地方,我都请读者去参考标准的教科书。没有任何事情像科学那样,对爱因斯坦来说,是他的生活,他的事业,他的避风港,他的特立独行的源泉。为了认识这位伟人,我们必须追溯他的科学思想和成就。但这还不够,他还是一位有很高天赋以及独到风格的德语作家,一个音乐爱好者,一位哲学研究者。他深切关心人类的处境(在晚年,他常把每天读《纽约时报》看成如他的肾上腺素治疗一样,必不可少)。他是丈夫,是父亲,是继父;他是犹太人;他还是传奇人物。所有这些角色,都会在我们做标记的那些章节的故事里表现出来。

如果有人要我用一句话来概括爱因斯坦的一生,我会说:“他

是我所知道的最自由的人。”如果要用一句话来写他的科学传记，我会写：“同他以前和以后的任何人相比，他更好地发明了不变性原理，更好地运用了统计涨落。”如果让我用图说明，我会这样来画：



题目便是：“阿尔伯特·爱因斯坦的科学和生活。”这幅图的每一个标题和每一个箭头，都是我对爱因斯坦的成功、他的理想图景 (version) 和他的弱点的最简洁的概括。很大程度上，我们这本书就是要试图解释这张框架图所隐藏的关系。全书结束的时候，我们还会看到它。

在写作本书的过程中，许多人的热情慷慨的智慧、知识和批评，对我来说，真是助莫大焉，在此向各位深表谢意。给我帮助最大的是海伦·杜卡斯 (Helen Dukas)，当今没有谁比她更熟悉爱因斯坦的生活了。她是普林斯顿爱因斯坦档案馆的可靠向导。真是太好了，亲爱的海伦，谢谢你！另外，我还获益于与约斯特 (Res Jost)、特雷曼 (Sam Treiman) 和乌伦贝克 (George Uhlenbeck) 的重要讨论。他们每一位都读过几乎整部手稿，提出了很多改进建议，给我许多鼓励。我怀着感激之情记录以下的专题讨论：与巴格曼 (Valentine Bargmann)、霍夫曼 (Banesh Hoffmann) 和施特劳斯 (Ernst Straus) 讨论爱因斯坦的生活、广义相对论和统一场论；与迪克 (Robert Dicke)、哈瓦斯 (Peter Havas)、佩里 (Malcolm Per-

ry)、施夏马(Dennis Sciama)和斯塔切尔(John Stachel)讨论相对论;与波勒尔(Armand Borel)讨论庞加莱;与柯恩(Eddie Cohen)、卡克(Mark Kac)和克莱因(Martin Klein)讨论统计物理学;与科克斯(Anne Kox)讨论洛伦兹;与切尼斯(Harold Cherniss)和吉尔伯特(Felix Gilbert)讨论从古希腊的原子论到魏玛共和国的许多问题。特别感谢苏黎世联邦工业大学(ETH)的格劳斯(Beat Glaus)和苏黎世大学的拉谢(Günther Rasche),他们曾帮助我顺利地利用苏黎世的档案。所有这些人,以及那些无数回答过我的问题、让我受到启发的人们,我再次向你们表示感谢!

本书是在普林斯顿高等研究院(The Institute for Advanced Study in Princeton)完成的,我要感谢沃尔夫(Harry Woolf)的友好和院长基金的资助。斯隆基金会(Alfred P. Sloan Foundation)在我的准备过程中给予的多方帮助,也令我难以忘怀。我还要深切感谢爱因斯坦和泡利的家属以及位于海牙的[荷兰]国家档案馆(Rijksarchief)《洛伦兹通信集》和莱顿的玻义哈维博物馆(Boerhaave Museum)《埃伦费斯特通信集》,他们慨允我引用未发表的材料。还要感谢斯德哥尔摩的(瑞典)皇家科学院诺贝尔委员会(K. Vetenskapsakademiens Nobel Kommittéer),特别是纳格尔(Bengt Nagel),他让我获得了有关爱因斯坦获诺贝尔奖的文件。

很幸运,我还得到了我亲爱的妻子莎娜(Sara)的建议和支持。

这篇前言的内容,是在海伦·杜卡斯生前写的,她于1982年2月10日去世,我仍保留着原来的样子。

## 关于参考文献

每一章都列有参考文献,在正文中以方括号标志,如[E3]、[P1]等。在列举文献时,我们会经常使用以下的缩写:

*AdP: Annalen der Physik* (Leipzig).

《物理学纪事》(莱比锡)

*EB: Albert Einstein-Michele Besso Correspondance 1903 — 1955* (P. Speziali, Ed.). Hermann, Paris, 1972.

《阿尔伯特·爱因斯坦—米歇尔·贝索通信集(1903—1955)》

*PAW: Sitzungsberichte, Preussische Akademie der Wissenschaften.*

《普鲁士科学院会议报告》

*Se: Carl Seelig, Albert Einstein.* Europa Verlag, Zürich, 1960.

卡尔·泽利希:《阿尔伯特·爱因斯坦》

## 凡 例

1. 版式悉遵原著,旁注原书页码,以方便检索。
2. 人名、书刊名、不常见的地名等专有名词,第一次出现时附原文。人名一般只译姓,需区别时加名或字母,译法均从习惯或遵辞书。
3. 原文中的德文、法文、拉丁文等外文均保留,译文处理方式也遵原著(有时直接译在后面,有时加括号,有时以注的形式出现)。个别德文片段的翻译与作者英译有所不同,是直接照德文译出的。
4. 译者在认为必要的地方加注,与原注同列,署“译者”以示区别。主要说明重要文献的中文本情况,供读者参阅;也有些关于文化背景の説明,补充翻译的不足。
5. 对于原文中出现的不少疏忽或错误,译者做了必要的更正,不另说明。
6. 有些译法与国内流行译法不一致,是非好坏,请读者评判。

# 目 录<sup>①</sup>

中文版序.....	1
致读者.....	2
凡例.....	6
I. 导论.....	3
第 1 章* 目标与计划 .....	5
第 2 章 相对论和量子理论 .....	38
(a) 有序的转变和革命时期 .....	38
(b) 时间囊 .....	47
第 3 章 年轻的物理学家 .....	52
有关爱因斯坦的众多传记的补充说明 .....	71
II. 统计物理学.....	77
第 4 章 熵和几率 .....	79
(a) 爱因斯坦贡献一览 .....	79
(b) 麦克斯韦和玻耳兹曼 .....	86
(c) 1905 年的前奏曲 .....	93

---

① 带\*的章节,其内容几乎全是传记性质的。

(d) 爱因斯坦与玻耳兹曼原理 .....	101
第 5 章 分子的实在性 .....	112
(a) 19 世纪的简单回顾 .....	112
(b) 普费弗尔坩埚和范特霍夫定律 .....	123
(c) 博士论文 .....	126
(d) 11 天后:布朗运动 .....	132
(e) 爱因斯坦和斯莫鲁霍夫斯基:临界乳光 .....	143
III. 狭义相对论 .....	155
第 6 章 上帝难以捉摸 .....	157
(a) 迈克尔逊-莫雷实验 .....	157
(b) 先驱者 .....	170
(c) 庞加莱在 1905 .....	184
(d) 1905 年以前的爱因斯坦 .....	187
第 7 章 新运动学 .....	198
(a) 1905 年 6 月:狭义相对论的确立,洛伦兹变换的导出 .....	198
(b) 1905 年 9 月:关于 $E=mc^2$ .....	212
(c) 早期反应 .....	214
(d) 爱因斯坦与 1905 年后的狭义相对论 .....	220
(e) 电磁质量:头 100 年 .....	222
第 8 章 历史的边缘 .....	235
IV. 广义相对论 .....	255
第 9 章 “我一生中最快乐的思想” .....	257
第 10 章 爱因斯坦教授先生 .....	267



(a)* 从伯尔尼到苏黎世 .....	267
(b) 三年半的沉默 .....	272
第 11 章 布拉格论文 .....	279
(a)* 从苏黎世到布拉格 .....	279
(b) 1911 年,光线弯曲是可测的 .....	282
(c) 1912 年,拓荒者爱因斯坦 .....	292
第 12 章 爱因斯坦—格罗斯曼合作 .....	302
(a)* 从布拉格到苏黎世 .....	302
(b) 从标量到张量 .....	305
(c) 合作 .....	314
(d) 绊脚石 .....	320
(e) 后来发生的事 .....	323
第 13 章 引力场理论:最初 50 年 .....	329
(a) 爱因斯坦在维也纳 .....	329
(b) 爱因斯坦—福克尔论文 .....	340
第 14 章 引力场方程 .....	344
(a)* 从苏黎世到柏林 .....	344
(b) 插曲:磁化旋转 .....	352
(c) 最后几步 .....	358
(d) 爱因斯坦和希尔伯特 .....	369
第 15 章 新动力学 .....	381
(a) 从 1915 年到 1980 年 .....	381
(b) 三个成功 .....	388
(c) 能量与动量守恒;比安基恒等式 .....	393
(d) 引力波 .....	399

(e) 宇宙学 .....	403
(f) 奇点;运动问题 .....	414
(g) GR9 还有别的新东西吗? .....	418
V. 后来的历程 .....	427
第 16 章* “一举成名的爱因斯坦博士” .....	429
(a) 疾病;再婚;母亲去世 .....	429
(b) 爱因斯坦走上神坛 .....	435
(c) 传奇的诞生 .....	440
(d) 爱因斯坦和德国 .....	448
(e) 后来的著作 .....	457
第 17 章 统一场论 .....	469
(a) 1920 年前后的粒子和场 .....	469
(b) 又一个孕育的 10 年 .....	473
(c) 第五维 .....	475
(d) 相对论与后黎曼微分几何 .....	485
(e) 后来的历程:科学年表 .....	492
(f) 统一理论的终曲,量子理论的前奏 .....	504
VI. 量子理论 .....	513
第 18 章 引言 .....	515
(a) 爱因斯坦贡献一览 .....	515
(b) 粒子物理学:最初 50 年 .....	518
(c) 量子理论:影响路线 .....	521
第 19 章 光量子 .....	525

(a) 从基尔霍夫到普朗克 .....	525
(b) 爱因斯坦论普朗克:1905,瑞利—爱因斯坦—金斯定律 .....	536
(c) 光量子假说和启发性原理 .....	541
(d) 爱因斯坦论普朗克:1906 .....	544
(e) 光电效应: $h$ 的第二次出现 .....	546
(f) 对光量子假说的反应 .....	551
第 20 章 爱因斯坦和比热 .....	561
(a) 19 世纪的比热 .....	561
(b) 爱因斯坦 .....	568
(c) 能斯特:第一届索尔未会议 .....	572
第 21 章 光子 .....	579
(a) 粒子与波动的融合与爱因斯坦的命运 .....	579
(b) 自发和感生辐射跃迁 .....	583
(c) 粒子图景的完成 .....	586
(d) 对或然性第一次感到不安 .....	590
(e) 题外话:不可分离的经典运动的量子条件 .....	593
(f) 康普顿效应 .....	594
第 22 章 插曲:BKS 提议 .....	599
第 23 章 一致性的丧失:量子统计学的诞生 .....	609
(a) 从玻耳兹曼到狄拉克 .....	609
(b) 玻色 .....	612
(c) 爱因斯坦 .....	616
(d) 关于玻色—爱因斯坦凝聚的补充 .....	622
第 24 章 承先启后的爱因斯坦:波动力学的诞生 .....	625
(a) 从爱因斯坦到德布罗意 .....	625

(b) 从德布罗意到爱因斯坦 .....	627
(c) 从德布罗意和爱因斯坦到薛定谔 .....	629
第 25 章 爱因斯坦对新动力学的反应 .....	632
(a) 1925—1931: 争论开始 .....	632
(b)* 爱因斯坦在普林斯顿 .....	645
(c) 爱因斯坦论客观实在 .....	653
第 26 章 爱因斯坦的理想图景 .....	662
(a) 爱因斯坦、牛顿和成功 .....	662
(b) 相对论与量子理论 .....	665
(c) 超因果性 .....	668
VII. 旅程的终点 .....	677
第 27 章* 最后 10 年 .....	679
第 28 章* 尾声 .....	688
VIII. 附录 .....	689
第 29 章* 张量、助听器及其他: 爱因斯坦的合作者们 ...	691
第 30 章* 爱因斯坦是如何获得诺贝尔奖的 .....	720
第 31 章* 爱因斯坦为诺贝尔奖写的提议 .....	737
第 32 章* 爱因斯坦年表 .....	747
人名索引 .....	766
主题索引 .....	783
译后记 .....	809

“上帝难以捉摸……”



# I 导论





## 第 1 章 目标与计划

大概在 1950 年的一天，我正陪爱因斯坦走在从高等研究院回他寓所的路上。突然，他停下来，转过头来问我：是不是只有在我望月亮时，才真正相信月亮存在。我们倒不是在谈什么特别的形而上学的东西，而是在讨论量子理论，特别是在物理观测意义上，哪些是可做的，哪些是可知的。当然，这位 20 世纪的物理学家并没有说他对此问题有了确切的答案。不过，他确实知道，他的 19 世纪的前辈们对这个问题的回答不再成立了。诚然，在日常生活条件下，那些回答几乎是完全正确的。但不能将它们外推到以近光速运动的事物，或者像原子那么小的事物，或者在某些方面，也不能外推到像星体那么重的事物上去。我们今天比过去更清楚地知道，我们在最有利的环境条件下能做什么，有赖于详细而具体地认识那些条件是什么。一般地说，这正是相对论和量子力学教给我们的东西。相对论是爱因斯坦创立的，量子力学则是他最终接受的（用他的话说）它是我们时代最成功的理论，但他相信，它还只是暂时的。

我们边走边谈，继续谈月亮，讨论用存在来指非生命事物时所表达的意义。走到梅瑟 (Mercer) 街 112 号，我祝他午餐愉快，然后回研究院。还在早些时候，我就喜欢这样的散步，并为那些尽管没有结果的讨论感到愉快，我已经习惯了。而每当我在回来的路上，又总会想起这个问题：像他这样一位对现代物理学的创立有着卓越贡献的人，为什么对 19 世纪的因果观还那么执著？

为把这个问题讲得更准确，我们不仅需要了解爱因斯坦对量子物理学的信念，还需要了解他对整个物理学的信念。对此我相信自己是知道的，而且将尽力在下面讲清楚。然而，为回答这个问题，我们不仅需要知道他的信仰，还需要知道他是怎样接受这些信仰的。这一点我同爱因斯坦的交谈也说明不了什么，这并不是他故意回避，而是我根本就没有提过这个问题。只是在爱因斯坦去世多年以后，我才看到了答案的端倪，那时我认识到，在现代量子力学发现近十年前，爱因斯坦首先认识到 19 世纪的因果思想将成为量子物理学的一个严峻问题。然而，尽管我现在比同他散步时对他的思想演化了解得更多了一些，我还是没法说我知道他为什么选择他坚持的那种信仰。爱因斯坦 50 岁时，在给女婿凯泽尔 (Rudolph Kayser) 为他写的传记的前言中写道：“也许作者忽略的是我性格中非理性的、自相矛盾的、可笑的、近乎疯狂的那些方面。这些方面似乎是那个永不停息地活动着的大自然为她自己欢喜而根植在人的性格里的。但这些东西只有在一个人的思想熔炉中才会各自显露出来。”这句话也许对自我认识的能力太乐观了，当然，它也公正地告诫任何一个传记作者，不要夸大地回答自己可能会合理地提出的每一个问题。

还是应该简单解释一下，我怎么会同爱因斯坦走在一起，我们又为什么会谈到月亮上来。我 1918 年生 in 阿姆斯特丹。1941 年，在乌得勒支 (Utrecht) 跟随罗森菲尔德 (Léon Rosenfeld) 获博士学位。后来，我躲在阿姆斯特丹，但最终还是被抓进了那里的盖世太保监狱。欧洲胜利日 (VE Day) 前夕，狱中的幸存者都自由

① VE Day，第二次世界大战欧洲胜利日（二战胜利日为 V-Day）即 1945 年 5 月 8 日，这一天德国投降。——译者

了。战争刚结束，我就向哥本哈根的尼尔斯·玻尔研究所（Niels Bohr Institute）和普林斯顿的高等研究院申请博士后研究，希望跟泡利（Wolfgang Pauli）一起工作。两个地方都同意我去。我先去哥本哈根一年，不久跟玻尔（Bohr）工作了几个月。下面的几行文字，是我对那段经历的回顾，它同我们这里谈的事情有关。“我得承认，合作开始阶段，我很多时候都跟不上玻尔的思路，实际上还常常感到疑惑。他一会儿说，薛定谔（Schrödinger）听说量子力学的几率解释后，感到很震惊；一会儿又谈些显然不相干的爱因斯坦的反对意见，我看不出它们有什么联系。但没过多久，疑雾散开了。我开始学会把握玻尔的论证路线和目的。像在许多运动中，运动员在走进竞技场之前要进行热身活动一样，玻尔的头脑中，也会再现在量子力学的内容被理解和接受之前展开的论战。我敢说，这样的思想论战，他一天也没停歇过。我相信，这正是玻尔之所以成为玻尔的无穷源泉。爱因斯坦似乎永远是为他引路的精神伙伴——即使在爱因斯坦去世以后，玻尔也一样在思想上同他争论，仿佛他还活着’[P1]。

1946年9月，我来到普林斯顿。刚到时，我知道的第一件事，就是泡利那时已去了苏黎世（Zürich）。同月，玻尔也来了。我俩都参加了普林斯顿200周年纪念大会。学者们聚在一起，爱因斯坦忽然从我眼前走过，这是我第一次看见他，但没看清。他正向杜鲁门总统（President Truman）身边走去。不过过了一会儿，玻尔就把我介绍给爱因斯坦。爱因斯坦友好地向我这个敬畏他的年轻人打招呼。那次，谈话很快就转到量子理论。他们讨论着，我在旁边听，细节已经忘了，但我清楚地记得我的第一个印象：他们很友好，互相尊重。交谈热情洋溢，不分彼此。而我呢，像第一次跟玻

尔谈话那样，全然不知爱因斯坦在说些什么。

不久，我在研究院门口遇到爱因斯坦。我告诉他，我不明白他同玻尔讨论的东西，问他我能不能什么时候到他办公室去聆听教诲，他请我跟他散步回家，这样我们开始了一系列的讨论，直到他去世前不久。<sup>①</sup>我常去他办公室，或者中午陪他回家（经常还有哥德尔 [ Kurt Gödel ] 作伴）。我很少去他家。总的说来，我大概几星期见他一次。我们的交谈总是用德语，要把握他的思想精髓和个人情趣，这是最恰当的语言。他只到我宿舍来过一次，那时正在召开研究院全体员工会议，会议的目的是为我们对 1954 年奥本海默事件的立场起草一个声明。

对于认识爱因斯坦的人来说，同他相处是令人愉快的，都能感到安慰。当然，他清楚地知道，自己在世人眼里是一个传奇人物，他把这看成是一个生活现实。在他的个性里，丝毫没有抬高他那神奇地位的东西，他也没有这个兴趣。私下里，如果他觉得有人滥用了他的地位，他会表示厌烦。我记得有某某教授，报上说他发现了爱因斯坦推广的引力方程的解。爱因斯坦对我说：“Der Mann ist ein Narr”，这人是个傻瓜。又说，在他看来，这位先生只会计算，不会思想。那位教授为他的工作来访问过爱因斯坦，爱因斯坦总是很礼貌，曾对他说过，如果他的结果正确，那将是很重要的。爱因斯坦恼火的是，文章没有经过讨论就引了他的名字。他说他对这件事不会说什么，但不会再接待那位先生了。照爱因斯坦的

<sup>①</sup>因为泡利不在，我也没多少心思留在研究院。我正考虑回欧洲时，奥本海默 (Robert Oppenheimer) 告诉我，他已经被任命为研究院院长，请我同他一起开展物理学研究，我同意了。一年后，我同研究院签了 5 年合同，1950 年升为教授，我在那儿一直呆到 1963 年。

看法，整个事情都是那人引起的，他充满热情地在一些同事中一再传播爱因斯坦的意见，那些同事则以为这大大有助于宣扬他们的大学。

对于能够理解爱因斯坦的科学思想并了解他的个性的物理学家来说，他的传奇色彩就不那么显著了，当然感觉还是有的。我记得，1947年，有一次我正在研究院讲新发现的 $\pi$ 介子 $\mu$ 介子，刚开始，爱因斯坦就走进来了，一时间我竟说不出话来，不敢相信这是真的。还有一次，在1949年3月19日普林斯顿为爱因斯坦70寿辰举行的学术讨论会上，<sup>①</sup>爱因斯坦走进大厅时，多数人都还坐着，又是一瞬间的安静，然后我们站起来欢迎他。

我相信，这些反应绝不是比爱因斯坦年轻许多的人所独有的。有几次，泡利和我同爱因斯坦在一起。从不过分谦恭的泡利，在爱因斯坦面前也跟我们没多大不同，还是可以看出他对爱因斯坦的崇敬。玻尔也一样尊敬爱因斯坦，尽管他们的科学观不同。

无论什么时候我见到爱因斯坦，我们的谈话总是海阔天空的，但都会转到物理学上来。这些讨论偶尔会涉及到一些历史，而我们主要谈的还是关于现在和未来。谈到相对论时，他常讲他为统一引力和电磁力所做的努力，并寄希望于他的下一步。他对自己选择的道路的信念，很少有动摇。只有一次，他对我说话时有点犹豫，他大概说：“我不敢确信微分几何是未来进展的框架，但是如果真是那样，那么我相信，我走的路是正确的。”这些话肯定是在

<sup>①</sup> 讲话的有奥本海默、拉比 (I. I. Rabi)、威格纳 (E. P. Wigner)、罗伯特逊 (H. P. Robertson)、克莱门斯 (G. M. Clemence) 和外尔 (H. Weyl)。

他生命的最后几年的某个时候说的。)①

然而，我们讨论的中心问题还是量子物理学。爱因斯坦从来没有停止思索量子理论的意义，他的论证总是一次次地转到量子力学和它的诠释上来。他的意见很明确，就是人们对这个问题普遍持有的观点不可能是最后的结论，但他还是以更微妙的方式来表达他的不同意见，例如，他从不不用 *die Wellenfunktion* 来说波函数，而总用数学名词 *die Psifunktion* ( $\psi$  函数)。20 世纪 40 年代末特别是 50 年代初，大量新粒子出现了，我从来也没有能够激起爱因斯坦对它们的兴趣。显然，他觉得现在还没到关心这些事情的时候，这些粒子最终会作为统一理论的方程的解而出现，在某种意义上说，他可能是对的。

我从这些谈话中得到的最有意义的东西是，爱因斯坦是怎样思考的，在一定程度上，他是怎样一个人。因为我从来没有做过他的合作者，所以我们的讨论不限于任何具体问题。然而我们也常常会谈些技术性的物理学题目。对于统计物理学，我们谈得很少，爱因斯坦在这个领域里曾有过巨大贡献，而后来他对此不再感兴趣了。我们偶尔谈狭义和广义相对论，那不过是因为当时相对论的主要思想看来已经确立了。回想一下，[学界]对广义相对论的新的兴趣浪潮，却是在爱因斯坦刚去世以后。但是，我确实还记得他谈过洛伦兹 (Lorentz)。在他的一生中，洛伦兹的形象就像慈父一般。有一次，我们也谈到庞加莱 (Poincaré)。量子理论谈了那

① 陈省身 1979 年 3 月在普林斯顿高等研究院爱因斯坦诞生 100 周年纪念会上的题为“广义相对论和微分几何”的演讲中曾表示过如下的希望：“一个总体的统一场论，不论它将会是什么样的理论，一定会很接近于爱因斯坦的宏伟计划，现在已经有了更多的数学概念和工具可以利用。”——译者

么多，多半都是他的选择，而不是我的意愿。没过多久，我就基本上懂得了爱因斯坦与玻尔的对话，实质上也就是互补性（complementarity）与客观实在性（objective reality）的对话。通过聆听两位巨人的谈话，我越来越清楚地看到，1925年量子力学的诞生所代表的与过去物理学的决裂，远远超过了1905年狭义相对论或1915年广义相对论出现时的情形。以前我从来没有看清这一点，因为我们这一代人面对的是“建立好的”量子力学。我逐渐意识到，自己是多么荒谬地接受了一种流传颇广的观念：爱因斯坦对量子理论完全没有兴趣。相反，他所希望的正是寻求一个统一场理论，不仅要把引力与电磁力统一起来，而且还要为量子现象的新诠释提供基础。对相对论，他不偏不倚；对量子理论，他满腔热忱。量子是他心中的魔鬼。很久以后我才知道，爱因斯坦曾对朋友斯特恩（Otto Stern）说过：“我在量子问题上费的心思，是广义相对论的100倍”[J1]。从我自己的经历来看，这句话一点儿也不奇怪。

物理学以外，我们也谈政治、原子弹、犹太人命运和其他不太重要的事情。一天，我给爱因斯坦讲了个犹太笑话，他很感兴趣。于是我开始收集我听过的笑话，准备下一回讲给他听。我讲故事时，他的脸变了，好像突然年轻了许多，甚至像一个淘气的小学生。听到精彩的地方，他便开怀大笑，这一刻，是我特别难忘的。

不关心过去是年轻人的特权。在我认识爱因斯坦的那些年月，我从没读过他的文章。原因很简单：我已经知道了那些文章中对于一个物理学家来说应该记住的东西，而不需要去知道那些已经被取代了的东西。现在我觉得，如果当时我对自己的无知少一些得意的话，我本可以向他提些很有意思的问题。那么我也许还能

了解到一些有趣的事实，但那已经不可能了。我与爱因斯坦的谈话，从来不是历史的回顾，它们涉及的都是当代的物理学。我很高兴我们没有采取别的形式。

随着岁月的流逝，我也读了不少爱因斯坦的文章，把他作为一个历史人物的兴趣也滋生起来。这样，我便从他的终点出发，追溯他的科学与生活。我逐渐感到，在研究过去科学的过程中，最困难的莫过于暂时忘记那些后来出现的东西。研究他的论文，与熟悉他的人讨论，利用爱因斯坦档案馆，倾听个人回忆——这些都是促成本书的要素。我发现，研究科学论文的重要性是其他任何事情都不可比拟的，我这样说，不是对大家无礼，也没有忘记大家的帮助。

在前言里，我说过要带读者浏览全书。现在我们就开始。为方便起见，我引入一些只在这里和下一章用的符号，例如用 (3) 代表第 3 章 而第 5 章 c 节则记为 5c)。重复一遍，像 J1 这样的符号，代表可以在每一章后面找到的参考文献。

我先说明交织在各章节中的爱因斯坦的个人生活：在 (3) 中讲述他的早年生活。从 1879 年他的出生说到 1908 年 2 月他在伯尔尼做无薪讲师 (Privatdozent) 而开始他的学术生涯。这一章还要讲他的童年，他在学校的生活 (与普遍看法相反，他在小学和中学的成绩都是很优异的) 他短暂的宗教信仰 他的学生时代 他最初找工作的困难以及他在伯尔尼专利局的大部分时间。在这期间，他父亲去世了。后来他同米列娃 ( Mileva Marić ) 结婚，生了一个儿子。在 (10a)，我们会跟着他从伯尔尼大学的无薪讲师来到 1911 年 3 月成为苏黎世大学的副教授。这期间，他的第二个儿子



出生了。接下来的一段 ( 11a) , 他成为布拉格 Prague 大学的正教授 ( 从 1911 年 3 月至 1912 年 8 月) 。在 ( 12a) 我们又将跟他回到苏黎世, 成为联邦工业大学 ( Federal Institute of Technology, ETH ) 的教授 ( 从 1912 年 8 月到 1914 年 4 月) 。围绕他从苏黎世到柏林 ( Berlin) 所发生的事情, 他离开米列娃和两个孩子, 他对第一次世界大战的反应, 将在 ( 14a) 讲述。在 ( 16 ) 中 我将继续讲述爱因斯坦在柏林的故事, 讲到他永远地离开欧洲。这段时期, 他病了几年, 但对他的科学创造没有产生什么引人注意的影响。他同米列娃离婚, 又同堂姐爱尔莎 Elsa 结婚 母亲在他柏林的家中病故 ( 16a) 。接着 ( 16b ) 和 16c ) 将叙述爱因斯坦在 1919 年突然成为世界名人 ( 一段时期以来, 他的天才已经得到了他的科学同行的完全承认) , 还将谈谈我对这激动人心的场面的起因的看法。然后 ( 16d) 叙述 20 世纪 20 年代爱因斯坦在柏林的那段紧张的日子, 这时, 他第一次卷入犹太人命运问题, 他继续保持和平主义的热忱; 在这里, 还会讲到他与国际联盟的联系。 1932 年 12 月 他最后离开德国。比利时的那段小插曲和初到普林斯顿的日子, 我们在 ( 25b) 讲述。 ( 26 ) 到 ( 28) 将讲他的晚年岁月。本书最后是一份详细的爱因斯坦年表 ( 32) 。

我还要引导读者来浏览爱因斯坦的科学。开始之前, 我先插几段话, 谈谈爱因斯坦和政治, 谈谈作为哲学家和人道主义者的爱因斯坦。

每当我想到爱因斯坦的政治, 我就回忆起 1954 年 4 月 11 日那个星期天的后半夜去见他的情景。那天早上, 纽约《先驱论坛报》 ( *Herald Tribune* ) 发表了一篇奥尔索普兄弟 ( *Alsop brothers* )

的文章 标题为：“麦卡锡的下一个目标 权威的物理学家”。文章开头写道，来自威斯康星（Wisconsin）的那个新议员正在玩弄手腕。我知道，奥本海默事件要爆发了。<sup>①</sup>晚上，我在研究院的办公室里，忽然电话铃响了，华盛顿的话务员请奥本海默博士接电话。我回答说他不在于城里（实际上，他在华盛顿）。话务员又问爱因斯坦博士，我告诉她，爱因斯坦不在办公室，而他家的电话号码没有登记。接着，话务员又告诉我，她的通话人想同我说话。美联社华盛顿办公室主任讲话了。他告诉我，星期二早晨各家报纸都将披露奥本海默事件，他想尽快得到爱因斯坦的意见。我认为，当天晚上作一简短的声明，也许会避免第二天上午梅瑟街的混乱。于是我说，我将同爱因斯坦讨论一下，无论如何给他一个回复。我驱车来到梅瑟街，敲响门铃，爱因斯坦的秘书海伦·杜卡斯让我进去。我很抱歉这么晚还来。我说，如果能跟教授谈几句话，事情可能会好些。这时，爱因斯坦已经披着睡衣，站在楼梯上了。他问：“Was ist los?”（“出了什么事情？”）他走下楼 继女玛戈特 Margot 跟在后面。我讲明来意，爱因斯坦放声大笑，我吓了一跳，问他笑什么。他说，问题很简单，奥本海默只要去华盛顿，告诉那些大员们说他们都是傻瓜，然后回家就行了。进一步讨论以后，我们认为需要发表一个声明。我拟好草稿，爱因斯坦通过电话向美联社在华盛顿的负责人宣读。第二天，海伦·杜卡斯在准备午饭，忽然看见门口停着些轿车，还有人正往下拿照相机。（她告诉我）她围裙也没脱，

<sup>①</sup> 麦卡锡（Joseph Raymond McCarthy, 1909—1957）是美国共和党参议员，1951—1954年间曾操纵参议院常设调查小组委员会，以法西斯手段迫害民主进步人士。奥本海默在1947—1953年曾是美国原子能委员会顾问团主席，被委员会宣布为“不十分可靠的公民”而受到迫害。——译者

就跑出去告诉爱因斯坦，他这时正在回家的路上。爱因斯坦回到家门口时，拒绝同记者谈话。

爱因斯坦当初的反对对吗？当然是对的，尽管他的建议不会也不可能被采纳。我记得曾参加过一次茹弗内尔（Bertrand de Jouvenel）主持的讨论会，他指出，政治问题的重要特征是：没有答案，只有妥协。而通过妥协来解决问题，却是与爱因斯坦的生活和科学最不能调和的。他常对政治问题发表看法，总想解决它们，而他的那些看法总被人说成是天真幼稚。<sup>①</sup>在我看来，爱因斯坦不但不幼稚，而且深深地知道人类愁苦和愚昧的天性。他对政治问题的见解并不是立刻可行的，并且我认为它们在总体上也没有产生很大的影响，然而他情愿并且高兴为此付出明智的代价（price of sanity）。

还有一件和政治有关的事情。我想讲一个故事，那是 1979 年以色列总统纳翁（Navon）告诉我的。1952 年 11 月，当时的以色列总统魏茨曼（Weizmann）去世了，本-古里安（Ben-Gurion）和他的内阁决定邀请爱因斯坦出任总统。爱班（Abba Eban）受命从华盛顿向爱因斯坦转达这一请求（27）。不久以后，在一次私人交谈中，本-古里安问他当时的私人秘书纳翁：“如果他接受了我们怎么办？”

爱因斯坦常在和平主义者的声明上签名。第一次是在 1914 年（14a）。1916 年爱因斯坦接受了柏林《福斯报》（*Die Vossische Zeitung*）的采访，谈了他的和平主义者朋友阿德勒（Friedrich Ad-

奥本海默写道：“他总是带着令人惊讶的纯真，像儿童般的天真，而又桀骜不驯”[O1]。这句话表现出作者洞察一切的天才。

ler)关于马赫的著作，那时阿德勒因刺杀奥地利总理斯蒂尔格(Karl Stürgkh 正在狱中[E1]。阿龙 Leo Arons )去世后 爱因斯坦也在《社会主义者月刊》(*Sozialistische Monatshefte* )上撰文悼念[E2]。阿龙是一个物理学家，爱因斯坦很欣赏他的政治胆略，虽然他并不认识他。1922年，爱因斯坦的朋友，魏玛共和国外交部长，同时按所受教育来说也是一位物理学家的拉特瑙(Wather Rathenau)被暗杀了，爱因斯坦为此在《新评论》(*Neue Rundschau*)上写道：“生活在虚幻世界里的人是不难成为理想主义者的，然而，他尽管生活在地球上，也几乎比其他任何人都更了解它的气息，却还是一个理想主义者”[E3]。1923年，爱因斯坦成为新俄罗斯友好协会(the Association of Friends of the New Russia)的创立者之一。一段时间里，他曾同洛伦兹、玛丽·居里(Marie Curie)、柏格森(Henry Bergson)等人一起是国际联盟学术合作委员会(the League of Nations' Committee for Intellectual Cooperation)的委员(16d)。他提名或他赞成获诺贝尔和平奖的人有：马萨里克(Masaryk)；国际反战组织名誉书记布朗(Herbert Runham Brown)；当时还在德国集中营的奥西厄茨基(Carl von Ossietzky)；另外还有青年阿利亚(Youth Aliyah)组织。他大声疾呼犹太民族的悲惨命运，并尽力帮助他们。为了让犹太人从欧洲移居美国，他在数不清的宣言上签名。

和平主义和超国家主义是爱因斯坦的两个基本的政治理想。20世纪20年代，他支持全面裁军和建立统一的欧洲(16d)。第二次世界大战后，他极力倡导世界政府的理想，主张和平利用而且只能和平利用原子能(27)。他很清楚和平主义和裁军在1933年到1945年都是不合时宜的，对此他深感遗憾(25b)。1939年，他

就核聚变对军事的影响给罗斯福总统 ( President Roosevelt ) 写过一封很理智的信。1943 年, 他同美国海军军需部签订了一个做临时顾问的协议 ( 他的津贴为每天 25 美元 )<sup>①</sup> 在这一时期里他最令人难忘的 大概是他说的那句话: “我身在海军, 但没人要我留海军发式” [B1]。他从来不原谅德国人 ( 27 )。<sup>②</sup>

爱因斯坦的政治倾向, 简单地说, 可以叫左派, 这来自他的正义感, 而不是因为他赞同某种方法或偏爱某种哲学。“我敬重列宁, 他为实现社会正义献出了全部力量乃至生命, 但我认为他的方式是不恰当的。”他 1929 年这么说 [E4] 不久后, 他又写道: “在俄国之外, 列宁和恩格斯当然不会被当成科学的思想家, 可能也不会有人有兴趣把他们看成是这样的思想家而去驳斥他们。在俄国情况也可能如此, 不过没人敢这么说” [E5]。关于爱因斯坦感兴趣的 政治问题和他卷入的政治事件, 请读者去看《爱因斯坦论和平》 ( *Einstein on Peace* ) [N1] , 那里有更多的文献。

爱因斯坦是一个爱智慧的人, 那么他是哲学家吗? 对这个问题的回答, 涉及到事实问题, 同时也涉及到爱好问题。让我说的话 在他处于最佳状态时, 他不是哲学家, 但对相反的观点, 我也不想强烈去反驳。可以确认的是, 爱因斯坦对哲学的兴趣是真的; 他不认为自己是哲学家, 这两者都是事实。

从中学第一次读康德 ( Kant ) 开始, 爱因斯坦一生都在研读哲学著作 ( 3 )。1943 年, 哥德尔、罗素 ( Bertrand Russell ) 和泡利曾好

关于爱因斯坦做顾问的情况, [ G1 ] 的说法是不准确的。

<sup>②</sup> 爱因斯坦的堂姊林娜·爱因斯坦 ( Lina Einstein ) 死在奥斯威辛 ( Auschwitz ), 表姐德雷弗斯 ( Bertha Dreyfus ) 死在特勒西城 ( Theresienstadt )。

几次聚在他家里讨论科学哲学 [ R1]。 “ 没有认识论的科学 —— 如果这真是可以设想的 —— 是原始的和混乱的。 ” 多年以后，他这样写道；同时他也警告科学家，太强烈地依赖于某个认识论体系是很危险的。“ 他 科学家 在一个有认识论体系的认识论者看来 必定像一个无聊的机会主义者：就他寻求描述一个独立于感觉作用的世界而言，他像一个实在论者；就他把概念和理论看成人类精神的自由发明（而不能从来自经验的东西逻辑地推导出来）而言，他像一个唯心论者；<sup>①</sup>就他认为他的概念和理论只有在为感觉经验之间的关系提供了逻辑表示的高度上才能成立而言，他像一个实证论者；就他认为逻辑简单性观点是他的研究所不可或缺的有效工具而言，他甚至像一个柏拉图主义者或毕达哥拉斯主义者 ” [E6].

所有这些“ 主义 ” 的成分，在爱因斯坦的思想中都清晰可辨。然而，在他生命的最后 30 年 他不再是一个“ 无聊的机会主义者 ”。那时，他把自己关进实在论的，或如他喜欢叫的，客观实在性的囹圄，成了哲学家，却大受其害。这段思想演变过程将在 ( 25 ) 中详细描述。哲学无疑展现着爱因斯坦的个性，然而，他的哲学知识并没有直接影响他主要的科学创造活动。除他对牛顿的评论外，他对哲学问题的其他言论，我们到 16e 再讨论。

牛顿、麦克斯韦、马赫、普朗克和洛伦兹 是爱因斯坦自己曾经承认过的他的先驱。正如他不止一次地告诉我，没有洛伦兹，他永远也不可能发现狭义相对论。我将在 ( 18a ) 谈他如何敬慕普朗克；

idealist 通译“ 唯心主义者 ” 亦有“ 理想主义者 ” 之意。 ——译者

在(15e)谈马赫对他的影响；<sup>①</sup>在(16e)谈他如何评价麦克斯韦。现在我来谈牛顿，但先说几句题外话。

爱因斯坦从小就有独立思考的强烈愿望，不让任何事情来干扰他的思想，这给他的个人带来一种不同寻常的超然的生活。这并不是说他超乎人世，寂寞孤单，不与人交往。从他在纳粹统治时期和以后对德国的态度，我们还看到他很容易动怒。在他为别人的正义和自由呐喊时，在他把犹太人称为他的兄弟时，在他为华沙犹太人隔离区的英雄伤心时，他是一个充满感情的人，也同样是一个有着丰富思想的人。他在呐喊和激动以后，常想回到理想世界的纯真和安宁中去，这没有什么奇怪的；而真正值得注意的是他回归那个理想世界的天才能力。他用不着将日常的世界从他身边推开，只要他愿意，他随时可以走出这个世界。于是，我们一点儿也不奇怪，他有两次很不光彩的失败的婚姻（他去世前不久是这么写的），而他一生中缺少一位他认同的人物——也许有一个例外那就是牛顿。

爱因斯坦曾在中年时写道：“伟大的牛顿在他青年时代经历的奇妙事情……对他来说，大自然是一本打开的书……他是实验家、理论家和技工，同样也是毫不逊色的语言艺术家……他坚强、自信而孤独地站在我们面前：他的创造的快乐和他严密的精确性，呈现在他的每句话和每幅图中……”[E8]。在我看来，他写这些话，是在描绘他自己的理想，他渴望成为一个理论家，也想成为一个实验

<sup>①</sup> 应该指出，我不太同意伯林(Isaiah Berlin)的观点[B2]。他认为，马赫是爱因斯坦的哲学导师之一，爱因斯坦先接受了马赫的现象论，而后来又放弃了它。我认为爱因斯坦对马赫的敬仰完全来自他读了马赫关于力学史的著作，在这本书中，一切运动的相对性是一个指导原则；另一方面，爱因斯坦认为马赫是“un déplorable philosophe”（一个可悲的哲学家）[E7]，可能只是因为马赫认为原子的实在性永远是该遭诅咒的。

物理学家（在这方面，他当然永远也比不上牛顿）。在此之前，他写道，牛顿因为他的贡献而“值得我们深深地敬仰”，而牛顿对自己理论的缺点的认识“总激起我由衷的赞叹” [E9]（这些缺点包括力的超距作用，牛顿曾指出它不能作为一种最终解释）。

“幸运啊 牛顿 幸福啊 科学的童年！” [E8]。这是爱因斯坦为新版牛顿《光学》(*Opticks*)写的序言的开场白，当他写这句话时 他特别想到 牛顿的名言‘Hypotheses non fingo’ 我不作假说，代表了过去的科学风格。在别的地方，爱因斯坦对这个问题讲得更明确：

我们现在知道，科学不能仅从经验中成长起来，在科学的建构中，我们需要自由的发明，至于这些发明是否有用，只能通过经验对比而后经验地验证。这个事实可能被我们的前辈们忽略了，对他们来说，理论的创立似乎是从经验的归纳中产生出来的，而不受概念的自由构造所带来的影响。科学所处的状态越原始，科学家越容易生活在他是一个纯粹的经验主义者的错觉中。在 19 世纪 仍然有许多人相信 牛顿的“我不作假说”这一基本原则，应该是一切健康的自然科学的基础。

[E10]

爱因斯坦还用只有他才写得出来的那些话表达了他认为科学方法已经变化了的观点：

牛顿啊，请原谅我：你发现了在你那个时代一个具有最高思维能力和创造能力的人所能发现的惟一道路。你所创立的



概念至今还指引着我们的物理学思想，尽管我们现在知道，如果想更深入地理解种种关系，那些概念必须用其他一些离直接经验领域更远的概念来代替。 [E11]

然而，在有一个问题上，爱因斯坦总是站在牛顿一边，并以他为典范，这就是因果性问题。在纪念牛顿逝世 200 周年之际，爱因斯坦写信给皇家协会秘书：“所有谦逊地参与思考物理学事物的奥秘的人，都在精神上同你在一起，我们有着共同的对牛顿的赞美和爱戴。”接着他评论了自牛顿以来的物理学的进化 最后说：

只有在量子理论中，牛顿的微分方法才变得不适当，而且实际上严格的因果性也令我们失望了。但这并不是定论。也许，牛顿方法的精神能给我们力量，以重建物理实在性与牛顿学说的最深刻特征——严格的因果性之间的和谐。 [E12]

什么是严格的牛顿因果性呢？举例来说，如果我告诉你一个粒子在某一特定时刻的精确位置和速度，你也知道所有作用在粒子上的力，那么你就能够根据牛顿定律预言这个粒子在以后时间的精确位置和速度。然而，量子理论表明，即使我有能够随意使用的最完好的仪器，我也不能以理想的精确度告诉你位置和速度的信息。这也就是我跟爱因斯坦讨论月亮的存在性时所涉及的问题。对于像月亮那么重的物体来说，我所给你的它的位置和速度的信息精确性的局限性，对所有的天文学意图和目的来说是没什么意义的，你可以忽略从我这里得到的信息的不确定性，而继续谈论月球轨道。

像原子那样的事物，情况就完全不同了。氢原子中，我们说电子在轨道上运动，它的意思跟月亮绕地球转动是不同的，要不，氢原子应该像一张平坦的小煎饼，而事实上它是一个小球。在原则上，我们没有办法回到牛顿的因果性。当然，这点认识无损于牛顿的地位。爱因斯坦想返回旧因果性的希望是不能实现的梦想；当然，现代物理学家所持有的这种看法，也不妨碍他们认为爱因斯坦是 20 世纪最重要的科学巨人。他的狭义相对论囊括了麦克斯韦和洛伦兹的成就，使之臻于完善；他的广义相对论包含了牛顿的引力论，并且纳入了马赫的一切运动的相对性思想，使两者成为完美的整体。在所有这些方面，爱因斯坦的全部成就代表了先驱者工作的最高峰，他修正并完善了那些理论的基础。从这个意义上讲，他是一个承先启后的人物，完善过去并改变未来事件的潮流。同时，他也是一个先驱者，首先是普朗克，跟着是他，后来还有玻尔，他们前无古人地建立了一门新物理学——量子理论。

爱因斯坦对牛顿的赞誉，也适合他自己：他也是一位语言艺术家。他在德语方面的才华仅次于他的科学天才，我这么说主要指的是他的文章特色，虽然他也喜欢写些悦耳动听的小诗。他的语言精妙绝伦，译文很难保留神韵。研究爱因斯坦的人应该读他的德文著作。他的一些重要著作，如在 1936 年《富兰克林研究院院刊》(*Journal of the Franklin Institute*) 发表的关于科学信仰以及在希尔普 (Schilpp) 编辑的那本书 [E6] 中的自传概略 (autobiographical sketch)，都应该以德英对照本的形式出版。爱因斯坦的所有科学论文，无论最后用哪种语言发表，最初都是用德文写的。爱因斯坦不仅驾驭德语轻松自如，而且，在他所写的对同事和朋友的纪念文章里，还清晰地表现出他对人的洞察力。他写过纪

念文章的人有：施瓦兹席尔德 (Schwarzschild) 和斯莫鲁霍夫斯基 (Smoluchowski)；玛丽·居里和诺特 (Emmy Noether)；迈克尔逊 (Michelson) 和爱迪生 (Thomas Edison)；洛伦兹、能斯特 (Nernst)、朗之万 (Langevin) 和普朗克；还有拉特瑙。最令人感动的悼念文章是纪念埃伦费斯特 (Paul Ehrenfest) 的。所有这些人物的素描都形象生动地证明了下列观点：爱因斯坦是一个天真的人。

对德语之外的其他语言，他用得就不那么自如了。<sup>①</sup> 1922年首次访问巴黎时，他用法语演讲 [K1]。然而，首次访问英国和美国时，他却用德语向观众讲话，后来他的英语才说得流利些。

他爱音乐，他对 20 世纪和许多 19 世纪的音乐家不大感兴趣。他喜欢舒伯特 (Schubert) 但不喜欢贝多芬 (Beethoven) 那些过于戏剧化的作品；他不太欣赏勃拉姆斯 (Brahms) 更不喜欢瓦格纳 (Wagner)。他喜欢更早一些的音乐家——莫扎特 (Mozart)、巴赫 (Bach)、维瓦尔第 (Vivaldi)、科莱里 (Corelli)、斯卡拉蒂 (Scarlatti)。我从没听过他拉小提琴，但多数听过的人都能证明他的音乐天赋，记得他目光扫过乐谱的轻快神态。关于他对视觉艺术的偏爱，我们来看一段玛戈特·爱因斯坦给夏皮罗 (Meyer Schapiro) 的信：

在视觉艺术中，他当然还是偏爱以前的大师们的作品。

<sup>①</sup> 20 世纪 20 年代，爱因斯坦曾对一位年轻朋友说：“新衣服和新食品我都不喜欢，最好也不要学一门新语言” [S1]。

他认为它们比我们当代的大师们的作品更“令人信服”（他用了这个字眼！）但有时候，我惊讶他也看毕加索（Picasso）的早期作品（1905, 1906）……像立体派、抽象画……那样的字眼儿，对他来说毫无意义……乔托<sup>①</sup>曾使他深受感动……安吉利科修士<sup>②</sup>……弗朗切斯卡<sup>③</sup>也令他感动……他喜欢意大利小城……喜欢佛罗伦萨、锡耶纳（Siena）（锡耶纳的绘画）、比萨、波洛尼亚（Bologna）、帕度亚（Padua）那样的城市，赞赏那里的建筑……如果说起伦勃朗（Rembrandt），他当然是很仰慕的，而且深受他的影响。[E13]<sup>④</sup>

在结束爱因斯坦的人生素描时，我该具体向大家解释我在前面说过的一句话：爱因斯坦是我所认识的最自由的人。我说这话的意思是，他比我所接触的任何人都更能把握自己的命运。如果说他有上帝，那么这个上帝就是斯宾诺莎（Spinoza）的上帝。爱因

① Giotto di Bondone(1267—1337)，意大利画家，被公认为西方绘画之父、文艺复兴的先驱。——译者

② Fra Angelico(1400—1455)，又名乔凡尼修士。虽然隶属于文艺复兴时代，却是这时代的反叛者，他的画风倾向中世纪画风，他只爱神圣的题材。代表作有《圣母领报》等。——译者

③ Piero della Francesca(1416—1492)，意大利画家，除致力于艺术外，也从事数学、几何的研究，画中人物及透视的表现，皆强调数理般的严谨与平稳。代表作有《示巴女王会见所罗门王》、《乌尔比诺公爵夫妇肖像》等。——译者

④ 爱因斯坦对文学的兴趣和爱好我说不太清楚。我不知道下面随便列举的他所喜欢的作家，有多大的代表性和完整性：海涅（Heine）、法朗士（France）、巴尔扎克（Balzac）、陀思妥耶夫斯基（Dostoyevski）（《卡拉玛卓夫兄弟》[*The Brothers Karamazov*]）、穆西尔（Musil）、狄更斯（Dickens）拉格洛夫（Lagerlof）、托尔斯泰（Tolstoi）（民间故事）、卡赞扎基斯（Kazantzakis）、布莱希特（Brecht）（《伽利略》）、布罗赫（Broch）（《维吉尔之死》[*The Death of Virgil*]）、甘地（Gandhi）《自传》、高尔基（Gorki）、赫西（Hershey）《阿达诺的铃》（*A Bell for Adano*）、房龙（Van Loon）（《伦勃朗的生活和时代》（*Life and Times of Rembrandt*））、赖克（Reik）（《用第三只耳朵听》（*Listening with the Third Ear*））。

斯坦不是革命者，推翻权威从来就不是他的基本动机。他不是叛逆者，因为除了理性的权威，一切权威对他来说都是可笑的，不值得费功夫争斗（人们很难把他对纳粹的反对说成是反叛态度）。他有提出科学问题的自由，有如此经常提出正确问题的天才。除了接受答辩，他别无选择。他对命运的深刻理解使他比他的任何前辈都走得更远。他的自信是他百折不挠、一往无前的力量源泉。名誉可以偶尔使他快乐，但从来不能使他动摇。他超然地对待时间，超然地对待死亡。在他后来对量子理论的态度中，在他探索统一场论的失败中，我没有看到什么悲剧发生，因为，特别是他提出的一些问题，仍然是对今天的挑战 (2b)——还有，我从来没见过他满脸愁容，一时的悲哀也绝不会掩盖他一贯的幽默。

现在，我们来浏览爱因斯坦的科学。

爱因斯坦从来不太喜欢讲课，没人从他那儿获得过博士学位，但他总是乐于和他平辈的同事或者比他年轻的同事讨论物理学问题。尽管他一生中常同别人合作，但所有的重要论文都是自己写的。他同三十多位同事或助手的合作，我们将在 (29) 看到。从学生时代到不惑之年，他常找机会做实验。学生时，他希望测量以太漂移（他相信）地球就在以太中穿行 (6a)。在专利局时，他曾设计一个装置来测量微小电势差 (3, 29)。在柏林，他做过磁化诱发旋转的实验 (14b)，测量了薄膜毛细管直径 (29) 还因冷藏器和助听器与人共享了专利 (29)。不过，当然了，他的主要贡献还是在理论物理学上。

概览他的理论工作，最好的办法是先看看他 1905 年做了些什么。这一年，爱因斯坦写了 6 篇论文：

1. 光量子与光电效应 3 月 17 日完成 (19c), (19e)。这篇为他赢得诺贝尔奖的文章是在写他的博士论文之前写好的。
2. 测定分子大小的新方法, 4 月 30 日完成。这是他的博士论文, 在现代文献中, 这是他被引用最多的文章 (5c)。
3. 布朗运动, 5 月 11 日收到。<sup>①</sup> 这是他的博士论文的直接结果。
4. 第一篇关于狭义相对论的文章, 6 月 30 日收到。
5. 第二篇关于狭义相对论的文章, 包含着关系  $E=mc^2$ , 9 月 27 日收到。
6. 第二篇关于布朗运动的文章, 12 月 19 日收到。

在他更早发表的论文中, 我们看不到什么隐藏着非凡的创造火花的东西。用他自己的话说, 他在 1901 年和 1902 年写的头两篇关于分子间力的一个普适定律的假设的文章, 是毫无意义的 (4a)。跟着的 3 篇关于统计力学基础的文章质量参差不齐 (4c, 4d)。最后的一篇写于 1904 年, 第一次谈到了量子理论。这 5 篇论文都没有在物理学中留下多少痕迹。但我相信这是爱因斯坦自我发展过程中十分重要的热身训练。然后他沉默了一年, 接下来便是 1905 年的爆发。我不知道 1904 年他在想什么。他的个人生活在两方面发生了变化: 在专利局的临时职位固定下来, 长子也降生了。这些事情是否激发了爱因斯坦的天才 (genius) 的突现, 我不敢说, 尽管我相信儿子的到来是很重要的; 我只知道, 天才不仅

<sup>①</sup> 指《物理学纪事》( *Annalen der Physik* ) 编辑收到。

是才华 (talent) 的极端形式, 而且, 天才也没有什么客观的标准。除此之外, 我不知道该如何一般而完整地描绘什么是天才。我轻松地看到, 同毕加索和伍迪·艾伦 (Woody Allen) 相比, 爱因斯坦的天才不会引来更多的争议, 于是我要宣称, 在我看来, 爱因斯坦是一个天才。

爱因斯坦在 1905 年以前的工作, 以及他在那年的第 2、3、6 三篇文章源于他对 20 世纪初两个中心问题的兴趣, 那是本书第二篇的主题。

第一个问题: 分子的实在性。怎样证实 (或否定) 原子和分子是实在的东西? 如果它们是实在的, 又怎样决定其大小和数目呢? 在 (5a) 中, 我们将简单介绍这个问题在 19 世纪的状况。那时, 化学家 (他们是一个新的科学分支的研究群体) 和物理学家在这个问题上有着不同的内容, 而彼此又几乎不关心对方说些什么。1900 年, 很多 (尽管不是全部) 著名的化学家和物理学家都相信分子是实在的。他们当中还有些人已经知道, 那个所谓的“不可分的”原子已名不副实了。大概 10 年以后, 分子实在性的观念不容争辩地确立起来, 因为这期间很多验证这些假想粒子的方法都在很小的误差范围内得到了相同的结果。千差万别的方法和高度一致的结论, 给分子图景带来了一个统一原理的驱动力。这些方法中的 3 个, 可以在爱因斯坦 1905 年的工作中看到。3 月, 他在光量子论文中计算了分子数目 (19c); 4 月, 他借助于糖溶液的流体性质又进行了计算 (5c); 5 月, 在解释著名的悬浮在溶液上的小凝聚物的布朗运动时, 他进行了第三次计算 (5d)。所有这些结论的合流, 是 19 世纪末叶实验物理学重大发展的结果。爱因斯坦的 3 月方法的成功, 是基于远红外光谱的一项突破 (19a)。而 4 月和 5 月方法

则是普费弗尔博士 ( Dr. Pfeffer ) 发现弹性薄膜制造方法的结果 (5c)。爱因斯坦后来 (1911) 在天空的蓝色问题和临界乳光现象的工作中，还提出了别的计算方法 (5c)。

第二个问题：统计物理学的分子基础。如果原子和分子是实在的东西，那么我们如何分别用这些微观粒子的运动来表达像压力、温度和熵之类的宏观概念呢？19 世纪的科学巨人们，像麦克斯韦、玻耳兹曼、开尔文、范德瓦尔斯 ( van der Waals ) 等当然不会在提出第二个问题之前坐等分子假说的证实。他们最严峻的问题是如何导出热力学第二定律。孤立系统的熵在系统趋向平衡时力图达到最大值，这个特征的分子基础是什么？在 (4) 中我回顾了爱因斯坦的先驱们和他本人对这个问题的贡献。在那早年岁月里，不光爱因斯坦一个人没能想到这个复杂的问题完全应该用数学方法来解决。他从事这项研究时，对玻耳兹曼的基本贡献只有些零碎的了解，而对吉布斯 ( Gibbs ) 的论文，他则全然不知。但即使这样，要确定他的贡献的价值，也丝毫不会轻松多少。

对爱因斯坦来说，第二个问题比第一个问题更有意思。像他以后说的那样，布朗运动作为一种粒子计数方法是重要的，但更重要的是它能使我们在显微镜下证实我们称为热的那些运动。总的说来，爱因斯坦关于热力学第二定律的工作，不像他对验证分子假说的考察那样有更长远的意义。实际上，他在 1911 年写道，如果他早知道吉布斯的工作，恐怕就不会发表 1903 年和 1904 年的论文了。

不管怎样，爱因斯坦对统计力学基本问题的关心是极端重要的，因为它促成了他对量子理论的巨大贡献。玻耳兹曼原理这个爱因斯坦造的名词，第一次出现在他 1905 年关于光量子的论文里



不是偶然的。事实上，光量子假设本身就是从关于辐射平衡特征的讨论中产生出来的（19c）。我们还应该记得，他关于能量涨落（4c）的第一次工作（1904）的主要应用也在量子领域。1909年远在量子力学发现之前，他就根据对黑体辐射的那些涨落的分析第一个指出，未来的理论应该建立在粒子和波的二重描述的基础上（21a）。另一条联系统计力学和量子理论的纽带，是他通过对电磁辐射场中分子的布朗运动的研究建立起来的。这些研究也使他获得了光量子的动量特性（21c）。他在1916年对普朗克黑体辐射定律的新推导也是以统计为基础的（21b）。他在后面这个研究中发现，在所谓自发辐射的过程中，不存在牛顿的因果律。他从这个发现中产生出对因果律的不安（21d）。

爱因斯坦积极投入统计物理学的研究，是从1902年开始的。到1925年，他为物理学做出了他的最后一个大贡献：处理分子的量子统计学方法（23）。他又一次、也是最后一次自如地利用了涨落现象，将他带到波动力学的大门口（24b）。在（24）中要讨论的爱因斯坦、德布罗意和薛定谔的工作之间的联系，将清楚地说明波动力学有着很深的统计力学渊源——而矩阵力学就不同了，其中玻尔、海森伯（Heisenberg）和狄拉克（Dirac）的工作之间的联系，首先是从原子动力学的研究中产生的（18c）。

长久的思想孕育是爱因斯坦科学发展的一个显著特征。他对量子问题的关切从普朗克1900年下半年发现黑体辐射定律之后不久就开始了，而它带来的第一颗果实是在1905年3月。狭义相对论的根本问题，早在1895年就在他心底萌发了（6d）而理论在1905年6月才成熟。他从1907年开始考虑广义相对论（9），1915年11月，理论达到第一个完整的形式（14c）；他对统一场论的兴

趣 至少要追溯到 1918 年( 17a) 到 1925 年他才第一次为这个理论提出自己的设想 ( 17d)。就相对论来说, 他的酝酿都达到了光辉的顶点。从他认识时间测量的确切意义, 到完成狭义相对论的第一篇论文 还不到 5 个星期 7a) 同样 在饱经磨难和错误之后 他在近两个月的时间里, 就完成了广义相对论的最终形式 ( 14c)。

接着, 我将集中讨论狭义相对论。它的历史可以用一句简单的话来说明: 1905 年 6 月, 爱因斯坦发表了一篇关于运动物体的电动力学的论文。我要谈的, 包括 10 个部分 前 5 部分之后 理论的完整形式就将呈现在我们面前; 其余的部分, 将一直谈到今天, 是前 5 部分提出的那些原理的应用。

关于那段历史, 我多少谈得详细些。首先, 我大概评说了 19 世纪的以太概念 ( 6a) 这个古怪的假想的介质为解释光波的传播而被引入, 最终为爱因斯坦所抛弃。常有人问, 爱因斯坦放弃以太, 是不是因为他熟悉迈克尔逊—莫雷实验? 这个实验高度精确地证明了人们预想的地球毫无阻碍地穿过以太时所引起的以太漂移是不存在的 (6a)。回答是肯定的, 爱因斯坦当然知道迈克尔逊—莫雷结果 ( 6d), 但这在他的思想发展中也许只发生过间接的作用 ( 7a)。1907 年以后, 爱因斯坦常强调迈克尔逊和莫雷工作具有根本的重要性, 但从来也没说过实验对他自己的发展有过直接的影响。为什么会有这种态度, 在历史上是找不到答案的。在 (8) 中, 我大胆地提出了我的假设。

在狭义相对论历史上, 洛伦兹和庞加莱这两位大师的地位是仅次于爱因斯坦的。洛伦兹, 这位电子论的创立者、洛伦兹收缩 ( 庞加莱命名的 ) 的共同发现者、塞曼效应的诠释者、爱因斯坦后来承认的先驱者 在 1904 年写下了洛伦兹变换 ( 这也是庞加莱命名

的)。1905年，那时还只知道洛伦兹1895年以前著作的爱因斯坦又重新发现了这些变换。当时最伟大的数学家之一，同时也是杰出的数学物理学家的庞加莱，在1898年指出，关于在两个不同地方所发生的事件的同时性，我们没有直接的直觉。这些意见，爱因斯坦在1905年前几乎肯定会知道的(6b)。1905年，爱因斯坦和庞加莱各自独立而且几乎同时(相差也只在数周以内)地指出洛伦兹变换的群特征和速度加法定理。然而，洛伦兹和庞加莱都没有发现狭义相对论，他们在动力学思想里陷得太深了。只有爱因斯坦看到了关键的新起点：必须放弃动力学的以太而支持建立在两个新假设基础上的新运动学(7)。只有他看到，洛伦兹变换和以这个变换为基础的洛伦兹-菲茨杰拉德收缩，都可以从运动学的论证中推导出来。洛伦兹也同意这一点，而且牢牢把握了狭义相对论的精神。但是，甚至1905年以后，洛伦兹还没有果断地抛弃他的以太和他对光速作为终极速度的疑虑(8)。而庞加莱(1912年去世)则一辈子也没明白狭义相对论的基础(8)。

狭义相对论澄清了旧物理学，也创造了新物理学，特别是爱因斯坦也在1905年导出了关系式 $E=mc^2$ (7b)。这个关于高速电子的能量-质量-速度关系，在新理论第一次获得实验验证几年前就出现了(7e)。1905年以后，爱因斯坦只是偶尔关心一下它的其他隐含的意义(7d)这主要因为1907年以来，他在追求一个更大的目标：广义相对论。

广义相对论的发现史更复杂一些，这是一段曲折的历史。我无法把它同前面所讲的狭义相对论的简单历史相比较。在量子理论领域，普朗克开了爱因斯坦的先河；在狭义相对论中，洛伦兹激发了他；而通向广义相对论的漫漫长路，是爱因斯坦独自开创的。

在他的发展中，我们再也感觉不到在他 1905 年发表的著作中的那种典型的轻快的风格。1907 年，他发现了等效原理的简单表达方式，他认识到物质会使光发生弯曲，来自太阳的光谱线相对于在地球上产生的相同谱线将表现出向红端的微小移动 (9)。在接着的三年半里，他的注意力集中到了量子理论这一危机的现象，而相对论问题还不那么急切 (10)。他致力于广义相对论是从 1911 年到达布拉格以后开始的。在那里，他通过一个模型理论学会了很多东西。他计算了光线经过太阳所发生的弯曲，结果是不彻底的，因为他这时还相信空间是平直的 (11)。他 1912 年夏回到苏黎世时，得到一个基本发现：空间不是平直的；世界的几何不是欧几里得的，而是黎曼的。在老朋友、数学家格罗斯曼 (Grossmann) 的大力帮助下，他建立了几何与引力之间的第一个联系。他怀着一贯的乐观，相信自己已经发现了寻找了 50 年的引力场理论 (13)。不过到 1915 年他才完全认识到，他那个理论实际上是百孔千疮。也就在这个时候，希尔伯特 (Hilbert) 开始了他关于引力的重要工作 (14d)。经过几个月高度紧张的工作之后，1915 年 11 月 25 日，爱因斯坦提出了他的经过修正的理论的最终形式 (14c)。

一周前他就得到了两个异乎寻常的结果。怀着 1907 年以来一直洋溢的激情，他发现了长期令人困扰的水星近日点运动的正确解释。这是他科学生涯的一个高峰，令他兴奋不已，3 天内几乎不能工作。另外，他还发现原来的光线弯曲的结果太小了，少了个因子 2。1919 年这第二个预言也被证实了，爱因斯坦成了一个圣者 (16b)。

1915 年后，爱因斯坦继续审查广义相对论的问题。他第一个提出了引力波理论 (15d)，他也是广义相对论宇宙学即一般意义的

宇宙的现代理论的奠基人 (15e)。宇宙膨胀是哈勃 (Hubble) 在爱因斯坦生前发现的；射电星系、类星体、中子星，也许还有黑洞，则是在他去世以后才发现的。这些后爱因斯坦的天文观测的发展在很大程度上说明了人们近来对广义相对论的兴趣的极大复苏。关于广义相对论从 1915 年之后直到目前的发展，我将在 (15) 中概括说明。

还是回到以前。1915 年后，爱因斯坦在相对论领域的活动，越来越少地关心广义相对论的应用，更多的是寻求它的推广。在广义相对论产生以后的那几年，这种追求看来是很合理的：按照广义相对论，引力场的存在不容分割地同物理世界的几何交织在一起。那时候，电磁场是除引力场外惟一已知其存在的场，没有什么事情比它的存在问题更吸引人了 (17a)。黎曼几何没能将电磁几何化。那么，是不是应该创立一种更为普遍的几何，使电磁场在这个几何中也能像引力场那样基本呢？如果说狭义相对论统一了电与磁，广义相对论几何化了引力，难道下一步不该是统一电磁与引力并将它们几何化吗？法拉第 (Faraday) 在实验统一了电与磁之后，他不是也让一块金属片从皇家研究所演讲厅的天顶落到地板的垫子上，想看看是不是引力也能感生电流吗？他不是这样写着吗：“如果证明这种希望是有根据的，那么，我现在正努力去把握的这种力，在它迄今不可改变的特性上，表现得多么伟大，多么神奇，多么壮观啊！向人类头脑开放的新的知识领域，又是多么宽广啊！”而当他的实验毫无结果时，他不也这样写吗：“它们没有动摇我的在引力和电之间存在着联系的强烈感觉，尽管它们没有证明这种关系是存在的” [W1]。像这样的思想和幻想驱使爱因斯坦设计统一场论的蓝图，它的目的既不是为了接纳不明现象，也不是为

了解决任何疑难问题，而纯粹是一种对和谐的向往。

在广义相对论的路上，爱因斯坦看到 19 世纪的黎曼几何正等着他。在 1915 年，他和同行们即将追寻的那个更普遍的几何却不存在，要靠他们自己发明。应该强调，统一蓝图不光是寻求新几何的原动力。1916 年，数学家们承认在广义相对论的激发下，为他们自己的理由，也开始了一样的追求。于是，爱因斯坦的工作直接引来了一个新的数学分支：联络理论 (17c)。

20 世纪 20 年代到 30 年代间，人们明显感到存在着非引力和电磁起因的力。爱因斯坦没有理会这些新力，尽管不论过去还是现在，它们的基本意义并不亚于那两个久为人知的力。他还在继续寻找他过去的那个引力与电磁的统一。一条路失败以后，又走新的一条。他曾研究过比我们熟悉的四维时空维数更高的世界 (17b) 或一种新四维世界的几何 (17d)，这些工作都徒劳无获。

近些年来，探寻所有力的统一，成为物理学的一个中心议题 (17e) 方法是新的，也取得一些明显的进步 (2b) 但爱因斯坦将引力同其他力联系起来的梦想，还远没实现。

追随爱因斯坦的科学旅行，就要结束了。现在我们来看他对量子理论的贡献。我要补充一句，1906 年下半年，爱因斯坦因为从根本上正确解释了例如像金刚石那样的坚硬固体在低温下的反常行为而成为固体量子理论的奠基人 (20)。前面对光量子假说的统计来源的评论，也有必要多说几句。爱因斯坦 1905 年 3 月的论文包含着两个、而不是一个假设。第一，在只考虑纯辐射（不与物质耦合）性质的情况下，光子被想象为一个小能量包。第二，爱因斯坦假定——他称它为启发性原理 在辐射与物质耦合（即发射和吸收）时，光以同样离散的能量包形式产生或湮灭 (19c)。这一

点，我相信是爱因斯坦对物理学的一个革命性贡献（2）它推翻了所有现成的光与物质相互作用的概念。我将详细描述启发性原理所遭遇的普遍怀疑的不同原因（19f）这种阻力 即使在人们认识了爱因斯坦的其他卓越贡献以后，甚至在以启发性原理为根据的光电效应的预言被证明获得了高度成功以后，也从没有减弱过（19e）。

带着一份能量的光量子，慢慢地演变成为携带着能量和动量的光子（21），这是一种具有零质量和单位自旋的基本粒子。从来没有哪个新基本粒子的建议像光子那样遭遇过那么强大的阻力（18b），也没有哪个人比玻尔更长期地抵制光子（22）。所有这些阻碍，等到光被电子散射的实验（康普顿效应）证明了爱因斯坦是正确的时候才消失（21f,22）。

光子概念刚确立几个月，量子力学便诞生了。我在（25）详细记述了爱因斯坦对这一新发展的反应。他最初认为量子力学包含着逻辑矛盾（25a），但没过多久，他确信量子力学是对自然的一种不完备的描述（25c）。不过，他还是承认，量子力学的非相对论形式确实是一个巨大进步。他提名薛定谔和海森伯获诺贝尔奖，不过是这种看法的一个表现（31）。

然而，对量子力学的相对论形式，即我们知道的量子场论，爱因斯坦从没说过一句好话。这个理论的成功并没有感动他。1912年，有一次谈到量子理论时，他说过，它越成功就越显得无聊（20）。在他后来的岁月中，谈到一个成功的物理理论时，他常拿旧的引力理论来做例子（26）。牛顿不是已经成功两个多世纪了吗？而他的理论不也还被证明是不彻底的吗？

爱因斯坦从没放弃寻找一个能容纳量子现象而同时无论如何

又能满足他对因果律的渴望的新理论。他关于在未来的统一场论中相对论和量子理论的相互作用的观点，将是本书最后一个科学章节要讨论的问题（26），那时我还会回顾这里描绘的图景。

最后，我来总结一下自己的观点。牛顿的因果律一去不复返了。相对论与量子理论的综合还没有完成（2）。

在这样的综合出现之前，对爱因斯坦的理想图景（vision）的任何评说，必然是这个开放的历史的一部分。

浏览就到此为止。下一步，我要对相对论和量子理论做一般性的评论，接下来我们将走入爱因斯坦的早年生活。然后，开始谈物理学。

## 参考文献

- B1. S. Brunauer, *J. Wash. Acad. Sci.* **69**, 108, (1979).  
 B2. I. Berlin. *Personal Impressions*, pp. 145, 150. Viking, New York, 1980.  
 E1. A. Einstein, *Die Vossische Zeitung*, May 23, 1916.  
 E2. —, *Sozialistische Monatshefte*, 1919, p. 1055.  
 E3. —, *Neue Rundschau* **33**, 815 (1922).  
 E4. —, statement prepared for the *Liga für Menschenrechte*, January 6, 1929.  
 E5. —, letter to K. R. Leistner, September 8, 1932.  
 E6. — in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, Ed.), p. 684. Tudor, New York, 1949.  
 E7. —, *Bull. Soc. Fran. Phil.* **22**, 97 (1923).  
 E8. — in I. Newton, *Opticks*, p. vii. McGraw-Hill, New York, 1931.  
 E9. —, *Naturw.* **15**, 273 (1927). English trans. in *Smithsonian Report*

① 在本书里，作者常用 vision 一词来说爱因斯坦的统一（或综合）的“形象”在前言里已经出现过了；以后在第 2 章和第 26 章还会提到。——译者



- for 1927, p. 201.
- E10. — in *Emanuel Libman Anniversary Volumes*, Vol. 1, p. 363. International, New York, 1932.
- E11. —, [E6], p. 31.
- E12. —, *Nature* **119**, 467 (1927); *Science* **65**, 347 (1927).
- E13. Margot Einstein, letter to M. Schapiro, December 1978.
- G1. G. Gamow, *My World Line*, p. 148. Viking, New York, 1970.
- J1. R. Jost, letter to A. Pais, August 17, 1977.
- K1. A. Kastler, *Technion - Informations*, No. 11, December 1978.
- N1. O. Nathan and H. Norden, *Einstein on Peace*, Schocken, New York, 1968.
- O1. J. R. Oppenheimer in *Einstein, a Centennial Volume* (A. P. French, Ed.), p. 44. Harvard University Press, 1979.
- P1. A. Pais in *Niels Bohr* (S. Rozental, Ed.), p. 215. Interscience, New York, 1967.
- R1. B. Russell, [N1], p. xv.
- S1. E. Salaman, *Encounter*, April 1979, p. 19.
- W1. L. P. Williams, *Michael Faraday*, pp. 468–469. Basic Books, New York, 1965.

## 第 2 章 相对论和量子理论

爱因斯坦的生命结束于……

要求我们去实现 [ 他的 ] 综合。

W. 泡利 [ P1 ]

### 2a. 有序的转变和革命时期

在物理学的全部发展史中，从没有哪个时期像从 1895 年到 1905 年的 10 年那样，发生过那么急剧、那么难以预料和那么广泛的转变。在日新月异的变化中，X 射线 (1895)、塞曼效应 (1896)、放射线 (1896) 和电子 (1897) 的实验发现，以及红外光谱学从 3 微米到 60 微米的扩展，展现出一片新的景象。量子理论 (1900) 和相对论 (1905) 的诞生，标志着一个新时代开始了。人们发现，物理学理论的基础本身需要修正。将道路引向理论新概念的两个人，一个是柏林大学教授普朗克，他一直为寻求频率和温度的普适函数所困惑——或者说着迷。从 1859 年基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff) 建立他的黑体辐射的基本定律以来，就知道应该存在这样的函数 (19a)。<sup>①</sup> 另一个是伯尔尼的瑞士专利局技术员爱因斯坦，他在一种应该说是辉煌的孤独状态下工作着 (3)。

<sup>①</sup> 在这一章里，我最后一次用括号来代指章节，如 (19a) 指第 19 章 a 节。

从许多外表特征看，这两个人完全不同。他们的认识背景、生活环境、个性气质和科学风格，都差别极大。但是，他们却有着深层的相似。在祝贺普朗克 60 周年寿辰的讲话中，爱因斯坦说：

渴望看到那……前定和谐 (preestablished harmony)<sup>①</sup> 是无穷的毅力和耐心的源泉。我们看到，普朗克怀着这种渴望献身于我们科学的最普遍的问题，而不使自己为那些更能获益和更容易实现成就的目标所诱惑。我常常听到，同事们想把他的这种态度归因于他那非凡的意志和修养，我认为这是完全错误的。能使人们达到这些成就的情感状态，是同有宗教信仰的人或恋爱中的人所有的那种状态相似的；日常的追求并不是来自什么设计和计划，而是来自直接的需要。 [E1]

这种对和谐的压倒一切的向往，也像对普朗克一样地指引着爱因斯坦的科学生活。两个人都非常钦佩对方。

这一章的主要目的，是引导性地评论爱因斯坦对量子理论和相对论的态度，为此，回想一下爱因斯坦所喜欢的在两类物理学理论之间作出的区分，是有帮助的 [E2]。他说，大多数理论是构造性的，它们用相对简单的命题来解释复杂的现象。一个例子是气

<sup>①</sup> 这是莱布尼兹 (Leibniz) 的用语，爱因斯坦认为特别合适。(莱布尼兹认为，万物由彼此无相互作用的绝对单纯的“自然的真正原子”即“单子”所构成，而万物则相互作用而构成一个和谐的整体，这是因为上帝在创造世界时，就使单子具有这样的本性，在后来的全部演化过程中，每个单子都遵循各自的规律发展，而又与其他单子协调。“灵魂遵守它自身的规律，形体也遵守它自身的规律，它们的会合一致，是由于一切实体之间的前定和谐，因为一切实体都是同一宇宙的表象。”参见《单子论》(Monadologie)。——译者)

体的运动学理论 在这个理论中, 气体的力、热和扩散等性质 都归结为分子间的相互作用和运动。“构造性理论的优点在于它们的综合性、适应性和明确性。”还有些理论是原理性的理论, 它们用分析而不是综合的方法: “它们的出发点不是假设的构造, 而是从经验中观察到的现象的普遍特征。”例如在热力学中永动机的不可能性。“原理理论 [ 的优点在于 ] 它们的逻辑的完整性和基础的可靠性。”然后, 爱因斯坦接着说: “相对论是一个原理理论。”这些话写于 1919 年, 相对论那时已变得“像一幢两层楼的房子”: 一层是狭义相对论, 一层是广义相对论。(当然, 狭义相对论本身也是一个原理理论。)

这样 在 1895—1905 的 10 年的最后, 一个新的原理理论出现了: 狭义相对论。当时量子理论的情形如何呢? 它既不是原理理论, 也不是构造理论, 实际上, 它根本谈不上是什么理论。普朗克和爱因斯坦关于黑体辐射的最初结果表明, 经典物理学的基础存在着某些错误, 但是, 旧的基础并没有立即被新的基础所取代, 正如狭义相对论最初所经历的那样 (7)。德拜 (Peter Debye) 回忆说, 普朗克的工作刚发表, 他们就在亚琛 (Aachen) 讨论过, 他当时正在那里跟索末菲 (Arnold Sommerfeld) 学习。普朗克定律与数据符合得很好, “但是我们不知道量子是不是某种根本上全新的东西” [B1].

1900 年量子理论 (19a) 和 1905 年狭义相对论的发现 (7) 的共同遭遇是, 没有新闻界的宣扬和市井歌舞的祝贺, 也没有人立即站出来宣称新时代的黎明来到了。不过, 这些相似都结束了。人们对狭义相对论的接受, 要快一些, 也容易些。诚然, 像洛伦兹和庞加莱那样的大人物, 也没那么容易认识到, 这是一个新的

运动学原理的理论，而不是一个构造的动力学理论（8）这个理论给哲学界带来了一场不可避免的混乱。作为证据，可举柏格森迟至 1922 年就此题材写的那本小册子 [B2]。不过，像普朗克那样的老一辈以及新一代的理论家们很快就认识到，狭义相对论已经通过爱因斯坦在他 1905 年论文(7a)中所提出的两个基本原理而完全确立起来了。剩下的事情就是这些理论原理的应用。狭义相对论一出现就“万事皆备”从来没有什么“旧”的相对论。

相反，“旧”量子理论从 1900 年到 1925 年的发展，靠的是一些非原理的但是有趣的发明和一些特设的法则的运用，而不是对一组公理含义的综合的考察。这并不是说相对论比量子物理学的发展路线“更好”或“更健康”而是强调这两个理论在演化中的深刻差异。我们也不应该低估包括爱因斯坦在内的旧量子理论的征服者们的巨大的、高度建设性的和长久的贡献。下面的四个方程，比一篇长篇累牍的博士论文都能更好地说明问题：

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.1)$$

这是热平衡状态下，关于作为频率  $\nu$  和温度  $T$  的函数的黑体辐射谱密度  $\rho$  的普朗克公式 ( $h$  = 普朗克常数,  $k$  = 玻耳兹曼常数,  $c$  = 光速)。它是辐射的量子理论的第一个方程。值得注意的是，旧量子理论是从对像黑体辐射那样复杂的问题的分析中产生出来的。从 1859 年到 1926 年，这个问题一直处在理论物理学的前沿，先在热力学，然后在电磁理论，后来又在旧量子理论，最后进入量子统计学；

$$E = h\nu - P \quad (2.2)$$

这是爱因斯坦 1905 年为在频率为  $\nu$  的光的辐照下，从金属表面逸

出的光电子的能量  $E$  所给的方程 (19e)，它是辐射和物质相互作用的量子理论的第一个方程；

$$c_v = 3R \left( \frac{h\nu}{kT} \right)^2 \frac{\exp(h\nu/kT)}{[\exp(h\nu/kT) - 1]^2} \quad (2.3)$$

这是爱因斯坦 1906 年为（其中所有格点都在平衡位置附近以惟一频率  $\nu$  作简谐振荡的）理想结晶固体的克原子比热  $c_v$  给出的方程（ $R$  为普适气体常数）(20)，它是固体量子理论的第一个方程而

$$\text{里德堡常数} = 2\pi^2 e^4 m / h^3 c \quad (2.4)$$

是玻尔在 1913 年给出的，它是原子结构的量子理论的第一个方程。早在人们认识什么是量子理论的原理以前，这样一些方程的成功，令人感到显然应该存在这样的理论。它们的每一次成功，都是扇向神经典概念的一记耳光。理论的新的内部前沿（inner frontiers）和未曾料想的与旧知识的矛盾，已经在如下的一些地方显露出来：经典统计力学的 [能量] 均分定理不能普遍地有效 (19b)；电子在封闭轨道上旋转而不产生辐射。

旧量子理论经历了 25 年的物理学革命，说它是革命，是在于它在不断地推翻现存的秩序。另一方面，相对论，无论狭义的还是广义的，从来就不是这种意义上的革命。它的出现，没有产生什么破坏，而是把旧秩序扩展到新领域，把知识的外部边界（outer frontiers）推得更远。

举一个简单例子就能很好说明这种状况。按狭义相对论，两

① 作者用 inner frontiers 和 outer frontiers 来表明理论的内部和外部边界或前沿的扩展，前者指理论的内部已经出现了问题，需要“推翻现存的秩序”才能解决；后者指知识的增长对于旧的理论体系“没有产生什么破坏”，只是范围扩大了。在 (18b) 作者还会用这两个词，而且特别强调 inner（内在的）和 outer（外在的）两者之间的区别。——译者

个在相同方向上的速度  $v_1$  和  $v_2$  的物理和  $\sigma(v_1, v_2)$  由

$$\sigma(v_1, v_2) = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (2.5)$$

给出，这是庞加莱和爱因斯坦在 1905 年各自独立获得的结果。这个方程最新奇的地方在于，它包含着一个极限律，即  $\sigma(v_1, c) = c$ 。它还表明，对任何速度，无论多么小，经典的结果  $\sigma(v_1, v_2) = v_1 + v_2$  都不再是严格正确的。但是，由于光速  $c$  的量级在每小时在 10 亿公里以上，这个方程也说明经典结果对于它过去适用的所有速度来说，仍然是可靠的。这就是随相对论同时产生的对应原理。因为对应原理，从伽利略、牛顿到麦克斯韦的那些老前辈们，仍然可以平安地躺在他们的荣耀里。

量子理论的情况就很不一样了。的确，在比热表达式发现之后，马上就明显看到，方程 (2.3) 给出了高温下 6 卡/摩尔的杜隆—珀替值 (20a)。同样，在普朗克的量子公式 (方程 2.1)) 和经典的“瑞利—爱因斯坦—金斯极限” ( $h\nu \ll kT$ ) 之间建立联系，也没经过多长的时间 (只有 5 年 (19b))。这两个结果表明，经典的能量均分的统计定律，(不那么严格地说) 在相应的高温极限下还可以保留下来。但是，对于方程 2.2) 和 (2.4) 过去 (和现在) 都不存在任何相应的极限情形。1925 年前，这些事情都没有从第一原理得到过证明。只是在量子力学、量子统计学和量子场论发现以后，方程 (2.1) 到 (2.4) 才获得一个理论基础。

方程 (2.5) 的主要优点在于它同时回答了两个问题：新理论从哪里开始？旧理论在哪里适用？新理论的出现也就意味着对过去理论的明显突破，而旧理论马上又能被承认，这表明这样的突破应

该是我所谓的有序的转变。另一方面，科学中的革命发生时，首先表现出来的只有新理论，从新理论的出现到旧理论的再适应 [在物理学中总是发生这样的事情，它是一个规律 (rule)，而不是定律 (law)]，我们要经历一段革命时期。因此，相对论的诞生是有序的转变，旧量子理论的时期是革命的时期。强调一句：我提出这种区别是为了适应理论发现的历史过程，而与这个或那个物理学理论的内容没有关系。（我不会反对把 1905 年对以太的放弃和对绝对同时性的拒绝以及 1915 年对牛顿绝对空间的否定，称为令人震惊的、奇异的、大胆的、极富想像力的、勇敢的……或革命的步骤。）

没有谁能比爱因斯坦更早和更好地认识相对论和量子理论的演化过程中存在的明显差异，他是惟一在两个理论的创立中产生过巨大作用的人。当然，也没有谁能比他更有资格来评说科学革命的结构。但他也曾经是个阻碍者。让我们来看，关于这个问题，他是怎么说的。

1905 年初，他在给朋友的一封信中宣布他即将发表两篇关于量子理论和狭义相对论的文章。他称第一篇论文是“非常革命的”。至于第二篇，他只是说：“它的运动学部分会令你感兴趣” [E3]

1921 年 6 月 13 日，爱因斯坦在伦敦做过一次相对论的演讲。从有关报道中我们看到：“他 [爱因斯坦] 反对那种认为新原理是一场革命的观点。他告诉听众，它是法拉第、麦克斯韦和洛伦兹工作的直接产物，或在某种意义上说，是那些工作的自然完善。而且，关于它，没有什么特殊的东西，自然也没有任何有意图的哲学的东西……” [N1]。

1919 年秋，在与一个学生讨论时，爱因斯坦递给她一份电报，



电报说，经过太阳的光的弯曲与他的广义相对论的预言一致。学生问他，如果没有得到证实，他会怎么说。爱因斯坦回答：“Da könnt’ mir halt der liebe Gott leid tun. Die Theorie stimmt doch.”那么，我只好为亲爱的上帝感到遗憾。无论如何，这个理论还是正确的[R1]。（这句话，与爱因斯坦第一次听到光线弯曲消息时非常激动的事实[16b]并不矛盾。）

这三个故事，反映了爱因斯坦对相对论一贯的态度：它们是有序的转变，在这个他亲身经历的转变中，他起着他所深信的那个难以捉摸但并不邪恶的上帝的一个工具的作用。

至于爱因斯坦如何评价自己在量子物理学发展中的作用，首先他在1905年的论文“关于光的产生和转化的一个启发性的观点”中说它是很革命的[19c)。接下来，我们听他自己的总结：“我在量子领域的发现只是偶然和零星的想法，它们是在同巨大问题所进行的毫无结果的斗争过程中产生的。因为这些东西在这个时刻接受这么大的荣誉，我感到很惭愧”[E4]。<sup>①</sup>这些话是在1929年6月28日讲的，那天，他从普朗克手中接受了普朗克奖章。到这个时候，旧量子理论的革命性阶段——恰好也是爱因斯坦最富创造性的那些年月！——已经为非相对论量子力学（和它向相对论量子理论拓展的开端）开辟了道路。到1929年时，几乎每个人都认为量子力学是一个新的原理理论。

爱因斯坦却不这么认为。对他这样一个根本不认为相对论是革命的人来说，量子理论仍然处于革命的状态，而且在他看来，他

<sup>①</sup> 我把 Ich bin beschämt 译为 I am ashamed（我很惭愧）而没有译为 I am embarrassed（我很困惑），因为我认为那更准确地反映了爱因斯坦的心情。

的余生还会在这场革命中度过；因为按他的观点，旧理论还没有很好地适应。这是对爱因斯坦的科学哲学最简洁的描述。他在内心深处更倾向于有序的转变，而不喜欢革命。他可能很激进，但绝不是叛逆者。

在1929年的同一篇讲话中，他还说：“我高度赞赏年轻一代物理学家的成就，他们叫它量子力学，我也相信这个理论在深层次上的正确性，但是我认为理论在统计规律上的局限只是暂时的。路已经开始分离了。爱因斯坦已开始孤独地去寻找他的原理理论，这个理论将以一种有序的方式保留经典的因果律，而且，量子力学将可能作为一个构造性理论而从它推导出来。

爱因斯坦对量子力学的批判，将在(26)中详细讨论。对于它的本质，我没有多大兴趣，更吸引我的是，他批判的动机是什么？是什么驱使他去研究被他自己说成“从外部看来十分古怪”[E5]的东西？他为什么会在他的余生继续“唱着我孤独可怜的老歌”呢[E6]？如我将在(27)中讨论的，这些问题的答案与量子力学发现之前爱因斯坦想象的一个综合的物理理论的伟大设计有关，那是一个粒子和场的理论，广义相对论和量子理论将在其中被综合在一起。这一点，他没能实现。

直到今天，我们也没能实现这个综合。

自从爱因斯坦第一次开始他的计划以来，需要用原理理论来解释的现象已经越来越多。理论上的进步让人印象深刻，但一个包罗万象的理论还不存在。随着现象变得越来越复杂，新综合的需要也显得越来越强烈。

因此，任何对爱因斯坦的理想的评价，都只能建立在某个有倾向的立场上。这个立场必然是暂时的，它是什么，或者至少在一

个物理学家看来，这个立场是什么，哪怕只有一个极简单的记录，也会有帮助的。这个记录，就是下面的“时间囊”，它是献给现在还没出生的后代物理学家的。<sup>①</sup>

## 2b. 时间囊<sup>②</sup>

当爱因斯坦和其他一些人展开他们的统一计划时，人们知道，存在着 3 种现代意义的粒子——电子、质子和光子——存在着两种基本相互作用：电磁力和引力。到今天，粒子已有几百种，把它们进一步地归并到更基本的单位，看来是不可避免的。现在我们相信，至少存在 4 种基本相互作用，所有这四种类型的力——引力、电磁力、弱相互作用力和强相互作用力——的统一，是当代研究的一个活跃课题，但还没有完成。

(狭义相对论意义下的) 相对论量子场论是进行这些探索的主要工具。我们对一般的场论方法的信心，首先而且主要是基于量子电动力学 QED 的巨大成功。以一个数字为例，电子的磁旋因子  $g$ ，既能说明这个理论当前的预言能力，也能说明当今的实验精度。

$$1/2(g-2) = \begin{cases} 1\ 159\ 652\ 460\ (127)\ (75) \times 10^{-12} & \text{纯 QED 预言}^{\text{③}} \\ 1\ 159\ 652\ 200\ (40) \times 10^{-12} & \text{观测结果} \end{cases}$$

下面的一节只是提供一个简短的记录，不做进一步解释，也不给出参考文献。浏览它不会造成叙述的中断。

② 时间囊 (time capsule) 照《韦氏词典》(Webster's Third New International Dictionary) 的解释，“是一种当代文物史料的储藏器，埋藏起来，如在地下或基石下，留给后人来打开。我们在 (25b) 会看到，爱因斯坦还真为一个时间囊写过一封信。——译者

在这个预言中 (不包括  $\mu$  子和强子的微弱贡献)，精细结构常数  $\alpha$  的最佳值用的是  $\alpha^{-1} = 137.035\ 963(15)$ 。(g-2) 的预言值的不确定性，主要来自实验上  $\alpha$  的不确定性，它产生误差 127)。误差 75 主要来自第 8 阶计算的不确定性 [K1]。

不过，现在已经很明显，这一个场论分支将与其他场的理论相融合。

“如果我们能向爱因斯坦呈交一个广义相对论和量子理论的综合，那么，同他讨论问题将会相当容易” [P1]。今天，这种综合遇到了概念的和技术的困难，与引力塌缩相关的奇点的存在，被一些人认为是广义相对论方程不完备的标志。现在还不知道这些奇点能不能被量子效应消除。

人们希望 在 20 世纪内能观测到引力波 (15d)。

弱相互作用和电磁相互作用的最终统一大概还没有实现，但是，一个坚固的堡垒看来已经通过包含自发对称破缺的局域非阿贝尔规范理论建立起来了。作为这个理论的一个结果，人们现在广泛相信，弱相互作用是通过有质量的矢量介子传递的。现在我们正盼望着在 10 年内观测到这些介子。

人们普遍认为，强相互作用也是通过局域非阿贝尔规范场传递的。它们的对称性没有被打破，所以对应的矢量介子没有质量。为禁止这些“非阿贝尔光子”作为单个自由粒子产生出来，人们提出了一种动力学，这个动力学的技术性考察还处在初级阶段。

在通向大统一的路上，我们已经迈出了有希望的几步，在紧致的非阿贝尔群中，统一了弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用。在多数大统一理论模型中，质子都是不稳定的，现在，人们正热切地等待着有关质子命运的消息。

我们最主要的目标是超统一，即全部四种力的统一。有些人相信，这个目标并不遥远，而且超引力将提供答案；另一些人则不那么有信心。

所有这些关于统一的现代工作，都可以说表现为一种类似

于爱因斯坦当年尝试过的几何化纲领，尽管五花八门的几何化潮流比他所预想的大，而且这个纲领中的量子框架也不会令他喜欢。

在寻求正确场论的过程中，对模型理论的检验揭示出，很可能存在一些新奇的扩展了的结构（孤子、瞬子、单极子），在对这些结构的考察中，拓扑方法进入了这个物理学领域。更一般地说，在过去 10 年里，我们清楚地看到，量子场论在结构上比以往认识的要丰富得多。我们当前的问题是：含自发对称破缺的非阿贝尔规范场的重整化、非渐近自由和超对称性。

新粒子的增殖促使人们尝试一些更简化的基本描述。照目前的图景，物质的基本构成是：两类  $-1/2$  自旋的粒子，即轻子和夸克，各种  $-1$  自旋的规范玻色子，有的有质量，有的没有质量；以及（推测性更强的）一些  $-0$  自旋基本粒子。迄今为止，我们观察到的惟一规范玻色子是光子。现在，我们已经检测到 3 类带电轻子。夸克是为观测到的强子而假设的构造基元，现在已经至少认定了 5 类夸克。人们提出强相互作用的动力学以禁止独立自由夸克的产生。这种夸克禁闭，还没有以令人信服的方式补充到理论中去。也不知道有什么标准能够使人们判断应该有多少种轻子和夸克存在。

弱、电磁和强相互作用具有明显的内禀对称特性，但是这些对称的层次还没有从理论上得到很好的理解。也许最令人疑惑的是空间反射下微小的非不变性效应，以及在时间反演下更小的非不变性效应。还有一点令人疑惑的是，后一个现象至今我们只在一种情况下，即在  $K^0 - \bar{K}^0$  系统中看到过。（这些现象是在爱因斯坦去世以后才第一次被发现的。我常想，如果他相信“纯粹数学结

能使我们发现概念和联系这些概念的定律” [E7]，他对这些发现会有什么反应?)

我们不知道电荷为什么是量子化的，但是在未来的规范理论的框架内它可能是很容易解释的。

总之，今天的物理学家正在为满足爱因斯坦对综合的要求而艰难地工作着，而他们使用的方法也许会遭到爱因斯坦的批判。大约从 1970 年以来，我们比二三十年前看到了更多的前进的希望。不过，现在研究的理论结构还不像人们所希望的那么简单和实用。绝大多数证据表明，粒子和场的理论还不完备，不论进步多大 爱因斯坦过去的抱怨在今天看来仍然有理：“已经逐渐与所观察到的现象相联系的理论，带来了一大堆令人难以容忍的独立的假设的堆积 [E8]。同时，也没有任何实验证据或内部矛盾可以说明广义相对论、狭义相对论或量子力学的假设存在着相互冲突或者需要修改和精致的地方。因此，我们没有任何根据来肯定或否定这些假设会永远不加修改地保留下来。

我用爱因斯坦自己的话来结束时间囊这一小节。他曾用这些话来评论物理学定律中出现无量纲常数（如精细结构常数和电子-质子质量比）的意义。关于这个问题，他不知道什么，我们也一无所知：“在一个合理的理论中，不存在任何只能靠经验决定其大小的 [无量纲] 数。当然，我不能证明……自然规律中的无量纲数——从纯粹的逻辑观点来看，它们同样可以有其他的数值——不应该存在。根据我的 ‘Gottvertrauen’ [对上帝的信仰] 这似乎是显然的，但很可能没几个人会有这样的看法” [E9]。

### 参考文献

B1. U. Benz, *Arnold Sommerfeld*, p. 74. Wissenschaftliche Verlags Ge-

- sellschaft, Stuttgart, 1975.
- B2. H. Bergson, *Durée et Simultanéité: A Propos de la Théorie d'Einstein*. Alcan, Paris, 1922.
- E1. A. Einstein, *Ansprachen in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, p. 29. Müller, Karlsruhe, 1918.
- E2. —, *The London Times*, November 28, 1919.
- E3. —, letter to C. Habicht, undated, most probably written in March 1905.
- E4. —, *Forschungen imd Fortschritte* **5**, 248 (1929).
- E5. —, letter to L. de Broglie, February 8, 1954.
- E6. —, letter to N. Bohr, April 4, 1949.
- E7. —, *On the Method of Theoretical Physics*. Oxford University Press, Oxford, 1933. Reprinted in *Philos. Sci.* **1**, 162, (1934).
- E8. —, *Lettres à Maurice Solovine*, p. 130. Gauthier-Villars, Paris, 1956.
- E9. —, letters to I. Rosenthal-Schneider, October 13, 1945, and March 24, 1950. Reprinted in [R1], pp. 36, 41.
- K1. T. Kinoshita and W. B. Lindquist, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1573 (1981).
- N1. *Nature* **107**, 504 (1921).
- P1. W. Pauli, *Neue Züricher Zeitung*, January 12, 1958. Reprinted in *W. Pauli Collected Scientific Papers*, Vol. 2, p. 1362. Interscience, New York, 1964.
- R1. I. Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth*, p. 74. Wayne State University Press, 1980.

## 第 3 章 年轻的物理学家

Apart... 4. 在行动或功效上远离其他；  
分离地、独立地、各自地。

《牛津英语词典》

赫尔曼·爱因斯坦 Hermann Einstein 在 1876 年的什么时候成为一个名为以色列与列维 (Israel and Levi) 床用鸭绒店的合伙人，我们不太清楚。但是可以肯定，那时，他和他的母亲以及所有兄弟姐妹已经在符腾堡 (Württemberg) 王国的乌尔姆 (Ulm) 生活了一段时间。8 月 8 日 赫尔曼与保莉妮·科赫 (Pauline Koch) 在坎城 (Cannstatt) 的犹太教堂结婚，就定居在乌尔姆，先住在大教堂广场 (Münsterplatz) 后来，在 1878—1879 年新旧交替之际，他们搬到火车站大街 (Bahnhofstrasse)。在 1879 年 3 月一个阳光明媚的星期五，他们的第一个儿子出世了，成为新德意志帝国的一个公民 (符腾堡在 1871 年加入了新的德意志帝国)。第二天，赫尔曼就去为儿子登记。将出生证直译过来，是这样的：“字第 224 号。乌尔姆，1879 年 3 月 15 日。商人赫尔曼·爱因斯坦，住乌尔姆火车站大街 135 号，信犹太教，来向本户籍员陈述如下：妻子，保莉妮·爱因斯坦 娘家姓科赫 信犹太教，于 1879 年 3 月 14 日上午 11:30 在乌尔姆家中生一男婴，名阿尔伯特。所述确实。签名：赫尔曼·爱因斯坦。登记者 哈特曼”。1944 年，火车站大街的房子在一次空袭中被毁。出生证现在还能在乌尔姆档案馆里找到。



赫尔曼和保莉妮有两个孩子，阿尔伯特是老大。1881年11月18日，他们的女儿玛丽雅 (Maria) 出世了。玛雅 (Maja 人们总这样叫她) 妹妹可能是爱因斯坦感到最亲近的人。两个孩子的名字，都没照祖宗的传统来取，说明爱因斯坦一家已经有些被同化了，这在19世纪的广大德国犹太人中是一种潮流。阿尔伯特是用他祖父亚伯拉罕的名字来命名的（如果人们可以这么说的话）。<sup>①</sup>但是 玛丽雅这个名字 不知道是怎么来的。“在这个家庭里 思想自由，对宗教不教条，父母也都是从这样的环境里长大的。他们不谈宗教事务和戒律”[M1]。阿尔伯特的父亲感到骄傲的是，在他的家里，没有犹太人的生活习惯 [R1]。

玛雅在1924年为哥哥写了篇传记，是我们回忆阿尔伯特童年家庭生活的主要来源。玛雅告诉我们，阿尔伯特出生时，头异乎寻常地大 后脑勺突起 这形状出奇的头脑 将是永久的 )母亲感到害怕。祖母看到这个家庭的新成员，第一个反应是：“Viel zu dick! Viel zu dick!”（太重了 太重了！玛雅还告诉我们 大人都担心阿尔伯特可能是个痴呆儿，因为好久以后，他才会说话 [M2]。他们的担心是没有理由的。根据爱因斯坦自己的童年回忆，“在他两三岁时，他就想讲完整的句子。每个句子他都自己先轻轻说一遍 觉得都对了 才大声说出来”[S1]。小时候 他很安静 喜欢自己玩儿。他也耍小孩子脾气。有时 他会发怒；在这个时候 他小脸儿阴沉，鼻尖儿发白，谁也管不了”[M2]。有几次，亲爱的小阿尔伯特还向妹妹扔东西。大约7岁时，他不再发脾气了。

父母关系和谐，相亲相爱。母亲个性很强，是位有才华的钢琴

家。她把音乐带进家中，让孩子们从小接受音乐教育。玛雅学钢琴，阿尔伯特从 6 岁起学小提琴，一直到 13 岁。尽管在跟施米德先生( Herr Schmied)学琴的那些年月里，拉琴对他来说是一种沉重的负担，但小提琴后来还是成了他最喜欢的乐器 [R2]。他还自己学会了弹钢琴，特别喜欢即兴弹点东西。

赫尔曼稳重、热心、与世无争，熟人也都喜欢他[R3]。他爱好文学，每到晚上就向家人朗读席勒和海涅的作品 [ R4]。(在阿尔伯特一生中，海涅一直是他喜爱的作家之一)。在中学时代，赫尔曼就表现出数学才能，但他没能实现进大学的愿望，因为家里供不起。

赫尔曼的床用鸭绒生意不很成功。阿尔伯特出生不久，赫尔曼那有事业心、有能力的工程师弟弟雅可布 ( Jakob) 提出，一块儿去慕尼黑办一家小型的煤气和自来水安装公司。赫尔曼同意负责商务，而且投入了他和保莉妮的大部分财产。 1880 年，赫尔曼一家移居慕尼黑，登记的时间是 6 月 21 日。这家规模不大的企业 10 月 11 日开业 开始很有前途 但雅可布雄心勃勃 几年后 他提出办一家电器工厂，生产发电机、弧光灯，并为城市电厂和照明系统生产测量设备。他还建议兄弟俩合起来在慕尼黑市郊的森德林 (Sendling)<sup>①</sup>买所房子。在家人特别是保莉妮父亲的资助下，他们的愿望实现了，公司在 1885 年 5 月 6 日正式注册登记。

阿尔伯特和玛雅很喜欢他们在阿德尔莱斯特街 ( Adelreiterstrasse ) 的新房子，它有一个很大的院子，里面绿树成荫。开始时生意似乎还可以。在一本名为《城市电力的供应》( *Versorgung*

① 现在森德林已成为慕尼黑市区的一部分。 ——译者

von Städten mit elektrischem Strom) 的书中, 我们发现 4 页是关于“慕尼黑 J. 爱因斯坦电气技术工厂和公司”的。我们在这里知道, 兄弟俩曾为慕尼黑—施瓦宾 (Schwabing) 和意大利的瓦拉色 (Varèse) 和苏萨 (Susa) 的电厂提供过设备 [U1]。

因此, 爱因斯坦在一个温暖、安定, 当然也有刺激的环境下度过了他的童年。后来在 60 多岁时, 他回忆了这段时期的一次特殊经历: “我经历了一个奇迹……那是我四五岁时, 家父给我看了一只罗盘” [E1], 它使这个孩子太激动了, “浑身颤抖, 发起冷来” [R5]。“一定有什么东西深藏在事情背后……[我们的] 思维世界的发展, 从某种意义上说, 就是对惊奇的不断摆脱” [E1]。这样的个人经历, 对爱因斯坦成长的作用, 比正规的学校教育要大得多。

5 岁时, 为他请了家庭教师。但是没多久, 不知什么事, 爱因斯坦有一回大发脾气, 向那位女老师摔椅子, 这个时期也就这样突然结束了。大约 6 岁时, 他进了公立小学 (Volksschule)。他是个诚实、执著的学生, 动作不是很快, 解数学习题却很自信, 尽管也会算错。他的成绩很好。1886 年 8 月, 保莉妮写信给她的母亲: “昨天, 阿尔伯特收到了考试成绩, 又是第一名。他的成绩单真是太漂亮了” [E1a], 不过, 阿尔伯特还是一个沉静的孩子, 他不在意与同学玩耍, 他自己做的游戏需要耐心和顽强。他喜欢搭积木之类的游戏。

1888 年 10 月, 阿尔伯特从公立小学进入卢伊特波耳德文法中学 (Luitpold Gymnasium) 在那里一直学到 15 岁。这几年来, 他的数学和拉丁文成绩总是数一数二的 [H1]。但总的说来, 他不喜欢学校生活; 专横的老师, 奴性的学生, 刻板的学习——没

有一样是他愿意的。而且，“他天生讨厌……体育运动……他容易头晕和疲劳”[R6]。在学校里，他感到孤独，几乎没有什么朋友。

然而，他并不缺乏课外的刺激。雅可布叔叔会给他布置数学习题，在他解决了这些问题之后，“这个男孩沉浸在深深的幸福之中”[M3]。在阿尔伯特从 10 岁到 15 岁期间，塔耳木德 Max Talmud)常来他家，对爱因斯坦的教育起了重要的作用。塔耳木德是一个没多少钱的医科大学生，他每星期四晚上来爱因斯坦家吃饭。他让爱因斯坦读一些科学的普及读物。后来，又让他读康德的书。他们两人经常讨论科学和哲学。<sup>②</sup>“在那些年里，我从没见过他读过任何轻松的文学作品，也没见他跟同学或其他同龄孩子在一起。”塔耳木德后来回忆说 [T2]。“他惟一的娱乐是音乐，在母亲伴奏下，他已经会演奏莫扎特和贝多芬的奏鸣曲了” [M4]。爱因斯坦还继续自学数学。12 岁时，他经历了第二个令他惊奇的事情：他得到一本关于欧几里得几何的小书 [H2]，后来他称这本小册子为神圣的几何书。“其内容的明晰和确定给我留下了难以描绘的印象，”[E1]。12 岁到 16 岁，他又自学了微积分。

巴伐利亚法律要求所有中小学生都必须接受宗教教育。在公立小学，只讲天主教。爱因斯坦在家里曾跟一位远亲学过犹太教的基本常识 [M5]。上中学后，继续接受宗教教育。这种灌输的结果是他在 11 岁左右曾有过一段强烈的宗教感情。他太虔诚了，什么事都照戒律说的做。例如，他不吃猪肉 [M6]。后来，在柏林

科学史学家 Arthur Miller 考证，此处应该是吃午饭。——译者

<sup>②</sup> 塔耳木德移居美国后，改名为塔耳梅 (Talmey)。他在一本书中回忆了他早年与爱因斯坦相识的情形 [T1]。

的时候，他告诉一个密友说，他在这期间做了几首献给上帝的歌，而且还在上学的路上热情地唱着这些歌 [S2]。一年后他钻进了科学，这段小插曲也就结束了。他没有受戒（bar mitzvah）也未学会希伯来语。50 岁时，他写信给他在中学的宗教老师弗里德曼（Oberlehrer Heinrich Friedmann）说：“我经常读《圣经》但它的原文我还是不能掌握” [E2]。

还有一个在慕尼黑的故事，他自己有时也喜欢讲给别人听。在中学时，一个老师曾对他说，如果这个孩子不在他的班上，他可能会快乐得多。爱因斯坦回答说他没有做错什么事呀。老师说：“是的，不错。但是，你坐在最后一排笑眯眯的，那样，老师就感觉不到他需要从学生那里得到的尊敬” [S1, S2]。

上面几个爱因斯坦小时候的故事，使我们明白看到，爱因斯坦最典型的个性特征是天生的，而不是后天获得的。这个开始讲话迟钝的小孩，在学校里是第一名（很多人相信他的成绩不好，那是没有根据的），成人后，他的每个科学成就都是经过长期孕育的结果。这个坐在教室里微笑的孩子，成为后来为别的事情发笑的老人。正如我在第 1 章讲过的，他为当局愚蠢地操纵奥本海默事件而朗声大笑。在他晚年，他的和平主义的信仰促使他坚决坦白地表示反对任何权威，然而，在他个人的科学行为中，他不是一位抵抗权威的叛逆者，也不是要推翻权威的革命者（也许，有一次例外<sup>①</sup>）。他的思想是相当自由的，在他看来，除了理性的权威而外，任何形式的权威都必然是可笑的。另一个问题是，他狂热的宗教

相反，爱因斯坦真正的革命性贡献是他 1905 年的光量子论文。有意思的是，他从不相信光量子假说的物理意义已经彻底认识了。这是我在后面几章中要讲的问题。

信仰竟没有留下什么痕迹，就像他后来那样，常常会对一个科学思想倾注高度的热情，然后又毫无结果地将它丢开。关于爱因斯坦的宗教情感，他后来自己写道：“我很清楚，这个青年时代宗教天堂的失去，是我将自己从那个‘仅仅是个人的’（only-personal）[桎梏]中解放出来的第一次尝试”[E3]，这是在他一生中存在的推动力。60岁时，他曾说过他已把自己的肉体 and 灵魂卖给了科学，思想的翅膀从“我”和“我们”飞向了“它”[E4]。但是，他并没有试图远离别人，他一生超脱，一生沉浸在思想世界里。而与众不同的是，他同时也与现实世界往来，从不逃避。

爱因斯坦的另一个也是最重要的个性特征，是他的“离群”（apartness），这一点在他小时候一个人静静的玩乐中，已经表现出来了。从个人的经历比正规的学校生活对他所产生的更大的影响中，我们又看到了这一点。在他认为自习比听课更重要的学生时代，他在伯尔尼专利局在几乎与物理学界没有任何人联系的情况下进行创造性活动的那些日子里，我们还可以看到这一点。这一点，也表现在他与其他人和权威的往来关系上。离群将有利于他单枪匹马和一心一意去追求。最引人注目的表现，就在他从狭义相对论通向广义相对论的道路上。这一特征，还强烈地表现在他对量子力学持深深的怀疑态度的后半生。最后，为了他所珍爱的个人小天地能够摆脱世人对它怀有的那种像对传奇和神话般的渴望，离群也成了他实际生活的需要。

让我们回到慕尼黑赫尔曼的生意，生意开始很兴隆，后来不景气。意大利代理人伽罗尼先生（Signor Garrone）建议将工厂迁往意大利，那里的前景看来会更好些。雅可布完全赞成，他的热情感染了赫尔曼。1894年6月，他们清理了森德林工厂的账目，

变卖了厂房，除阿尔伯特留下上学以外，全家都移居米兰。“爱因斯坦与伽罗尼”的新工厂在帕维亚建起来了。1895年，赫尔曼和全家从米兰搬到帕维亚，住在费斯科罗街（Via Foscolo）11号 S3]。

阿尔伯特一个人留在慕尼黑，感到抑郁和紧张 [M4]。他想要家，讨厌学校。因为他已经 16 岁了，他担心会去服兵役。<sup>①</sup> 没跟父母商量，他决定来意大利和他们团聚。他从家庭医生那里得到一张神经失常的证明，获许离开了学校。1895 年早春，他来到了帕维亚。他的突然来到，令父母很不安。他答应他们，他将自学准备苏黎世 ETH 的入学考试，还告诉他们，他想放弃德国国籍 [F1]。一种清新自由的生活和不受约束的工作，使这个沉静的男孩变成了一个爱交谈的年轻人。意大利的风光和艺术给他留下了难忘的印象 [M7]。

1895 年 10 月，爱因斯坦去苏黎世参加 ETH 考试。尽管数学和自然科学考得很好，但他还是失败了。<sup>②</sup> 有人建议他先获得一张中学文凭 (Matura) 那可以使他在 ETH 注册。于是，他来到瑞士讲德语的阿劳 (Aarau) 地区的一所州立中学，住在温特勒 (Winteler) 家里。温特勒 (Jost Winteler) 是爱因斯坦的老师，本身也够得上一个学者，爱因斯坦很尊敬他，也非常喜欢温特勒夫人，还与他们的 7 个孩子相处得很好，像一家人一样。

根据法律，一个男孩只有在 17 岁之前离开德国，才不必回国服兵役。爱因斯坦还在很小的时候就讨厌当兵。那时，他和父母观看了一次阅兵式。那些没有个人意志的人的运动，令爱因斯坦感到害怕。他的父母不得不答应他，决不会让他去当兵 [R4]。

<sup>②</sup> 他考试的科目有政治与文学史、德语、法语、生物学、数学、画法几何、化学、物理学和图画，另外，还必须写一篇短文。

这是他有生以来第一次喜欢学校。在去世前不久，他写道：“因为学校的自由精神和那些毫不依附任何外来权威的老师们自然独特的思想，它给我留下了不可磨灭的印象” [E5]。从本书扉页的那幅爱因斯坦在阿劳的照片，我们可以看到一个自信的，甚至还可能有点自负的青年。小时候的胆怯，一点儿影子也没有了。一个同学后来还记得他有力而自信的步伐，他脸上露出的高傲以及他“勇敢地表达不管多么逆耳的意见的那些方式” [S4]。他大概本来就充满着自信，现在，都表现出来了。

爱因斯坦在阿劳上学时，写的一篇题为“Mes Projets d'Avenir”的小短文，保存到了现在（下两页可以看到它的影印件）。原文是 1895 年左右爱因斯坦用不太完美的法文写的，表达了他的目标。译文如下：

### 我未来的计划

一个幸福的人对现在感到太满意就不可能对未来思考太多。另一方面，年轻人喜欢献身于大胆的计划。而对一个严肃的青年来说，尽可能准确地去认识他适当的目标是什么，是很自然的事情。

如果运气好，能通过考试，我将去苏黎世 [ETH]。我会在那儿学 4 年数学和物理。我想象自己会成为那些自然科学分支领域里的一名老师，我想我会更喜欢其中的理论部分。

引导我走向这个计划的是这样一些理由。首先，是因为 [我] 倾向于抽象思维和数学思维 而且 [我] 缺乏想像力和实践能力。我的愿望也激励我下同样的决心，那是很自然的，人



总是喜欢做他有能力做的事情。而且，科学事业还存在着一定的独立性，那正是我所喜欢的。 [E5]

1896年，爱因斯坦从阿劳的德语中学的一个学生，成为一个无国籍的 ETH 大学生。1月28日他花3个马克得到一个乌尔姆市政府签发的证明，宣布他不再是德国（更准确地说，符腾堡）公民。这年秋，他以如下的成绩通过了中学毕业考试（最高分为6分）：德语5分，意大利语5分，历史6分，地理4分，代数6分，几何6分，画法几何6分，物理学6分，化学5分，自然史5分，绘画（艺术）4分，制图（技术）4分。10月29日在苏黎世入户成为ETH的大学生。圆满完成4年课程后，他可以去当一名中学数学和物理学老师。从1896年到1900年他的整个大学时代，他每月有100瑞士法郎的生活费，不过要省下20法郎来付他加入瑞士国籍的费用。<sup>①</sup>

然而，这时在他家里却遇到了经济困难。赫尔曼和雅可布在帕维亚的工厂倒闭了，不得不在1896年清偿债务，家里投进来的大部分资金都损失了。雅可布在一家大公司找到了工作。这一回，赫尔曼决定重新开始，在米兰独立开一家工厂。阿尔伯特警告父亲别再冒险，但没用。他又到德国的一个叔叔那儿去请他别再给父亲更多的资助。爱因斯坦一家回到米兰，又从头开始。两年后，赫尔曼不得不又放弃了。这时阿尔伯特写信给玛雅：“可怜的父母真不幸，多年来一刻也没幸福过，令我感到很沉重。我已经长

<sup>①</sup> 在1895年的《苏黎世日报》（*Tagesblatt der Stadt Zürich*）上我们可以看到如下的典型广告：带家具的小屋，20法郎/月；公寓，两顿热餐、无酒，1.40法郎/天；好房间，包饭，70法郎/月（我感谢约斯特为我将它找出来）。因此，爱因斯坦的津贴虽然不高，但也不低。

Albert Einstein

Mes projets d'avenir.

Un homme heureux <sup>est</sup> trop content de la <sup>du présent</sup> présence pour penser beaucoup à l'avenir. Mais de l'autre côté ce sont surtout les jeunes gens qui aiment s'occuper de hardis projets. Du reste c'est aussi une chose naturelle pour un jeune homme sérieux, qu'il se fasse une idée aussi précise que possible du but de ses desirs.

Si j'avais le bonheur de passer heureusement mes examens, j'irais à l'école polytechnique de Zurich. J'y resterais <sup>quatre</sup> quatre ans pour étudier les mathématiques et la physique. Je m'imagine de devenir professeur dans ces branches de la science de la matière en choisissant la partie théorique de ces sciences.

inf. insag  
 mit. polytechn.  
 /crats  
 1902  
 aus. H. H. H.  
 11/10/02

爱因斯坦在阿劳写的短文 (essay)。此文获 3—4 分 (满分 6 分)。蒙阿尔高州立档案馆惠允。

Voici les choses <sup>raisons</sup> ~~causes~~ qui m'ont  
<sup>mis en voie pour</sup> porté à ce projet. Et <sup>est</sup> surtout la disposition  
individuelle pour les pensées abstraites et  
mathématiques, le manque de phantasie  
et du talent pratique. Ce sont aussi mes  
deux qui ~~m'ont guidé~~ <sup>m'ont inspiré</sup> la même ~~voie~~ <sup>réalisation</sup>  
me conduiraient à la même profession.  
Il est tout naturel, on aime toujours faire  
les choses, pour lesquelles on a le talent.  
Mais il est aussi une certaine indépendance  
de la profession qui scientifique qui me  
plait beaucoup.

3-11.

大了，却只能袖手旁观……即使是最小的事情，我也为他们做不了，这也使我伤心。我不过是亲人的一个负担……如果没有我，事情肯定会好些。我想……只有年复一年我不让自己有一点快乐和安逸，才能使我生活下去，也只有这样，才能使我常常从绝望中摆脱出来 [M8]。当父亲又建起一个与发电设备的安装有关的新工厂时，他忧郁的心情才消失。

爱因斯坦的学生时代还是有过一些快乐的时光。偶尔，他也会让自己去听音乐会，或去歌剧院，或在咖啡馆和朋友谈天。他同著名历史学家斯特恩 ( Alfred Stern ) 一家以及与同学和朋友格罗斯曼 ( Marcel Grossmann ) 一家，度过了许多美好的时光。在苏黎世，他认识了贝索 ( Michele Angelo Besso ) ，和他成了一生的朋友。那时和以后，他都珍视友谊带来的幸福，欣赏音乐和文学表现的美妙。但是，他已经是一个青年人了，没有任何事情可以使他从他的命运中摆脱出来。18 岁时，他用诗一般的语言，清楚地表达了那种“命运”：“紧张的工作和对上帝本性的沉思 是我的天使 尽管冷酷无情，却使我安宁，令我坚强，它将领我走过生活的喧嚣” [E6]。

“大部分时间我都在物理实验室里工作，直接与观察接触，这令我着迷。”这是爱因斯坦后来回忆的他在 ETH 的生活 [E7]。然而，他的教授韦伯 ( Heinrich Friedrich Weber ) 对他的实验计划并不热心，特别是，他不让爱因斯坦做地球相对于以太运动的实验 [R8]。<sup>①</sup> 据说，有一次韦伯曾对他说：“爱因斯坦，你是一个聪明的小伙子，非常聪明。但是你有一个很大的毛病，你听不进别人的话” [S5]。爱因斯坦对实验的痴迷大概就这样被压下去了；甚至

① 见( 6d )。

在 ETH 数理部的记事簿上，还记载着他因忽视实验而受过严重警告 (Verweis)。

反过来，爱因斯坦对韦伯的物理课也没什么印象。他“对 [ 韦伯的 ] 理论物理学导论不感兴趣，因为没能从中学到任何关于麦克斯韦理论的新东西，令他很失望……作为经典物理学的典型代表，[ 韦伯 ] 完全无视亥姆霍兹 (Helmholtz) 以后的任何物理学发展” [S6]。不过，爱因斯坦对别的课程却有强烈的兴趣。<sup>①</sup> 后来，他多次指出，胡尔维兹 (Adolf Hurwitz) 和闵可夫斯基 (Hermann Minkowski) 是优秀的数学老师 [R9, E6]。<sup>②</sup> 但是总的说来，爱因斯坦并不参加听课，更多的是靠自学。作为学生，他读了基尔霍夫、赫兹 (Hertz) 和亥姆霍兹的著作，从 1894 年出版的弗普尔 (August Föppel) 所著《麦克斯韦电学理论导论》(*Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität*) 的第一版 [F1] 学习了麦克斯韦理论；他还读了马赫的力学著作，“这本对基本概念和基本定律抱着批判态度的书，给我留下了深刻和久远的印象” [S8]；他也研究过洛伦兹和玻耳兹曼的论文。<sup>③</sup> 其他方面引起爱因斯坦注意的，是达尔文 (Darwin) 的著作 [R9]。

“在这里一共只有两次考试，其余时间里，人们可以做他想做的事……直到考试前几个月……我彻底享受着这种自由” [E9] 考试的这几个月，对爱因斯坦来说，也很容易过去，因为他可以参考格罗斯曼写得漂亮又整理得有条有理的课堂笔记。<sup>④</sup>

① 爱因斯坦大学四年级的课程表，请见 [S7]。

② 爱因斯坦还听过一些盖泽尔 (Geiser) 的微分几何课，这对他后来的广义相对论工作是有意义的 [K1, R10]。我将在 12b 讨论盖泽尔的影响。

③ 我还没找到 [M9] 和 [S9] 提到的玻耳兹曼和爱因斯坦之间通信的任何证据。

这些课堂笔记现在是苏黎世图书馆的历史藏品。

然而，无论如何，这段听别人命令行事的时间，对他来说是一场痛苦的经历。毕业考试以后，他过了一年的时间才完全找回对物理学的感觉 [E9]。他的最后成绩是：理论物理、实验物理和天文学各 5 分，函数论 5.5 分，关于热传导的论文 4.5 分（6 分制）。这样，1900 年 8 月，爱因斯坦和其他 3 位同学一起，有资格当老师了。那 3 位同学马上在 ETH 获得了助教职位 [S5]。另外，还有第五位同学，米列娃，没有通过考试，<sup>①</sup>爱因斯坦自己也没找到工作。

爱因斯坦很失望。他从来没有完全原谅过韦伯。韦伯曾答应给他一个助教职位，后来却落空了。<sup>②</sup> 9 月，爱因斯坦写信问胡尔维兹，能否考虑让他补一个助教的缺 [E11]。几天以后，他又写信说：“我很高兴地注意到，我有希望获得这个职位” [E12]。然而，希望没有实现，直到年底，他仍然没有工作。

然而，也有某些令他满意的事情。1900 年 12 月，他完成了他的第一篇科学论文，讨论分子间作用力，从苏黎世投给《物理学纪事》[E13]。1901 年 2 月 21 日，他获得瑞士国籍，<sup>③</sup>他已经为此耗费了长期的积蓄。后来，他一直是瑞士“这个我所知道的地球上最美丽的角落”[S10]的公民。

1901 年初，爱因斯坦又想在大学找工作。“我和父母 [在米兰] 呆了 3 个星期，想找一个大学助教的职位。如果韦伯不跟我玩

<sup>①</sup> 米列娃在 1901 年 7 月又参加了一次考试，也没通过。

<sup>②</sup> 1912 年在韦伯去世以后，爱因斯坦以一种相当罕见的方式写信给一位朋友说：“韦伯的死对 ETH 是一件好事” [E10]。

<sup>③</sup> 1899 年 10 月 19 日，他正式申请瑞士国籍。1900 年 1 月 10 日，父亲同意了他的申请，这是法律需要的认可 [F2]。1901 年 3 月 13 日，他被认为不适合参军，原因是扁平脚和静脉曲张。

欺骗的把戏，我早就获得了这种职位” [E14]。<sup>①</sup> 1901 年 3 月，他把第一篇论文的抽印本寄给莱比锡的奥斯特瓦尔德 (Friedrich Wilhelm Ostwald)，并附了一封信，他在信中问“您是否用得着一位熟悉绝对测量的数学物理工作者” [E15]。4 月，他写信给昂内斯(Heike Kamerlingh Onnes)，请他在莱顿为自己找个职位 [E16] 也许，他从来没有收到别人的答复。当然，他的申请都失败了。从他父亲给奥斯特瓦尔德的信中，我们看到，他有点儿泄气：“我儿子对他当前的失业状态很难过。他一天天感到自己的生活失去了方向……他压力很大，以为是我们的累赘，因为家里并不富裕” [E17]。<sup>②</sup> 赫尔曼请求奥斯特瓦尔德，至少对儿子的论文说几句鼓励的话。9 年后，奥斯特瓦尔德和爱因斯坦同时在日内瓦接受荣誉博士学位。又过了一年，奥斯特瓦尔德第一个提名授予爱因斯坦诺贝尔奖。<sup>③</sup>

终于，爱因斯坦找到了一份临时工作。从 1901 年 3 月 19 日起，他在温特图尔(Winterthur)中学代课两个月。他写信给温特勒，说他从没想到过从教学中得到这么大的乐趣。“上午上过五六小时课后，我的精力还很充沛，下午或在图书馆继续我的学业，或在家研究感兴趣的问题……我放弃了到大学谋职的野心，因为我看到，在目前这种环境下，我也能保持进行科学研究的力量和愿望” [E18]。<sup>④</sup> 他还从温特图尔给格罗斯曼写过信，说他正在研究气体的运动学理论，也在考虑物质相对于以太的运动 [E19]。

① “.. wenn Weber nicht ein falsches Spiel gegen mich spielte. ”

② 爱因斯坦父子给奥斯特瓦尔德的信，在 [K2] 中可以看到复印件。

③ 见第 30 章。

④ 在同一封信中，爱因斯坦还说他遇到了一位德国大物理学家，我没有找到这个人是谁。

温特图尔过后，他又找到一个临时工作。从 1901 年 9 月开始，他被聘为夏夫豪森 (Schaffhausen) 一所私立学校的教员，为期一年 [ F3 ]。他又有了充分的时间来研究物理学。我们来看爱因斯坦在 1901 年 12 月写的一段话：“从 1901 年 9 月 15 日起我就是夏夫豪森一所私立中学的老师。在这所学校的头两个月里，我写了一篇关于气体运动学理论的博士论文。一个月前，我向苏黎世大学呈交了这篇论文” [ E20 ]。<sup>①</sup> 然而，这篇论文并没被接受为博士论文。<sup>②</sup> 这是爱因斯坦生活中的最后一次挫折，大约发生在他离开夏夫豪森去伯尔尼的时候。在伯尔尼，他将度过一生中 richest 创造力的年代。

移居伯尔尼的想法在 1900 年就已经形成，那时，格罗斯曼向家里人说了爱因斯坦的求职困难，这使格罗斯曼的父亲把爱因斯坦推荐给伯尔尼联邦专利局局长哈勒 (Friedrich Haller)。爱因斯坦很感谢他的推荐。<sup>③</sup> 这件事一直拖到 1901 年 12 月 11 日那天，《瑞士联邦公报》(Schweizerisches Bundesblatt) 登出专利局有空缺职位的广告。爱因斯坦立即发出一封申请信 [ E20 ]。某一天，哈勒约他面谈，也许在这次谈话中他得到了什么许诺。总之在任命之前，他就辞去了夏夫豪森的工作，在 1902 年 2 月来到伯尔尼。最初，他的生活来源靠家里给的一点儿钱和做数学和物理学家教的收入。他的一个学生曾这样描述他：“大约五英尺高，宽宽的肩，

① 那时，ETH 还不能授博士学位。

我没能发现苏黎世大学对爱因斯坦提交的论文有什么反应。这篇运动学论文后来出版了 [ E21 ]。这年初，爱因斯坦曾打算把他的第一篇关于分子间作用力的论文扩展后作为博士论文 [ E14 ]。

③ 在 1901 年而不是如 S11 所说的 1902 年 )4 月 14 日写给格罗斯曼的信中，他表达了他的感激 [ E14 ]。



背有点儿驼 浅棕色的皮肤 漂亮的嘴唇 黑色的小胡子 微曲的鹰钩鼻，褐色明亮的眼睛，动听的声音，正确的法语，略带一点方言” [F4]。在这段时间里，他遇到了索洛文 (Maurice Solovine)。“der gute Solo”<sup>①</sup> 是来听课的，后来成了爱因斯坦的终生朋友。他们和另一个朋友哈比希特 Konrad Habicht 定期聚会 讨论哲学、物理学和文学，从柏拉图谈到狄更斯。他们郑重地建立了“奥林匹亚科学院 (Akademie Olympia)，而他们自己是仅有的 3 个成员。他们常在一起吃饭 通常有香肠、乳酪、水果和茶 总是很开心。<sup>②</sup>

这个时候，瑞士联邦机构对爱因斯坦的任命也通过了。从 1902 年 6 月 16 日起，他就是专利局的三级技术专家，试用期内年薪为 3500 瑞士法郎。

在定居伯尔尼之前，爱因斯坦就已计划与 ETH 的一个同学结婚，他与她在苏黎世曾经常讨论科学问题。她就是米列娃·玛丽琦 (或玛丽蒂 Marity)，1875 年出生在 (匈牙利南部的) 第特尔 (Titel) 一个有希腊正教信仰背景的家庭。爱因斯坦的父母强烈反对这门婚事：“也许他们曾希望过别的安排” [M10]。1902 年，爱因斯坦与母亲有过短暂的摩擦，母亲从来都不喜欢米列娃 [E23]。这一年对保莉妮来说，真是苦难的一年。她丈夫接连的不幸，逐渐损毁了他强健的身体，致命的心脏病很快就夺去了他的生命。父亲临终前，爱因斯坦从伯尔尼回到米兰，老头子在病床上

字面意思是“一个好的独唱或独奏演员”，此处用来指“好朋友索洛文”。——译者

<sup>②</sup> 60 多岁时 爱因斯坦还回忆起那段“我们组建我们快乐的‘科学院’[的日子]，它比起我后来逐步认识的许多令人尊敬的科学院来，一点儿也不幼稚” [E22]。索洛文对科学院作过最好的描述。他记得，大家还读斯宾诺莎、休谟 (Hume)、马赫、庞加莱、索福克勒斯 (Sophocles)、拉辛 (Racine) 和塞万提斯 (Cervantes) 等人的著作 [S12]。

同意了儿子的婚事。死神临近了，赫尔曼让所有的人都走开，让他独自离去。爱因斯坦一想起这一刻，就感到内疚。<sup>①</sup> 1902 年 10 月 10 日 赫尔曼·爱因斯坦去世，葬于米兰。

阿尔伯特和米列娃于 1903 年 1 月 6 日结婚。当天晚上办了一个小型聚会。晚会过后，夫妇俩回他们的家时，爱因斯坦不得不喊醒房东开门，因为他忘带钥匙了 [ M10]。很久以后，爱因斯坦还念念不忘他走进婚姻时内心的那种抵触情绪 [ E24]。1904 年 5 月 14 日 他们的儿子汉斯·阿尔伯特 (Hans Albert) 出生，使得爱因斯坦家的香火延续至今。

爱因斯坦在专利局干得不错。他很认真，而且常常发现这些工作也很有趣。他总有足够的时间和精力留给自己做物理学研究。1903 年和 1904 年，他发表了几篇关于统计力学的论文。1904 年 9 月 16 日，他转为专利局的正式职员，而进一步的提升，照哈勒的说法，“要等他完全掌握机械技术之后；他原来是学物理的” [F5]。

像 1905 年的爱因斯坦那样，在这么短的时间内就拓宽了物理学的视界，是前无古人，后无来者的。他在这一年的工作，当然要在后面的章节里详细地讨论。<sup>②</sup> 在这里，我只想提一句。3 月 他完成了一篇后来为他赢得诺贝尔奖的论文；4 月 他完成了一篇使他最终获得苏黎世大学博士学位的论文 [ E25]。

1906 年 4 月 1 日，爱因斯坦被提升为二级技术专家，年薪也增至 4500 瑞士法郎。现在，他在技术方面已懂得够多了，哈勒写

与海伦·杜卡斯的私人交谈。

<sup>②</sup> 关于博士论文和布朗运动，请见第 5 章 关于狭义相对论，请见第 6 章至第 8 章 关于光量子假说，请见第 19 章。

道：“他是专利局最受尊重的专家之一”[F6]。1906 年底，他完成了一篇关于比热的重要论文。他还抽时间为《物理学纪事》写书评 [K3]。1907 年底，爱因斯坦向广义相对论迈出了重要的第一步（参见第 9 章）。

爱因斯坦青年时代的生活画卷，到这里就展开完了。他在伯尔尼的生活还没有结束，但新的阶段即将开始：那就是他的大学教师生涯（详见 10a）。

在生命的终点，爱因斯坦写道，格罗斯曼为他做的最重大的事情，就是通过老格罗斯曼的帮助，把他推荐到专利局 [E26]，这是千真万确的。爱因斯坦的薪水可能是有限的，他的婚姻也许是不完美的；但是，对于一个喜欢独处而思考的人来说，伯尔尼的岁月是他可能在地球上最接近天堂的时段。

## 有关爱因斯坦的众多传记的补充说明

在准备这一章时，我曾力争尽可能地依靠原始文献，当然，主要还是依靠普林斯顿的爱因斯坦档案馆和海伦·杜卡斯的指导。我也从苏黎世 ETH 图书馆科学史收藏室（Wissenschaftshistorische Sammlung）获益匪浅，克劳斯博士（Dr. Glaus）在那里给了我许多帮助。此外，我还大量采用了以下的传记：

1. 《阿尔伯特·爱因斯坦：生活画卷》（*Albert Einstein, Beitrag für sein Lebensbild*）玛雅·爱因斯坦著，手稿。1924 年 2 月 15 日写于佛罗伦萨。原稿在贝索家；复印件存普林斯顿档案馆。在本章的参考文献中称 M。
2. 《爱因斯坦传》（*Albert Einstein, a Biographical Portrait*）安

- 东·赖泽尔( Anton Reiser) 鲁道夫·凯泽尔的笔名)著 ;A. & C. Boni, New York, 1903。以下引用称 R。关于本书, 爱因斯坦 1913年写道“赖泽尔的这本书 在我看来 是我的传记中最好的一本。它出自对我个人生活有很好了解的人之手” [E8]。[凯泽尔是位德语专家, 多年来主编柏林的一本有影响的月刊《新评论》(*Neue Rundschau*)。他还写过许多书, 当过老师。1924年, 他与爱因斯坦的继女伊尔莎结婚。]
3. 爱因斯坦的“自传”(Autobiographisches) 载《阿尔伯特·爱因斯坦 哲学家-科学家》(*Albert Einstein; Philosoph -Scientist*) 希尔普(P. Schilpp)编, Tudor, New York, 1949。以下引用称 E。这是爱因斯坦写的最详细的自传, 是必备图书。
  4. 《阿尔伯特·爱因斯坦》(*Albert Einstein*) 泽利希(C. Seelig)著, Europa Verlag, Zürich, 1960。以下引用称 Se。本书的素材部分来自作者与爱因斯坦、玛戈特和海伦·杜卡斯的大量通信。本书是作者在 1954年同名著作的基础上, 大大加以扩充了的版本(它的 1960年版的英译本, 这里就不向读者推荐了)。
  5. 《阿尔伯特·爱因斯坦: 创造者与叛逆者》(*Albert Einstein, Creator and Rebel*) 霍夫曼(Banesh Hoffmann)编 H. 杜卡斯协助), Viking, New York, 1972。
  6. 《爱因斯坦在伯尔尼》(*Albert Einstein in Bern*), 弗吕基格(Max Flückiger)著, Paul Haupt Verlag, Bern, 1974。以下引用称 F。书中复制了大量有关爱因斯坦青年时代的罕见文献, 但不准确之处也不少。
  7. 《阿尔伯特·爱因斯坦: 他的生活与时代》(*Albert Einstein, sein Leben und seine Zeit*) 菲利普·弗兰克(Philipp Frank)

著, Vieweg, Braunschweig, 1979。本书的德文版优于英文版(*Einstein . His Life and Time . Knopf. New York. 1947*)。因为德文版中的很大一部分内容在英文版中没有;另外,德文版还有爱因斯坦写的序言,在序言中,爱因斯坦说他曾鼓励弗兰克写这本书。

8. 《爱因斯坦与乌尔姆》(*Einstein und Ulm*), H. E. 施佩克(Hans Eugen Specker) 编, Kohlhammer, Stuttgart, 1979。本书详尽介绍了爱因斯坦的祖先,还有一份家谱。
9. 《阿尔伯特·爱因斯坦在柏林 1913—1933》(*Albert Einstein in Berlin 1913—1933*) 基斯顿(C. Kirsten) 和特雷多(H. J. Treder) 编, Akademie Verlag, Berlin, 1979。本书汇编注释了普鲁士科学院档案馆的有关文献,编得极好。

## 参考文献

- E1. E, p. 8.
- E1a. Pauline Einstein, letter to Jette Koch, August 1, 1886.
- E2. A. Einstein, letter to H. Friedmann, March 18, 1929.
- E3. E, p. 4.
- E4. A. Einstein, letter to Hermann Broch, September 2, 1945.
- E5. —, *Mes Projets d'Avenir*; the original is in the Staatsarchiv Kanton Aargau.
- E6. —, letter to Rosa Winteler, June 3, 1897.
- E7. E, p. 14.
- E8. A. Einstein, letter to E. F. Magnin, February 25, 1931.
- E9. E, p. 16.
- E10. A. Einstein, letter to H. Zangger, summer 1912.
- E11. —, letter to A. Hurwitz, September 23, 1900.
- E12. —, letter to A. Hurwitz, September 26, 1900.

- E13. —, *AdP* **4**, 513, (1901).
- E14. —, letter to M. Grossman, April 14, 1901.
- E15. —, letter to W. Ostwald, March 19, 1901.
- E16. —, letter to H. Kamerlingh Onnes, April 17, 1901.
- E17. H. Einstein, letter to W. Ostwald, April 13, 1901.
- E18. A. Einstein, letter to J. Winteler, undated, 1901.
- E19. —, letter to M. Grossman, undated, 1901.
- E20. —, letter to the Eidgenössisches Amt für geistiges Eigentum, December 18, 1901; reproduced in F, p. 55.
- E21. —, *AdP* **9**, 417(1902).
- E22. —, letter to M. Solovine, November 25, 1948.
- E23. Pauline Einstein, letter to R. Winteler, February 20, 1902.
- E24. A. Einstein, letter to C. Seelig, May 5, 1952.
- E25. —, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. Buchdruckerei K. J. Wyss, Bern, 1905.
- E26. — in *Helle Zeit, dunkle Zeit*, p. 12. C. Seelig Ed. Europa Verlag, Zürich, 1956.
- F1. A. Föppl, *Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität*. Teubner, Leipzig, 1894.
- F2. F, pp. 43–44.
- F3. F, p. 34.
- F4. F, p. 11.
- F5. F, p. 67.
- F6. F, p. 65.
- H1. Ph. Hausel, *Münchener Merkur*, March 14, 1979.
- H2. E. Heis and T. J. Eschweiler, *Lehrbuch der Geometrie zum Gebrauch an höheren Lehranstalten*. Du-Mont and Schauberg, Cologne, 1867.
- K1. L. Kollros, *Helv. Phys. Acta Suppl.* **4**, 271 (1956).
- K2. H. Körber, *Forschungen und Fortschritte* **38**, 74 (1974).
- K3. M. J. Klein and A. Needell, *Isis* **68**, 601 (1977).
- M1. M, p. 12.
- M2. M, pp. 9–10.

- M3. M, p. 14.
- M4. M, p. 15.
- M5. M, pp. 11—12.
- M6. M, p. 13.
- M7. M, p. 16.
- M8. M, p. 18.
- M9. M, p. 20.
- M10. M, p. 23.
- R1. R, p. 28.
- R2. R, p. 31.
- R3. R, p. 24.
- R4. R, p. 26.
- R5. R, p. 25.
- R6. R, p. 33.
- R7. R, p. 54.
- R8. R, p. 52.
- R9. R, p. 48.
- R10. R, p. 49.
- S1. E. G. Straus, lecture given at Yeshiva University, September 18, 1979.
- S2. Se, p. 15.
- S3. E. Sanesi, *Physis* **18**, 174 (1976).
- S4. Se, pp. 21—22.
- S5. Sc, p. 48.
- S6. Se, p. 47.
- S7. Se, pp. 38—40.
- S8. Se, p. 54.
- S9. Se, p. 43.
- S10. Se, p. 415.
- S11. Se, p. 85.
- S12. M. Solovine, Ed., *Albert Einstein, Lettres à Maurice Solovine*, introduction. Gauthier Villars, Paris, 1956.
- T1. M. Talmey, *The Relativity Theory Simplified and the Formative*

*Years of Its Inventor*. Falcon Press, New York, 1932.

T2. [T1], pp. 164–165.

U1. F. Uppenborn, Ed., *Die Versorgung von Städten mit elektrischem Strom*, p. 63. Springer, Berlin, 1891.



## II 统计物理学



## 第 4 章 熵和几率

### 4a. 爱因斯坦贡献一览

爱因斯坦与热力学、统计力学和运动学理论有关的活动始于他 1900 年完成的第一篇论文，延续了 25 年，写了近 40 篇不同深度的文章。1905 年迎来第一个收获之年，他从理论上提出了 3 种独立的求阿伏伽得罗常数的方法。

在 1949 年出版的自传中，爱因斯坦对自己在统计物理学方面的贡献谈得不多。主要的意见都在如下一段话里：“在不知道玻耳兹曼和吉布斯早已发表而且事实上已经彻底解决了问题的研究工作的情况下，我发展了统计力学和以它为基础的热力学的分子运动理论。我这么做的主要目的，是寻找一些事实来证实具有确定大小的原子的存在性” [E1]。他这里指的是 1902—1904 年间发表的 3 篇论文。<sup>①</sup> 在这些论文中，他“重新发现了统计力学的所有基本原理” [B1]。这时，他零星知道些玻耳兹曼的著作，而对吉布斯的论文则全然无知 [G1]。1910 年，爱因斯坦写道，如果他知道有吉布斯的书，那么，除了稍加评论外，他就不会发表自己关于统计力学基础的论文了 [E2]。在他的两个朋友和崇拜者埃伦费斯

<sup>①</sup> 1901 年，他将其中的一篇寄到苏黎世，希望能作为博士论文，见第 3 章。

特夫奴 (Paul Ehrenfest and Tatiana Alexeyevna Ehrenfest-Affanasjewa) 同年完成的对统计力学的概念基础的影响深远的评论中,只是在附录里顺便提了一下爱因斯坦的那些文章 [E3]。确实,爱因斯坦的这几篇论文没有为热力学第二定律的统计基础带来什么新东西。如他自己所指出的 [E4] 为理解他 1905 年关于分子实在性的研究,并不需要先了解这几篇论文。然而,不管怎么说,早期的这段工作,对他自己进一步的科学发展还是很重要的;特别是他后来从 1905 年到 1925 年将以无比精妙的技巧发挥其作用的涨落理论已经在这里萌芽了。

然而,如果认为爱因斯坦对统计物理学和分子运动论的贡献,不过在于他天才而重要地运用了他独立发现、但却是别人首先提出的那些原理,那就完全错了。以他对布朗运动的处理为例,新思想随处可见:悬浮粒子的行为类似于溶液中的分子;扩散与粘性之间存在一定的关系,即第一个涨落—扩散定理;粒子的均方位移能与扩散系数相联系。最后的结论说:①阿伏伽德罗常数原则上能够通过普通显微镜的观察来确定。这一点,即使对以前读过这篇论文并从而知道这句话的人来说,也总会感到惊奇。1905 年以后爱因斯坦在谈话中还会偶然说到“令人疑惑的是玻耳兹曼自己竟没有得出这个显而易见的结论 [即布朗运动的解释],因为玻耳兹曼已为整个学科奠定了基础” [S1]。不过,也很难想象,抑郁的玻耳兹曼②能够表现出爱因斯坦处理分子实在性问题的那种严

① 这个推论过程将在第 5 章中详加讨论。

② 玻耳兹曼有周期性精神抑郁症,有史家认为这是他自杀的原因之一。参见 [意] 卡罗·切尔奇纳尼著:《玻耳兹曼——笃信原子的人》胡新和译,上海科学技术出版社,2002 年版。——译者

肃而活泼的精神。

爱因斯坦把统计思想运用于量子物理学，更重要的创新在于，在第一篇讨论这个主题的论文中，光量子假说就是从统计论证产生出来的，这比他关于布朗运动的论文还早两个月。1905年以后，爱因斯坦确实会偶尔回到经典统计物理中来，但在那些年月，他所有的关于统计问题的工作，都是在量子理论的领域中进行的。实际上，我们还可以说得更肯定一些：爱因斯坦对量子理论的一切重大贡献都有着统计渊源。这些贡献包括关于比热的研究，关于波粒二象性的研究，关于光量子的粒子性的研究，关于自发和感生辐射过程的研究，还有关于黑体辐射公式的新推导。他最后一次与统计问题的相遇，照他的说法 [ S2 ]，是不经意的。那是在 1924 年底到 1925 年初，他正在统一场论里艰难地耕耘着。那时发表的 3 篇论文，把他引到了波动力学的大门前。

爱因斯坦关于统计物理学的论文涉及内容太广泛，为帮助理解，我们先对它们的主要观点依时间顺序做些详细的讨论。

**1901—1902** 关于液体表面 [ E5 ] 和电解过程 [ E6 ] 的热力学。在这些论文中，爱因斯坦在寻找有关分子力假说的实验证据。通过与引力类比，他猜想  $i$  和  $j$  两类分子间的势能具有  $c_i c_j \phi(r)$  的形式，这里  $c$  表征分子类型，而  $\phi(r)$  是距离的一般函数。进一步与引力类比，他假定每个  $c_i$  都具有  $\sum c_\alpha$  的形式，而  $c_\alpha$  是  $i$  类分子中第  $\alpha$  个原子的特征数。他还可以把  $c$  与比容和表面张力及其对温度的导数联系起来。利用已知的数据来检验他的假说，他发现，这个假说实际上在碳化合物（分子量基本为 100 的数量级）的有限范围内适应得很好，但对于像水那样的轻分子，就不那么好了。

当然，爱因斯坦的假说是错误的。现在我们知道，即使在最简单的半唯象模型（如勒纳德—琼斯势）中，分子间的作用力不仅有一个强度特征常数，而且还与分子大小有关。现在看来，他第一篇文章惟一有意义的地方在于，它表明他是如何从头为了一般性原理而摸索的，在这里，是为了分子力与引力之间的关系。“应该看到”他指出“常数  $c$  一般说来是增大的，但并不总是随分子量而增大。然而，它们的增长不是线性的。于是我们的[分子]力是否与引力相关，其关系又如何，这个问题，现在还完全是一个谜” [E5]。第二篇论文 [E6] 同样还是想获得他猜想的分子力定律的信息。这回，没有什么可以比较的数据了。文章最后，爱因斯坦感到遗憾，他自己没有能够使他的理论思想在实验上得到证明。

从爱因斯坦 1901 年给格罗斯曼的信，我们可以看到，他对普适的分子力概念是相当热情的：“我现在确信，我的吸引力的理论……可以推广到气体……这样，关于分子力与牛顿超距作用力之间密切联系的问题的解决，也将离我们更近了” [E7]。接着是下面充满诗意的句子：“从那些在直接感觉经验看来表现为毫不相关的复杂现象中去认识它们的统一特征，那是一种奇妙的感觉。”

1907 年 12 月，爱因斯坦写信给斯塔克 (Stark)：“除了头两篇毫无价值的论文外，我所有的出版物……都给您寄来了” [E8]。于是，我们在这里第一次看到爱因斯坦一生的典型特征。他对自己的思想满腔热忱，但在必要的时候，他会毫不吝惜地将它们当废物扔掉。

关于爱因斯坦的头两篇论文，我谈了这么多，完全是因为这样做了以后，我就不必再回来讨论它们了。最后，再说明两点：(1)第

一篇论文包含的一个热力学关系继续有效；<sup>①</sup>(2)爱因斯坦 1911 年又不止一次地回到他的液体表面现象的分子理论上来。<sup>②</sup>

**1902—1904** 于统计学基础的 3 篇论文，第一篇讨论满足热平衡条件的温度和熵的定义以及均分定理 [E10] 第二篇讨论不可逆性 [E11]；第三篇讨论涨落和确定玻耳兹曼常数值大小的新方法 [E12]。1911 年，爱因斯坦发表了对这 3 篇论文的简单评论 [E2]。

**1905 年 3 月** 借助以玻耳兹曼统计为基础的论证而引入光量子假说 [E13]。第一次正确地将 [能量] 均分用于辐射。

**1905 年 4 月** 完成关于测定分子大小的新方法的博士论文 [E14]。修订稿在 1911 年发表 [E15]，1920 年作了一点说明 [E16]。

**1905—1908** 关于分子布朗运动的几篇论文。第一篇也是最重要的一篇，是 1905 年 5 月写的 [E17]。1906 年的续篇讨论旋转布朗运动 [E18]。1907 年发表关于对平均速度的解释的简单说明 [E19]。1908 年，对整个学科作了半通俗的解释 [E20]。

**1906** 固体比热的量子理论 [E21]。这篇论文是固体统计量子理论的开端。

**1907** 利用电容器的电压涨落测定玻耳兹曼常数 [E22]。热力学量的相对论性变换 [E23]。<sup>③</sup>

令  $l$  为容器所盛液体在常压  $p$  下的热容量， $\omega$  为液体表面， $\sigma$  为表面张力，爱因斯坦导出如下关系 [E5]。

$$\frac{\partial l}{\partial \omega} = -T \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T^2} \right)_{p, \omega}$$

绍特基 (Schottky) 曾经讨论过这一结果 [S3]。

<sup>②</sup> 是在一个关于表面张力、比容和温度之间的厄缶关系的简短注记中 [E9]。

关于这个课题的历史评价，现在时机还不成熟 [L1]。

**1909** 两篇关于热平衡附近电磁辐射的能量涨落的文章，通过对这些涨落公式的解释，在历史上第一次表述波粒二象性思想；讨论镜面匀速通过辐射场所表现的布朗运动 [ E24, E25]。

**1910** 从统计观点看共振器在辐射场内的运动 [ E26, E27]；1915 年，进一步说明 [ E28]；临界乳光理论 [ E29]。

**1911** 关于 1906 年比热论文 [ E21 ] 的两点补充说明：联系固体比热与固体弹性性质 [ E30]；修正以前因简单性理由而做的晶格振动可近似认为是单频的假设 [ E31]。

**1912—1913** 光化学过程热力学 [ E32, E33]。

**1914** 解释气体比热反常的一次不成功的尝试 [ E34]。

**1916—1917** 内容交叉但不重复的 3 篇关于自发和感生辐射 (A、B 系数) 的论文；黑体辐射定律的一个新推导；与辐射相平衡的分子气体的布朗运动及由此导出的光量子的动量性质 [ E35, E36, E37]。

**1924** 在分子平均自由程小于容器线度的情况下关于气体热传导性质的定性讨论 [ E38]。那时，有人相信，辐射计中箔片运动在一定程度上是辐射压力引起的。爱因斯坦的这篇论文补充了克鲁森 (Knudsen) 早先的工作，为消除这种错误观念做出了贡献。

**1924—1925** 3 篇关于分子气体的量子理论的论文；以爱因斯坦和玻色名字命名的凝聚现象的发现；关于涨落理论的最后一次应用，引导他沿不同于德布罗意从前走过的路而达到物质的波粒二象性 [ E39, E40, E41]。

**回顾** 1911 年，爱因斯坦在第一届索尔未会议上总结了比热问题的现状 [ E42]。1915 年，他写了一篇关于运动学问题的半通



俗评论 [E43]。

以上介绍性地总结了爱因斯坦在统计物理学和相关课题上的工作。当然，我还会详细地回来讨论这个年表所提到的那些主题。4c 和 4d 讨论 1902—1904 年的论文和爱因斯坦后来与玻耳兹曼原理的瓜葛。第 5 章以分子实在性这样一个 19 世纪的复杂问题为开头，而它的主要篇幅则用来讨论爱因斯坦的博士论文、布朗运动和临界乳光。而以上提到的那些属于量子物理学领域的原理性论文，将在第 19 章至第 24 章讨论。

我在本节开头说过，当 70 岁的爱因斯坦回顾他一生的工作时，不太关心自己在统计物理学领域的贡献，那时，他对相对论说了很多，而对量子力学的批判，则比以上总结的所有工作都谈得更多 [E1]。前面的年表还有另外一个目的，就是为了说明爱因斯坦的回顾并没有完全概括他毕生的工作。

想了解爱因斯坦关于统计力学原理问题的立场，最好先来简单回顾一下麦克斯韦，特别是玻耳兹曼的贡献。这里不谈吉布斯，因为他没有影响爱因斯坦；而且，正如洛伦兹在爱因斯坦面前说的，爱因斯坦和吉布斯的研究方法不一样 [L2]。爱因斯坦没有反对。事实上在回答洛伦兹的话时他发现：“我的观点可以这么说，用唯象的方法引进一个具体状态的几率。这样我们就不需要借助任何特别的理论，如任何统计力学了” [E44]。这句话所隐含的对玻耳兹曼方法的批评态度，将在 4d 讨论。本章的目的之一就是说明爱因斯坦在用唯象方法想些什么？

最后，我指出一点，爱因斯坦有关统计力学的基础的活动，发生在他发表第一批论文以前。在那些文章里，他指出，玻耳兹曼的

各态历经假说并不处处令人满意，于是，我以后也就没有机会来谈各态历经理论了。

## 4b. 麦克斯韦和玻耳兹曼<sup>①</sup>

玻耳兹曼长眠在维也纳的中央公墓，墓碑上刻着公式

$$S = k \log W \quad (4.1)$$

“玻耳兹曼从没有以这种形式写出这个方程，这无关紧要。这个方程首先是普朗克写出来的……首先引入常数  $k$  的也是普朗克而不是玻耳兹曼”[S4]。事实上  $k$  是 20 世纪的符号，它第一次出现在 1900 年 12 月 14 日普朗克为黑体辐射的热平衡分布提出的公式里：<sup>②</sup>

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (4.2)$$

$\rho(\nu, T) d\nu$  是在温度  $T$  时频率从  $\nu$  到  $\nu + d\nu$  间隔内单位体积的辐射能量。方程 (4.1) 或者另一个(更好的)方程，

$$S = k \ln W + \text{常数} \quad (4.3)$$

也是首次出现在普朗克几周以后完成的一篇论文里 [P3]。直到 1911 年洛伦兹才称  $k$  为普朗克常数 [L3]。那时这么叫的，还不止他一个 [J1]。

从方程 (4.3) 可以看到，热力学第二定律只能通过熵与几率的

写这一节时 M. 克莱因对麦克斯韦和玻耳兹曼的研究是我不可或缺的指南。

<sup>②</sup> 普朗克的发现将在第 19 章讨论。在同年 10 月 9 日，普朗克就提出了同方程 (4.2) 等价的一个方程，但那里还没有明确地出现  $h$  和  $k$  [P2]。

联系来理解 这是 19 世纪物理学的一个伟大进步。<sup>①</sup> 似乎是麦克 61  
斯韦第一个指出，第二定律在本质上是统计的。他在关于他的“小  
妖”的一封信中，讨论了这些怪物的名字、特征和目的：

- “1. 谁给它们起的名字？汤姆逊。<sup>②</sup>
2. 本质上说，它们是什么？它个子很小，但活生生的；它不能做  
功，却能开关可以无摩擦或无惯性移动的活塞。
3. 它们的主要目的是什么？为说明热力学第二定律只有统计意  
义下的确定性... …”[M2]。

麦克斯韦写这些话时，玻耳兹曼已经开始尝试推导第二定律  
了，但他还没认识到这个定律的统计特征。在他关于这个课题的  
第一篇论文（1866）里所提出的目标是，“给出热理论第二定律的完  
全一般的证明，而且还要去发现它在力学中的对应定理” [B2]。<sup>③</sup>

<sup>①</sup> 回想一下，热力学第一定律（第一类永动机的不可能性）的发现，大致在 1830  
年到 1850 年间。许多科学家，从工程师到生理学家，都独立完成了这个发现 [K1]。当  
然，纯机械系统的能量守恒定律更老一些。第二定律是 1850 年克劳修斯（Rudolf Jul-  
ius Emmanuel Clausius）在考虑卡诺（Sadi Carnot）的工作时发现的 [C1]。它的最初形  
式（克劳修斯原理）在本质上说，即热不可能在没有其他变化相伴随的情况下，从较冷  
的物体转移到较热的物体。熵这个术语也是克劳修斯在 1865 年提出的。那时，他是  
这样表述这两个定律的：“世界的能量是一个常数，它的熵趋于极大”，接着又评论说，  
“热力学第二定律比第一定律更难从思想上把握” [C2]。麦克斯韦关于第二定律的观  
点，克莱因有过详细的讨论 [K2]。

<sup>②</sup> 这里说的是威廉·汤姆逊（William Thomson），即后来的开尔文男爵（Baron  
Kelvin of Largs）。1867 年 12 月 麦克斯韦给泰特（Peter Guthrie Tait）写了一封信 在  
信中，他引入了“一个有限的东西（a finite being）它通过简单的观察 就能知道所有分  
子的路径和速度” [M1]。泰特把这封信转给汤姆逊，汤姆逊为麦克斯韦的有限的东西  
起名叫“小妖”（demon）。

<sup>③</sup> 克劳修斯在 1871 年也进行了极其相似的尝试 [C3]。于是，在玻耳兹曼和克  
劳修斯之间发生了一场优先权的争论——这令麦克斯韦感到好笑 [K2]。

当 1871—1872 年又回到这个问题时，玻耳兹曼找到了新起点：“热的力学理论的问题就是……几率理论中的问题” [B3]。1872 年发表的续篇 [B3] 是他最重要的论文之一，其中有玻耳兹曼方程，也有  $h$  定理：存在一个由速度分布决定的量，后来称为  $H$  具有性质  $dH/dt \leq 0$ ，这样，乘以一个负常数， $H$  便可以与熵等同起来。在这个定理的推导中，作者同时进行了力学和几率的论证。（在同一时期，玻耳兹曼对能量均分定理也做了重要工作，而且还在 1876 年导出了杜隆和珀替的那个“定律”。关于均分和比热，等到第 20 章时我们再讨论。）

然而，在这个时候，玻耳兹曼也还没有完全把事情弄清楚。他认为自己已经证明了第二定律是绝对的， $H$  永远不会增加。他的最后一步，是在考虑了洛施米特 (Johann Joseph Loschmidt) 的一个说明 [L4] 之后迈出的。<sup>①</sup> 用现代语言，可以这样说：考虑一个满足完全确定的初始条件，并服从标准的时间反演不变的牛顿定律的大量运动粒子所组成的系统，假设  $H$  随时间减小；再考虑另一个系统，它与第一个系统的区别仅在于它的初始条件是前者的时间反演，那么，对第二个系统来说， $H$  必然随时间而增加。因此，熵增加定律不可能是绝对的。玻耳兹曼立刻认识到这个发现的重要性 [B5]。于是，在 1877 年发表的一篇重要论文中 [B6] 他终于达到了现代的观点：在趋于平衡的过程中，熵的增加不是实际的而只是一种最可能的事件过程。正如洛施米特的意见指引着玻耳兹曼一样 20 年后，玻耳兹曼的意见也一样指引了普朗克。那时，普朗克正试图在熵增加是一个绝对规律的假定下，推导黑体辐射的

① 关于洛施米特的思想对玻耳兹曼的影响，请特别参阅 [K3]。

平衡分布。在他俩的争论中，玻耳兹曼首先证明了电磁理论的时间反演性质：在电场不变而时间和磁场同时反向时，麦克斯韦方程是不变的 [B7]。更一般地，我们认为玻耳兹曼第一次精确地阐明，对时间反演不变的动力学来说，宏观的不可逆性归结为如下的事实：在绝大多数情况下，一个物理系统总是从初始状态向着一个几率最大的状态演化。<sup>①</sup> 玻耳兹曼还第一次明确地指出，以上的解释在时间不对称的动力情况下，可能需要重新考虑。<sup>②</sup>

下面我来谈玻耳兹曼对热力学几率概念的定义。实际上，在他的著作中，我们发现有两个定义。第一个定义出现在 1868 年 [B9]：考虑一个固定总能量的  $N$  个无结构粒子所组成的系统。这个系统的时间演化可以表示为  $6N$  维相空间（后来称为  $\Gamma$  空间 [E3]）中能量为常数的曲面上的一条轨道。系统的一个状态  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) 对应于轨道上的一个点。状态  $S_i$  应该确定到一个小区域，因而相应的点就落在一个小邻域内。观察一段时间  $\tau$  系统处于  $S_i$  态的时间为  $\tau_i$ ，那么  $\tau_i/\tau$ （在  $\tau \rightarrow \infty$  的极限下）就定义为系统处于  $S_i$  态的几率。这应该是玻耳兹曼对几率的第一个定义。

前面我隐约说过，爱因斯坦对玻耳兹曼的某些思想是抱批判

$H$  定理的量子力学形式，请参阅 [P4]。

<sup>②</sup> 请参阅 [B8]。在我们的物理世界中，最重要的初始条件是弗里德曼宇宙的选择——我们似乎就生活在这个宇宙中——它是时间反演不变的引力场方程的一个实现的了解。曾有人提出，这个现实化的宇宙的特定选择，是我们现在的物理学定律还不完备的一个标志。实际的物理规律并不都是时间对称的，在中性的  $K$  粒子系统中观察到的时间反演的破坏，不过是这种不对称性的第一次表现。时间的统计箭头的传统观点实际上可能需要修正。所有这些课题的讨论，请参阅彭罗斯 (Penrose) 的评论 [P5]。

态度的，不过，这与几率的第一个定义无关。事实上，这个定义正是爱因斯坦自己最喜欢的。他在 1903 年也独立引进了这个概念 [E11]，显然，他那时并不知道玻耳兹曼 1868 年的文章。（后来，洛伦兹把这个定义称为爱因斯坦的时间系综 [L3]，这个名字也许不怎么恰当。）相反，爱因斯坦对玻耳兹曼在 1877 年的论文 [B6] 中提出的几率的第二个定义，却是怀有疑虑的。在那篇论文中，玻耳兹曼第一次引入了所谓统计方法这个新工具。这种方法不需要（像运动学方法那样）具体地同碰撞机制和碰撞频率打交道。他的新论证只在近平衡态时才成立 [B10]。他只把它用于理想气体 [B11] 在这种情况下，他不仅给出几率的第二个定义，还说明了怎样通过计算“配容”来具体地计算几率。

为了以下评论爱因斯坦的反对意见（4d）和以后讨论经典统计与量子统计之间的区别（第 23 章）我们有必要回顾一下这个计算过程的基本事实。<sup>①</sup>

我们来看，假设桌上有两只一样的球。请某人闭上眼睛，过一会儿再睁开。然后我问，我是在刚才把球调换了位置？他答不上来，因为球是一样的。不过，我知道答案。如果我调换了球，那么我就能够跟踪这种将球从初始位置引到最终位置连续的运动。这个简单的例子说明了玻耳兹曼经典力学的第一个公理。该公理认为，在本质上，我们可以根据初始条件和运动的连续性来区分彼此不能无限靠近的全同粒子。玻耳兹曼认为，这个假定“为我们在不同时间识别同一质点，提供了惟一的可能性” [B13]。像薛

<sup>①</sup>关于这个方法与吉布斯的微正则系综的等价性，请参阅洛伦兹 [L3]。另外，正如吉布斯在他的统计力学著作的序言 [G1] 中强调的，系综的概念来源于玻耳兹曼的工作 [B12]。

定谓强调的，“在玻耳兹曼以前，没人认为有必要去定义我们用相同质点 这个字眼 所表达的意思 [ S5 ]。这样，我们便可以在经典意义上谈论能量为  $E$  的由  $N$  个全同可分辨的分子所组成的气体。

下面 我们 遵循玻耳兹曼 考虑一个具体的例子 在理想气体模型中，单个粒子的能量只能取离散值  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots$  令有  $n_i$  个能量为  $\epsilon_i$  的粒子 那么，

$$N = \sum n_i, E = \sum \epsilon_i n_i \quad (4.4)$$

由于气体是理想的，粒子是不相关的，因而在单粒子相空间 ( $\mu$  空间) 中，没有任何特殊区域的先验选择，也就是说，它们是统计独立的。而且，在刚才所描述的意义下，它们是能够区别开来的。于是，对应于配分方程 (4.4) 的微观状态数 (或如玻耳兹曼所说的配容) 由下式给出：

$$w = N! / \prod_i n_i! \quad (4.5)$$

玻耳兹曼认为  $w$  正比于  $(n_1, n_2, \dots)$  所确定的分布的几率 这就是他对几率的第二个定义。

为了以后的讨论，我还需要谈一个与玻耳兹曼无关的进展。现在，我们把微观状态数  $w$  称为细粒几率。为了分析系统的一般宏观特性，用一个约定俗成的描述是很重要的，这就是所谓的粗粒几率，<sup>①</sup>这个概念可以追溯到吉布斯。计算过程如下：把  $\mu$  空间分成相格  $\omega_1, \omega_2, \dots$  使得在  $\omega_A$  中的粒子的平均能量为  $E_A$ 。在空间中分配  $N$  个粒子 使  $\omega_A$  中有  $N_A$  个粒子：

<sup>①</sup> 细粒的和粗粒的密度 ( feine und grobe Dichte) 这两个名词是埃伦费斯特引入的 [ E45 ]。

$$N = \sum_A N_A \quad (4.6)$$

$$E = \sum_A E_A N_A \quad (4.7)$$

集合  $(N_A, E_A)$  便定义了一个粗粒状态。对于理想气体模型的特例从方程 (4.5) 我们得到  $\Gamma$  空间中对应于方程 (4.6) 和 (4.7) 的配分的体积  $W$ , 由下式决定:

$$W = N! \prod_A \omega_A^{N_A} / N_A! \quad (4.8)$$

这里  $\omega$  就是所谓的粗粒几率。 $\omega$  的最大值  $W_{\max}$  所对应的平衡态可以认为是  $N_A$  的函数, 并且服从方程 (4.6) 和 (4.7) 所表示的约束。这样, 麦克斯韦-玻耳兹曼分布就从极值条件

$$\sum_A \delta N_A (\ln \omega_A - \ln N_A - \lambda + \beta E_A) = 0 \quad (4.9)$$

导出来。<sup>①</sup> 平衡态下的熵  $S_{\text{eq}}$  由下式给出 [见方程 (4.3)]:

$$S_{\text{eq}} = k \ln W_{\max} + \text{常数} \quad (4.10)$$

而从  $\partial S_{\text{eq}} / \partial E = T^{-1}$  得到  $\beta^{-1} = kT$ 。

关于爱因斯坦的先驱者, 以上的介绍已经足够了。在这一节的最后, 我再说明三点。

首先, 用持续时间来定义的第一个几率, 是最自然的, 它直接与观察相联系。例如, 最可几的状态就是持续时间最长的状态。第二个定义 (用  $\omega$  或  $W$ ) 就不与观察直接联系, 倒更像一个判断。不过, 它有它的优点, 我们能够方便地用它来进行计算。当然, 逻辑要求这两个定义是等价的, 要求“时间持续”与“ $\Gamma$  空间的体积”成正比。这是各态历经理论中影响深远而没完全解决的问题。<sup>②</sup>

<sup>①</sup> 对经典的理想气体, 我们可以直接从方程 (4.4) 和 (4.5) 得到麦克斯韦-玻耳兹曼分布, 玻耳兹曼本人正是这么做的。

对这个问题的介绍, 可以参阅, 例如 [U1] 和 [V1]。



玻耳兹曼很清楚需要证明这种等价性。爱因斯坦凭他的物理直觉对第一个定义感到满意，而不满意第二个。

第二，为什么玻耳兹曼本人没有引入符号  $k$ ?<sup>①</sup> 毕竟，在他 1877 年的论文 [ B6 ] 里，还有一节题为“熵与所谓配分几率量的关系”这个量本质上就是  $\ln W$ 。而且，在这一节中，他指出“除了差一个常数因子和一个附加常数外，是与熵等同的”。他也很熟悉方程 (4.9)，熟悉它的两个拉格朗日乘子 [ B14 ]。我能想象，他没有写出方程 (4.3)，是因为他更关心如何理解热力学第二定律，而不在意 (4.3) 那样的方程在实际计算中的应用。我希望比我更熟悉玻耳兹曼工作的人，能在哪一天来讨论这个问题。

最后，方程 (4.3) 显然比 (4.10) 更普遍。玻耳兹曼也知道这一点：“[  $\ln W$  ] 对不可逆物体 (body)<sup>②</sup> 也同样有意义，而且 [ 在这样一个过程 (process) ] 中稳定地增大” [ B6 ]。在方程 (4.3) 的更广泛意义下使用它的第一个人，是爱因斯坦；也是爱因斯坦在 1905 年关于光量子假说的论文 [ E13 ] 中，为这个方程起了一个最合适的名字：玻耳兹曼原理。

## 4c. 1905 年的前奏曲

玻耳兹曼杰出的演说才能没有在他的科学论文里反映出来。他的那些论文，有时太冗长，偶尔模糊不清，而常常是非常晦涩难

至于事情的原委，大概是这样的：1860 年，麦克斯韦在导出他的速度分布时，就能够第一次引入  $k$ ，玻耳兹曼因子就是第一次出现在这里的。麦克斯韦把这个因子写成  $\exp(-v^2/\alpha^2)$  其中  $v$  = 速度 并证明  $\alpha^2$  正比于  $v^2$  的平均值，而且完全知道这个平均值正比于  $T$ 。

<sup>②</sup> 显然，他说的应该是过程 (process)，而不是物体 (body)。

懂；论文的主要结论，有时就被吞没在冗长的计算中。而且（特别是关于第二定律的理论诠释），玻耳兹曼的观点常常从一篇文章变到另一篇，而不先提醒读者。<sup>①</sup> 麦克斯韦说过：“我没能通过研究玻耳兹曼的著作而理解他。他因为我的简短而不能理解我，而他的冗长，无论过去还是现在，对我来说也同样是一块绊脚石” [M3]。爱因斯坦曾对一个学生说：“玻耳兹曼的著作不好读。没能理解它的物理学家大有人在” [S6]。<sup>②</sup> 这句话是他 1910 年左右在苏黎世大学当教授时说的。那时，他可能已经读过玻耳兹曼 1877 年关于第二定律的统计力学推导的重要论文，因为他在 1909 年曾（第一次！）提到过它 [E47]。然而，从 1901 年到 1904 年当爱因斯坦自己研究这个课题时，他是否知道这篇论文或者玻耳兹曼 1868 年引入第一个几率定义的那篇论文呢？这就很难说了。

爱因斯坦那时大概很难得到科学期刊。回想一下，他关于统计力学基础的三篇论文的第一篇，是他还在夏夫豪森任教时完成的。<sup>③</sup> 后来，他到伯尔尼时似乎也没得到多少文献 [E48]。我们也还不清楚，他那时是否读过麦克斯韦关于分子运动论的论文。当然，他那时还不懂英语，因为大约到了 1909 年 [S7] 他才开始学这门语言，而且即使后来到美国时，他的英语知识也才刚入门。<sup>④</sup>

<sup>①</sup> 对玻耳兹曼风格的讨论，特别可以参阅克莱因的回忆 [K3]。

<sup>②</sup> 埃伦费斯特为百科全书写了文章，就有像这样的一些语句：“玻耳兹曼的研究……目的……似乎是……”这可以作为一个证明 [E46]。

参见第 3 章。

与海伦·杜卡斯的私人交谈。不过，爱因斯坦也可能读过麦克斯韦在 19 世纪 70 年代写的《热理论》（*Theory of Heat*）一书的德译本。

尽管如此，爱因斯坦对麦克斯韦和玻耳兹曼的成就还是熟悉的。正如他在第一篇关于统计物理学的论文 [ E10 ] 里所说的：“麦克斯韦和玻耳兹曼的理论已经接近了目标”，离从力学方程和几率理论导出热平衡定律和第二定律不远了。然而，他又指出，这个目标还没有达到；他自己的论文就是“为着填补 [ 这些先辈遗留下的 ] 空白”。从爱因斯坦论文所列的惟一那篇参考文献可以清楚地看到，他对于他们的工作了解了多少。这篇参考文献是玻耳兹曼的两卷关于气体理论的讲义 [ B15 ]，其中有许多创造性的研究，但玻耳兹曼当然不会把它作为自己早期工作的纲要。讲义主要以运动方法 玻耳兹曼方程 为基础 相比之下 统计学方法的论述就太简略了。书中提出了配容的计算公式 [ B6 ] 然而 玻耳兹曼说：“我想对 [ 这个方法 ] 附带提一下就应该足够了”。接着 他让读者参考他 1877 年的论文，就结束了这个题目。另外，在我看来，爱因斯坦对麦克斯韦的运动理论的了解，大概也只限于玻耳兹曼在同一讲义中所讨论的那些。这样，爱因斯坦不会知道，在麦克斯韦，特别是在玻耳兹曼的论证中，真正的漏洞在哪里，他也没有在无意中把它们弥补掉。这些漏洞，在爱因斯坦看来，实际上是什么，他没有明确指出来，所以我们读他那篇文章 [ E10 ] 就不很容易。全文都在讨论热平衡，讨论了温度、熵和均分定理的统计解释，所用的工具（用现代的术语来说）基本上是正则系综。这篇论文是够水平的，不过，爱因斯坦自己承认 [ E2 ] 它没多大意思，也写得不太好。

爱因斯坦认为 他在 1903 年写成的第二篇论文 [ E11 ] 里给出了不可逆过程的第二定律的证明。这时候，他当然需要一些关于热力学几率  $W$  的定义 也就在这里 他借助  $\Gamma$  空间中适当区间的

持续时间，独立引入了玻耳兹曼的第一个几率定义。他的证明在逻辑上是正确的，但却依赖于一个错误的假定：“我们将不得不假定，较大可能的分布总是跟随着较小可能的分布，也就是说， $W$  总是 [我加的黑体] 增大的，直到分布达到恒定时， $W$  也达到最大值” [E49]。在把论文寄给《物理学纪事》3 天后，他写信对贝索说：“现在 [这项研究] 完全清楚了，而且是那么的简单，我完全感到满意” [E50]。从 1901 年起，他一直在研究玻耳兹曼的著作 [E51]。在这本书中确实提到了洛施米特的反对意见，但是，玻耳兹曼以他典型的风格，却把它写在不那么显眼的地方 [B16]。爱因斯坦大概也把它忽略过去了；无论如何，有一点很显然，他在 1903 年还不知道证明第二定律的主要微妙处在于熵增的极大的或然性，而不是它的确定性。

到了 1910 年，对爱因斯坦的“推导”的批评，才第一次在文献中出现。那时，保耳·赫兹 (Paul Hertz) 提出：“如果像爱因斯坦那样，假定较大几率分布跟随着小几率分布，那么我们便引入了一个并不明显而且完全需要证明的特殊的假定” [H1]。这句话很值得注意。赫兹没说“你的假定错了”，而是要求证明它。这不过是一个例子，说明在 20 世纪头 10 年结束时，玻耳兹曼的思想还没有为大多数活跃在统计物理学前沿的物理学家所消化。更多的人是在埃伦费斯特 1911 年发表了对玻耳兹曼工作的评述 [E3] 以后，才在某种程度上熟悉玻耳兹曼的。

爱因斯坦在 1910 年对赫兹的回答 [E2] 也是值得注意的。他同意赫兹的反对意见，又补充说：“那时 [即 1903 年] 我的推导已不能令我满意了，所以不久之后，我提出了第二个推导。”这后一个

推导包含在爱因斯坦惟一在 1904 年完成的那篇论文 [ E12 ] 中。<sup>①</sup> 这实际上是一个不同的推导，它利用了正则系综，不过仍然包含着赫兹所批评的那个假定。

有趣的是爱因斯坦在 1903 年和 1904 年的孤立的研究中，没有注意到时间反演问题，但这也并没有什么奇怪的，毕竟玻耳兹曼在 30 年前也是这样的。然而，在 1910 年，爱因斯坦与赫兹进行交流时，他是苏黎世的教授（这年夏天，他教热的分子运动理论 [ S8 ]），到这时（如我们以前说过的）他已经读过玻耳兹曼 1877 年的论文。玻耳兹曼在那篇论文中提出，熵并不总是在增大，而只能说它几乎总是在增大。在给赫兹回信的一个月前，爱因斯坦已在另一篇论文里相当确切地陈述了第二定律。<sup>②</sup> 我们只能说，爱因斯坦答复赫兹时，不太在意。

作为对第二定律问题评述的补充，我们应该回顾一下 1912 年 2 月爱因斯坦与埃伦费斯特在布拉格的第一次交往。爱因斯坦夫妇去火车站迎接埃伦费斯特夫妇，寒暄过后，“他们的谈话马上转到物理学，随之又陷入了各态历经假说的讨论” [ K6 ]。

在这一点上，爱因斯坦的科学努力有什么收获吗？有的，他写了 5 篇论文。头两篇关于追求普适分子力的论文，已经差不多被人遗忘了。<sup>③</sup> 后 3 篇论文，雄心勃勃地想为热力学定律建立动力学基础，也没有彻底实现。从这些文章中，我们感觉不到，真的还

对爱因斯坦 1902—1904 年论文的其他讨论，请参阅 K4 和 [ K5 ]。

<sup>②</sup> “物理现象的不可逆性只是表面的……当 [ 一个 ] 系统正好处在一个相对小几率的状态时，它可能 [ 我加的黑体 ] 会向着较大几率的状态演化。” [ E29 ]。

见 4a。

感觉不到爱因斯坦在 1905 年的爆发，那是从他下一篇文章开始的。然而，在他 1904 年的短文里确实还有一点我还没有讲到），暗示着那即将来临的事情。在 1902 年到 1904 年间，爱因斯坦可能还没有抓住那些令人敬畏的问题——同时也还是一个活跃的研究课题——这些问题必须面临的困难是为第二定律提供经得住严格数学检验的基础。但是，他早年的这些努力在他未来的思想发展中起着重要的作用，驱使他在 1904 年问自己：玻耳兹曼常数的意义是什么？如何测量这个常数？对这些问题的追求，导致了他对统计物理学的不朽贡献和他在量子理论中最重要的发现。

爱因斯坦在 1904 年论文 [ E12 ] 的开场白里，就提到方程 (4.3)，“ 对一个系统的熵的描述……它是玻耳兹曼在理想气体情况下发现的，也曾为普朗克在他的辐射理论中所假定…… ” 这里，普朗克的名字第一次出现在爱因斯坦的著作中，而且，我们也从这里看到爱因斯坦后来在统计学背景下考虑量子理论的第一迹象。他似乎对奇妙的方程 (4.2) 已经考虑了很长时间。多年以后，他写道 “1900 年之后不久，即在普朗克的开创性工作之后不久，我就清楚地认识到，不论力学还是热力学（除了极限情况下以外）都不能说是精确成立的 ” [ E52 ]。

他说热力学不精确当然是对涨落现象而言的。爱因斯坦第一次转向涨落问题是在 1904 年，那时他考虑了一个与温度为  $T$  的大系统处于热平衡的具有可变能量  $E$  的系统，这个系统的平衡态能量  $E$  由下式给出：

$$\langle E \rangle = \frac{\int_0^{\infty} E e^{-\beta E} \omega(E) dE}{\int_0^{\infty} e^{-\beta E} \omega(E) dE}, \quad \beta = 1/kT \quad (4.11)$$

这里  $\omega(E)$  是能量为  $E$  的态密度。1904 年, 爱因斯坦导出了系统均方能量涨落公式:

$$\langle \epsilon^2 \rangle \equiv \langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 \quad (4.12)$$

方程(4.11) 对  $\beta$  微分, 他得到:

$$\langle \epsilon^2 \rangle = -\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial \beta} = kT^2 \frac{\partial \langle E \rangle}{\partial T} \quad (4.13)$$

$\langle \epsilon^2 \rangle$  (爱因斯坦指出) 是系统的热稳定性的度量。涨落越大, 系统的稳定程度越小。“因此, 绝对常数  $[k]$ <sup>①</sup> 决定系统的热稳定性。[方程(4.13)] 之所以有趣, 原因是它不含任何会令人想到这个理论赖以作为基础的那些假设的量” [E12]。

接着, 爱因斯坦为大涨落引入一个判据:

$$\xi \equiv \frac{\langle \epsilon^2 \rangle}{\langle E \rangle^2} \approx 1 \quad (4.14)$$

这个关系并不被正常条件下的经典理想气体所满足, 因为这时  $\langle E \rangle = nkT/2$  ( $n$  是粒子数) 则  $\xi = 0(n^{-1})$  而与体积无关。他接着指出, 只有对黑体辐射这类系统来说,  $\xi$  才可能有 1 的量级。在这种情况下, 照斯特藩—玻耳兹曼定律,  $\langle E \rangle = aVT^4$  ( $V$  是体积,  $a$  为一常数) 从而  $\xi = 4k/aVT^3$ 。温度  $T$  反比于光谱分布达到极大值时的波长  $\lambda_{\max}$ 。于是他得出结论, 体积相关性是重要的: 对于固定的  $T$  如果  $\lambda_{\max}^3/V$  很大或即  $V$  很小,<sup>②</sup> 则  $\xi$  可以变得很大。因此, 他认为, 辐射是“我们能够想象展示能量涨落的……惟一一类物理系统。”

① 爱因斯坦不是用的符号  $k$ 。

② 对于  $\xi = 1, V^{1/3} \approx 0.4/T, \lambda_{\max} \approx 0.3/T$ 。爱因斯坦发现这个近似的符合关系很有趣。

关于这个题目，我们需要说明两点。首先，它的结论是不正确的。考虑几种模式构成的辐射，那么， $\langle E \rangle = aVT^4 = nkT$  这样又有  $\xi = 0(n^{-1})$ 。因此在经典理论当然也是爱因斯坦 1904 年用的理论) 中，涨落对辐射和对理想气体，并没有什么截然不同。其次，对爱因斯坦 1905 年的工作来说，这里的推理是很重要的，因为它使他注意到了热力学量对体积的依赖性，这种依赖性对他下一篇文章将出现的光量子假说的建立，起着决定性的作用。

不管怎么说，爱因斯坦在 1904 年已经迈了大胆的一步（他自己也知道）：他已经把统计论证用到辐射中来了。<sup>①</sup> 1905 年他还会这么做。1909 年方程 (4.13) 将会成为把他引向电磁辐射的波粒二象性认识的起点。1925 年，一个同方程 (4.13) 密切相关的公式将使他清楚地看到，对物质来说，也存在着同样的波粒二象性。这些话题将在本书的第 6 篇作详细讨论。现在，对方程 (4.13) 再说最后两句。爱因斯坦第一次导出它时，并不知道吉布斯在他以前就这么做过了 [G2]。这也是他 1905 年以前最重要也是惟一值得大家纪念的结果。

1905 年 5 月，爱因斯坦还会为涨落忙碌，尽管方式不同。那时他在研究布朗运动，即我们第 5 章的话题。在本章剩下的篇幅里，我们来谈谈爱因斯坦在 1905 年和随后的年代里对统计物理学的一般看法。

<sup>①</sup> 瑞利在他之前已经这样做过（见 19b）但我相信爱因斯坦在 1904 年不会知道这件事。



#### 4d. 爱因斯坦与玻耳兹曼原理

我已经强调过，爱因斯坦对量子理论的主要贡献都有着统计渊源。相应地，他对统计力学原理的更重要的评论大多出现在他关于量子物理学的论文中。1905 年的光量子一文 [E13] 便是一个典范。17 页的论文，2 页半讨论光电效应，9 页讨论统计学和热力学问题。这篇第一次提出玻耳兹曼原理一词的论文，也包含着他对玻耳兹曼统计方法的批评。

在从 1905 年到 1920 年间，爱因斯坦不止一次地说过，他对别人的几率处理方式感到不满。1905 年他写道：“几率一词是在与它在概率论中的定义不一致的意义下使用的。特别地，‘等概率事件’常常是在所使用的理论图景完全能够确定地提出推论而不是假设的情况下定义的” [E13]。因为这时候爱因斯坦自己也重新提出了玻耳兹曼的第一个几率定义，所以，我们似乎可以满有把握地设想，他这些话是针对配容计算说的。他不仅认为那个定义是人为的，而且他相信人们根本用不着这样的计算：“[我]希望用这种方法来消除仍然阻碍着应用玻耳兹曼原理的逻辑困难” [E13]。为说明自己的想法，他在常温为  $T$ 、体积能可逆地从  $V_0$  变化到  $V$  的情况下，重新导出了著名的熵变公式：

$$S(V, T) - S(V_0, T) = \frac{R}{N} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (4.15)$$

这里  $n$  是气体分子数， $R$  是气体常数， $N$  是阿伏伽得罗常数。如我们后面将看到的，这个方程在爱因斯坦的光量子发现中起着决定性的作用。（为了避免任何混乱，我提醒读者，这个关系与统计

力学的任何微妙之处毫不相干，因为它是可逆过程的热力学第二定律和理想气体定律的一个结果。<sup>①</sup> ) 爱因斯坦推导方程 (4.15) 的过程是这样的：玻耳兹曼原理 (方程 4.3)—— 爱因斯坦用的形式是

$$S = R/N \ln W + \text{常数} \quad (4.17)$$

(直到 1909 年 爱因斯坦才用  $k$  代替  $R/N$ )—— 意味着从状态“a”到状态“b”的可逆变化满足

$$S^a - S^b = \frac{R}{N} \ln \frac{W^a}{W^b} \quad (4.18)$$

令系统由无相互作用从而统计独立的子系统 1, 2, … 组成，那么

$$W = W_1 W_2 \cdots \quad (4.19)$$

$$S^a - S^b = \frac{R}{N} \ln \frac{W_1^a}{W_1^b} \cdot \frac{W_2^a}{W_2^b} \cdots$$

在理想气体情况下，子系统可以是单个分子。令处在状态 a 和 b 的气体分别具有体积和温度  $(V, T)$  和  $(V_0, T)$  接下来爱因斯坦提出他自己的几率定义：“对于这样一个‘统计几率’的几率  $[W^a / W^b]$  我们显然 我用的黑体 看到它的值

对于无限小的可逆变化，第二定律可以写成 ( $p$  = 压力)

$$TdS = c_v dT + [(\partial U / \partial V) + p] dV \quad (4.16)$$

这里  $c_v$  是定容比热， $S$  和内能  $U$  一般说来都是  $V$  和  $T$  的函数 从

$$\frac{\partial(\partial S / \partial V)}{\partial T} = \frac{\partial(\partial S / \partial T)}{\partial V}$$

和方程 (4.16) 得

$$\frac{\partial p}{\partial T} - \frac{(p + \partial U / \partial V)}{T} = 0$$

对于经典理想气体，最后这个关系归结为  $\partial U / \partial V = 0$ ，因为在这种情况下  $NpV = nRT$ 。反过来， $\partial U / \partial V = 0$  意味着  $c_v$  只是  $T$  的函数。(实际上，对经典理想气体， $c_v$  也不依赖于  $T$  但在这里 我们还不需要它) 因此  $TdS(V, T) = c_v(T) dT + nRT dV / NV$ 。对于有限可逆变化，通过对体积积分，便得到方程 (4.15)。

$$\frac{W^a}{W^b} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (4.20)$$

方程(4.17)和(4.20)再一次给出方程(4.15)。

方程(4.20)当然也可以从玻耳兹曼的公式(4.8)导出来 因为每个因子  $\omega_A$  (对所有  $A$ ) 都可以选择它正比于  $V$ 。于是, 方程(4.8)可以写成  $W = V^N$  乘以一个对于状态  $a$  和  $b$  都相同的配容计算因子。因此, 爱因斯坦说方程(4.15) (从而也包括从方程(4.15)和(4.16)导出的理想气体定律) 不必通过计算配容就可以推导出来 是相当正确的。“[他声称]我将在另一篇论文中证明, 在考虑热性质情况下, 所谓统计几率是完全充分的” [E13]。这句话太乐观了, 方程(4.8)有着比方程(4.15)更强的结果。物理学家都不会否认 发现  $n$  个统计独立的粒子在  $V_0$  的子体积  $V$  中的概率‘显然’等于  $(V/V_0)^n$ 。然而 配容的计算带来了更多的信息 即麦克斯韦-玻耳兹曼分布。我们不会奇怪, [爱因斯坦] 许诺的那篇论文从来没有出现过。

然而, 爱因斯坦并没停止批评配容概念。下面是他在 1910 年说的话: “通常人们将  $W$  与配容数等同起来……为了计算  $W$  我们需要一个关于所研究系统的完备的 (分子力学) 理论。因此, 没有一个完备的分子力学理论或其他什么描述这些基本过程的理论, 玻耳兹曼原理是否还有意义, 就很成问题了。[方程(4.13)] 似乎没什么内容, 从唯象的观点来看, 它没能另外提供这样一个基本理论 (*Elementartheorie*)” [E29]。

据我对这段话所能理解的, 它说明爱因斯坦在 1910 年还不清楚配容方法是如何能够从理想气体推广到实际气体的。确实, 如果存在分子间的作用力, 就没有像方程(4.5)和(4.8)那样简单具

体的计算公式。然而，从原则上讲，实际气体可以利用吉布斯的粗粒微正则系综来处理，这个过程爱因斯坦显然还不熟悉。

1910 年以后，在爱因斯坦的论文里再也看不到他对统计方法的批评了。他后来对这个课题的观点，可以用几年后他对玻耳兹曼和吉布斯的评论来很好地说明。关于玻耳兹曼，他 1915 年写道：“他对第二定律的讨论太长，难以捉摸。但是，他对它的思考的努力却因这个主题的重要和优美而得到了丰厚的回报” [E43]。关于吉布斯，他 1918 年写道：“[他的]书……是一部杰作，尽管很难读，而且主要观点要在字里行间去寻找” [E54]。在去世前一年，爱因斯坦表达了对吉布斯的最高敬意。有人问他，在他认识的人中，谁是最伟大的人、最有力的思想家，他回答说：“洛伦兹”，接着又补充道，“我从没见过威拉德·吉布斯 (Willard Gibbs) 如果我见过他，也许我会把他与洛伦兹并列 [D1]。

我在 4a 结束时说过，爱因斯坦喜欢以唯象方式来考虑几率，而不借助于统计力学。本章最后这一点，就用来解释他这样做有什么意义。首先需要强调，玻耳兹曼原理对爱因斯坦来说就像能量守恒定律那么神圣 [E54]。然而，他对其他几率概念处理方式的忧虑，把他引向了一条孤独的与众不同的道路，只有他一个人去寻求  $S$  和  $W$  的关系。他的建议不是从微观出发导向宏观，而是把推理过程反过来。这就是说，玻耳兹曼为获得熵的表示而作了一个关于几率的假定 (Ansatz)，而爱因斯坦提出利用熵的唯象信息，来导出几率必须是什么。

为了说明他行之有效的这种推理方式，我从他关于量子物理学的一篇重要论文里找了一个典型的例子。它涉及到涨落方程

(4.13), 这是吉布斯和爱因斯坦用基本相同的方法独立导出的。1909年, 爱因斯坦又提出了一个完全属于他自己的新推导 [E24]。考虑一个体积为  $V$  在温度  $T$  处于平衡态的大系统。将  $V$  分成子体积  $V_0$  和剩余体积  $V_1$  两部分, 这里  $V = V_0 + V_1, V_0 \ll V_1$ 。对固定的总能量作同样的划分,  $E = E_0 + E_1$ 。假定熵也是可加的

$$S = S_0 + S_1 \quad (4.21)$$

设  $E_0, E_1$  与它们各自的平衡值的偏离分别为  $\Delta E_0, \Delta E_1$  那么

$$\begin{aligned} \Delta S = & \left[ \frac{\partial S_0}{\partial E_0} \right] \Delta E_0 + \left[ \frac{\partial S_1}{\partial E_1} \right] \Delta E_1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 S_0}{\partial E_0^2} \right] (\Delta E_0)^2 + \\ & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 S_1}{\partial E_1^2} \right] (\Delta E_1)^2 + \dots \end{aligned} \quad (4.22)$$

这里括号中的表达式指平衡值。一阶项因  $\Delta E_0 = -\Delta E_1$  (能量守恒) 和  $[\partial S_0 / \partial E_0] = [\partial S_1 / \partial E_1]$  (平衡) 而消去。而且,  $[\partial^2 S_0 / \partial E_0^2] = -1/c_0 T^2, [\partial^2 S_1 / \partial E_1^2] = -1/c_1 T^2$  这里  $c_0, c_1$  是各自的定容热容量而且因  $V_1 \gg V_0$  有  $c_1 \gg c_0$ 。因此, 方程(4.22)成为

$$\Delta S = \Delta S_0 = -\frac{(\Delta E_0)^2}{2c_0 T^2} \quad (4.23)$$

接着, 爱因斯坦把关系  $S_0 = k \ln W_0$  用于子系统, 而且重新解释这个方程意味着  $W_0$  是子系统 (在给定的时间) 具有熵  $S_0$  的几率。这样,

$$W_0 = \bar{W}_0 e^{\Delta S/k} \quad (4.24)$$

这里是  $\bar{W}_0$  是  $W_0$  的平衡值。方程(4.22)和(4.24)表明,  $W_0$  服从关于  $\Delta E_0$  的高斯分布。(同以前一样), 记这个分布的均方差为  $\langle \epsilon^2 \rangle$  那么  $\langle \epsilon^2 \rangle = k c_0 T^2$  又得到方程(4.13)。

① 这个假定后来受到了小小的挑战, 参见 21a。

现在我们知道，从事统计力学基础研究的物理学家同时面临着两个任务，而这一点在 20 世纪初，他们并不是很快就明白了的。到了 1913 年玻尔的原子时代，所有量子现象的证据都从黑体辐射或比热中出现了。在这两种情况下，统计思想都起着关键作用。这样，伴随着对经典统计力学的更进一步的理解，人们也逐渐认识到量子现象要求一种新的力学，从而也要求一种新的统计力学。关于分开这问题所遇到的困难，说得最清楚不过的是爱因斯坦在 1909 年的那句话。他这时又在抱怨配容，他发现“不论玻耳兹曼先生还是普朗克先生，都没有给  $W$  下过定义”[E24]。写这些话时，经典物理学家的玻耳兹曼已经离开了人世。而第一个量子物理学家普朗克，把一种新的配容计算方法引进了 20 世纪的理论物理学，这个方法绝对没有丝毫的逻辑基础——但却为他提供了他正在寻找的答案。<sup>①</sup> 不论对两位先生既尊重又批评的爱因斯坦，还是别的什么人，都没能在 1909 年预见到，在 20 世纪后期，看到玻耳兹曼和普朗克的努力被统一在同一科学语言下，会显得多么奇妙。

总的说来，爱因斯坦在 1905 年之前关于统计力学的工作之所以值得我们纪念，首先在于他导出了能量涨落公式，其次在于他对热力学量与体积的依存关系的兴趣，这对他发现光量子是那么的重要。他用“持续时间”重新提出了玻耳兹曼的第一个几率定义。他对玻耳兹曼第二个定义的批判立场，则可能使他用“爱因斯坦逻辑 ' $S \rightarrow W$ ' 来代替“玻耳兹曼逻辑 ' $W \rightarrow S$ ”。从他对统计力学基础的活动中，产生出大量的更为重要的应用方法，用于在理论上确定玻

普朗克的计算方法在 19a 讨论。

耳兹曼常数。这些应用是下一章的主题，在那里，我们会看到爱因斯坦在 1905 年的爆发。他的创造力的爆发，原因之一很可能是他从并不很适合他科学气质的高深的数学基础问题中解放出来了。

### 参考文献

- B1. M. Born in *Albert Einstein; Philosopher-Scientist* (P. Schilpp, Ed.), p. 46. Tudor, New York, 1949.
- B2. L. Boltzmann, *Wiener Ber.* **53**, 195 (1866). Reprinted in *Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann* (F. Hasenohrl, Ed.), Vol. 1, p. 9. Chelsea, New York, 1968. (These collected works are referred to below as WA.)
- B3. —, *Wiener Ber.* **66**, 275 (1872); WA, Vol. 1, p. 316.
- B4. —, *Wiener Ber.* **63**, 712 (1871); WA, Vol. 1, p. 288.
- B5. —, *Wiener Ber.* **75**, 62 (1877); WA, Vol. 2, p. 112 (esp. Sec. 2).
- B6. —, *Wiener Ber.* **76**, 373 (1877); QA, Vol. 2, p. 164.
- B7. —, PAW, 1897, p. 660; WA, Vol. 3, p. 615.
- B8. —, WA, Vol. 2, p. 118, footnote 2.
- B9. —, *Wiener Ber.* **58**, 517 (1868); WA, Vol. 1, p. 49 and Sec. III. See also L. Boltzmann, *Nature* **51**, 413 (1895); WA, Vol. 3, p. 535.
- B10. —, WA, Vol. 2, p. 218.
- B11. —, WA, Vol. 2, pp. 166, 223.
- B12. —, *Wiener Ber.* **63**, 679 (1871); WA, Vol. 1, pp. 259, (esp. p. 277); *Crelles J.* **100**, 201 (1887); WA, Vol. 3, p. 258.
- B13. —, *Vorlesungen über die Principe der Mechanik*, Vol. 1, p. 9. Earth, Leipzig, 1897. Reprinted by Wissenschaftliche Buchges, Darmstadt, 1974.
- B14. —, *Wiener Ber.* **72**, 427 (1875); WA, Vol. 2, p. 1, Eq. 13.
- B15. —, *Vorlesungen über Gastheorie*. Earth, Leipzig, 1896, 1898. Translated as *Lectures on Gas Theory* (S. G. Brush, Tran.). University of California Press, Berkeley, 1964.
- B16. —, [B15], Vol. 1. Sec. 6.

- C1. R. Clausius, *AdP* **79**, 368, 500 (1850).  
C2. —, *AdP* **125**, 353 (1865), esp. p. 400.  
C3. —, *AdP* **142**, 433 (1871).  
D1. V. A. Douglas, *J. Roy. Astr. Soc. Can.* **50**, 99 (1956).  
E1. A. Einstein, [B1], p. 46.  
E2. —, *AdP* **34**, 175 (1911).  
E3. P. and T. Ehrenfest, *Enz. d. Math. Wiss.*, Vol. 4, Part 2, Sec. 28. Teubner, Leipzig, 1911. Translated as *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics* (M. J. Moravcsik, Tran.). Cornell University Press, Ithaca, N. Y., 1959.  
E4. A. Einstein, *AdP* **17**, 541 (1905), footnote on p. 551.  
E5. —, *AdP* **4**, 513(1901).  
E6. —, *AdP* **8**, 798 (1902).  
E7. —, letter to M. Grossmann, April 14, 1901.  
E8. —, letter to J. Stark, December 7, 1907. Reprinted in A. Hermann, *Sudhoffs Archiv.* **50**, 267 (1966).  
E9. —, *AdP* **34**, 165(1911).  
E10. —, *AdP* **9**, 417(1902).  
E11. —, *AdP* **11**, 170(1903).  
E12. —, *AdP* **14**, 354 (1904).  
E13. —, *AdP* **17**, 132(1905).  
E14. —, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen.* K. J. Wyss, Bern, 1905. Apart from a short addendum identical with *AdP* **19**, 289 (1906).  
E15. —, *AdP* **34**, 591 (1911).  
E16. —, *Kolloidzeitschr.* **27**, 137 (1920).  
E17. —, *AdP* **17**, 549 (1905).  
E18. —, *AdP* **19**, 371 (1906).  
E19. —, *Z. Elektrochem.* **13**, 41 (1907).  
E20. —, *Z. Elektrochem.* **14**, 235 (1908).  
E21. —, *AdP* **22**, 180, 800 (1907).  
E22. —, *AdP* **22**, 569 (1907).



- E23. —, *Jahrb. Rod. Elektr.* **4**, 411 (1907), Secs. 15, 16.  
E24. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 185 (1909).  
E25. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 817 (1909).  
E26. — and L. Hopf, *AdP* **33**, 1096 (1910).  
E27. — and —, *AdP* **33**, 1105 (1910).  
E28. —, *AdP* **47**, 879 (1915).  
E29. —, *AdP* **33**, 1275 (1910).  
E30. —, *AdP* **34**, 170, 590 (1911).  
E31. —, *AdP* **35**, 679 (1911).  
E32. —, *AdP* **37**, 832 (1912); **38**, 881 (1912).  
E33. —, *J. de Phys.* **3**, 277 (1913).  
E34. —, and O. Stern, *AdP* **40**, 551 (1914).  
E35. —, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **18**, 318 (1916).  
E36. —, *Mitt. Phys. Ges. Zürich* **16**, 47 (1916).  
E37. —, *Phys. Zeitschr.* **18**, 121 (1917).  
E38. —, *Z. Phys.* **27**, 392 (1924).  
E39. —, *PAW*, 1924, p. 261.  
E40. —, *PAW*, 1925, p. 3.  
E41. —, *PAW*, 1925, p. 18.  
E42. — in *Proceedings of the First Solvay Conference* (P. Langevin and M. de Broglie, Eds.), p. 407. Gauthier-Villars, Paris, 1911.  
E43. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.). Teubner, Leipzig, 1915 (2nd ed., 1925).  
E44. —, [E42], p. 441.  
E45. [E3], Sec. 23.  
E46. [E3], Sec. 11.  
E47. A. Einstein, [E24], p. 187.  
E48. —, letter to M. Besso, March 17, 1903. *EB*, p. 13.  
E49. —, [E11], p. 184.  
E50. —, letter to M. Besso, January 1903. *EB*, p. 3.  
E51. —, letter to M. Grossmann, 1901, undated.  
E52. —, [B1], p. 52.

- E53. —, [E42], p. 436.
- E54. —, letter to M. Besso, June 23, 1918. *EB*, p. 126.
- G1. J. W. Gibbs, *Elementary Principles of Statistical Mechanics*. Yale University Press, New Haven, Conn., 1902.
- G2. —, [G1], Chap. 7.
- H1. P. Hertz, *AdP* **33**, 537 (1910), esp. p. 552.
- J1. See, e. g., S. Jahn, *Jahrb. Rad. Elektr.* **6**, 229 (1909), esp. p. 236.
- K1. T. S. Kuhn in *Critical Problems in the History of Science* (M. Clagett, Ed.), p. 321. University of Wisconsin Press, Madison, 1962.
- K2. M. Klein, *Am. Scientist* **58**, 84 (1970).
- K3. — in *The Boltzmann Equation* (E. G. D. Cohen and W. Thirring, Eds.), p. 53. Springer Verlag, New York, 1973.
- K4. —, *Science* **157**, 509 (1967).
- K5. — in *Proceedings of the Jerusalem Einstein Centennial Symposium*, March 1979.
- K6. —, *Paul Ehrenfest*, Vol. 1, p. 176. North Holland, Amsterdam, 1970.
- L1. P. T. Landsberg, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 149 (1980).
- L2. H. A. Lorentz, [E42], p. 441.
- L3. —, *Entropie en Waarschynlykheid*, p. 39. Brill, Leiden, 1923. Translated as *Lectures on Theoretical Physics* (L. Silberstein and A. Trivelli, Trans.), Vol. II, p. 175. Macmillan, London, 1927.
- L4. J. Loschmidt, *Wiener Ber.* **73**, 128 (1876), see esp. p. 139; **75**, 67 (1877).
- M1. J. C. Maxwell, letter to P. G. Tait, December 11, 1867. Reprinted in C. G. Knott, *Life and Scientific Work of P. G. Tait*, p. 213. Cambridge University Press, Cambridge, 1911.
- M2. —, letter to P. G. Tait, undated; Knott, p. 214.
- M3. —, letter to P. G. Tait, August 1873; Knott, p. 114.
- P1. M. Planck, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **2**, 237 (1900).
- P2. —, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **2**, 202 (1900).
- P3. —, *AdP* **4**, 553 (1901).

- 
- P4. W. Pauli, *Collected Scientific Papers* (R. Kronig and V. Weisskopf, Eds.), Vol. 1, p. 549. Interscience, New York, 1964.
- P5. R. Penrose in *General Relativity* (S. W. Hawking and W. Israel, Eds.), p. 581. Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- S1. A. Sommerfeld, *Phys. Zeitschr.* **18**, 533 (1917).
- S2. E. Salaman, *Encounter*, April 1979, p. 19.
- S3. W. Schottky, *Thermodynamik*, p. 116. Springer, Berlin, 1929.
- S4. A. Sommerfeld, *Thermodynamics and Statistical Mechanics*, p. 213. Academic Press, New York, 1956.
- S5. E. Schrödinger in E. Broda, *Ludwig Boltzmann*, p. 65. Deuticke, Vienna, 1955.
- S6. Se, p. 176.
- S7. Se, p. 198.
- S8. Se, p. 169.
- U1. G. E. Uhlenbeck and G. W. Ford, *Lectures in Statistical Mechanics*, Chap. 1. American Mathematical Society, Providence, 1963.
- V1. V. I. Arnold and A. Avez, *Problèmes Ergodiques de la Mécanique Classique*, Gauthier-Villars, Paris, 1967.

## 第 5 章 分子的实在性

### 5a. 19 世纪的简单回顾

1. 化学 1771 年,《不列颠百科全书》(*Encyclopedia Britannica*) 第一版问世,它是“按照苏格兰绅士协会……的一个新的编辑计划而编的一本有关科学和艺术的辞典。”原子这一词条是由献身学术同时以嗜好威士忌而著名的斯梅里(William Smellie)写的 [K1]:“原子从哲学上说是一种极小的物质粒子,小得可以认为它不可分。原子是 *minima naturae*[最小的实体]而且被想象成第一原理或所有物理数量的组成部分。”德谟克利特(Democritus)也许不会同意这个说法,因为他的原子不一定很小。伊壁鸠鲁(Epicurus)可能也会反对原子有结构——尽管不能通过物理手段把它分成更小的部分。这两位古人也许还能发现这个定义是不完备的:因为它没有说如他们所确信的,原子以无限多种形态和大小而存在,任何一种形态都不可能使自己变成另一种。他们也许还会感到奇怪,为什么没有提到 *πρώτη ύλη*(组成所有原子的基本物质)。然而有可能设想一个古希腊哲学家和 18 世纪哲学家之间的对话,这也许会很快使他们共同认识到:在分隔他们的 2000 年的时间里,在对物质的基本结构的理解方面,几乎没有发生过大的变化。

迅速的改变是从 1808 年开始的。这一年，道尔顿(John Dalton) 发表了他的《化学哲学新体系》(*New System of Chemical Philosophy*)[D1],<sup>①</sup>这件事标志着近代化学的诞生。按近代化学的观点，所有的物质模型都可以归结为有限的原子种类（那时已经知道 18 种元素），道尔顿（在 1810 年）对这门最年轻的学科的早期评价，听起来却很现代：“我应该觉察到存在着大量的可以恰当地称之为基本元质的东西，它们永远不可能依靠任何我们能够把握的力量而从一种变成另一种。然而，我们应该有效地利用各种办法来尽可能地减少这些实体或元质出现的数目。毕竟，我们不知道哪些元素是绝对不可分解的，哪些是耐熔的，因为我们不知道恰当的将它们还原的方法。我们已经观察到所有的同类原子，无论是简单的还是复合的，都一定可以想象为在形状、重量和每一种其他特性上相似的东西”[B1]。注意，道尔顿所说的复合原子就是我们所说的分子。一个人所说的分子，可能是另一个人所说的原子，在 19 世纪大多数年代里，这些术语引起了极大的混乱。一种共同语言的需求越来越强烈，但进展很慢。50 年后，在历史上第一次国际科学会议即 1860 年卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)化学家会议上，<sup>②</sup>会议程序委员会还认为有必要把这个问题放在议程的首位来讨论。“是否能在分子和原子的表述之间建立一种区别，这样，分子就用来命名那些能进入化学反应而且也能在物理性质方面相互进行比较的最小实体粒子——而原子则是那些包含在分子内的最小的实体粒子？”[M1]。比这个问题本身更有趣的是，甚至

① 有中译本，李家玉等译，武汉出版社 1992 年。——译者

② 会议于 1860 年 9 月 3—5 日举行。127 位化学家参加了会议，代表来自奥地利、比利时、法国、德国、英国、意大利、墨西哥、波兰、俄国、西班牙、瑞典和瑞士。

到了 1860 年，也没有达成一致的意见。

为理解 19 世纪的科学，最具启发意义的是年轻的凯库勒 (August Kekulé von Stradonitz) (那时他已经发现碳原子是四价的) 在卡尔斯鲁厄会议上致的开幕词。“[他]讲了物理分子和化学分子的区别以及这些分子和原子的区别。他说，物理分子指的是所讨论的气体、液体和固体的粒子；化学分子是进入或离开化学反应的最小实体粒子，这些分子并不是不可分的。而原子则是不能进一步分解的粒子” [M1]。康尼查罗 (Stanislao Canizzaro) 在凯库勒讲话后的讨论中说，所谓物理分子和化学分子之间的区分，没有实验基础，从而是不必要的。如果当时多留意一下这些评论，物理学和化学都会获得更多的东西。实际上，关于 19 世纪的原子和分子的争论，最值得注意的是，化学家和物理学家在实际上没有忽略对方时，他们的目的在很大程度上是相反的。这并不是说化学家有一种共同的观点，而物理学家有另一种观点。相反，更确切地说，在两大阵营内部都存在着很多而且常常是很大的意见分歧，这些用不着在这里详细讲出来。我们要做的，只是举几个能说明问题的例子，并对中心论题作些特别说明。化学家争论的焦点在于，原子是实在的客体，还是仅仅是认识化学规律和定律的记忆手段？物理学家的争论主要集中在气体分子运动论，特别是围绕着热力学第二定律的意义。

道尔顿对盖-吕萨克 (Joseph Louis Gay-Lussac) 的工作的看法，较早地说明了物理学家和化学家之间的分歧。道尔顿的化学基于他的倍比定律：如果两个元素可以生成一种以上的化合物，其中一种元素以相同的重量与另一元素相结合，那么另外那种元素在不同化合物中的重量比将是简单的整数。我说过，道尔顿的重

要著作发表于 1808 年。1809 年，盖—吕萨克发表了他的结合体积定律：气体是按体积的简单整数比结合的。盖—吕萨克指出他的结果是与道尔顿的原子论相一致的 [G1]。而另一方面，道尔顿却不相信盖—吕萨克：“他的测量观点类似于我的原子观点；如果能证明所有弹性流体在相同体积内有相同数目的原子，如 1,2,3,4 等等，那么，这两个假设，除我的是普遍的而他的只能用于弹性流体外，将是一样的。盖—吕萨克不得不看到，我已经考虑过类似的假设，又因为它站不住脚而放弃了” [D2]。（弹性流体就是我们现在熟悉的气体。而且道尔顿也不接受阿伏伽德罗 1811 年提出的假设：在固定的温度和压强下，相同体积的气体包含着相同数目的分子 [A1]。<sup>①</sup> 道尔顿的立场在一段时期内并不是孤立的。据各方面情况看，卡尔斯鲁厄会议的高潮是康尼查罗的讲话，在讲话中，讲演者还认为有必要强调阿伏伽德罗原理对化学思考的重要性。<sup>②</sup> 那次会议并没能使化学家们很快地走到一起来。“可能年轻科学家们冲动的行为和高傲的态度，冒犯了老一辈的尊严” [M2] 然而，门捷列夫 (Dmitri Ivanovich Mendeleev) 在 30 年后回忆说：“阿伏伽德罗定律经过这次会议获得了广泛的传播，不久就征服了所有的头脑” [M3]。

阿伏伽德罗定律是最早的建立在分子是实在事物这一明确假设基础上的物理、化学定律。化学家对这个定律的接受却是那么迟疑，可见分子实在性思想的传播有多大的阻力。关于化学家之

<sup>①</sup> 道尔顿反对的原因是他没有（像阿伏伽德罗那样）认识到，气体元素的最小粒子不必是原子，而可能是分子。

<sup>②</sup> 关于这位著名人物的观点，很容易在 1961 年出版的他在 1858 年写的一篇文章的英译本中看到 [C1]。

间的原子争论的更详细的情况，我建议读者参考最近发表的精彩论述 [B1, N1]。这里，我只引一段忠实的原子论者威廉森 ( Alexander Williamson ) 动人的评论。1869 年，在他就任伦敦化学学会主席的演讲中说：“有些权威化学家有时公开地说原子理论是那些他们可以抛弃的东西，他们羞于用它。在他们看来，它似乎是与一般的化学事实截然不同的东西，似乎只有完全扔掉它们科学才会进步……一方面，所有化学家都在用原子理论，而……另一方面，又有相当数量的人不相信它，甚至有些人讨厌它。如果这个理论真的如他们所想象的那样不确定和不必要，那么，把它的缺陷暴露出来，让大家来检查它吧。如果有可能，让我们来补救它；如果它的毛病真像那些批判者的嘲笑所暗示的那样严重、那样不可救药，那就抛弃它，用某个别的理论来代替它” [W1]。

作为对 19 世纪化学的最后评论，我们应该注意那段时间发现的与物质的原子性有关的另一个规律。1815 年，对化学怀有极大兴趣的伦敦开业医生普劳特 ( William Prout ) 在他写的一篇匿名发表的论文中声称，他已经发现原子核素的比重能以一个基本单位的整数倍来表示 [ P1]。第二年，他又匿名发表了一篇补充论文 [ P2]。他提出，这个基本单位可以等同于氢的比重：“我们几乎可以认为古人的  $\pi\rho\acute{\omega}\tau\eta\ \acute{\upsilon}\lambda\lambda\eta$  (组成所有原子的基本物质) 能在氢中实现。”不过，普劳特还没有想到他的假设暗示着原子的实在性：“我相信，像现在大多数植物学家看待林奈体系一样，我已经习惯认为它 [原子理论] 不过是一种约定的技巧，虽然对大多数目的来说它是非常方便的，但它并不代表大自然” [B2]。

2. 分子运动论 气体由离散粒子组成的看法至少可以追溯到 18 世纪。大概是伯努利 ( Daniel Bernoulli ) 第一个提出气体的



压强是由气体微粒与容器壁的碰撞所引起的 [ B3 ]。照当时的定义,我们可以说,19 世纪的 [ 分子 ] 运动论大师都是原子论者。克劳修斯在 1857 年的一篇题为“论我们称为热的那类运动”的论文中 [ C2 ], 将固体、液体和气体的区别与不同类型的分子运动联系起来。1873 年,麦克斯韦说:“尽管在岁月的历程中,灾难已经出现,就连天堂也可能在劫难逃,尽管古老的体系可能会瓦解而新的体系会从它的废墟中产生出来,但是,这些体系 [ 地球和整个太阳系 赖以构成的分子 即原子 ]——这个物质世界的基石,它们在今天仍然和刚诞生时一样,是永远不会破碎和磨损的,在数量、尺度和重量上还是那么绝对... ..”[M4]。①

玻耳兹曼不爱出风头,实际上常常沉默寡言。假如他不相信物质的颗粒结构,他是不太可能发展他关于第二定律的理论的。但他关于熵“差不多总是但不一定总是”增大的断言,确实很难被那些不相信分子实在性的人所接受。普朗克当时是这个理论的坦率的怀疑者,他看得很清楚。他在 1883 年写道:“第二定律 [ 对普朗克来说,即熵增大是一个绝对定律 ] 自洽的实现.....是与有限原子的假定相矛盾的。人们可以预料,在理论进一步发展的过程中,两个假设之间将会发生论战,最终会有一个假设在这场论战中消失的 [P3]。这就是奥斯特瓦尔德在 1895 年加入的那场论战,那年,他在德国自然研究者与医生协会 ( Deutsche Gesellschaft für Naturforscher und Ärzte ) 的一次会议上的讲话中说:“所有自然现象最终都能归结为力学现象的前提,不能作为有效的研究假设:

法拉第对这些话有保留意见。他在 1844 年写道:“原子学说.....至多是真理的一个假定,而关于那个真理,我们没有什么可以确定的,不论我们对它的可能性可以说、怎么想”[W2]。

它完全是错误的。这个错误最清楚不过地由下面的事实揭示出来了：所有的力学方程都有允许时间量反号的性质，就是说，在理论上完整的力学过程，[在时间]正反方向上都可以同样地演化。这样，在纯粹的力学世界里，不可能存在我们现实世界中所有的‘以前’和‘以后’树能回到树苗和种子 蝴蝶能变回幼虫 老人能变成小孩。机械论学说没有解释为什么这些事情不会发生，因为这些力学方程的基本性质，它也不可能提出什么解释。因此，自然现象的实际不可逆性证实了那种不能用力学方程描写的过程的存在；关于科学的唯物主义的判断也随着这一点而确立起来了” [O1]。这段话基本上是洛施米特在 20 年前所做的论证的重演。

这是同在那个会上的玻耳兹曼不得不面对的言论。幸运的是我们有年轻的索末菲写的会场上后来发生的争论的亲历记。“来自德累斯顿的赫尔姆 提交了一篇关于‘唯能说’ (Energetik) 的论文；他背后站着奥斯特瓦尔德，而这两位依靠的是马赫的哲学。马赫没有出席会议。反对者是玻耳兹曼，克莱因 (Felix Klein) 跟在后面。玻耳兹曼和奥斯特瓦尔德的论战，无论从外在的还是内在的方面看，都类似于凶猛的公牛与敏捷的斗牛士之间的角斗。不管斗牛士的反抗多么机敏，然而这一次他还是被公牛战胜了。玻耳兹曼辩论了一天。我们这些年轻的数学家那时都站在玻耳兹曼一边 对我们来说 显然 即使对于单个质点的情况 也不可能从单一的能量方程演绎出运动方程——更不用说对于一个具有很多自由度的体系了……”[S1]。至于马赫的立场，它是反原子论的，但

① 物理学家格赫尔姆 (Georg Helm) 是奥斯特瓦尔德的“唯能说”的热情支持者。照“唯能说”，分子和原子不过是数学的虚构东西，而千姿百态的能量则是基本的物理实在。

比奥斯特瓦尔德更清醒：“[马赫说]如果将它[原子论]的自我生成的、可变的和简便的工具性，即那些分子和原子，理解为隐藏在现象背后的实在，那不是物理科学……原子必须作为一个像数学函数那样的工具”[M5]。

早在 19 世纪末 (*fin de siècle*) 的这些学术讨论发生以前，事实上早在热力学定律建立以前，估算分子大小的理论尝试就已经开始了。早在 1816 年 杨 (Thomas Young) 就指出“水的粒子的直径或线度是在 20 亿到 100 亿分之 1 英寸之间”[Y1]。<sup>①</sup> 1866 年 洛施米特计算了一个空气分子的直径 得到的结论是“在分子和原子范围中，合适的长度度量是百万分之一毫米”[L1]。4 年后，开尔文发现，“气体的分子直径不可能小于  $2 \times 10^{-9}$  厘米”[T1] 他曾认为，“气体由运动分子组成，是一个业已确立的科学事实。”1873 年，麦克斯韦宣称，氢分子的直径大约是  $6 \times 10^{-8}$  厘米 [M6] 同年，范德瓦尔斯 (Johannes Diderik van der Waals) 在他的博士论文中报告了类似的结果 [W3]。至于 1890 年 这些和其他一些人所测定的值 [B4] 的分布，都确定在相当窄的范围内。一篇对 19 世纪 80 年代末的测量结果的评述，将氢原子和空气分子的半径定在  $1 \times 10^{-8}$  到  $2 \times 10^{-8}$  厘米之间 [R2] 这是一个非常合理的范围。前面提到的有些物理学家用过的一些方法，还能确定阿伏伽德罗常数  $N$  即每摩尔的分子数。例如，洛施米特 1866 年的计算暗示着  $N \approx 0.5 \times 10^{23}$  [L1] ，而麦克斯韦发现  $N \approx 4 \times 10^{23}$  [M6]。现在最好的值 [D3] 是

<sup>①</sup> 杨将表面张力与分子力的范围联系起来，然后令这个范围等同于分子直径，通过这个相当粗糙的论证，他得到了他的估计。瑞利和其他一些人都很难理解杨的推理过程 [R1] 。

$$N \approx 6.02 \times 10^{23} \quad (5.1)$$

19 世纪快结束的时候 不同的  $N$  大致确定在  $10^{22}$  到  $10^{24}$  之间。从所用模型和方法的粗糙程度来看——这是所有参与这方面工作的人都强调过的——这个结果已够令人佩服了。

作者们开始走向未经探索的领域，我们不在这里讨论包含在这些论文中的那些有时朦胧而常常很精妙的物理学。然而，洛施米特的工作 [L1] 是一个例外 因为 如我们马上会看到的 他的论文包含着后来又出现在爱因斯坦 1905 年关于分子半径和阿伏伽德罗常数的论文中的一个基本特征：同时运用以已知的物理量分别表示未知的  $N$  和分子直径  $d$  的两个方程。

洛施米特用的第一个方程是关于  $d$ 、平均自由程  $\lambda$  和单位体积的刚球气体中的分子数  $n$  之间的关系： $\lambda n \pi d^2 =$  一个可计算常数。<sup>①</sup> 第二个关系联系着  $n \pi d^3 / 6$ ，即单位体积内分子所占体积的比例。假定这些粒子在液相是紧密聚集的，那么  $n \pi d^3 / 6 = \rho_{\text{气体}} / 1.17 \rho_{\text{液体}}$  这里  $\rho$  是各相的密度，几何因子 1.17 是洛施米特估算的分子在液相中所占体积与它们的固有体积之比。这样我们有两个关于  $n$ （从而也关于  $N$ ）和  $d$  的方程。（洛施米特把他的推理用于空气，这种情况下  $\lambda$  是实验上已知的。然而，为了估算液氧和液氮的密度 他只好用间接的理论估算。）

总的看来，分子实在性早先在物理学中所遇到的阻力要比在

<sup>①</sup> 这个关系是克劳修斯和麦克斯韦导出的。如果用全同分子的麦克斯韦速度分布 那么这里的常数等于  $1/\sqrt{2}$ 。洛施米特用的是克劳修斯的  $3/4$ ，它是在所有气体分子都具有相同速度的假设下得出的。关于对洛施米特计算的修正，可以在 [T2] 中找到。

化学中小一些，这是不奇怪的。1866 年洛施米特的计算这一事例让我们看到，当物理学家已经能够用分子来确实地做些事情时，化学家在大多数情况下还只是认为它们不过真的是一种编码工具或将它们作为这种工具而丢弃了。然而，1874 年以后，化学界要否认分子的实在性就越来越困难了。这一年，范特霍夫（*Jacobus Henricus van't Hoff*）和勒贝尔（*Joseph Achille Le Bel*）根据碳化物的立体化学性质独立解释了某些确定的有机物的同分异构现象。即使这时，怀疑论者也没有立即让步（范特霍夫自己最初在这个问题上也是十分谨慎的 [N2]）。但到了 19 世纪 80 年代，真实的分子图景的威力已被广泛承认了。

为完成爱因斯坦加入之前有关分子实在性问题的全面考察，还需要补充两点进一步地说明。

3. 不可分性的终结 直到 19 世纪末叶，即使不是所有但大多数相信原子实在性的物理学家，都同意麦克斯韦的观点，认为这些粒子是永远不会破碎和磨损的。“它们是……惟一的还完全保持着最初存在状态的物质的东西”，这是麦克斯韦在《热理论》（*Theory of Heat*）一书 [M7] 中写的。这本书包含了他关于原子信念的最精彩表述。<sup>①</sup>诚然，在这些物理学家中，还有许多人（包括麦克斯韦）确信，在原子内部一定得有某种东西来解释原子光谱。于是，虽然需要一个有内部结构的原子图景，但它并不（像它看起来的那样）意味着可以将原子分开。然而，1899 年 J. J. 汤姆逊在发现电子两年以后，又宣布原子已经被分裂了：“起电 [即电离] 实质上包含了原子的分裂，也就是一部分原

对麦克斯韦来说，电离解并不与原子的不可分性相抵触——那是另一回事。

子质量得到自由而从原来的原子中分离出来” [T3]。那时候，人们越来越清楚 辐射现象 (最早在 1896 年发现) 也只得用可分的原子来解释。“ [放射性元素的] 原子从化学观点看，是不可分的，但在这里，它是可分的。”玛丽·居里在 1900 年这么说 [C3]。她又说，用亚原子粒子的脱离来解释放射行为，“严重地破坏了化学原理的基础”。1912 年，卢瑟福和梭迪 (Frederick Soddy) 提出他们的变换理论。根据这个理论，放射性物体包含有不稳定原子，这些不稳定原子在单位时间里衰变一个固定的分数。40 年后，有人描述了他所经历的这个时期的状况：“要年轻的物理学家或化学家去认识，[变换理论] 对当时的原子论者来说，有多大胆，又多么难以接受，即使不是不可能，也一定是很困难的” [R3]。

这样，在世纪之交，相信原子和原子的不可分性的经典原子论者受到了来自两方面的攻击。以奥斯特瓦尔德和马赫为代表的有影响力的保守派迅速衰落了，他们都根本不相信原子的存在。同时，一个新学派出现了。这些人如 J. J. 汤姆逊、居里夫妇和卢瑟福，他们都确信原子的实在性，不过有时也像玛丽·居里那样感到惶恐，他们也都知道，化学不是粒子物理学的最后一章。对他们来说，古人的原子想象已成为现实，古老的物质转变的梦想，也已经成为不可避免的了。

4. 不可见性的终结 如果说，在物理学家和化学家之间，不论他们是否是原子论者，存在一致的观点，那就是，即使原子真的存在，也一定是太小而看不见的。关于这一点，大概没人比范德瓦尔斯讲得更有力的了。在 1873 年博士论文结束时，他希望他的工作有助于人们走近未来的时代，那时，“人们会暂时忘却行星的运

动和天球的音乐，<sup>①</sup>而赞美那些看不见的原子轨道所织成的精美和巧妙的网'[W3]。

终于在 20 世纪 50 年代，我们在离子显微镜下直接看到了原子图像 [M8]。当然，从原子这个词的更广泛的意义上说，比原子更小的粒子也早就“看见”过了。在世纪之交，从硫化锌屏上看到了  $\alpha$  粒子的闪烁；在云雾室中看到了电子的径迹。在 1828 年的一篇部分标题为“1827 年 6、7、8 月对植物花粉中的粒子所进行的显微镜观察的简单解释”的论文中 [B5]，植物学家布朗 (Robert Brown) 报告，他看到了各类小得足以悬浮在水中的微粒的无规则运动。他检查了花粉微粒末，“所有物体都沉积着大量的烟尘，特别是在伦敦”，岩石碎屑中混合着来自狮身人面像或其他地方的微粒。今天我们说，布朗看到的是水分子对悬浮物的作用。但是，以什么样的表达方式来说我们在布朗运动中看到的東西，同我们说云雾室中一定径迹可以确认为一个电子一样，都依赖于理论的分析。

对于布朗运动，爱因斯坦做过这样的分析，从而他成为第一个使分子成为看得见的人。作为走近爱因斯坦分析的最后一步，我必须简单谈谈在 19 世纪后期，人们关于稀溶液都知道些什么。

## 5b. 普费弗尔坩埚和范特霍夫定律

19 世纪 80 年代中期，阿姆斯特丹大学化学、矿物学和地质学

music of the spheres 毕达哥拉斯 (Pythagoras) 学派认为，天体在天球不同层次的振动会产生天上的和声。——译者

教授范特霍夫在研究溶液的化学平衡过程中发现，“如果在溶液中我们只考虑所谓的渗透压，那么，特别在物理性质方面，存在着[液体]和气体之间的根本性的类似，甚至几乎全同……我们在这里不去讨论这种奇怪的类似，而是要讨论根本性的东西”[H1]。这些发现的实验基础，是非凡的普费弗尔 10 年前在波恩通过对刚性薄膜的渗透的测量而提供的 [P4]。

我们先回想一下，范特霍夫的那个渗透压意味着什么。考虑一个充满流体即溶剂的容器，用溶剂可以完全渗透的薄膜在流体中圈闭出一部分体积  $V_0$ 。在  $V$  中注入另一类分子，即溶质。如果薄膜对溶质来说是完全不可渗透的，那么溶剂将流入  $V$  中，直至达到平衡。平衡时，作用在薄膜上的压力就是一种渗透压。如果薄膜有一定弹性，那么渗透压会引起薄膜膨胀。对于不能弯曲的刚性薄膜的特殊情形，施加在薄膜上的压力就是范特霍夫所说的那个渗透压，我们下面所说的压力也是在这个意义上说的。（这个压力可以很大，例如，1% 原糖溶液会产生  $2/3$  个大气压的渗透压）

普费弗尔在植物学和植物生理学方面也很有名，他的另一伟大功绩，就是第一个制造了这种刚性薄膜。他将盛满  $K_3Fe(CN)_6$  水溶液的瓷坩埚放入盛满硫酸铜溶液的池中，结果，在瓷坩埚细孔中生成的  $Cu_2Fe(CN)_6$  沉淀就构成一个刚性薄膜。普费弗尔用他的新工具作了精心的测量，结果使他猜想，“显然[渗透]压一方面与分子的大小，另一方面与分子的数目，一定存在着某些联系” [C4]。爱因斯坦在范特霍夫定律帮助下发现并在博士论文中报告了普费弗尔所猜想的联系。反过来，范特霍夫这个纯粹的唯象的发现，又完全依赖于他对普费弗尔所得数据的分析。



范特霍夫定律适用于理想溶液，即“被稀释到可与理想气体相比的溶液”[H1]。<sup>①</sup> 对这样的理想溶液，他的定律可以表述如下（假定没有电离解过程发生）：

1. 在平衡态 我们有

$$pV=R'T \quad (5.2)$$

而与溶剂的性质无关。与波义耳—盖吕萨克定律类比， $p$  是渗透压， $V$  是薄膜包围的体积， $T$  是温度  $R'$  是一个常数。

2. 阿伏伽德罗定律的推广：在相同的  $p$  和  $T$  下 相同体积的溶液含有相同数目的溶质分子。这个数等于同一（气体）压强  $p$  和温度  $T$  时气体分子的数目。因此，对一克一摩尔分子来说，

$$R'=R \quad (5.3)$$

这里  $R$  是气体普通常数。于是范特霍夫以后，液相为测量气体普通常数提供了一种新方法，从而也为决定阿伏伽德罗常数提供了新的可能性。

埃伦费斯特在 1915 年写道：“事实表明 溶解在稀溶液中的分子加到半透膜上的压力，尽管有溶剂存在，还是与这些分子单独存在并处于理想气体状态时所产生的压力是一样的。这个事实太令人惊讶了，已经有很多人反复尝试过去寻找一种尽可能简单的运动学解释”[E1]。1905 年，爱因斯坦简要地讨论了范特霍夫定律的统计推导 [E2]；然而，更重要的是他应用了这些定律。

1901 年，范特霍夫成为第一个获得诺贝尔化学奖的人。在颁奖仪式上对他的介绍清楚地说明，在 20 世纪伊始，分子实在性已

<sup>①</sup> 范特霍夫指出，稀释过程中的热量能否忽略，是判断溶液是否理想的一个实际标准。

广泛地被物理学家和化学家所接受了：“他证明了气体压强和渗透压是同等的，因而气相的分子和溶液中的分子本身也是相同的。这就带来一个结果，它使我们看到，化学中的分子概念在我们迄今还不曾想到的程度上，有着确定而普遍的有效性” [ N3]。

## 5c. 博士论文

在他的博士论文中，爱因斯坦描述了一个确定分子半径和阿伏伽德罗常数的新的理论方法。通过他的最后方程和糖的水溶液数据的比较，他发现

$$N = 2.1 \times 10^{23} \quad (5.4)$$

在他的博士论文的印刷本 ( printed version )<sup>①</sup>[ E3 ]有句题词：“献给我的朋友马塞耳·格罗斯曼”时间是 1905 年 4 月 30 日作为完稿日期。直到 7 月 20 日，爱因斯坦才把学位论文送给苏黎世大学哲学学院二部主任 [ E4 ]。这种拖延也许有技术上的原因，更大的可能是 4 月到 7 月间，爱因斯坦在忙别的事情：在这几个月里，他完成了他的第一篇关于布朗运动和狭义相对论的论文。这篇学位论文很快被接受了。7 月 24 日，<sup>②</sup>主任把克莱纳 ( Kleiner ) 和布克哈特 ( Burkhardt ) 的赞同报告转给学院里评议，通过了。克莱纳曾请布克哈特校核论文中最重要的部分计算 ( 布克哈特没能指出爱因斯坦的计算中有一个相当严重的错误——后来才发现 )。这样，爱因斯坦就成为博士先生 ( Herr Doktor ) 了。

在德语国家，博士论文一般需正式出版，印数倒是次要的。——译者

<sup>②</sup> 爱因斯坦后来回忆，他听说论文太短了以后，又加上了一句，这样论文才被接受 [ S2 ]。我没有找到这些通信的任何证据，它发生在什么时候，我也不清楚。

爱因斯坦博士论文是他最重要的论文之一，这一点还没有得到足够的认识。历史和传记都不例外地将 1905 年作为他的奇迹年。因为他关于相对论、光量子 and 布朗运动的论文都诞生在这一年。在我看来，博士论文与布朗运动的论文一样重要。事实上，从某些（而不是所有）方面看，他关于布朗运动的结果只是他博士论文的副产品。这就在很大程度上解释了，为什么关于布朗运动的论文只是在博士论文完成 11 天以后，即 1905 年 5 月 11 日才被《物理学纪事》收到。

在博士论文通过 3 周以后，《物理学纪事》收到了一份请求发表的副本（无献词）论文在 1906 年 1 月，爱因斯坦加了一个简短补遗后才发表 E5 [ 我将把这篇论文称为 1906 年论文 )。由于种种耽搁，博士论文在《物理学纪事》上的发表是在布朗运动的文章在同一杂志上发表以后。这可能会使某些人产生这样的印象（例如参见 [ L2 ]），爱因斯坦和苏特兰 ( Sutherland ) 的一个非常重要的方程——扩散和粘滞性之间的关系，首先是爱因斯坦在关于布朗运动的论文中获得的。而事实上，它最先出现在博士论文中。

在 1906 年论文的补遗中，爱因斯坦给出了一个新的（后来证明是改进了的  $N$  值）：

$$N = 4.15 \times 10^{23} \quad (5.5)$$

这个值和他在 8 个月以前得到的值相差这么大，完全归因于他得到了更好的糖溶液的数据。

除开在博士论文中获得的一些结果的基本特性，这篇论文引起人们异乎寻常的兴趣，还有另一个原因：它比爱因斯坦写的其他任何论文都有更为广泛的实际应用。

正如蒙田 (Montaigne) 把人类心智描述为变化无常和多种多样的 (*ondoyant et divers*) 那样, 通过引征指数的研究来追溯科学参考文献也是如此。爱因斯坦对后来的研究所产生的影响的历史, 如他的论文的引用频率所表现的, 为我们提供了几个惊人的例子。在 1912 年以前发表而在 1961 年到 1975 年间被他人引用最多的 11 篇论文中, 有 4 篇是爱因斯坦的。在这 4 篇中, 博士学位论文 (或者说, 1906 年论文) 的引用频率名列第一, 接下来的是写于 1911 年的它的一个续篇 (我在后面将回来讨论它)。关于布朗运动的论文名列第三, 而关于临界乳光的, 名列第四。在 1970 年到 1974 年间, 爱因斯坦的科学论文被引用得最多的, 也是这篇 1906 年论文, 它的引征数比他 1916 年第一次对广义相对论的考察文章高出 4 倍; 比 1905 年关于光量子的文章高出 8 倍 [C5]。

当然, 论文的相对引用频率不是相对重要性的量度。谁不渴望写一篇如此基本的文章以便不久众人皆知, 无人不用呢? 不过很明显, 爱因斯坦博士论文的流行, 一定有它的理由。实际上, 这些原因是不难发现的: 这篇处理大量关于悬浮粒子的流变特性的论文所包含的结果, 有着异常广泛的应用范围。它们联系着建筑行业 (水泥混合中的沙粒运动 [R4])、乳制品业 (牛奶中的酪蛋白胶束的运动 [D4])、生态学 (云中烟雾粒子的运动 [Y2]) 以及前面零星提到的一些例子。爱因斯坦如果听到这些, 一定会很高兴, 因为他是十分喜欢把物理学应用到实践中去的。

让我们来详细地讨论爱因斯坦的博士论文。他的第一步是流体力学。考虑不可压缩均匀流体的稳定流, 如果忽略加速效应, 那么流体运动可用纳维尔-斯托克斯方程来描写:

$$\vec{\nabla} p = \eta \Delta \vec{v} \quad \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (5.6)$$

这里  $\vec{v}$  是速度,  $p$  是流体静压力,  $\eta$  是粘性系数。接着, 在流体中放入大量相同的刚性球状微粒, 假定溶质分子的半径比溶剂分子的半径大得多, 这样, 溶剂还可以作为连续介质处理。假定溶液是稀释的, 那么微粒总体积比液体总体积要小得多。进一步假定:

(1) 体系的整体运动仍是纳维尔—斯托克斯型的; (2) 溶质微粒的平动惯性和转动可以忽略; (3) 无外力作用; (4) 任何一个小球的运动不因其他小球的存在而受影响; (5) 流体张力只作用在运动微粒的表面上; (6) 流速  $v$  的边界条件是, 在球面上,  $v=0$ 。然后, 爱因斯坦证明, 流动仍能用方程 (5.6) 来表述, 只要  $\eta$  用一个新的“有效粘性系数” $\eta^*$  来代替:

$$\eta^* = \eta(1 + \varphi) \quad (5.7)$$

这里  $\varphi$  是 (均匀分布的) 球在单位体积内占据的体积比, 以刚球代表分子 (不离解) 那么

$$\varphi = \frac{N\rho}{m} \frac{4\pi}{3} a^3 \quad (5.8)$$

这里  $N$  是阿伏伽德罗常数,  $a$  为分子半径,  $m$  是溶质的分子量,  $\rho$  是单位体积溶质的总质量。爱因斯坦已得到了稀释的糖溶液的  $\eta/\eta^*$  值, 而  $\varphi$  和  $m$  也是已知量, 这样, 方程 (5.7) 和 (5.8) 描写了两个未知量  $N$  和  $a$  之间的关系。

爱因斯坦接下来要做的事情, (根据洛施米特的精神), ①当然是去找  $N$  和  $a$  的第二个关系。为此, 他用了一个部分热力学和部

① 参阅 5a。在 1915 年关于分子运动论的回顾文章 [E6] 中, 爱因斯坦所讨论的 19 世纪测定  $N$  和  $a$  的惟一方法, 就是洛施米特的那个方法。

分动力学的推理，这个论证在他的博士论文中有概略的叙述，更详细的复述在第一篇关于布朗运动的论文 [ E2 ] 中。这是一个极具独创性的方法。

首先考虑理想气体。一个与时间无关的力  $K$  沿  $x$  轴的负方向作用在气体分子上。单位体积所受的力等于  $K\rho N/m$ 。在热平衡下，这个力和气压  $p$  的平衡关系由下式给出

$$\frac{K\rho N}{m} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{RT\partial\rho}{m\partial x} \quad (5.9)$$

这里  $R$  是气体普适常数。现在，爱因斯坦根据范特霍夫定律得出，只要与时间无关的力  $K$  仅作用在溶质分子上，那么方程 (5.9) 对于稀溶液也应该成立。

令  $K$  使溶质分子得到一个（相对于溶剂）为  $v$  的速度。如果溶剂分子的平均自由程远小于溶质分子的半径，那么，（也从溶质微粒表面  $v=0$  的边界条件的观点看），我们有著名的斯托克斯关系

$$K = 6\pi\eta a v \quad (5.10)$$

这样在  $K$  的作用下每秒钟有  $K\rho N/6\pi\eta a m$  个溶质分子沿  $x$  负方向通过单位面积。结果产生的浓度梯度导致  $x$  方向上  $DN/m$  ( $\partial p/\partial x$ ) 个粒子/厘米<sup>2</sup>/秒的扩散，这里  $D$  定义为扩散系数。动力学平衡要求，扩散流的大小等于由  $K$  产生的流的大小：

$$\frac{\rho K}{6\pi\eta a} = D \frac{\partial\rho}{\partial x} \quad (5.11)$$

然后，根据热力学平衡条件 [ 方程 5.9 ] 和动力学平衡条件 [ 方程 (5.11) ]。

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6\pi\eta a} \quad (5.12)$$

我们看到力  $K$  在方程 (5.12) 中已消去了。所以，这里的技巧是

只将  $K$  作为一个中间量来联系扩散系数与斯托克斯流体中的粘  
性系数。方程 (5.12) 就是两个未知量  $N$  和  $a$  的第二个关系。

一个值得注意的巧合是，在爱因斯坦写学位论文的同时，方程  
(5.12) 也在澳大利亚被发现了。1905 年 3 月，苏特兰提交了一篇  
论文，在论文中，他用我们刚讲过的方法得到了与爱因斯坦完全相  
同的结果 [S2a]。这样，方程 (5.12) 应该恰当地称为苏特兰—爱因  
斯坦关系。

注意 方程 (5.12) 的推导本质上与溶质微粒的运动细节无关。  
这里的强有力的论证，后来多次出现在爱因斯坦的不同主题的工作  
中：一个“体系的力”，即斯托克斯型的阻力（也就是正比于速  
度），与一个随机的或涨落的力相平衡。现在的情形和布朗运动的  
情形一样，涨落力是由周围分子的热运动产生的，它导致了净扩  
散。后来，在 1909 年和 1917 年，爱因斯坦还会运用斯托克斯力和  
由电磁辐射产生的涨落力之间的平衡。

至于爱因斯坦学位论文的内容，在刚发表的 5 年内，一切还十  
分平静。后来，佩兰 (Jean Baptiste Perrin) 的一个名叫巴塞兰先  
生 (Mr. Bacelin) 的学生告诉爱因斯坦，他测量到的  $\eta^*$  值太大了，  
不能与方程 (5.7) 一致。我们在下一节会看到，这时候，关于  $N$  应  
该有多大，佩兰已经有了一个好想法。因此，现在  $\eta^*$  可以计算 ( $a$   
从其他来源知道)，结果也能拿来与实验相比较！听到这个消息，  
爱因斯坦叫他自己的一个学生去计算，发现在方程 (5.7) 的推导中  
有一个低级但并非无关紧要的错误，正确结果应该是 [E7]

$$\frac{\eta^*}{\eta} = 1 + \frac{5\phi}{2} \quad (5.13)$$

爱因斯坦用与以前得到 (5.5) 时用过的同样的数据，得到新的  $N$

值为

$$N = 6.6 \times 10^{23} \quad (5.14)$$

这个结果要好得多，在下一节里我还会进一步评论它。总的说来，现在我们知道，爱因斯坦的方程(5.13)只有在  $\varphi \leq 0.02$  时才成立。<sup>①</sup> 对它右边的  $\alpha \varphi^2$  ) 量级的修正的理论研究，直到 1977 年才进行。导致  $\varphi^2$  项的效应，是两个粒子之间的关联 [B6] 这也是博士论文没有讨论的现象：溶质微粒的布朗运动 [B7]。

## 5d. 11 天后：布朗运动<sup>②</sup>

1. 19 世纪的另一段历史在 19 世纪，各实验室所做的实验表明，布朗运动随着悬浮微粒的密度和大小的减小而加剧（ $10^{-3}$  毫米是典型的微粒半径，半径超过它的微粒很难观察到布朗运动）；也随着基液的粘性系数的减小和温度的增大而加剧。这些早期研究的另一个重要成果是，它把对这个现象的可能的解释的数目减下来了，这以布朗自己的一个结论为开端：它同那些活泼的小东西无关。进一步的研究还排除了如下一些对布朗运动的影响因素：温度梯度、机械微扰、毛细管作用、液体的辐射（只要运动引起的温度的升高可以忽略），以及液体内对流的存在。我们可以想到，并不是所有这些结论马上就能毫无争议地获得广泛的认同。

<sup>①</sup> 请看拉特格斯 (Rutgers) 的评论，文章详细比较了理论与实验，还列出许多对方程(5.13)的修改建议 [R5]。

爱因斯坦关于布朗运动的论文和那篇 1906 年论文都收在菲尔特 (Fürth) 编辑的一本袖珍小册子中 [F1, F2]。在斯莫鲁霍夫斯基的一篇文章 [S3] 中可以找到 19 世纪的实验工作和理论思考的一组（尽管不太完整但很有用的）参考文献。还可以参见 [B8 和 N4]。



19 世纪 60 年代，出现了这样的观点：这现象的起因将会在液体的内部运动中找到。从那时起，更具体的建议很快就有人提出来了：悬浮微粒的曲折运动是归因于微粒与流体分子的碰撞。至少有 3 个物理学家独立提出了这种观点：帕维亚的坎托尼（Giovanni Cantoni）和比利时的德尔绍克斯（Jesuits Joseph Delsaulx）和卡尔博内勒（Ignace Carbonelle）；当然这些都仅仅是推测，而不是证明。坎托尼写道：“Io penso che il moto di danza delle particelle solide... possa attribuirsi alle differenti velocità che esser devono ... sia in coteste particelli solide, sia nelle molecole del liquido che le urtano da ogni banda”[C6]。<sup>①</sup> 德尔绍克斯写道：“[Les] mouvements browniens... seraient, dans ma manière de considérer le phénomène, le résultat des mouvements moléculaires calorifiques du liquide ambiant”[D5]。<sup>②</sup>

然而，这些建议很快就遭到了以瑞士植物学家内格里（Carl von Naegeli）以及拉姆齐（William Ramsey）等人的强烈反对。他们的反驳基于一个错误的假设：悬浮微粒路径的每一段折线都应该是微粒与个别分子的单个碰撞的结果。尽管当时还没有很好的定量实验，但还是可以不太困难地认识到，这个假定会带来荒谬的结果。不过，人们也没完全放弃用分子碰撞来解释布朗运动。古伊（Louis Georges Gouy）就是一个很好的例子。关于布朗运动他做过一些 19 世纪最好的实验，他同意内格里和拉姆齐的说法，但

“我相信，固体微粒的跳跃运动……可以归因于不同的速度，而速度的差别……则要么归因于上述的固体微粒，要么归因于从各方向与 [这些固体微粒] 发生碰撞的液体分子。”

“根据我对这个现象的考虑，布朗运动应该是周围液体分子的热运动的结果。”

他又猜测，在液体中，分子是有组织的群体运动，因此悬浮微粒受到的每一次撞击都应归因于大量分子的同时作用。

古伊还第一个指出，从热力学的观点来理解布朗运动是很困难的。在他看来，至少在原则上可能构造出靠这种无休止的运动来驱动的第二类永动机（应当指出，要否定这句话是不那么容易的。关于这个问题的最好的文章是西拉德（Leo Szilard）写的 [S4]）。这就导致古伊表示了这样的信念：卡诺原理（热力学第二定律）不能应用于微米量级线度的范围 [G2]。

在世纪之交常被请来就物理学现状发表意见的庞加莱，使这些思想引起了许多人的注意。在 1900 年巴黎国际物理学会议的开幕词中他在谈了古伊关于布朗运动的思想后指出：“人们也许会相信，正看到麦克斯韦妖在活动” [P5]。他在 1904 年圣路易斯（St. Louis）举办的科学和艺术博览会发表的题为《数学物理学的危机》的演讲中，把卡诺原理放在他列出的有危机的普遍定律的最前面：“（布朗）首先想到[布朗运动]是生命现象，但不久他看到无生命物体的舞蹈并不比生命缺少激情，然后，他把这件事情告诉了物理学家……现在，我们在眼皮底下看到，运动通过摩擦变成了热，热又反过来变成运动。这就与卡诺原理相矛盾” [P6]。

2. N 的多方决定 (Overdetermination)<sup>①</sup> 在 1905 年时，爱因斯坦完全不知道布朗运动的详细历史。那时，他既不知道庞加莱关于相对论的工作，也不知道他的“论热的分子运动论所要求的静止流体中悬浮微粒的运动”的权威断言，而这正是爱因斯坦第一篇

在 26c 我们会看到爱因斯坦自己也用过 *overdetermination* 一词，意思与这里的不太一样。为了区别，我们在这里译为“多方决定”而在 26c 译为“超决定”。——译者

讨论布朗运动的论文的题目 [ E2]。说静止流体，是因为他清楚自己在 11 天前完成的论文已经处理过运动流体。题目中没有布朗运动这个词，可以从文章的第二句话看到解释：“这里讨论的运动可能与所谓的布朗分子运动是同等的；但是，关于后一题目，我能找到的参考文献太不准确，不能让我形成什么意见。”

这篇《物理学纪事》1905 年 5 月 11 日收到的论文，标志着在不到两个月的时间里，爱因斯坦第三次做出了有关阿伏伽德罗常数确定方法的基本发现。3 种方法截然不同。第一种方法（1905 年 3 月 18 日提交给《纪事》）利用了黑体辐射定律的长波极限得出  $N=6.17 \times 10^{23}$  (!)。<sup>①</sup> 第二种方法利用了溶液的不可压缩流动得出  $N=2.1 \times 10^{23}$ ，这是上一节讲过的。第三种方法即关于布朗运动，得到一个公式，而没有得出数值。在这篇论文的最后，他写道：“但愿会有哪个研究者很快能成功地解决这里提出的问题，它对热理论是非常重要的。”<sup>②</sup> 尽管他不了解文献，但他还是正确地估计到，当时还没能得到合适的数值。情况很快变了。顺便说一句，不论在学位论文，还是在关于布朗运动的论文中，爱因斯坦都没有说过，他在 1905 年提出了不仅一个而是几个决定  $N$  的方案。如果说，爱因斯坦在写作时很少参考别人的工作是他的作风，实际上他也很少参考自己的工作，他是从不会在脚注上浪费太多时间的。

爱因斯坦还没有用他发明的新方法来求阿伏伽德罗常数。这年年底 12 月，他完成了第二篇关于布朗运动的论文，包括两个进一

<sup>①</sup> 参见 19b。

我注意到爱因斯坦说过 [ E2]，也包括在这篇文章里的他对范特霍夫定律的分子运动论推导，对理解他论证的其余部分并不是必须的。

步决定  $N$  的方法 [E8]。1907 年他指出电压涨落的测量为决定  $N$  提供了又一方法 [E9]。1910 年,他还给出了另一种方法,即临界乳光 [E10]。他一定已经认识到,  $N$  的普遍存在将一劳永逸地解决分子实在性问题,事实确实如此。

我们早就指出随着 19 世纪走向终点,原子和分子的实在性也逐渐被广泛接受,尽管还存在一些阻力。不过,我们还是可以说关于分子实在性的争论的了结是 20 世纪开始 10 年的发展结果。这并不就是因为爱因斯坦的第一篇关于布朗运动的论文或者哪个单独的决定  $N$  的方法。相反,问题的彻底解决,是因为从许多不同方法获得了非常一致的  $N$  值。问题不是由  $N$  的一种决定来解决的,而由  $N$  的多方决定解决的。到 1909 年,根据像放射性、布朗运动、天空的蓝色等不同的事物,可以断言,大量的测定  $N$  值的相互独立的方法所得到的结果都在  $6 \times 10^{23}$  到  $9 \times 10^{23}$  之间。佩兰在 1909 年关于这个课题的专题报告 [P7, P8] 的最后满有把握地说:“我认为,一个不带任何偏见的头脑在考虑那些如此趋于相同结果的极端分散的现象时,不可能不留下强烈的印象,我还认为,从今往后,谁要靠理性的论证来坚持他对分子假设的敌对态度,那将是很困难的” [P8]。<sup>①</sup>

3. 爱因斯坦第一篇关于布朗运动的论文 我们先评述以前的一个评论,接下来将解释,第一篇关于布朗运动的论文在什么意义上是博士论文的一个例证。为达到这个目的,我们回到前面讨论过的扩散系数  $D$  和粘性系数  $\eta$  之间的关系

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi\eta a} \quad (5.12)$$

<sup>①</sup> 关于在 1980 年我们对  $N$  的认识状况 请参阅 [D3]。

这里  $a$  是溶解在液体中的刚球分子的半径，回想方程 (5.12) 推导中的如下几个要点：

1. 范特霍夫定律的适用性 [方程 (5.2) 和 (5.3)];
2. 斯托克斯定律的有效性 [方程 (5.10)];
3.  $x$  方向的扩散机制，由以下方程描写 (以前没有具体用过)

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5.15)$$

这里  $n(x, t)$  是时刻  $t$  在  $x$  附近单位体积的微粒数目。

爱因斯坦处理布朗运动的实质，在于他发现，就下面三个事实而言，对溶液适用的，对悬浮体也适用：

1. 范特霍夫定律不仅对稀溶液成立，对稀释的悬浮微粒也成立：“我们不明白，为什么对于相同数目的悬浮体和被溶解分子，渗透压不会保持相同”[E2]。
2. 不加任何具体说明，爱因斯坦假定斯托克斯定律成立。回想一下，这暗示着将液体作为连续介质来处理 (它还暗示着所有的悬浮微粒有相同的半径)。
3. 布朗运动被描述为服从方程 (5.15) 的扩散过程 (为简单起见，爱因斯坦把运动作为一维问题处理。)

现在，考虑在时刻  $t=0$  所有粒子都在原点的情况下，方程 (5.15) 的基本解：

$$n(x, t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (5.16)$$

这里  $m = \int n(x) dx$ 。离开原点的均方位移  $\langle x^2 \rangle$  为

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{n} \int x^2 n(x, t) dx = 2Dt \quad (5.17)$$

根据方程 (5.12) 和 (5.17)

$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{3\pi Na\eta} t \quad (5.18)$$

在这个爱因斯坦关于布朗运动的基本方程中,  $\langle x^2 \rangle$ 、 $t$ 、 $a$ 、 $\eta$  都是可测量的, 因而  $N$  值也可以确定。正如以前说过的, 我们对这个结果的惊奇是永远的, 似乎可以说不知它是从哪里产生出来的: 准备一组小球, 同简单分子相比, 它们总是巨大的, 拿一只跑表和一个显微镜, 就能发现阿伏伽德罗常数了。

像爱因斯坦强调的, 没有必要假定所有粒子在  $t=0$  时都在原点。那就是说, 由于假定粒子是独立运动的, 我们可以认为  $n(x, t)dx$  是在  $t$  秒钟内位移在  $x$  和  $x+dx$  之间的粒子数。他举了一个例子对 17 的水,  $a \approx 0.001$  毫米,  $N \approx 6 \times 10^{23}$ 。如果  $t=1$  分钟, 我们有  $\langle x^2 \rangle^{1/2} \approx 6$  微米。

方程 (5.18) 是涨落—耗散关系的第一个例子: 一个均方涨落与一个由粘性参量唯象地描写的耗散机制相联系。

爱因斯坦的论文立刻引起了广泛的注意。1906年9月, 他收到伦琴 (Wilhelm Conrad Röntgen) 的来信, 问他要相对论论文的抽印本。在信中, 伦琴还表示了对爱因斯坦的布朗运动的工作有极大兴趣, 他问他对古伊的观点有什么看法, 又说: “可能很难在 [布朗运动] 和热力学第二定律之间建立一种和谐的关系” [R6]。很难想象爱因斯坦会不给这样一个著名的同行回信, 不幸的是, 爱因斯坦的回信 (如果有的话) 不知到哪儿去了。

4. 作为马尔科夫过程的扩散 爱因斯坦第一篇关于布朗运动的论文的主要物理思想, 全都包含在方程 (5.18) 中。然而, 同一篇论文还包含了另一个新奇的事情, 还是那么简单, 那么深刻, 与

方程 (5.15) 的解释有关。这个方程来自 19 世纪, 从连续理论中产生出来, 也在其中得到应用。1905 年, 爱因斯坦从布朗运动的思考中得到启发, 重新推导了这个扩散方程。

像在方程 (5.12) 的推导中所做的那样, (爱因斯坦说) 假定悬浮微粒彼此独立地运动, 进一步假定, 我们可以定义一个时间间隔  $\tau$  它比观察的时间间隔 即方程 (5.18) 中的  $t$ ] 要小, 同时它又足够大, 以至微粒在间隔  $\tau$  内的运动与在间隔开始以前的历史无关。令  $\phi(\Delta)(d\Delta)$  为在间隔  $\tau$  内, 一个微粒处于  $\Delta$  到  $\Delta + d\Delta$  间的几率。几率  $\phi$  是归一和对称的:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(\Delta) d\Delta = 1, \phi(\Delta) = \phi(-\Delta) \quad (5.19)$$

由于微粒是独立运动的, 我们可以在时刻  $t$  把这个分布与  $n(x, t + \tau) dx$  联系起来:

$$n(x, t + \tau) dx = dx \int_{-\infty}^{\infty} n(x + \Delta, t) \phi(\Delta) d\Delta \quad (5.20)$$

左边展开到  $\tau$  的一阶项, 右边展开到  $\Delta$  的二阶项, 再用方程 (5.19) 那么 我们重新得到方程 (5.15),  $D$  现在定义为几率分布  $\phi$  的二级矩

$$D = 1/2\tau \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 \phi(\Delta) d\Delta \quad (5.21)$$

所有关于碰撞动力学的信息都包含在  $\phi(\Delta)$  的具体表达式中。因而, (5.18) 的巨大优越性在于, 除了用在方程 (5.21) 的推导中的非常普遍的条件以外, 它与碰撞现象的所有细节无关。

用今天的话来说, 爱因斯坦在 1905 年将扩散过程处理为一个马尔科夫过程 [以马尔科夫 (Andrei Andreievich Markov) 的名字命名。他在 1906 年引入了所谓的马尔科夫链], 从而在单粒子的

随机行走和多粒子的扩散之间建立了联系。

5. 后来的论文 下面,我们简要回顾一下爱因斯坦后来关于布朗运动的论文的主要观点。

1) 1905 年 12 月[ E8 ] 同事告诉爱因斯坦,他前面的论文的思想,在数量级上与布朗运动的实验确实是符合的,于是他把新论文题名为“论布朗运动理论”。他提出以前思想的两个新应用:悬浮体在重力作用下的垂直分布和在转动固体球情形下的布朗运动。相应地,他也发现两个新方程,根据这两个新方程,也可以决定  $N$ 。他还指出,方程 5.18) 在  $t$  很小时不能成立,因为这方程暗示着  $t \rightarrow 0$  时 平均速度  $\langle x^2 \rangle^{1/2}/t$  趋于无限,原因是我们……明确地假定 在时间  $t$  内的现象与在较早时间 [ 发生的事情 ] 无关。这个假定当  $t$  很小时不是很合适。①

2) 1906 年 12 月[ E9 ] 简单讨论了“与布朗运动相近的一个电学领域的现象”在电容器极板间(依赖于温度的)电势的均方涨落。

3) 1907 年 1 月[ E11 ] 爱因斯坦提出并回答了下面的问题:由于假定悬浮体服从范特霍夫定律,根据能量均分定理,可以得到粒子的瞬时速度的均方值  $\overline{v^2}$  等于  $3RT/mN$  ( $m$  是悬浮微粒的质量)。这样,  $\langle v^2 \rangle$  比从方程 5.18 对适当的  $t$  值得出的平方平均速度  $\langle x^2 \rangle/t^2$  要大许多数量级。这是自相矛盾吗?不是的,因为我们可以估计,瞬时速度在大约  $10^{-7}$  秒的时间内,其大小和方向都会发生改变从而  $\overline{v^2}$  在布朗运动实验中是不可能观察到的。这也

① 奥恩斯坦(Ornstein)[O2]和菲尔特(Fürth)[F3]独立给出了对所有  $t$  成立的一般解。



回答了内格里—拉姆齐的疑难。

4) 1908 年 爱因斯坦在物理化学家理查德·洛伦兹 (Richard Lorentz) 的建议下, 对布朗运动理论作了基本阐述 [E12]。

到这里, 爱因斯坦在经典领域内对布朗运动的贡献就讲完了。它在量子理论中的应用, 将在第六篇讨论。最后我来零散地谈谈经典布朗运动后来的历史情况。

爱因斯坦关系 [方程(5.18)] 现在普遍借助朗之万方程 (朗之万在 1908 年导出的 [L3]) 来推导。第一篇关于布朗运动的综述出现在 1909 年 [J1]。后来, 这个题目又生出许多分支, 包括小  $t$  下的行为、非斯托克斯流体情形以及外力存在的情形 [W4]。在 20 世纪 70 年代, 布朗运动仍然是一个活跃的研究课题 [B9]。

奈 (Nye) 描述了迅速兴起的新一代的实验对爱因斯坦理论的证实, 特别是佩兰及其学派所起的关键作用 [N1]。佩兰自己在他 1913 年首次出版的《原子》(*Les Atomes*) 一书中的叙述 (也有英译本 [P10]), 今天读来, 也像当年一样令人耳目一新。<sup>①</sup> 这本书不仅讨论了根据布朗运动来测定  $N$  的方法, 而且还总结了那时检验过的各种决定  $N$  的方法。值得注意的是, 爱因斯坦在博士论文中提出的方法却不见了。我前面说过, 佩兰的一个学生曾与爱因斯坦通过信, 使他发现了论文中的一个错误。佩兰一定知道这件事, 因为爱因斯坦不久后给他写过一封信, 感谢他的意见, 并告诉他修正的结果 [E13]。爱因斯坦那个最近的  $N$  值 [方程(5.14)] 发表于 1911 年, 它没有出现在佩兰的书里, 这表明, 爱因斯坦的博士论文

① 我极力推荐读者去读佩兰的论文集 [P11]。

在早年并没有受到普遍的赏识。关于这一点，我们还可以明显地从爱因斯坦 1920 年发表的一篇短文看出来。这篇短文的惟一目的，在于唤起人们注意他 1911 年发表的一个勘误 [E7]：“它现在似乎还没有完全引起这个领域内的人的注意。”

1909 年下半年，爱因斯坦从苏黎世写信给佩兰：“我已经相信，不可能这么精确地研究布朗运动” [E15]。这封信也说明，爱因斯坦那时的兴趣已经转向了量子理论。他问佩兰，从普朗克黑体辐射定律得到的  $N$  和从布朗运动得到的  $N$  有 15% 的差别，能不能给这个差别赋予任何重要意义？对他来说，它似乎是“令人不安的，因为人们一定要说普朗克公式的理论基础是虚构出来的。”

前面讲爱因斯坦关于布朗运动的工作，强调了它在保证分子实在性被普遍接受的过程中所起的作用，然而，按照爱因斯坦自己的观点，这不是布朗运动在物理学发展中的惟一作用，也不是最重要的作用。1915 年关于这个工作，他写道：

[它]之所以重要是因为允许精确地计算  $N$ ……不过，更重要的原理上的意义在于……我们在显微镜下直接看到了以机械能形式出现的热能部分。 [E6]

1917 年，他又写道：

由于理解了布朗运动的本质，所有对热力学定律的玻耳兹曼解释的正确性的疑虑，一下子都消失了。 [E16]

## 5e. 爱因斯坦和斯莫鲁霍夫斯基：临界乳光

如果斯莫鲁霍夫斯基只是一个杰出的理论物理学家而不同时是一位优秀的实验家，那么他可能会是第一个发表布朗运动的定量理论的人。

斯莫鲁霍夫斯基出生在一个波兰家庭，早年在维也纳度过，也在那里读大学。1894 年毕业后，他到国外的几个实验室工作，然后回维也纳，成为一名无薪讲师。1900 年，他成为伦堡 (Lemberg 现在的利沃夫 [Lvov]) 大学的理论物理学教授，一直到 1913 年。这段时间，他完成了他的主要工作。1913 年，他任克拉科夫 (Cracow) 的杰齐洛尼大学 Jagiellonian University 实验物理学研究所所长，1917 年在那儿死于传染性痢疾。<sup>①</sup>

奇怪的是，斯莫鲁霍夫斯基和爱因斯坦经常同时独立地抓住差不多相同或相似的问题。1904 年，爱因斯坦研究能量涨落时 [E17]，斯莫鲁霍夫斯基研究理想气体的粒子数涨落 [S5]。爱因斯坦完成第一篇关于布朗运动的论文是在 1905 年 5 月，而斯莫鲁霍夫斯基是在 1906 年 7 月 [S3]。以后我们还会遇到更多的这类例子，不过，我们还是首先来说布朗运动。

与爱因斯坦不同，斯莫鲁霍夫斯基很熟悉 19 世纪的布朗运动研究，至少因为他与他学生时代的朋友埃克斯纳 (Felix Exner) 保

关于斯莫鲁霍夫斯基的生活和工作的详细情况，请读者参阅特斯克 (Teske) 写的传记 [T4]。我将在这里提到的爱因斯坦与斯莫鲁霍夫斯基的通信，也可以在该书看到。我对斯莫鲁霍夫斯基的贡献的认识，很大程度上受益于读了卡克 (Mark Kac) 的未发表手稿。

保持着联系，而埃克斯纳在这个课题上做过很好的实验工作。实际上斯莫鲁霍夫斯基在 1906 年的论文中批评了爱因斯坦以前的所有对这个现象的解释。和爱因斯坦一样（但更早一些），斯莫鲁霍夫斯基也反驳了内格里—拉姆齐的反对意见。他指出，我们在布朗运动中所看见的，实际上是悬浮微粒与周围液体分子每秒  $10^{20}$  次的碰撞所产生的平均运动。他还反驳了别的意见：“内格里相信，[碰撞效应]应该在平均中彼此相消……这跟赌徒相信他决不会比单赌一注输得更多犯的是同样的概念性错误。”接着，为说明问题斯莫鲁霍夫斯基计算了在规定的扔钱币次数下赢或输！得一定数额的概率。<sup>①</sup>

斯莫鲁霍夫斯基在他 1906 年论文[S3]的开头提到 1905 年的两篇文章：“这些文章的发现完全符合我……几年前得到的一些结果，从那时起，我就认为这些结果是这个现象的运动特性的重要论证。”那么，他为什么没有更早发表呢？虽然现在我还不能对这个观点的结果进行实验验证，那是我原来想做的事情。但是，我还是决定发表这些想法……”作为对这个决定的支持，他说他的运动学方法似乎比爱因斯坦的方法更直接、更简单，从而也更有说服力。在爱因斯坦的方法中，碰撞运动没有什么具体的作用。人们是否同意他的优越性判断（我不同意），在某种程度上要看他熟悉哪种方法。不管怎么说，斯莫鲁霍夫斯基的论文，也是对物理学的一大贡献，尽管爱因斯坦的优先权是毫无疑问的（斯莫鲁霍夫斯基自己也这么说[S6]）。

概率论常有令人大吃一惊的结果，这里说的赌博问题就是一例。比如，扔 20 次硬币，不幸的赌徒领先一半 10 次的概率只有 0.06，而他一次也没领先的概率却为 0.3524！参见费勒（William Feller）的《概率论及其应用》（第一卷第 3 章）。——译者

斯莫鲁霍夫斯基把悬浮微粒看成瞬时速度为均分定理所给的常数的刚球。他从克努森的情形（平均自由程比半径  $a$  大）出发，用刚球碰撞的运动学，计算悬浮微粒和液体分子每一次碰撞在方向上引起的平均变化，他在这里发现了一个（ $x^2$  的表达式当然与方程 (5.18) 不同）。他之所以必须先处理克努森情形，是因为在运动学上它比斯托克斯情形简单得多。对于斯托克斯情形，自由程比  $a$  小 在这种情况下 他得到了  $x^2$  的方程 (5.18) 但在方程右边多了一个  $27/64$  的因子。在后来的论文中，他把这个不正确的因子去掉了。

爱因斯坦和斯莫鲁霍夫斯基的通信，保存下来的还有 6 封 都洋溢着真诚的情谊以及两人之间的相互钦佩。这些通信始于 1908 年，爱因斯坦先写了封短信，告诉斯莫鲁霍夫斯基他已给他寄了一些自己论文的抽印本，并向斯莫鲁霍夫斯基要了一些论文 [E18] 下一封信是在 1911 年 11 月，也是爱因斯坦写的，讨论他们两人都感兴趣的一个新课题：临界乳光。

自 19 世纪 70 年代以来，人们就已经知道 [A2]，通过气体的光线散射在临界点的邻域  $O(1^\circ\text{C})$  内急剧增强。1908 年，斯莫鲁霍夫斯基首先把这个现象归结为巨大的密度涨落 [S7]。他导出了如下的均方粒子数涨落  $\overline{\delta^2}$  的方程：

$$\overline{\delta^2} = \frac{RT}{NV(-\partial p/\partial V)_T} \quad (5.22)$$

方程精确到  $O[(\partial^3 p/\partial V^3)_T]$ 。对理想气体， $\overline{\delta^2} \sim 1/N$  但靠近由  $(\partial p/\partial V)_T = (\partial^2 p/\partial V^2)_T = 0$  确定的临界点时，方程 (5.22) 的右边变成无穷大了。“这些凝聚和分散，必然引起对应折射率离开平均值的局部密度涨落，于是，物质的粗粒性一定通过在临界点有显著

极大值的丁铎尔现象表现出来，照这个方法，临界乳光可以非常简单地解释为某种现象的结果，而这个现象的存在，是任何承认分子运动论原理的人都不能否认的” [S8]。

这样，斯莫鲁霍夫斯基不但看到了临界乳光的真正起因，而且还看到了这个现象与正午的蓝天和日落的红霞的联系。1869年，丁铎尔 (John Tyndall) 就已经用光被尘埃和小水滴散射，解释了天空为什么是蓝色的，即“丁铎尔现象” [T5]。瑞利在这个问题上断断续续做了近半个世纪的工作，他得出的结论是，产生这个现象所需要的不均匀物质就是空气分子本身。斯莫鲁霍夫斯基相信，临界乳光与瑞利散射之间的联系是定性的。他没有做过详细的散射计算：“一个精确的计算……将要求对瑞利的计算作重大的修正” [S7]。

1910年，爱因斯坦也走近这个问题。他计算了弱非均匀无吸收介质内的散射，发现 [E10] (对单色偏振光)

$$r = \frac{RT(n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2}{9N - \nu(\partial p / \partial \nu)_r} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{\Phi}{(4\pi\Delta)^2} \cos^2 \theta \quad (5.23)$$

这里  $r$  是散射后的密度与初始密度之比， $n$  为折射率， $\nu$  为比容， $\lambda$  为入射波长， $\Phi$  为受辐射的气体体积， $\Delta$  为观察距离， $\theta$  为散射角。对理想气体 ( $n \approx 1$ )，

$$r = \frac{RT(n^2 - 1)^2}{N} \frac{1}{p} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{\Phi}{(4\pi\Delta)^2} \cos^2 \theta \quad (5.24)$$

“只要分子是随机分布的 [方程 5.24] 也能通过对个别分子散射求和而得到。”这样，爱因斯坦发现临界乳光和瑞利散射之间的联系是定量的，而且，他又一次 (也是最后一次) 得到了测量阿伏伽德罗常数的新方法。如我们在佩兰的《原子》一书中所读到的，很快

就有人对这些现象进行观测。

斯莫鲁霍夫斯基很高兴，在 1911 年发表的一篇论文中，他说爱因斯坦的贡献是“一个有意义的进展”[S9]。然而，他不太理解爱因斯坦的论证。在 1911 年论文的附录中，斯莫鲁霍夫斯基提出天空的蓝色是由两个因素造成的：分子的散射和密度涨落引起的散射。爱因斯坦写信表示反对 [E19]。散射的原因有一个，也只有一个：“Reileigh”原文如此 ]<sup>①</sup>处理了我们的问题的一个特例，他最终的结果与我自己的一致不是偶然的。”不久，斯莫鲁霍夫斯基回信说：“你完全正确”[S10]。

斯莫鲁霍夫斯基对这个问题的最后贡献是他的实验：他想在一个地面实验中再现蓝天。初步的结果看来很有希望 [S11]，他还宣布更细的实验正在进行中。他没能活着完成这些实验。<sup>②</sup>

斯莫鲁霍夫斯基去世以后，索末菲 [S12] 和爱因斯坦 [E16] 在讣告中赞扬他是一个好人，一个伟大的科学家。爱因斯坦说他是一个天才的研究者，一个高尚的、敏锐的人。

最后：

爱因斯坦关于临界乳光和蓝天的论文写于 1910 年 10 月，是从苏黎世提交的，他当时是苏黎世大学副教授。这是他在经典统计物理学领域的最后一篇重要论文。1911 年 3 月，他去布拉格——第一次成为正教授——就着手他关于广义相对论的主要研究。

应为 Rayleigh(瑞利)，爱因斯坦的原文写错了。——译者

<sup>②</sup> 关于乳光现象后来的实验，请参阅，例如 [C7]。[M9] 评论了临界乳光的现代理论的问题。

1908年，奥斯特瓦尔德也让步了。在谈到布朗运动和电子的那些实验时，他说，它们的结果，“能让任何谨慎的科学家放心地讲，实验证实了充满空间的物质是由原子组成的” [O3]。

1916年，马赫去世，至死也不相信原子的实在性。<sup>①</sup>

佩兰在1926年因为布朗运动的工作而获诺贝尔奖。在20世纪最著名的物理学著作之一的《原子》一书中，佩兰用古典法语对关于分子实在性的论战做了事后的分析：

La théorie atomique a triomphé. Nombreux encore naguère, ses adversaires enfin conquis renoncent l'un après l'autre aux défiances qui longtemps furent légitimes et sans doute utiles.<sup>②</sup>

## 参考文献

- A1. A. Avogadro, *J. de Phys.* **73**, 58 (1811); *Alembic Reprints*, No. 4. Livingstone, Edinburgh, 1961.
- A2. M. Avenarius, *Ann. Phys. Chem.* **151**, 306 (1874).
- B1. Quoted in *The Atomic Debates* (W. H. Brock, Ed.), p. 8. Leicester University Press, Leicester, 1967.
- B2. Quoted by W. H. Brock and M. Knight, *Isis* **56**, 5 (1965).
- B3. D. Bernoulli, *Hydrodynamica*. Dulsecker, Strassbourg, 1738. German translation by K. Flieler, published by Forschungsinstitut für die Gesch. d. Naturw. und Technik, Series C, No. 1a, 1965.

<sup>①</sup> S. 迈尔 (Stefan Mayer) 回忆了马赫在维也纳时对  $\alpha$  粒子产生的闪烁现象的反应：“现在我相信原子了” [M10]。然而，在他离开维也纳后写的光学教科书表明，他的信念没坚持多久 [M11]。

原子论胜利了。不久前还在反对它的人，最后都失败了，纷纷打消了他们的疑虑，这些疑虑在很长一段时期里曾是正当的，而且不可否认也是有益的。



- B4. S. G. Brush, *The Kind of Motion We Call Heat*, Vol. 1, Chap. 1. North Holland, Amsterdam, 1976.
- B5. R. Brown, *Phil. Mag.* **4**, 161 (1828); see also, *Phil. Mag.* **6**, 161 (1829).
- B6. G. K. Batchelor and J. T. Green, *J. Fluid Mech.* **56**, 401 (1972).
- B7. —, *J. Fluid Mech.* **83**, 97 (1977).
- B8. S. G. Brush, [B4], Vol. 2, Chap. 15.
- B9. G. K. Batchelor, *J. Fluid Mech.* **74**, 1 (1976).
- C1. S. Cannizzaro, *Alembic Reprints*, No. 18, Livingstone, Edinburgh, 1961.
- C2. R. Clausius, *AdP* **10**, 353 (1857).
- C3. M. Curie, *Rev. Scientifique* **14**, 65 (1900).
- C4. E. Cohen, *Naturw.* **3**, 118 (1915).
- C5. T. Cawkell and E. Garfield, in *Einstein, the First Hundred Years* (M. Goldsmith, A. McKay, and J. Woudhuysen, Eds.), p. 31. Pergamon Press, London, 1980.
- C6. G. Cantoni, *N. Cimento* **27**, 156 (1867).
- C7. B. Chu and J. S. Lin, *J. Chem. Phys.* **53**, 4454 (1970).
- D1. J. Dalton, *New System of Chemical Philosophy*. Bickerstaff, London, Vol. 1, Part 1: 1808; Vol. 1, Part 2: 1810; Vol. 2: 1827.
- D2. —, [D1], Vol. 1, Part 2, Appendix.
- D3. R. D. Deslattes, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **31**, 435 (1980).
- D4. R. K. Dewan and V. A. Bloomfield, *J. Dairy Sci.* **56**, 66 (1973).
- D5. J. Delsaulx, quoted in T. Svedberg, *Die Existenz der Moleküle*, p. 91. Akademisches Verlag, Leipzig, 1912.
- E1. P. Ehrenfest, *Collected Scientific Papers* (M. J. Klein, Ed.), p. 364. North Holland, Amsterdam, 1959.
- E2. A. Einstein, *AdP* **17**, 549 (1905).
- E3. —, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*. Wyss, Bern, 1905.
- E4. —, letter to the Dekan der II. Sektion der philosophischen Fakultät der Universität Zürich, July 20, 1905.

- E5. —, *AdP* **19**, 289 (1906).
- E6. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.). Teubner, Leipzig, 1915 (2<sup>nd</sup> edn., 1925).
- E7. —, *AdP* **34**, 591 (1911).
- E8. —, *AdP* **19**, 371 (1906).
- E9. —, *AdP* **22**, 569 (1907).
- E10. —, *AdP* **33**, 1275(1910).
- E11. —, *Z. Elektrochem.* **13**, 41 (1907).
- E12. —, *Z. Elektrochem.* **14**, 235 (1908).
- E13. —, letter to J. Perrin, January 12, 1911.
- E14. —, *Kolloidzeitschr.* **27**, 137 (1920).
- E15. —, letter to J. Perrin, November 11, 1909.
- E16. —, *Naturw.* **5**, 737 (1917).
- E17. —, *AdP* **14**, 354 (1904).
- E18. —, letter to M. v. Smoluchowski, June 11, 1908.
- E19. —, letter to M. v. Smoluchowski, November 27, 1911.
- F1. R. Fürth, Ed., *Untersuchungen über die Theorie der Brownschen Bewegung*. Akademische Verlags Gesellschaft, Leipzig, 1922.
- F2. —, *Investigations on the Brownian Movement* (A. D. Cowper, Tran.). Methuen, London, 1926.
- F3. —, *Z. Phys.* **2**, 244 (1922).
- G1. J. L. Gay-Lussac, *Mém. Soc. d'Arceuil* **2**, 207 (1809); *Alembic Reprint*, No. 4, Livingstone, Edinburgh, 1961.
- G2. L. G. Gouy, *J. de Phys.* **7**, 561 (1888).
- H1. J. H. van 't Hoff, *Arch. Neerl. des Sci. Exactes et Nat.* **20**, 239 (1886); *Alembic Reprint*, No. 19, Livingstone, Edinburgh, 1961.
- J1. S. Jahn, *Jahrb. Rad. Elektr.* **6**, 229 (1909).
- K1. H. Kogan, *The Great Encyclopedia Britannica*. University of Chicago Press, Chicago, 1958.
- L1. J. Loschmidt, *Wiener Ber.* **52**, 395 (1866).
- L2. C. Lanczos, *The Einstein Decade*, p. 140. Academic Press, New York, 1974.

- L3. P. Langevin, *C. R. Ac. Sci. Paris* **146**, 530 (1908).
- M1. Cf. C. de Milt, *Chymia* **1**, 153 (1948).
- M2. E. von Meyer, *J. Prakt. Chem.* **83**, 182 (1911).
- M3. D. Mendeleev, *The principles of chemistry*, Vol. 1, p. 315. Translated from the 5th Russian edn. by G. Kamensky. Greenaway, London, 1891.
- M4. J. C. Maxwell, *Collected Works*, Vol. 2, pp. 376–377. Dover, New York.
- M5. E. Mach, *Popular Scientific Lectures*, p. 207. Open Court, Chicago, 1910.
- M6. J. C. Maxwell, [M4], Vol. 2, p. 361.
- M7. —, *Theory of Heat*, Chap. 22. Longmans, Green and Co., London, 1872. Reprinted by Greenwood Press, Westport, Conn.
- M8. E. W. Müller, *Phys. Rev.* **102**, 624 (1956); *J. Appl. Phys.* **27**, 474 (1956); **28**, 1(1957); *Sci. Amer.*, June 1957, p. 113.
- M9. A. Minister, *Handbuch der Physik* (S. Flügge, Ed.), Vol. 13, p. 71. Springer, Berlin, 1962.
- M10. S. Meyer, *Wiener Ber.* **159**, 1 (1950).
- M11. E. Mach, *The Principles of Physical Optics*, preface. Methuen, London, 1926.
- N1. M. J. Nye, *Molecular Reality*, Elsevier, New York, 1972.
- N2. —[N1], p. 4.
- N3. *Nobel Lectures in Chemistry*, p. 3. Elsevier, New York, 1966.
- N4. M. J. Nye, [N1], pp. 9–13 and 21–29.
- O1. W. Ostwald, *Verh. Ges. Deutsch. Naturf. Ärzte* **1**, 155 (1895); French translation; *Rev. Gen. Set.* **6**, 956 (1895).
- O2. L. S. Ornstein, *Versl. K. Ak. Amsterdam* **26**, 1005 (1917); *Proc. K. Ak. Amsterdam* **21**, 96 (1919).
- O3. W. Ostwald, *Grundriss der Physikalischen Chemie*, introduction. Grossbothen, 1908.
- P1. W. Prout, *Ann. Phil.* **6**, 321 (1815).
- P2. —, *Ann. Phil.* **7**, 111 (1816); Alembic Reprints, No. 20. Gurney and

- Jackson, London, 1932.
- P3. M. Planck, *AdP* **19**, 358 (1883).
- P4. W. Pfeffer, *Osmotische Untersuchungen*. Engelmann, Leipzig, 1877.
- P5. H. Poincaré in *Rapports du Congrès International de Physique* (C. Guillaume and L. Poincaré, Eds.), Vol. 1, p. 27. Gauthier -Villars, Paris, 1900.
- P6. H. Poincaré in *The Foundations of Science*, p. 305. Scientific Press, New York, 1913.
- P7. J. Perrin, *Ann. Chim. Phys.* **18**, 1 (1909).
- P8. —, *Brownian Movement and Molecular Reality* (F. Soddy, Tran.). Taylor and Francis, London, 1910.
- P9. —, *Les Atomes*, 4th edn. Librairie Alcan, Paris, 1914.
- P10. —, *Atoms* (D. L. Hammick, Tran.). Van Nostrand, New York, 1916.
- P11. —, *Oeuvres Scientifiques*, CNRS, Paris, 1950.
- R1. Lord Rayleigh, *Phil. Mag.* **30**, 456 (1890).
- R2. A. W. Rücker, *J. Chem. Soc. (London)* **53**, 222 (1888).
- R3. H. R. Robinson, *Proc. Phys. Soc. (London)* **55**, 161 (1943).
- R4. M. Reiner, *Deformation, Strain and Flow*. Lewis, London, 1949.
- R5. R. Rutgers, *Rheol. Acta* **2**, 202, 305 (1965).
- R6. W. C. Röntgen, letter to A. Einstein, September 18, 1906.
- S1. A. Sommerfeld, *Wiener Chem. Zeitung* **47**, 25 (1944).
- S2. Se, p. 112.
- S2a. W. Sutherland, *Phil. Mag.* **9**, 781 (1905).
- S3. M. von Smoluchowski, *AdP* **21**, 756 (1906).
- S4. L. Szilard, *Z. Phys.* **53**, 840 (1929). Reprinted in *The Collected Works of Leo Szilard* (B. T. Feld and G. W. Szilard, Eds.), p. 103. MIT Press, Cambridge, Mass., 1972.
- S5. M. von Smoluchowski, *Boltzmann Festschrift*, p. 627. Barth, Leipzig, 1904.
- S6. —, letter to J. Perrin, undated; quoted in [T4], p. 161.
- S7. —, *AdP* **25**, 205 (1908).

- S8. —, *Phil. Mag.* **23**, 165 (1912).
- S9. —, *Bull. Ac. Sci. Cracovie, Classe Sci. Math. Nat.*, 1911, p. 493.
- S10. —, letter to A. Einstein, December 12, 1911.
- S11. —, *Bull. Ac. Sci. Cracovie, Classe Sci. Math. Nat.* 1916, p. 218.
- S12. A. Sommerfeld, *Phys. Zeitschr.* **18**, 534 (1917).
- T1. W. Thomson, *Nature* **1**, 551 (1870).
- T2. C. Truesdell, *Arch. Hist. Ex. Sci.* **15**, 1 (1976).
- T3. J. J. Thomson, *Phil. Mag.* **48**, 565 (1899).
- T4. A. Teske, *Marian Smoluchowski, Leben und Werk*. Polish Academy of Sciences, Warsaw, 1977.
- T5. J. Tyndall, *Phil. Mag.* **37**, 384 (1869); **38**, 156 (1869).
- W1. A. W. Williamson, *J. Chem. Soc. (London)* **22**, 328 (1869).
- W2. Quoted by L. P. Williams, *Contemp. Phys.* **2**, 93 (1960).
- W3. J. D. van der Waals, *Over de Continuïteit van den Gas-en Vloeistoftoestand*. Sythoff, Leiden, 1873.
- W4. N. Wax (Ed.), *Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*. Dover, New York, 1954.
- Y1. T. Young, *Miscellaneous Works*. Murray, London, 1855. Reprinted by Johnson Reprint, New York, 1972, Vol. 9, p. 461.
- Y2. Y. I. Yalamov, L. Y. Vasiljeva, and E. R. Schukin, *J. Coll. Interface Sci.* **62**, 503(1977).



## III 狭义相对论





## 第 6 章 上帝难以捉摸……

### 6a. 迈克尔逊—莫雷实验

麦克斯韦为《不列颠百科全书》第九版写了《以太》(Ether)一文 [M1], 文章开头列举了大量“以太的充斥着高度形而上学的…… [和 普通的用法”而且毫不含糊地批评下列说法 即使仅从科学的角度看, 整个全部空间也已经三四次地充满了以太”。从多方面讲, 麦克斯韦这篇文章都是很重要的。现在只提出三点: 文章向我们表明, 麦克斯韦像他同时代的人一样, 深信某种以太的实在性: “毫无疑问, 行星际和恒星际空间并不是空白, 而是被某种实体物质或物体占据着, 它当然是最大的, 而且可能也是最均匀的物体, 我们有它的一切知识”; 文章告诉我们, 麦克斯韦本人曾做过一次不成功的地面光学实验, 目的是测定以太拖曳对地球运动的影响; 文章还告诉我们, 他认为  $v/c$  ( $v$  = 地球相对于以太的速度,  $c$  = 光速) 的二阶效应太小了, 不能探测。最后这一点, 通过他的观察推进了一步, 他发现, “一切可能的……通过地面实验测定光速的方法……都依赖于光从一个观测点到另一个观测点之间的往返历程所需的时间的测量”, 它的效应至多是  $O((v/c)^2) = O(10^{-8})$ 。

然而, 麦克斯韦还希望一阶效应可以从天文学上观测到。他

举的例子是，当从地球上看到木星近似处在黄道的两对径点时，测定来自木卫食的光的速度。如果我们照麦克斯韦的意思，或者一样地，照菲涅耳 (Augustin Jean Fresnel) 的意思来定义以太 (aether)<sup>①</sup>——一种相对于固定的恒星处于绝对静止状态的介质，光在这种介质中传播，地球穿过它而它对地球好像是透明的——那么，我们很容易看到木星效应。如果真的存在，将是太阳系相对于这种以太的速度的一阶效应。

麦克斯韦从华盛顿特区的航海历办公室主任托德 (David Peck Todd) 那儿要来了木星系的数据。1879年3月19日，麦克斯韦写了一封感谢信，向托德提到了他在《不列颠百科全书》上的文章，并且特别重申了他对地面实验的二阶效应特征的评论。麦克斯韦写这封信（没有收入他的论文集）时，离去世不到8个月，而爱因斯坦刚出生5天。麦克斯韦去世以后，这封信转给了皇家学会的秘书，他把这封信发表在1880年1月29日的《自然》杂志上 [M2]。

一年半以后的1881年8月，在《美国科学杂志》(*American Journal of Science*)上出现了一篇文章 [M3]，作者是美国海军的迈克尔逊 (Albert Abraham Michelson) 船长。那时，迈克尔逊刚从海军退役，正在柏林亥姆霍兹实验室读研究生，他读过麦克斯韦1879年的信。这时，他已是知名的光速测量专家（已经在这方面发表了3篇论文 [L2]），他感到麦克斯韦低估了地面实验所能达到的精度。为测量麦克斯韦的二阶效应，他在柏林动手设计了著

<sup>①</sup> 关于以太理论和以太模型的论述，特别可以参考 [L1] 和 [S1]。以太，一些人说 aether，另一些人说 ether。我更喜欢前者；不过，在引用别人的文字时，我遵从原作者的偏爱。

名的迈克尔逊干涉仪。为避免城区干扰，他把实验移到波茨坦 (Potsdam) 附近的天文台去做。他用的方法是比较光在平行或垂直地球相对于以太的运动方向上，走相同距离所经历的时间。在他的设计下，静止的以太将产生一个时间差，它对应于平行方向上的光的波长将额外增加大约黄光波长的  $1/25$ ，通过平行和垂直两个方向上的光束的干涉，就能观测到这个效应。实验细节很容易找到，请读者去参考教科书，<sup>①</sup>我只说迈克尔逊的结论：没有任何以太漂移的证据。“这样看来，静止以太假说的结果是不正确的，由此得出的必然结论是：这个假说是错误的”[ M3]。

1887 年初，迈克尔逊写信给瑞利<sup>②</sup>说，他为“工作没受到多少重视而感到沮丧”[M4]。从关心这件事的人数来看，他这么说也许是对的，但如果考虑到这些人的名望，这么说就不对了。开尔文和瑞利当然注意到了他的实验。迈克尔逊 1884 年在约翰·霍普金斯大学 (Johns Hopkins University) 见过他们二人 [S3] 洛伦兹也注意到了，他发现迈克尔逊的实验理论中有一个错误 [L3] 并对实验的解释表示怀疑 [L4]。洛伦兹的疑虑和瑞利的劝告，使迈克尔逊决定重复他的实验。当时，他在克利夫兰 (Cleveland) 的凯斯 (Case) 应用科学学院。这一次，他同毗邻的西部预备大学的化学家莫雷 (Edward Williams Morley) 合作。他们基本上照波茨坦实验的设计建了一台新干涉仪，尽可能地减少了干扰的影响。1887 年 8 月，迈克尔逊写信告诉瑞利，他们又一次发现了零结果 [M5]。迈克尔逊—莫雷实验的论文跟着在 11 月发表 [M6]。我

① 例如 参阅 [P1]。

② 迈克尔逊和瑞利之间通信的详细情况，特别可以参阅 [S2] 和 [H1]。

们不难理解，实验的负结果开始是很令人失望的，不但实验者感到失望，开尔文、瑞利和洛伦兹也感到失望。

然而，更重要的是，实验结果被大家接受了。那么，理论一定有问题。1892年洛伦兹问瑞利：“在迈克尔逊先生实验的理论中会不会还存在着被忽略了的地方？”[L5]。1900年4月27日开尔文在皇家研究院 (Royal Institution) 的一次演讲中说，这个实验是“最仔细地完成的，保证了结果的可靠性”它像一朵乌云出现在19世纪光的动力学理论的天空 [K1]。1904年在他的《巴尔的摩演讲集》(Baltimore Lectures) 的序言中写道：“迈克尔逊和莫雷通过他们关于以太相对于地球运动的伟大的实验工作，向我们的动力学解释提出了一个而且是惟一的一个严峻的挑战……” [K2]

后来，迈克尔逊又重复了几次实验，最后一次是在1929年7月 [M7]。其他人也做过类似的实验，特别是米勒 (Dayton Clarence Miller)，他曾是迈克尔逊在凯斯的年轻同事。1904年莫雷和米勒第一次做了山顶实验：“有人认为迈克尔逊—莫雷实验只证明了在某个地下室的以太被带着随它一起运动，所以我们把仪器放在山顶上，希望能在那里探测到某个效应” [M8]。<sup>①</sup> 1933年 [M9] 和 1955年 [S4] 的两篇文章详细介绍了这些实验的技术和历史情况。从历史来看，香克兰 (Robert S. Shankland) 的文章是最好的，我们这一节就大量引用了他的材料。为眼下的目的，后来的实验发展用不着我们讨论了。不过有段插曲要讲，它直接同爱因斯坦有关。

迈克尔逊早就指出，也许以太会在他做实验的地下室被俘获 [M4]。

1921 年 4 月 2 日，爱因斯坦第一次来到美国，进行为期两个月的访问。5 月，他在普林斯顿大学做了 4 次关于相对论的演讲 [E1]。这时，有消息传到普林斯顿说，米勒在威尔逊山天文台做初步实验时(4 月 8 日—21 日 [S4])，发现了非零的以太漂移。听到这个传言后，爱因斯坦评论道：“Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht”，上帝难以捉摸，但他并不邪恶。不过，5 月 25 日，爱因斯坦在离开美国前夕，去克利夫兰拜访了米勒，同他讨论了这件事 [S5]。

这个故事还有两段后话。其中一件事情很快就过去了。1925 年 4 月 28 日，米勒在华盛顿国家科学院宣读了一篇文章，报告以太漂移被明确地证实了 [M10]。同年后，他从美国物理学会主席的职位上退下来，在堪萨斯城 (Kansas City) 做的退休演讲中又讲了同样的东西 [M11]。结果，米勒收到了美国科学促进协会 (American Association for the Advancement of Science) 为他的堪萨斯城论文而奖给他的 1000 美元 [L6]——这大概部分是对他抵制相对论的一点表示；那时，相对论的阻力在某些地方仍然存在着 [B1]——而同时，爱因斯坦却收到雪片般的电报和来信，要求他对此做出解释。爱因斯坦对这场骚动的反应，在给贝索的信中顺便说到了：“我一刻也没有把 米勒的结果 当真” [E2]。<sup>①</sup> 今天，量子场论极大地改变了我们的真空观念，但这与 19 世纪和以前的以太没有任何关系，它们已经一去不复返了。<sup>②</sup>

关于米勒插曲，我要补充的第二件事情，一直延续到今天。普

① 1927 年，爱因斯坦指出，米勒所发现的正效应可能是由于实验设备的微小温差引起的 [E2a]。

② 1951 年，狄拉克曾一度又想到以太 [D1]。

林斯顿的数学教授维布伦 (Oswald Veblen) 在无意中听到爱因斯坦关于上帝难以捉摸的那句话。1930 年, 他写信给爱因斯坦, 请他允许把这句话刻在费因楼 (Fine Hall)<sup>①</sup> 休息室内壁炉的石架上 [V1]。爱因斯坦答应了。<sup>②</sup> 尽管数学系以后搬到了其他地方, 但石头上的刻辞还保留在原来的地方, 即费因楼 202 室。

现在, 让我们回到爱因斯坦还默默无闻的时期。我们要问, 迈克尔逊对爱因斯坦的狭义相对论有什么反应? 迈克尔逊—莫雷实验对爱因斯坦 1905 年的理论的创立产生过什么影响?

第一个问题很简单。迈克尔逊是仪器和实验的天才, 他从不满意狭义相对论。1907 年, 他成为第一个获诺贝尔奖的美国人。在他的颁奖辞中,<sup>③</sup> 没有提到任何以太漂移的实验, 那是毫不奇怪的, 因为相对论还年轻, 甚至 15 年后, 在爱因斯坦的诺贝尔奖的颁奖辞中, 也没有提到相对论。更有意思的是, 迈克尔逊在他的获奖演讲中没讲那些实验 [N1], 这就与爱因斯坦大不相同。爱因斯坦 1922 年因光电效应获奖, 但他的回答却是一篇关于相对论的演讲 [E4]。然而, 真能回答这个问题的是 1927 年迈克尔逊在他的《光学研究》(*Studies in Optics*) 一书 [M12] 中所表达的关于相对论的意见。他指出, 相对论“一定会被慷慨地接受”。它清晰地揭示了

① Fine Hall, 是普林斯顿大学数学系的大楼, 是为纪念数学家 Henry Burchard Fine (1858—1928) 命名的, 他曾是校长和系主任, 还是美国数学学会创始人之一 (1911—1912 年曾任主席) ——译者

② 在给维布伦的回信中, 爱因斯坦这样解释了那句话: “Die Natur verbirgt ihr Geheimnis durch die Erhabenheit ihres Wesens, aber nicht durch List” 大自然隐藏它的秘密是因为它本性高傲, 而不是凭什么狡黠的手段 [E3]。1966 年 6 月 海伦·杜卡斯为这件事的经过写了一份备忘录 [D2]。

③ 颁奖辞说, 他获奖是“因为他的光学精密仪器以及他用这些仪器进行的光谱学和计量的研究” [N1]。

洛伦兹变换以及这个变换为迈克尔逊—莫雷实验和斐索 (Armand Hippolyte Louis Fizeau) 流水光速实验所提供的结果。然后,他总结说:“以太的存在似乎与理论不一致……但没有介质,怎么能解释光波的传播?……如果不存在介质,又如何解释传播的恒定性这样一个(至少在我们现在讨论的这个理论中的)基本假定?”<sup>①</sup>

这不是单独哪一个人的悲哀,而是一个时代的悲哀。尽管这个时代在迈克尔逊的书出版时,已基本过去。迈克尔逊的著作是对我们要在本章和下一章展开的两个主要论题的完美的说明。第一个论题是,在狭义相对论的早期,它的数学比物理更容易理解;第二个论题是,接受这个新的运动学以永远地取代那个旧的以太动力学,不是一件简单的事情。

现在,我们回来谈迈克尔逊—莫雷实验对爱因斯坦最早的相对论论文的影响 [E5]。这个问题的重要性远不是爱因斯坦是否该在某个地方加个脚注那样的小问题可以说明的。相反,对这个问题的回答,将有助于我们对爱因斯坦的思想获得本质的理解,并将为我们以后讨论爱因斯坦的研究方法与洛伦兹和庞加莱的研究方法之间的根本区别,做好准备。

无论在爱因斯坦关于狭义相对论的第一篇还是以后的论文中,都没有提到迈克尔逊。爱因斯坦在 1949 年写的自述中 [E6],描述了他的科学历程,提到了许多影响过他的科学家,但我们还是找不到迈克尔逊的名字。这并不意味着爱因斯坦在任何时候低估过这个实验的重要性。1907 年,爱因斯坦第一次写关于相对论的综述文章 [E7],也第一次遇到了罗列详细参考文献的麻烦。迈克

①即狭义相对论的光速不变的假定。——译者

尔逊和莫雷的名字就出现在这篇综述中。后来，爱因斯坦在 1915 年写的一篇半科普文章 [E8] 里，在 1921 年的普林斯顿演讲 [E1] 和（根据这些演讲写成的）《相对论的意义》（*The Meaning of Relativity*）<sup>①</sup>[E9] 一书中，又提到了迈克尔逊和莫雷。书中还说，迈克尔逊—莫雷实验是所有零结果的以太漂移实验中最重要中的一个。

然而，无论在研究论文还是在这 4 篇综述文章中，爱因斯坦都没说明他在 1905 年以前是否知道迈克尔逊—莫雷实验。他的往来书信也帮不了忙。我只找到一封 1923 年迈克尔逊给爱因斯坦的信 [M13]，但爱因斯坦给迈克尔逊的信，一封也没有找到。在那封信中，当时为芝加哥大学物理系主任的迈克尔逊为爱因斯坦提供了一个在芝加哥的教授职位，没谈与科学有关的事情。后来，两人终于在帕萨迪纳（Pasadena）见面。海伦·杜卡斯（当时跟爱因斯坦在加利福尼亚）告诉我，他们热情而友好。1931 年 1 月 15 日，在加州理工学院图书馆（Atheneum of Cal Tech）为爱因斯坦举行的宴会上，爱因斯坦第一次也是最后一次公开谈了迈克尔逊其人：“我的成功来自那些多年来我工作中的真正的同志。当我还很小，还不到三英尺高时，您，我尊敬的迈克尔逊博士，就开始了这项工作。是您将物理学引向了新的道路，您通过卓越的实验工作，为相对论的发展铺平了道路。您揭示了光的以太理论中一个暗藏的效应，这个效应确实存在着，它激发了 H. A. 洛伦兹和菲茨杰拉德的思想，狭义相对论就是从这些思想发展起来的。” [E10]。人

有两个中译本。一、《相对论的意义》，李灏译，科学出版社，1961。二、《相对论的意义》郝建纲、刘道军译，上海科技教育出版社，2002 年。——译者



们可以认为，如果爱因斯坦认为，在有正当理由的情况下，他可能会明确地将自己与洛伦兹和菲茨杰拉德（FitzGerald）联系在一起了。凭爱因斯坦的社会经验，他一定知道，人们会认为这些话是对迈克尔逊的附加的赞誉，而不会认为他不够谦虚。

在爱因斯坦参加宴会时，迈克尔逊正在重病中，4个月后就离开了人世。1931年7月17日，爱因斯坦回到柏林，在柏林物理学会（Physikalische Gesellschaft）上发表了纪念迈克尔逊的讲话 [E11] 讲话结束时，他讲了则有趣的轶事。在帕萨迪纳时，爱因斯坦曾问迈克尔逊，为什么费那么大劲去提高光速测量的精度。迈克尔逊回答说：“Weil es mir Spass macht”，因为我觉得它有趣。爱因斯坦关于迈克尔逊—莫雷实验的主要评论是：“它的负结果大大增加了人们对广义相对论有效性的信念。”甚至，在这最自然的场合，我们也没能看到他承认迈克尔逊的工作对他自己的发展有过直接影响。

不过 爱因斯坦在 1905 年前知道迈克尔逊—莫雷实验吗？它对狭义相对论的创立产生过影响吗？对这两个问题的回答，毫无疑问都是肯定的。这一点，我们是从 20 世纪 50 年代香克兰和爱因斯坦的讨论以及 1922 年 12 月 4 日爱因斯坦在京都大学作的题为“我怎样创立相对论？”的演讲以后我们简称它为京都演讲中知道的。我们先来看爱因斯坦同香克兰的两次谈话和他给香克兰的一封信的一部分 [S7]。<sup>①</sup>

a) 1950 年 2 月 4 日的谈话。“我问他是怎么知道迈克尔逊—莫

<sup>①</sup> 这封应香克兰要求所写的信，曾在克利夫兰物理学会纪念迈克尔逊诞生 100 周年时宣读。谈话是香克兰记录并在后来发表的 [S6]。

雷实验的 他告诉我 是在读了 H. A. 洛伦兹的著作以后知道它的 那只是在 1905 年以后（香克兰强调的）才引起他的注意！‘另一方面’他说，‘我会在我的论文里提到它’。他继续说 对他影响最大的实验结果是星体的光行差观测和斐索的流水光速测量。‘这些足够了。’他这么说”[S6]。

b) 1952 年 10 月 24 日的谈话。“我问爱因斯坦教授什么时候第一次听说迈克尔逊和他的实验，他回答说：‘这不太好说。我记不清第一次听说迈克尔逊实验是在什么时候。我不觉得在我投身于相对论的 7 年中，它对我有过什么直接的影响。我想，我那时理所当然地认为它是正确的。’然而 爱因斯坦说 在 1905—1909 年间，他考虑广义相对论时，在同洛伦兹和其他人的讨论中，他对迈克尔逊的结果想了很多。那时他发现（他是这样告诉我的），在 1905 年以前，他已经意识到了迈克尔逊的结果，那部分是由于他读了洛伦兹的论文，而更多是由于他已经简单地假定迈克尔逊的结果是正确的”[S6]。

c) 1952 年 12 月爱因斯坦给香克兰的信。“迈克尔逊—莫雷的判决实验对我自己的工作的影响是很间接的。我是从洛伦兹（1895）对运动物体的电动力学的决定性的考察知道它的，那是在提出狭义相对论以前就熟悉的。我不相信洛伦兹的静止以太的假定，因为它本身不能令人信服，另外还因为，它所带来的对迈克尔逊—莫雷实验的解释，在我看来极不自然”[S7]。

从以上三段话中，我们能知道些什么呢？

首先，记忆难免有误。（爱因斯坦在 1950—1952 年间身体不太好 并且已经知道活不久了。爱因斯坦 1950 年 2 月的谈话明显地同他后来的两个说法相矛盾。似乎应该认为后来的说法更有意

义。再进一步考虑，我们可以断定，爱因斯坦在 1905 年以前确实知道迈克尔逊和莫雷。由此我们也知道，口述历史是一项很专业的工作，应该小心谨慎地去把握。

其次，爱因斯坦认为，光行差和斐索实验对他来说已经足够了。这是爱因斯坦关于狭义相对论的起源所作的最重要的说明。它表明，最终导致狭义相对论的主要论证，并不需要去解决迈克尔逊—莫雷实验结果和 19 世纪后期流行的以太理论之间的冲突，相反，与迈克尔逊—莫雷实验无关，它将这个在根本上不足令人信服和不自然的 19 世纪的物理学大厦完全抛弃了。

为认识爱因斯坦在这些问题上离先辈们的观点有多远，有必要拿他的观点来同洛伦兹 1895 年发表的“决定性的考察”[L4] 进行比较。在洛伦兹那篇论文的第 64 节，我们看到下面的那句话，黑体字是原作者强调的：“根据我们的理论，地球的运动对用地面光源进行的实验不会产生任何  $[\nu/c]$  的一阶效应。”照爱因斯坦自己的说法他知道 1895 年洛伦兹的那篇讨论过光行差和斐索实验的论文。让我们简要回顾一下，危机发生在什么地方。假如一颗恒星在地球静止时位于天顶，那么，由于地球的速度  $\nu$  我们看到的星体实际上在与垂直方向成  $\alpha$  角的方向上。这里，

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\nu}{c} \quad (6.1)$$

绝对静止的以太概念，是菲涅耳在 1818 年给阿拉戈 (Dominique François Jean Arago) 的贺信 F1 中为解释光行差而引入的 (如果以太与地球一起运动，就没有光行差)。至于斐索效应，菲涅耳已经预言 (假如液体以速度  $\nu$  相对于以太流过一根管道，光束沿同方向穿过) 那么实验室中的净光速  $c'$  由下式给出：

$$c' = \frac{c}{n} + v(1 - \frac{1}{n^2}) \quad (6.2)$$

这里  $n$  是液体（假定是非色散介质）的折射率。菲涅耳在推导这个结果时曾假定，光在穿过以太时，把弹性振动传给了它。根据他的解释 因子  $(1 - 1/n^2)$  现在叫菲涅耳拖曳系数）的出现，表明了这样一个事实：因为光部分地为管中的以太所拖曳，它不能完全获得大小为  $v$  的附加速度。1851 年，斐索将来自地面源的光送入一根充满了流动液体的管子，发现实验结果与方程 (6.2) 一致 [F2]。

洛伦兹在电磁理论的观点下讨论了这两个效应，并根据入射电磁波在介质中产生的极化给出了菲涅耳拖曳的动力学推导。贯穿 1895 年的论文，我们可以明显看到菲涅耳以太假设的影子。于是，为了否决光行差和斐索实验的这些解释，爱因斯坦告别了电磁理论的创业者们所建立的一阶效应的理论根基，那些创业者，虽然人数不多，却声誉卓著，影响深远。他这么做的理由，我留在下一章讨论。然而，请注意，一旦对一阶效应的重新考察带来了狭义相对论的新逻辑 那么（正如爱因斯坦多次说过的那样）很容易认为迈克尔逊-莫雷实验的结果是理所当然的。还请注意，这个实验在洛伦兹 1895 年的论文中有着详细的讨论，而爱因斯坦在 1905 年以前是熟悉这篇论文的！

最后，我们来看京都演讲。演讲是用德语做的，由石原纯 (Jun Ishiwara) 译成日文 [I1]。<sup>②</sup> 日文本的部分内容又被译成英文

① 关于这些问题的计算，请看帕洛夫斯基 (Panofsky) 和菲利普斯 (Phillips) 合写的书 [D2]。

② 从 1912 年到 1914 年，石原纯在德国和瑞士学习物理学，在那些日子里他认识了爱因斯坦。他还把爱因斯坦的许多论文译成日文。（石原纯的拉丁拼音似为 Ishihara 而非 Ishiwara。——译者）

[O1]，我从英译本中引用以下几句：

还是学生的时候，我就知道了迈克尔逊实验的那个不能解释的结果。那时，我凭直觉意识到，如果把实验结果当作事实，那么，我们思想的错误可能就在于考虑地球相对于以太的运动。事实上，这是使我通向现在被称为狭义相对论原理的第一条道路……我偶然读了洛伦兹 1895 年的专题论文，在这篇文章中，他在一阶近似下，换句话说，在忽略运动物体的速度与光速之比的高于二阶的量的情况下，成功地给出了电动力学问题的一个综合解。在这种背景下，我考虑了斐索实验……

在爱因斯坦第一篇关于相对论的论文中，他提到了“探测地球相对于‘光介质’运动的那些尝试的失败”但没具体说明他想到的是哪些尝试。<sup>①</sup> 尽管他知道迈克尔逊和斐索，但这两个人他都没有提到。爱因斯坦对以前那些关于一阶效应的解释的不满，大概会使迈克尔逊和莫雷的二阶零结果的神秘性对他来说也不那么重要。然而这个“不能解释的结果”确实影响了他的思想。那么这就提出一个新问题：为什么总体说来，爱因斯坦那么不愿承认迈克尔逊对他的影响呢？我将在第 8 章回到这个问题上来。

在关于爱因斯坦和迈克尔逊—莫雷实验的一篇思想丰富的文章中，霍尔顿 (Holton)[H2] 提出，爱因斯坦可能了解一些那时已知的其他零实验结果，例如，不存在双折射 B2, R1 和特鲁顿—诺博 (Trouton-Noble) 实验 [T1]。

## 6b. 先驱者

1. 爱因斯坦知道什么对 19 世纪后期的电磁学历史的说明，几乎都千篇一律地引用杰出的实验物理学家和理论物理学家赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz) 的那句话：“麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组。”<sup>①</sup>这本是一句笑谈，却被引用成了名言，但用它来评论那个时期的物理学的最佳表现则是毫无意义的。在麦克斯韦之后，爱因斯坦之前，绝大多数人的最后看法是，电动力学是麦克斯韦方程组加上包含在这些方程中的电荷和电流密度的确定再加上以太特性的猜想。

在麦克斯韦自己的理论中，场的概念处于中心地位。它没有消除以太，但把以太大大地简化了。这里，不再有麦克斯韦曾抱怨的“已经三四次地充满了以太”的空间 [M1] 相反，“许多实践者和思想家们帮着加强了 19 世纪的填充派 (school of *plenum*) 的观点 对光、热、电、磁来说 只有一种以太”这是开尔文在 1893 年写的 [K3]。不过 这一种以太 在 19 世纪还有着许多候选者，其中有的比麦克斯韦理论还早。那些以太，来自菲涅耳、柯西 (Cauchy)、斯托克斯 (Stokes)、诺伊曼 (Neumann)、麦克拉 (MacCullagh)、开尔文、普朗克和其他一些人，它们在均匀性、压缩性和地球对以太的拖曳特性上 有着不同程度的差别。这就差不多 尽管不是完全 解释了为什么会有那么多后麦克斯韦时代的麦克斯韦理论，如赫兹、洛伦兹、拉莫尔 (Larmor)、威切特 (Wiechert)、科恩 (Cohn) 以及也许还

见赫兹全集第二卷 [H3] 在英译本 [H4] 中也可找到。

有其他人的理论。

赫兹当然知道这些自由的选择 [ M14 ]但他终究还得选择自己的以太（他选择的是被地球拖曳的以太）。实际上，前面所引的他那句名言，原话是这样的：“麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组。每一种导致同样方程组从而也包含着同样的可能现象的理论，我都认为是麦克斯韦理论的一种形式或者特例。”

对所有的以太的主人和麦克斯韦理论的创立者来说，最重要的问题是找到光行差和菲涅耳拖曳以及后来迈克尔逊—莫雷实验的动力学解释。从广泛意义上说，所有这些人都是爱因斯坦的先驱者，而爱因斯坦却证明了，他们所做的事情是不可能、也不必要的。当然，爱因斯坦的理论并不正好就是赫兹意义的麦克斯韦理论。相反，爱因斯坦对时常出现在运动物体的电动力学中的困难的解决，靠的是一个彻底的运动学新框架。他超越洛伦兹和庞加莱的地方，在于他将他的理论建立在对标志着 20 世纪与 19 世纪决裂的测量问题的一个重要的再认识基础上（另一个对测量问题的再认识将带来量子力学）。

这一节谈爱因斯坦的先驱者，但详细讨论上面提到的那些先驱者们的思想历程，则不是我们的目的。在这里，我将集中来谈新运动学的先驱者：洛伦兹和庞加莱。爱因斯坦、洛伦兹和庞加莱三者的贡献的最后比较，将放到第 8 章讨论。洛伦兹最杰出的贡献，即他用基本粒子（1892 年，他称它是荷电粒子；1895 年叫它离子；最后，1899 年，叫它电子）所携带的电荷和电流对麦克斯韦方程组进行原子论的解释，尽管在电动力学发展中是那么重要的进展，我也不去说它。我主要讨论的限于洛伦兹变换的演化和解释：

$$x' = \gamma(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma(t - vx/c^2) \quad (6.3)$$

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (6.4)$$

它把一个时空坐标系  $(x', y', z', t')$  和相对于它以常速  $v$  运动的另一个时空坐标系  $(x, y, z, t)$  联系起来(在本节中,只考虑  $x$  方向的相对运动就够了)。

在下面的讨论中,出现的主要人物有:第一个写出洛伦兹变换的伏依特 Voigt),第一个提出收缩假说的菲茨杰拉德、洛伦兹本人、第一个把洛伦兹变换和收缩假说联系起来的拉莫尔,以及庞加莱。还应该指出,1900年以前,其他一些人已意识到作为物质介质的以太也许是不必要的。因此德鲁德(Paul Drude)在1900年写道:“绝对静止的以太的概念是最简单和最自然的——至少,[在]不把以太想象为一种物质而只把它作为赋予了一定物理性质的空间时[是这样的]”[D3]科恩在1901年写道:“这样一种介质,充满我们空间的每一个角落;它可能是一个确定的有重系统,也可能是真空”[C1]。

在有关我们讨论的这个课题的众多论文中,以下几篇对我有特别的帮助:广重彻(Tetu Hirose)讨论以太问题[H5]<sup>①</sup>、麦科马赫(McCormack)讨论赫兹[M14]、玻克(Bork)[B3]和布拉西(Brush)[B4]讨论菲茨杰拉德,以及米勒(Miller)[M15]讨论庞加莱的论文。

至于爱因斯坦本人,他在第一篇相对论论文中只提到了3个物理学家的名字:麦克斯韦、赫兹和洛伦兹。正如他在其他地方

<sup>①</sup> 广重彻这篇发表在《物理科学的历史研究》(*Historical Studies in the Physical Science*)上的论文《以太问题、机械观和相对论的起源》的中译本,可以在他的《物理学史》(李醒民译 吴熙敬校 求实出版社,1988年版)的附录五中读到。——译者



反复指出的那样，在 1905 年，他只知道洛伦兹 1895 年以前的工作。这说明，如我们以后会看到的，爱因斯坦在 1905 年并不知道洛伦兹变换。他是靠自己独立发现它的。那时，他也不知道庞加莱在技术上详细讨论相对论观点的论文。

2. 伏依特 1887 年，伏依特注意到 [V2]，下列方程

$$\square\phi=0 \quad (6.5)$$

$$\square\equiv\partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2+\partial^2/\partial z^2-\partial^2/c^2\partial t^2 \quad (6.6)$$

如果用如下的新时空变量：

$$x'=x-vt \quad y'=y/\gamma \quad z'=z/\gamma \quad t'=t-vx/c^2 \quad (6.7)$$

来表示，将保持原来的形式。这些坐标变换，就是差一个比例因子的洛伦兹变换 [方程 6.3]。伏依特在一篇研究多普勒原理的文章中报告了这个结果。作为变换 (6.7) 的一个应用，他推导了多普勒频移，但只讨论了大家早已熟悉的  $v/c$  阶的纵向效应。直到今天，他的新方法仍是标准的推导步骤：他利用了平面光波传播的相因子在变换 (6.7) 下的不变性 [P3]。由于多普勒频移（在相对论意义上）是纯运动学效应，所以，伏依特把他的论证建立在早已为人们所忘记的光传播的弹性理论的动力学框架上，就离题太远了，因为根据这种理论，光在不可压缩弹性介质中是以振动形式传播的。

洛伦兹熟悉伏依特的一些工作。大约 1887 年或 1888 年，两人通过信，讨论迈克尔逊-莫雷实验 [V3]。然而，在很长一段时间内，洛伦兹似乎并不知道伏依特的变换 [方程 (6.7)]。事实上，洛伦兹 1906 年在哥伦比亚大学的演讲（1909 年以书的形式发表）中有如下的说明：“有一篇……1887 年发表的论文……我很后悔在这些年没有注意到它。[在那篇文章里]，伏依特已对 [方程 6.5]

那种形式的方程应用了一个等价于 [ 方程 ( 6.3 ) ] 的变换。变换 [ 方程 ( 6.3 ) ] 的思想……从而可能来自伏依特，并且在他的文章中也证明了，[ 变换 ] 不会改变自由以太方程的形式” [ L7 ]。（尽管这些话写在爱因斯坦 1905 年的工作之后，它还是提到了以太。洛伦兹这本书在 1915 年发行的第二版仍是这样。在第 8 章中 我还会更多地谈这个问题。）

在 1908 年的一次物理学会议上，闵可夫斯基注意到了伏依特 1887 年的论文 [ M16 ]。当时伏依特也在场。他的反应很简单：“… … [ 在 1887 年 ] 那时，就已经发现了一些结果，这些结果后来又在电磁理论中得到了” [ V4 ]。

3. 菲茨杰拉德 由菲茨杰拉德的朋友拉莫尔为他编辑的文集 [ L8 ] 表明，这位爱尔兰物理学家属于一个小规模的特别研究小组，这个小组的物理学家很早就参与了麦克斯韦理论的进一步发展的研究。（1899 年，他由于在光学和电动力学方面的工作被他所属的皇家学会授予皇家奖章。）然而，这个精美的文集没有收入菲茨杰拉德最为人称道的那篇关于运动物体的收缩假设的短文。文章 1889 年发表在美国《科学》( *Science* ) 杂志上 [ F3 ] 题为“以太和地球大气”。全文如下：

我以极大的兴趣阅读了迈克尔逊和莫雷先生试图决定以太在多大程度上为地球所携带这个重要问题的精彩实验。他们的似乎与其他实验相反的结果表明，空气中的以太能被带动的程度小得难以观察。我将建议，有质物体的长度在它们通过以太或穿越它时，会发生改变，改变量依赖于它们的速度与光速之比的平方，这差不多是惟一可以协调这个矛盾的假

设。我们知道电力受带电体相对于以太的运动的运动的影响，那么，假定分子力也受这种运动的影响从而引起物体大小的改变，也不是不可能的。看来，重要的是，应该在地球赤道的某些地方进行长期的实验，观测永久带电体之间的吸引力，如在灵敏的象限静电计中的那种力，看它有没有周日或周年的变化——周日变化是由地球的自转速度与轨道速度的加减 [ 差异 ] 引起的；而周年变化则类似地是由地球轨道速度与太阳系的运动速度的加减 [ 差异 ] 引起的。

在这里，第一次出现了现在叫做菲茨杰拉德-洛伦兹收缩的建议。建议的表述是定性的，并且有着明显的前相对论时代的特征。考虑这句话：“有质物体的长度在它们通过以太……时，会发生改变”我们看到，首先，这里当然还在谈以太，其次，长度的改变（如果借后来爱因斯坦的话来说）被认为是客观真实的，是绝对的变化，而不是相对于静止观察者的改变。接着，我们来考虑关于分子力受运动影响的那句话，作者显然在设想一种动力学的收缩机制，它把在通过以太的运动中的分子压缩在一起。

洛奇 ( Oliver Joseph Lodge ) 在几次演讲 ( 后来发表 ) 中都谈到菲茨杰拉德的假说 [ B3 ]。拉莫尔在菲茨杰拉德文集的引言中也恰当地称赞说：“他菲茨杰拉德第一个提出……穿过以太的运动会引起固态分子集合体的线度的变化” [ L9 ]。在那本书的其他地方，我们看到菲茨杰拉德本人在 1900 年提到这个收缩假说。那年拉莫尔的《以太和物质》( *Aether and Matter* ) 一书 [ L10 ] 已经问世，在评论这本书时，菲茨杰拉德写道，在对迈克尔逊-莫雷实验的分析中：“他拉莫尔不得不假定物体的长度依赖于它是纵向

地或是横向地通过以太”[L11] 然而 他却 没有提自己 10 年前的建议!

菲茨杰拉德这种令人奇怪的沉默,也许可以从他给朋友亥维赛(Oliver Heaviside)的信中得到部分解释:“由于我对错误一点也不敏感,我匆匆地用各种不成熟的概念,希望它们能建立一些别 的思想,并带来某些进展”[F4]。他也许知道他的那些思想特性, 并因此而退却了。关于那些性质,菲茨杰拉德去世后不久,亥维赛 曾这样描述:“毫无疑问 他比任何人有更敏锐和独创性的思想 这是 他的一大特点。但对他的科学声誉来说,我想这是很不幸的。他 了解的东西太多,他的头脑太丰富,也太具创造力。我想,如果 他稍笨一点——我的意思是,如果他不那么敏捷和多能,而能更踏 实一些,也许会更好些。除少数几个人外,他本该得到更多的欣 赏”[O2]。

洛伦兹就是那几个欣赏菲茨杰拉德个性的人之一。

4. 洛伦兹 洛伦兹的第一篇与我们现在的讨论有关的论文, 是在 1886 年,即迈克尔逊—莫雷实验之前写的。在文中,他批评 了迈克尔逊对 1881 年波茨坦实验的理论分析 [L3]。洛伦兹这篇 论文的主要目的是考察菲涅耳的静止以太与事实的符合程度。于 是,他重新考察了光行差和斐索效应,并且特别注意到迈克尔逊和 莫雷的另一成就(我还没说过)以更高的精度重复斐索实验(比 从前知道的更定量的方式证实菲涅耳拖曳系数的预言 [M17]。因 为在那个时候,洛伦兹有理由怀疑波茨坦实验的精度,所以他最后 认为 没有特别需要担心的地方:“在我看来 菲涅耳假设已被实验 否决的说法,似乎是可疑的”[L3]。

我们来到 1892 年,这一年,洛伦兹发表了他的第一篇原子观

点的电磁理论的文章 [ L12 ]。迈克尔逊 — 莫雷实验也同时完成了。这一次洛伦兹对实验非常关心(如我们在前面说的):很长一段时间,这个实验一直令我迷惑,到最后,我才想出惟一能协调它和菲涅耳理论的一个方法。这就是,假定固体中联结两点的线段,如果先与地球运动方向平行,随后它转过  $90^\circ$  角,则它不再保持原来的长度 [L13]。如果在后一位置的长度是  $l'$  洛伦兹指出,只要原先位置的长度  $l$  为

$$l' = l(1 - v^2/2c^2) \quad (6.8)$$

菲涅耳的以太假说就可以保留。今天,我们称方程 (6.8) 为精确到  $v/c$  二阶的菲茨杰拉德 — 洛伦兹收缩。为解释这个结果,洛伦兹假定,分子力像电磁力一样,“通过以太的介入而发生作用”;而且,在任何已知的实验条件下,都不可能排除  $O(v^2/c^2)$  阶的收缩效应。

这些结论与菲茨杰拉德以前的建议在细节上是显著一致的:通过以太以动力学方式介入分子力的作用而挽救以太。然而,洛伦兹在 1892 年还不知道菲茨杰拉德更早的论文。

1894 年秋,洛伦兹写信告诉菲茨杰拉德,他从洛奇 1893 年的论文知道了他的假说;还告诉他,他自己在 1892 年的论文中已经得出了同样的思想;又问他的思想发表在哪里,他想参考它们 [L14]。几天后,菲茨杰拉德回信说,他的论文寄给《科学》杂志了,“但我不知道他们是否把它发表了……我敢担保,你发表的论文一定早于我的任何一篇印刷品(!)”[F5]。他还表示,很高兴能听到洛伦兹同意他的观点,“因为由于我的观点我在这儿到处遭人嘲笑。”

从那时起,洛伦兹实际上一有机会就指出他和菲茨杰拉德独

立地产生了收缩的想法。在 1895 年的论文中，他谈了他的“一个假说……我后来发现，菲茨杰拉德先生也已经提出它了” [L15]。这篇论文也标志着洛伦兹已开始走向洛伦兹变换，即我们下面的主题。

在 1895 年的那篇论文中，洛伦兹证明了下面的“对应态原理”：在相对于以太静止的坐标系  $(x, t)$  中，考虑一个非磁性物质分布 分别用  $E, H, D$  表示电场、磁场和位移电场。 $\vec{D} = \vec{E} + \vec{P}$ ,  $\vec{P}$  是电极化矢量。再考虑相对于  $(x, t)$  系以速度  $v$  运动的第二个坐标系  $(\vec{x}', t')$ 。那么，在  $v/c$  的一阶近似下，第二个坐标系中存在一个对应态，在此状态下  $\vec{E}', \vec{H}', \vec{P}'$  作为  $X', t'$  的函数 与  $E, H, \vec{P}$  作为  $\vec{x}, t$  的函数，在形式上是一样的。这里，

$$\vec{x}' = \vec{x} - vt \quad (6.9)$$

$$t' = t - \vec{v}\vec{x}/c^2 \quad (6.10)$$

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{H}/c \quad (6.11)$$

$$\vec{H}' = \vec{H} - \vec{v} \times \vec{E}/c \quad (6.12)$$

$$\vec{P}' = \vec{P}$$

与在他之前的伏依特一样，洛伦兹把这个变换 [ 方程 (6.9) 和 (6.10) ] 仅看成是证明物理定理的一个方便的数学工具。他这里要证明的是，在  $(v/c)$  量级上地面光学实验与地球运动无关，这是我们在 6a 中已经讲过的结果。方程 (6.9) 对洛伦兹来说显然是熟悉的，但新方程 (6.10) 促使他引入了重要的新术语。他建议把  $t$  叫做一般时， $t'$  叫做地方时 [L16]。很明显，在他看来，可以说只有一个真实时间  $t$ ，尽管他没说得这么明确。在这段时间，洛伦兹对不存在任何静止以太的证据的解释，有着混杂的特征：在一阶情形，他根据电动力学导出了零效应；在二阶情形，他不得不引入方

程(6.8)所表达的他特设的假定。

关于这篇论文,我再说一句。它还包含着别的新东西,即一个假定 电荷为  $e$  速度为  $v$  的“离子”受到一个力  $K$  的作用:

$$\vec{K} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{H}/c) \quad (6.13)$$

也就是洛伦兹力 [洛伦兹叫它电力 (*electrische Kraft*)] [L17]。

正如我反复讲的,爱因斯坦在 1905 年只知道洛伦兹 1895 年以前的工作。所以,爱因斯坦差不多就知道以下这些事情:洛伦兹对迈克尔逊—莫雷实验的关注;他的“一阶洛伦兹变换”,方程(6.9)和(6.10);他对光学现象的一阶定理的证明;他用收缩假设对这个证明的一个补充;以及,最后他新提出的洛伦兹力的假设,方程(6.13)。

作为对洛伦兹 1905 年以前工作的总结,我需要谈以下 3 篇论文。

1898 年洛伦兹在杜塞尔多夫 (Düsseldorf) 的一次演讲中,讨论了他的工作现状 [L18]。这是他 1895 年所写东西的一个基本总结。

1899 年他给出了他早先理论的一个“简化形式” [L19]。5 年后他这样描述了这项工作:“假如通过一定的基本假设也不忽略一阶和其他量级的项,而能够证明许多电磁作用完全与系统的运动无关,那将会更令人满意。几年前 [在 1899 年] 我已设法建立了一个这样的理论” [L20]。1899 年,他写下了变换

$$x' = \epsilon \gamma (x - vt) \quad (6.14)$$

$$y' = \epsilon y, z' = \epsilon z \quad (6.15)$$

$$t' = \epsilon \gamma (t - vx/c^2) \quad (6.16)$$

这是多出一个比例因子  $\epsilon$  的洛伦兹变换 [方程(6.3)]。在这些关

系中，他特别注意到“由 [方程 (6.14) 和 (6.15)] 决定的膨胀正好是我为解释迈克尔逊先生的实验而不得不做的假定！”因此，把菲茨杰拉德—洛伦兹收缩还原为洛伦兹变换的结果<sup>①</sup>是 19 世纪的产物。洛伦兹将方程 (6.16) 确定的  $t'$  叫做修正的地方时。关于比例因子，他指出“它应该有一个确定的值，而这个值只有通过对这个现象更深入的认识”才能决定。当然，他也注意到，为解释迈克尔逊—莫雷实验，并不需要知道  $\epsilon$  是什么。（因为对于自由空间的一切光学现象，我们不仅可以考虑洛伦兹不变性，也可以考虑标度不变性，事实上，也就是考虑共形不变性。）1899 年，洛伦兹没有检查他的对应态定理是否能适应方程 (6.14)–(6.16) 所表示的变换。

1904 年洛伦兹最后写出了他的那个变换 [方程 (6.3)–(6.4)][L20]。他根据电子在外场作用下的运动方程的变换性质的讨论，确定了  $\epsilon$  为一个单位量。这次，他试图证明非齐次麦克斯韦—洛伦兹方程的对应态定理（即洛伦兹协变性）。他在速度的变换方程中犯了个错误 ([L20] 方程 8)。结果，他没有得到一阶  $v/c$  以外的协变性 [比较 L20 中的方程 (2) 和 (9)]。

我将在下一章再来讨论这篇 1904 年的论文。不过，对相对论运动学的历史来说，洛伦兹作为爱因斯坦的先驱者的故事，讲到这里就够了。

5. 拉莫尔 拉莫尔的获奖论文《以太和物质》[L10] 完成于 1898 年，1900 年出版。书中不仅包含了这个变换 [方程 (6.3) 和 (6.4)]，而且也证明了，借助这些变换，可以得到菲茨杰拉德—洛

<sup>①</sup> 这个还原的简单数学计算，请参见普通的教科书，例如 [P4]。



洛伦兹收缩 [L21]。拉莫尔知道洛伦兹 1895 年的论文，并详细地引用了它，但还不知道他 1899 年的论文。

的确，拉莫尔的推理常常因为他对以太和物质间的动力学关系的思考（没有必要在这里谈）而显得模糊不清。然而，毫无疑问，他在洛伦兹独立发现之前，给出了洛伦兹变换和以此变换为根据的收缩论证。奇怪的是，无论在拉莫尔与洛伦兹的通信中，<sup>①</sup>还是在洛伦兹的论文中，都没提到拉莫尔的这个贡献。

我第一次知道拉莫尔的工作是在 20 世纪 50 年代。当时福克尔 (Adrian Fokker) 告诉我，在莱顿，大家都知道拉莫尔在洛伦兹之前就得到了洛伦兹变换。可惜，我从没问过福克尔（洛伦兹以前的学生），在这个问题上，洛伦兹本人是怎么说的。

6. 庞加莱 1898 年，庞加莱发表了一篇十分引人注目的文章题为《时间的测量》(La Mesure du Temps)[P5]。<sup>②</sup> 在这篇文章中，作者指出，“我们没有关于两个时间间隔相等的直觉。相信有这种直觉的人是受了假象的欺骗”（黑体字是庞加莱用的）。他进一步指出，“很难将同时性的定性问题与时间测量的定量问题分离开来；不论我们用计时计还是考虑像光那样的传播速度，因为没有时间的测量，就不能够测量这个速度。”在讨论了过去同时性定义的不恰当性后 庞加莱最后说：“两个事件的同时性 或者它们的发生次序，以及两个时间间隔的相等，都必须以这样的方式来定

<sup>①</sup> 这些信件存放在海牙的国家档案馆 (Ryksarchief)。我感谢科克斯 (Anne Kox) 让我知道了这些信。

<sup>②</sup> 这篇文章的英译本在《科学的价值》(The Value of Science)[P6 第二章中可以找到。(G. R. Halsted 1913 年的英译本，包括庞加莱的 3 部著作：《科学与假设》、《科学的价值》、《科学与方法》是庞加莱本人认可的权威译本。它的中译本为《科学的价值》，李醒民译，石雷校，光明日报出版社 1988。——译者)

义：使自然规律的表述尽可能简单。换句话说，所有的法则和定义都不过是无意识的机会主义的产物。”这几句话 仿佛为 7 年后绘出的那幅具体的图景设计好了一般的框架。从文中的其他论述我们看到，庞加莱写这篇文章，是为了回答不久前发表的几篇关于时间间隔测量这一经常争论的问题的文章。他在这些讨论中引入的新观点，是他对同时性的客观意义的诘难。

1898 年，庞加莱没有谈电动力学中的任何问题，后来在 1900 年和 1904 年的两次讲话中，他也没有谈。他的东西还是纲领性的。在这些工作中，以太问题是中心。“以太真的存在吗？”在 1900 年巴黎会议的开幕词 [ P7 ] 中<sup>①</sup>他这样问。“大家知道我们对以太的信念是从何而来的。当光在从遥远星体射向我们的路上……它不再在星体上，也不在地球上。它一定在某个地方被支撑着 可以说 被某种物质支撑着。”他指出 在斐索的实验中“我们相信能用手摸到以太。”谈到理论观点，他指出，洛伦兹理论“是我们所拥有的最令人满意的一个理论。”<sup>②</sup>然而，在这个理论中光学现象与地球运动的独立性在一阶和二阶效应上有着分离的解释 庞加莱认为这是一个缺陷。“我们必须为这个和那个[ 效应 ] 找一个相同的解释，而每一件事情都使我们预感到，这个解释也适合于更高阶的项 而且这些[ 速度相关 ] 项的消除 将是严格的和绝对的。”他说高阶项的消除，似乎表明他在思考某种动力学作用。

<sup>①</sup> 讲话的英汉译本见《科学与假设》(Science and Hypothesis)[P8] 第 9、10 章。(《科学与假设》法文单行本也有中文译本 叶蕴理译 商务印书馆,1930 第一版,1957 年修订重印。——译者)

<sup>②</sup> 1895 年到 1900 年间，庞加莱因为这个理论不满足牛顿意义的动量守恒，也就是物质的动量守恒，从而认为它有缺陷。不久之后，他不再坚持这个反对意见。

1904年，他在美国圣路易斯国际艺术与科学博览会的讲话 [P9],<sup>①</sup>又回到了老问题，而且走的还是纲领性的路。“什么是以太？它的分子如何排列？它们相互吸引还是排斥？”他对绝对速度的思想表示了他的忧虑：“假如我们成功地测量了某些东西，我们总可以自由地说这 [速度] 不是绝对速度，假如它不是相对于以太的速度，它总可以是相对于某种新的未知流体的速度，我们可以用这种流体来充满空间。”他温和地批评了洛伦兹的假设堆积，并超越洛伦兹而把地方时作为一个物理概念来对待。他考虑了两个匀速相对运动的观察者，他们希望通过光信号来校准彼此的时钟。“以这种方法校准的钟不能代表真正的时间，而它们所代表的时间我们可以称为地方时。”一个观察者所看到的所有现象对另一个观察者来说都会是延迟的，但他们之间的延迟是等价的，（庞加莱指出并且“作为相对性原理的要求 [观察者] 不可能知道他是静止还是在绝对运动着的。”庞加莱越走越近了。但是接着他动摇了：“不幸的是 [这个推理] 是不充分的，还需要补充假设 [我用的黑体]；我们必须假定，运动物体在它们运动的方向上会受到一个均匀的收缩。”他说需要补充假设，这清楚表明相对论还没有被发现。

庞加莱在这篇讲话的最后，提出了他的另一个了不起的思想：“也许，我们必须构造一种新的力学，现在我们还只能抓住它的一点儿灵光……在这种力学中，光速将成为不可逾越的极限。”但是，他又说：“我要赶紧说，我们还没有到这个地步，也没有任何事情证明 [旧原理] 不会胜利地从这次斗争中走出并完整地保留下来。”

<sup>①</sup> 讲话的英汉译本见《科学的价值》[P6第7至9章。

庞加莱在这里迟疑了，我们关于爱因斯坦的先驱者的话也说完了。洛伦兹变换写出来了，同时性问题提出来了，光速作为一个极限速度也猜想到了。但在 1905 年以前，相对论却还是没有。现在，让我们来看看庞加莱下一步做了些什么。这时，他不再扮演爱因斯坦先驱者的角色，而基本上与爱因斯坦同时做着自己的事情。

## 6c. 庞加莱在 1905

刚才提到的 3 篇文章的特征是定性的。庞加莱，这位在他那个时代的数学和数学物理学领域的真正领袖之一，当然知道电磁理论的一切。1889 年，他出版了一本光学的书 [ P10]; 1901 年出版了一本电磁理论的书 [ P11]; 1895 年，他写了一系列关于麦克斯韦理论的论文 [ P12]; 从 1897 年到 1900 年，他又写了几篇关于洛伦兹理论的文章 [ P13]。所有这些工作在他 1905 年完成的两篇论文达到顶峰。两篇论文有同一个标题：《论电动力学》(Sur la Dynamique de l'Electron)，动力学一词的出现是很有意思的。下面的时间序列，也同样有意思：

1905 年 6 月 5 日，庞加莱将第一篇论文通报给巴黎的科学院 (Académie des Sciences)[P14].

1905 年 6 月 30 日，《物理学纪事》收到了爱因斯坦的第一篇相对论的论文。

1905 年 7 月，庞加莱完成他的第二篇论文，1906 年发表 [P15]

庞加莱论文的第一篇，本质上是更长的第二篇的纲要。两篇文章的内容是部分运动学、部分动力学。我在这里只讨论运动学

部分，其余部分留在下一章讨论。

6月论文开头说：无论光行差及其相关现象，还是迈克尔逊的工作，都没有揭示出任何地球的绝对运动的证据。“看来，不可能证明绝对运动是自然界的一条普遍规律。”接着，庞加莱谈到收缩假设和洛伦兹 1904 年的论文 [ L20 ]，洛伦兹在这篇论文中，如庞加莱所赞同的，已经成功地修正了假设，“使它能与完全不可能测量绝对运动这一点相一致。”这句话不太对 因为 如我们以前说过的)，洛伦兹并没有成功地证明非齐次麦克斯韦—洛伦兹方程的协变性。7月，庞加莱还要回到这一点。然而，他在 6月就已经发现了正确的速度变换性质，这一点，洛伦兹错过了。“我被驱使着在一定细节上修正和完善 洛伦兹的分析 。”

然后 庞加莱转来谈变换 [ 方程 (6.14) — (6.16) ]，“我愿以洛伦兹的名字来命名它们。”他接着说：“所有这些变换的集合 同所有空间转动的集合一起，一定构成一个群 但是 为实现这一点 必须要求  $\epsilon=1$ ；<sup>①</sup> 因此，这促使我们假定  $\epsilon=1$  这个结果 洛伦兹已经用别的办法得到过了。”

这篇论文最后讨论的问题同引力有关。照洛伦兹的动力学图景，庞加莱用一种更普遍和更抽象的方式论证了所有的力都应该在洛伦兹变换下以相同方式变换。从而他断定，牛顿定律需要修正，而且应该存在以光速传播的引力波。最后，他指出，对牛顿定律的修正，结果一定是  $O(v^2/c^2)$  量级的，而天文数据的精度，似乎不会消除这个量级的效应。

庞加莱的 7月论文给出了许多细节。它的第 1 节题为“洛伦

① 我用方程 (6.14) — (6.16) 的符号 庞加莱用  $\epsilon$  而没用  $\epsilon$ 。

兹变换”，包含了电动力学协变性的完整证明。“在这里我必须首先指出与洛伦兹的论证的一个区别” [P16]。第 4 节讨论了“我们将称之为洛伦兹群的一个连续群。”庞加莱解释了他对  $\epsilon=1$  的论证：从方程 (6.14) — (6.16) 出发，考虑这些变换的逆变换，也就是，以  $-v$  代  $v$  显然，

$$\epsilon(v)\epsilon(-v)=1 \quad (6.17)$$

另外绕  $y$  轴转过  $180^\circ$  得到

$$\epsilon(v)=\epsilon(-v) \quad (6.18)$$

因此

$$\epsilon(v)=1 \quad (6.19)$$

一旦选择了  $\epsilon=1$ ，洛伦兹变换就有如下性质

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \text{ 保持不变} \quad (6.20)$$

为表明洛伦兹变换的群性质，庞加莱指出：速度为  $v_1$  与速度为  $v_2$  的两个变换方程 (6.3) 的“积”产生另一个速度为  $v$  的洛伦兹变换  $v$  为

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2} \quad (6.21)$$

当然他不知道几个星期以前已经另外有人独立地指出了洛伦兹变换的群性质，而且用几乎相同的论证导出了方程 (6.19) — (6.21)

我以后将回过头来谈洛伦兹 1904 年和庞加莱 1905 年为电子理论所做的努力。然而，我相信，所有有关洛伦兹和庞加莱在相对论发展中的作用的证据，我都已经在这里提出来了。现在，我先来讨论爱因斯坦关于相对论的前两篇论文，再谈他们的事情。然后，我想比较这 3 个人的贡献。

作为讲述爱因斯坦相对论发现的最后一步准备，我还应该说一句关于他在 1905 年以前有关这个问题的思想，我们知道的少得可怜。

## 6d. 1905 年以前的爱因斯坦

爱因斯坦对电磁理论的好奇心至少可以追溯到他 1895 年在帕维亚的日子，那时，他刚从他所厌恶的慕尼黑中学解脱出来。在他创立狭义相对论前的十年间，他对电动力学的兴趣，反映在下面这些简短的、相当零散的叙述中。

1. 帕维亚论文 1895 年，爱因斯坦将一份题为“*Über die Untersuchung des Atherzustandes im magnetischen Felde*”（《对磁场中以太状态的考察》）的手稿寄给他在比利时的舅舅科赫（Caesar Koch）。<sup>①</sup> 这篇论文，爱因斯坦从未发表。在随手稿的附信中 爱因斯坦写道：“[手稿]处理的是一个很特殊的题目，而且正如人们能从一个年轻人那儿得到的期待那样……相当幼稚和不完整。”论文开头 他请读者宽容一些：“由于我完全缺乏深入研究这个课题所需的资料，我请求不要将这种情况理解为浅薄。”

这篇文章提出的主要问题是，电流所产生的磁场如何影响周围的以太？反过来，磁场又如何影响电流本身？显然，爱因斯坦那时相信以太，认为它是一种弹性介质，并特别想知道“3 个弹性量[如何]影响以太波的速度”而以太波是通过电流产生的。他得

<sup>①</sup> 1950 年，爱因斯坦注明这手稿的时间是 1894 年或 1905 年。它寄给科赫是在 1895 年，因为在附信中，爱因斯坦说过他打算去 ETH 还说：“下一封给您的信 也许会来自那儿。”论文和附信 都可以在梅拉 Mehra 的一篇论文 [M18] 中看到复制件。

出下面的主要结论：“首先应该从实验上证明电流产生磁场的能力存在一个消极的阻力；这个阻力正比于导线的长度而与横截面和导体材料无关。”因而年轻的爱因斯坦独立发现了自感（他没有用这个术语）的定性特性。很清楚，他还不熟悉有关这个现象的早期工作。在论文中他提到“赫兹的精彩实验”，我不知道他是怎么知道赫兹的工作的。无论如何，那时他已经知道光是一种电磁现象，但还不知道麦克斯韦的论文。

2. 阿劳问题 在爱因斯坦最后写的自述片断中 [E12] 他写道：“在阿劳的那一年 [大概从 1895 年 10 月到 1896 年早秋] 我想到了这个问题 假如一个人以与光速相同的速度跟着光波跑 那么他将面对一个不依赖于时间的波场。然而，像这样的事情似乎并不存在！这是与狭义相对论有关的第一个朴素的思想实验。”（并且他还说：“发明不是逻辑思维的产物 尽管最终的结果总是联系着一个逻辑结构。”）在 1949 年发表的内容更广泛的自传中，爱因斯坦指出：“经过 10 年的沉思以后，这样一个原理 [狭义相对论] 就从我 16 岁时偶然想到的 [那个] 悖论中，产生出来了” [E6]。

3. ETH 学生 爱因斯坦的女婿兼他的传记作者凯泽尔本人不是物理学家，所以，传记中的下面几句话，大概只能认为是爱因斯坦自己讲的。“在大学生活的第二年（1897—1898）他立即遇到了光、以太和地球运动问题。这个问题从没离开过他，他想建一台仪器来精确测量地球相对于以太的运动。爱因斯坦还不知道，他的愿望也是其他重要理论家所有的。那时他还不熟悉几年前荷兰大物理学家洛伦兹的建设性贡献和后来迈克尔逊的著名实验。他想在经验上适应他对时间的科学感觉，而且他相信，他寻找的那种



仪器会给他带来这个问题的解决，他已经感觉到了它的广阔前景。但是，他没有机会建这种仪器，因为他的老师们的疑心太大而事业心又太小。所以阿尔伯特只好把它放到他的计划之外，但还没有永远放弃它。他还希望通过观察和实验来接近这个物理学的大问题 '[R2]'

至于电磁理论，爱因斯坦在 ETH 时代没有上过这门课。如第 3 章所说，他是跟福普尔的教科书学这个理论的。

4. 温特图尔的信 爱因斯坦在 1901 年从温特图尔写给格罗斯曼的信告诉我们，他还在思考以太漂移实验：“我想到一种新的简单得多的考察物质相对于光以太运动的方法。残酷的命运如能给我一点安静来实现它，那该有多好！”[E13]。这段话前面没说什么，所以我们得到这样一个印象：格罗斯曼知道一些他们一起在 ETH 时爱因斯坦曾经想过的方法。

这封信也表明 直到 1901 年，爱因斯坦还相信以太。

5. 伯尔尼演讲 1903 年 12 月 5 日晚上，在伯尔尼斯托尔亨旅馆 (Hotel Storchen) 的会议室，阿尔伯特·爱因斯坦这个临时三级技术专家，向伯尔尼自然研究者协会 (Naturforschende Gesellschaft Bern) 发表演讲。他在 1903 年 5 月 2 日被选为协会会员。这篇 12 月演讲的主题是“电磁波理论” (Theorie der electromagnetischen Wellen)[E6]。大家显然非常想知道，那天晚上爱因斯坦讲了些什么，然而，就我所知，这次讲话没有留下记录。

6. 京都演讲 最后，我要引用爱因斯坦 1922 年京都演讲的另一部分，它是从德文译成日文，再从日文译成英文的。引用之前，我先要说明，我不知道他说的“那时我想……”和“那些日子里……”指的是什么时候。

“那时我想，我应该以某种方法从实验上向我自己证明以太相对于地球的流动，或者说，地球的运动。在这个问题出现在我的思想中的那些日子里，对于以太的存在性和地球在其中的运动，我一点也没怀疑过。同时，我还有一个试图检测它的实验计划。我想的办法是温差电偶的热量差，这个热量差在来自单光源的光被适当的镜面反射的同向和反向上，是应该出现的，因为我预先假定了相反方向的反射光存在着能量差。这个想法同迈克尔逊的实验很相似，但我却没能做这个实验，也就没得到任何确定的结果” [O1]

7. 总结 在同一演讲中，爱因斯坦指出：“我是怎样得到相对论的，这个问题从来就不好说。因为，存在着各种激发人类思想的隐藏的复杂性，而且它们起着大小不同的作用” [O1]。即使记着这个告诫，似乎还是可以像下面这样来公正地总结爱因斯坦 1905 年前在电动力学方面的工作和思想。

爱因斯坦第一个重要的创造性活动要追溯到他的中学时代，那时，他独立发现了自感现象，当然，这个贡献不会记上他的名字。他至少产生过两次以新实验方法测量以太漂移的想法，他想亲自做这些实验，但没有做成，也许因为老师不让他做 [R2] 或者因为他没有足够的空余时间 [E13]。至少到 1901 年，他还相信以太 [E13]。在 1895 年到 1896 年间，光不可能变成静止的思想令他震惊 [E12]。他知道迈克尔逊—莫雷实验，然而，这对他的狭义相对论的形成来说，不如光行差和菲涅耳拖曳等一阶效应那么重要 [S6,O1]。他知道洛伦兹 1895 年的那篇详细讨论了迈克尔逊—莫雷实验的论文，但他不知道洛伦兹变换。庞加莱在技术细节上讨论物理学的那些著作，他一点都不知道。

然而完全可以肯定,1905年之前,爱因斯坦知道庞加莱1900年的巴黎演讲,而且他也读过庞加莱1898年关于“我们没有两个时间间隔相等的直觉”的意见。1905年以前,爱因斯坦和他的奥林匹亚科学院的朋友们一起确实读过一些庞加莱的一般科学论文:“在伯尔尼我与哈比希特和索洛文一起经常在晚上阅读和讨论哲学著作,主要是休谟的……读休谟、庞加莱和马赫的著作,对我的发展产生过一定的影响”[E14]。

庞加莱的4本文集:《科学与假设》(*La Science et l'Hypothèse*)、《科学的价值》(*La Valeur de la Science*)、《科学与方法》(*Science et Méthode*)和《最后的沉思》(*Dernières Pensées*),<sup>①</sup>分别于1902、1905、1908和1913年首次出版。在6b提到的3篇庞加莱的纲领性论文,就收集在这些文集中。他1898年对同时性的朴素说法提出质疑的那篇文章和1904年的圣路易斯演讲收在《科学的价值》中,1900年的巴黎演讲收在《科学与假设》中。后面这一本,是4本书中惟一在1905年前出版的,也就是爱因斯坦和他的朋友们在伯尔尼读的那一本。所以我相信,爱因斯坦在写他的第一篇相对论论文之前,已经知道了巴黎演讲。庞加莱在演讲中指出,在 $v/c$ 的所有阶上,都应该普遍没有相对于以太运动的证据。而且,“这些速度相关项的消除将是严格的和绝对的。”但是爱因斯坦知道的还更多。在《科学与假设》关于经典力学的那一章中,庞加莱写道:“不存在绝对的时间。说两个间隔相等,这句话本身没有意义,它的意义只能靠约定来获得……我们不仅没有两个间隔相等

此书有中译本,是根据英译本翻译的。《最后的沉思》,李醒民译,范岱年校,商务印书馆,1995年。——译者

的直觉，而且甚至也没有发生在不同地点的两个事件的同时性的直觉，这一点我已在题为《时间的测量》的一篇文章中作了解释。”我强调一句，爱因斯坦和他的朋友们并不限于浏览庞加莱的著作。索洛文给我们留下了一张详细的 [奥林匹亚] 科学院成员一起阅读过的图书清单，从这些书中，他选了一本、也是惟一的一本，即《科学与假设》做了如下说明：“[这本]书给我们留下了深刻的印象，它伴我们度过了无比紧张的几个星期” [E15]!

关于爱因斯坦和庞加莱，我还应该多讲一些，等下一章讨论了爱因斯坦狭义相对论的创立之后，我会在第 8 章这么做的。

### 参考文献

- B1. Cf. W. L. Bryan (Ed.), *A Debate on the Theory of Relativity*. Open Court, Chicago, 1927.
- B2. D. B. Brace, *Phil. Mag.* **7**, 317 (1904).
- B3. A. M. Bork, *Isis* **57**, 199 (1966).
- B4. S. G. Brush, *Isis* **58**, 230 (1967).
- C1. E. Cohn, *Goett. Nachr.*, 1901, p. 74.
- D1. P. A. M. Dirac, *Nature* **168**, 906 (1951); **169**, 702 (1951).
- D2. H. Dukas, memorandum to V. Hobson, secretary to Professor J. R. Oppenheimer, June 21, 1966.
- D3. P. Drude, *The Theory of Optics* (C. R. Mann and R. A. Millikan, Trans.), p. 457. Dover, New York, 1959.
- E1. A. Einstein, *The Meaning of Relativity* (E. P. Adams Tran.). Princeton University Press, Princeton, N. J., 1921.
- E2. —, letter to M. Besso, December 23, 1925; EB, p. 215.
- E2a. —, *Forschungen und Fortschritte* **3**, 36 (1927).
- E3. —, letter to O. Veblen, April 30, 1930.
- E4. —, *Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie*. I mprimerie Royale, Stockholm, 1923. English translation in [N1], p. 482.

- E5. —, *AdP* **17**, 891 (1905).
- E6. — in *Albert Einstein; Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, Ed.). Tudor, New York, 1949.
- E7. —, *Jahrb. Rod. Elektr.* **4**, 411 (1907).
- E8. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.), Vol. 3, Sec. 3. Teubner, Leipzig, 1915.
- E9. —, *The Meaning of Relativity* (5th edn.). Princeton University Press, Princeton, N. J., 1955.
- E10. —, *Science* **73**, 375 (1931).
- E11. —, *Z. Angew. Chemie* **44**, 685 (1931).
- E12. — in *Helle Zeit, dunkle Zeit* (C. Seelig, Ed.). Europa Verlag, Zürich, 1956.
- E13. —, letter to M. Grossmann, 1901, undated.
- E14. —, letter to M. Besso, March 6, 1952; *EB*, p. 464.
- E15. —, *Lettres à Maurice Solovine*, p. VIII. Gauthier-Villars, Paris 1956.
- F1. A. Fresnel, letter to F. Arago, September 1818. Reprinted in *Oeuvres d'Augustin Fresnel*, Vol. 2, p. 627. Imprimerie Royale, Paris, 1868.
- F2. A. Fizeau, *C. R. Ac. Sci. Paris* **33**, 349 (1851).
- F3. G. F. FitzGerald, *Science* **13**, 390 (1889).
- F4. —, letter to O. Heaviside, quoted in A. M. Bork, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, p. 15. Scribner's, New York, 1972.
- F5. —, letter to H. A. Lorentz, November 10, 1894. Reprinted in [B4].
- F6. M. Flückiger, *Albert Einstein in Bern*, pp. 71–76. Paul Haupt Verlag, Bern, 1974.
- H1. J. N. Howard, *Isis* **58**, 88 (1967).
- H2. G. Holton, *Isis* **60**, 133 (1969).
- H3. H. Hertz, *Gesammelte Werke* (2nd edn.), Vol. 2, p. 23. Earth, Leipzig, 1894.
- H4. H. Hertz, *Electric Waves* (D. E. Jones, Tran.), p. 21. Dover, New York, 1962.
- H5. T. Hirose, *Hist. St. Phys. Sci.* **7**, 3 (1976).

- II. J. Ishiware, *Einstein Kōen -Roku*, Tokyo -Tosho, Tokyo, 1977.
- K1. Kelvin, *Baltimore Lectures*, Appendix B. Clay, London, 1904.
- K2. —, [K1], p. vi.
- K3. —, [H4], p. xv.
- L1. H. A. Lorentz, *Lectures on Theoretical Physics*, Vol. 1, p. 3. McMillan, London, 1927.
- L2. D. M. Livingston, *The Master of Light*, Chap. 3. Scribner's, New York, 1973.
- L3. H. A. Lorentz, *Arch. Neerl.* **21**, 103 (1886). Reprinted in H. A. Lorentz, *Collected Papers*, Vol. 4, p. 153. Nyhoff, the Hague, 1936.
- L4. —, *Versuch Einer Theorie der Electricischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*, *Collected Papers*, Vol. 5, p. 1. Brill, Leiden, 1895.
- L5. —, letter to Lord Rayleigh, August 18, 1892. Reprinted in [S2].
- L6. B. E. Livingston, *Science* **63**, 105 (1926).
- L7. H. A. Lorentz, *The Theory of Electrons*, Sec. 169. Teubner, Leipzig, 1909.
- L8. J. Larmor (Ed.), *The Scientific Writings of the Late George Francis FitzGerald*. Longmans Green, London, 1902.
- L9. —, [L8], p. lviii.
- L10. —, *Aether and Matter*. Cambridge University Press, Cambridge, 1900.
- L11. —, [L8], p. 514.
- L12. H. A. Lorentz, *Arch. Néerl.* **25**, 363 (1892); *Collected Papers*, Vol. 2, p. 164.
- L13. —, *Versl. K. Ak. Amsterdam* **1**, 74 (1892); *Collected Papers*, Vol. 4, p. 219.
- L14. —, letter to G. F. FitzGerald, November 10, 1894. Reprinted in [B4].
- L15. —, [L4], Sec. 89.
- L16. —, [L4], Sec. 31.
- L17. —, [L4], Sec. 12.

- L18. —, *Verh. Ges. Deutsch. Naturf. Ärzte* **70**, 56 (1898); Collected Papers, Vol. 7, p. 101.
- L19. —, *Versl. K. Ak. Amsterdam* **10**, 793 (1902); Collected Papers, Vol. 5, p. 139.
- L20. —, *Proc. K. Ak. Amsterdam* **6**, 809 (1904); Collected Papers, Vol. 5, p. 172.
- L21. J. Larmor, [L10], Chap. 11.
- M1. J. C. Maxwell, *Encyclopedia Britannica*, 9th edn., Vol. 8, 1878. Reprinted in *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 2, p. 763. Dover, New York.
- M2. —, *Nature* **21**, 315(1880).
- M3. A. A. Michelson, *Am. J. Sci.* **22**, 120 (1881).
- M4. —, letter to Lord Rayleigh, March 6, 1887. Reprinted in [S2].
- M5. —, letter to Lord Rayleigh, August 17, 1887. Reprinted in [S2].
- M6. — and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **34**, 333 (1887).
- M7. —, F. G. Pease, and F. Pearson, *Nature* **123**, 88 (1929); *J. Opt. Soc.* **18**, 181(1929).
- M8. E. W. Morley and D. C. Miller, *Phil. Mag.* **9**, 680 (1905).
- M9. D. C. Miller, *Rev. Mod. Phys.* **5**, 203 (1933).
- M10. —, *Proc. Nat. Ac. Sci.* **11**, 306 (1925); *Science* **61**, 617 (1925).
- M11. —, *Science* **63**, 433 (1926).
- M12. A. A. Michelson, *Studies in Optics*, Chap. 14. University of Chicago Press, Chicago, 1927.
- M13. —, letter to A. Einstein, December 5, 1923.
- M14. R. McCormach in *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 6, p. 340. Scribner's, New York, 1972.
- M15. A. I. Miller, *Arch. Hist. Ex. Sci.* **10**, 207 (1973).
- M16. H. Minkowski, *Phys. Zeitschr.* **9**, 762 (1908).
- M17. A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **31**, 377 (1886).
- M18. J. Mehra, *Phys. Blatt.* **27**, 385 (1971); University of Texas at Austin, Report CPT-82, 1971.
- N1. *Nobel Lectures in Physics 1901 — 1921*, pp. 159ff. Elsevier, New

- York, 1967.
- O1. T. Ogawa, *Jap. St. Hist. Sci.* **18**, 73 (1979).
- O2. O. Heaviside, letter quoted in [L8], p. xxvi.
- P1. W. K. H. Panofsky and M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1955.
- P2. —, [P1], p. 174.
- P3. —, [P1], p. 347.
- P4. —, [P1], Chap. 15.
- P5. H. Poincaré, *Rev. Métaphys. Morale* **6**, 1 (1898).
- P6. —, *The Value of Science*. Reprinted in *The Foundations of Science* (G. R. Halsted, Tran.). Science Press, New York, 1913.
- P7. —, *Report of the International Physics Congress* (C. Guillaume and L. Poincaré, Eds.), Vol. 1, p. 1. Gauthier-Villars, Paris, 1900.
- P8. —, *Science and Hypothesis*. Dover, New York, 1952.
- P9. —, *Bull. Sci. Math.* **28**, 302 (1904).
- P10. —, *Théorie Mathématique de la Lumière*. Carré, Paris, 1889.
- P11. —, *Électricité et Optique*. Carre and Naud, Paris, 1901.
- P12. —, *Oeuvres*, Vol. 9, pp. 369—426. Gauthier-Villars, Paris, 1954.
- P13. —, *Oeuvres*, Vol. 9, pp. 427—488.
- P14. —, *C. R. Ac. Sci. Paris* **140**, 1504 (1905); *Oeuvres*, Vol. 9, p. 489.
- P15. —, *Rend. Circ. Mat. Palermo* **21**, 129 (1906); *Oeuvres*, Vol. 9, p. 494.
- P16. —, *Oeuvres*, Vol. 9, p. 500.
- R1. Rayleigh, *Phil. Mag.* **4**, 678 (1902).
- R2. A. Reiser, *Albert Einstein*, p. 52. Boni, New York, 1930.
- S1. L. S. Swenson, *The Ethereal Aether*, p. 194. University of Texas Press, Austin, 1972.
- S2. R. S. Shankland, *I sis* **58**, 86 (1967).
- S3. —, *Am. J. Phys.* **32**, 16 (1964).
- S4. —, S. W. McCuskey, F. C. Leone, and G. Kuerti, *Rev. Mod. Phys.* **27**, 167 (1955).



- 
- S5. —R. S. Shankland, *Biography Quarterly*, Vol. 2, No. 3. University of Hawaii Press, Honolulu, 1979.
- S6. —, *Am. J. Phys.* **31**, 47 (1962); **41**, 895 (1973).
- S7. —, *Am. J. Phys.* **32**, 16 (1964).
- T1. —F. T. Trouton and H. R. Noble, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **A202**, 137  
165 (1903).
- V1. —O. Veblen, letter to A. Einstein, April 17, 1930.
- V2. —W. Voigt, *Goett. Nachr.*, 1887, p. 41.
- V3. —W. Voigt, *AdP* **35**, 370, see footnote on p. 390 (1888).
- V4. —W. Voigt, *Phys. Zeitschr.* **9**, 762 (1908).

## 第 7 章 新运动学

### 7a. 1905 年 6 月：狭义相对论的确立， 洛伦兹变换的导出

1. 相对论的美学渊源 如果没有传播介质，那么我们就听不到声音，同样也看不见光。这正是 19 世纪物理学貌似合理的偏见。随着对光越来越多的了解，光的传播介质即以太的性质越来越确定。看来最可能的以太也许是这样的：当我们和地球穿过这种绝对不动的介质时，它像风一样吹过来。后来证明光是一种横波现象，从而人们确认，以太是准刚性的。

狭义相对论剥夺了以太的主要力学性质，即绝对静止的特性，从而使它成为多余的东西。正像爱因斯坦在他 1905 年 6 月的那篇论文（这一章里我们称它为 6 月论文的引言中说的那样，“‘光以太’的引进被证明是多余的 因为 根据将在 这里 建立的观点，我们既不需要引进一个赋予特殊性质的‘绝对静止空间’，也不需要把速度矢量同电磁过程在其中发生的空虚空间的一个点联系起来”[E1]。<sup>①</sup> 狭义相对论为了解释电磁现象而放弃了力学图景，一个曾受偏爱的绝对静止坐标系被抛弃了，代替它的是无限多的优

<sup>①</sup> 这篇论文的英译本见 [S1]。

越坐标系，即惯性系。根据定义，这些坐标系中的任意两个都彼此相对做匀速运动。因为对匀速的相对运动的偏爱，这样的相对论才被称为狭义的。

1905 年春，还在完成相对论论文之前，爱因斯坦就写信给他的朋友 C. 哈比希特说：“第四篇文章即 E1 是爱因斯坦 1905 年发表的第四篇论文] 还只有草稿，是一篇关于运动物体的电动力学，它利用了对空间和时间信条的修正；纯运动学部分你一定会感兴趣的 '[E2]。有点奇怪的是，爱因斯坦为什么想让朋友注意运动学部分呢？6 月论文的内容包括：一个引言，5 节讨论运动学 接着的 5 节讨论电动力学，没附参考文献，有一个致谢。运动学部分便包括了完备的狭义相对论的第一原理。

第 6 章说过，狭义相对论的诞生经过了 10 年的孕育。然而，决定性的运动学灵感，却是在实际完成我们将讨论的这篇论文的五六周之前才闪现的。这是我们从爱因斯坦 1922 年 12 月在京都的演讲中知道的；演讲还告诉我们，这次高潮爆发以前，他曾茫然地奋斗过一年。这里我再从京都演讲 [ O1] 引用几段：

“我考虑了斐索实验，然后试图在如下的假设基础上解决这个问题：关于电子的洛伦兹方程，在我们将坐标系定义在运动物体的情况下也应该成立，就像坐标系定义在真空中那样。总之，我那时确信，电动力学中的麦克斯韦-洛伦兹方程是正确的。而且这些方程在运动参考系中也要成立，这便格外向我们展现出所谓光速不变性的关系。然而，光速不变性是与我们在力学中熟悉的速度加法法则相矛盾的。

“为什么这两件事情彼此矛盾，我感到这个问题难以解决。我怀着修正洛伦兹某些思想的希望，差不多考虑了一年，毫无结果；

这时候我才认识到，它真是一个难解之谜。

“这时，伯尔尼的一个朋友意外地帮助了我。那是一个明媚的日子，我去访问他，与他进行了如下的谈话：‘最近我有个难以理解的问题，所以今天我把问题带到这里来想跟你讨论。’我们谈了很多，我突然明白了。第二天我又去看他，开口就说：‘太感谢你了！我已经完全解决了这个问题。’我解决的实际上就是时间概念，也就是说，时间不是绝对确定的，而是在时间与信号速度之间有着不可分割的联系。有了这个概念，前面的疑难也就迎刃而解了。在认识这一点 5 周后，现在的狭义相对论就完成了。”

这位伯尔尼的朋友就是贝索，他是爱因斯坦在苏黎世学生时代的亲密朋友，1904 年起，他也在专利局工作。于是，京都演讲使我们明白了，爱因斯坦在 6 月论文里所感谢的“我的朋友 M. 贝索的真诚帮助”是怎么一回事。至于说他在 5 周内完成这篇论文，是因为《物理学纪事》收到论文是在 6 月 30 日而爱因斯坦把精力集中到相对论，是紧跟在他刚从完成 3 篇重要的统计物理学论文的紧张中解脱出来之后：一篇关于光量子，一篇学位论文，一篇关于布朗运动，完成时间分别是 3 月 17 日、4 月 30 日和 5 月 10 日左右。

以后我们会看到，爱因斯坦 1905 年相信“麦克斯韦—洛伦兹方程是正确的”并不是无条件的，但这已足以使他觉察到（真空中）光速不变性与经典力学的相对性原理之间的矛盾了。那时，相对性原理早已为人所熟悉。它指出，一切力学定律在任何由

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad (7.1)$$

联系的两个坐标系  $(x, y, z, t)$  和  $(x', y', z', t')$  中应该是一样

的。<sup>①</sup>从 1909 年起，这些变换被称为伽利略变换。<sup>②</sup>（回忆一下，1905 年在纯力学领域内还没有什么证据有悖于伽利略不变性的普遍有效性。）如果把伽利略不变性提高为一个普遍原理，矛盾就出现了。绝对静止的以太几乎不可能满足这样的设想。于是一些物理学家认为，应该修正电动力学的基础。<sup>③</sup>爱因斯坦采纳这样的选择：“电动力学和力学现象都没有表现出什么与绝对静止相应的性质”[E1]。在 6 月论文中，他列举了两点具体理由：第一，不存在以太漂移的实验证据；第二，存在着“似乎本不是这些现象所固有的不对称性”。作为这种不对称的例子，他考虑了一个由磁体和导体组成的系统。当导体静止而磁体运动时，则产生一个电场，在导体内感应出电流。另一方面，当磁体静止而导体运动时，则产生一个（与  $v \times H$  成正比的）电动力，它也会感应出电流。更坦率地说，我们大概可以认为，爱因斯坦既不关心电与磁的逻辑矛盾，也不关心刚才所描述的两个坐标系之间的非对称关系。

我在第 6 章曾讲过，爱因斯坦拒绝了他认为既不令人信服，也极不自然的 19 世纪对以太漂移的一阶效应的解释，而二阶的迈克尔逊—莫雷疑难在某种程度上对他来说是次要的。另外他还指出：“麦克斯韦的电动力学——照目前通常的理解——一旦用于运动物体，便会产生本不是这些现象所固有的不对称性。”这样，他写 6 月论文的动机，我们就看清楚了：驱使爱因斯坦走向狭义相对论

<sup>①</sup> 像前一章那样，为简单起见，我只考虑  $x$  方向上的相对运动。

这个名词是弗兰克提出的 [F1]。

<sup>③</sup> 详细情况请参阅泡利为百科全书写的论文第三部分，德文本为 [P1]，英译本为 [P2]。

的主要动力是美学的追求，也就是简单性的追求。这种辉煌而执迷的信念，还会伴随他的一生，为他带来广义相对论的伟大成功，也将他引向统一场论的巨大失败。

2. 两个假设 新理论完全建立在两个假设 基础上 [E1]:

(1) 物理定律在所有惯性系中有相同的形式。

(2) 在任意给定的惯性系中，光速  $c$  总是一样的，而与发光体是否静止或匀速运动无关。

菲茨杰拉德和洛伦兹已经看到，迈克尔逊—莫雷实验的解释要求新的假设，这就是收缩假说。他们相信收缩是动力学效应（匀速运动着的杆的分子力不同于静态杆的情形），爱因斯坦修正了这种观念：杆的收缩是他两个假设的必然结果。而且，6月论文第一次正确指出了它的观察意义。

1905年的爱因斯坦，最迷人的地方在于他那么轻松、那么新鲜(*fraîcheur*)地引来了新思想。如果自由辐射由光量子组成，那么光的发射和吸收也应该是离散的；如果范特霍夫定律对溶液成立，那么它也应该对悬浮物成立；如果光速似乎与发光体的速度无关，那么为什么不干脆做这样的假设呢？这几步飞跃都是在冥思苦想之后迈出的，尽管最终的产物看起来，即使不能说是显然的，却也是非常容易的。

当然，最大的问题还是两个假设的相容性。关于这一点，爱因斯坦在1907年的回顾 [E3]中说过下面的话：“奇怪的是，为了克服这个我们第一次提到的困难 [即迈克尔逊—莫雷实验的结果，爱

我不逐字抄录爱因斯坦的原文。惯性系一词是在一段时间之后才流行起来的，伽利略不变性和洛伦兹不变性也一样，从现在起，我开始自由使用它们。

因斯坦的确是在 1907 年的论文里才第一次把它提出来]，足够精确地建立时间概念，看来就成为惟一必要的了，这就要求我们认识到，洛伦兹所引进的‘地方时’这个辅助性的量能够纯粹而简单地定义为‘时间’。”

有多少惯性系就有多少时间，这是 6 月论文中运动学部分的精神，不论在形式上还是内容上，它都代表着科学的最高成就。这些章节，所有科学家都该去读，哪怕他并不熟悉相对论，而只是为了从中获得享受（译者加的黑体）。我还觉得，这种运动学，包括速度加法定理，能够而且应该向中学生们讲授，把它作为一个发展路线的简单例子，看现代物理学是如何沿着这些路线远离日常生活直观的。<sup>①</sup>（如果在量子理论情形下，我也能向中学生推荐些什么，那该多好啊！……）

我来简单叙述一下新运动学的内容。<sup>②</sup> 在给定惯性系中的观察者 A 利用刚性杆根据（如爱因斯坦明确指出的）“欧几里得几何学”去测量他相对于原点的位置  $x_A$ 。第二个观察者 B 类似地确定  $x_B$ 。然后，在  $x_A$  的 A 钟通过光信号与在  $x_B$  的 B 钟校准。如果 A 钟与 B 钟同步而 B 钟同第三个观察者 C 的钟同步，那么 A 钟和 C 钟也同步。从而同步性就在任何一个惯性系内部完全确定了。

由于第二个假设，即使 B 和他的钟在公共惯性系中校准以后，开始相对于 A 做匀速运动，也就是 B 加入了另一个惯性系，用光信号为工具来比较 A 和 B 的钟也总是有效的。

<sup>①</sup> 例如，中学生可以去读玻恩（Born）的那本通俗而严密的精彩论述 [B1]。（中译本为《爱因斯坦的相对论》，彭石安译，贺准城校，河北人民出版社，1981 年。——译者）

<sup>②</sup> 更详细的内容请参见标准的教科书，如 [M1] 和 [P3]。

[说明 在 1921 年写的一篇未发表的手稿中, ①爱因斯坦照这样的推理又提出下面 3 个假设:(1)均匀性:杆和钟的性质既与它们的位置无关,也与它们的启动时刻无关,而只与它们的运动方式有关。(2)各向同性:杆和钟的性质与方向无关。(3)这些性质还与它们的经历无关。]

一个事件的时刻定义为与该事件重合并相对于它静止的时钟的读数,在一个惯性系中同时的事件,在另一个惯性系中则不是同时的。爱因斯坦举了个例子:两个相同的杆  $R_1$  与  $R_2$  在给定的惯性系中重合,系中的两个观察者  $O_1$  和  $O_2$  校准了各自的钟。观察者  $O_1$  和  $R_1$  留在这个惯性系中, $O_2$  随  $R_2$  运动进入另一个惯性系。测量 3 个时间间隔: $O_1$  测量光线从  $R_1$  的一端到另一端的往返时间  $t_1'$ , $O_2$  对  $R_2$  进行相同测量得到  $t_2$ 。观察者  $O_1$  还测量光线从  $R_2$  一端到另一端的往返时间  $t_1$ 。于是根据第一个假设  $t_1 = t_2$  但  $t_1 \neq t_1'$ ：“我们看到不能给同时性加上绝对的意义。”

只有加上测量位置和时间(从而也测量速度)的实验规定,这两个假设才有物理意义。这两个假设和那些规定一起才完全确立了爱因斯坦的狭义相对论。

3. 从假设到洛伦兹变换 我们还接着用两根杆的例子。如果不等式  $t_1 \neq t_1'$  不能用二者之间具体的关系来说明,物理学就是不完备的。爱因斯坦从他的假设导出洛伦兹变换,从而也得到了这个关系。他的论证过程大体如下:考虑两个惯性系  $(x, y, z, t)$  和  $(x', y', z', t')$  第二个以速度  $v$  沿  $x$  方向相对于第一个运动。 $t = t' = 0$  时,两个坐标系重合。此刻,一球面光波从公共原点发

① 这就是摩根手稿,第 9 章将说明它的来源。



出  $t$  秒后 扩展为球面

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad (7.2)$$

两个假设的一致性要求, 同一光波同样扩展为

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 = c^2 (t')^2 \quad (7.3)$$

这两个方程所蕴含的两组坐标之间的关系, 根据空间和时间的均匀性, 可假设为线性的。那么, 简单的计算给出

$$x' = \epsilon \gamma (x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \epsilon \gamma (t - vt/c^2) \quad (7.4)$$

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (7.5)$$

这里  $\epsilon$  是仅与  $v$  有关的任意比例因子。因为变换与逆变换之积应该是恒等变换, 我们有

$$\epsilon(v)\epsilon(-v) = 1 \quad (7.6)$$

对称性要求 从  $v \rightarrow -v$ ,  $y$  和  $z$  应该不变, 因此

$$\epsilon(v) = \epsilon(-v) \quad (7.7)$$

这样  $\epsilon(v) = 1$  [因为  $\epsilon(0) = 1$ ] 而且

$$x' = \gamma(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma(t - vx/c^2) \quad (7.8)$$

我们在第 6 章讨论洛伦兹和庞加莱的论文时, 曾遇到过方程 (7.4)–(7.8)。然而, 从第一原理导出洛伦兹变换 [方程 (7.8)] 第一次还是出现在爱因斯坦的论文中。<sup>①</sup>

爱因斯坦还指出, 方程 (7.8) 所表达的变换组成一个群, “wie dies sein muss” 正该如此:<sup>②</sup>沿同一方向的速度为  $v_1, v_2$  的相继两个变换, 产生一个形如方程 (7.8) 的以  $v$  为速度的新变换, 而  $v$  由

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2} \quad (7.9)$$

关于假设和观察在狭义相对论中的作用的有趣说明, 请参阅 [R1]。

② 对这句难以理解的话, 他没有展开来说明。

给出。

20 年后，爱因斯坦听说过一些有关洛伦兹变换的事情，令他大吃一惊。那时他正在莱顿。1925 年 10 月，乌伦贝克 (George Eugene Uhlenbeck) 和高德斯米特 (Samuel Goudsmit) 发现了电子的自旋 [U1]，从而解释了为什么碱金属会出现双谱线。但没过多久，他们就看到双谱线的分裂值不对。后来，托马斯 (Llewellyn Thomas) 补充了失去的因子 2，即现在我们知道的那个托马斯因子 [T1]。乌伦贝克告诉我，托马斯的著作第一次发表时，他一点儿也不明白：“我记得，当我头一回听说这件事情时，真有点不相信，相对性效应能给出因子 2 而不是  $v/c$  量级的什么东西……甚至相对论的鉴赏家们 (包括爱因斯坦!) 也大吃了一惊” [U2]。托马斯的工作进展依赖于这样的事实：以速度为  $\vec{v}_1$  的洛伦兹变换继以不同方向的速度为  $v_2$  的洛伦兹变换，并不能与以速度为  $v_1 + v_2$  的洛伦兹变换导出相同的惯性系 [K1]。(泡利费了几个星期才弄懂托马斯的意思。①)

4. 应用 爱因斯坦在 6 月论文里讨论了假设的应用，他的运用方法，至今还是标准的教科书内容。所以，以下内容都不谈推导过程 (爱因斯坦自己的推导过程，请见 [S1])。

- a) 从假设推导洛伦兹变换，已经谈过了。
- b) 从洛伦兹变换推导杆的菲茨杰拉德-洛伦兹收缩和时间膨胀：

$$\gamma l = l_0 \quad t = \gamma t_0 \quad (7.10)$$

这里  $l_0$  和  $t_0$  分别分别是静止参照系中的长度和时间间隔。

① 请参阅泡利、玻尔和克雷默 (Kramers) 1926 年 2 月 26 日至 3 月 12 日之间的通信 [P4]。

这些关系的运动学原因不是立刻就能普遍为人所理解的。1911年，爱因斯坦还不得不向大家解释：“洛伦兹收缩存不存在这个问题还很混乱。对随杆运动的观察者来说，这种收缩并不‘实际’存在，然而，静止的观察者可以在原则上对它加以说明。从这个意义上说，它又是‘实际’存在的”[E4]。

c) 速度的加法，也说过了。

d) 天顶光行差的相对论表述：

$$\operatorname{tg} \alpha = \gamma \frac{v}{c} \quad (7.11)$$

e) 光频率变换定律

$$\nu' = \gamma \nu (1 - v \cos \phi / c) \quad (7.12)$$

这里的  $\phi$  是频率为  $\nu$  的单色光线与  $x$  方向的夹角。于是，爱因斯坦从而发现了横向多普勒效应：即使光源沿垂直于观察者的方向运动， $\nu'$  也与  $\nu$  不同。1907年，他发表了一篇短小的笔记，讨论横向效应在实验上观测的可能性[E5]。

f) 在6月论文中没有菲涅耳公式

$$c' = \frac{c}{n} + v(1 - 1/n^2) \quad (7.13)$$

的推导。这是方程(7.9)的直接结果。令  $v_1 = c/n$ ,  $v_2 = v$  展开到  $v_1 v_2 / c^2$  的一阶项。我认为，6月论文不谈这个公式的推导，比它不提迈克尔逊和莫雷，更值得注意。爱因斯坦涉及到的别人的东西并不多，斐索实验对他的思想已经很重要了，而不借助以太就能成功导出拖曳公式，即使像爱因斯坦这样的

① 不同符号的意义请参阅 6a。爱因斯坦对色散介质的拖曳的评论，请参阅 [E5a]。

人也会感到满意的，虽然他不会表现自己。第一次导出这个公式的荣誉应该归于冯·劳厄 (Max von Laue) (1907 年)，他指出：“根据相对论原理，光完全被物体（即流动流体）所拖曳，但这只不过是因为它 [光] 相对于不随物体运动的观察者的速度，并不等于它相对于物体的速度与物体相对观察者的 [速度的] 矢量和” [L1]。我们在第 6 章已经说过，对于小的  $v/c$ ，可以通过动力学计算导出方程 (7.13)，而不用具体涉及相对论 [P5]。刚才说的运动学推导，并不意味着动力学计算是错误的，但那确是不必要的。洛伦兹不变性足以获得需要的结果。

- g) 爱因斯坦的确曾偶然地提到，如果两个校准的钟  $C_1$ 、 $C_2$  处在相同的初始位置，如果  $C_2$  离开 A 沿着封闭轨道运动，那么，当回到 A 时， $C_2$  相对  $C_1$  来说会变慢。他把这个结果称为定理，而与后来那个不恰当的词“时钟佯谬 (clock paradox)”没什么关系。事实上，正如爱因斯坦自己后来所提到的那样 [E6]，“因为是  $C_2$  而不是  $C_1$  经历了加速，从这个结果中不可能构造出理论基础的矛盾之处来。”
- h) 电动力学方程的协变性。爱因斯坦用了一些可怕但还不算稀奇的记号，电磁场的每个分量都有一个名字。<sup>①</sup> 他先对无源情况，然后对有源情况，证明了麦克斯韦方程的洛伦兹协变性。他还讨论了电荷为  $e$ 、质量为  $m$  的带电粒子在外加电磁场中的运动方程。在粒子处于瞬时静止的坐标系  $(\vec{x}, t)$  中，方程为

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = e \vec{E} \quad (7.14)$$

<sup>①</sup> 赫兹、普朗克和庞加莱采用的记号也差不多，而洛伦兹用三维矢量的语言。

运用变换 [ 方程 (7.8) ] 他发现在以速度  $v$  沿  $x$  方向运动的坐标系中 :

$$m\gamma^3 \frac{d^2 x'}{d(t')^2} = K'_x \quad m\gamma \frac{d^2 y'}{d(t')^2} = K'_y \quad m\gamma \frac{d^2 z'}{d(t')^2} = K'_z \quad (7.15)$$

$$\vec{K}' = e(\vec{E}' + \vec{v} \times \vec{H}'/c) \quad (7.16)$$

这样, 他得到了所谓洛伦兹力的“新表达方式”: 洛伦兹在 1895 年就作为一个新假设而引进了方程 (7.16)[ 参见方程 (6.13) ][L2], 而在这里, 爱因斯坦是根据作用在瞬时静止的带电粒子上的纯电力, 以运动学方法得到这个力的。对于加速度很小从而没有能量以辐射形式释放的情况, 他还写出了粒子动能  $W$  的表达式。在这种情况下,

$$W = \int K'_x dx' = m \int_0^v \gamma^3 v dv = mc^2(\gamma - 1) \quad (7.17)$$

他是这样来说明这个关系的: “当  $v = c$  时,  $W$  成为无限大。大于光速的速度……没有存在的可能。” [ 在 1907 年这一年间, 爱因斯坦就这个问题与维恩 (Wilhelm Wien) 通过信。 ]

[ 说明: 这个结论也许不那么确切。精确的说法是: 如果粒子在一个惯性坐标系中以低于 (高于)  $c$  的速度运动, 那么它在所有惯性系中都以低于 (高于)  $c$  的速度运动 ( 根据定义 惯性系之间的相对速度  $\leq c$  )。因此,  $c$  是两方面的速度极限。根据方程 (7.9),  $c$  是以亚光速 超光速 运动的粒子的上下限。有几个物理学家设想过“快子”(tachyons) 的特异性, 这个名字是费因伯格 (Gerald Feinberg) [F2] 为假想的超光速粒子起的。<sup>①</sup> 快子在我们日常生活的亚光速世界里, 只能成对地出现。快子物理学从而成为量子

<sup>①</sup> 例如 参见 [B2]; 关于早期的文献, 还可以参阅 [F2]。

场论的必要课题。自由快子的量子理论已经有了一定程度的进步 [F2]。关于快子的相互作用的理论描述，迄今还是一个悬而未决的问题。]

5. 相对论与量子理论 6 月论文有光能  $E$  的变换法则：

$$E' = \gamma E(1 - v \cos \phi / c) \quad (7.18)$$

[这里  $\phi$  与方程(7.12) 中的定义一样] 以及爱因斯坦关于这个方程与 (7.12) 的相似性的评论：“值得注意的是，光复合体的能量和频率按相同规律伴随] 观察者的运动状态而变化。”

三个月前，爱因斯坦完成的一篇论文 [E7] 中有光量子的能量与频率之间的关系：

$$E = h\nu \quad (7.19)$$

有趣的是：爱因斯坦声称  $E$  和  $\nu$  的变换的相似性值得注意，却不提他自己关于光的能量和频率的这个量子关系。大概这个关系在他头脑中也还是很新鲜的。这件事情尽管特别，我们还是能够讲清楚。我已经说过，爱因斯坦对麦克斯韦—洛伦兹方程的信念是坚定的，但不是无条件的，正如他在光量子论文中所指出的：“以空间变量的连续函数为工具的光的波动理论，已经表明它本身是描述纯粹光学现象的有效工具……[然而]可以想象，当我们把这个] 理论用到光的产生和转换时，可能会出现与实验的矛盾” [E7]。他认为，自由电磁场的麦克斯韦—洛伦兹理论真是太好了，“也许永远不会被其他理论所取代”；但在考虑光与物质的相互作用时，他又不能不怀疑这个理论。而且，他正确地感到，他 1905 年的光量子假说更大程度上是一种新的唯象的描述方法，还说不上是一个新理论；而相对论就大不相同了，他理直气壮地认为那是有着明确的第一原理的真正的理论。这样看来，他分别推导方程(7.12)

和(7.18)，而不求助于方程(7.19)，就不足为怪了。

不仅是在1905年在爱因斯坦的一生中，他都认为量子理论是通向未来的真正理论的第一步，而相对论则是通向那个真理的捷径。不过，这个话题要留到第26章再谈。

6. “我本可以说得更简单些” 1943年秋，爱因斯坦会见来访的博伊德(Julian Boyd)，博伊德当时是普林斯顿大学图书馆馆长，他来访的目的是请爱因斯坦把他的6月论文的手稿送给“书与作者战争债务委员会”(Book and Authors War Bond Committee)，作为对战争债务的一点贡献。爱因斯坦回答说，论文发表后，他就把原来的手稿扔了，但他又说，自己会写一个复本。博伊德欣然接受了。1943年11月21日，爱因斯坦写完了。在委员会协助下，手稿于1944年2月3日在堪萨斯(Kansas)市拍卖，由堪萨斯市妇女城市俱乐部和堪萨斯市战争财务委员会妇女分会负责。最后，堪萨斯市生命保险公司以650万美元竞买成交；同时爱因斯坦和巴格曼的“双矢量(Das Bi-Vektor Feld)”未完成手稿也以500万美元售出。<sup>①</sup>不久，两部手稿都送到了国会图书馆[B3]。

海伦·杜卡斯曾向我讲过6月论文的复本是怎么写出来的。爱因斯坦在写这篇论文时，她常坐在旁边向他口述内容。有一次，爱因斯坦放下笔，转身问她，他是不是真的说过她刚提示的东西。知道确实说过后，爱因斯坦说：“Das hätte ich einfacher sagen können。”<sup>②</sup>

<sup>①</sup> 这篇论文1944年出了英文版[E8]。

本小段标题：“我本可以说得更简单些”的德文原文。——译者

7b. 1905 年 9 月：关于  $E=mc^2$ 

“物体的质量是它的能量的量度”，这是伯尔尼专利局三级技术专家爱因斯坦在 1905 年 9 月得到的结果 [E9]。“质量守恒定律是能量守恒定律的一个特例”，这是二级技术专家爱因斯坦在 1906 年说的 [E10]。“关于惯性质量  $m$  相当于能量...  $mc^2$ 。这个结果异乎寻常地重要，因为 [它暗示着] 一个物理系统的惯性质量与物理能量是以等价的形式出现的”，1907 年他这么讲 [E11]。对于特殊情况，质量和能量的等价性在 25 年前就为人所知了。① 1905 年的创新在于这种联系的普遍性。

爱因斯坦 1905 年证明 关系

$$E=mc^2 \quad (7.20)$$

的过程如下：考虑静止于给定惯性系中的能量为  $E_i$  的物体，然后，物体沿与  $x$  轴成  $\phi$  角的方向发射能量为  $L/2$  的平面光波，在相反方向上也发射等量的光。发射以后，物体能量为  $E_f$ ，于是  $\Delta E = E_f - E_i = L$ 。在以速度  $v$  沿  $x$  方向运动的惯性系中考虑同样的情况，根据方程 (7.18)， $\Delta E' = E'_f - E'_i = \gamma L$  而与  $\phi$  无关，这样

$$\Delta E' = \Delta E = L(\gamma - 1) \quad (7.21)$$

或者，展开到二阶，

① 参见 7e 有关电磁质量的部分。也是在 1905 年 9 月以前，哈泽内尔 (Fritz Hasenöhr) 就发现小盒充满辐射时动能增加了，从而系统质量也以这种方式增加了 [H1]。

后来他又证明了两次。1934 年他在匹茨堡作吉布斯演讲，根据质点系统的能量和动量守恒在所有惯性系中成立，导出了方程 (7.20) [E12]。1946 年他又提出一个基本推导，其中假定了光行差和辐射压的方程 [E13]。



$$\Delta E' - \Delta E = \frac{1}{2} \left( \frac{L}{c^2} \right) v^2 \quad (7.22)$$

这时，爱因斯坦说，注意方程 7.21) 所示的能量差在结构上与方程 (7.17) 所示的粒子的动能差是一样的，那么，“如果物体以辐射形式释放能量  $L$  则它的质量减少  $L/c^2$ 。离开物体的能量变成辐射形式的能量，这个事实显然没什么奇怪的。”

在 1905 年 9 月的这篇短文最后，爱因斯坦指出：“那些能量可以大幅度变化的 [ 物体 ]，例如镭盐”，也许可以用来检验这个预言。但他自己也没把握。同年秋，他写信告诉哈比希特，“这个想法有趣又迷人，但我不知道亲爱的上帝会不会笑它，也许他已经欺骗了我” (... mich an der Nase herumgeführt hat) [E14]。在 1907 年的评论中，他认为，用镭来检验它并达到必要的精度，“当然是不可能的” [E15]。在 1910 年的另一篇评论里，他又指出，用实验来证实质能等价，“目前无论如何是没有希望的” [E16]。

所有这些情形中，爱因斯坦都认为质量的损失源于辐射转换。普朗克首先注意到，质能关系同结合能有关。1907 年他估算了与 1 摩尔水分子的结合能相当的质量 [P6] 结果之小 (大约  $10^{-8}$  g) 当然是观察不到的——但至少是能够计算的。四分之一世纪过后，人们才对原子核的结合能做出同样的估算。而即使在 1911 年提出原子核模型时，也没人考虑这个问题。两年后朗之万想：“在我看来 [核] 内能的惯性质量 由于存在着与普劳特定律的一定偏差而被证实了” [L3]。也是在那年，汤姆逊首次完成了同位素的分离。朗之万的有趣的想法没有考虑到同位素混合的影响，从而过高估计了原子核的结合效应。接着，混乱出现了，原子核被

想象为由质子和电子组成——但都还没有正确的结构。不过，泡利还是猜对了——这是 1921 年——他设想：“能量的惯性定律也许要等到将来某一天 [我用的黑体]通过对核稳定性的观察来证明”[P7]。1930 年，在一本当时的核物理权威著作中写着，我们可以根据  $\alpha$  粒子的结合能得出自由质子比束缚在氦核中的质子重 6.7MeV[R2]。用核的质子—电子模型，我们还能说些什么呢？

20 世纪 30 年代，人们才认识到原子核的结合能和它与  $E = mc^2$  的关系。1937 年，已经可以根据核反应来计算光速了，这里原始质量和最终产物的质量以及反应中能量的释放是已知的。结果得到的  $c$  值精确到 1.5% [B4]。当 1939 年爱因斯坦给罗斯福总统写那封著名的信时，我们可以想象，他也许会记得他 1907 年说过的话：“放射性过程是可以搞清楚的 在这个过程中 初始原子相当大的一部分质量转变成为各种形式的辐射，比镭的情况要多得多”[E15]。

## 7c. 早期反应

玛雅·爱因斯坦的传记对她的哥哥在其 6 月论文被《物理学纪事》接受后不久的心态，作了清晰的描绘：“这位年轻的学者想，他在这本著名的拥有大量读者的杂志上发表的论文，会立刻引起别人的注意。他期待着强烈的反对和严厉的批评。但他失望了。论文发表之后是冰冷的沉寂，接下来的几期杂志根本没有提他的文章。学术界在等待着、观望着。后来，柏林来信了，是著名的普朗克教授写的，他请阿尔伯特为他澄清几个他感到模糊的地方。

盼望已久的第一个回音终于来到了，他的文章真有人读过，年轻的科学家无比喜悦，因为他的工作已为当代最伟大的物理学家所承认了 [M2]。玛雅还说，后来，信件开始纷纷飞往“伯尔尼大学爱因斯坦教授”。

狭义相对论很快成为讨论和研究的课题，这在很大程度上应归功于普朗克最初的兴趣。他在科学自传里谈过自己为什么会那么强烈地为爱因斯坦的理论所吸引：“对我来说，它的迷人之处在于，我能从它的定理导出绝对的、不变的特征” [P7a]。在追求绝对——普朗克永恒的科学目标——的过程中，他发现了一个新焦点：“像量子理论中的作用量子一样，光速是相对论的绝对中心。”在 1905—1906 年冬季学期里，普朗克在柏林物理学研讨会上介绍了爱因斯坦的理论。他的讲话引起了助手冯·劳厄的注意。于是冯·劳厄成为又一名较早的相对论的信奉者。1907 年他发表了一篇讨论斐索实验的优美短文 [L1]，对狭义相对论做过一些漂亮的工作，还写出第一部相对论专著 [L4]。在 1906 年 9 月举行的一次科学会议上，普朗克也讨论了“Relativtheorie”的一些应用 [P8]。关于相对论的第一篇博士论文，也是在他的指导下完成的 [M3]。

据我所知，除爱因斯坦外，第一篇关于相对论的文章是普朗克发表的 [P6]。在他得到的那些新结果中，我首先提出他写出的动量-速度关系

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v} \quad (7.23)$$

变换法则

$$p'_x = \gamma \left( p_x - \frac{vE}{c^2} \right) \quad p'_y = p_y$$

$$p'_z = p_z \quad E' = \gamma(E - \frac{v p_x}{c^2}), \quad (7.24)$$

以及相对论质点力学的变分原理

$$\delta \int L dt = 0 \quad (7.25)$$

$$L = \gamma mc^2 \quad (7.26)$$

方程 (7.23) 是普朗克根据电磁场对带电质点的作用, 把方程 (7.15) 和 (7.16) 写成  $d(m\gamma\dot{x}')/dt' = \vec{K}'$  的形式而推导出来的。通过力学的能量-动量守恒定律对方程 (7.23) 的直接推导, 要等到 1909 年以后才能看到 [L5]。

其他一些关于相对论的早期论文, 我提一下埃伦费斯特 1907 年写的一篇 [E17], 他第一次提出如下的重要问题: 怎样将洛伦兹变换用于刚体?

普朗克还是第一个把相对论用于量子理论的人。他指出, 作用量不仅对质点力学 (这时它等于方程 (7.25) 中的  $\int L dt$ ) 而且普遍说来, 都是一个变量。他从这里得出他的常数  $h$  是一个相对论不变量。“显然, 因为这个定理, 最小作用量原理的意义又拓展了新方向” [P9]。爱因斯坦大概从他的方程 (7.13)、(7.18) 和 (7.19) 也得到过这个结论。

当初, 相对论也不只是理论家才关心的事。早在 1906 年, 实验家就已经对关系式

$$E = \gamma mc^2 \quad (7.27)$$

产生了兴趣: 这个关系对于  $\beta$  射线的总能量和速度还能成立吗? 这是我们将在 7e 讨论的问题。

1905 年相对论论文的发表, 标志着爱因斯坦开始结束他在专利局辉煌而孤独的工作。从 1906 年起, 常有人到伯尔尼来和他讨

论这个理论。冯·劳厄是最早的来客之一（也许还是第一个）。他后来回忆说：“迎接我的年轻人给我留下一种意想不到的印象，我简直不敢相信，他会是相对论之父” [S2]。<sup>①</sup> 别的年轻人也来过。劳博 (Johann Jakob Laub) 从维尔茨堡 Würzburg 来信问爱因斯坦，他能否来跟他工作 3 个月 [L6]；他真的来了。他们在伯尔尼完成了爱因斯坦的第一次合作论文 [E18, E19]。拉登堡 (Rudolf Ladenburg) 也从布勒斯劳 [Breslau, 现在的弗罗茨瓦夫 (Wrocław)] 来了，后来在普林斯顿他成了爱因斯坦的亲密朋友。然而，那时候相对论专家寥寥无几。1907 年 7 月，普朗克写信给爱因斯坦说：“只要相对论原理的倡导者们组成一个这样的小团体 那么，他们彼此的协调无疑是很重要的了” [P10]。

接着，在 1908 年，闵可夫斯基发表了《空间和时间》的演讲。1902 年，他在苏黎世当过爱因斯坦的老师，后来迁到哥廷根 (Göttingen) 大学。1907 年 11 月 5 日，他在那里举办了一个关于相对论的讨论会。在会中，他将洛伦兹变换等同于一个伪转动，在这种转动下，

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \text{ 是不变量, } x_4 = ict \quad (7.28)$$

这里  $x_1, x_2, x_3$  代表空间变量。在他的报告里，最重要的结果是，电流密度和电磁势一样，都是洛伦兹群的矢量，而电磁场强度则构成一个二阶张量 [或如闵可夫斯基那时称的  $T_{\text{tractor}}$  (拖拉机)]。此后不久，闵可夫斯基发表了详尽的论文 [M5]，第一次以现代张量形式提出了麦克斯韦—洛伦兹方程，也用相同的方法处理了质

<sup>①</sup> 去伯尔尼之前，劳厄曾去阿尔卑斯山登山旅行。爱因斯坦表达了这样的看法：“我想象不到，一个人怎么能在那里走来走去” [S3]。

点力学方程，而且，还从相对论观点讨论了牛顿引力理论的缺陷。像类空矢量、类时矢量、光锥和世界线等等术语，就是从这篇文章诞生出来的。

狭义相对论就这样开始了形式上的巨大简化。爱因斯坦当初并没受它的影响，还认为把他的理论转变成张量形式，完全是“überflüssige Gelehrsamkeit”（多余的知识卖弄）<sup>①</sup>。然而到了 1912 年，爱因斯坦也采用了张量方法。1916 年，他又感谢闵可夫斯基为狭义相对论向广义相对论的过渡提供了极大的方便 [E20]。

闵可夫斯基的半技术性报告，也就是他 1908 年在科隆 (Cologne) 的那个“空间和时间”的演讲。演讲开头是这样的：<sup>②</sup>“我想摆在你们面前的空间和时间的观点已经凭着它们的生命力从实验物理学的土壤里萌发出来了。它们都是根本性的东西。从现在起空间也好时间也好它们各自注定会像幻影一样消失而只有二者的某种统一还将保持独立的实在性。”最后他说，“我愿意认为世界假设即相对论的假设毫无例外的有效性是关于世界的电磁图景的真正核心，它由洛伦兹发现，又被爱因斯坦进一步揭示出来，现在看来已经豁然开朗了” [M6]。这一头一尾两段话在听众中激起了强烈反响，那是毫不奇怪的，尽管没有几个人跟得上他清晰的讲话内容。闵可夫斯基没有能够活着看到他的演讲的出版，1909 年因阑尾炎离开了人世。希尔伯特在纪念他时称他是“天国的礼物” [H2]。

大概从 1908 年以后，爱因斯坦在科学界声名鹊起。1909 年 7

这是爱因斯坦告诉巴格曼的，感谢巴格曼又告诉了我。

<sup>②</sup> 讲话内容是由索末菲准备的，1915 年发表 [M4]，那时闵可夫斯基已去世很久了。本文没有收入闵可夫斯基的文集 (1911 年出版) [M5]。

月，日内瓦大学授予“à Monsieur Einstein, Expert du Bureau Fédéral de la Propriété intellectuelle”联邦专利局专家爱因斯坦先生荣誉博士称号。我不知道他们是如何评价他的。不过，那时在日内瓦大学当实验物理学教授的居伊（Charles Guye）一定同这件事情有关。因为他的兴趣主要是在 $\beta$ 射线的能量与速度的依存关系上，可能正是由于这一缘故，爱因斯坦才因为相对论而接受了许多荣誉中的第一个荣誉博士称号。

1912年初，上一年度诺贝尔物理学奖获得者维恩写信给斯德哥尔摩，为本年度奖推荐了如下的候选人：<sup>①</sup>“我提议莱顿的洛伦兹和布拉格的爱因斯坦共享这个奖。至于我这么建议的动机，我愿提出以下的几点看法：相对论原理消除了存在于电动力学中的疑难，并且使预言运动系统的一切电磁现象成为可能，这些现象过去只对于静止系统才知道。”在列举了相对论的一些特征后，他继续说：“从纯粹的逻辑观点来看，相对论也一定可以认为是理论物理学所取得的最富意义的成就之一。至于这个理论的实验验证，这方面的情形类似于能量守恒定律的实验验证。[相对论]是在所有测定绝对运动的努力失败后，用演绎的方法得到的……同时，洛伦兹应该说是第一个发现相对论原理的数学表述的人，而爱因斯坦成功地将它归结到一个简单的原理。于是，我们应该承认两位探索者的功绩是同等的……”。

那时和以后，都常有一些狭义相对论的反对者。然而维恩的精彩论述表明，真正的支持者立刻就认识到这个理论构成了一次巨大的进步。

见第30章。

## 7d. 爱因斯坦与 1905 年后的狭义相对论

1907 年，爱因斯坦关于相对论的评述的第 5 节完成了，内容是讨论引力的，其中写道：“只要我们把自己限制在很小的光程范围内，光速不变性原理也能在这里 [ 即引力存在的情况下 ] 用来定义同时性” [E3]。那时他已经知道，狭义相对论不过只是一个开端（见第 9 章），这在很大程度上解释了为什么狭义相对论本身很快便从他的兴趣中消失了。而且，他也不是那种过分追求主要思想的技巧性结果的人。另外，从 1908 年到 1911 年的某个时候，占据他思想的是量子理论，而不是相对论（见第 10 章）。

除几篇评论和一般演讲外，爱因斯坦关于狭义相对论的结果的研究到 1909 年就结束了。我只想把他在 1905 年以后的有关这个课题的文章依年代顺序列出来。这项工作，泡利曾经讨论并整理过 [P1,P2]。

1906 关于狭义相对论中有心力运动的讨论 [E10]（关于这个问题的详细讨论，特别可以参阅 [M1]）。

1906 对在  $\beta$  射线实验中确定  $(1 - v^2/c^2)$  大小的可能性的评论 [E21]。

1907 对横向多普勒效应可观测性的评论 [E5]。

1907 对埃伦费斯特关于刚体疑问的简要评论：“目前刚体的运动学和动力学……必须认为是未知的” [E22]。

1907 爱因斯坦以前曾导出过动能的表达式  $mc^2(\gamma - 1)$  现在他将  $\gamma mc^2$  的形式引入总能量。而且，他还在外力存在的情况



下（即开放系统），导出了能量和动量的变换。<sup>①</sup>他又进一步考虑了刚体问题：“如果说相对论电动力学是正确的，那么，我们却远没有刚体转动的动力学” [E23]。在这篇文章里，爱因斯坦还就自己最近的光量子假说与自由麦克斯韦方程的有效性之间的关系，发表了意见。在他看来，只要在我们处理的问题中，电磁能的总量或能量的转移不是太小，这些方程就是可以应用的，正如只要布朗运动类型的效应（涨落）可以忽略时，我们就可以运用热力学一样。

1907 一篇评论 [E3]。这是从狭义相对论向广义相对论的过渡。文章所讨论的问题中，有几点是以前没有提过的：（1）关于封闭系统的总电荷是洛伦兹不变的说明；（2）对考夫曼（Kaufmann）的  $\beta$  射线实验的评论，这是下一节将要讨论的；（3）关于相对论热力学讨论。<sup>②</sup>

1908—1910 与劳博合作的关于有重介质的相对论电动力学的论文 [E18, E19]（参见 [P1] 或 [P2], 33, 35 节）。

关于这个问题的进一步评论，出现在 1909 年 [E25]。1910 年，爱因斯坦又发表一篇短文，讨论磁场中有质动力的非相对论定义 [E26]。

以上就是爱因斯坦后来在狭义相对论方面的工作的一个简目。他还在 1935 年 [E12] 和 1946 年 [E13] 两次以不同方法导出  $E=mc^2$ ，这一点已经说过了。另外，他还有几次谈到狭义相对论，最早是他第一次在物理学会议上的讲话 [E27]，然后是 1910 年

<sup>①</sup> 请参阅 [P1] 或 [P2], 43 节。

<sup>②</sup> 关于这个课题的工作，请参阅 [P1] 或 [P2], 46—49 节；也可以参阅 [E24]。对这些论文的相继而来的严厉批评，可以参阅 [O2]。因为这个课题到今天还存在着争议（例如，参阅 [L7]）还不适合做历史性评价。

[E28]、1911年[E29]、1914年[E30]、1915年[E31]和1925年[E32] 他的《相对论的意义》一书，当然也讨论了狭义相对论[E33] 他为报纸写的第一篇文章，大部分也在谈狭义相对论[E34]；他为有关的书写过评论，赞扬过布里尔（ Brill）[E35]、洛伦兹[E35]和泡利[E36]等人的著作。

到现在为止，我们已经从相对论在 19 世纪的先驱，谈到爱因斯坦的动机 他 1905 年的那篇论文和它的后续，还谈了这个新理论最初激起的反响。关于经典狭义相对论的进一步发展，我不想再更多地讨论了，它对现代物理学的影响，在帕诺夫斯基 [ P11 ] 和珀塞尔 ( Edward Purcell)[P12 ] 的文章里有过评价。

还有些未完成的事情，主要是有关爱因斯坦、洛伦兹和庞加莱的作用 我们将在第 8 章讨论。作为过渡，我们现在来考虑电磁质量的问题。

## 7e. 电磁质量：头 100 年<sup>①</sup>

很久以前，人们还不知道能量与惯性质量的等价是相对论假设的必然结果，也不知道这种等价适用于一切形式的能量，不知道分离的能量守恒和质量守恒定律会合成一个守恒定律，但还是曾经有过动力学而不是运动学的论证，也产生了电磁质量的概念，这是带电粒子在与它自身的电磁场相耦合的情况下明确产生出来的一种能量形式。我写这几句话时，电磁质量概念正好产生 100 年了。像亚伯拉罕、洛伦兹和庞加莱这些人对电子自能问题的考察，

① 本节有些材料以前曾发表在一篇关于电子理论的历史的文章中 [ P13]。

早就没什么意义了。所有从那时还留到现在的，就是我们对这个问题还不了解。

“关于这个电磁质量的问题，流体力学为它提供了一个简单的类比。”这是 1906 年初洛伦兹在哥伦比亚大学告诉大家的 [L8]。他考虑的问题是质量为  $m_0$  的完全光滑的球体以均匀的速度  $v$  在无限不可压缩的理想流体中运动。这种运动早在 1842 年就由斯托克斯分析过了 [S4]。斯托克斯证明系统的动能  $E$  和动量  $p$  分别是  $E=1/2mv^2$  和  $p=mv$  这里  $m=m_0+\mu$  参数  $\mu$  为感应质量或流体力学质量，依赖于球的半径和流体的密度。洛伦兹说的这个类比最早是 J. J. 汤姆逊提出的。汤姆逊 1881 年曾研究过“带电球体穿过充满介电常数为  $K$  的介质的无限空间 [的问题] ..... [对球的运动的] 阻力 ..... 必然相当于固体在理论上通过理想流体所受的阻力” [T2]。汤姆逊计算了低速系统的动能，发现它具有  $E=1/2mv^2$  的形式 这里  $m=m_0+\mu$ ：“充电的结果就像球的质量增加了一样 .....” 这样，他发现了电磁质量  $\mu$ ，虽然他没有给出这个名字。读者也许会乐意重复他的计算：将地球充电到不至于放电的最高电势时 计算它的  $\mu$  值。

洛伦兹在他的哥伦比亚演讲中接着指出：“当球在理想流体中运动的情况下，如果我们的实验仅限于测量作用于物体的外力和由它们产生的加速度，那么我们可能会确定有效质量  $[m_0+\mu]$  但不可能单独发现  $m_0$  和  $[\mu]$  的值。现在，重要的是，在电子运动的实验考察中，我们可以走得更远一些，这是因为电磁质量不是常数，而是随着速度增大的” [L8]。汤姆逊计算后不久，人们就清楚地看到，如果包括与  $v/c$  有关的效应，那么带电球的能量形式会远

比  $1/2mv^2$  复杂 (例如 参阅 [H3、S5、S6])。洛伦兹在讲话中提到的带电刚球的计算, 是亚伯拉罕 (Max Abraham) 在哥廷根进行的, 结果似乎被他的朋友 W. 考夫曼也在哥廷根做的实验所证实。<sup>①</sup>

考夫曼和亚伯拉罕的科学生涯都带有一些悲剧色彩。1897年考夫曼完成漂亮的阴极射线实验使他得到这样的结论: “如果我们貌似合理地假设运动粒子就是电离子, 那么  $e/m$  对每一种物质都该有不同的数值, 而它 [在电场和磁场中] 的偏移应该同电极的性质或 [阴极管中的] 气体的性质有关。事实并非如此。而且, 简单的计算表明, 为解释所观测到的偏移,  $e/m$  应为  $10^7$  但即使对氢气来说,  $[e/m]$  也只有大约  $10^4$ ” [K2]。如果考夫曼能在他1897年4月完成的论文里加上那么一句猜测性的话, 那他也会作为电子的独立发现者而为人们所纪念了。就在同月30日 J. J. 汤姆逊在皇家研究院关于阴极射线的演讲中, 讨论了他用与考夫曼极其相似的方法所获得的极其相似的结果, 但做出了相当果断的结论: “这些数字似乎支持这样的假设: 电荷的携带者要比氢原子小 [T3] 在我看来, 考夫曼的文章还是值得大家记住的, 尽管他缺乏汤姆逊那股勇气, 没有能够向新粒子的物理学冲出最后一步。

至于亚伯拉罕, 他是一位很有才华的理论物理学家 (爱因斯坦在1914年离开 ETH 去柏林时, 还特别考虑他继任自己的职位), 但命运却使他在狭义相对论和广义相对论方面跟爱因斯坦发生争论——而在这两件事情上, 他都失败了。在第13章我们还会碰到

① 这件事详见 [G1]。

他。

现在回来谈电磁质量的问题。考夫曼第一个从实验上研究了电子的能量-速度关系。1901年,他为此写了篇论文,题为“贝克勒尔射线即 $\beta$ 射线]的电磁偏转和电子的表观质量”[K3]。在这些研究的激发下,亚伯拉罕不久就在将电子考虑为电荷为 $e$ 、半径为 $a$ 而且在均匀的电荷分布的刚性球情况下,得到了电子的电磁能量( $E_{\text{elm}}$ )和电磁动量( $p_{\text{elm}}$ )的完整答案( $\beta=v/c, \mu=2e^2/3ac^2$ ):

$$E_{\text{elm}} = \frac{e^2}{2a} \left( \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right) \approx \frac{e^2}{2a} + \frac{1}{2} \mu v^2 + \dots \quad (7.29)$$

$$p_{\text{elm}} = \frac{e^2}{2ac\beta} \left( \frac{1+\beta^2}{2\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right) \approx \mu v + \dots \quad (7.30)$$

1902年9月,在卡尔斯巴德(Karlsbad)召开的第74届自然研究者会议(Naturforscherversammlung)上,考夫曼提出了他最新的实验结果[K4]。亚伯拉罕紧跟着报告了自己的理论[A1]。考夫曼最后说:“[ $E$ 对 $v$ 的]依赖关系由亚伯拉罕的公式精确地表达出来了。”亚伯拉罕说:“现在看来,有必要从一开始就把电子的动力学建立在电磁思想的基础上”(关于这种刚性电子,1903年他发表了一篇重要的详尽的文章[A2])。现在,我们明白洛伦兹在哥伦比亚演说中的意思了:如果 $E-v$ 关系将而且能从实验上证实真的由方程(7.29)所表达,那么我们将知道两件事情:电子是小刚球,而它的质量纯粹来自电磁源。

那时的情况大概就是这样。1904年,洛伦兹提出一个新模型:静止的电子还是一个小球,但它服从菲茨杰拉德-洛伦兹收缩[L9]。从这个模型得到与方程(7.29)和(7.30)不同的速度关系:

$$E_{\text{elm}} = \gamma \mu_0 c^2 \left( 1 + \frac{\beta^2}{3} \right) \approx \mu_0 c^2 + \frac{1}{2} \mu_1 v^2 + \dots \quad (7.31)$$

$$p_{\text{elm}} = \gamma \mu v \approx \mu v + \dots \quad (7.32)$$

这里,  $\mu_0 = 3\mu/4$ ,  $\mu_1 = 5\mu/4$ ,  $\mu$  与方程(7.29)和(7.30)中的相同。洛伦兹知道考夫曼的结果和它与亚伯拉罕理论的一致性, 于是他指出, 他的方程也应该“基本上是[一致]的……如果我现在提出的理论不会有什么严重疑难的话。”他还用了一些数据来符合他的理论, 使他最后感到没有什么可以忧虑的事情。

为弄清洛伦兹的方程(7.31)和(7.32)以及庞加莱后来为修正这些结果而提出的建议, 我们先暂时抛开事件的历史过程, 而根据电磁能量-动量密度张量  $T_{\mu\nu}$  的变换性质来导出洛伦兹的结果 [P13] 借助这个张量, 我们可以写出 (在闵可夫斯基度规下)  $\textcircled{1}$ :

$$E_{\text{elm}} = \int T_{44} d\vec{x} = \gamma \left[ \int T_{44}(0) d\vec{x}_0 - \beta^2 \int T_{11}(0) d\vec{x}_0 \right] \quad (7.33)$$

$$P_{\text{elm}} = -\frac{i}{c} \int T_{44} d\vec{x} = \frac{\gamma v}{c^2} \left[ \int T_{44}(0) d\vec{x}_0 - \int T_{11}(0) d\vec{x}_0 \right] \quad (7.34)$$

这里“0”指静止坐标系。因为  $T_{\mu\nu}$  的迹为 0 而静止坐标系是空间各向同性的, 这些变换关系立刻就产生方程(7.31)和(7.32)。

产生电磁质量概念的是动力学论证, 而不是运动学论证; 促使庞加莱修正洛伦兹模型的也是动力学论证而不是运动学论证。在 1905 年 6 月发表的一篇短文中, 庞加莱宣布: “通过假设可变形可压缩的电子受着一种其大小正比于体积变化的恒定外加压力的作用, 我们就可以得到……一个可能的关于电子收缩的解释” [P14]。在 1905 年 7 月的文章里他又说: “那种压力正比于电子的实验质量的 4 次方” [P15] 在第 6 章, 我讨论过这两篇论文的

我们仍然假定为电子在  $x$  方向上的运动。方程(7.33)和(7.34)于 1911 年由劳厄首次发表 [L10]。

运动学部分。而对庞加莱来说，更重要的是动力学部分，也就是“关于电子收缩的解释”那部分。两篇文章都叫“论电动力学”并不是随便叫的。

庞加莱的动力学问题，用现代的语言可以这样说：我们能否从相对论不变的作用量原理出发，导出洛伦兹电子和它自身的场的方程，并证明静止的球状电子在以洛伦兹所假定的方式匀速运动时会变成椭球体？庞加莱先证明这是可能的，而后却又从中走了出来：“如果希望保留洛伦兹理论而避免那些令人难以忍受的矛盾，那么，我们必须假设一种特殊的力，它既能解释〔运动方向上的〕收缩也能解释另外两个轴方向上的不变”〔P15〕。

借助  $T_{\mu\nu}$ ，可以把彭加勒的长篇论证简化为以下的几行。把方程 (7.31) 写成

$$E_{\text{elm}} = \gamma\mu c^2 - PV \quad (7.35)$$

这里  $V = 4\pi a^3 / 3\gamma$  是电子（收缩后）的体积， $P = 3\mu c^2 / 16\pi a^3$  是标量压力。给  $T_{\mu\nu}$  加一项“彭加勒张力”  $\rho P \delta_{\mu\nu}$ ，这里在电子内部  $\rho = 1$ ，而在外部为 0，这一项对所有速度来说，都将  $E_{\text{elm}}$  中的  $-PV$  项消去了，它对  $p_{\text{elm}}$  没有贡献，但可以靠它获得我们希望的收缩。彭加勒又更进一步假设，电子质量纯粹是电磁质量，那么  $\mu \sim e^2/a$ ，而  $P \sim \mu/a^3 \sim \mu^4$ ，这正是他以前提到的结果。再用现代语言来说，外加的张力使有限的电子进入一个封闭系统。庞加莱没有认识到，从他的模型中产生出来的关系

$$E_{\text{elm}} = \gamma\mu c^2 \quad p_{\text{elm}} = \gamma\mu v \quad (7.36)$$

是多么令人满意！（关于庞加莱的推理过程的详细讨论，请参阅〔M7〕。）

下面我们该回来说考夫曼了。在这些新理论发展的激励下，

他精简了实验并在 1906 年宣布了新结果：“测量 [数据] 和洛伦兹—爱因斯坦假设不一致。亚伯拉罕方程与布赫雷尔方程 很好地表示了这些观测结果……”[K5]。

这些结论震惊了理论家。普朗克在 1906 年的一次物理学会议上讨论了自己对考夫曼数据的再分析 [ P16]，他没有发现什么问题，只好在旁观望。1908 年的庞加莱也是如此 [ P17]。洛伦兹动摇了：那些实验“肯定对我努力得到的那种收缩观点不利。不过，尽管我们很可能会完全抛弃这个观点，但是我想，它还是值得更深入地研究下去的……”[ L12 ]。爱因斯坦却岿然不动：“考夫曼先生以令人钦佩的细心，确定了  $\beta$  射线的 [电和磁的偏转之间的] 关系……普朗克先生用自己独立的方法得到与考夫曼 [计算] 完全一致的结果……更值得注意的是，亚伯拉罕和布赫雷尔的理论产生的曲线比从相对论得到的更好地符合了实验观察曲线。然而，在我看来，这些理论 [成功] 的可能性应该说是很小的，因为它们关于运动电子质量的基本假设，没有被包容了更广泛的复杂现象的理论体系所证明” [E3]。这些话没写多久，布赫雷尔就得到了  $E = m\gamma c^2$  的实验证据 [B7]。闵可夫斯基高兴了，他说，把刚性电子引入麦克斯韦理论，就像用棉花塞住耳朵去听音乐会 [ M8]。但是，这个观点还有些争议。维恩在 1912 年初给诺贝尔委员会的信中指出：“至于阴极射线和  $\beta$  射线的新实验，我认为它们不会有什么决定性的证明力量。这些实验太微妙，谁也不能担保是不是

① 布赫雷尔 (Alfred Bucherer) [ B5] 和朗之万 [ L11] 独立提出了一个更普遍的电子模型 有菲茨杰拉德—洛伦兹收缩，但同时也有不变的体积。关于这个模型，庞加莱 [ P15] 和埃伦费斯特 [E37] 曾有过进一步分析。1908 年 布赫雷尔告诉爱因斯坦 他的实验已使他放弃了自己支持相对论预言的模型 [B6]。



所有的误差来源都消除了。”最终支持相对论的实验判决是在 1914—1916 年完成的。<sup>①</sup>

狭义相对论捣碎了通过粒子的能量—动量—速度关系去探讨粒子质量的动力学起源的传统梦想。这些关系都是纯运动学的。粒子作为有限小球的经典图景也一去不复返了。量子场论告诉我们，粒子无论如何是有结构的，这些结构来自量子涨落。最近，统一场论也告诉我们，电子的质量本质上当然不会是纯电磁学的。

但是我们还不知道，电子的重量是由什么引起的。

#### 参考文献

- A1. M. Abraham, *Phys. Zeitschr.* **4**, 57 (1902).  
 A2. —, *AdP* **10**, 105 (1903).  
 B1. M. Born, *Die Relativitätstheorie Einsteins*. Springer, Berlin, 1921.  
 Translated as *Einstein's Theory of Relativity* (H. L. Brose, Tran.).  
 Methuen, London, 1924.  
 B2. O. M. Bilaniuk, V. K. Deshpande, and E. C. G. Sudarshan, *Am. J. Phys.* **30**, 718, (1962).  
 B3. F. E. Brasch, *Library of Congress Quarterly* **2** (2), 39 (1945).  
 B4. W. Braunbeck, *Z. Phys.* **107**, 1 (1937).  
 B5. A. H. Bucherer, *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie*  
 pp. 57–58. Teubner, Leipzig, 1904.  
 B6. —, letters to A. Einstein, September 7, 9, and 10, 1908.  
 B7. —, *Phys. Zeitschr.* **9**, 755 (1908).  
 E1. A. Einstein, *AdP* **17**, 891 (1905).  
 E2. —, letter to C. Habicht, spring 1905, undated.  
 E3. —, *Jahrb. Rod. Elektr.* **4**, 411 (1907).

关于 1918 年以前的详尽的实验文献，请参阅 [P1 或 P2] 的 29 节。

- E4. —, *Phys. Zeitschr.* **12**, 509 (1911).
- E5. —, *AdP* **23**, 197 (1907).
- E5a. —, *Astr. Nachr.* **199**, 7, 47 (1914).
- E6. —, *PAW*, 1916, p. 423; *Naturw.* **6**, 697 (1918).
- E7. —, *AdP* **17**, 132(1905).
- E8. — and V. Bargmann, *Ann. Math.* **45**, 1 (1944).
- E9. —, *AdP* **18**, 639 (1905).
- E10. —, *AdP* **20**, 627; footnote on p. 633 (1906).
- E11. —, [E3], p. 442.
- E12. —, *Bull. Am. Math. Soc.* **41**, 223 (1935).
- E13. —, *Technion J.* **5**, 16 (1946).
- E14. —, letter to C. Habicht, fall 1905, undated.
- E15. —, [E3], p. 443.
- E16. —, *Arch. Sci. Phys. Nat.* **29**, 5, 125 (1910), see esp. p. 144.
- E17. P. Ehrenfest, *AdP* **23**, 204 (1907).
- E18. A. Einstein and J. J. Laub, *AdP* **26**, 532 (1908); corrections in *AdP* **27**, 232 (1908) and 28, 445 (1909).
- E19. —, —, *AdP* **26**, 541 (1908).
- E20. —, *Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*, introduction. Barth, Leipzig, 1916.
- E21. —, *AdP* **21**, 583 (1906).
- E22. —, *AdP* **23**, 206 (1907).
- E23. —, *AdP* **23**, 371 (1907).
- E24. —, *Science* **80**, 358 (1934).
- E25. —, *AdP* **28**, 885(1909).
- E26. —, *Arch. Sci. Phys. Nat.* **30**, 323 (1910).
- E27. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 817 (1909).
- E28. —, *Arch. Sci. Phys. Nat.* **29**, 5, 125 (1910).
- E29. —, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **56**, 1 (1911).
- E30. —, *Scientia* **15**, 337 (1914).
- E31. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.), Vol. 1, p. 251. Teubner, Leipzig, 1915.

- E32. —, [E31], 2nd edn., Vol. 1, p. 783.
- E33. —, *The Meaning of Relativity*; 5th edn. Princeton University Press, Princeton, N. J., 1956.
- E34. —, *Die Vossische Zeitung*, April 26, 1914.
- E35. —, *Naturw.* **2**, 1018 (1914).
- E36. —, *Naturw.* **10**, 184 (1922).
- E37. P. Ehrenfest, *Phys. Zeitschr.* **7**, 302 (1906).
- F1. P. Frank, *Sitz. Ber. Akad. Wiss. Wien. IIa*, **118**, 373 (1909), esp. p. 382.
- F2. G. Feinberg, *Phys. Rev.* **159**, 1089 (1967); **D17**, 1651 (1978).
- G1. S. Goldberg, *Arch. Hist. Ex. Sci.* **7**, 7 (1970).
- H1. F. Hasenöhl, *AdP* **15**, 344 (1904); **16**, 589 (1905).
- H2. D. Hilbert in H. Minkowski, *Ges. Abh.* (see [M5]), Vol. 1. p. xxxi.
- H3. O. Heaviside, *Phil. Mag.* **27**, 324 (1889).
- K1. H. A. Kramers, *Quantum Mechanics* (D. ter Haar, Tran.), Sec. 57. Interscience, New York, 1957.
- K2. W. Kaufmann, *AdP* **61**, 545 (1897).
- K3. —, *Goett. Nachr.*, 1901, p. 143.
- K4. —, *Phys. Zeitschr.* **4**, 54 (1902).
- K5. —, *AdP* **19**, 487 (1906).
- L1. M. von Laue, *AdP* **23**, 989 (1907).
- L2. H. A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der Electricischen and Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*. Brill, Leiden, 1895. Reprinted in *Collected Papers*, Vol. 5, p. 1. Nyhoff, the Hague, 1937.
- L3. P. Langevin, *J. de Phys.* **3**, 553 (1913).
- L4. M. Laue, *Das Relativitätsprinzip*. Vieweg, Braunschweig, 1911.
- L5. G. N. Lewis and R. Tolman, *Phil. Mag.* **18**, 510 (1909).
- L6. J. J. Laub, letter to A. Einstein, February 2, 1908.
- L7. P. T. Landsberg, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 149 (1980).
- L8. H. A. Lorentz, *The Theory of Electrons*, p. 40. Teubner, Leipzig, 1909.
- L9. —, *Proc. R. Ac. Amsterdam* **6**, 809 (1904); *Collected Papers*, Vol.

- 5, p. 172.
- L10. M. von Laue, *AdP* **35**, 124 (1911).
- L11. P. Langevin, *Rev. Gén. Sci.* **16**, 257 (1905).
- L12. H. A. Lorentz, [L8], p. 213.
- M1. C. Møller, *The Theory of Relativity*, Chap. 2. Oxford University Press, Oxford, 1952.
- M2. Maja Einstein, *Albert Einstein, Beitrag für sein Lebensbild*, Florence, 1924, unpublished.
- M3. K. von Mosengeil, *AdP* **22**, 867 (1907). Reprinted in Planck, *Abhandlungen*, Vol. 2, p. 138.
- M4. H. Minkowski, *AdP* **17**, 927 (1915).
- M5. —, *Goett. Nachr.*, 1908, p. 53. Reprinted in *Gesammelte Abhandlungen von Herman Minkowski*, Vol. 2, p. 352. Teubner, Leipzig, 1911.
- M6. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 104 (1909); *Ges. Abh.*, Vol. 2, p. 431.
- M7. A. I. Miller, *Arch. Hist. Ex. Sci.* **10**, 207 (1973).
- M8. H. Minkowski, *Phys. Zeitschr.* **9**, 762 (1908).
- O1. T. Ogawa, *Jap. St. Hist. Sci.* **18**, 73 (1979).
- O2. H. Ott, *Z. Phys.* **175**, 70 (1963).
- P1. W. Pauli, *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*, Vol. 5. Part 2, p. 539. Teubner, Leipzig, 1921.
- P2. —, *Theory of Relativity* (G. Field, Tran.). Pergamon Press, London, 1958.
- P3. W. K. H. Panofsky and M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism*, Chap. 15. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1955.
- P4. W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, Vol. 1, pp. 296 — 312. Springer, New York, 1979.
- P5. See e. g., [P3], Chap. 11.
- P6. M. Planck, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **4**, 136 (1906); see also PAW, 1907, p. 542; *AdP* **26**, 1 (1908).
- P7. W. Pauli, [P1] or [P2], Sec. 41.
- P7a. M. Planck, *Wissenschaftliche Selbstbiographie*. Barth, Leipzig, 1948. Reprinted in M. Planck, *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*,

- Vol. 3, p. 374. Vieweg, Braunschweig, 1958.
- P8. —, *Phys. Zeitschr.* **7**, 753 (1906); *Abhandlungen*, Vol. 2, p. 121.
- P9. —, [P6], Sec. 12.
- P10. —, letter to A. Einstein, July 6, 1907.
- P11. W. K. H. Panofsky in *Proc. Einstein Centennial Symposium at Princeton*, 1979, p. 94. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
- P12. E. M. Purcell, [P11], p. 106.
- P13. A. Pais in *Aspects of Quantum Theory* (A. Salam and E. P. Wigner, Eds.), p. 79. Cambridge University Press, Cambridge, 1972.
- P14. H. Poincaré, *C. R. Ac. Sci. Paris* **140**, 1504 (1905); *Oeuvres de Henri Poincaré*, Vol. 9, p. 489. Gauthier-Villars, Paris, 1954.
- P15. —, *Rend. Circ. Mat. Palermo* **21**, 129 (1906); *Oeuvres*, Vol. 9, p. 494; see esp. Sec. 8.
- P16. M. Planck, *Phys. Zeitschr.* **7**, 753 (1906); *Abhandlungen*, Vol. 2, p. 121.
- P17. H. Poincaré, *Rev. Gén. Sci.* **19**, 386, 1908; *Oeuvres*, Vol. 9, p. 551.
- R1. H. P. Robertson, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 378 (1949).
- R2. E. Rutherford, J. Chadwick, and C. D. Ellis, *Radiations From Radioactive Substances*, p. 531. Cambridge University Press, Cambridge, 1930.
- S1. A. Sommerfeld, Ed., *The Principle of Relativity*, p. 37. Dover, New York.
- S2. Se, p. 130.
- S3. Se, p. 131.
- S4. G. G. Stokes, *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 1, p. 17. Johnson, New York, 1966.
- S5. G. Searle, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **187**, 675 (1896).
- S6. A. Schuster, *Phil. Mag.* **43**, 1 (1897).
- T1. L. H. Thomas, *Nature* **117**, 514 (1926); *Phil. Mag.* **3**, 1 (1927).
- T2. J. J. Thomson, *Phil. Mag.* **11**, 229 (1881).
- T3. — in *The Royal Institute Library of Science, Physical Sciences*, Vol.

5, p. 36. Elsevier, New York, 1970.

U1. G. E. Uhlenbeck and S. Goudsmit, *Naturw.* **13**, 953 (1925).

U2. —, *Phys. Today* **29** (6), 43 (1976).

## 第 8 章 历史的边缘

1. 一种新的思维方式 1922 年 4 月 6 日，法国哲学学会 Société Française de Philosophie，由庞加莱帮助建立）召集了一次关于狭义相对论和广义相对论的讨论会。参加会议的有数学家嘉当（Elie Cartan）、阿达玛（Jacques Hadamard）、潘勒韦（Paul Painlevé），物理学家贝克勒尔（Jean Becquerel）、爱因斯坦、朗之万和哲学家柏格森、布伦斯维格（Léon Brunschvicg）、勒鲁瓦（Edouard LeRoy）和迈耶逊（Emile Meyerson）。讨论中，柏格森表达了他对爱因斯坦工作的欣赏：“[在他的工作中]，我不仅看到了新物理学，而且，在某些方面，我还看到了一种新的思维方式”[B1]。

狭义相对论带来了一种新的哲学思维模式，激起了新打油诗的涌现，比如那首有关来自怀特（Wight）女郎的诗。<sup>①</sup>然而，这一理论首先还是为物理学本身带来了一种新的思维方式。说它新，是因为它要求对长期统治着古典时代的物理学和化学的概念进行修正。在物理学中，它的巨大新奇性首先在于，对空间距离和时间间隔的测量记录，比以前认为必要的更具体、更精确。其次，经典力学的经验仅在  $v \ll c$  的极限情况下才成立。在化学中，它的新

相对论诞生时，出现过不少有趣的打油诗。例如，说收缩效应的：“斐克小伙剑术精，出刺迅捷如流星。由于空间收缩性，长剑变成小铁钉。”还有写光速极限的：“年轻女郎名伯爵，神行有术光难追；爱因斯坦来指点，今日出游昨夜归。”[这两首诗见盖莫夫（George Gamow）的《从一到无穷大》]——译者

奇性在于，拉瓦锡的质量守恒定律和道尔顿关于简单重量比的定律只是近似成立，但这种近似程度之高，并不要求普通化学有明显的改变。这样，相对论将牛顿力学和经典化学变成近似的科学，在这个过程中，它没有清除它们，而是更好地界定了它们。

今天看来，这些修正并没产生什么危害，而且很容易讲清楚。对爱因斯坦来说，它们的出现尽管相当突然，但却只有在经过多年不成功的思索之后才能得出来的结果。他的假设，一旦孕育成熟，对他而言就成为显而易见的了。当我同他谈这段转变时期时，他对自己总是漫不经心的。他常把狭义相对论的诞生说成是“den Schritt’ 行动。

洛伦兹和庞加莱的情况就大不一样了。他们也都在与同样的问题作艰苦的斗争，而且已经向着他们自己的解迈出了重大的步伐，在这个过程中逐渐形成了深刻的见识，但谁也没有迈出突破性的最后几步。在后来的岁月里，爱因斯坦、洛伦兹、庞加莱三人对狭义相对论的反应，都有些令人奇怪。总的说来，我们奇怪，为什么爱因斯坦那么不情愿承认迈克尔逊—莫雷实验对他思想的影响？为什么洛伦兹从不完全放弃以太？为什么庞加莱从不理解相对论？这些问题，把我们引向了历史的边缘。

从历史的边缘这个词，人们会自然地认为，它的使用者对什么是历史有着清晰的认识和明确的定义，可惜这样想是错的。历史是处理发生在过去的事情。一个时期的历史，是在从信息海洋中挑选出来的典型时间和事实的基础上对那个时期的一种说明，完全可以说，这种说明是不完全的。选择因素是必要的，但它不可避免地也是主观的。因此，我们不能说一段时期的历史本身。我们可以说一个历史学家肯定错了，但却常常说不准他是不是对的。



这一点是很清楚的。此外，如果我们不满足于——这是应该的——了解发生了什么，还希望更进一步知道“它”是如何发生的，那么，关于那些被挑选出来的时间与事实的知识，虽然必需，却还不够。在科学发现的历史过程中，下面这些问题是很吸引人的：为什么 A 创立了他所提出的理论？为什么 B 很快就接受 A 的理论？为什么 C 反对 A 的新观点？在我沉溺于理论物理学的许多年里，对于 A 的创造、B 的接受和 C 的反对，都曾见识过。尽管他们的东西也许不像相对论那么重大，我还是常常感到很难回答刚才提出的那些问题。无论在科学还是其他领域，创造、接受和反对，都是一些普遍的行为和态度。关于他们的那些“为什么”只有在我们认识了 A、B、C 的思想活动以后才能把握。谁能说他是否知道这些呢？

然而，在找不到 A-B-C 问题的答案或者仅能猜想一个有趣的答案时，问题自身的真伪也不一定是肯定的。再回到爱因斯坦、洛伦兹和庞加莱，我提出的关于他们的问题，是我耐心读完他们的文章以后发现的，因此，这些问题本身是从历史记录中提取出来的，我想，说它们是历史的一部分，也算不上过分。但它们的答案在我看来，似乎却是超越历史的。在问题与答案之间的某个地方，就是历史的边缘。这样，我就比历史本身更精确地定义了我所谓的历史的边缘。在下面，我有时也会对答案进行一些超越历史的思索。

不过，我们还是先来看几个事实。

2. 爱因斯坦与文献 1907 年爱因斯坦应斯塔克的邀请为《放射性与电子学年鉴》(*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*) 写了一篇文章 [E1]。斯塔克是这套丛书的发起人和编辑，

爱因斯坦答应他写篇相对论综述。在给斯塔克的信中，他说：“应该指出，很不幸我没能向自己指明已经发表过的有关的每件事情，因为在我有空的时候，图书馆总是关着的。除我自己的文章外，我还知道一篇洛伦兹的（1904年），一篇科恩的，一篇莫森盖尔（Mosengeil）的和两篇普朗克的。<sup>①</sup>如果您能向我指出更多的您知道的相关的出版物，我将非常感激’[E2]。<sup>②</sup>这封信和早些时候给贝索的信[E3]表明，对这位专利局的年轻人来说，文献是很难看到的。斯塔克在回信中提到了普朗克、冯·劳厄和他自己的工作，又说：“除了这些和你自己提到的那些，我也不知道别的还有什么”[S1]。这样，爱因斯坦和斯塔克都不知道庞加莱1905年7月完成1906年发表在《巴勒莫数学会刊》（*Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*）上的关于相对论的长篇论文[P1]。1907年11月5日，闵可夫斯基在哥廷根数学协会的一次演讲中提到过这篇文章[M1]。因此可以肯定，这篇文章在1907年12月已经流传开了，这时爱因斯坦已写完了综述。1908年3月，爱因斯坦进而对综述进行了补正和说明[E4]。然而，无论如何，特别是从爱因斯坦与斯塔克的通信来看，我找不到什么根据可以认为爱因斯坦在1907年知道庞加莱的文章并故意忽略它。

不过，我相信，爱因斯坦对他获得书籍和杂志的困难的抱怨无疑是真的，但这对于我们了解他对现有文献的掌握情况，却是次要的。事实上，他对文献向来不太关心。例如，我们看他在1906年发表的一篇文章的引言中写些什么：“在我看来，下面要谈的有些

① 所有这些文章，在6、7两章里我们都提到过。

② 这封信发表在赫尔曼的一篇文章里[H1]。

③ 见7c。

部分可能会已经被别的作者澄清了。然而，我在这里考虑的问题要在一种新观点下进行处理，从这个事实来看，我相信用不着去查找文献，它会令我厌烦，而特别是因为其他作者很有可能来弥补这一不足，正像第一篇相对论原理论文出现时，普朗克先生和考夫曼先生 [ 为它 ] 做的值得赞美的工作一样” [E5]。<sup>①</sup> 如果说高傲是而且只能是不安的标志，那么这些话是算不上高傲的，在我看来，它表达了一种豪情和完全的自信，而且明显地表现出，爱因斯坦对文献没多大兴趣。<sup>②</sup>

到 1908 年，爱因斯坦还不知道庞加莱关于相对论的专门论文。我在 6b 说过，1905 年时，爱因斯坦已经读过庞加莱的《科学与假设》，庞加莱在书中猜想地球相对于以太的运动在  $v/c$  的任何数量级上都是不可测定的，并且对同时性的朴素的用法提出了批评。然而，我们不能说爱因斯坦 1905 年 6 月的论文在任何技术意义上都依赖于庞加莱的重要意见。别的人如果也处于爱因斯坦的位置，他可能首先就会提到庞加莱。但是，在我看来，爱因斯坦在 1905 年没有什么理由一定要这么做。我马上会来讲，爱因斯坦后来关于庞加莱会说些什么。这里我要指出，庞

<sup>①</sup> “Es scheint mir in der Natur der Sache zu liegen, dass das Nachfolgende zum Teil bereits von anderen Autoren klargestellt sein dürfte. Mit Rücksicht darauf jedoch, dass hier die betreffenden Fragen von einem neuen Gesichtspunkt aus behandelt sind, glaubte ich, von einer für mich sehr umständlichen Durchmusterung der Literatur absehen zu dürfen, zumal zu hoffen ist, dass diese Lücke von anderen Autoren noch ausgefüllt werden wird, wie dies in dankenswerter Weise bei meiner ersten Arbeit über das Relativitätsprinzip durch Hrn. Planck und Hrn. Kaufmann bereits geschehen ist.”

<sup>②</sup> 爱因斯坦如果真想得到文献，他显然还是可以得到的。他在 1907 年发表的一篇文章 [E1] 里就引用了许多期刊，甚至包括 1887 年报道过迈克尔逊-莫雷实验的《美国科学杂志》。如果说这些参考文献是爱因斯坦从洛伦兹的一篇文章中抄下来的，我一点也不会感到惊奇。另外，1906 年，爱因斯坦还提到过一篇庞加莱的文章 [P2] 因为它出现在一本洛伦兹的纪念文集中而引起了他的注意 [E6]。

加莱的名字在爱因斯坦有关相对论的文章中只出现过一次，也就是出现在他 1921 年关于狭义相对论的一篇演讲《几何学与经验》(Geometrie und Erfahrung) 中[ E7]，他赞扬“der tiefe und scharfsinnige Poincaré”（深刻而敏锐的庞加莱），原因是他关于非欧几何的思想——而这个思想，刚好可以在《科学与假设》的第 3 章找到。

3. 洛伦兹和以太 对洛伦兹来说，简单性意味着简单的动力学。作为洛伦兹风格的一个典型例子，我们看他 对考夫曼 1901—1906 年关于电子质量的纯电磁起源的结论 有什么反应：“从简单性的观点看，我们最好接受考夫曼的结论——或者假说，如果喜欢这么叫的话——负电子根本没有实在的质量。这肯定是现代物理学最重要的结论之一...…”[L1]。我相信，洛伦兹的一生一直抱着这个纯电磁电子质量的观点。

关于考夫曼的这段话，是洛伦兹 1906 年在哥伦比亚演讲时说的。这个演讲“因为我希望给出这个课题的进一步发展”，而拖了 3 年才发表 [L2]。尽管拖了这么久，“爱因斯坦的相对论原理 [ 还是没有 ] 受到足够的重视”[L2]，这的确是事实。例如，洛伦兹仍然认为，杆的收缩有着动力学的原因。无疑，他这时已读过并理解了爱因斯坦的那些论文。然而，无论当时还是以后，他都没有将它们的结论作为以太问题的确定回答。1913 年，洛伦兹在哈勒姆 (Haarlem) 的泰勒基金会 (Tayler Foundation) 演讲中，以他一贯的明晰，表达了自己的信念 [L3]：

“照爱因斯坦的说法，谈相对于以太的运动是没有意义的”。

他同样也否认存在绝对的同时性。

“一定值得我们注意的是，这些相对论的概念，还有那些有关时间的概念，这么快就被接受了。

“这些概念的接受，主要是认识论的问题……然而，可以肯定的是，这在很大程度上依赖于人们习惯的思维方式，看他们对哪个解释最感兴趣。就我的演讲来说，人们会在旧的解释中感到一定的满足。按这些解释，以太至少有一些物质性的东西；空间和时间可以明确地分离；可以不需要进一步的说明而谈论同时性。关于最后这一点，也许有人会要求我们具有想象任意极大速度的能力。这样，我们离绝对同时性的概念就很近了。

“最后还应该指出，决不会观测到大于光速的速度这一大胆的论断包含着对我们的能力的一个假想的限制时[这一限制]我们不能无条件地接受。”

毫无疑问，洛伦兹的图像还是经典的图像。如果光以  $c$  公里/秒的速度运动，就不难想象一个  $(c+1)$  公里/秒的速度来。一个能在数学上想象的速度，就必然能在物理上实现，这是经典思想的论断，而相对论思想却否认这一点。

我所理解的洛伦兹是理论物理学的一个领袖，他完全领会了狭义相对论的数学和物理实质，却无论如何舍不得完全放弃他所喜爱的经典时代。这种态度与个性冲突无关，这些东西对他来说太陌生。爱因斯坦与庞加莱总是称赞他，洛伦兹也总是报以同样的回答。他会毫不犹豫地澄清他自己的错误。在为哥伦比亚演讲第二版增加的注释中他写道：“我没有发现相对论的主要原因，在于我固执地认为，只有变化的时间才能作为真正的时间，而我的地方时  $t'$  不过是一个辅助的数学量而已” [L4]。1915年1月在

给爱因斯坦的信件 [L5] 中,<sup>①</sup>洛伦兹针对菲茨杰拉德—洛伦兹收缩这样写道：“我补充一点，如果我们将已知的静电力经变换后的结果推广到其他形式的力，我们就会得出这个假设。如果那时在这方面多加强调，这一假设给人的印象就不太会被认为是特地发明出来的。”洛伦兹从来就没有完全从老的动力学转到新的运动学。<sup>②</sup>

4. 庞加莱和第三假设 1909年4月，庞加莱在哥廷根一连做了6次演讲 [P3]。最后一次演讲题为“新力学” (*La Mécanique Nouvelle*)，讨论与相对论有关的问题。粗看这篇讲稿的读者可能会奇怪，在里面找不到爱因斯坦的名字，这时候爱因斯坦的理论已经4岁了。不过，仔细读下去就会发现，不谈爱因斯坦也在情理之中，因为庞加莱并没有描述爱因斯坦的理论。

庞加莱说，新力学以三个假设为基础。第一是物体不能获得大于光速的速度。第二是（用现代语言来讲）物理学定律在所有惯性系中都一样。这时候，还没出现什么问题。然后，庞加莱引入了第三个假设：“我们还需要作第三个假设，它更令人惊奇，更难以接受，而且在很大程度上是我们普遍习惯的一个障碍：平动的物体在位移方向上会发生形变……不论它显得有多奇怪，我们必须承认，这个第三假设是被完全证实了的。”显然，直到1909年，庞加莱还不知道杆的收缩是爱因斯坦两个假设的一个结论。从而庞加莱连狭义相对论的一个最基本特征都不了解。

<sup>①</sup> 这一草稿是科克斯1979年在洛伦兹的一个笔记本中发现的。感谢科克斯博士让我注意到它的内容。

按照玻恩的说法，“洛伦兹……也许从来没有成为一个相对论者，他那时在口头上称赞爱因斯坦，不过是为了避免争论 [B2]。

我们是否应这样来理解庞加莱：他提出第三个假设仅仅是出于教学的目的。我想，这恐怕太牵强了。况且，如果照刚才说的那样重读他早些时候的文章，我们就会看到，他对菲茨杰拉德—洛伦兹收缩的看法前后明显一致。我再重复一下庞加莱 1904 年在圣路易斯说过的话 [P4]。那一次，他基本上也是先引入这头两个假设 然后补充道：“不幸的是 [这个推理] 是不充分的，还需要补充假设。我们必须假定，运动物体在它们的运动方向上会受到一个均匀的收缩。”再读一下《巴勒莫数学会刊》中的重要文章 [P1] 我们会看到关于洛伦兹变换的精彩讨论，却没有看到他谈这些变换隐含着杆的收缩，这篇文章所强调的是动力学。这种情形，同庞加莱 1908 年关于相对论的半科普介绍是一样的 [P5]。

关于庞加莱对相对论的贡献，我个人的评价，与以前提到的法国哲学协会在巴黎召开的会议的开幕词中对他的评价是一致的：“庞加莱所期望的答案，由爱因斯坦在 1905 关于狭义相对论的论文中提出来了。爱因斯坦完成了庞加莱曾经预见并且物理学发展似乎要陷入绝境时将它提出来的那场革命”[L6]。

5. 惠特克和相对论历史 1910 年，惠特克 Edmund Taylor Whittaker) 出版了一本名为《以太和电学理论的历史》(*History of the Theories of Aether and Electricity*) 的书 [W1] 从笛卡儿写到 19 世纪末。比我精通这段历史的同行们使我相信，这是一部杰作。40 年后，它的修订本出来了。这时，惠特克又出版了第二卷 [W2]，讨论 1900 年到 1926 年的历史。从他在这一卷里对狭义相对论的讨论，我们发现，作者对文献是多么无知，又是多么缺乏物理学的理解力。如果不是它在许多人的心目中引起了有关相对论发现的优先权的问题，我是不会评论他对狭义相对论的看法的。

惠特克的这个论点，很好地反映在他讨论这个问题的那一章的标题上：“庞加莱和洛伦兹的相对论”。<sup>①</sup>玻恩曾礼貌地提醒过惠特克 [B3]。爱因斯坦的反应是：“我用不着读这些东西……如果他想说服别人，那是他们自己的事。”[B4]

6. 洛伦兹和庞加莱 庞加莱的每一篇关于相对论原理的文章，都承认了洛伦兹的先驱作用。在哥廷根演讲中，庞加莱说洛伦兹是牛顿力学的“*grands démolisseurs*” [伟大的掘墓人 (我不知道洛伦兹是否同意)]，并再次提到他的地方时概念的“天才的创见”。

反过来，洛伦兹也很敬佩庞加莱。在 1904 年的一篇重要文章中他承认庞加莱在 1900 年巴黎会议上的批评对他的激励。批评大概说，洛伦兹在早期工作中引入的独立假设太多了 [L7]。后来，他写信给庞加莱，感谢他寄来的“关于电动力学的重要论文” [L8]。《数学纪事》(*Acta Mathematica*) 第 38 卷的内容全是纪念去世的庞加莱的，洛伦兹详细分析了巴勒莫论文 [L9] 附带着第一次引进了虚时间坐标 ( $x_4 = ict$ )。至于庞加莱对相对论原理的贡献，洛伦兹的看法总是公允的。在他的哥伦比亚演讲的两个版本中，庞加莱都只是和他所创造的应力项一同出现的。后来在给爱因斯坦的一封信中，洛伦兹回忆了狭义相对论的起源：“我感到需要一种更普遍的理论，后来 [即 1904 年] 我试着去发现它 而你 [还有庞加莱在更低的程度上] 把它建立起来了。”[L5]

7. 洛伦兹和爱因斯坦 爱因斯坦不止一次地告诉我，他觉得，洛伦兹是他一生中所见过的最多才多艺、最和蔼可亲的人。尊

<sup>①</sup> 惠特克为皇家学会写的爱因斯坦悼念文章，也不怎么样 [W3]。



重、爱戴和敬畏，构成了爱因斯坦对洛伦兹的认识和情感。“我比任何人都更敬佩他 可以说 我爱他”[E8]，1909 年 爱因斯坦写信给劳博这么说。在给格罗斯曼的信中，他称洛伦兹为“我们最伟大的同行”[E9]。在给洛伦兹本人的信中，他又写道：“您会真切地感到，我对您怀有无限的敬意”[E10]。洛伦兹去世后不久，在莱顿大学的纪念会上，爱因斯坦也讲了话：“他的工作的重大意义在于它构成了原子理论和狭义与广义相对论的基础。狭义相对论更是洛伦兹在 1895 年的研究中所发现的那些概念的具体表现”[E11]。

洛伦兹的生活集中在阿纳姆 (Arnhem)、莱顿和哈勒姆。他第一次在离荷兰边境很近的地方参加国际会议时，已经 44 岁了。爱因斯坦在这个年纪已相继在 4 个国家生活过，有过 4 个教授职位。像候鸟一样的他，有时也许会渴望洛伦兹那样的荷兰中上层稳定而安宁的生活。洛伦兹对爱因斯坦也是极敬重的。在第 12 章 我还将更详细地叙述他们两人间的相互影响，当时洛伦兹几乎说服了爱因斯坦永远在荷兰工作。

8. 庞加莱和爱因斯坦 为什么庞加莱在哥廷根演讲中没有提爱因斯坦？为什么庞加莱没有写过一篇与爱因斯坦和相对论有联系的文章？我们不能想象，庞加莱会读爱因斯坦 1905 年的文章而没有理解它；说他在 1909 年 哥廷根演讲那年 还没听说过爱因斯坦在这个领域的活动，也是不可能的。我能说这是因为斗气和职业上的嫉妒吗？我不会的，读者的推测可能和我一样。会不会是这样：庞加莱只在匆匆浏览过爱因斯坦论文后就忙下结论，以为那些内容自己已经都知道了，没有什么新东西？可能的。这么想一点儿也不牵强，这种事情也不是没有发生过。布卢姆 (Harold

Bloom 在他的《影响的忧虑》(*The Anxiety of Influence*)一书中写道：“有感召力的诗人们通过彼此的误读……来写历史，以便为人们自己清理一个想象的空间。”还说“有感召力的诗人[就是]那些同他们强大的先驱者们作不懈斗争直到死亡的主人公”[B5]。<sup>①</sup>就这一点而言，我看不到在有感召力的诗人与其他任何领域中具有强烈创造力的人之间有什么区别。庞加莱对黎曼的反应 [K1] 与爱因斯坦对希尔伯特的反应(将在第 14 章讨论)都是很好的例子。不论怎么说，这个问题都令人感兴趣，并且它也的确不是凭空杜撰出来的，但答案却不一定是我们所能及的。在我看来，庞加莱直到临终前对爱因斯坦保持缄默，要比爱因斯坦在临终前对庞加莱保持缄默更加意味深长。为更真切地反映庞加莱和爱因斯坦的情况，在结束有关他们的讨论前，我向大家提供他们的最后一些谈话，只稍加自己的一点说明。

莫斯科夫斯基 (Alexander Moszkowski) 在他的爱因斯坦传 [M2] 的开头回忆了 1910 年 10 月 13 日庞加莱在柏林科学协会作的关于“die neue Mechanik”(新力学)的演讲(庞加莱很喜欢德语)。“在这个演讲中，我们第一次听到了阿尔伯特·爱因斯坦这个名字。”庞加莱说的是“一个新潮流的开始 他承认 这个潮流扰乱了他以前的思想安宁”。可惜，作者没有告诉我们，庞加莱是怎么谈到爱因斯坦的。

1911 年 10 月，爱因斯坦和庞加莱在布鲁塞尔召开的第一届索尔未会议上见面了(我相信这是第一次也是最后一次)对这次相遇，爱因斯坦告诉朋友说：“Poincaré war (gegen die Relativitätstheorie)

einfach allgemein ablehnend, zeigte bei allem Scharfsinn wenig Verständnis für die Situation”[E12]。<sup>①</sup> 这又一次表明，庞加莱从没有理解也没有接受过相对论。

不久，ETH 当局准备任命爱因斯坦为教授。向庞加莱征求意见，庞加莱回答说：“爱因斯坦先生是我所知道的最有创造思想的人物之一，尽管他还很年轻，但已经在当代第一流科学家中享有崇高的地位。我们应该特别欣赏他让自己适应新概念的那般轻松和从这些概念导出结果的那种能力。他不受经典原理的束缚，每当面临一个物理学问题时，他会很快想象到各种可能性，这使他马上在头脑中产生一些可以在未来得到实验证实的新现象的预言。不过，我想说，并不是他的所有期待都能在实验可能的时候经得住检验。相反，因为他在不同方向上摸索，我们应该想到，他所走的路大多数都是死胡同；不过，我们同时也应当希望，他所指出的方向中会有一个正确的，这就足够了” [P6]。

就我所知，这是庞加莱留给我们的他对爱因斯坦单独的和最后的评判。他还有两次评论相对论 [P7, P8]，是在见到爱因斯坦和写上面那封信以后。他也两次提过洛伦兹，在第二次也提到爱因斯坦，不过是与光电效应联系在一起的，这是 1912 年 4 月 11 日的一次讲话：3 个月后，他竟出人意料地去世了。

1919 年，数学家米塔格-莱弗勒 Mittag-Leffler 写信给爱因斯坦，请他为《数学纪事》的庞加莱纪念专辑写一篇文章 [ M3]。4 个月后，爱因斯坦才回信说，来信耽误了很长时间他才收到，现在

“（对于相对论）庞加莱简直讨厌极了，而且表明他几乎不理解它的情形，尽管他才思敏捷。”

“可能太晚了”[E14]。米塔格—莱弗勒回信告诉他，如果愿意，他还可以寄一篇文章去 [M4]。两个半月后，爱因斯坦回信说，繁忙的事务和旅行使他写不成东西，又补充说，他不写这篇文章，“只应该认为是他把这个任务看得太重了” [E14]。

1920年12月，《纽约时报》(*New York Times*) 记者到柏林哈伯兰大街 (Haberland strasse) 的家中访问了爱因斯坦。在回答相对论的起源问题时，爱因斯坦说：“人们发现 [伽利略不变性] 不适用于电动力学中的高速运动，这促使荷兰的洛伦兹教授和我本人建立了狭义相对论... …”[E15]。如果在谈话中提一下庞加莱的先驱思想，也许更礼貌些。不过，在1921年接受《费加罗报》(*Le Figaro*) 采访时，他表达了对庞加莱的崇高敬意 [E16]。

20世纪50年代初，我曾问爱因斯坦，庞加莱的巴勒莫论文对他的思想有过什么影响。爱因斯坦回答说，他从未读过这篇文章。我有 Gauthier -Villars 出版的单行本，是别人用过的旧书，问他愿不愿意借去看看，他说行，他愿意。我把书借给他，他再也没还给我。爱因斯坦去世后，我请海伦·杜卡斯帮我找一下，书已经不见了.....

也许他真的读了。1953年，爱因斯坦收到邀请，请他参加即将在伯尔尼举行的相对论50周年纪念会。爱因斯坦回信说，他的健康状况不允许他有这么长的旅行。在这封信中，爱因斯坦第一次（就我所知）提到庞加莱对狭义相对论的影响：“Hoffentlich wird dafür gesorgt dasz die Verdienste von H. A. Lorentz und H. Poincaré bei dieser Gelegenheit ebenfalls sachgemass gewürdigt werden” [E17]。<sup>①</sup> 伯尔尼会议在爱因斯坦去世后不久召开了。评价洛伦兹

“我希望人们在此机会也适当关注一下洛伦兹和庞加莱的功绩。”

和庞加莱的任务落在了玻恩头上（他听过庞加莱的哥廷根演讲）。他讲的不是很好。<sup>①</sup>

在去世前两个月，爱因斯坦公正地做出了最后评价：“洛伦兹已经认识到以他的名字命名的变换对分析麦克斯韦方程是基本的，而庞加莱将这种洞见更加深化……” [E18]。

9. 尾声 迈克尔逊—莫雷实验 在结束这段狭义相对论历史的时候，我们再回到它的起源。我在 6a 末尾说过要进一步讨论爱因斯坦为什么不谈迈克尔逊—莫雷实验对他思想的影响，现在就来讲。

爱因斯坦逝世前一年在给一位历史学家的信中，最后一次表达了他对这个问题的看法：“在我个人的发展中，迈克尔逊的实验结果没有特别大的影响。我甚至不记得，我（1905年）写第一篇关于这个题目 [狭义相对论] 的论文时，究竟是不是知道它。原因是，从一般理由说，我深信不存在绝对运动，我的问题只是怎样把我们的电动力学知识同这个事实协调起来。这样，人们可能会理解，为什么在我个人的奋斗中，迈克尔逊实验没有起作用，或者说，至少没有起决定性的作用” [E19]。

为什么无需记住这一实验？或者为什么小看它的影响呢？

在爱因斯坦写这最后一封信的 20 年前，也就是狭义相对论诞生 30 年<sup>②</sup>后，他在牛津作了一次题为《论理论物理学的方法》的报告 [E20]。在报告中，他说：“我坚信 纯粹的数学结构能使我们发现概念和联系这些概念的定律，它们为我们提供了理解自然现象

<sup>①</sup> “庞加莱所使用的推理正如爱因斯坦在他 1905 年的第一篇论文中导入的推理一样……难道庞加莱在爱因斯坦之前就知道了这一切？有可能……” [B6]。

<sup>②</sup> 原文为“twenty years”(20 年) 当是笔误。——译者

的钥匙。”依我看，这里爱因斯坦显然过高地估计了人类的——哪怕像他那样伟大的——思维能力。诚然，理论物理学家如果感觉不到数学的精巧、美妙和简单，就失去了许多基本的东西。但同时，完全依赖于形式的论证也是危险的，甚至可能是致命的，爱因斯坦在后来也未能逃脱这种危险。

爱因斯坦对数学的强调，与他年轻时所习惯的方式大不相同。这个变化是由什么引起的呢？当他正在通向广义相对论的道路上摸索时，他发现黎曼几何正在前头等着他，显然，这件事情一定深刻地影响了他后来的思想。他在牛津所表达的信念，会不会还有更早的根源呢？

走出历史的边缘，我想，我们勉强可以看到，爱因斯坦后来对依靠纯粹的数学思想发现概念的认识态度，可以追溯到 1905 年。他 6 月论文的运动学部分有一种已完成的理论所具有的理想的公理化结构，这种结构是他在同贝索的讨论中顿悟的。也许，这段经历太强烈，在他头脑中留下了深刻的印象，而且部分掩盖了以前伴随着他的思想状况，这就是他在内心深处渴望走近纯粹创造的神圣形式的结果吗？当然，这是可能的；当然，我和你永远也不会知道这是不是真的；当然，爱因斯坦在这一点上也永远帮不了我们的忙。

### 参考文献

- B1. H. Bergson, *Bull. Soc. Fran. Phil.* **22**, 102 (1922).  
B2. M. Born, *The Born-Einstein Letters* (I. Born, Tran.), p. 198. Walker and Cy, New York, 1971.  
B3. —, letter to A. Einstein, September 26, 1953; [B2], p. 197.  
B4. —, [B2], p. 199.

- B5. H. Bloom, *The Anxiety of Influence*, p. 5. Oxford University Press, Oxford, 1973.
- B6. M. Born, *Helv. Phys. Acta Suppl.* **4**, 244 (1956).
- E1. A. Einstein, *Jahrb. Rad. Elektr.* **4**, 411 (1907).
- E2. —, letter to J. Stark, September 25, 1907.
- E3. —, letter to M. Besso, March 17, 1903; *EB*, p. 13.
- E4. —, *Jahrb. Rad. Elektr.* **5**, 18 (1908).
- E5. —, *AdP* **23**, 371 (1907).
- E6. —, *AdP* **20**, 627 (1906).
- E7. —, *PAW*, 1921, p. 123. An extended version was published by Springer, Berlin, 1921.
- E8. —, letter to J. Laub, May 19, 1909.
- E9. —, letter to M. Grossmann, December 10, 1911.
- E10. —, letter to H. A. Lorentz, November 23, 1911.
- E11. —, *Math.-Naturw. Blätt.* **22**, 24 (1928).
- E12. —, letter to H. Zangger, November 15, 1911.
- E13. —, letter to M. G. Mittag-Leffler, April 12, 1920.
- E14. —, letter to M. G. Mittag-Leffler, July 21, 1920.
- E15. —, *The New York Times*, December 3, 1920.
- E16. —, letter to A. Sommerfeld, January 28, 1922. Reprinted in *Albert Einstein/Arnold Sommerfeld Briefwechsel* (A. Hermann, Ed.), p. 99. Schwabe Verlag, Stuttgart, 1968.
- E17. —, letter to A. Mercier, November 9, 1953.
- E18. —, letter to C. Seelig, February 19, 1955; *Se*, p. 114.
- E19. —, letter to F. C. Davenport, February 9, 1954.
- E20. —, *On the Method of Theoretical Physics*. Oxford University Press, Oxford, 1933.
- H1. A. Herman, *Sudhoffs Archw.* **50**, 267 (1966).
- K1. F. Klein, *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19 Jahrhundert*, Vol. 1, pp. 374–380, Springer, New York, 1979.
- L1. H. A. Lorentz, *Theory of Electrons* (1st edn.), p. 43. Teubner, Leipzig, 1909.

- L2. —, [L1], preface.
- L3. —, *Das Relativitätsprinzip*, p. 23. Teubner, Leipzig, 1920.
- L4. —, [L1], 2nd edn., 1915, p. 321.
- L5. —, draft of letter to A. Einstein, January 1915, undated.
- L6. X. Léon in [B1], p. 93.
- L7. H. A. Lorentz, *Proc. Roy. Soc. Amsterdam* **6**, 809 (1904). Reprinted in *H. A. Lorentz, Collected Papers*, Vol. 5, p. 172. Nyhoff, the Hague, 1937.
- L8. —, letter to H. Poincaré, March 8, 1906. Reprinted in A. I. Miller's contribution to the Proceedings of the Jerusalem Einstein Centennial Symposium, March 1979.
- L9. —, *Acta Math.* **38**, 293 (1921).
- M1. H. Minkowski, *AdP* **47**, 927 (1915).
- M2. A. Moszkowski, *Einstein*, p. 15. Fontane, Berlin, 1921–1922.
- M3. M. G. Mittag-Leffler, letter to A. Einstein, December 16, 1919.
- M4. —, letter to A. Einstein, May 3, 1920.
- P1. H. Poincaré, *Rend. Circ. Mat. Palermo*, **21**, 129 (1906). Reprinted in *Oeuvres de Henri Poincaré*, Vol. 9, p. 494. Gauthier-Villars, Paris, 1954.
- P2. —, *Arch. Néerl.* **5**, 252 (1900); *Oeuvres*, Vol. 9, p. 464. Also in *Recueil de Travaux Offerts à H. A. Lorentz*. Nyhoff, the Hague, 1900.
- P3. —, *Sechs Vorträge aus der Reinen Mathematik und Mathematischen Physik*. Teubner, Leipzig, 1910.
- P4. —, *Bull. Sci. Math.* **28**, 302 (1904).
- P5. —, *Rev. Gén. Sci.* **19**, 386 (1908); *Oeuvres*, Vol. 9, p. 551.
- P6. —, letter to a colleague at the ETH, undated, probably November 1911.
- P7. —, *Scientia* **12**, 159 (1912). Reprinted in *Dernières Pensées*, Chap. 2. Flammarion, Paris, 1913.
- P8. —, *J. de Phys.* **5**, 347 (1912). Reprinted *Dernières Pensées*, Chap. 7.
- S1. J. Stark, letter to A. Einstein, October 4, 1907, published in [H1].
- W1. E. T. Whittaker, *History of the Theories of Aether and Electricity*.



Longman, Green, London, 1910.

W2. E. T. Whittaker, *History of the Theories of Aether and Electricity*,  
Vol. 2. Nelson & Sons, New York, 1953.

W3. E. T. Whittaker, *Biogr. Mem. Fell. Roy. Soc.* **1**, 37 (1955).



## IV 广义相对论



## 第 9 章 “我一生中最快乐的思想”

*Musz es sein ? Es muss sein.*

1921 年 2 月 17 日的那期《自然》(Nature) 杂志几乎都在谈相对论。这时候，“[ 广义相对论 ] 预言的两个现象已为观测所证实，对于这两个现象，还没出现其他可供选择的令人满意的解释；第三个预言还是探讨中的课题”[ L1]。头两个现象是水星近日点进动与光线经过太阳发生的偏折，是爱因斯坦在 1915 年计算的。第一个预言的结果与久为人知的观测非常一致，第二个预言直到 1919 年才得到验证。第三个预言是辐射的红移，对它的实验观测，1921 年时还在酝酿之中。

这一期《自然》杂志出版时，爱因斯坦无论在物理学界还是在大众眼中，都是公认的世界名人。第一篇文章是爱因斯坦写的，开头说：“将一系列思想的演化以尽可能简洁的形式表达出来，是很吸引人的事情... ..”[ E1]。接着的一些文章的作者是天文学家戴森(Dyson)和克罗梅林(Crommelin) 物理学家金斯(Jeans)、洛伦兹、洛奇和爱丁顿(Eddington)，以及数学家外尔(Hermann Weyl)。当然，少不了还有几篇哲学文章。这期杂志等了很久才出来，而计划是在皇家学会和皇家天文学会 1919 年 11 月 6 日在伦敦联合召开的那次历史性会议后几周就考虑了。在那次会议上报告了两个日食远征队 5 月的观测结果符合爱因斯坦的理论。同

月，杂志请爱因斯坦写篇文章 [L2]。也正是因为爱因斯坦“尽可能简洁”的努力耽误了很长时间。1920年1月文章基本上写好了，“但是这么长，我很担心它是不是能在《自然》上发表” [E2]。文章没有发表。最后发表的短文 [E1] 同他原来写的“Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt”(“相对论发展中的基本思想和方法”)大不一样。这篇文章虽然从没发表过，但还是留下来了。手稿收藏在纽约市的皮尔蓬·摩根图书馆(Pierpont Morgan Library)。下面我们称它为摩根手稿。

这是一篇极有趣的文献。在这里，我们不但可以欣赏爱因斯坦的思想，而且还能分享他的体验。其中一点，他解释了他在1907年是怎样从一篇评论的准备过程中想到牛顿的引力理论应该以何种方式修正，才能使它的定律适合于狭义相对论。“在1907年，我为《放射学与电子学年鉴》写一篇关于狭义相对论的综述文章时，也不得不尝试去修正牛顿的引力理论以使它的定律满足[狭义相对论的]理论。沿着这个方向的努力确实表明，这是可行的。但我还不满意，因为这些尝试的基础是一些没有物理根据的假设。”(关于这些尝试的详情见第13章。)他接着说：

那时候，涌现出了“glücklichste Gedanke meines Lebens”(我一生中最快乐的思想)。事情是这样的：引力场只有相对的存在性，就像磁感应产生电场一样。<sup>①</sup> 因为对一个从房顶自由下落的观察者而言——至少在离他很近的环境

原稿在这个地方有几个显然是爱因斯坦忘记删除的字。

中——不存在引力场 [ 爱因斯坦用的黑体 ]。事实上，如果这个观察者让物体下落，那么物体相对于他的状态是静止的或是匀速运动的，而与物体特殊的化学和物理性质无关（在这种考虑中，当然忽略了空气的阻力）。从而，这个观察者有理由说他的状态是“静止的”。

由于这个想法，引力场中所有物体以相同加速度下落这一极不寻常的实验定律，立刻就获得了深刻的物理意义。也就是说，只要存在一个物体在引力场中的下落方式与其他物体不同，则观察者就可以凭这一点认定他正处于引力场中并正在其中下落。然而，如果没有这种物体——正如经验以极高的精确度告诉我们的那样——那么，观察者判断自己是在引力场中下落就是毫无客观意义的。相反，他有理由认为自己处于一种静止状态，而在他周围也没有引力场。

于是，这种在实验上众所周知的落体加速度的独立特性，最终为将相对性假设推广到彼此相对以非均匀速度运动的坐标系，提供了有力的根据。

现在，我们来看爱因斯坦 1907 年的那篇综述 E3 的第五部分。编辑部收到这篇文章的日期是那年 12 月 4 日。爱因斯坦就是从这里踏上从狭义相对论到广义相对论的漫长道路的。让我们跟着他上路。我们会看到，他有过多多少少试验，犯过多少错误，经历过多少彷徨 最后 在 1915 年 11 月 25 日，我们现在所熟悉的广义相对论的结构，终于出现在他的面前。

我在第 7 章提到过爱因斯坦在 1905 年 9 月论文完成后 在狭义相对论领域所做的一些工作。这些后来的论文，发表于 1906 年

和 1907 年初。那期间，他还对他 1905 年关于布朗运动的研究做了些补充（第 5 章）。不过，他这时的主要活动还是在量子理论方面。1906 年 他为普朗克 1900 年关于量子理论的工作提出了自己的解释，还完成了一篇关于固体比热的量子理论的重要文章（第 19 和 20 章）。

爱因斯坦 1905 年后关于相对论的第一篇重要文章就是 1907 年的综述，它是应《年鉴》的编辑斯塔克的请求而写的 [E4]。爱因斯坦是在 1907 年 9 月 25 日收到邀请的。11 月 1 日 他又写信给斯塔克说：“我现在已经完成了为您的《年鉴》写的论文的第一部分，正忙着用可怜的一点儿空闲时间写第二 [ 部分 ] ” [E5]。因为第二部分包含了引力的讨论 所以 爱因斯坦那“最快乐的思想”很可能就是在 1907 年 11 月的某个时候涌现出来的。我们还确切地知道，出现这个思想时，他在什么地方。在京都演讲中，他告诉我们：

我正坐在伯尔尼专利局的办公室里，忽然闪现出一个念头：“如果一个人自由下落，那他就感觉不到自己的重量了。”我惊呆了，这个简单的想法给我留下了深刻的印象，它促使我走向引力理论。 [I1]

爱因斯坦第一次对引力感兴趣，是因为他想将引力纳入狭义相对论呢，还是因为他发现可以借助它来推广狭义相对论？从那段摩根手稿的引文来看，答案似乎应该是这样的：为了将引力纳入狭义相对论，他立刻或几乎立刻就获得了狭义相对性原理的推广。这也是爱因斯坦自己在京都演讲中的回忆：“1907 年 在写一篇关



于狭义相对论的结果的综述文章时……我认识到，除引力定律外，一切自然现象都可以用狭义相对论来讨论……我深深感到需要探求它背后的原因……我最不满意的是，尽管惯性与能量之间的关系可以那么美妙地 [ 在狭义相对论中 ] 推导出来，但是惯性与重力的关系却没有。我怀疑这个关系不能用狭义相对论来说明” [11]。1907 年的综述没有提到静态牛顿引力势  $\Phi$  的方程：

$$\Delta\Phi=4\pi G\rho \quad (9.1)$$

( 这里  $\rho$  是物质密度,  $G$  是牛顿引力常数。 ) 这说明将这个方程推广到狭义相对论, 不是他的最终目的。方程 (9.1) 直到 1912 年 2 月才在他的文章中出现 [ E6 ], 但那时他已经知道, 即使在静态情况下 它也不是普遍成立的 这一点 我们将在第 11 章看到。

年鉴中的论文的第五部分提出了 3 个主要问题。

1. 等效原理 “ 相对性原理对于相互做加速运动的坐标系也成立, 这是可以想象的吗? ” 爱因斯坦一开始就提出这个问题, “ 这是每一个相信相对性原理应用的人都会提出来的。 ” 接下来 他作了标准的论证。一个参照系  $\Sigma_1$  以常加速度  $\gamma$  沿  $x$  方向做加速运动 第二个参照系  $\Sigma_2$  在一均匀引力场中静止, 而这个引力场给所有物体施加一个沿负  $x$  方向的加速度  $-\gamma$ 。 “ 根据现有的经验知识, 我们没有理由认为...  $\Sigma_1$  与  $\Sigma_2$  有任何方面的区别, 因而, 我们在下面将假定引力场与对应的加速参照系 [  $\Sigma_1$  ] 在物理上是完全等效的 [ 我用的黑体 ]。这个假定把狭义相对性原理推广到了匀加速运动的参照系的情形。 ” 爱因斯坦指出, 他的综述不是彻底讨论这个问题的地方。不过, 通过把他的新假设用于麦克斯韦方程, 他总算开了个头, 不过总是在匀加速条件下。直到 1912 年 他才提出进一步推广到非匀加速的情形。这一年他第一次把他的假

设称为“等效原理”[E7]。

2. 引力红移 很多相对论教科书都用爱因斯坦的方法，通过光在向上加速运动着的升降机内从顶射向底的多普勒效应来计算红移。这确实是在 1911 年给出的推导（见第 11 章），不过，他在 1907 年就知道引力红移了。他那时给的推导不太有普遍性，它值得我们特别注意的原因，在于它包含了后来将成为他的最终理论基石的两个思想的萌芽：定域洛伦兹坐标系与无限小路径的光速不变性。这些论证限于低速、低匀加速以及小时间间隔的情况。推导过程如下：

考虑两个坐标系  $S(x, y, z, t)$  和  $\Sigma(\xi, \eta, \zeta, \tau)$  在某一时刻重合而且速度  $v=0$ （括号中的符号分别表示各自的时空坐标）。在这个时刻， $S$  中的一系列时钟都相互校准，而且与  $\Sigma$  中同样的一系列时钟同步。令两系重合的时间为  $t=\tau=0$ 。当  $\Sigma$  开始以匀加速度  $\gamma$  沿  $x$  方向运动时， $S$  保持静止。再引入第三个坐标系  $S'(x', y', z', t')$  相对于  $S$  以匀速  $v$  沿  $x$  方向运动，满足在某一固定时刻  $t, x'=\xi, y'=\eta, z'=\zeta$ ，于是  $v=\gamma t$ 。进一步设想， $S'$  与  $\Sigma$  重合时， $S'$  中所有的时钟都与  $\Sigma$  中的时钟同步。

I. 考虑  $S'$  与  $\Sigma$  重合后的一个时间间隔  $\delta$  这个间隔很小，使所有的  $O(\delta^2)$  效应都可忽略，若  $\gamma$  也很小从而可以忽略所有的  $O(\gamma^2)$  效应，那么， $S'$  的时钟相对于  $\Sigma$  的时钟的速率是多大？我们不难发现，在所有那些假设的条件下， $\Sigma$  和  $S'$  之间的相对位移、相对速度和加速度对时钟的相对速率的影响，都是二阶或更高阶的。因此，在无限小间隔  $\delta$  内，我们仍可用定域洛伦兹坐标系  $S'$  的钟的时间来描述  $\Sigma$  的时钟的速率。于是，“如果只限于小光程……光速不变性原理也可以用于同时性的定义。”运用 3 个坐标系的技巧真是天

才的。一方面,  $S$  和  $S'$  为惯性系, 可以用狭义相对论; 另一方面, 在小时间间隔内, 在精确到高阶效应下,  $S'$  中的测量可以等同于  $\Sigma$  中的测量。

II.  $\Sigma$  中两个空间点的钟的相对速率是怎样的呢? 在  $t = \tau = 0$  时,  $\Sigma$  的这两个钟彼此同步, 而且也以同样方式相对于  $S$  运动, 因此,  $\Sigma$  这两点的钟相对于  $S$  仍保持同步。但这时 (根据狭义相对论) 它们相对于  $S'$  是不同步的, 于是根据 I) 它们彼此也是不同步的。现在, 我们可以选出一个钟, 例如原点的钟, 令  $t = \tau$  来定义  $\Sigma$  的时间  $\tau$ 。接下来, 借助 I) 的讨论, 我们可以用  $S'$  来定义  $\Sigma$  中的同时性:  $\Sigma$  中事件 1 与 2 同时发生的条件是

$$t_1 - \frac{vx_1}{c^2} = t_2 - \frac{vx_2}{c^2} \quad (9.2)$$

这里还是  $v = \gamma t = \gamma \tau$ 。设事件 1 对应于  $\Sigma$  原点, 事件 2 对应于时钟读数为  $\sigma$  的空间点  $(\xi, 0, 0)$ 。最后引入一个近似条件:  $S'$  与  $\Sigma$  重合时间  $\tau$  也很小, 它的二阶效应  $O(\tau^2)$  可以忽略。那么  $x_2 - x_1 = x_2' - x_1' = \xi$ ,  $t_1 \equiv \tau$ ,  $t_2 \equiv \sigma$  从而方程 (9.2) 成为:

$$\sigma = \tau \left( 1 + \frac{\gamma \xi}{c^2} \right) \quad (9.3)$$

这就是我们在现代教科书里看到的公式, 尽管推导方法不同。

等效原理对这个方程的应用, 也是我们熟悉的。那就是, 对于处在  $\xi$  方向的均匀引力场中的静止坐标系,

$$\sigma = \tau \left( 1 + \frac{\Phi}{c^2} \right) \quad (9.4)$$

这里,  $\Phi$  为  $(\xi, 0, 0)$  与原点间的引力势能差。[注意, 这里和以后所说的引力势能, 总是指单位质量的, 因此  $\Phi$  有 (速度<sup>2</sup>) 的量纲。]

爱因斯坦立刻就转向方程 (9.4) 的物理意义: “存在着这样的

‘钟’，它们处在引力势不同的地方，它们的速率可以精确地调节，这就是光谱线的源。根据前面的论述，来自太阳表面的光……要比地球上同种材料发出的光具有更长的波长。”他还为这个著名的结论加了注脚：“我们这里假设 [ 方程 9.4 ] 对非均匀引力场也成立 ( 我用的黑体 ) 这个假设 对爱因斯坦未来的思想来说 具有根本性的意义。1911 年，他还会进一步考察它的结论。

3. 麦克斯韦方程组 光的弯曲 引力能 =  $mc^2$  爱因斯坦一往直前，下一步的对象是麦克斯韦方程组。他的工具还是刚才讲的在红移问题中用的那些。他仍然以一个定域惯性系  $S'$  为中介，比较事件在  $S$  和  $\Sigma$  中的描述。步骤直截了当，细节我就不说了，只谈结果。

首先，爱因斯坦发现， $\Sigma$  中的麦克斯韦方程仍具有  $S$  中的形式，但  $S$  中的光速  $c$  在  $\Sigma$  中应以下式代替：

$$c\left(1 + \frac{\gamma\xi}{c^2}\right) = c\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right) \quad (9.5)$$

“由此可知 不在  $\xi$  方向上传播的光线，将被引力场所偏折”。第二 他检验了  $\Sigma$  中的能量守恒定律，发现“一个很值得注意的结果：能量  $E$  [ 定义为无引力场情况下的能量 ] ……为总能量额外地贡献一个与位置有关的量

$$\frac{E}{c^2}\gamma\xi = \frac{E}{c^2}\Phi \quad (9.6)$$

在引力场中，我们必须给每一能量  $E$  联系一个与位置相关的能量，它等于质量大小为  $E/c^2$  的‘有重’物质的位能。于是， $[E = mc^2]$  这一法则……不仅对惯性质量成立，对引力质量也成立”。

前面说过，《年鉴》一文是编辑部 12 月 4 日收到的。24 日爱

因斯坦写信给哈比希特说：

这些日子，我 [ 又 ] 在忙于考虑与引力定律相联系的相对论问题……我希望弄清楚至今还没有答案的水星近日点距离的长期变化…… [ 但 ] 到现在似乎还不行。 [E8]

我珍藏着两件爱因斯坦的纪念品。一件是他用的最后一只烟斗 陶制的烟斗头 芦苇做的烟杆 这是海伦·杜卡斯 1955 年送给我的。另一件是第一次出现在 1950 年版的《相对论的意义》中的附录 II 的校样，题为“广义引力论”。在扉页上，爱因斯坦用颤抖的手写着：“Pauli: nach Einsichtnahme bitte Pais geben. A. E. 泡利：读后请给派斯。书出版那年，我三十多岁，当时我就读过这本书，以后每隔几年都要重读一遍。每当我翻动书页时，总怀着一样的心情。这个人的生命从不停息吗？”

对这篇我后来读的《年鉴》文章，现在我也有同样的感觉。这篇综述没有 1905 年关于狭义相对论的论文那么完美。笨拙的近似 [ 方法 ] 掩盖了结论的普遍性，这话第一次是爱因斯坦在 1911 年自己说的。光线弯曲的结论，是定性正确而定量错误的——尽管在 1907 年，还不是逻辑上的错误。第一个发现这一点的，也是爱因斯坦，那是在 1915 年。尽管如此，我对这篇文章至少是像对 1905 年那篇完美的相对论论文同样欣赏的。重要的不是文章的细节，而是它的勇气。

1905 年，爱因斯坦对同时性的处理是他多年思考的结果，那些思考已经使他发现了整体洛伦兹不变性的新物理解释。只过了两年，他就意识到，狭义相对性原理的推广要求重新估量这个宝贝

工具的有效性。1907年，他已清楚地知道，如果要等效原理普遍成立，这个不变性就有问题。那时他还不知道洛伦兹不变性会有一种新的定域形式。换了别人，也许会为了保留整体洛伦兹不变性而躲避等效原理，爱因斯坦却不是这样。他毫不畏惧地走上新的征程。接着的8年里，他别无选择，只有走下去。从这时起，他的风格也变了。如果说他1905年的工作像莫扎特，那么，他在1907—1915年的工作，会令人想到贝多芬。本章题目下的引言，就是贝多芬《作品第135号[F大调弦乐四重奏]》最后一个乐章的标题：一定如此吗？一定如此！

### 参考文献

- E1. A. Einstein, *Nature* **106**, 782(1921).
- E2. —, letter to R. W. Lawson, January 22, 1920.
- E3. —, *Jahrb. Rad. Elektr.* **4**, 411(1907).
- E4. —, letter to J. Stark, September 25, 1907, quoted in [H1].
- E5. —, letter to J. Stark, November 1, 1907, quoted in [H1].
- E6. —, *AdP* **38**, 355(1912).
- E7. —, [E6], p. 365.
- E8. —, letter to K. Habicht, December 24, 1907.
- H1. A. Hermann, *Sudhoffs Archiv.* **50**, 267(1966).
- I1. J. Ishiwara, *Einstein Koën-Roku.* Tokyo-Tosho, Tokyo, 1977.
- L1. R. W. Lawson, *Nature* **106**, 781(1921).
- L2. —, letter to A. Einstein, November 26, 1919.

## 第 10 章 爱因斯坦教授先生

### 10a. 从伯尔尼到苏黎世

1907 年 12 月刚过，爱因斯坦的大学教师生涯就开始了。

他的第一步，也同当时大家一样，是申请一个无薪讲师职位 (Privatdozentship)。这不算正式教员，也没有学校或其他官方机构发薪水。做无薪讲师意味着有权在指定的大学讲课，惟一的酬劳来自每堂课学生缴纳的一点听课费。那时人们常说，做大学老师只是那些自己富有或者同有钱人结婚的人才会考虑的事。爱因斯坦两种人都不是，这也许就是他早先谋求这种职位不成的原因 [E1]。

1907 年，他还是决定在保留专利局职位的同时，申请当老师。6 月 17 日，他给伯尔尼地方政府写信，并附上他的博士论文、17 篇发表的论文（当然包括他 1905 年的成果）和履历表。讨论这件事情时，有几个教授同意他的申请，<sup>①</sup>但还得照章办事。不知什么原因，爱因斯坦没有按要求随申请寄一篇未曾发表的教授资格论文 (Habilitationsschrift) 于是申请被否决了除非什么时候爱因斯坦先生愿意提供一篇这样的文章 [F1]。爱因斯坦拖了很久也没

<sup>①</sup> 然而，实验物理学的教授却表示反对 [E1a]。

有写。1908年1月，他写信给格罗斯曼，问他怎样才能申请到一个空缺的中学教师职位：“我能不能到那里去当面谈谈？我具有作为一名教师和公民的德行，我大概不会留下坏印象吧（非瑞士—德国人，犹太人的长相，等等）。那时，如果我极力称赞自己的科学论文，会有用吗？”[E1a] 也许他从来就没申请过，也许申请被拒绝了。不管怎么说，1908年初，他终于写了他的资格论文——一篇至今也没有发表的论文。2月28日，回信来了，通知这位年轻的爱因斯坦博士，他的申请被批准了。他终于获得了 *venia docendi* 教书的权利[F2]。爱因斯坦第一次成为大学教师队伍里的一员。

他的主要工作还在专利局，只能临时讲些课。在1908年的夏季学期，他星期六和星期二上午7点到8点给3个朋友包括贝索，讲热的分子运动论。他的第二门也是最后一门课，是1908—1909年的冬季学期上的，每星期三下午6点至7点，有4个人听课。他的妹妹玛雅偶尔也来听。玛雅在柏林大学读了两年之后，那时又转到伯尔尼大学。也就在1908年12月21日爱因斯坦家中又一件学术事件发生了，玛雅以最优异的 (*magna cum laude*) 成绩获博士学位，她的论文是研究罗曼斯语 (*Romance Languages*) 的[E1b]。

爱因斯坦的第二门课是辐射理论，也是他资格论文的主题：《黑体辐射能量分布定律的辐射构成的一些结果》[F3]。这篇文章从来没有发表，手稿也没找到。它的内容很可能都并入了1909年初发表的《关于辐射问题的现状》的报告[E2]和同年早些时候发表的《论我们关于辐射的本质和构成的观点的发展》[E3]。这两篇文章不只是一般的概述，还蕴含着非常重要的新物理学。 40



年后，泡利谈到第二篇报告时说，它“可以认为是理论物理学发展的一个里程碑”[ P1]。在第 21 章，我还要回来详细讨论这些文章。在这里，我只说一句，它们是爱因斯坦 1908—1911 年间最重要的贡献。

这两篇文章中的第一篇在伯尔尼完成，第二篇在苏黎世完成。那时，他第一次获得正式的教员职位，苏黎世大学理论物理学副教授，这是新设的一个职位。自从克劳修斯 1867 年离开以后，学校就没有理论物理学或数学物理学教授 [ R1]。克莱纳给教授委员会的提议清楚地表明，爱因斯坦的声誉在迅速提高：“爱因斯坦是当今最重要的理论物理学家之一，这已经得到了相当广泛的承认，这是因为他在相对论原理方面的工作…… [ 因为 ] 他异常明晰的概念和对观念的追求……明快而精确的风格……”[ S1]。

爱因斯坦可能知道这些赞誉，也许他还能感到教授们在最后的报告中表达的情感：“我们的同事克莱纳以几年来的个人交往为根据的介绍，总体上说，对委员会和对全体教授，都是很有意义的。爱因斯坦博士是犹太人，而且确切地说是属于学者中的犹太人。人们常认为（在许多情况下并非完全没有理由）这些人在意识到他们的学术地位时，总是表现出所有令人不愉快的怪癖特征，诸如纠缠不休，厚颜无耻和斤斤计较。<sup>①</sup>然而，还应该说，在犹太人中，也有不带丝毫令人厌恶习气的人。从而，如果仅仅因为一个人正好是犹太人就将他拒之门外，那是不公平的。事实上，我们有时也发现，在非犹太学者中也有些人，他们的科学研究也有着那些

① 当然，爱因斯坦不太可能看到这个报告。

② "... Zudringlichkeit, Unverschämtheit, Krämerhaftigkeit..."

人们通常所说的地道的‘犹太人的’商务意识和实用主义特征。因此，委员会和全体教授认为，将反犹太主义作为政策，并不能代表什么尊严。<sup>①</sup>而同事克莱纳先生能为我们提供的关于爱因斯坦先生的性格情况完全令我们放心” [Sla]。这样的观点，当然不会只出现在 1909 年的苏黎世，它还反映了 20 世纪早期的西方文明。

1909 年 3 月，全体教授就爱因斯坦的申请举行秘密投票，10 票赞成，1 票弃权。1909 年 7 月 6 日，爱因斯坦向专利局提出辞职，两天后，日内瓦大学授予他荣誉博士学位，<sup>②</sup>这是他获得的一个荣誉称号，也是他的名声正在增长的一个标志。10 月 15 日，他开始新的大学工作；22 日他、米列娃和汉斯·阿尔伯特定居在穆松街 (Moussonstrasse) 12 号。当月，这位 30 岁的新任副教授兼荣誉博士第一次参加了在萨尔茨堡举行的物理学会议。他在会上做了报告，泡利高度评价了这个报告。1909 年 12 月 11 日他做了有生以来第一次但不是最后一次 就职演说 题目是《关于原子理论在新物理学中的作用》。新职位的年薪是 4500 瑞士法郎，他在伯尔尼当二级技术专家时也拿这么多。

新的工作在等着他：每周讲课和开研讨会的时间为 6 到 8 小时。他还要带研究生，其中一位是坦纳 (Hans Tanner) 他是爱因斯坦的第一位博士生，然而却没有从他那里得到学位。<sup>③</sup>课堂上

“... den ‘Antisemitismus’ als Prinzip auf ihre Fahne zu schreiben...”

② 玛丽·居里和奥斯特瓦尔德也同时接受了名誉博士学位。

③ 爱因斯坦去布拉格后，坦纳去了巴塞尔 (Basel)。1912 年在那里获得学位。另一位学生舒普 (Hermann Schüpp) 的博士论文题目是赫尔佐格 (Albin Herzog) 在爱因斯坦到苏黎世前指定的，爱因斯坦是审定人。这篇论文 1909 年 12 月 21 日被教授委员会接受 [D1]。

的爱因斯坦不太注意打扮 裤腿短小 带着名片大小的纸片 上面记着讲课纲要 [S2]。后来,爱因斯坦常说他不喜欢教书。“他 [爱因斯坦] 显然乐于向别人解释他的思想,而且讲得很好,因为他凭直觉思考,而不在乎语言形式。他讨厌的大概是上课需要准备和提出一些材料,而他有时对这些东西并不感兴趣,正因为此,备课可能会扰乱他自己的想法” [S3]。

1909年10月到1911年3月在苏黎世期间,爱因斯坦发表了11篇理论物理学论文,包括一篇讨论临界乳光现象的论文。他还是位积极的实验家,在伯尔尼时他就发表过一篇文章,提出一种用以测量微小电势差的仪器的设计思想 [E4]。他也曾在伯尔尼尝试根据这个想法,“在我用原始办法拼凑起来的小静电实验室里”进行实验 [E5]。爱因斯坦的奥林匹亚科学院的伙伴康拉德·哈比希特 (Konrad Habicht) 和兄弟保耳 (Paul) 也很感兴趣。在苏黎世大学实验室,他们造了一台“Maschinchen”(小机器)这是爱因斯坦亲切地为他们的小发明起的名字。哈比希特兄弟在论文中说:“这个……实验是同 A. 爱因斯坦一起做的” [H1]。爱因斯坦还对它的改进满怀兴趣 [E6]。(关于这个小机器更详细的情况,请看第29章。)

1911年3月,爱因斯坦一家移居布拉格。那时一家四口人。1910年7月28日,阿尔伯特和米列娃的第二个儿子出生了。他们给孩子起名爱德华 (Eduard) 叫他“特德”(Tede) 或“特德尔”(Tedel);他们对两个孩子的爱称是“die Bärchen”(小熊)“爱德华模样随他父亲,也有父亲的音乐天赋,也从母亲那里继承了忧郁气质” [S4] 后来,爱德华曾热衷于艺术。他写过诗,想当一名精神分析专家,又想研究医学,但他没能实现这些目标。他的生活结

局很不幸。<sup>①</sup>

## 10b. 三年半的沉默

爱因斯坦第一次表达等效原理是在 1907 年。1915 年，他提出我们现在知道的广义相对论。这是很久以前，我从泡利为百科全书写的文章就知道的；从那篇文章我还知道，爱因斯坦在得到他的最后形式之前，“nach langen Irrwegen”，曾走过很长一段时间的弯路 [P2]。于是，在我的想象里，出现一个埋头于 1907 年新思想的爱因斯坦从 1907 年到 1915 年，他不停地奋斗，为着将匀速运动下的不变性向一般运动下的不变性的推广纳入一个羽翼丰满的理论。直到我读了他的论文，特别是他在那个时期的通信后，我才发现自己错了。

从 1907 年 12 月到 1911 年 6 月(他定居布拉格后几个月)爱因斯坦在引力问题上一直保持沉默。

我们可以为他的沉默找很多理由。这段时间，他经历了巨大的变化。家里多了个新生儿；他的工作也变动了 3 次 从伯尔尼的技术专家到无薪讲师，再到苏黎世的副教授，然后，我们马上会看到，他将成为布拉格的正教授。他还有了研究物理学的新作风：与人合作。先同劳博，接着同哈比希特兄弟，然后同霍普夫 (Ludwig Hopf)。另外，讲课也占去他不少时间和精力：“我简直被课程占有了，真正的空闲时间比在伯尔尼还少” [E7]。所有这些因素，都

海 伦·杜卡斯告诉我，爱因斯坦很早就发现小儿子有精神分裂的征兆。爱德华被送进苏黎世的布格霍尔茨里 (Burghölzli 精神病医院，1965 年死在那里。

会影响他离开研究的主题。这段时期，爱因斯坦声名鹊起，他第一次与物理学界建立了部分往来。这样的环境，常会使创造性思维的紧张松弛下来。对别人来说，这些事情综合起来，很可能足以打消启动一个真正的新的重大研究计划的念头。然而，我想这对爱因斯坦对引力的沉默几乎没有什么影响。

事实上，即使他在引力问题上沉默，但对整个物理学，他一点儿也不这样。新问题的研究在这期间仍然继续着。他和劳博一起研究狭义相对论，和霍普夫一起研究经典辐射理论，还写了关于临界乳光的艰深的论文，发明了他的小机器。更重要的是，他还写了我们已提到过的、富有高度创见内容的关于量子物理学的论文。这些工作很难令人想象，他已经离开了物理学主流，没有时间认真思考问题。

当然 我们并不奇怪 爱因斯坦在 1908 年到 1911 年间没有发表任何关于引力问题的新东西，这只能说明他想过这个问题，但没有发现什么可以交流的新思想。非常令人奇怪的是，他两次总结相对论时都没有谈到引力或等效原理及其主要结果：红移和光线弯曲。第一次总结是他在萨尔茨堡会上的报告，考察了相对论，“我只想谈它的一个结论（即  $E=mc^2$ ）[E3] 不过 报告的主题是量子理论，而不是相对论。第二次总结是在 1910 年，那是一篇详尽的报告，印稿有 44 页 [E8]。它没有提到相对加速的系统，这也不太奇怪。即使狭义相对论，在当时也是新的，把它限定在匀速相对运动的情况下讨论，似乎是明智的。

然而，我发现了一个非常有意义的事实，它用教学的动机是解释不了的。爱因斯坦一生都喜欢给同事和朋友写信，讨论当时他认为重要的科学问题。他的信坦白真诚，令人耳目一新，和朋友们

共享新思想产生的快乐，分担疑难带来的烦恼。事实上，照爱因斯坦的作风，假如在 1908 年和 1911 年之间，引力问题真的困扰着他，我相信，他会用自己的话向朋友这样说的：我正专注于引力问题，它使我迷惑 毫无着落。然而 就我所知 他在这一时期的科学通信中，只有一次提到了引力及有关的新问题。这些信也清楚地向我表明，爱因斯坦对等效原理及其结果沉默的原因是：占据他头脑的不是引力，而是量子理论。

还有些例子可以说明，爱因斯坦那时是多么强烈地关注着量子物理学。1908 年，他给劳博写信说：“我正不停地忙于辐射的构成问题……这一量子问题异乎寻常地重要和困难，应该受到每个人的关注。我确曾发现一些在形式上与 [量子理论] 相呼应的东西，但我有确凿的理由认为它们是毫无意义的” [E9]。1909 年 7 月 他给斯塔克的信说：“你简直不能想象 为寻求一种令人满意的量子理论的数学处理方法，我遇到了多大的麻烦” [E10]。1909 年 11 月，他给贝索的信说：“关于光量子，考虑太少，也不成功” [E11]。一个月后，他又写信给贝索说，他试图修正麦克斯韦方程，以使新的方程有光量子解：“这里也许有光量子问题的答案” [E12]。同一天，他给劳博写信：“我还没有发现光量子问题的解决办法，然而我倒想看看我是不是能解决这个迷人的问题” [E13]。<sup>①</sup> 1910 年 3 月，他又对劳博说：“我已经发现了关于量子的一些有趣的东西，但还没有做成任何事情” [E14]。

1910 年夏，爱因斯坦写信给劳博谈了他的长篇评论 [E8]：“ [这篇文章] 只是相当广泛地揭示了相对论的认识论基础”

① Ich will sehen ob ich dieses Lieblingsei doch nicht ausbrüten kann.

[E15]。这本来是考虑新的等效原理的认识论的好机会，但爱因斯坦没有那么做。在几句话之后，他却说：“关于光的结构问题，我还没有走得更远。”11月，他再次写信给劳博说：“最近，我很希望解决辐射问题……”[E16]。一个星期以后，他又给劳博写信：“关于光量子问题的答案，我还是没有得到”[E17]。12月，他对劳博说：“辐射之谜还没解开”[E18]。最后，1911年5月，当他打算暂时放弃这个问题时，他写信告诉贝索：“我不再问量子是否真的存在，也不打算再去构造它们，因为现在我知道，照这种方法，我的头脑是不可能理解这个问题的”[E19]。

一个月后，也就是1911年6月，他回到了引力理论。

如果认为爱因斯坦在那三年半的时间里根本没有思考过引力问题，那当然是荒谬的，在得到苏黎世的职位前，他从伯尔尼给索末菲的信说明，他确实是考虑过的：

因为相对性原理向匀速转动系统的推广，对匀速转动的刚性物体的处理，对我来说是非常重要的。我在我的[1907年]论文……的最后一部分，曾试图为匀加速运动寻求过实现这一推广所需要的一系列思想。 [E20]<sup>①</sup>

选出来的这段话尽管重要，但也不能使我改变我的意见：爱因斯坦在这个时期的精力集中在别的方向上。爱因斯坦本人在晚年也不愿向别人谈他这一时期的引力思想。1933年6月，在格拉斯哥

<sup>①</sup> 也可以参阅[S5]。在下一章，我将回来讨论这个转动物体的问题对爱因斯坦思想的影响。

(Glasgow) 发表的关于广义相对论起源的吉布森 (Gibson) 演讲中, 他说:

如果 [ 等效原理 ] 对所有过程都正确, 它表明, 如果人们希望获得一种自然而然的引力场理论, 那么相对性原理必须推广到包括非匀速运动的坐标系中去。从 1908 年到 1911 年, 我本人曾集中考虑过这个问题的本质, 在这里就不多讲了。[E21]

在他 1949 年写的重要的科学自传里 [ E22 ], 他还是不谈那特殊的几年。在他去世前几个月写的自传片段里, 有这样的话: “从 1909 年到 1912 年, 我不得不在苏黎世大学和布拉格大学教理论物理时 我一直被这个 [ 引力 ] 问题迷惑着 ” [E23]。确实这一点也为他 1911 年下半年给朋友的信所证实, 但那以前的信却说明不了什么。事实上, 似乎很明显, 在去布拉格以前, 他以为——应该说有很多原因——量子理论的疑惑远比引力问题更重要、更急切。相反, 从他到布拉格时候起直到 1916 年, 他只有几篇量子理论的短文, 而这时的通信却清楚地表明, 引力论牢牢地占据了头脑。即使不说强烈醉心于引力论是爱因斯坦没有立即参与由玻尔 1913 年所发起的新的量子动力学的惟一原因, 但那一定也是一个很重要的因素。

下面让我们跟爱因斯坦去布拉格。

#### 参考文献

D1. C. Dür, letter to R. Jost, November 29, 1979.



- E1. A. Einstein, letter to M. Besso, January 1903; *EB*, p. 3.
- E1a. —, letter to M. Grossmann, January 3, 1908.
- E1b. M. Einstein, 'Beiträge zur Überlieferung des Chevaliers du Cygne und der Enfanse Godefroi,' Druck, Erlangen, 1910.
- E2. A. Einstein, *Phys. Zeitschr.* **10**, 185 (1909).
- E3. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 817 (1909).
- E4. —, *Phys. Zeitschr.* **9**, 216 (1908).
- E5. —, letter to J. Stark, December 14, 1908. Reprinted in A. Hermann, *Sudhoffs Archiv.* **50**, 267 (1966).
- E6. — in *EB* pp. 42, 47, 464.
- E7. —, letter to M. Besso, November 17, 1909; *EB*, p. 16.
- E8. —, *Arch. Sci. Phys. Nat.* **29**, 5, 125 (1910).
- E9. —, letter to J. Laub, 1908, undated.
- E10. —, letter to J. Stark, July 31, 1909. Reprinted in A. Hermann, [E5].
- E11. —, letter to M. Besso, November 17, 1909; *EB*, p. 16.
- E12. —, letter to M. Besso, December 31, 1909; *EB*, p. 18.
- E13. —, letter to J. Laub, December 31, 1909.
- E14. —, letter to J. Laub, March 16, 1910.
- E15. —, letter to J. Laub, Summer 1910, undated.
- E16. —, letter to J. Laub, November 4, 1910.
- E17. —, letter to J. Laub, November 11, 1910.
- E18. —, letter to J. Laub, December 28, 1910.
- E19. —, letter to M. Besso, May 13, 1911; *EB*, p. 19.
- E20. —, letter to A. Sommerfeld, September 29, 1909.
- E21. —, 'The Origins of the General Theory of Relativity.' Jackson, Wylie, Glasgow, 1933.
- E22. — in *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (P. A. Schilpp, Ed.). Tudor, New York, 1949.
- E23. — in *Helle Zeit, dunkle Zeit* (C. Seelig, Ed.). Europa Verlag, Zürich, 1956.
- F1. M. Flückiger, *Einstein in Bern*, pp. 114ff. Paul Haupt Verlag, Bern,

- 1974.
- F2. —, [F1], p. 123.
- F3. —, [F1], p. 118.
- H1. C. and P. Habicht, *Phys. Zeitschr.* **11**, 532 (1910).
- P1. W. Pauli in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, p. 149.
- P2. — in *Encyklopädie der Mathematische Wissenschaften*, Vol. V, 2, Sec. 56. Teubner Verlag, Leipzig, 1921.
- R1. G. Rasche and H. Staub, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **124**, 205 (1979).
- S1. Se, p. 166.
- S1a. C. Stoll, letter to H. Ernst, March 4, 1909.
- S2. Se, p. 171.
- S3. E. G. Straus, lecture delivered at the Einstein Centennial Celebration, Yeshiva University, September 18, 1979.
- S4. Se, p. 192.
- S5. J. Stachel in *General Relativity and Gravitation*, GRG Society Einstein Centennial Volume, Vol. 1, p. 1. Plenum Press, New York, 1980.

## 第 11 章 布拉格论文

### 11a. 从苏黎世到布拉格

“我很可能会到一所更大的大学去做教授，薪水也比现在高。不过，我还不知道会去哪里”[E1]这是 1910 年 4 月 4 日爱因斯坦给母亲的信，这时他在苏黎世当副教授还不到半年。他希望卡尔·菲迪南大学（布拉格的一所德语大学）能请他去，但他还得谨慎些 因为 1 月成立的研究委员会到现在还没向教授委员会提建议。委员会主席、爱因斯坦的有力拥护者，实验家兰帕（Anton Lampa）事先向爱因斯坦透露，1910 年 4 月 21 日的报告提出了 3 位候选人，他们都愿意接受正式的职位，爱因斯坦排在第一位。报告援引了普朗克的热情推荐：“[爱因斯坦的相对论工作]不仅在思辨科学，甚至在认识论方面，都大胆地超越了以往所做的一切；相比之下 非欧几何不过是儿童游戏罢了。”接着 普朗克又将爱因斯坦比做哥白尼 [H1]。

消息传开了。1910 年 7 月，Erziehungsrat（教育委员会）向苏黎世州政府呈交报告，报告说，据专家们的意见，爱因斯坦是理论物理学界少有的权威之一；ETH 的学生都来苏黎世大学听他的课 他每周上 6—8 小时的课，而按惯例只有 4—6 小时。报告还提议应该努力把他留在苏黎世，再给他增加 1000 瑞士法郎的年薪。

报告被批准了 [P1]。

然而，爱因斯坦看来是渴望去布拉格的。1910年夏他给劳博写信说：“我没有收到布拉格的邀请。我只是由教授们提过，当局还没有接受，因为我有犹太血统” [E2]。（我没有见过这件事的证明。）10月，他对劳博说，这个职位好像差不多定下来了 [E3] 但12月他又说，他没有得到布拉格的消息 [E4]。不过，1911年1月6日，约瑟夫皇帝陛下 (His Imperial and Apostolic Majesty Franz Joseph) 正式同意这一任命，从4月1日起生效。爱因斯坦收到的通知是1月13日发的 [H1]。就职前他还得填报宗教信仰，他填的“无”没有被接受，他就写“犹太教”(Mosaisch) [F1]。1月10日，他向苏黎世大学写了辞职信，2月10日得到批准 [P2]。2月，爱因斯坦去莱顿见了洛伦兹。3月，他和全家来到布拉格 [S1]。

我很迷惑，爱因斯坦为什么要移居布拉格。他喜欢苏黎世，米列娃也喜欢。在这里，他可以与同事交谈，与朋友演奏音乐。他的薪水提高了，而且他一定也知道按正常经历还有希望晋升，再说，布拉格也不是理论物理学的活动中心。然而，克莱纳给同事的一封信表明，也许另有原因：“在我不久前谈了他的行为之后，他一再想道歉，而我一再加以劝阻），爱因斯坦认为他不能指望得到教授代表们的个人同情了。我个人倒是认为在你重提这事前，尽可以等到他提出辞职……” [K1]。我不知道发生摩擦的原因是什么。

到布拉格不久，爱因斯坦写信告诉格罗斯曼：“这儿有极好的研究机构，我工作很愉快” [E5]。他在苏黎世的助手霍普夫与他同来，但不久接受了亚琛一个较低的职位。霍普夫的后继者是诺赫尔 (Emil Nohel)，有关他的事，我所知道的一点可以在第29章

看到。1911 年夏，贝索来访 [E6]。1912 年 2 月，爱因斯坦与埃伦费斯特第一次在布拉格见面 [K2]。斯特恩在布雷斯劳 (Breslau) 跟萨库尔 (Sackur) 获得博士学位后 [S2] 毛遂自荐 也来到爱因斯坦身边 从 1912 年到 1914 年一直跟着他，先在布拉格，然后去苏黎世。

爱因斯坦给贝索写信说：“我的地位和研究给我带来了许多乐趣。”但又说，“Nur die Menschen sind mir so fremd”(只是我对这里的人太陌生了) [E7]。似乎爱因斯坦在布拉格从来就不太舒畅。每当他到研究所 就有侍者来迎，一边鞠躬，一边自称“您忠实的仆人”，他厌恶这种奴性。他的工作常受些官僚作风的干扰。“为一些最无聊的 Dreck (屁事) 写个没完”，他给朋友的信中这么说 [E5]；又对另一位朋友说：“Die Tintenscheisserei ist endlos” [E7a]。<sup>①</sup> 妻子也不轻松 [F2]。当爱因斯坦在的时候，布拉格有 4 所高等学府：两所综合大学和两个工学院，它们都是其中一所讲捷克语，另一所讲德语。正如斯特恩后来回忆的：“[在这些高校中] 没有一个人能和爱因斯坦谈他真正感兴趣的事情……他在布拉格完全是孤独的……” [J1]。

爱因斯坦在布拉格住了 16 个月，本来他提议埃伦费斯特接替他的位置，可是因为埃伦费斯特拒绝填写宗教信仰，建议被否决了 [K3] 最后，弗兰克在爱因斯坦推荐下获得这个职位，在布拉格一直呆到 1938 年。<sup>②</sup> 下一章我将谈爱因斯坦回到苏黎世以后的事情。不过，现在我们还是先来看看爱因斯坦在布拉格时期的物

德文大意为：“文牍之类的讨厌屁事没完没了。”这是一种不太文雅的说法。爱因斯坦在对待自己不满意的事时，有时也会讲一些这样的话。——译者

<sup>②</sup> 爱因斯坦在布拉格期间的其他情况，请参阅弗兰克的传记 [F1]。

理学。

## 11b. 1911 年，光线弯曲是可测的

物体对远处的光有作用吗？这些作用会使光线弯曲吗？  
这些作用（在其他情况相同时）是否在距离最小时影响最大？

艾萨克·牛顿：《光学》疑问 1<sup>①</sup>

1911 年 6 月，爱因斯坦终于打破了他对引力的沉默 [ E8]。他对 1907 年的结论很不满意 [ E9]。“而且，我现在认识到，那些考虑的最重要的结果之一是经得起实验验证的。”这个结果就是光线的弯曲。1907 年他就知道会有这个现象，然而那时他只考虑借助地球上的实验来观察，而结果是实验太难实现了（今天仍然如此）。现在，他忽然想到，光线被太阳所偏折是可以观测到的。另外，他还报告了其他一些新结论。

结果，1911 年的论文《引力对光传播的影响》收在《相对论原理》(*Das Relativitätsprinzip*) 中，这是一本小册子，1913 年首次出版（英译本为 [ L1]）。它以后的版本包括了洛伦兹、闵可夫斯基、爱因斯坦和外尔对相对论的贡献。<sup>②</sup> 这本书有两个缺陷。第

<sup>①</sup> 牛顿在 1717 年为他的《光学》增加了 31 个疑问 这是第 1 问。7 月 16 日 牛顿为第二版写了声明 II,基本上只有一句话，也许很有意思：“… …为表明我没有把引力看作物体的基本属性，我已加上了关于它的原因的一个疑问；我所以选定以一个疑问的方式提出它，是因为我由于缺乏实验而对它还不满意。”《光学》一书有中译本，周岳明等译，科学普及出版社，1988。——译者

<sup>②</sup> 据英文本翻译的中文本为《相对论原理（狭义相对论和广义相对论经典论文集）》赵志田、刘一贯译 孟昭英校 科学出版社，1980。——译者

一，它没有包含庞加莱的工作。庞加莱 1905 年写的文章太长，确实不适合收入这本小册子，但选一些章节还是容易的，特别是书中洛伦兹的一篇文章就是一篇摘要；第二个缺点是没有爱因斯坦 1907 年论文的简洁的第五部分 [E9]。这一部分应该与他 1911 年的论文收在一起 要么两者都不要 因为 离开他 1907 年用过的近似方法 ]就不可能理解他在 1911 年的更精妙的观点。

在 1911 年论文中，爱因斯坦提醒读者，“即使理论基础是正确的，这里导出的关系也只有在一阶近似下才有效”，但他没有为这些近似的性质作补充说明。他还没有从自己以前的工作中学会重申结论的技巧。

这并不奇怪，在爱因斯坦研究引力之前，他的每篇论文，尽管读者有时得花点力气去读，但都是明白的和自足的（最早的那篇关于统计力学基础的文章可能是例外）。我们已经看到，爱因斯坦早年在各种情况下，并没有费劲地去找别人的文献，但这对于我们理解他自己要表达的内容并没构成特别的障碍。当然，他会随时回到他以前讨论过的题目，但新的作品仍然是自足的。我们知道，有时候他在获得一个新的灵感前，已经经历了长期的冥思苦想，如狭义相对论就是这样。但在最终的论文里，几乎看不出有经过思想斗争的痕迹，而且给人以自我陶醉的印象。从 1907 年到 1916 年，这种轻快感觉和自足的特征没有了。他的写作风格变了。我们看到的是关于进展中的工作的报告，而不是带着终结特征的结论。

让我们回到布拉格的第一篇论文，显然，我首先应该谈谈爱因斯坦所指的近似。他的问题仍然是寻找一种方法来确定匀加速系中同时性的意义。为这个目的，他又一次用了 1907 年的近似方法。这样，我们在第 9 章讨论过的 3 个坐标系  $S$ 、 $\Sigma$  和  $S'$ ，又在

1911 年的论文里出现了。<sup>①</sup> 回忆一下，相对于  $S$  做匀加速运动，而惯性系  $S'$  有且只有一个时刻与  $\Sigma$  重合。如以前讲的，这个技巧的目的在于用洛伦兹变换来联系  $S'$  与  $S$  的钟，然后在微小时间间隔内，将  $S'$  的钟的读数同  $\Sigma$  的等同起来。如我们在第 9 章中所看到的，这个过程是不严密的。这里解释的近似方法，也就是我们现在考虑的论文所运用的。

1911 年的 4 个主题，还是与 1907 年的相同：等效原理、能量的引力、红移和光线弯曲。两篇文章的主要方程也几乎是一样的。然而，爱因斯坦现在对这 4 个问题都有了新的看法。

### 等效原理

令参照系  $S$  静止并有一负  $z$  方向的均匀引力场； $\Sigma$  为无场参照系，以均匀加速度沿正  $z$  方向相对于  $S$  运动。爱因斯坦首先提醒读者，牛顿的力学定律在两个系统中是等价的。接着，他换了一种方式表述这一原理：“在这个参照系中也不能说绝对加速度，正如在通常的〔狭义〕相对论中不能说绝对速度一样（他用的黑体），由此，他得出结论：“按照这个理论，在引力场中一切物体都同样下落是不证自明的（我用的黑体）”。

这个看上去很简单的新说法是有典型意义的。爱因斯坦具有通过反观古代智慧并从中获得新思想的天才。就现在这个例子，他将下面这个推理的逻辑箭头倒转了方向：实验已知下落时间相等  $\rightarrow$  不变的绝对加速度没有意义。这样，1911 年我们第一次看到

<sup>①</sup> 在 1911 年论文中，爱因斯坦用坐标系  $K, K'$  和  $K_0$  分别表示  $S, \Sigma$  和  $S'$ 。为方便叙述，我继续使用他以前的符号。



了爱因斯坦的新计划：从新的引力理论导出等效原理。这是不能在他所谓的通常的相对论即狭义相对论的框架中完成的，于是，我们不但要寻找新的引力论，而且还要寻找新的相对论。文章还有一点同样与这个新计划有关：“当然，我们不能以没有引力场的运动状态来取代一个任意的引力场，正如我们不能凭相对性变换将任意运动介质的点变换到静止一样。”这句话在最终的广义相对论中仍然是正确的。

在关于等效原理的说明的最后，爱因斯坦再次强调了这个假设的重大启发意义，它对一切物理现象都是正确的，而不是仅限于质点力学。

### 能量的引力 红移

1907年，爱因斯坦指出，电磁场不仅是惯性能量的源，而且也是等量的引力能量的源（见第9章）。他是通过在 $\Sigma$ 系中研究麦克斯韦方程的结构得到这个结论的。现在他可以详细说明他的结果了，但没有任何像能量的电磁源那么具体的东西可以利用。他的崭新而更广泛的观点是以守恒定律的普遍考虑为基础的。（他说），考虑任一物体增大数量为 $E$ 的能量，按照狭义相对论，它的惯性质量将相应地增加 $E/c^2$ 。这就导致一个“非常满意”的结论：质量守恒定律融入了能量守恒定律（他继续说）现在，设物体的引力质量没有相应的增加，那么我们只好保留单独的引力质量守恒定律，而同时不再有单独的惯性质量守恒定律。“必须认为这是极不可能的。”不仅等效原理的存在 还有能量的引力特征 都标志着狭义相对论的不彻底性。“通常的相对论[本身]没有提供任何论证能使我们得出物体的重量依赖于它所含的能量的结论。”然

而，如果我们另外求助于等效原理的话，这种能量依赖性可以用更普遍的方法导出；我们将证明...…[S 和  $\Sigma$ ] 系等价的假设会产生能量的引力这一必然结果。”然后，他进行了如下论证。（在这里，读者可以重温一下在第 9 章中讨论的坐标系。）

令  $\Sigma$  系的原点有一光接收器  $S_1$  同样在  $\Sigma$  系中沿  $z$  轴正方向距离原点  $h$  处，有一发射器  $S_2$ 。在  $S'$  和  $\Sigma$  刚好重合时， $S_2$  发出大小为  $E_2$  的辐射能，辐射近似地经过  $h/c$  的时间后到达  $S_1$  相对于  $S'$  的速度为  $\gamma h/c$ ， $\gamma$  是  $\Sigma$  的加速度。回想一下， $\Sigma$  内的钟是用惯性系  $S'$  来确定的，因而，爱因斯坦可以用他 1905 年狭义相对论论文中的结果 [E10] 到达  $S_1$  的能量  $E_1$  比  $E_2$  大：

$$E_1 = E_2 \left(1 + \frac{v}{c}\right) = E_2 \left(1 + \frac{\gamma h}{c^2}\right) \quad (11.1)$$

现在，我们来看具有引力场的  $S$  系。在这个参照系中像在  $\Sigma$  中一样，在相同的相对位置放置同样的仪器  $S_1$  和  $S_2$ ，那么，方程 (11.1) 和等效原理给出：

$$E_1 = E_2 + \frac{E_2}{c^2} (\phi_2 - \phi_1) \quad (11.2)$$

这里  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别是位置 1 和 2 的引力势。这是这个迁移过程的能量守恒定律。它暗示能量  $E$  对应着一个引力质量  $E/c^2$  这是所希望的结果。

接着，爱因斯坦用相同的方式处理红移问题。先在  $\Sigma$  中令  $S_2$  发出的光的频率为  $\nu_2$  大约经过  $h/c$  的时间后， $S_1$  收到的光的频率为  $\nu_1$  为寻找  $\nu_2$  和  $\nu_1$  之间的联系，现在来看  $S'$  则著名的线性多普勒效应公式给出

$$\nu_1 = \nu_2 \left(1 + \frac{\gamma h}{c^2}\right) \quad (11.3)$$

等效原理告诉我们，在 S 系中发生的事件为

$$\nu_1 = \nu_2 \left(1 + \frac{\phi}{c^2}\right) \quad \phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (11.4)$$

假定这个方程在非均匀引力场中也成立，令  $\phi_2$  代表太阳， $\phi_1$  代表地球，则  $\phi$  是负的，地球上能看到的红移为  $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-6}$ 。

下面我先打断有关布拉格论文的讨论，以便做两点说明。第一，爱因斯坦为能移导出了方程 (11.2)；然后，他又“全部重头来过”导出了频移方程 (11.4)。这不是偶然的，我相信，他不是只导出这两个方程之一，然后借助于

$$E = h\nu \quad (11.5)$$

导出另一个。他早就跟方程 (11.5) 打过交道了，它不会溜过他的思想；量子理论从来没有从他的思想中溜走过。然而，爱因斯坦的风格永远是，如果他有机会帮助量子理论，如现在这个能移和频移的例子，他总是回避它的。在第 26 章，我还会以一定的篇幅回头来讨论他的这种态度，这是理解他作为物理学家的命运的一条重要线索。

第二，在好的广义相对论教科书中，红移要讲授两次。在第一次，我们会看到红移只是狭义相对论和等效原理的结果。然后，在导出广义相对论的张量方程并理解了等效原理只在小范围内严格成立以后，又会回到红移问题，并且证明，只需要考虑  $g_{44}$  对它在平坦时空下的值的偏离的主要部分，就可以得到前面的结果。如果教材内容足够新，那么它接着会将我们带向精确的二阶效应和这些展开都不再有效的极端情形。为更好地了解爱因斯坦在 1911 年所处的困境，我们应该记住这些。他知道，狭义相对论必将纳入一个更深远的理论，但他不知道该怎么办。为得到方程 (11.1) —

(11.4) , 他小心翼翼地巧妙地利用了他那 3 个坐标系。他很清楚, 这些方程是近似的, 但不知道与什么近似。

## 光线弯曲

我们能测量什么? 怎么去测量? 科学的这个问题有双重意义。首先, 它意味着, 观念上的意义是什么? 它在技术上可行吗? 从这个意义上讲, 爱因斯坦对红移和光线偏折的论述, 在广义相对论出现以前就为它的唯象学指明了方向; 这个问题还有第二个意思: 从原则上说, 什么才是有意义的测量? 在这个意义上, 爱因斯坦也通过他 1905 年对同时性的重新分析而做出了贡献。1907 年在他研究加速坐标系中的麦克斯韦方程时, 他明白, 光速在引力场存在时不再是普适的常数。当他 1911 年回到这个问题时, 他又一次把以前的动力学考虑丢在一边, 而转向对方程 (11.4) 的解释。

“从表面上看 [ 这个方程 ] 似乎表达了某种荒唐的事情。如果光稳定地从  $S_2$  传播到  $S_1$  那么每秒钟内到达  $S_1$  的光为什么会与从  $S_2$  发出的光有不同的周期数呢? 然而, 答案很简单。”明显的麻烦不在周期数, 而在于第二点: 我们必须以极大的小心来考察, 在非均匀引力场中, 我们所说的钟的速率是什么意思? 它需要了解以下 3 个和时间有关的事实:

时钟工厂 用爱因斯坦的话说, 我们必须构造 “gleich beschaffene Uhren” 同时调准的钟。他没说什么做, 不过从他后来的论证来看, 只有如下的过程才有意义: 在一个引力场为常数的 (足够小) 空间区域内建一个时钟工厂, 用一些标准步骤校准这些钟。移动这些钟, 将其中一个 ( $U_1$ ) 移到位置 1, 另一个 ( $U_2$ ) 移到位置 2 等等。

局部实验 观察  $U_1$  所在的位置 1 产生的光谱线频率，把这个频率称为  $\nu(1,1)$  (在 1 产生用  $U_1$  测量)。接着确定  $\nu(2,2)$  (即在 2 产生用  $U_2$  测量的相同光谱线的频率。(爱因斯坦宣称)人们会发现  $\nu(1,1) = \nu(2,2)$ 。“频率与光源和(局部)时钟所在的位置无关。”

[说明 严格地讲 这种说法是不正确的 即使我们还不能计算由局部外引力场所引起的谱线移动(我们还没有量子引力论!)但我们还是确实知道这样的移动必然存在;在我们的邻域内,它应该很小。]

整体实验 测定  $\nu(2,1)$  这是在 2 产生的相同谱线的频率,但它在位置 1 用  $U_1$  测量的。如方程 (11.4) 所隐含的,  $\nu(2,1) \neq \nu(1,1)$  但是,爱因斯坦坚持认为,我们应该继续接受在 2 与 1 之间传播的波峰数与时间的绝对数值无关这一物理准则。这是很可能的 因为 没有什么事情迫使我们假设 ‘同时调准的’ 时钟在不同的引力势 如 1 和 2 下应该同步运行。(回忆一下 时钟校准是在工厂中进行的。)

结论是必然的:方程 (11.4) 与物理准则的一致性意味着,位置 2 的钟  $U_2$  比位置 1 的钟  $U_1$  慢一个  $(1 + \phi/c^2)$  的因子。这当然也和  $\nu(2,2) = \nu(1,1)$  是一致的,因为 2 的谱线频率也以同一因子减小。谱线毕竟只不过是时钟本身。换句话说,由于把钟移到引力场强度不同的地方,结果这些钟就成了 “*verschieden beschaffen*”,不是同时调准的。这就带来一个 “有根本意义……的结果”:

$$c_1 = c_2 \left(1 + \frac{\phi}{c^2}\right) \quad (11.6)$$

① 我相信相同 (the same)这个词不会引起混乱。

这里  $c_1$  和  $c_2$  是位置 1 和 2 的局部光速  $c_1$  和  $c_2$  的差别可以认为是很小的, 这样, 方程 (11.6) 中的符号  $c$  既可以代表  $c_1$  也能代表  $c_2$  ] 这样 爱因斯坦又对了 但是有代价的: 在这个理论中, 光速不变性原理不像……在通常的相对论中那样适用。”

论文最后的结果, 是把方程 (11.6) 用于来自“无限远”的在点源引力场 (即  $1/r$  型的引力势) 中运行的光线的偏折。简单运用惠更斯 (Huyghens) 原理 爱因斯坦发现光线在走向‘无限远’时 会经历角度为  $\alpha$  的向场源的偏转 (用弧度表式):

$$\alpha = \frac{2GM}{\Delta c^2} \quad (11.7)$$

这里  $G$  是引力常数,  $M$  是场源质量,  $\Delta$  是光线经过场源的最近距离,  $c$  是 (真空) 光速。对经过太阳的光线来说  $\Delta \approx 7 \times 10^{10}$  厘米  $M \approx 2 \times 10^{33}$  克 从而  $\alpha = 0''.87$  (爱因斯坦得的是  $0''.83$ )。4 年后 他又给这一结果加了因子 2。

论文结束时, 他向天文学家求助: “迫切希望天文学家注意这里提出的问题, 即使上述考虑看上去似乎没有充分的根据或者甚至是一个冒险。”

从那时起, 爱因斯坦给朋友们写信时, 常倾诉他对引力的希望和恐惧, 就像我们看到的他过去对量子理论的态度那样。完成上面讨论的那篇论文不久, 他给劳博写信说:

对引力的相对论处理产生了严重的困难, 我想, 可能通常形式的光速不变性原理只有在常引力势的空间中才成立。

[E11]

显然，他不太知道在他的最近的工作中应该相信什么。然而，他确信需要新的东西。几个月后，他写信给他的朋友，苏黎世大学法医学研究所所长仓格尔（Heinrich Zangger）：“我刚才还在教那可怜的毫无生命力的力学基础，她是那样的美丽。她的后继者该是什么样子呢？这个 [问题] 在不断地折磨着我” [E12]。

本节结束之前，我想表达我对德国地震记录转换装置专家和天文学家佐尔德纳（Johann Georg von Soldner）的敬意。他在 1801 年第一个回答了牛顿关于光线弯曲的疑问 [S3]。他写道<sup>①</sup>：“我希望，不会有人反对我把光线当作重物来处理……我们不可能认为实际存在并作用于我们的感觉的事物不具有物质特性。”这种渴望激发他去检验那些天文数据的计算会有什么修正。他的计算以牛顿的散射理论为基础，根据这个理论，光由粒子组成。在这个图景下，光被太阳散射的问题就成为牛顿散射理论的一道习题，对于小质量的光粒子，答案与质量无关，正如爱因斯坦的波动计算与光的频率无关一样。佐尔德纳进行的散射计算，代入数据，结果是  $\alpha = 0''.84!!$

1911 年，爱因斯坦还不知道佐尔德纳的工作。实际上，在 1921 年以前，物理学界对佐尔德纳的论文是一点也不知道的。在这动荡的一年中，勒纳德（Lenard）在《物理学纪事》上发表了一篇怀疑爱因斯坦的文章 [L2]，重述了佐尔德纳论文的部分内容，还有一个长长的引言，声称在质-能等价问题上，优先权应该属于哈泽内尔。<sup>②</sup>冯·劳厄很快就注意了勒纳德 [L3]。

<sup>①</sup> 我没有看到他的原文，只看到最近与一些有价值的历史资料一起发表的英译本 [J2]。

<sup>②</sup> 见 7b。

## 11c. 1912 年，拓荒者爱因斯坦

又过了 8 个月，爱因斯坦在引力论上迈出了他的下一步。卡尔斯鲁厄的科学会议、苏黎世的暑期演讲和几篇短文，都挤到同一时间里来，忙得他不亦乐乎。但他主要的精力却又一次被量子理论占去了。不过，这一回不是因为这题目对他更有吸引力，而是因为他承担着义务，要为第一届索尔未会议（Solvay Congress）（1911 年 10 月 30 日—11 月 3 日）准备一个关于量子物理学的主题报告。他写信告诉贝索：“我为我要在布鲁塞尔会议上的胡言乱语感到不安”[E13]。他并不盼望在布鲁塞尔的“巫师们的”子夜聚会（the ‘witches’ sabbath）[E14]。

他发现大会很有趣，特别欣赏洛伦兹主持会议的方式。“洛伦兹有惊人的智慧，行为老练，而且，真是一件活生生的艺术品！在我看来，他是现在理论家中最富才能的一个”[E12]。他对讨论的结果没有印象：“……但是，没人知道什么。一切都会让耶稣会牧师们高兴”[E12]。“会议仿佛令人听到耶路撒冷（Jerusalem）废墟上的哀鸣”[E15]。显然，这些话是对量子物理学违背了传统思想而言的。爱因斯坦最后也讲了话，大会指定他讲的主题是比热的量子理论，实际上他批判地讨论了量子理论的一切问题，众所周知，这些问题存在于对氢原子的威胁和希望还有待揭示的时候，我们到第 20 章再来详细讨论这个题目。至于爱因斯坦的讲话，当然不是胡言乱语。

接着，爱因斯坦一气呵成了两篇关于引力的文章，一篇写于 1912 年 2 月[E16] 另一篇写于 3 月[E17] 在本节中 我们分别称



为 I 和 II)。这是两篇实实在在的理论分析，得费些时间来把握它们的逻辑。不过，它们给人们的印象，与其说是已经完成的成果，还不如说是笔记本里成熟的纲要。文章的风格也是犹豫不决的。原因很清楚 在 1907 年和 1911 年，爱因斯坦已最大限度地将运动学方法向引力问题伸展了。这时候，他从事的是 20 世纪最困难的问题之一：寻找新的引力动力学。他小心翼翼地迈出了第一步。

在这两篇文章里，我们也是最后一次看到卷曲的时间和平直的空间。在爱因斯坦发表的论文中，论文 I 第一次指出了对空间的这种处理

并不是显然可以允许的，但是它包含着最终可能被证明是错误的物理假定；比如 [ 欧几里得几何学的定律 ] 很可能在匀速旋转的系统中不成立，因为在这种系统中存在着洛伦兹收缩，如果用我们的长度定义，那么周长与直径的比应该不同于  $\pi$ 。

然而，爱因斯坦仍然继续坚持平直空间。紧接着刚才的引文再援引一段也许是有意义的，他继续写道：“量杆和坐标轴都应该认为是刚体，即使这样的刚体不可能实际存在”，这也是可以允许的。这些话可能会令人猜想，狭义相对论著名的刚体问题激发爱因斯坦在 1912 年后走向弯曲空间。<sup>①</sup>

关于这两篇文章，不能完全忽略，但也不能说得太多，说多了会产生误导。的确，文章中引力的特殊动力学模型没有留下来，但

<sup>①</sup> 关于这个看法，斯塔切尔 (Stachel) 有更详尽的讨论 [ S4 ]。

那些研究也不是无用的练习。实际上，爱因斯坦在他的思想过程中，为我们留下了许多值得注意的观点和发现。在本章剩下的篇幅里，我就把那些东西列出来，还以 A 到 F 为它们作上标记。不过，在下面的讨论中，我会将技术细节减少到最低限度。

爱因斯坦首先提醒读者回忆他以前的结果：在引力场中光速不是普通常数。

A. “……这个结果排除了洛伦兹变换的普遍实用性。”

我们立刻听到了新的音符（以前他说“用我的话”）：让我们看看洛伦兹变换能带我们走多远？现在他说：“洛伦兹变换是不够的。”

B. “如果我们不限制在光速为常数  $c$  的空间范围内，那么，保持自然规律不变的变换的流形以及等价系统的流形都将更大。但是反过来，那些定律也将更复杂 [1]！”

让我们来看爱因斯坦引力论的第一个动力学算式（Ansatz），这是方程 (11.6) 为他带来的。他还是从  $S(x, y, z, t)$  系中的均匀场与加速的  $\Sigma(\xi, \eta, \zeta, \tau)$  系的比较开始，对于很小的  $\tau$ ， $O(\tau^2)$  可以忽略，他发现

$$x = \xi + \frac{ac}{2}\tau^2 \quad y = \eta \quad z = \zeta \quad t = c\tau \quad (11.8)$$

和一个重要的关系

$$c = c_0 + a\xi \quad (11.9)$$

其中  $c_0$  由原点处的钟确定； $a$  是原点相对于  $S$  的加速度。这样在  $\Sigma$  中  $\Delta c = 0$ 。根据等价性，则在  $S$  中  $\Delta c = 0$ （ $\Delta$  是各坐标系

① 我还是用第 9 章的符号，它们与论文 I 的不同。在  $S$  系中，光速取为单位量。

中的拉普拉斯算子  $\Delta$  “假定  $\Delta c = 0$ ”对一切无质量静态引力场都有效，似乎是合理的。”下一个假定是这个方程在物质密度为  $\rho$  的情况下的修正：

$$\Delta c = k c \rho \quad (11.10)$$

这里  $k$  是常数。场源必须是静止的：“我发现这个方程仅适于物质静止的静态情况” [E18]。

最后这句就引力场方程说的话，并不妨碍关于质点在静态外场  $c$  作用下的运动的研究。（爱因斯坦发现），这样的运动由如下方程决定：

$$d/dt \left( \frac{\dot{x}}{c} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = - \rightarrow \vec{\nabla} c / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (11.11)$$

这里  $v^2 \equiv \dot{x}^2$ 。注意方程在什么意义下满足等效原理，对我们后面的讨论是很重要的：如果  $c$  由方程 (11.9) 决定，那么方程 (11.11) 在加速系  $\Sigma$  中可以转化成没有外力的方程。

在论文 I 中，爱因斯坦用什么方法推导方程 (11.11) 我们用不着关心。但另一方面，注意他在为论文 II 的校样所加的注释中对方程 (11.11) 的说明，则是很重要的。他在这里证明，方程可以从变分原理

$$\delta \int ds = 0 \quad (11.12)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (11.13)$$

推导出来。以前，普朗克曾将方程 (11.12) 用于狭义相对论的质点力学 [P3] 当然在那种情况下方程 (11.13) 中的  $c$  是通常的真空中的不变光速。爱因斯坦很激动：当  $c$  为静态场时，方程 (11.12) 和 (11.13) 仍然适用！

C. “而且，我们在这里还看到，如普朗克在通常的相对论中所表明的那样，分析力学的方程的意义远远超过了牛顿力学的方程。”

可以认为，这种洞察指引着爱因斯坦达到广义相对论的力学方程的最终形式 那时 方程 (11.12) 保留下来了，而方程 (11.13) 则被进一步推广了。

论文 II 主要讨论这样一个问题：在  $c$  满足方程 (11.6) 的假设下，电磁场方程会受到什么影响？除一点说明外，文章的细节没多大意思。场  $c$  当然会进入麦克斯韦方程组，由此，引力场和电磁场之间就存在一种耦合。然而，一般说来，电磁场不是静态的，而根据假设 引力场是静态的。因此“[ 这些方程 ]也许都不精确……因为电磁场可能会影响引力场从而使它也不再是静态的。”

可以想象，我的一些读者在考虑最后这句话时，会像我第一次读论文 II 一样，提出这样的问题：是什么支配着爱因斯坦？他为什么提出静态引力场与非静态麦克斯韦场的耦合，并且希望它能产生合理的结果？我实在应该问他，但实际上在认识他多年以来，我从没留意过这些论文。我只能告诉大家我想象的他可能会给我的回答。

时间大概是 1950 年，爱因斯坦说：“Ja, wissen Sie 是的，您知道）那时在布拉格 就物理学而言 是我一生中最混乱的时期。在写出方程  $\Delta c = k c \rho$  以前，我当然想过用达朗贝尔算子来代替拉普拉斯算子，这样会更优美。然而我决定不这样做，因为我已经知道引力必将使我超出洛伦兹变换，这样的话，我看写成  $\square c = k c \rho$  的形式也没有什么优越性，因为在我看来洛伦兹不变性，特别是在引力的动力学情况下，已不再是显然的准则了。基于这个原因，我从来

不相信亚伯拉罕和其他人那时进行的工作，哦，可怜的亚伯拉罕！必须承认，我没有意识到人们可以导出一个与时间相关的标量引力场方程，它确实满足弱等效原理。哦，不，这同从标量理论得到错误的近日点数值无关。几年后，当我第一次被格罗斯曼和我稍后写出的方程的复杂性吓了一跳时，我又考虑了标量理论。是啊，那时还是有些混乱，但不像在布拉格的时候。在苏黎世，我确信找到了正确的出发点 而且 我也相信 我有论据可以证明 这个标量理论，你知道，即诺德斯特勒姆理论（Nordström theory）是与等效原理矛盾的。但是，我马上又发觉我错了。1914年，我开始相信，诺德斯特勒姆的理论很有可能是对的。

“再回头说布拉格。那时我惟一深信的事情是必须把等效原理纳入基本的方程。你知道吗，那时我甚至连厄缶（Eötvös）的实验也没听说过呢。哦，您知道。嗯，那就是我当时的情形。没有任何类型的悖论，它不像那时的量子理论。柏林的那些关于黑体辐射的实验已经清楚地说明，经典物理学有严重的问题。另一方面，等效原理和牛顿力学却没有毛病，它们相符得很好。不过，我还是确信，牛顿理论虽然成功，但并不彻底；我也没有对狭义相对论失去信心，但我认为它同样是不彻底的。因此，我在布拉格所做的工作大概就是这一类的。我知道我必须重新开始去建立一种引力理论。当然，牛顿理论和狭义相对论都应该在一定的近似意义上重现。但我不知道该怎么做，我站在无人的荒漠上。所以，我决定先分析静态情形，然后将它推广，直到不可避免地得到一些矛盾的结果。我希望这些矛盾能够反过来告诉我下一步该怎么走。Sehen Sie（您看），我那时考虑牛顿理论的方法同今天考虑量子力学的方法没有什么不同。它对我来说，也是一个朴素的理论，我认

为人们应该重新开始，先考虑非相对论的理论，像我在布拉格考虑引力那样……”

我杜撰的话说完了，现在回到 1912 年的论文，展示最后三点。

囊括电磁力的思想迫使爱因斯坦推广方程 (11.10) 中  $\rho$  的意义，因为电磁能有等价的引力质量：

D. 引力场源必须是“随 [局部测量的] 能量密度而增加的有重物质的密度。”

用于带电粒子和电磁场的系统，意味着  $\rho$  应该由一个“力学”项和一个电磁项的和来代替。爱因斯坦用一个新符号  $\sigma$  来记这个和。然而，问题来了。仔细检验后，他发现，这个理论不满足能量和动量守恒定律，“这个相当严峻的结果，令人怀疑这里发展起来的整个理论是否可以接受。”不过，他找到了解决这个疑难的办法。

E. “如果每一能量密度……都产生引力力线的（负）散度，那么对于引力本身的能量密度，它也一定成立。”这使他得到  $c$  的最后方程

$$\Delta c = k \left[ c\sigma + \frac{1}{2k} \frac{(\vec{\nabla} c)^2}{c} \right] \quad (11.14)$$

他接着说明，括号里的第二项是引力场能量密度，它的引入保证了守恒定律的有效性。从这时起，他准备接受引力场的非线性理论！

$c$ -场方程的最后修正，是他的一个重大决定。爱因斯坦写道：“因为 [作为结果] 我背离了无条件的等效原理的基础。”回想一下方程 (11.9) 后面的讨论：使他在无源条件下得到  $\Delta c = 0$  的就是这个方程和等效原理。同样的推理却不适于  $\sigma = 0$  的方程 (11.14) 这意味

在这段虚构的谈话里所指的其他物理学家，都有现实的基础，在以后的章节里可以清楚地看到这一点。

着什么？

F. 看来，[ 等效原理 ] 似乎只有在无限小场才成立……我们对质点和电磁 [ 场 ] 运动方程的推导并没有使人迷惑，因为 [ 方程 11.8) 和 ( 11.9) ] 只适用于无限小的空间区域。

这是等效性只作为局部性原理的正确表述的开端。

我们来总结一下布拉格的论文。<sup>①</sup> 1912 年春，爱因斯坦知道红移和光的偏折。他已经认识到洛伦兹变换的非普遍性还需要更大的不变群；而且物理定律也会相应地更加复杂。根据对原始标量模型的场论的研究，他的注意力转向了力学体系的变分原理  $\delta \int ds = 0$  的普适性问题。他知道，引力场源不仅是有重物质，也可能是场能。他认识到了，引力场能应该作为一个源包括在理论中，引力场方程从而必然是非线性的。他看到，等效原理显然只能局部成立。尽管他还没有引力的理论，但在物理学上，他已经知道很多了。

### 参考文献

- E1. A. Einstein, letter to Pauline Einstein, April 4, 1910.
- E1a. —, letter to M. Besso, March 6, 1952; *EB*, p. 464.
- E2. —, letter to J. Laub, summer 1910, undated.
- E3. —, letter to J. Laub, October 11, 1910.
- E4. —, letter to J. Laub, December 28, 1910.
- E5. —, letter to M. Grossmann, March 1911.
- E6. —, letter to H. Zangger, August 24, 1911.

<sup>①</sup> 在布拉格他还写过第三篇关于  $g$  场的短文 [E19] 将在后面讨论。

- E7. —, letter to M. Besso, May 13, 1911; *EB*, p. 19.
- E7a. —, letter to A. Stern, March 17, 1912.
- E8. —, *AdP* **35**, 898 (1911).
- E9. —, *Jahrb. Rad. Elektr.* **4**, 411 (1907).
- E10. —, *AdP* **17**, 891 (1905), Sec. 8.
- E11. —, letter to J. Laub, August 10, 1911.
- E12. —, letter to H. Zangger, November 16, 1911.
- E13. —, letter to M. Besso, September 11, 1911; *EB*, p. 26.
- E14. —, letter to M. Besso, September 21, 1911; *EB*, p. 32.
- E15. —, letter to M. Besso, December 26, 1911; *EB*, p. 40.
- E16. —, *AdP* **38**, 355(1912).
- E17. —, *AdP* **38**, 443(1912).
- E18. —, letter to P. Ehrenfest, June 7, 1912.
- E19. —, *Viertelj. Schrift Ger. Medizin*, **44**, 37 (1912).
- F1. P. Frank, *Albert Einstein, Sein Leben und Seine Zeit*, p. 137, Vieweg, Braunschweig, 1979.
- F2. —, [F1], p. 169.
- H1. J. Havránek, *Acta Univ. Carolinae* **17**, 105 (1977).
- J1. R. Jost, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **124**, 7 (1979).
- J2. S. Jaki, *Found. Phys.* **8**, 927 (1978).
- K1. A. Kleiner, letter to an unidentified colleague, January 18, 1911. The original is in the Staatsarchiv des Kantons Zürich.
- K2. M. J. Klein, *Paul Ehrenfest*, Vol. 1, p. 176. North Holland, Amsterdam, 1970.
- K3. —, [K2], p. 178.
- L1. H. A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, and H. Weyl, *The Principle of Relativity* (W. Perrett and G. B. Jeffery, Trans.). Dover, New York.
- L2. P. Lenard, *AdP* **65**, 593 (1921).
- L3. M. von Laue, *AdP* **66**, 283 (1922).
- P1. *Protokoll des Regierungsrates*, No. 1226, July 14, 1910.
- P2. *Protokoll des Regierungsrates*, No. 247, February 10, 1911.



- P3. M. Planck, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **8**, 136 (1906).  
S1. Se, p. 204.  
S2. O. Stern, see *Biogr. Mem. Nat. Ac. Sci.* **43**, 215 (1973).  
S3. J. G. von Soldner, *Berliner Astr. Jahrb.*, 1804, p. 161.  
S4. J. Stachel in *General Relativity and Gravitation*, GRG Society Einstein Centennial Volume, Vol. 1, p. 1. Plenum Press, New York, 1980.

## 第 12 章 爱因斯坦—格罗斯曼合作

纪念马塞耳·格罗斯曼

### 12a. 从布拉格到苏黎世

在前一章我们看到，格罗斯曼是乐于助人的同学，他让爱因斯坦用他的课堂笔记；他也是乐于助人的朋友，他同他的父亲为爱因斯坦铺平了到伯尔尼专利局工作的道路，爱因斯坦把他的博士论文献给了这位朋友。现在我们来进一步熟悉他。

格罗斯曼是一个古老的瑞士家族后代，1878 年生于布达佩斯，那是他父亲工作的地方，他也在那儿长到 15 岁，然后到瑞士，在那儿念完中学。随后，从 1896 到 1900 年在 ETH 与爱因斯坦同学。接着的 7 年里，他在中学教书，先在弗劳恩费尔德 (Frauenfeld)，然后在巴塞尔。这期间，他完成了“共线结构的度量特性”的学位论文，那是他最喜欢的课题。这些论文有优美的平面几何结构，据说，这些结构至少得到过希尔伯特的赞赏 [S1]。经过 6 年的歇息以后，1910—1912 年他又发表了 4 篇相关的论文，并因此获苏黎世大学博士学位。他还出版了为中学生写的两本几何书，还有 3 篇关于非欧几何的论文，并将其中一篇提交给 1912 年 8 月在英国剑桥召开的第 15 届国际数学家大会 [G1]。剑桥会议几个月后，他开始与爱因斯坦合作，上面提到的那些论文，就是合作以

前的全部科学成果。显然，他以前的研究与微分几何或张量分析没有任何关系。

格罗斯曼同时还是苏黎世 ETH 的数学教员，先是代职，1907 年正式成为几何学教授。不久，他着手为中学教师组织暑期课程。1910 年，他成为瑞士数学会的创立者之一，第二年他被任命为 ETH 数学物理系主任。

年轻的系主任做的第一件事，就是打听爱因斯坦是否乐意回苏黎世到 ETH 来。格罗斯曼的信已经不见了，但爱因斯坦的回信还在：“原则上说，我当然打算接受 [ETH] 的教职。有希望回苏黎世，我感到非常快乐，它使我最近几天没有接受来自乌得勒支大学的邀请”[E1]。看来格罗斯曼的第一步行动有结果了，然而，还应该快些行动。爱因斯坦现在成了热门人物。乌得勒支的邀请是“太阳物理学最有创见的代表人物之一”[E2] 的朱立叶斯 (Willem Julius) 发出的，这不过是爱因斯坦 1911 到 1912 年收到的几个邀请的第一个，这些邀请都没使他动摇，他想去的是苏黎世。甚至在官方采取任何动作之前，他就给仓格尔发了电报：“Habe Grossmann zugesagt”，已经答应了格罗斯曼 [E3]。仓格尔忙给当局写信，催他们赶快行动，特别是因为他听说维也纳的邀请可能也要来了 [S2]。爱因斯坦还写信告诉仓格尔，纽约哥伦比亚大学也请他 1912 年秋去讲学（他谢绝了）[E4]。

1912 年 1 月 23 日，ETH 当局向联邦内政部建议为爱因斯坦提供为期 10 年的职位 [S3] 随信附有包括玛丽·居里“我们有充分理由对他寄予最高希望，从他身上，我们看到了一个未来最优秀的理论家”和庞加莱的推荐信（第 8 章已说过了）政府很快接受了建议。2 月 2 日，爱因斯坦写信给斯特恩：“两天前我收到 ETH

的邀请 halleluia 哈里路亚!)我已经宣布要离开我的 k. k.<sup>①</sup>了'[E5]。就这样,1912 年秋,爱因斯坦开始了他科学生涯的新时期。

这段时期只过了 3 个学期。其实,在他来苏黎世以前,柏林就在他招手了。1912 年春,帝国物理技术研究所(Physikalisch Technische Reichsanstalt)的著名所长瓦尔堡(Emil Warburg)请爱因斯坦去他的研究所。这时,苏黎世的职位已经正式办理好了。在决定去 ETH 之后,维也纳的邀请也来了。“到苏黎世前,我不想考虑任何事情。”爱因斯坦在给仓格尔的信中这么说。他已经向仓格尔说过柏林和维也纳的建议[E6]。

这时候,一个人来到爱因斯坦身边,改变了他的思想,也许他还改变了他的命运,那人就是洛伦兹。在 1911 年 10 月的索尔未会议期间,洛伦兹问爱因斯坦,去乌得勒支怎么样[L1]。也许,爱因斯坦不明白,洛伦兹是否真愿意让一个外国人在乌得勒支占上个位置。不管怎么说,一回到布拉格,他就给洛伦兹写信:“我怀着沉重的心情给您写这封信,就像一个孩子做了对不起父亲的事……”又说,“如果我当初知道您真想让我去乌得勒支,我一定会去的”[E7]洛伦兹回信说,爱因斯坦应该愉快地以良好的精神状态去接受苏黎世的位置[L1]。不久后,慈父般的洛伦兹又讲话了。1912 年 2 月 29 日,爱因斯坦写信告诉仓格尔:“洛伦兹叫我去莱顿接替他的位置,而问题是我已经答应了苏黎世,如果不是这样,我就到那里去了”[E8]。莱顿的职位给了埃伦费斯特,从 1912 年

<sup>①</sup> k. k. = kaiserlich und königlich = imperial and royal (帝国的和皇家的)这两个形容词指奥-匈帝国。(布拉格当时属于奥地利。——译者)

秋开始上任。1913年的某个时候，爱因斯坦给埃伦费斯特写了封信，信里一定随处有令收信者回味的东西：“那一次洛伦兹召唤我时，我禁不住大吃一惊 [E9]。

## 12b. 从标量到张量

1912年8月，爱因斯坦全家回到苏黎世。这月10号，他们登记户口，定居在霍夫街（Hofstrasse）16号。10日和16日间的某一天，爱因斯坦认识到，黎曼几何是我们现在所谓的广义相对论的最恰当的数学工具。这次顿悟的影响，将改变他后来对物理学和物理学理论的总看法。接着的3年，是他科学生涯中最艰难的时期。

为了理解1912年8月发生的事情，我们必须知道，爱因斯坦在到苏黎世以前就已经有了一个结论：必须抛弃布拉格时的以单纯的标量 $c$ -场对引力场进行的描述，而需要一种新的物理时空的几何学。我确信，他到苏黎世时已经知道，必要的引力势不是1个而是10个。这个看法的根据，有爱因斯坦在论文里的一些说明，有我对他在1912年3月至8月16日期间的通信的研究，这些信现存于普林斯顿的爱因斯坦档案馆。同时，还有我本人和斯特劳斯（Ernst Gabor Straus）回忆的与爱因斯坦的谈话。施特劳斯在1944—1948年间曾是爱因斯坦的助手。

我们先回忆一下，前一章讨论过的爱因斯坦1912年论文中的第二篇 [E10]是在3月完成的。那月底，爱因斯坦写信给贝索：“最近，我正狂热地研究引力问题，现在已经到了可以考虑静态情况的时候。不过，关于动力场的情况，我还一点儿也不知道，那只

能是下一步的事了……每迈一步都极端困难” [E11]。<sup>①</sup> 然而，他对完成的静态情况的那一部分的最初反应是非常肯定的。他从布拉格写信告诉埃伦费斯特说：“对引力的静态情况的研究完成了，令我非常满意。我真的相信已经发现了一点真理。我现在正在考虑动力学的情况，还是从特殊走向一般” [E12]。这封没署日期的信，一定写于 1912 年，而且极可能在 5 月中旬以前，因为从那以后，爱因斯坦已经不那么确信了。5 月 20 日他给仓格尔写信说，“对引力的研究已经产生了一些令人满意的结果，尽管直到现在我还不能超越引力的静态情形” [E13]。不久后，困难出现了：“引力论的进一步发展遇到了巨大的障碍” (... stösst auf grosse Hindernisse)[E14]。这封给仓格尔的没有日期的信还提到冯·劳厄 X-射线衍射的发现。因为爱因斯坦 6 月给冯·劳厄写了贺信 [E15]，因此这封信很可能是同月写的。还有一封信，肯定是 6 月写的，有相同的话：“[静态情况的]推广显得十分困难” [E16]。他在反复谈这些困难时，从来没有对他关于红移和光线弯曲的结论表示过怀疑。他从没动摇过自己的信念：这些现象将是未来物理学的一部分。例如，他在 6 月写道：“关于放弃光速不变性原理，同事们会怎么说呢？维恩试图通过能量的引力 [行为] 来解救自己，然而，这是站不住脚的鸵鸟政治” [E16]。就我的理解，爱因斯坦确信自己走在正确的方向上，但他逐渐认识到还缺少一些基本的理论工具。

爱因斯坦 1912 年 7 月在布拉格写的最后一篇文章里有段简洁而意义深远的话，表明他正走近新的东西。这篇文章（是反驳亚

<sup>①</sup> 这封重要信件没有收入《爱因斯坦—贝索通信集》。

伯拉罕的 我以后还会来谈它 有这样的句子：“时空坐标的简单物理解释将不得不丧失，而现在我们还不能把握普遍的时空变换方程会具有什么样的形式 [我用的黑体]。我要请所有的同事都来关注这个重要问题！”[E17]。注意这句话末尾的惊叹号。我不知道这个符号在爱因斯坦文章里能找到多少，但我知道它是难得出现一回的。

我们说过，爱因斯坦在 8 月 10 日登记成为苏黎世居民。 8 月 16 日，他给霍普夫写信，没有说极端的困难和巨大的障碍。相反，他写道：“Mit der Gravitation geht es glänzend. Wenn nicht alles trägt habe ich nun die allgemeinsten Gleichungen gefunden” [E18].<sup>①</sup>

1912 年的 7 月和 8 月初到底发生了什么呢？

关于这个故事，爱因斯坦讲过两段话。在京都演讲（1922 年 12 月）中他说，“如果所有 [加速] 系都等价 那么欧几里得几何就不能对它们都成立。抛弃几何而保留 [物理] 定律，就像表达思想而不用语言。我们在表达思想以前必须寻找语言，那么，现在的情况下我们应该寻找什么呢？这个问题，直到 1912 年我才发现是可以解决的。那时，我突然意识到高斯的曲面理论为解开这个谜提供了钥匙。我感觉他的曲面坐标系具有深刻的意义。然而，我还不知道那时黎曼已经用更深刻的方法研究过它的几何基础。我忽然回想起，我当学生时，盖泽尔教的几何课程里就包括了高斯的理论……我感到几何基础有物理意义。当我从布拉格回到苏黎世

<sup>①</sup> “引力进展非常顺利。如果说它不是幻景，那么，我现在已发现了最一般 (*most general*) 的方程。”爱因斯坦的一位传记作者用 *general* 来代替 *most general*[S4] 是对这个关键词句的一个非同寻常的改动。

时，我亲爱的朋友、数学家格罗斯曼也在那里。从他那里，我先学了里奇的几何，然后又学黎曼的。于是，我问我的朋友，我的问题能不能用黎曼理论来解决 [我用的黑体]，也就是说，线元不变量不能完全决定那些我正在寻求的量？”[I1]。

至于盖泽尔的影响，<sup>①</sup>我们知道爱因斯坦至少听过他的一些课 [K2]。爱因斯坦在弥留之际还念念不忘盖泽尔关于“*Infinitesimalgeometrie*”(无穷小几何学)[E19]的令人着迷的课程 [S5]。格罗斯曼的课堂笔记(保存在 ETH 表明盖泽尔讲过高斯的曲面理论。

我认为，第一次与微分几何的邂逅，对爱因斯坦 1912 年的思想只起到了次要作用。在与爱因斯坦在布拉格进行的长谈中，数学家皮克 (Georg Pick) 猜想，进一步发展爱因斯坦思想所需要的数学工具，也许可以从里奇 (Ricci) 和勒维 - 契维塔 (Levi-Civita) 的论文 [F1] 里发现。我怀疑这句话那时对爱因斯坦是否会有任何影响。在布拉格的日子里，他当然没有特意去查阅那些重要文献。

关于 1912 年 7 月至 8 月那段时间，爱因斯坦在 1923 年又讲过另一段话：“然而，只是在 1912 年我回到苏黎世以后，我才有了一个决定性的思想，即 [广义相对性] 理论的数学问题与高斯的曲面理论之间存在着类比，但这时我还不知道黎曼、里奇和勒维 - 契维塔的工作。第一次使我注意这些 [工作] 的，是我的朋友格罗斯曼，那时，我向他提出寻找普遍的协变张量的问题，这些张量仅依

<sup>①</sup> 盖泽尔是一位称职的、有影响的数学家，他为提高 ETH 数学系的水平做了大量工作 [K1]。他的继任者是外尔。



赖于二次基本不变量  $[g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu]$  的系数  $g_{\mu\nu}$  的导数 (我用的黑体) [E20].

从这两段话我们看到, 还在布拉格的最后几个星期, 爱因斯坦就已经知道他需要由微分线元

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (12. 1)$$

联系着的协变量和不变量的理论。其中的 10 个量  $g_{\mu\nu}$  将被认为是以一定方式描述引力的动力场。一到苏黎世, 他一定马上把自己酝酿的问题告诉了格罗斯曼。那时, 他一定说过: “Grossmann, Du musst mir helfen, sonst werd’ ich verrückt!” (格罗斯曼, 你一定得帮我, 不然的话, 我会发疯的! [K2]). 爱因斯坦在格罗斯曼的帮助下向黎曼几何的伟大转变, 大概发生在 8 月 16 日的前一周, 这是他给霍普夫的信所表明的。

这些结论同我本人回忆的与爱因斯坦的一次谈话是一致的。那次谈话中, 我问他同格罗斯曼的合作是如何开始的, 他的回答我还记得很清楚, 尽管不是原话: 他将自己的问题告诉了格罗斯曼, 并请他去图书馆, 看看是否真有能处理这种问题的恰当的几何。第二天, 格罗斯曼回来了 (爱因斯坦告诉我), 说确实有这样的几何, 即黎曼几何。格罗斯曼很可能查阅了一些文献, 因为我们知道, 他自己的研究领域是远离微分几何的。

爱因斯坦还有几句特别感谢格罗斯曼的话, 我相信它能证实我自己的回忆。这些话是他 1916 年写的广义相对论的第一篇总结的引言的最后几句: “最后 我要在这里感谢我的朋友、数学家格罗斯曼, 他通过他的帮助, 不仅将我从有关数学文献的研究中解放出来, 而且还支持我去寻找引力场方程” [E21]。

最后, 我们来听听施特劳斯的回忆 [S6]。他也记得, 爱因斯

坦在与格罗斯曼相聚前，就已在考虑广义协变问题了。爱因斯坦告诉格罗斯曼，他需要一种能让方程（12. 1）不变的允许最普遍变换的几何学。格罗斯曼回答，爱因斯坦正在找的是黎曼几何（施特劳斯没有想起爱因斯坦请格罗斯曼查阅文献的事）。但是格罗斯曼又说，物理学家不应卷入这场可怕的混乱之中。爱因斯坦接着问，是否还有别的他能用的几何，格罗斯曼说没有了，而且向爱因斯坦指出，黎曼几何的微分方程是非线性的，他认为这是一个糟糕的性质。相反，对最后这一点，爱因斯坦回答，那是它的巨大优点。如果我们还记得，爱因斯坦的布拉格模型已经让他明白，引力场必须是非线性的，因为引力场必须充当它自己的源 [ 见方程（11. 4）]，那么，最后这句回答也就容易理解了。

我们已经讨论了 1912 年 7 月到 8 月初发生了什么事情，现在，我们来看事情是怎么发生的。1921 年，爱因斯坦给出了回答：

[ 如果没有下面的考虑 ] 通向广义协变方程的决定性的一步是不会迈出去的：由于在相对于惯性系旋转的参照系中存在着洛伦兹收缩，决定刚体的定律并不符合欧几里得几何的法则。因此，如果承认非惯性系有同等的地位，就必须抛弃欧几里得几何。 [E22]

让我们跟着爱因斯坦那“决定性的一步”往前走得更远一点。

1912 年 6 月，爱因斯坦从布拉格写信给埃伦费斯特：“等效性 [ 原理 ] 似乎只能在无限小系中成立，从而玻恩的加速有限系似乎不能认为是静态引力场，也就是说，它不能由静止质量产生。从这个意义上讲，旋转的环不能产生静态场，尽管它不随时间变化……

在电学理论中，我的这种情形相当于静电场；另一方面，普遍的静态情形还应该额外地包括与静磁场类似的东西。我还没有走这么远。我发现的方程只能适于静止质量的静态情形。玻恩的有限推广的场不属于我们这里的问题。我还不明白，等效原理为什么对有限场玻恩不成立 [E23]。<sup>①</sup> 爱因斯坦不擅长追踪科学文献，但他显然知道玻恩 1909 年关于刚体的相对论处理的主要论文 [B1]。在 1909 年秋的萨尔茨堡会议上，玻恩关于刚体工作的论文 [B2] 立刻就超过了爱因斯坦本人关于辐射构成的报告 [E25]，我们现在知道，他们两人利用这次机会，讨论了许多共同关心的科学问题 [B2]。正如爱因斯坦给埃伦费斯特的信所表明的，1912 年 6 月，他正在思考玻恩早先的论文。我感到这件事是很吸引人的，因为玻恩 1909 年的形式化的东西很明显地具有黎曼的特色！怎么会有这种事呢！要解释它，真是蛮有意思的。

玻恩论文的两个主要观点是：(1) 将刚性定义为连续可变形介质（忽略所有原子结构特征）的极限性质；(2) 将刚性定义为微分的性质，而不是整体的性质。玻恩首先考虑非相对论牛顿力学的情况。令  $\xi^i (i=1,2,3)$  代表介质中某点在  $t=0$  时刻的笛卡儿坐标， $\xi^i$  与  $\xi^i + d\xi^i$  这两点之间的距离  $ds$  在  $t=0$  时为

$$ds^2 = \sum_{i=1}^3 (d\xi^i)^2 \quad (12.2)$$

令  $x^i(\xi^i, t)$  为  $t=0$  时在  $\xi^i$  的点在  $t$  时的坐标。根据所谓的拉格朗日方法，函数  $x^i$  用以描述流体每一粒子的过程 [L2]。在时刻  $t$ ,

在一篇发表在《法医学季刊》(Quarterly for Forensic Medicine) 上的题为“存在一种类似于电动感应效应的引力作用吗？”[E24] 的短文中，爱因斯坦简要地回顾了他在给埃伦费斯特的信中提到的电磁学类比。这是他为纪念仓格爾的专辑写的文章。它也表明爱因斯坦对自己的结论没多大把握。

无限接近的两点之间的距离由  $ds^2 = \sum (dx^i)^2$  给出。由于

$$dx^i = \sum_j \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} d\xi^j \quad (12.3)$$

我们有

$$ds^2 = \sum_{k,l=1}^3 p_{kl}(\xi, t) d\xi^k d\xi^l \quad (12.4)$$

$$p_{kl}(\xi, t) = \sum_{i,j} \frac{\partial x^i}{\partial \xi^k} \frac{\partial x^j}{\partial \xi^l} \delta_{ij} \quad (12.5)$$

$p_{kl}$  在一般情况下是与时间相关的场, 满足  $p_{kl}(\xi, 0) = \delta_{kl}$ 。在牛顿情况下, 玻恩的无限小刚性条件由  $dp_{kl}/dt = 0$  决定。这是一个不变性条件:  $ds^2$  在任何时刻都保持不变, 而且永远具有欧几里得表达式 [ 方程 12.2 ) ] 所确定的大小。

接着, 玻恩试图通过“相对论拉格朗日方法”将牛顿情况推广到狭义相对论情况, 他引入  $x^\mu(\xi^\mu)$  来代替  $x^i(\xi^i, t)$ ,  $x^4 = ict(\xi^4 = ic\tau$  是原时) 我们有

$$dx^\mu = \sum_{\nu=1}^4 \frac{\partial x^\mu}{\partial \xi^\nu} d\xi^\nu \quad (12.6)$$

闵可夫斯基线元

$$ds^2 = \sum (dx^\mu)^2 \quad (12.7)$$

用拉格朗日坐标表示为

$$ds^2 = \sum A_{\mu\nu}(\xi^\rho) d\xi^\mu d\xi^\nu \quad (12.8)$$

现在, 考虑那样一些世界点, 在以四维速度  $u^\mu$  运动的体积元为  $d\xi^\mu$  的观测者看来, 它们是同时的:  $u_\mu d\xi^\mu \partial x^\mu / \partial \xi^\nu = 0$ 。用这个关系可以从方程(12.8)中消去  $d\xi^4$ , 则(12.8)可以写成带刚性条件  $dp_{kl}/d\tau = 0$  的方程(12.4)的形式。埃伦费斯特 [ E26 ] 和赫尔格洛兹 (Herglotz) [ H1 ] 指出, 玻恩的关于一般运动物体的体积元的相对

论性局部刚体准则可以表达如下：相对于静止的观察者，体积元受到与它的中心瞬时速度相对应的洛伦兹收缩。对我们来说，没有必要讨论这个方法在有限物体的情况下所引起的佯谬——爱因斯坦在 6 月 7 日给埃伦费斯特的信中曾提过这种情况。有兴趣的读者可以在泡利为百科全书写文章 [ P1 ] 里看到更多的关于这个问题的讨论。

玻恩的推理过程可以转述如下：在牛顿情况下，引进一个三维流形，方程 (12.4) 在这个流形上定义了一个黎曼度量。变换 [ 方程 (1.23) ] 是保持  $ds^2$  不变的微分线性变换。 $p_{\mu}$  由介质运动所服从的动力学决定。然后，将这些论证推广到四维。

现在我来说爱因斯坦。直到 1916 年他还在具体的刚体问题上保持沉默 [ E27 ]。然而，会不会是玻恩的形式化工作已经给他带来了广义协变的灵感呢？

不管是不是那样，总之，在第一次同格罗斯曼讨论后，爱因斯坦就找到了通向广义协变的正确出发点。真正的工作从这里开始，艰难的日子还在后头。10 月，爱因斯坦给索末菲写信说：

现在，我整个人都完全被引力问题占据了，我也相信，在这里的一个数学家朋友的帮助下，我会战胜所有的困难。但有一点是肯定的，在我的一生中，我从来没有这么艰难地工作过，我已经变得非常崇敬数学了，它那么微妙的东西对于我这简单的头脑，至今还纯粹是一种奢望。与这个问题相比，最初的相对论不过是儿童游戏。 [ E28 ]

## 12c. 合作

爱因斯坦—格罗斯曼论文（我们在这里叫它 EG）发表于 1913 年 [E29]，有对测量性质的深刻洞察，有正确的广义相对论的方程，也有错误的推理和笨拙的记号。

先谈谈记号。协变张量和逆变张量的概念走进来了，但所有的张量指标都被写成下标。例如，协变度规张量记为  $g_{\mu\nu}$ ，它对应的逆变张量记为  $\gamma^{\mu\nu}$ 。1914 年，爱因斯坦放弃了这些可怕的记号。“按照里奇和勒维—契维塔的方法，我们将这些逆变性质的指标写在上边” [E30]。但即使这个时候，爱因斯坦还是将坐标微分  $dx^\mu$  排除在规则之外，EG 也没有现在的约定，即重复指标自动表示求和，这个规则是爱因斯坦本人在 1916 年引进的 [E31]。后来，他对朋友开玩笑说：“我有一个伟大的数学发现，当求和是对重复出现两次的指标进行时，我总是把求和号省去了... ..” [K2]。我想，如果为了追求历史的准确性而继续使用 EG 的符号，对读者是不会有帮助的，所以我用温伯格 (Weinberg) 关于引力论和宇宙论的书中的记号和约定 [W1]，<sup>①</sup>把 EG 的方程改写成现代的形式。所有可以在那本书中找到的技术细节，我都省略了。

在 EG 中，爱因斯坦感谢马赫给他的思想带来了灵感。关于马赫对爱因斯坦的影响的评论，本身是一个重要的课题，等到第 15 章我再来讲。

<sup>①</sup> 中译本为《引力论和宇宙论》，邹振隆、张厉宁等译，科学出版社，1984。注意，以下文献 [W2-10] 都指这本书。——译者

我们已经看到，等效原理的原始形式（有重物体的引力质量与惯性质量相等）自 1907 年以来，一直是爱因斯坦的指南。像他往常一样，由于对文献了解有限，5 年后他才会知道瓦沙罗什瑙梅尼（Vásárosnamény）的罗兰·厄缶男爵的精确测量，它表明引力质量与惯性质量在很高的精度上是相等的。在 EG 中，他第一次讨论了厄缶的实验，最后指出：“引力质量与惯性质量在物理学上的同一性……具有高度的可能性。”<sup>①</sup>

开场白讲完了，现在来看格罗斯曼对 EG 的贡献。克莱因（Christian Felix Klein 在他的 19 世纪数学史 [K3] 中写道：“爱因斯坦是在克里斯托菲尔—里奇传统（Christoffel-Ricci tradition）中成长起来的。”这部权威著作说明从数学观点来看，广义相对论是从高斯（Carl Friedrich Gauss）开始经过黎曼（Georg Friedrich Bernhard Riemann）到克里斯托菲尔（Elwin Bruno Christoffel）、里奇（Gregorio Ricci-Curbastro）和勒维—契维塔（Tullio Levi-Civita）等人的发展而到达顶点。我希望我的读者能像我一样从阅读他们的原始论文和克莱因的历史著作中获得快乐。我还向大家推荐斯特鲁克（Dirk Struik）关于微分几何历史的文章 [S7]。我自己的任务仅限于说明爱因斯坦是如何“成长起来的”。关于格罗斯曼对 EG 的贡献，我主要参考了克里斯托菲尔 1869 年在苏黎世写的“关于二阶齐次微分形式的变换” [C1] 以及里奇和他的天才学生勒维—契维塔 1910 年的关于“绝对微分计算”的综述 [R2]。

格罗斯曼的贡献主要是对黎曼几何和它的张量计算的清晰说

<sup>①</sup> 关于厄缶的先驱和他的实验的说明，请参阅 [W2]。对关于实验更新的改进结果的记述，请参考迪克（Dicke）及其合作者 [R1] 以及布拉金斯基（Braginskii）和帕诺夫（Panov）的论文 [B4]。

明。而且，他还为爱因斯坦的一些讨论提供了详尽的数学证明。开始，他讨论了线元方程 (12.1) 在下列变换下的不变性：

$$dx^\mu = a^\mu_\nu dx'^\nu \quad a^\mu_\nu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\nu} \quad (12.9)$$

$$g'_{\mu\nu} = a^\lambda_\mu a^\rho_\nu g_{\lambda\rho} \quad (12.10)$$

接着是张量的定义、张量代数的基本计算（如 [W3]）、用度规张量联系协变张量和逆变张量以及协变微分（“Erweiterung”）的描述。回忆一下逆变张量  $V^\mu$  的协变导数  $V^\mu_{; \lambda}$  为

$$V^\mu_{; \lambda} = \frac{\partial V^\mu}{\partial x^\lambda} + \Gamma^\mu_{\lambda\nu} V^\nu \quad (12.11)$$

这里仿射联络“克里斯托菲尔的三指标 (Drei-Indizes) 符号”  $\Gamma^\mu_{\lambda\nu}$  是由下式定义的非张量 [W4]：

$$\Gamma^\mu_{\lambda\nu} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} \left( \frac{\partial g_{\sigma\lambda}}{\partial x^\nu} + \frac{\partial g_{\sigma\nu}}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} \right) \quad (12.12)$$

对 EG 来说，特别有意义的是二阶张量  $T^{\mu\nu}$  的协变散度 [W5]：

$$\theta^\nu \equiv T^{\mu\nu}_{; \mu} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\mu} (\sqrt{g} T^{\mu\nu}) + \Gamma^\nu_{\mu\lambda} T^{\mu\lambda} \quad (12.13)$$

这里

$$g \equiv -\det g_{\mu\nu} \quad (12.14)$$

对于对称的  $T^{\mu\nu}$  我们有

$$\theta_\rho = g_\rho{}^\nu \theta^\nu = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\mu} (\sqrt{g} g_\rho{}^\nu T^{\mu\nu}) - \frac{1}{2} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\rho} T^{\mu\nu} \quad (12.15)$$

这是爱因斯坦讨论能量—动量守恒用过的关系。作为协变微分的又一个例子，应该提到方程 [W6]

$$g_{\mu\nu;\rho} = 0 \quad (12.16)$$

这个关系曾将爱因斯坦引入歧途好长一段时间。



格罗斯曼专门用了一节来讨论反对称张量。他指出, 方程 (12.13) 意味着

$$F_{\nu}^{\mu} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} (\sqrt{g} F^{\mu\nu}), \text{ 如果 } F^{\nu\mu} = -F^{\mu\nu} \quad (12.17)$$

他还指出,  $\epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}/\sqrt{g}$  是从勒维-契维塔符号  $\epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}$  导出的四阶逆变张量。如果  $\alpha\beta\gamma\delta$  是 0123 的偶奇排列, 则  $\epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} = +1(-1)$  在其他情况下, 它为 0。① 结果

$$F^{\alpha\beta} \equiv \epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} F_{\gamma\delta} / \sqrt{g} \quad (12.18)$$

是一个张量, 即  $F_{\gamma\delta}$  的对偶张量。

格罗斯曼的最后一节的开头写道: “引力场微分方程的建立问题, 需要注意微分不变量……和微分协变形式……  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}$ 。”接着, 他为爱因斯坦未来的理论提出了重要的张量: “克里斯托菲尔四指标符号”即现在我们知道的黎曼-克里斯托菲尔张量 [W7]:

$$R_{\mu\nu\kappa}^{\lambda} \equiv \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\kappa}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\kappa}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} + \Gamma_{\mu\nu}^{\eta} \Gamma_{\kappa\eta}^{\lambda} - \Gamma_{\mu\kappa}^{\eta} \Gamma_{\nu\eta}^{\lambda} \quad (12.19)$$

根据这个张量, “可以导出一个关于 [ $g_{\mu\nu}$  的二阶导数的] 二阶张量”, 即里奇张量: 219

$$R_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\lambda\nu}^{\lambda} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\lambda}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\lambda}} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\lambda} - \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} \Gamma_{\lambda\alpha}^{\lambda} \quad (12.20)$$

在论文结束时, 格罗斯曼犯了一个错误, 这一点我在谈爱因斯坦对 EG 的贡献时会转来讨论。关于这个话题, 应该先说明格罗斯曼同意和爱因斯坦合作: “他 [格罗斯曼] 很高兴准备同我在这个问题

为明确起见,  $\epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}$  用局部笛卡尔坐标系定义, 0 代表时间方向, 1, 2, 3 为空间方向。

上合作，但条件是不为物理性质的判断的解释承担责任”[E32]。

爱因斯坦开宗明义地讲，他希望能推广相对论，以使他以前关于非均匀静态引力场中光速的可变性结果能作为一个特例而包括进来 [E33]。未经过任何准备，他立刻转向广义协变性的要求：质点的运动应该由方程 (11.12) 和 (12.1) 决定，我重写一遍：

$$\delta \int ds = 0 \quad (12.21)$$

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (12.22)$$

这些方程在变换 [方程 (12.9) 和 (12.10)] 下应该不变，而  $ds^2$  应该是一个“绝对不变量”，然后，他表述了如我们今天所知的等效原理：存在一个 [方程 (12.9) 型的] 特殊变换

$$dx^\mu = a^\mu_\nu d\xi^\nu \quad (12.23)$$

它将二次形式 (方程 (12.22)) 局域地引到主轴上来：

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} d\xi^\mu d\xi^\nu \quad (12.24)$$

$$\eta_{11} = \eta_{22} = \eta_{33} = -\eta_{00} = 1 \quad \eta_{\mu\nu} = 0, \mu \neq \nu \quad (12.25)$$

这个通过变换而消除了引力场的局部坐标系，就像一个自由下落的无限小实验室。时间和空间的测量，在这个坐标系中可以局域地用狭义相对论的方法进行。结果，如方程 (12.22) 那样，以一般的  $dx^\mu$  表示的自然距离，只有在规定引力场的  $g_{\mu\nu}$  已知的情况下，才可以决定……引力场以确定的方式影响测量物体……”这两句话表达了他的广义相对论的宏大构想。

爱因斯坦用方程 (12.21) 和 (12.22) 来讨论质量为  $m$  的物质分布的能量和动量的性质 ( $m$  是“一个与引力势无关的特征常数”)。特别地，他获得了无压力物质的能量-动量张量的表达式：

$$\theta_{\mu\nu} = \rho_0 \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} \quad (12.26)$$

这里  $\rho_0 = m/V_0$  而  $V_0 = d\xi^3$  为物质分布的静止体积元。接下来,借助格罗斯曼方程 (12.15) 他进一步猜想,能量-动量守恒定律应有一般的协变形式

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\mu} (\sqrt{g} \theta^\mu) - \frac{1}{2} \frac{\partial g^{\mu\nu}}{\partial x^\rho} \theta^{\mu\nu} = 0 \quad (12.27)$$

其中,第二项反映了引力场对物质的作用。

非零质量粒子运动的测地线方程

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\nu\lambda}^\mu \frac{dx^\lambda}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0 \quad (12.28)$$

[ $d\tau = (-g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu)^{1/2}$  为原时] 没有在 EG 中出现(爱因斯坦第一次得到这个方程是在 1914 年)。注意这一点是很重要的,因为这两位作者克服了好多困难才认识到他们的工作和牛顿极限之间的联系。回忆一下关于这个运动方程(12.28) 的极限的发现过程,对以后的讨论是很有帮助的 [W8]: (1) 相对于  $dt/d\tau$ , (在低速运动时) 忽略  $d\vec{x}/d\tau$ ; (2) 令  $\partial g_{\mu\nu}/\partial t = 0$  (静态情况); (3) 写出

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (12.29)$$

只保留  $h_{\mu\nu}$  的一次项 (弱场近似) 则我们得到牛顿方程

$$\ddot{\vec{x}} = -\vec{\nabla}\phi \quad (12.30)$$

这里  $\phi = -h_{00}/2$  是牛顿势, 因此

$$g_{00} = -(1+2\phi) \quad (12.31)$$

不管怎么说, 虽然关于物体运动的讨论不彻底, 但到这一步还是很顺利的, 而且同样的讨论对电动力学也是正确的。事实上, EG 包括了麦克斯韦方程的正确的一般协变形式:

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\sqrt{g} F^{\mu\nu}) = J^\mu \quad (12.32)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\sqrt{g} F^{\mu\nu}) = 0 \quad (12.33)$$

[参见方程 (12.17) 和 (12.18)]。最后还有一个问题：引力场方程本身是怎样的？爱因斯坦正确地猜到：“我们需要的 [牛顿方程的] 推广，应该有如下的形式

$$\kappa \theta_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\nu} \quad (12.34)$$

这里…… $\Gamma_{\mu\nu}$  是……通过基本张量  $g_{\mu\nu}$  的微分运算得到的一个二阶张量。”

于是，麻烦来了。

## 12d. 绊脚石

显然，爱因斯坦与格罗斯曼在找这样一个张量  $\Gamma_{\mu\nu}$  以使牛顿—泊松方程

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho \quad (12.35)$$

作为一种极限情况而出现。关于这一点，爱因斯坦指出，从方程 (12.35) 看 如果我们要求  $\Gamma_{\mu\nu}$  不能有  $g_{\mu\nu}$  的高于二阶导数的项，那是不可能的。对这个错误结论，爱因斯坦进行过两次论证。第一次是在 EG 中他本人写的那部分，可以表达如下：我们需要推广  $\text{div grad}\phi$ ，梯度算符推广为协变微分  $\phi$  推广为  $g_{\mu\nu}$  但  $g_{\mu\nu}$  的协变散度却为零 [方程 (12.16)]！用爱因斯坦的话说，“这些运算 [  $\text{div grad}$  的协变形式 ] 用于  $g_{\mu\nu}$  时……就退化了。从这里似乎可以得出，我们寻求的方程只对一定的变换群才是协变的……关于这个群，我们现在还一无所知。”

第二个论证包括在格罗斯曼写的那部分中，也是错误的。如

我们在前面讲的，格罗斯曼认为，里奇张量 [ 方程 12.20 ) ] 很可能是方程 12.34) 中  $\Gamma_{\mu\nu}$  的候选者，然而，按格罗斯曼的说法，“看来……这个张量不能在弱引力场的特殊情况下归结为  $\Delta\phi$ 。”EG 很勉强地得到这样的结论：引力场方程的不变群只限于线性变换 ( $\partial x^\alpha / \partial x'^\beta$  与  $x$  无关)，从而  $\partial / \partial x'^\mu (g^{\nu\sigma} \partial g_{\rho\sigma} / \partial x^\nu)$  确实像张量那样变换，而且，它在方程 12.29) 决定的弱场极限下归结为  $\square g_{\rho\sigma}$ 。“如果场是静态的，并且只有  $g_{44}$  [ 作为  $\vec{x}$  的函数 ] 变化，那么我们就达到了牛顿引力理论的特例。”令人困惑的方程 (12.16) 就这样避开了！

爱因斯坦还为一般协变的引力场方程的不可能性提出了“物理学论证”。尽管这个论证当然是错误的，但还是相当重要。（他说）考虑将四维时空区域分成  $L_1$  和  $L_2$  两部分 引力场源  $\theta_{\mu\nu}$  [ 参见方程 12.34) ] 仅在  $L_1$  中非零 但  $\theta_{\mu\nu}$  以方程 12.34) 的方式决定整个区域的  $g_{\mu\nu}$ 。构造一个一般协变变换  $x_\mu \rightarrow x'_\mu$  以使在  $L_1$  中  $x'_\mu = x_\mu$  而同时在  $L_2$  中至少有部分  $x'_\mu \neq x_\mu$ ，则在这一部分中， $g_{\mu\nu} \neq g'_{\mu\nu}$ 。场源  $\theta_{\mu\nu}$  保持不变 在  $L_1$  中  $\theta_{\mu\nu} = \theta'_{\mu\nu}$ ，同时，在  $L_2$  中， $\theta_{\mu\nu}$  一旦为零，则将保持为零。于是，一般协变性意味着，对于给定的  $\theta_{\mu\nu}$  分布，存在着不止一个可能的  $g_{\mu\nu}$  分布。“如果——像本文这样——坚持要求  $g_{\mu\nu}$  完全由  $\theta_{\mu\nu}$  决定，那么，我们被迫限制参照系的选择。”（我用的黑体）。（注意，如果变换是线性的，则上面的变换  $x_\mu \rightarrow x'_\mu$  是不允许的！）这个推理是相当正确的，那么错在哪里呢？

爱因斯坦的“物理学论证”是不相关的。 $g_{\mu\nu}$  并不完全由  $\theta_{\mu\nu}$  决定。最简单地说，他的困境在于他不知道比安基恒等式。我们看看方程 (12.34) 的最终形式 要等到 1915 年他才得到这个方程：

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (12.36)$$

这里  $R_{\mu\nu}$  由方程 (12.20) 给出, 而  $R = R^{\mu\nu} g_{\mu\nu}$ 。左端满足 4 个比安基恒等式:

$$(R^{\mu\nu} - 1/2 g^{\mu\nu} R)_{;\nu} = 0 \quad (12.37)$$

由于这些关系, 方程 (12.36) 并不惟一决定  $g^{\mu\nu}$ ——正如麦克斯韦方程组不能惟一决定电磁势一样 [W9]。只有在对应于任意坐标变换  $x_\mu \rightarrow x'_\mu$  的某个变换  $g_{\mu\nu} \rightarrow g'_{\mu\nu}$  下方程才能决定  $g_{\mu\nu}$ 。爱因斯坦还需要知道, 变换的任意性表明了坐标系的选择只是一个方便的问题, 而没有物理意义。到 1915 年他才知道这一点——尽管这时他还不知道比安基恒等式 (参见第 15 章)。

现在我们也理解格罗斯曼在牛顿极限上遇到的困难。利用方程 (12.29) 并定义  $h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - 1/2 \eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta} h^{\alpha\beta}$  则方程 (12.35) 成为

$$\square h'_{\mu\nu} - \frac{\partial^2 h'_{\mu\alpha}}{\partial x^\nu \partial x^\alpha} - \frac{\partial^2 h'_{\nu\alpha}}{\partial x^\mu \partial x^\alpha} + \eta_{\mu\nu} \frac{\partial^2 h'^{\alpha\beta}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (12.38)$$

这一不明显的关系。然而, 我们可以自由选择坐标系, 其中

$$\frac{\partial h'_{\mu\alpha}}{\partial x^\alpha} = 0 \quad (12.39)$$

在静态弱场的极限情况下,  $R_{\mu\nu}$  除  $R_{00}$  外的所有分量都可以忽略, 而 [参见方程 (12.31)]

$$R_{00} \approx \Delta g_{00}/2 = -\Delta\phi \quad (12.40)$$

这正是希望的结果。

爱因斯坦没有马上发觉加在广义协变性上的明显的限制是一个缺陷。他感觉这个问题已经解决了。1913 年初, 他写信给埃伦费斯特说: “引力的事情已经清楚了, 我完全满意 (即引力场方程只有对线性变换才是协变的)”。我们可以证明, 根据物质张量来完全

决定 [ 引力 ] 场的广义协变的方程根本不可能存在。还有什么比从守恒定律得到的必然限制更美妙的呢？”（他用的黑体）[E34]。

爱因斯坦和格罗斯曼的论证，我就大概讲完了。他们通过这些讨论，达到一个混合理论，我们也从中看到一些最终理论的基本要素。我应该略去那些乏味的计算，虽然这些计算为他带来了满足守恒定律的方程 (2.34) 中的  $\theta_{\mu\nu}$  和  $\Gamma_{\mu\nu}$  的具体表达式。他们付出的努力是巨大的。爱因斯坦已经很久没有给埃伦费斯特去信了。1913 年 5 月他写道：“很抱歉！为了引力问题，我实在费了超人的努力。我现在深信，我已经发现了正确的东西，也相信文章发表后，在同行中间会流传一些愤怒的怨言，几周之内这种事情就会出现”[E 35]。

到这里，爱因斯坦通向广义相对论的更崎岖、更惊险的一段路，我们就要走到头了。他从 1907 年的等效原理开始，接着是几年的沉默，然后是关于  $c$  场的布拉格论文，最后，就是同格罗斯曼的合作。在 1913 年这个理论当然离逻辑的完成还很远，但是后来的故事要平淡得多。主要是他认识到广义协变是能够实现的；里奇张量的确是正确的引力方程的线索；另外，还有这个理论的 3 个经典的成功。所有这些，我们将在以后的章节里讨论。

## 12e. 后来发生的事

1905 年，爱因斯坦把他的博士文献给格罗斯曼。1955 年，他又把他最后出版的自传片段 [ E32 ] 献给这位长眠已久的老朋友。本章剩下的篇幅用来简单地谈谈爱因斯坦和格罗斯曼在他们

划时代的合作以后直到爱因斯坦去世前不久的故事。

1913年9月9日，爱因斯坦与格罗斯曼先后在瑞士物理学会的年会上宣读论文 [E36, G2] 这些论文是 EG 的简化，没有什么本质的新内容。他们合作的第二篇也就是最后一篇论文 [E37] 发表时，爱因斯坦已到了柏林。在这篇文章里，他们回到引力方程，提出这样的问题：在  $g_{\mu\nu}$  完全由引力场决定的假设下，可接受的最一般的变换是什么？在 EG 中，他们已经证明，线性变换足以满足这种情况。现在他们发现，某些非线性变换也是允许的（包括各种加速度）。事实上，他们离正确答案更近了：他们用 4 个非广义协变的约束条件来表达他们没有证明的  $g_{\mu\nu}$  惟一决定准则。如我们现在知道的，具有这些性质的 4 个约束（所谓的坐标条件）正是正确的广义相对论所要求的，通过选择某些特殊坐标系以消除  $g_{\mu\nu}$  的不确定性 [W10]。

在接下来的 7 年里，格罗斯曼发表的文章都是关于教育和政治问题的。第一次世界大战期间，他投身于各种社会问题，其中之一就是解救那些当过战俘的各国学生，1922 年到 1930 年间，他又写了 5 篇论文 题目是他最喜欢的 画法几何。

到 1920 年，多发性硬化的征兆已经在他身上出现，到 1926 年，症状更严重了。他的女儿埃尔斯贝特 (Elsbeth Grossmann) 告诉我，从那时起，他说话都很困难。1927 年，他只好辞去 ETH 的教授职务。

1931 年，格罗斯曼写了最后一篇论文 [G3] 是一篇不带公式的辩论文章 他反对平行移动 (勒维-契维塔) 绝对平行性 (嘉当) 和距离平行性 (爱因斯坦) 等一些概念。这篇文章是他听朋友谈爱因斯坦关于统一场论的演讲后写的。格罗斯曼宣称，上面刚提到



的所有概念都可以从逻辑上予以反驳。读这篇文章只会让人感到悲哀。它的内容在他与爱因斯坦的通信中讨论过，虽然友好但却拘谨。爱因斯坦还写信给嘉当，劝他不要公开回答格罗斯曼 [E38]，嘉当同意了 [C2]。<sup>①</sup>

1936 年，格罗斯曼去世后，爱因斯坦给他夫人写了封深情感人的信 [E39] 说格罗斯曼“早年满怀希望 成果累累 晚年命里多难。”说他“是一个模范同学……和老师关系很好……而我呢 孤独寂寞，不满现状，不太讨人喜欢。”他也谈了格罗斯曼帮他找工作：“没有他的帮助 我虽不会死 但也会在精神上崩溃的。”他讲了“10 年之后的狂热合作。”又说：“Aber eines ist doch schön. Wir waren und blieben Freunde durchs Leben hindurch.”<sup>②</sup>

我感到遗憾的是，爱因斯坦没有在格罗斯曼死后立即写篇悼念文章，在这类的事情上，爱因斯坦曾经常表现出他的天才和敏锐。后来他写了。1955 年，他写到了格罗斯曼同他的合作，说格罗斯曼如何“检索文献，并且马上发现那个数学问题已经由黎曼、里奇和勒维-契维塔解决了……黎曼的成就最大。”在这篇文章里，爱因斯坦写道：“在我一生中，至少应该向马塞尔·格罗斯曼表达一次我对他的感激之情……这个愿望，给了我写这篇……自传草稿的勇气”[E32]。

## 参考文献

B1. M. Born, *AdP* 30, 1 (1909).

<sup>①</sup> 这两封信都已收入《嘉当—爱因斯坦通信集》(*Cartan-Einstein correspondence*)[C3]。

<sup>②</sup> 但有一件事情却是美好的，我们曾经是朋友，而且终生都是朋友。

- B2. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 814 (1909).
- B3. —, *Phys. Zeitschr.* **11**, 233 (1910).
- B4. V. B. Braginskii and V. I. Panov, *Soviet. Phys. JETP* **34**, 463 (1972).
- C1. E. B. Christoffel, *Z. Math.* **70**, 46 (1869).
- C2. E. Cartan, letter to A. Einstein, June 24, 1931.
- C3. *Cartan-Einstein Correspondence on Absolute Parallelism* (R. Debever, Ed.). Princeton University Press, Princeton, N. J., 1979.
- E1. A. Einstein, letter to M. Grossmann, November 18, 1911.
- E2. —, *Astrophys. J.* **63**, 196 (1926).
- E3. —, telegram to H. Zangger, November 20, 1911.
- E4. —, letter to H. Zangger, January 27, 1912.
- E5. —, letter to A. Stern, February 2, 1912.
- E6. —, letter to H. Zangger, Spring 1912.
- E7. —, letter to H. A. Lorentz, November 23, 1911.
- E8. —, letter to H. Zangger, February 29, 1912.
- E9. —, letter to P. Ehrenfest, 1913, undated.
- E10. —, *AdP* **38**, 443 (1912).
- E11. —, letter to M. Besso, March 26, 1912.
- E12. —, letter to P. Ehrenfest, 1912, undated.
- E13. —, letter to H. Zangger, May 20, 1912.
- E14. —, letter to H. Zangger, 1912, undated.
- E15. —, postcard to M. von Laue, June 10, 1912.
- E16. —, letter to L. Hopf, June 12, 1912.
- E17. —, *AdP* **38**, 1059 (1912).
- E18. —, letter to L. Hopf, August 16, 1912.
- E19. — in *Helle Zeit, dunkle Zeit* (C. Seelig, Ed.), p. 10. Europa Verlag, Zürich, 1956.
- E20. *Einstein a Praha* (J. Bicak, Ed.), p. 42. Prometheus, Prague, 1979.
- E21. —, *Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*, p. 6. J. A. Earth, Leipzig, 1916.
- E22. —, *Geometrie und Erfahrung*. Springer, Berlin, 1921; also PAW,

- 1921, p. 123.
- E23. —, letter to P. Ehrenfest, June 7, 1912.
- E24. —, *Viertelj. Schrift Ger. Medizin* **44**, 37 (1912).
- E25. —, *Phys. Zeitschr.* **10**, 817 (1909).
- E26. P. Ehrenfest, *Phys. Zeitschr.* **10**, 918 (1909).
- E27. A. Einstein, *AdP* **49**, 769 (1916).
- E28. —, letter to A. Sommerfeld, October 29, 1912. See A. Hermann, *Einstein/Sommerfeld Briefwechsel*, p. 26. Schwabe Verlag, Stuttgart, , 1968.
- E29. — and M. Grossmann, *Z. Math. Physik.* **62**, 225 (1913).
- E30. — *PAW*, 1914, p. 1030.
- E31. —, *AdP* **49**, 769 (1916), Sec. 5.
- E32. — in *Helle Zeit, dunkle Zeit* (C. Seelig, Ed.). Europa Verlag, Zürich, 1956.
- E33. —, *AdP* **38**, 443 (1912).
- E34. —, letter to P. Ehrenfest, 1913, undated.
- E35. —, letter to P. Ehrenfest, May 28, 1913.
- E36. — *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **58**, 284 (1913). An abbreviated version appears in *Verh. Schw. Naturf. Ges.* **96**, 137 (1914), and a French translation in *Arch. Sci. Phys. Nat.* **37**, 5 (1914).
- E37. — and M. Grossmann, *Z. Math. Physik.* **63**, 215 (1915).
- E38. —, letter to E. Cartan, June 13, 1931.
- E39. —, letter to Mrs M. Grossmann, September 26, 1936.
- F1. Ph. Frank, *Albert Einstein; Sein Leben und seine Zeit*, p. 141. Vieweg, Braunschweig, 1979.
- G1. M. Grossmann, *Proceedings of the 5th International Congress of Mathematicians*, August 1912, p. 66. Cambridge University Press, Cambridge, 1913.
- G2. —, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **58**, 291 (1913).
- G3. —, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **76**, 42 (1931).
- H1. G. Herglotz, *AdP* **31**, 393 (1909).
- I1. J. Ishiwara, *Einstein Kōen-Roku*. Tokyo-Tosho, Tokyo, 1977.

- K1. L. Kollros, *Verh. Schw. Naturf. Ges.* **115**, 522 (1934).
- K2. —, *Helv. Phys. Acta Suppl.* **4**, 271 (1956).
- K3. F. Klein, *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert*, Vol. 2, p. 189. Springer, New York, 1979.
- L1. H. A. Lorentz, letter to A. Einstein, December 6, 1911.
- L2. H. Lamb, *Hydrodynamics* (6th edn.), p. 12. Dover, New York.
- M1. C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation*, p. 393. Freeman, San Francisco, 1973.
- P1. W. Pauli in *Encyklopädie der Mathematischen Naturwissenschaften*, Vol. V, 2, Sec. 45, Teubner, Leipzig, 1921.
- R1. P. G. Roll, R. Krotkov, and R. H. Dicke, *Ann. Phys.* **26**, 442 (1964).
- R2. G. Ricci and T. Levi-Civita, *Math. Ann.* **54**, 125 (1901).
- S1. W. Saxer, *Viertelj. Schr. Naturf. Ges. Zürich* **81**, 322 (1936).
- S2. Se, p. 226.
- S3. Se, pp. 227—233.
- S4. Se, p. 242.
- S5. Se, p. 38.
- S6. E. G. Straus, discussion with A. Pais, December 11, 1979.
- S7. D. J. Struik, *Isis* **19**, 92 (1932); **20**, 161 (1933).
- W1. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*. Wiley, New York, 1972 (quoted as W hereafter).
- W2. W, pp. 11—13.
- W3. W, pp. 93—98.
- W4. W, pp. 75, 103—106.
- W5. W, pp. 98, 107.
- W6. W, p. 105.
- W7. W, p. 133.
- W8. W, p. 77.
- W9. W, p. 161.
- W10. W, p. 162.

## 第 13 章 引力场理论：最初 50 年

### 13a. 爱因斯坦在维也纳

没过多久，爱因斯坦就认识到，同格罗斯曼的合作 [E1] 已经带来了一些违背自己初衷的结果。让我们再简单回顾一下，至 1913 年春，他的引力思想有些什么发展。1907 年底，他发现引力在相对论中的奇特地位，认识到问题不在于如何将引力纳入狭义相对论，而在于如何将引力作为一种手段，使理论从匀速相对运动协变性的特殊地位中摆脱出来，走向一般运动的协变性。在布拉格的日子里，他从对光在非均匀引力场中运动的分析中认识到，光速与引力势有关，因而狭义相对论的框架显得过于狭隘 [E2]。离开布拉格前夕，他在思想上已经形成了一般协变性的具体概念，而且，作为引力携带者的度规张量的基本作用也清晰起来。同格罗斯曼一起在引力的张量理论上迈出的第一步，将他们引向这样的结论：引力场方程只有对线性变换才是协变的。

到 1913 年 8 月，他已清楚地感到，那个结论意味着一场灾难。在给洛伦兹的信中，他表达了这种感受：“我对这一理论的可靠性还没有坚定的信心……不幸的是引力方程没有一般协变的性质，只能肯定它在线性变换下是协变的。然而，对这个理论的全部信心都依赖于我们相信，参照系的加速度等价于引力场。这样，如果

不是理论中所有的方程组都……允许非线性变换，那么，这一理论就背离了它自己的出发点 [ 而 ] 一切都成为空中楼阁 ( sie steht dann in der Luft )”[E3]。

类似这样的思想，爱因斯坦大概在去维也纳时就有了。9月23日，他得在那里向自然研究者大会 Naturforscherversammlung 提交一篇论文。<sup>①</sup> 他不仅报告自己的工作，还要报告芬兰物理学家诺德斯特勒姆从1912年发展起来的引力理论。另外，他还要评论一个新近的引力理论，那是亚伯拉罕的（在前面讨论狭义相对论时，我们遇见过他）。他知道，他还将面对一个刚提出来的更进一步的引力理论，这是米 (Gustav Mie) 的。<sup>②</sup> 无论从哪方面讲，1912和1913两年中涌现出来的引力理论，都是爱因斯坦布拉格论文的结果。亚伯拉罕提出，将爱因斯坦静态引力场中光速可变的理论推广到非静态情形。诺德斯特勒姆则提出另一个问题：难道等效原理不能纳入一个光速不变的相对性理论吗？米的理论又是光速为常数的一种情形。然而，1911—1913年的这些活动，从任何意义上说，都并不能标志寻求引力的场理论的开始。作为讨论1913年维也纳会议上的混乱状况的前奏曲，让我们暂时先回到半个世纪以前。

引力场理论的寻找，从麦克斯韦关于引力矢量理论的评说开始。那几句评论，隐藏在他1864年完成的伟大研究报告《电磁学的动力学理论》(A Dynamical Theory of the Electromagnetic

在那次会上，爱因斯坦遇到了科特勒 (Friedrich Kottler)，并赞扬了他。科特勒是第一个以一般协变形式写出麦克斯韦方程的人，尽管与引力理论无关 [K1]。科特勒后来也研究广义相对论，但没什么成绩 [E3a]。

<sup>②</sup> 从亚伯拉罕的一篇回顾 [A1] 中，还可以看到那时以来其他一些人的引力研究。

Field) 中。这部著作的目的是,“解释分离物体间的[电磁]作用,而不需要假设在可感距离内存在着能直接发生作用的力。从而,我提出的这个理论可以叫电磁场理论……”[M1]。在花了约 40 页的篇幅谈论这个问题之后,麦克斯韦忽然转向引力问题:“考察周围介质的作用:磁和电的吸引和排斥,在发现它们都反比于距离的平方后,我们自然会提出这样的问题:遵从同样距离定律的引力是否也能归结为周围介质的作用呢?麦克斯韦又问,但我们又怎么能解释,引力是吸引的而同号电荷间的力却是排斥的呢?他指出,当从电磁的有质动力走向引力的有质动力时,需要一个特设的符号改变(记住这里谈的是一个矢量理论)从而,引力能也需要一个额外的负号这就导致一个悖论:“无论什么地方只要存在净吸引力,致密物体的存在就会影响介质从而减少[介质的]能量。因为我还不能理解介质能以什么方式获得这种性质,所以,在寻找引力起因的方向上,我不能走得更远。”

麦克斯韦这些话语没有引起普遍注意,甚至一些大物理学家也忽略了它。亥维赛讨论过引力—电磁力的类比,但没有提到负能疑难[H1]。同样值得注意的还有洛伦兹 1900 年写的一篇对他来说是少有的推测性文章[L1]。他提出带电粒子 $+e, +e$ 之间的斥力与 $-e, -e$ 之间的斥力相等(但在绝对值上)比 $+e, -e$ 之间的引力略小些。那么,比如我们有两个静止的中性粒子,每个粒子由子单元 $(+e, -e)$ 组成,则它们之间存在剩余牛顿吸引。他的理论体系由两组麦克斯韦方程和有质动力构成(后者带有的系数可以调整到对不同的电荷组合给出希望的行为)。在这篇奇特的文章里,并没有说明存在一个双重的守恒定律,一方面是关于电荷的,另一方面是关于引力的静止质量的。洛伦兹计算了对牛顿定

律的速度相关修正，并进一步估计了它们对水星近日点的影响（太小）。还有几个人也考察过这个理论的结果 [ G1, W1 ]。1908 年，庞加莱将洛伦兹的引力理论作为一个满足狭义相对论要求的场论的例子 [ P1 ]。<sup>①</sup>

到了 1912 年，仍然有必要说明，由于麦克斯韦的负能疑难，所有的矢量理论都没有意义。当时，亚伯拉罕指出，引力振子的平衡态是不稳定的 [ A2 ]；轻微振荡的振幅随着引力场能量的发射而增加；存在的是辐射增益而不是辐射阻尼。这样，当人们的注意力刚转向标量理论时，矢量理论也就被遗忘了。

这段短暂时期始于爱因斯坦 1911 年 6 月的论文，他在文章中表明，在静态引力场中光速能再作为一个普遍的常数 [ E4 ]。半年后，亚伯拉罕第一次尝试将这个结论推广到非静态场 [ A3 ]。他试验了一种不可能的事情：将非常光速的思想纳入狭义相对论。他将质点的牛顿方程  $\vec{K} = -\vec{\nabla}\phi = \vec{a}$  这里  $K$  是作用单位质量引力， $\phi$  是引力势， $a$  是加速度 推广为

$$K_{\mu} = -\frac{\partial\Phi}{\partial x^{\mu}} = \dot{u}_{\mu} \quad (13.1)$$

这里  $u_{\mu}$  是四维速度 点号代表对原时  $\tau$  的微分。设函数  $\Phi$  满足如下形式的方程

$$\square\Phi = \rho \quad (13.2)$$

这里  $\Phi$  和  $\rho$  是标量场。四维速  $u_{\mu}$  满足

$$u_{\mu}u^{\mu} = -c^2 \quad (13.3)$$

<sup>①</sup> 庞加莱在他 1905 年的报告 [ P2 ] 中已经强调过，需要一个相对论性的引力理论。在报告中，他还讨论了这个问题的某些普遍的运动学特征，但没有提出具体模型。关于这些，还可以参阅闵可夫斯基 [ M2 ]。



根据方程 (13.1) 和 (13.3).

$$u^\mu \frac{\partial \Phi}{\partial x^\mu} = \frac{d\Phi}{d\tau} = c \frac{dc}{d\tau} \quad (13.4)$$

因为  $c$  不是常数。由此，

$$c_1^2 - c_2^2 = 2(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (13.5)$$

或者，近似地有，

$$c_1 = c_2 \left( 1 + \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{c^2} \right) \quad (13.6)$$

这就是爱因斯坦 1911 年的方程 [ 参见方程 (11.6) ]。推导中没有用到 (13.2)。这个方程好像对于狭义相对论是不变的，但当然不是这样的 因为  $c$  是变量。亚伯拉罕在随后的一个通讯中对此评论说：“ $c$  的可变性意味着洛伦兹群只在无限小变换下成立” [A4]，这句话几乎立刻就被爱因斯坦否定了 [ E5]。

在《物理学纪事》上，一场争论开始了。从亚伯拉罕这方面来看，既缺风度，也少内容。在第一篇批评 [ A5 ] 中 亚伯拉罕指出 相对论正威胁着物理学的健康发展 因为“ 对一个冷静的观察家来说 这个理论显然永远不可能带来一个完整的世界图景，如果它不能……纳入引力的话。”他又说，爱因斯坦因为抛弃了洛伦兹变换的无条件有效性<sup>①</sup>，而给相对论带来了“致命的打击”。“像本作者 [ 亚伯拉罕 ] 一样，曾不得不反复告诫要警惕被这个理论所诱惑的那些人 将满怀高兴地欢迎 [ 这样的事实 ] 这个理论的创始人现在已经令他自己相信了，他的理论是不可能维持下去的。”亚伯拉罕承认，爱因斯坦在技术上对他的工作的反驳是正确的。在后一篇文章里 [A6] 他摆出他的“第二理论”：“我更喜欢发展一个不需要进行时

① 请注意，这些话是在爱因斯坦—格罗斯曼论文 [ E1 ] 发表以前说的。

空问题 讨论 ]的新引力理论。”亚伯拉罕这时完全放弃了洛伦兹不变性，而引入了一个绝对参照系（还可以参阅 [A1]，488 页）。

爱因斯坦的回击理直气壮 不过话说得很谨慎。“[ 狭义 ]相对论有广阔的实用范围 [ 而且是 ]一个重要的进步 我相信它不会妨碍物理学的发展……我们没有丝毫根据可以怀疑相对性原理 [ 对匀速运动 ] 的普遍有效性”[E6]。对于尚未解决的引力难题，他通过一个比较来表达他的观点：“在我看来 [ 关于引力的 ] 这种情况，并不说明狭义相对论原理的失败，正如布朗运动的发现和正确解释没有使人认为热力学和流体力学是异端邪说一样。”他还说，他自己也还不明白如何一般地实现等效原理。

亚伯拉罕不示弱，又发表文章来反驳 [A7]。他的反驳在本质上没有增加任何新内容 话却说得很难听：“[ 爱因斯坦 ]在为未来的相对论乞求信任。”爱因斯坦的回答是一个只有五行字的声明。他在声明中宣布，这场公开论战在他看来已经结束了 [ E7]。他 向一个朋友描述亚伯拉罕的理论是“一匹缺了三条腿的高贵的马” [E8]

如果不是因为亚伯拉罕是位很出色的物理学家，我大概会忽视他跟爱因斯坦的争论。爱因斯坦认为，在同事中，亚伯拉罕对引力的理解是最透彻的 [ E9]。亚伯拉罕 1914 年对引力理论的评论就非常精彩 [A1]。1913 年，爱因斯坦决定离开苏黎世去柏林时，向仓格尔建议，考虑让亚伯拉罕接替他 [ E10]。<sup>①</sup> 但他补充说“我相信，他们没我也会做下去，因为我是拥护令人生畏的亚伯拉罕的

<sup>①</sup> 1912年5月17日，爱因斯坦写信告诉维恩，亚伯拉罕已经“皈依”了他的理论。

事业的”。

亚伯拉罕有为自己制造困难的天才，这是了不起的；但特别因为他那伤人的嘲讽，这也是不幸的。在他本人和他的幻想之间，永远站着他的魔鬼的身影：爱因斯坦。他懂相对论，但不能与它和谐相处。他算不得一个大科学家，不过，他作为那些伴随着科学转变的悲剧的代表，还是值得让我们记住的。1923年，他死于脑瘤。玻恩和冯·劳厄共同为他写了讣告：“他是位可敬的对手，他以坦诚作为斗争武器，毫不掩饰忧伤和无根据的辩论为他带来的失败。他厌恶爱因斯坦的思想；他爱他的绝对以太、他的场方程和他的刚性电子，就像年轻人爱他的初恋情人，那些记忆是不可能被后来的经历抹去的。但是他始终保持着清醒的头脑……他的反驳基于他对物理学的基本信念……而不是基于无知” [B1]。

现在回到物理学的发展上来。1912年底，在爱因斯坦—格罗斯曼论文发表前，诺德斯特勒姆在 Helsingfors (赫尔辛基) 提出了一个天才的想法 [N1]。既然爱因斯坦和亚伯拉罕都遇到了依赖于  $\Phi$  的  $c$  所带来的麻烦，那么为什么不尝试去寻求一个其中  $c$  与  $\Phi$  无关而且能以一种熟悉的方式保持为一个普适常数的引力理论呢？爱因斯坦一开始就正确地看到，引力的纳入意味着狭义相对论的普适性的结束。同样，诺德斯特勒姆的问题在当时也是特别有见识的。奇怪的是，这个思想在 1912年 10月以前却没有人去考虑过（或者，至少在科学文献中没有关于它的讨论）。

从亚伯拉罕对方程 (13.1) (13.4) 的不适当处理中，我们看到，问题并不那么简单。诺德斯特勒姆的想法是，令质量而不是  $c$  依赖于  $\Phi$ 。对于一般的质量  $m$  他将代表单位质量的方程 (13.1) 改写为如下形式：

$$mK_{\mu} = -m \frac{\partial \Phi}{\partial x^{\mu}} = \frac{d}{d\tau}(mu_{\mu}) = m\dot{\mu}_{\mu} + \dot{m}u_{\mu} \quad (13.7)$$

他的理论的新颖处在于  $m$  项, 从方程 13.7) 和显然没有变化的方程(13.3)看到,

$$mu^{\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^{\mu}} = m \frac{d\Phi}{d\tau} = c^2 \frac{dm}{d\tau} \quad (13.8)$$

233 因此,

$$m = m_0 \exp(\Phi / c^2) \quad (13.9)$$

更进一步, 我们注意到, 方程 13.7) 和(13.8)给出

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial x^{\mu}} = \dot{u}_{\mu} + \frac{u_{\mu}}{c^2} \dot{\Phi} \quad (13.10)$$

在这里  $m$  消失了。方程 13.10) 和 13.12) 构成了诺德斯特勒姆第一个理论的基础。在这个理论中, 他将  $\rho$  等同于“静止质量密度”[N2]。这个理论还缺很多东西, 它的更多的细节, 我就不谈了。现在来看他 1913 年提出的“第二个理论”[N3] 尽管它当时就夭折了, 但作为人们建立的第一个逻辑一致的相对论性的引力场理论, 它还是值得回忆的。

理论的主要思想(诺德斯特勒姆认为应归功于冯·劳厄与爱因斯坦)是, 对他的标量引力场来说, 惟一可能的源是

$$T = \eta_{\mu\nu} T^{\mu\nu} \quad (13.11)$$

即能量-动量张量  $T^{\mu\nu}$  的迹(和通常一样,  $\eta_{\mu\nu}$  是闵可夫斯基度规)。这个理论的所有物理结果, 都是诺德斯特勒姆自己得到的。不过, 我在这里不跟他的推导走, 而是讲爱因斯坦在维也纳会议上报告的简单技巧[E11], 它很快就能导出需要的结果。

在方程(13.10)中, 令  $\Phi = c^2 \ln \psi$  那么,

$$\frac{\partial \psi}{\partial x^\mu} + \frac{1}{c^2} \frac{d}{d\tau} (u_\mu \psi) = 0 \quad (13.12)$$

这个方程可以从变分原理

$$\delta \int \psi d\tau_0 = 0 \quad d\tau_0^2 = -\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (13.13)$$

导出。一旦有变分原理，我们就可以导出静止质量为  $m$ 、静止体积为  $V(\rho = m/V)$  的粒子的能量-动量张量方程，这里的粒子是作为体积  $V$  中的一种连续分布来处理的：

$$T^{\mu\nu} = \frac{\rho \psi}{c^2} u^\mu u^\nu \quad (13.14)$$

而它的散度

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial x_\mu} \quad (13.15)^\text{①}$$

方程 (13.14) 给出  $T_\nu^\nu \equiv T = -\rho\psi$  从而方程 (13.15) 化为

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = T \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x_\mu} \quad (13.16)$$

这里，所有与质量为  $m$  的粒子相关的量都消失了。爱因斯坦提出 234  
考虑方程 (13.16) 对任何物质（和电磁）系统产生  $T^{\mu\nu}$  的情形都成立。令

$$-\psi \square \psi = \kappa T \quad (13.17)$$

这是诺德斯特勒姆的“第二个”场方程。根据方程 (13.16) 和 (13.17) 有

$$\frac{\partial (T^{\mu\nu} + t^{\mu\nu})}{\partial x^\nu} = 0 \quad (13.18)$$

这里，

注意，在方程(13.15)、(13.16)和(13.19)中，坐标的指标表示不符合现代的约定。我们大概可以从形式上将  $x_\mu$  理解为  $\eta_{\mu\rho} x^\rho$ 。——译者

$$t^{\mu\nu} = \frac{1}{\kappa} \left[ \frac{\partial\psi}{\partial x_\mu} \frac{\partial\psi}{\partial x_\nu} - \frac{1}{2} \eta^{\mu\nu} \left( \frac{\partial\psi}{\partial x_\lambda} \frac{\partial\psi}{\partial x^\lambda} \right) \right] \quad (13.19)$$

是引力场的能量-动量张量。这样，理论是洛伦兹不变的，而且满足守恒定律。

现在来看等效原理。考虑一个完全静止的封闭系统，它遵从  $\int T_i d\vec{x} = 0 (i=1, 2, 3)$  (对全体体积分) 从而,  $\int T d\vec{x} = -E/c^2$  这里  $E$  是总能量。只要认为  $E$  是对全体系统的时间平均量, ① 则同一关系对于处于统计平衡的体系也是成立的。对静态弱场的极限情况,  $\psi/c^2 = 1 + \phi/c^2$ ,  $\phi$  是牛顿势。这时, 方程 (13.17) 成为

$$\Delta\phi = -\frac{\kappa E}{c^4} \quad (13.20)$$

则我们得到希望的结果：引力质量正比于体系的总能量。② 如后来爱因斯坦所指出的，在这个理论中，等效原理是一个统计定律 [E12]。

爱因斯坦的维也纳报告《关于引力问题的现状》，大约用了四分之一的篇幅来讨论诺德斯特勒姆的工作。③ 对亚伯拉罕的工作，他只是简单地评论说，他认为，狭义相对论应该被任何一个未来的理论所吸收，这是一种需要，而亚伯拉罕没有这么做。在接下来的讨论中，米指出，诺德斯特勒姆理论是亚伯拉罕工作的自然产物，爱因斯坦回答：从心理上说是的，但在逻辑上却不是。等效原理也应该纳入未来的理论，是爱因斯坦强调的另一个愿望。“在

① 请参阅 [L2]。这个平均是在抹平了压力涨落的时间内的平均。

② 这是迪克意义上的弱等效原理。迪克还进一步证明，诺德斯特勒姆理论不满足强等效原理，照这一原理，在非旋转的自由下落实验室中，物理定律是无引力空间的定律，假定它们是处处一样的 [D1]。

爱因斯坦利用这个机会，收回了他和格罗斯曼在他们的论文中提出的对标量理论的反驳。对标量引力论的其他评论，请参阅 [W2]。

[引力理论的背景下 厄缶实验的作用 类似于匀速运动中迈克尔逊实验的作用。”后来 米问爱因斯坦为什么没提到他的 米的工作 爱因斯坦回答说 他要讨论的理论 不像米的那种 而是满足等效原理的理论。<sup>①</sup> 爱因斯坦报告的主要内容，当然还是他和格罗斯曼的最新工作。不过，对我们刚才的讨论，它也没有什么可以补充的。在维也纳，米是爱因斯坦的主要论敌，会议后不久，他又写了一篇文章批评爱因斯坦的理论 [ M4]。爱因斯坦在回答中提出的部分论证是错误的：他又一次强调了引力方程的不变性仅对线性变换成立的必然性 [ E13]。

总的说来，1912 年以前，建立引力场理论的尝试没有产生任何结果。到 1913 年底，情况彻底被搅乱了。诺德斯特勒姆有了惟一的一个自治的引力理论。多数物理学家准备接受狭义相对论。有些人愿意承认等效原理在理论中的基本作用，但另一些人则认为它没有那么重要。爱因斯坦关于引力论加给狭义相对论的限制的观点，不见得有什么人赞同，也没有准备随他的计划去寻求引力的张量理论。只有洛伦兹给他鼓劲，“我很高兴您赞同我们的研究 [ 爱因斯坦-格罗斯曼论文 ]” 爱因斯坦在信中这么说 在同一封信中，他表达了自己对他的理论状况的疑虑 [ E3]。

尽管众说纷纭，爱因斯坦依然满怀战斗的激情。在评论亚伯拉罕和米的批评时 他写道：“我很高兴 这件事情至少有了必要的生机。我欣赏这种论战，费加罗式的：‘Will der Herr Graf ein

<sup>①</sup> 在米理论 [ M3 ] 中，引力质量与惯性质量的比依赖于如速度、温度等物理参量。而且，理论中既无红移，也没有光的弯曲。我在这里不讨论这个复杂的理论（它有两个标量场），因为在概念上它没有包含什么有意义的观点。

Tänzelein wagen? Er soll's nur sagen! Ich spiel ihm auf'<sup>①</sup>[E14] . . . 他感到，四维伪欧几何描述一定需要修改。“我很高兴，同行们全身心地投入这个理论，尽管他们现在的目的是想抹煞它……从表面上看，诺德斯特勒姆的理论……显得更为合理。但是，它也是建立在先验的四维欧几里得空间上，对这种空间的信念，我感到近乎是一种迷信'[E15]。1914年3月，关于自己的努力，他说过如下的话：“大自然让我们看见的只是狮子的尾巴，但我不怀疑大自然真有这头狮子，尽管因为它身躯庞大而不能立刻暴露自己”[E16].<sup>②</sup>

爱因斯坦在1913年的科学家形象，总的说来是值得注意的。他没有为他的努力宣扬什么牵强的结果，他看到了自己当时工作的局限。他笃信自己的幻想，他的理性力量，他的勇气和坚韧，还会在那样的环境下继续发挥作用，而且在几年以后达到顶点。我认为，他这段经历能够帮助我们理解，多年以后，他还会无畏地站在同样的位置上，孤独地去寻找完全与众不同的量子力学的解释。

## 13b. 爱因斯坦—福克尔论文

福克尔(Adriaan Daniel Fokker)1913年下半年在洛伦兹指导下获博士学位。他的学位论文是关于辐射场中电子的布朗运动[F1]，文章里包含着后来著名的福克尔—普朗克方程。这一工作结束后，洛伦兹将他送到苏黎世跟爱因斯坦工作。他们的这次合

① “伯爵先生想跳一小会儿舞吗？他只要这么说就行！我为他伴奏。”

② 爱因斯坦在1914年对诺德斯特勒姆理论的评论，请见第14章：他对标量理论的回顾 请参阅[E17]。



作，只进行了一个学期，发表了一篇短文。这篇论文，对广义相对论的历史有着重要意义，因为这是爱因斯坦第一次处理严格服从广义协变性的引力理论 [ E18]。

作者首先重写了方程 (13.13)

$$\delta \int d\tau = 0 \quad d\tau^2 = -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad g_{\mu\nu} = \psi^2 \eta_{\mu\nu} \quad (13.21)$$

从这里他们得到，诺德斯特勒姆的理论是爱因斯坦—格罗斯曼理论的一个特例，它的特征在于额外地要求光速为常数。不过，这个理论当然还是比狭义相对论更普遍。尤其是根据方程 (13.21) 不论钟的实际速率  $dt$  还是杆的实际长度  $dl$ ，分别都不是相对论的  $dt_0$  和  $dl_0$  的值，而是（如诺德斯特勒姆已经知道的）， $dt_0 = dt/\psi$ ， $dl_0 = dl/\psi$  同  $\psi$  与光速无关的性质是一致的。

这篇论文特别重要的地方在于重新推导了场方程 (13.17)。“从微分张量数学家们的考察出发”，场方程必须具有（他们提出的）如下形式：

$$R = \text{常数} \cdot T \quad (13.22)$$

这里，

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \quad (13.23)$$

是从里奇张量  $R_{\mu\nu}$  [方程 12.20] 导出的曲率标量，而  $g^{\mu\nu}$ （在目前的例子中）当然是由方程 13.21) 给出的。爱因斯坦和福克尔进一步证明 方程 (13.22) 通过常数调整) 与方程 13.17) 是等价的！

文章最后指出：“似乎黎曼—克里斯托菲尔张量在我们现在的考察中所起的作用，还将以一种与物理学假设无关的方式，为我们敞开通向导出爱因斯坦—格罗斯曼引力方程之路。证明这种联系的存在与否，将是一个重要的理论进展。”最后的脚注说明爱因斯坦和格罗斯曼 [E1] 为不存在这种联系而提出的理由之一，即已经

被认定是错误的里奇张量的弱场性质，是不正确的（第 12 章）。

这样，1914 年初，在麦克斯韦的第一次引力场理论尝试刚好过了 50 年，爱因斯坦还没有达到这个理论，但是正像爱因斯坦-福克尔论文最后所清楚表明的那样，他正在走近它。但是，他又差不多用了两年，才到达最后的答案。为什么呢？部分原因是他的个人生活将发生重大的变化，这一点，我们接下去就会看到。

### 参考文献

- A1. M. Abraham, *Jahrb. Rad. Elekt.* **11**, 470(1914).  
 A2. —, *Arch. Math. Phys.* **20**, 193(1912).  
 A3. —, *Phys. Zeitschr.* **13**, 1, 4(1912).  
 A4. —, *Phys. Zeitschr.* **13**, 310(1912).  
 A5. —, *AdP* **38**, 1056(1912).  
 A6. —, *Phys. Zeitschr.* **13**, 793(1913).  
 A7. —, *AdP* **39**, 444(1912).  
 B1. M. Born and M. von Laue, *Phys. Zeitschr.* **24**, 49(1923).  
 D1. R. H. Dicke, *Ann. Phys.* **31**, 235(1965).  
 E1. A. Einstein and M. Grossmann, *Z. Math. Physik.* **62**, 225(1913).  
 E2. —, *AdP* **38**, 355, 443(1912).  
 E3. —, letter to H. A. Lorentz, August 14, 1913.  
 E3a. —, *AdP* **51**, 639, (1916).  
 E4. —, *AdP* **35**, 898(1911).  
 E5. —, *AdP* **38**, 355(1912), Sec. 4.  
 E6. —, *AdP* **38**, 1059(1912).  
 E7. —, *AdP* **39**, 704(1912).  
 E8. —, letter to L. Hopf, August 16, 1912.  
 E9. —, letter to M. Besso, late 1913; EB, p. 50.  
 E10. —, two letters to H. Zangger; one, undated, from late 1913 or early 1914 and the other dated July 7, 1915.  
 E11. —, *Phys. Zeitschr.* **14**, 1249(1913); **15**, 108(1914).

- E12. —, *Scientia* **15**, 337(1914).
- E13. —, *Phys. Zeitschr.* **15**, 176(1914).
- E14. —, letter to H. Zangger, undated, late 1913 or early 1914.
- E15. —, letter to E. Freundlich, undated, early 1914.
- E16. —, letter to H. Zangger, March 10, 1914.
- E17. — in Albert Einstein, *Philosopher-Scientist* (P. Schilpp, Ed.), pp. 63–65. Tudor, New York, 1949.
- E18. — and A. D. Fokker, *AdP* **44**, 321(1914).
- F1. A. D. Fokker, *Phys. Zeitschr.* **15**, 96(1914).
- G1. R. Gans, *Phys. Zeitschr.* **6**, 803(1905).
- H1. O. Heaviside, *Electromagnetic Theory* (3rd edn.) Vol. 1, p. 455, 238  
Chelsea, New York, 1971.
- K1. F. Kottler, *Wiener Ber.* **121**, 1659(1912).
- L1. H. A. Lorentz, *Collected Works*, Vol. 5, p. 198. Nyhoff, The Hague, 1934.
- L2. M. von Laue, *Das Relativitätsprinzip*, (2nd edn.), p. 208. Vieweg, Braunschweig, 1913.
- M1. J. C. Maxwell, *Collected Papers*, Vol. 1, p. 570. Dover, New York, 1952.
- M2. H. Minkowski, *Goett. Nachr.*, 1908, p. 53, Anbang.
- M3. G. Mie, *AdP* **40**, 1(1913), Sec. 5.
- M4. —, *Phys. Zeitschr.* **15**, 115, 169(1914).
- N1. G. Nordström, *Phys. Zeitschr.* **13**, 1126(1912).
- N2. —, *AdP* **40**, 856(1913).
- N3. —, *AdP* **42**, 533(1913).
- P1. H. Poincaré, *Oeuvres*, Vol. 9, p. 551. Gauthier-Villars, Paris, 1954.
- P2. —, [P1], p. 494, Sec. 9.
- W1. F. Wacker, *Phys. Zeitschr.* **7**, 300(1906).
- W2. M. Wellner and G. Sandri, *Am. J. Phys.* **28**, 36(1963).

## 第 14 章 引力场方程

### 14a. 从苏黎世到柏林

1915 年 11 月 25 日，爱因斯坦向普鲁士科学院物理数学部提交了一篇论文，在论文中，“广义相对论最终完成了它的逻辑结构” [E1]，论文题目与本章的标题相同。文章叙述了他是怎样得到场方程的最后形式的。

爱因斯坦为维也纳会议提交报告（我们曾在第 13 章讨论过）时，还是 ETH 的教授，然而那时他已经决定离开苏黎世了。

1913 年春，普朗克和能斯特来到苏黎世，目的是试探爱因斯坦是否有兴趣去柏林，同时有几个职位在那里等着他：一个是领特殊薪俸的普鲁士科学院院士，薪俸的一半由政府支付，另一半由科学院物理—数学部支付，它来自外界支持的一个基金；一个是柏林大学教授，有上课资格，但也可以不上课，还有一个是即将建立的一个物理研究所的所长，研究所由威廉皇家协会赞助，协会是 1911 年为利用私人资助支持基础研究而建立的机构。<sup>①</sup>

很久以后，爱因斯坦回忆起普朗克苏黎世之行时他们之间有趣的交谈。普朗克问他在研究什么，爱因斯坦向他描述了那时的

<sup>①</sup> 这个物理所的活动始于 1917 年，1921 年由劳厄负责日常事务。

广义相对论。普朗克说：“作为老朋友 我劝你别搞了。首先 你不会成功 而且 即使成功了 也没人相信你”[S1]。

爱因斯坦很快答复了，他决定去柏林。他在这段时期的通信，充分说明了他对这个邀请感兴趣的主要理由。尽管不论那时还是以后，他都从不厌倦与青年同事和学生讨论物理问题；但他教的课已经够多了，他那时所需要的只是思考。在 ETH 获得的博士论文目录表明，爱因斯坦曾做过四篇论文的副审，<sup>①</sup>内容都是实验物理学的，他没有收入一个从事理论物理学研究的博士研究生。

听到爱因斯坦的答复，普朗克、能斯特、鲁本斯和瓦尔堡很兴奋 他们于 1913 年 6 月 12 日联名写了一个正式推荐，支持爱因斯坦为院士的提议 [K1]。7 月 3 日 [科学院 物理—数学部对提议举行投票 结果以 21 票赞成、1 票反对通过 [K2]。但还有一大堆安排需要落实。不过，爱因斯坦早在 1913 年 7 月就已经写信给一位朋友 说他 1914 年春将去柏林 [E2]。8 月，他写信给洛伦兹，“衷心感谢您对我获得新职位的友好祝愿。我不能抗拒这一职位的诱惑，它使我从各种义务中解脱出来而能自由地冥思苦想了 (Grübeleien)”[E3]。对埃伦费斯特同样的祝愿 他回答说 他“接受这一悠闲职位是因为教书令我恼火 而在那儿 [柏林] 我用不着讲课了”[E4]。他告诉仓格尔，在柏林与同事交往真令人兴奋。“特别是 天文学家 这时 对我来说太重要了”[E5]。显然，这指的他当时对红移和光线弯曲的兴趣。

在 1913 年 12 月 7 日给科学院的信 [K3] 中 爱因斯坦正式接

<sup>①</sup> ETH 论文必须经主审 (Referent) 和副审 (Korreferent) 两人批准才获通过。爱因斯坦为伦格尔 (Karl Renger)、伦克尔 (Hans Renker)、弗兰克尔 (Elsa Frenkel) 以及皮卡德 (August Piccard) 的论文担任过副审。

受院士职务，并说明他希望从 1914 年 4 月开始新工作。他指出：“我们在引力理论上，和只知道库仑定律的 18 世纪的物理学家一样，没有什么进步”[E6]。他提到诺德斯特勒姆 N 理论和爱因斯坦—格罗斯曼（EG 理论 评论前者更简单 也似乎更合理 但没说明非匀速运动的相对性；他还表示希望，光的弯曲（EG 理论现象，N 没有）不久将从实验上对两种理论做出选择。

3 月下旬，爱因斯坦一家离开了苏黎世。爱因斯坦在对莱顿作短暂访问后，即到柏林，他将在这里一直住到 1932 年 12 月。他的妻小去罗加诺(Locarno)几周后[E7]，也来到柏林和他团聚 但时间不长。米列娃来后不久，夫妇开始分居。我不知道在那个时候发生了什么事。但他们的婚姻本来就不美满。爱因斯坦并不全怨米列娃。带着内在的抵制，他承担了一个最终超出了他能力的事业 [E7a]。现在，米列娃和孩子要离开苏黎世了，他去车站送行。“Weinend ist er vom Bahnhof zurückgegangen。”<sup>①</sup> 他一直爱他的孩子，多年来，他常带他们旅游度假，但这种亲近并不总是容易的。因为米列娃对分居和后来的离婚，从来就不甘心。后来，爱因斯坦再婚后，孩子们还会来柏林看望他们的父亲，同他住在一起。

家人走后不久，爱因斯坦搬进维特尔斯巴赫大街（Wittelsbacherstrasse）12 号的单身宿舍。四月初，他写信给埃伦费斯特说：“住在柏林真令人高兴，一间漂亮的屋子……这儿的亲戚给了我极大的快乐 特别是和我同龄的‘表姐’长期的友谊使我爱上她了 [E8]。一年后，他告诉仓格尔，“至于我个人的情形，我从没有

<sup>①</sup> “从火车站往回走时，他满眼泪花”。（与 H. 杜卡斯的私人交谈。）

像现在这样安逸和幸福。我过着幽静的生活，但不孤独，因为有‘表姐’的爱，实际上是她吸引我到柏林来的”[E9]。<sup>①</sup> 在 16 章里我们会听到更多的关于这位表姐的故事。

爱因斯坦到柏林时已经很出名了，虽然还不是五年后的那颗明星。所以他抵达不久，自然就有一家德国大报《福斯报》的编辑来访问，请他向读者谈谈他的工作，爱因斯坦答应了。4 月 26 日，他的第一篇报刊文章发表了，题目是“关于相对论原理”（Vom Relativitätsprinzip）[E10]。文章很漂亮，主要谈狭义相对论。在最后一段他先问：“上面概述的狭义相对论从根本上说是不是完整的？或者它是否只是更进一步发展的开始？”爱因斯坦指出，他认为后一种情况是对的。但又说，“在这点上，即使那些理解相对论的物理学家观点也还有分歧。”<sup>②</sup>

对相对论的未来众说纷纭，是 1913—1915 年这一时期的特征。1914 年 7 月 2 日，爱因斯坦在普鲁士科学院的就职演说 [E12] 更说明了这一点。他首先感谢能有机会使他“全身心地从事科学研究，而不必为职业焦虑和操心。”接着他转到当前物理学的主要问题。他称赞普朗克说，他的“量子假说，在足够小的质量以足够小的速度和足够大的加速度运动的情况下，推翻了经典力学……关于这些 [分子] 运动的基本定律，我们的处境同牛顿以前的天文学家关于行星运动的处境是一样的。”然后他谈相对论，指出狭义相对论“在理论上是不能完全令人满意的，因为它给匀速运动以优越的地位。”

<sup>①</sup> “... die mich ja überhaupt nach Berlin zog.”

<sup>②</sup> 1915 年爱因斯坦对相对论所做的评述 [R11] 与他在报纸上发表的文章大意相同。它几乎都在谈狭义相对论，在结尾时，也有一段话与刚引用的几乎一样。

普朗克致答词 [P1]，欢迎爱因斯坦的到来，又说：“我非常了解你，我敢说，你真正热爱的是那些能使个人才智得到最大自由发挥的研究方向。”接着他也谈到狭义相对论中匀速运动的特殊性问题。“我认为，也可以持与爱因斯坦相反的观点，把匀速运动的优越性明确作为这个理论的一个非常重要而有意义的特征。”普朗克指出，因为自然规律总是在无限多的可能性中隐含一定的限制，“难道我们能因 2 次幂扮演了一个优越的角色，就对牛顿的引力定律不满意吗？”人们能够不把匀速运动的优越性同“从空间曲线中选出直线这样一个特殊考虑”联系起来吗？！这样的批评是不够深刻的。但是，我们也有同意普朗克的地方，他礼貌而公正地批评爱因斯坦，指出在他的广义理论中，也不是所有的坐标系都处于相等地位，“正如你自己刚才证明的那样。”普朗克最后也表示希望，1914 年 8 月 21 日的日食远征队将为爱因斯坦预言的光线弯曲 [这时预言的数值还不正确] 提供信息，因为第一次世界大战的爆发，他的希望破灭了。

爱因斯坦的成果并没受战乱的影响。事实上，这是他一生中最多产和最富创造性的时期之一。这段时期，他完成了广义相对论，得到了光线弯曲的正确值和水星近日点的位移，开创了宇宙学和引力波的研究，引进了辐射跃迁的 A、B 系数，发现了普朗克辐射定律的新推导——而且，第一次陷入了量子物理学的因果律的困扰。更令人惊讶的是，尽管他在 1917 年曾身患重病，并且以后几年里，身体一直很虚弱，他还是在大战期间完成了一本书和约五十篇论文。

紧张的科学活动，没有妨碍爱因斯坦真诚而强烈地关注发生



在他周围世界的悲剧。相反，在 1914—1918 年间，爱因斯坦以一个激进的和平主义者、一个具有强烈道德信念的人公开出现，不论是否讨人喜欢，他从不回避公开发表他的意见。战争初期，他和几位学者共同签署了“告欧洲人宣言”批评科学家和艺术家“放弃了任何还想维持国际交往的愿望”，并号召“一切真正爱惜欧洲文化的人联合起来……我们应该努力去建立一个欧洲人同盟”（这一努力落空了），这大概是爱因斯坦第一次签名的政治文献。他还加入了和平主义者新祖国同盟（Bund Neues Vaterland）。<sup>①</sup> 他愉快地看到“同事们”坚定立场而不为“我们的”时代的浊流所动摇……希尔伯特遗憾自己……没有更好扶持国际友好关系……普朗克尽一切努力阻止科学院的大多数沙文主义者势力的扩张。我必须说，在这方面，敌对国双方是势均力敌的” [E13]。

爱因斯坦一生都怀着一种愉快的超然态度认为人类是愚蠢的，但这并没有减弱他对自己的强烈信念。“自觉超脱盘踞在疯狂大众（die verrückte Allgemeinheit）中的一切事物，我开始在目前这不可理喻的喧嚣里（wahnsinnige Gegenwartsrummel）感到满足。人们为什么不能像疯人院的侍者那样心满意足地生活呢？归根结底，人们认为疯人院是为居住在大厦的疯子存在的。在一点上，人们能够做出自己的制度选择——尽管它们之间的差别比人们年轻时所想象的要小” [E14]。

随着战争的继续，爱因斯坦初时的真理必胜的希望也变得悲

<sup>①</sup> 由纳坦（Otto Nathan）和诺登（Heinz Norden）编辑的《爱因斯坦论和平》（*Einstein on Peace*）一书详细描述了爱因斯坦在第一次世界大战期间的政治活动 [N1]。宣言中的话就引自该书，书中有宣言的全文。（此书的中译本分上下册，分别由李醒民、刘新民译，湖南出版社，1992 年版。——译者）

观了。1917 年他写信给洛伦兹说：“我无法忍受降临在我们生活中的无数悲伤所带来的可怕的抑郁，像过去那样躲进物理学也无济于事了”[E15]。我想，他当时的病情可能加深了他的忧郁。

离开爱因斯坦和战争这个话题，我们再回到广义相对论的发展。这是在 1914 年的秋天 爱因斯坦为《普鲁士科学院会议报告》撰写了长篇论文[E16]。文章的主要目的是更系统而详尽地讨论在与格罗斯曼合作的一篇论文[E17]里所使用的方法和得到的结果。有近一半的篇幅讨论张量分析和微分几何，爱因斯坦清楚地感到，需要用自己的方法解释这些技巧，它们对大多数物理学家和他自己来说，都一样是新的。论文还触及到几个新的物理思想。首先，爱因斯坦反对牛顿关于旋转的绝对性的论证（例如，牛顿常常提到的水桶旋转实验[W1]）。他强调，“我们没有办法区别‘离心场’和‘引力场’[因而我们可以认为离心场就是引力场。”文章的另一进展，是爱因斯坦第一次导出了质点运动的短程线方程（参见方程 12.28）[E18]并证明它有正确的牛顿极限（参见方程[12.30]）[E19]。他还证明他原先关于红移和光线弯曲（还是旧的计算值，差一个因子 2）的结果包含在张量理论中[E20]。最后，还应该提到一个有意义的结果（就我所知）爱因斯坦在这里对时空特性第一次发表了重要见解：“按照我们的理论，不存在独立的（selbständige 空间性质”[E21]。

然而，关于引力场方程的协变性却没有进展，情况甚至更为不妙。

我们在 12d 看到，1913 年初，爱因斯坦和格罗斯曼没能找到广义协变的引力场方程[E17]，他还对广义协变的不可能性进行过“物理论证”。现在即 1914 年的下半年，爱因斯坦重述了相同

的讨论。这时他不仅仍然相信它，还在讨论前说明：“如果希望完全符合因果律，我们就必须限制 [ 广义协变性的 ] 要求” [E22]。爱因斯坦在文中提出一个没有证明的原则：度规张量  $g_{\mu\nu}$  应该由场源即能量—动量张量惟一决定，从这点说，他的意见是可以理解的。在这篇 1914 年的论文里，他又像在 12d 讨论过的那样，将时空划分为  $L_1$  和  $L_2$  两个区域。我们记得，他那时已经发现，在没有物质的区域  $L_1$  中  $g_{\mu\nu} \neq g'_{\mu\nu}$ 。这次，他将不等式写得更详细： $g_{\mu\nu}(x) \neq g'_{\mu\nu}(x')$  不过又加上  $g'_{\mu\nu}(x') = g_{\mu\nu}(x'(x)) \equiv f_{\mu\nu}(x)$ 。任何熟悉张量场的人，都不会对  $g_{\mu\nu}(x) \neq f_{\mu\nu}(x)$  这个事实感到惊奇。而爱因斯坦却从这个不等式得出结论：广义协变的引力场方程是不能接受的。1914 年，他不仅关于因果律有错误的物理学观点，而且对张量的一些基本数学概念，他也还没有理解 [ H1 ]。还在坚持引力场方程只有在线性变换下才是协变的。

爱因斯坦接着证明：严格的协变性惟一决定了引力场的拉格朗日量 只要它是  $g_{\mu\nu}$  的（普通的，非协变的）一阶导数的二次齐次函数 [ E24 ]。然而，他在 1915 年意识到，这些“关于决定引力场的拉格朗日函数的论证是完全错误的，因为我们可以很容易地通过自由选择…… [ 这个拉格朗日量 ] 的方式来修正它” [E25]。

1914 年 10 月论文的数学细节无助于理解广义理论的发展，我们不谈它了。1915 年初，这篇论文引出了爱因斯坦和勒维—契维塔通信。后者在信中指出了爱因斯坦的一些技术错误，爱因斯坦很感激他对这些问题的关注，不过，他更高兴的是终于找到了

① 在第二篇爱因斯坦—格罗斯曼论文 [ E23 ] (12d) 中，允许的变换稍微扩大了些，那一定是在此不久后发现的。

一个对他工作感兴趣的专家。“值得注意的是，我的同事对于内在的需要一个真正的相对论是那么漠不关心……因而能结识像您这样的人，我备感高兴”[E26]。

概括地说 回顾 1914 年，它给爱因斯坦的个人生活和科学生涯都带来了巨大的变化。他基本上是独自憧憬着相对论的未来，也为它的一些关键特征感到迷惑。一年后，他改正了概念上的错误，完成了理论，并看到其他人也积极地参与到这个理论的发展中来了。

## 14b. 插曲：磁化旋转

“我深信我走的路是基本正确的 以后人们]将为广义相对论思想正在遭遇着的巨大阻力感到奇怪”[E27]，这是爱因斯坦在 1915 年第一个星期的预言。它本来可以在年内实现的，但没有；爱因斯坦还将渡过一次危机，接着又经历一场令他精疲力竭的奋斗。到 1915 年秋天，他终于认识到，<sup>①</sup>他那时的理论在几个方面都存在着严重的错误。

同时 在 1915 年早期，他也没有发表过关于相对论的任何实质性的新东西。<sup>②</sup>他只是写了两篇评论，一篇关于相对论 [E11]，一篇关于物质的原子论 [E29] 还写过一篇关于热平衡下电磁辐射的统计特征的短文 [E30]。更有趣的是他在实验物理学的活动，他那时在位于夏洛滕堡 (Charlottenburg) 的帝国物理技术研究所作短期客座访问，做过不少事情 [K4]。“我对实验越来越有

<sup>①</sup> 见 14c。

<sup>②</sup> 人们有时错误地认为，爱因斯坦在普鲁士科学院发表的讲话摘要 [E28] 中就宣告了他在 1915 年 11 月发表的 [D1] 理论的最终形成。

热情”[E31]。在这种热情下，发现了爱因斯坦—德哈斯 EdH 效应即悬空的例如金属的圆柱体在突然磁化后会产生力矩。这一节（这段插曲）将致力于对他们的活动作一个简单的介绍。

德哈斯 (Wander Johannes de Haas) 是与爱因斯坦同龄的荷兰物理学家,1912年在昂内斯指导下在莱顿获博士学位。同年稍后,他来到柏林大学,在杜波伊斯 (Henri du Bois) 实验室工作。<sup>①</sup>1913年8月,洛伦兹在祝贺爱因斯坦获得柏林职位时,也一定提到了德哈斯的事情(原信已失散),这可以从爱因斯坦的回信看出:“现在,我不知道能为您的女婿做些什么,因为在柏林我既不会有研究所,也不会有助手。”[E3]。后来,帝国物理技术研究所的访问邀请来了,爱因斯坦终于有机会为德哈斯——也为洛伦兹做些事情了。<sup>②</sup>我不知道德哈斯什么时候到帝国物理技术研究所来与爱因斯坦在一起。不过,他们的磁回旋实验是“在很短时间内”进行的[H1a]。1915年4月,德哈斯离开了帝国物理技术研究所。

在他们的合作结束不久,爱因斯坦热情介绍了获得的结果。“这学期,在科学工作方面,我和洛伦兹的女婿共同完成了一个精彩的实验。我们严格证明了安培 (Ampère) 分子电流的存在(顺磁现象和铁磁现象的解释)。<sup>③</sup>……在误差允许的范围内(约10%),实验在所有细节上都证实了这个理论”[E14]。<sup>④</sup> 他们的实验理论

<sup>①</sup> 1912年12月,在洛伦兹建议下,埃伦费斯特夫妇在柏林访问了德哈斯夫妇 [K5]。

<sup>②</sup> 有一次,爱因斯坦在一篇文章中称德哈斯为德哈斯—洛伦兹先生 [E32]。

<sup>③</sup> 安培 (André-Marie Ampère) 在1820年左右猜测磁可以认为是由运动的电引起的。

<sup>④</sup> EdH 论文有德文、荷兰文和英文三种文本,每一种都与其他两种略有差别。实验误差范围的说法各篇基本与引用的信中所说的相同,三个文本均出版于1915年。

上很简单，而实际做起来却很复杂，首次证实了磁化引起旋转的现象。他们的结果在定性上是正确的，但是，在还没有发现自旋的 1915 年，任何铁磁性的动力学理论肯定都是错误的，爱因斯坦不会知道他的理论预言错在一个因子 2。由于爱因斯坦和德哈斯宣布他们发现实验与理论一致，所以他们的实验也差个因子 2。10% 的实验误差估计未免太乐观了。我们将看到，所谓理论与实验的一致，在很大程度上是理论的偏见。

特别的是，爱因斯坦在完成自己的实验一段时期以后，才知道测量旋磁效应的早期工作 [ E33]。那要追溯到麦克斯韦，他在 1873 年的论文中指出，“还没有实验证据表明电流是一种实在的物质流”[M1] 他提出几个方法来检验这个思想：导体的加速将产生电流，<sup>①</sup>磁体像一个回旋仪，这正是 EdH 效应的基本思想 [M2]。1861 年麦克斯韦本人试图确定这个旋转效应，但没有成功。

还应该提到 1915 年前的另外两件有关的事情。<sup>②</sup> 爱因斯坦 1915 年的理论推导，在 1907 年就已经由理查德逊 (Owen Willans Richardson) 给出了，他还在普林斯顿帕尔梅实验室观测过磁化的旋转效应，但是没有结果 [ R1]。<sup>③</sup> 1909 年，当时在图兰勒大学 (Tulane University) 的巴勒特开始研究逆效应，由旋转引起磁化，即现在著名的巴勒特效应。下面我简单讲一下 1915 年的 EdH 工作，然后介绍巴勒特 (Samuel Jackson Barnett ) 同时获得的有趣结果 [ B2]。

① 这一效应在 1916 年首次发现 [ T1]。

② 关于磁旋效应更详细的历史见巴勒特的论文 [ B1]。

③ 1915 年之后几年里，这个效应曾被称为爱因斯坦—理查德逊效应。

首先，我们用现代语言表述安培假说。<sup>①</sup> 一个磁体（假设静止）的磁矩  $M$  是“隐电流”的环流产生的，而隐电流又源于带电体（电子）沿封闭轨道的运动。因此，存在隐角动量  $\vec{J}$  通过

$$\vec{M} = -\frac{e}{2mc} \cdot g \cdot \vec{J} \quad (14.1)$$

与  $M$  联系 这里  $-e$  和  $m$  分别是电子的电荷和质量， $g$  现在称为兰德因子（对顺磁性和铁磁性物质来说， $g > 0$ ）。在查理德逊和爱因斯坦的模型中，

$$g = 1 \quad (14.2)$$

推理如下：考虑电子以匀速  $v$  在半径为  $r$  的圆形轨道上运动，圆频率为  $\nu$  则  $v = 2\pi r\nu$  角动量具有数值  $mvr = 2\pi r^2 m\nu$ 。每秒钟有总量为  $-e\nu$  的电量通过轨道的一点。从而，磁矩等于  $(-e\nu \chi \pi r^2)/c$  由此  $g = 1$ 。有人还讨论过，只要磁是由一组电子沿独立圆轨道运动引起的，则同样的  $g$  值对顺磁性或铁磁性物质仍然成立。

爱因斯坦和德哈斯都很清楚，这个推导会引来别人的反对。

“这些反对甚至比安培时代更为严峻……环绕的电子必须因辐射而损失能量……磁体分子从而失去它们的磁矩。这类事情还没有发现过。[安培]假说看来与基本电磁定律的普遍有效性不相容。似乎赞成它和反对它都有道理，它好像关系着重要的物理原理” [E35]。显然，爱因斯坦更希望证明存在永恒的电子环流，而不仅满足于证明一个百年假说。<sup>②</sup> 玻尔也是这样。那时，他的定态原

在 EdH 和其他早期文献里，磁矩定义为  $cM$ 。

<sup>②</sup> 另外还有一个理由说明，爱因斯坦为什么给 EdH 效应赋予很大的意义，看他 1915 年写的一篇文章 [E32] 就更清楚了：他（错误地）相信，在绝对零度时，铁磁性的持续意味着存在旋转的零点能（1913 年他正试图用这个零点能去解释双原子分子比热的某些反常 [E36]。然而，到 1915 年他知道，他的比热论证错了 [F1]。）

子轨道理论刚提出两年。对玻尔来说，EdH 实验的结果证实了他自己的观点。1915 年后期他写道：“如爱因斯坦和德哈斯所指出的，[他们的]实验强有力地表明，电子可以在原子内旋转而不辐射能量”[B3]。<sup>①</sup>

EdH 测量  $g$  的技巧在于分析金属圆柱的运动。圆柱用线垂直地悬起来在  $z$  方向以“向上”为正)在圆柱外装一个同轴的固定螺线管，当交变电流通过螺线管时，金属被磁化。 $z$  方向上磁矩的变化  $\Delta M$  导致因电子运动的角动量变化  $\Delta J$ ，因此  $\Delta M = eg\Delta J/2mc$ 。角动量守恒要求  $\Delta J$  应被补偿，从而金属圆柱整体就获得角动量  $-\Delta J$ ，因为可以认为它是刚性的。如果只有磁力作用于圆柱，则最后角速度  $\Delta\alpha$  由  $egQ\Delta\alpha = 2mc\Delta M$  给出 ( $Q$  是  $z$  方向的惯性矩)，这个实在的  $\Delta\alpha$  是磁驱动力与圆柱系于导线的恢复力相互作用的结果。显然，如果其他磁和力学的参量已知，这个实验就能用来决定  $g$ 。

实验中存在许多复杂情况。圆柱必须精确地悬于中轴，磁场必须关于轴对称而且均匀，以使  $\Delta M$  具有简单意义；地球磁场的影响需要补偿；还有一些影响可能来自交变电流和圆柱剩余磁化的相互作用。难怪（爱因斯坦说）这个圆柱经历着“最惊险的行为”[E33]。爱因斯坦和德哈斯证明，许多困难都可以用一种巧妙的方法克服，这就是共振方法。圆柱用相当牢的玻璃线悬挂起来，该系统的力学振动频率与交变电流相同。结果共振很容易把希望的效应从干扰中区别出来。<sup>②</sup>

然而，在爱因斯坦和德哈斯合写的所有文章中，都没有提到量子理论。

<sup>②</sup> 通过对共振以及共振周围的测量，可以得到许多其他信息。这里不讨论更多的技术细节，可以从巴勒特发表在《现代物理学评论》上的论文里找到 [B1]。



爱因斯坦和德哈斯进行了两组测量，想从中选出一组来符合他们的计算结果  $g=1$ 。六年后——在认识到  $g=1$  错了以后——德哈斯描述了他们的工作：<sup>①</sup>“我们得到的数 [ $g$  值] 是 1.45 和 1.02，第二个值近似等于经典值 [ $g=1$ ] 于是我们认为实验误差使第一个值太大了……我们没有测量线圈的磁场，是计算的……我们也没测量圆柱的磁场，也是计算或估计的。这在我们的原始论文中都说明了。最初的结果似乎使我们很满意，人们也容易理解 我们倾向于认为 1.02 是较好的值……”[H1a]。我不知道爱因斯坦是不是也这样说过。

我们再来谈谈现代的观点，这一部分内容就完整了。现在知道铁磁性是纯自旋效应，早先轨道贡献的观点看来几乎完全消失了。1928 年海森伯提出的铁磁性的量子力学理论 [H1b] 为重新处理铁磁体的旋磁效应提供了基础 [H2]。实验发现 铁磁物质的  $g$  值接近于  $2$  (除了  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) 误差  $< 10\%$  [S2]。巴勒特在 1915 年发表了第一次表明  $g=2$  的实验 (他那时在俄亥俄州立大学)。在我们先前提到过的论巴勒特效应的论文 [B2] 中 他总结道：“这个数值……在实验误差范围内，等于……计算值的两倍”，计算值是  $g=1$ 。然而，他在 1917 年的进一步测量给出  $g \approx 1$ ，“但是实验误差太大……在我看来，不能太看重它 [同他先前结果] 的矛盾” [B4]。1918—1920 年间，报告过三次独立的 EdH 效应测量。按时间顺序，它们来自普林斯顿 [S3]、苏黎世的 ETH [B5] 和乌普萨拉 (Uppsala) [A1]，得到的结果分别是  $g \approx 1.96, 1.88$  和

我用  $g$  表达这些结果，因而对德哈斯的原话稍作了某些改动。

1.87。从这时起，（通常所谓的）“旋磁异常”就严格建立起来了。这不可避免地引起人们对 [带正电荷的] “原子核的行星运动结构” [B6] 的相当广泛的思索。1921 年，兰德首先猜测，反常塞曼效应与新的旋磁异常之间可能存在着联系 [L1]。同年，海森伯在给泡利的信中谈了他的看法，他认为，只对铁磁体才会出现  $g=2$  [H3]。

因为德哈斯是莱顿人，而自旋也是在那里发现的，我自然去问乌伦贝克，EdH 效应对他和高德斯密特的电子自旋发现有没有影响，（我知道在他们的论文里没有提到这个效应）。乌伦贝克回答说他知道，因为他在莱顿，但那时它还不是中心问题。“如果埃伦费斯特认为它有价值，他一定会告诉我们的”。因此 EdH 效应没有激发后来的理论发展，而是为它奠定了基础。

至于爱因斯坦，在德哈斯离开后，他仍对旋磁性感兴趣。1916 年他又发表一篇关于 EdH 效应的论文，新设计了一套实验方案来测定  $g$  [E37]。<sup>①</sup> 他对帝国物理技术研究所的活动也保持着兴趣。这一年他被任命为 Kuratorium (理事会成员) 在实验的计划和设计方面起着积极的作用 [K6]。

现在言归正传，我们来谈爱因斯坦广义相对论的最终建立。

## 14c. 最后几步

1. 危机 1916 年元旦，一切都好了。爱因斯坦写信给洛伦

<sup>①</sup> 这个想法是为了消除原磁化金属圆柱的剩磁，它的好处是只将圆柱置于磁场极短时间（ $\approx 10^{-3}$  秒），那么讨厌的边缘效应就大为减少了。

兹，“去年秋天，旧引力方程的错误，越来越清楚地显露出来，把我带入一个艰难时期 [E25]。这一转折发生在 1915 年 7 月底到 10 月初之间。因为在 1915 年 7 月 7 日 爱因斯坦向仓格尔描述 他刚在哥廷根演讲的是“至今已经很清楚了的引力理论” [E38]。一周以后，他告诉索末菲有个临时计划，想写篇关于相对论的短文，它将指明广义相对论的方向 [E39]。但 11 月 7 日 他写信给希尔伯特说，“大约四个星期前，我发现，到那时为止，我所用的证明方法都是不可靠的” [E40]。另外，在 10 月 12 日给洛伦兹的信中，他说“我在 1914 年 10 月 [E16]) 论文里轻率地引入了 [引力的拉格朗日函数] 在线性变换下保持不变的假设” [E41]。在 1915 年 11 月完成的一系列论文中，他放弃了这一线性不变性，终于达到他 11 月 25 日提出的引力方程的最后形式。11 月 28 日 他写信给索末菲，“过去的一个月里，我度过了一生中最激动、最紧张也最成功的日子” [E42]。所有这些话放在一起使我确信，迟至 1915 年 7 月 爱因斯坦仍相信‘旧’理论，7 月到 10 月，他发现理论有问题，而最后的理论，从构思到完成是在 10 月底至 11 月 25 日之间。关于对理论旧形式的迷信，他在 12 月自嘲地写道“爱因斯坦这个家伙只图自己方便，他每年都推翻自己以前说过的话……” [E43]。

是什么使爱因斯坦在 7 月到 10 月间改变了他的思想？给索末菲 [E42] 和洛伦兹 [E25] 的信说明，他至少发现了反对旧理论的三个理由：(1)限制的协变性没有包括匀速旋转；(2)水星近日点进动的结果太小，差了一个因子 2；(3)他 1914 年 10 月对引力拉格朗日量的惟一性的证明是错误的。在接连的四篇短文中，爱因斯坦消除了所有这些缺点。“不幸的是，在 [这些] 学术论文里，永远

铭刻着我在这次奋斗中所犯的最后错误” [E42]。

2. 11 月 4 日 爱因斯坦向普鲁士科学院全体会议提出了“以相对于行列式为 1 的变换的协变性假设为基础”的广义相对论的新观点 [E44]。他在论文开头说，对 1914 年 10 月提出的方程 [E16] 他已经“完全失去了信心”。那时，他给出了引力拉格朗日量的惟一性证明，同时意识到证明“依赖于错误的概念”，他接着说：“我又回到场方程更普遍的协变性上来。三年前，在同我的朋友格罗斯曼合作时，我才怀着沉重的心情放弃了它。（应该说，在科学事业上，爱因斯坦从来没有保持长期沉重的心情。）”

我们再最后一次回顾一下，爱因斯坦和格罗斯曼曾得到结论说 [E17]，引力方程只在线性变换下不变，爱因斯坦对这一限制的证明基于他对引力方程应惟一决定  $g_{\mu\nu}$  的信念。这是他 1914 年 10 月还在继续强调的观点 [E16]。在新论文里 [E44] 他终于从三年的偏见中解放出来，这是 11 月 4 日的主要进步。虽然，他的结果还不完美，还有那么一点小小的缺陷，三个星期以后才消除，但是，道路敞开着，他也激动了：“没有哪个真正掌握了这个[新理论]的人能够逃脱它的魔力。”

最后那点缺陷，当然就是爱因斯坦关于么模变换的不必要限制。我相信，他引进这一限制的理由并不深刻。他只是说，这类限制的变换可以简化张量计算。这主要是因为  $\sqrt{g}$  在么模变换下是标量（参见方程 12.14），从而张量与张量密度的区别不存在了。结果，可以重新定义高于 1 阶的张量的协变微分。例如，我们可以用 [E45]

$$T_{i\mu}^{\nu} = \frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^i} + \Gamma_{i\lambda}^{\nu} T^{\lambda\mu} \quad (14.3)$$

来代替方程(12.13) 方程(12.17)可同样简化。“最大的简化”是方程(12.20)给出的里奇张量。记<sup>①</sup>

$$R_{\mu\nu} = r_{\mu\nu} + s_{\mu\nu} \quad (14.4)$$

$$r_{\mu\nu} = -\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\lambda}} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\lambda} \quad (14.5)$$

$$s_{\mu\nu} = \frac{\partial v_{\mu}}{\partial x^{\nu}} - \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} v_{\alpha} \quad (14.6)$$

这里 [W2]

$$v_{\mu} \equiv \Gamma_{\lambda\mu}^{\lambda} = \frac{\partial \ln \sqrt{g}}{\partial x^{\mu}} \quad (14.7)$$

因为 $\sqrt{g}$ 是标量， $v_{\mu}$ 是矢量； $s_{\mu\nu}$ 是 $v_{\mu}$ 的协变导数。因此在么模变换下 $R_{\mu\nu}$ 分解为 $r_{\mu\nu}$ 和 $s_{\mu\nu}$ 两部分，每一部分是一个独立的张量。

分解里奇张量后，爱因斯坦接着提出他的引力方程的倒数第二个形式：

$$r_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (14.8)$$

方程在局部么模变换下是协变的。这是对爱因斯坦—格罗斯曼方程的重大改进，而且还克服了爱因斯坦刚才发现的毛病，么模变换确实包括了任意变化的角速度的旋转。此外，他还证明，方程(14.8)可由变分原理导出；守恒定律也能满足（这里用了简化的定义[14.3]）而且还存在恒等式

$$\frac{\partial}{\partial x^{\alpha}} (g^{\alpha\beta} \frac{\partial \ln \sqrt{g}}{\partial x^{\beta}}) = -\kappa T \quad (14.9)$$

这里 $T$ 是 $T_{\mu\nu}$ 的迹。他把这个方程解释为对 $g_{\mu\nu}$ 的约束。一周后，他对这一关系还有更多的认识。

① 量 $R_{\mu\nu}$ 、 $r_{\mu\nu}$ 、 $s_{\mu\nu}$ 对应于爱因斯坦在[E44]中用的 $G_{\mu\nu}$ 、 $R_{\mu\nu}$ 、 $S_{\mu\nu}$ 。

在弱场极限下,  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$  (方程 12.29)) ,方程 (14.8) 回到牛顿定律。爱因斯坦对这一点的证明是他论文中最重要的部分。“坐标系不固定,因为它需要四个方程来决定。从而我们可以自由选择(我用的黑体字)<sup>①</sup>,

$$\frac{\partial h^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = 0 \quad (14.10)$$

则方程 (14.8) 和 14.10 给出

$$\square h_{\mu\nu} = 2\kappa T_{\mu\nu} \quad (14.11)$$

在静态极限下,它回到牛顿—泊松方程。

上面黑体的引文表明,爱因斯坦对广义协变性的理解有很大进步。引力方程不具体地决定  $h_{\mu\nu}$  (从而  $g_{\mu\nu}$ ) 这与因果律不矛盾。我们可以随意选择坐标系,因为它没有实在意义,爱因斯坦在论文里没有说得这么明白。但不久后,他向埃伦费斯特解释说,“如果认识到……参照系不能赋予实在性,则明显强加于[我的旧因果律疑问]的性质立刻就消失了[E43]。”

3. 11月11日 爱因斯坦退了一步。他提出一个比一周前更强的方案,理论不仅关于么模变换协变——这暗示  $g$  是标量场——而且,它应该更严格地满足

$$\sqrt{g} = 1 \quad (14.12)$$

他将引力方程写成

$$R_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (14.13)$$

这里  $R_{\mu\nu}$  是完整的里奇张量。然而,方程 (14.7) 和 (14.12) 暗示  $S_{\mu\nu} = 0$  因此方程 (14.4) 和 (14.14) 又回到 11月4日的引力方程

<sup>①</sup> ‘Wir dürfen deshalb willkürlich festsetzen...’. 方程 (4.10) 是弱场极限的谐和坐标条件 [W3]。

(14.8)。

他的新想法尽管不太动人，看来还算简单。事实上，它是相当大胆的。方程 14.12) 暗示  $T=0$ 。对电磁场来说，能量张量的迹的确为零，但对物质来说却不是这样的。于是看来有了矛盾。爱因斯坦解决矛盾的办法是“假设分子的引力场构成物质的一个基本部分。”他认为我们在物质中“看到的”迹实际上是  $T$  与这个引力场的迹的总和  $T'$ ，那么尽管  $T=0$ ， $T'$  也可以是正的。“我们在下面假定条件  $T=0$  确实是满足的。”

接着的两个星期内，爱因斯坦相信他的新方程 (14.2) 已使他距普遍的协变性更近了。11月12日他向希尔伯特表示了他的看法，“同时，问题也进了一步。也就是说  $\sqrt{g}=1$  的假设要求广义的协变性；黎曼张量直接给出引力方程。如果我现在的修正……得到证实，那么引力在物质结构中一定起着基本的作用。好奇心使我的工作更加困难” [E47]。

一周后，他指出，方程 14.12) 不会产生“根本性的疑难” [E48]。两周后，他宣布，“我最近关于这个问题的意见是错误的” [E1]

4. 11月18日 爱因斯坦仍然认为需要么模不变性和  $\sqrt{g}=1$ 。在这个“最彻底的相对性理论”的基础上，他提出两个伟大发现 [E48]，每个发现都改变了他的生活。

第一个结果，他的理论“定量……地解释了……勒维烈发现的水星轨道的百年转动……而不需要任何特殊的假定。”我相信，这一发现是爱因斯坦科学生涯中，或者也许是他一生中最激动人心的。大自然已经对他说了，他肯定是对的。“几天来，我兴奋极了” [E49]。后来，他告诉福克尔，他的发现使他的心都要跳出来了

[F2]。他对德哈斯说的[F2]更有意思：当他看到他的计算和还未解释的天文观测一致时，他感到身上有什么东西响了一下……。

爱因斯坦的发现解决了六十多年的难题。勒维烈 ( Urbain Jean Joseph Le Verrier ) 最先发现水星轨道异常，也最早试图解释这个现象。1859年9月12日，他向巴黎科学院报告了他在给费伊 ( Hervé Faye ) 的信中的内容，那封信记录了他的发现 [ L2 ] :水星近日点每百年移动 38 秒，原因是“一些尚未清楚的作用<sup>①</sup>——一个值得天文学家注意的大难题。”根据已知天体解释这个现象，惟一办法是至少为金星增加 10% 的质量，这是不能接受的。他很怀疑现象的原因可能是在水星轨道内存在着——一颗还没发现的行星。他认为，也不能排除在水星内侧存在着——一群小行星。“那么，我亲爱的朋友 (*mon cher confrère*)，这是一个在太阳身边招摇的新难题。”

水星和其他天体的近日点进动，<sup>②</sup>自 1850 到今天，<sup>③</sup>一直是实验研究的课题。纽康 ( Simon Newcomb ) 1882 年得到的水星每世纪 43 秒的进动值 [ N1a ]，现在也没改变。目前最好的值是  $43''.11 \pm 0.45$  [ W4 ]。爱因斯坦 1915 年 11 月 18 日引用的实验数据是  $45'' \pm 5$  [ E48 ]。<sup>④</sup>

19 世纪末和 20 世纪初，从理论上解释水星异常的努力还很

“... dū à quelque action encore inconnue, ‘cui theoriae lumen nundum accesserit.’ ...”

② 例如，见 [ W4 ] 的表。

③ 19 世纪详尽的参考文献目录见 [ O1 ]。

④ 爱因斯坦的数值取自弗罗因德里希 ( Erwin Freundlich ) 的评述 [ F3 ] 他对纽康的评价见 [ E49a ]。



多。勒维烈关于水内行星<sup>①</sup>或行星环的建议，也有人重新考虑。其他考虑过的机制还有：水星的卫星（也还没有发现）、星际尘埃、太阳可能是扁圆的 [O2, F3]。每一个思想，都有它一时的拥护者，但没哪一个获得过普遍接受。它们都一致认为牛顿的  $1/r^2$  引力定律严格有效。也有很多人建议根据引力定律的偏差来解释。回想一下 牛顿本人已经知道对 2 次方的微小偏差可能导致行星轨道的周期性摄动 [N2]。人们考虑过两种修正方法，一个是稍微不同的纯静态定律 [O3]，一个是带速度相关修正项的  $1/r^2$  律 [Z1]（第 13 章谈到的洛伦兹引力论属于后一种）。这些尝试，要么失败了，要么因为它们包含着可调参数而没人感兴趣。不论怎么努力，反常还是一个谜。纽康到晚年倾向于“暂时接受太阳引力并不精确是平方反比的假设” [N3]。<sup>②</sup>

在这个历史背景下，我们更容易理解，为什么爱因斯坦对于“不要特殊假设”就能解释水星近日点的进动，会那么高兴。爱因斯坦的计算技巧，很多是同标准教科书一致的，无须在这里多说，说明以下几点就够了。

a) 爱因斯坦是从他的虚空空间的场方程

$$r_{\mu\nu} = 0 \quad (14.14)$$

(参见方程 [14.8]) 和一般性条件  $\sqrt{g} = 1$  (方程 [14.12]) 出发的现代处理则以  $R_{\mu\nu} = 0$  和满足  $\sqrt{g} = 1$  的坐标选择为出发点。不论哪种方法，答案当然是一样的。爱因斯坦在准备论文时就知道了 [E50].

<sup>①</sup> 19 世纪 70 年代，一度有人相信这颗星已经发现了（它被称之为火神星）

<sup>②</sup> 对勒维烈和纽康工作的详细评论见 [C1].

b) 11 月 18 日, 他的场方程还没有  $g_{\mu\nu}R/2$  项。一周后他说, 这一项对他的实际计算没有影响。

c) 论文中所发展的近似方法标志着后牛顿天体力学的开端。爱因斯坦要求一个静态的各向同性的度规 (现代说法) [W5] 结果是:  $g_{ik} = -\delta_{ik} - \alpha x_i x_k / r^3, g_{i0} = 0, g_{00} = -1 + \alpha/r (i, k=1, 2, 3)$  这里  $\alpha$  是积分常数。以  $\alpha/r$  展开;  $\sqrt{g} = 1$  一阶近似成立。  $\Gamma_{jk}^i$  计算到一阶,  $\Gamma_{00}^i$  到二阶就够了。结果代入测地线方程 (12.28) 然后进行标准的约束轨道计算。这样, 在完成广义相对论一周前, 爱因斯坦得到了行星每公转一周的进动为  $24\pi^3 a^2 / T^2 c^2 (1 - e^2)$  对水星, 它给出  $43''/\text{百年}$  ( $a$  = 半长轴,  $T$  = 公转周期,  $e$  = 偏心率 这个结果同现代实验的关系见 [W6])。

d) 两个月后, 1916 年 1 月 16 日 爱因斯坦代表施瓦兹席尔德向普鲁士科学院宣读了一篇论文 [S4], 施瓦兹席尔德当时正在俄国前线的德国军队中。论文包含了质点静态各向同性引力场的精确解, 这是完全的爱因斯坦引力场方程的第一个精确解。 2 月 24 日, 爱因斯坦又宣读了施瓦兹席尔德的另一篇论文 [S5] 给出了处于不可压缩流体球引力场中的质点问题的解, 施瓦兹席尔德半径就是在这里首次引入的。 6 月 29 日, 爱因斯坦在普鲁士科学院发表讲话 [E51], 纪念施瓦兹席尔德。施瓦兹席尔德在俄国前线染病不久, 于 5 月 11 日去世。爱因斯坦高度评价了他作为实验家和理论家的才能和贡献 以及他 (1909 年以来) 任波茨坦天文台台长的业绩。爱因斯坦最后表示, 他相信施瓦兹席尔德的工作将继续激励科学的发展……。

现在回到 11 月 18 日的论文。爱因斯坦只用了半页篇幅介绍他的第二个发现 光线弯曲 数值是他以前发现的两倍, 光线通过

太阳将发生  $1''.7$  (而不是  $0''.85$ ) 的偏转。“众所周知 [W7] 这一结果也能借助上面提到的  $g_{\mu\nu}$  获得, 此时用它来计算非约束轨道。① 这一结果的重要影响留在第 16 章讨论。

5. 11 月 25 日 [E1]

$$R^{\mu\nu} = -\kappa(T^{\mu\nu} - 1/2g^{\mu\nu}T) \quad (14.15)$$

大功告成了。它满足守恒律;  $\sqrt{g}=1$  不再是基本方程, 而是方便选择坐标系的重要指南。以前认为有重要物理意义的恒等式 (14.9), 现在成为一个平凡结果。一周前的计算仍然成立。

任何服从狭义相对论的物理学理论都能纳入广义相对论; 这一普遍理论对物理学理论不提供任何判据……最后, 广义相对论有完整的逻辑结构。 [E1]

注意, 方程 14.15) 等价于  $R^{\mu\nu} - g^{\mu\nu}R/2 = -\kappa T^{\mu\nu}$

我在 12d 说过, 爱因斯坦同格罗斯曼合作时, 还不知道比安基恒等式 [W8]

$$(R^{\mu\nu} - 1/2g^{\mu\nu}R)_{;\nu} = 0 \quad (14.16)$$

11 月 25 日, 他仍然不知道, 因而他没有认识到能量-动量守恒定律

$$T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0 \quad (14.17)$$

是方程 14.16) 的自然结果 相反 他把守恒律作为理论的约束条件! 我解释一下他是如何论证的。从方程 (14.15) 出发 但是以待定的  $\alpha$  代替  $1/2$  协变微分 (14.15) 并利用方程 (14.17) 接着求

爱因斯坦将这些  $g_{\mu\nu}$  代入  $g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = 0$ , 然后应用惠更斯原理。

方程 14.15 的迹 然后微分 得到  $R^{\mu\nu} + \alpha(1-4\alpha)^{-1} g^{\mu\nu} R)_{;\nu} = 0$  (用  $g_{\mu;\lambda} = 0$ )。选取坐标系使  $\sqrt{g} = 1$  看有没有  $\alpha$  的解, 我们发现  $\alpha = 1/2$ 。爱因斯坦的坐标选择当然是可以的, 但是这个不必要的限制, 使他没能看出方程 14.16) 是一个普遍的协变关系。在 15c 我们将看到比安基恒等式最终是如何进入物理学的。

爱因斯坦曾一度错误地相信方程 (14.9) 这也许对他还是有益的。因为他曾用和上面完全一样的方法, 发现了那个可笑的方程。在方程 (14.8) 的情况下,  $r = -\kappa T$  而  $r_{;\nu}^{\mu\nu} = 0$  方程 14.9) 左端一项的出现是因为他已经在 11 月 4 日的论文里重新定义了协变导数 [参见方程 14.3)] 使守恒律以  $\partial T_{\mu\nu} / \partial x^\mu - T^{\alpha\beta} \partial g_{\alpha\beta} / 2 \partial x^\nu = 0$  来替代方程 14.17)。

11 月 28 日, 爱因斯坦写信告诉索末菲, 他和格罗斯曼三年前曾考虑过方程 14.15), “没有左边的第二项”, 但是却错误地认为它不包括牛顿近似 [E42]。

12 月 10 日 他写信给贝索 说他“zufrieden aber ziemlich kaputt”[E52]. ①

1933 年 6 月 20 日, 被驱逐出德国的爱因斯坦, 在英国的格拉斯哥大学发表了广义相对论起源的演讲, 演讲结束时, 他说:

在黑暗中探寻我们感觉到却说说不出的真理的岁月里, 渴望越来越强, 信心时来时去, 心情焦虑不安, 最后终于穿过迷雾看到光明, 这一切, 只有亲身经历过的人才会明白。[E52a]

感到满意, 但差不多累垮了。

## 14d. 爱因斯坦和希尔伯特<sup>①</sup>

再说一次，爱因斯坦在 11 月 25 日向普鲁士科学院提出了他的引力方程的最后形式（方程 14.15）。五天前，希尔伯特曾向哥廷根自然科学协会提交过一篇论文 [ H4 ]，包括有同样的方程，但是附加了一个条件。爱因斯坦从几周前的错误中走出来，除限制变换和守恒性质而外，他保留了完全自由的  $T^{\mu\nu}$  结构。另一方面，希尔伯特却认为引力与所有其他力一样具体，他的  $T^{\mu\nu}$  相应地（这就是他的条件）有着确定的动力学形式：“……我相信 [ 我的论文 ] 同时包含了爱因斯坦和米的问题的解。”

1912—1913 年间，米在麦克斯韦方程的非规范不变修正的基础上提出一种电磁和物质的场论 [ M4 ]，这意味着它是一个除引力而外包容一切的理论。<sup>②</sup> 他的思想在 20 世纪 20 年代曾引起人们注意，但在今天却只留下历史价值，同我们现在的主题无关。我们满可以这样说，希尔伯特的目标不仅是提出一个引力理论，而是要提出一个关于整个世界的公理化理论，这使他的论文从题目“物理学的基础”（*Die Grundlagen der Physik*）到结论都很豪迈。他在文章里表示，他相信他的基本方程将最终揭示原子结构的秘密。1915 年 12 月，爱因斯坦指出，从广义相对论的观点来看，希尔伯特对米理论的忠心是不必要的 [ E53 ]。他后来写道，“希尔伯特关于物质的估价在我看来似乎太幼稚了” [ E54 ]。尽管这些批评很

<sup>①</sup> 也见 [ M3 ]。

在 第 13 章曾参考过米的引力思想。爱因斯坦对米电磁理论的评论见 [ E52b ]。读者在泡利 [ P2 ] 和外尔的教科书 [ W9 ] 中，可以找到对米理论的清楚说明。

有道理，希尔伯特的文章还是对广义相对论有着非常重要的独立的贡献：从变分原理推导方程 (14.15)。

将变分原理用于引力，希尔伯特不是第一个，洛伦兹在他以前就用过了 [L3]，爱因斯坦在几周前也用过 [E44]。然而，他第一个正确表达了这个原理。对于无穷小变分  $g^{\mu\nu}(x) \rightarrow g^{\mu\nu}(x) + \delta g^{\mu\nu}(x)$  使在积分区域边界上  $\delta g^{\mu\nu} = 0$  则变分原理为

$$\delta \int (L - \frac{1}{2\kappa} R) \sqrt{g} d^4x = 0 \quad (14.18)$$

( $R$  是黎曼曲率标量,  $L$  是物质的拉格朗日量)。我们知道, 如果  $L$  依赖于  $g^{\mu\nu}$  而与  $g^{\mu\nu}$  的导数无关, 则方程 (14.18) 将导出包括迹项在内的方程 (14.15)。<sup>①</sup>

希尔伯特的论文还叙述了 (而不是证明!!) 下面的定理。令  $J$  为  $n$  个场的标量函数 对于无穷小  $\xi^\mu$  的变分  $x^\mu \rightarrow x^\mu + \xi^\mu(x)$ ,  $\delta \int J \sqrt{g} d^4x = 0$  则在  $n$  个场之间存在四个关系。现在知道, 如果  $J = L$  这些关系即能量-动量守恒定律; 如果  $J = R$ , 它们是比安基恒等式 [方程 (14.16)] 但在 1915 年, 这些事实还不清楚。希尔伯特在把这个定理用于他的理论时, 误解了它的意义, 他让  $J$  对应于总的引力-电磁拉格朗日量 则  $J$  依赖于  $10+4$  个场 即  $10$  个  $g_{\mu\nu}$  和  $4$  个电磁势, 它们之间存在四个恒等式, “作为这个定理……的结果, 四个 [电磁] 方程可以认为是引力方程的结果, ……从这个意义说, 电磁现象是引力效应。从这个发现中, 我看到了黎曼问题的简

<sup>①</sup> 对变分原理的详细讨论参见 [W10] 和 [M5]。张量  $T^{\mu\nu}$  定义为  $\delta \int L \sqrt{g} d^4x = 1/2 \int \sqrt{g} T^{\mu\nu}(x) \delta g_{\mu\nu}(x) d^4x$ 。

单而惊人的解决，他是第一个从理论上寻找引力和光的关系的人。”<sup>①</sup>显然，希尔伯特也不知道比安基恒等式！

这些错误和其他一些错误，在希尔伯特 1924 年的论文中都改正了 [H5]。题目还是“物理学的基础”，它包括 1915 年文章的纲要和一年后写的续篇 [H6]。在《希尔伯特文集》中（每卷开头都有他自己写的前言）没有这两篇早期论文，只有 1924 年的那篇修订 [H7]。在后面这篇文章里，希尔伯特把关于四个恒等式的定理的证明归功于诺特（1915 年她在哥廷根）；1918 年，诺特的论文也同时发表了 [N4]。到 1924 年，洛伦兹、克莱因、爱因斯坦和外尔都写过关于变分法和由它们引出的恒等式的文章（进一步讨论见 15c）。

然而，我们现在该来谈爱因斯坦和希尔伯特了。他们相同的发现几乎是同时的，这就引出一个显然的问题：1915 年他们之间有过什么交流？这把我带回那年夏天。如以前所说，6 月底到 7 月初，爱因斯坦在哥廷根住过约一个星期，在那里他“认识了希尔伯特，也喜欢希尔伯特。我在那儿做过六次两小时的演讲” [E9]，<sup>②</sup> 题目是广义相对论。“令我高兴的是，我成功地使希尔伯特和克莱因完全信服了” [E56]。他刚回到柏林，又写道：“我对希尔伯特充满热情。一个重要人物……” [E39]。从爱因斯坦演讲的时间看，他讲的是 1914 年 10 月论文所描绘的不完全理论。我已经说过，爱因斯坦取得巨大进展是在 1915 年 10—11 月，但是希尔伯特在

<sup>①</sup> 这里希尔伯特指的是黎曼死后出版的《文集》(Nachlass) [R2] 中“引力与光” (Gravitation und Licht) 一文。

至少早在 1912 年 10 月，爱因斯坦与希尔伯特就开始了通信往来，他那时还在苏黎世。

什么时候完成他 11 月 20 日提交的论文，我知之甚少。不过，借克莱因的话说，像爱因斯坦一样，希尔伯特的决定性思想也是 1915 年秋出现的——不在哥廷根，而在波罗的海岸边的吕根岛 (Rügen)[K8]。

关于这关键的 11 月，最能说明问题的，是爱因斯坦 (E) 和希尔伯特 (H) 在这期间的通信。从 11 月 7 日至 25 日喜欢写信的爱因斯坦却没有同任何人通过信——除了希尔伯特 (如果普林斯顿的爱因斯坦档案馆在这期间是完整的话)。我们来看他们彼此都说了些什么。

11 月 7 日, E 致 H 围绕 11 月 4 日论文的证明“在这篇文章里我导出了引力方程，我认识到四个星期前的证明方法是错误的。”信还提到索末菲的来信，希尔伯特曾根据这封信发现了 10 月论文的问题 [E40] 爱因斯坦知道不仅他一个人发现了他先前工作的缺陷 在我看来 所有的 11 月通信都是由这件事情引出来的。

11 月 12 日, E 致 H 通报  $\sqrt{g}=1$  的假设 (11 月论文) 随信寄两份 1914 年 10 月论文 [E4]。

11 月 14 日, H 致 E 很激动，谈他自己“公理化解决了您的主要问题……它是普遍数学定理的一个结果，(推广的麦克斯韦) 电动力学方程作为引力方程的数学结果而出现，因此引力和电力根本没有什么区别。”邀请爱因斯坦参加这个题目的演讲，演讲计划在 11 月 16 日举行 [H8]。

11 月 15 日 E 致 H “您明信片上的提示给我带来了极大的希望。”他抱歉不能参加讲座。他累坏了，胃疼得厉害。索要一份希尔伯特论文的校样 [E57]。



11月18日, E致H 显然爱因斯坦收到了希尔伯特的文章。“您给的[方程]组,就我所见,和我在几周发现并提交科学院的东西完全一致。”[E58]。

11月19日, H致E 祝贺他解决近日点问题,“如果我能算得像您那么快,那么电子将在我的方程面前投降,而氢原子也得坦白它为什么不辐射”[H9]。这时,离希尔伯特提交他20日论文只有一天。两人的11月通信,我们所知的就这些了。

让我们回到爱因斯坦11月18日的论文。写这篇文章时(他自己承认)他正忘形于近日点的发现(同一天正式宣布),又累又病,还在为25日的论文工作。也许他想过吸取希尔伯特18日论文的内容,但在我看来,那是极不可能的。一年多后,克莱因写道,他发现,在那篇论文里的方程太复杂了,他没有检验过[K9]。的确,希尔伯特的论文包含着爱因斯坦需要引入的迹项<sup>①</sup>,但是,爱因斯坦引入它的方法,如我们以前说的,是用他在11月4日论文中已经用过的技巧。

因此,无论爱因斯坦“就我所见”的与希尔伯特的一致,还是希尔伯特“在我看来”的与爱因斯坦的一致[H2],我们都不应看得太重。我更同意克莱因的意见,他们两个“相互交流,这在同时代多产的数学家之间并不罕见”[K10]。(我要撇开爱因斯坦的数学家特征,他从来不是、也从不假装是数学家。)我还同意克莱因说的,“不存在优先权的问题,因为两个作者追寻着完全不同的思想路

<sup>①</sup> 希尔伯特的  $T_{\mu\nu}$  具有非零迹,因为他的  $L$  来自米理论。我发现很难相信爱因斯坦能够想到,希尔伯特的  $T$  必须为零[E59]。

线，它们的结果的一致性不是马上可以确定的” [K11]。我确信，爱因斯坦是广义相对论物理理论的惟一创立者，而他和希尔伯特都发现了基本方程 (14.15)。

我不知道两个主人公会不会同意这种说法。

11月20日到12月20日，两人之间发生了一些事情。爱因斯坦写信给希尔伯特说：“我们之间已经有了一点不愉快，起因我不愿去分析。我一直在同它所引起的痛苦做斗争，现在完全胜利了。我又怀着往日的友好想您，请您也能这样对我。两个真正的朋友，能在一定程度上从卑鄙的世俗中解脱出来，却不能相互喜欢，那真令人羞愧” [E60]。事情的经过，恐怕永远不会被人知道了。不过，施特劳斯在回答我的一个提问时写道：“爱因斯坦觉得希尔伯特也许在无意中剽窃了他在哥廷根讨论会上提出的 [大大错误的!] 思想。<sup>①</sup> 爱因斯坦告诉我，希尔伯特给他寄来书面道歉，说 [这次讲话] 他已经全忘了... ..” [S1]。不论发生了什么，爱因斯坦和希尔伯特还在，他们后来通信的语气也还是友好的。1916年5月，爱因斯坦在柏林举行了一次有关希尔伯特工作的研讨会 (colloquium) [E61]。在这次会上，他很有可能表达了自己对希尔伯特研究方法的批评。<sup>②</sup> 1917年5月，他告诉从哥廷根来的一个学生：“现在想描绘世界图景真是太大了，因为还有很多事情我们远不能预料。”显然，这指的是希尔伯特希望的引力和电磁的统一。说这话时，爱因斯坦38岁，不久以后，他将开始他自己的世界

我只能认为这是指6—7月的讲话，因为很难相信爱因斯坦在1915年11月访问过哥廷根。

爱因斯坦在给埃伦费斯特的信中说：“我不喜欢希尔伯特的表达.....无谓的特殊.....无谓的复杂.....华而不实的结构 (通过浮华的方法达到超人的 (Übermensch) 思想).....” [E62]。

图景的计划.....。

## 参考文献

- A1. G. Arvidsson, *Phys. Zeitschr.* **21**, 88 (1920).
- B1. S. J. Barnett, *Physica* **13**, 241 (1933); *Phys. Zeitschr.* **35**, 203 (1934); *Rev. Mod. Phys.* **7**, 129 (1935).
- B2. —, *Phys. Rev.* **6**, 239 (1915).
- B3. N. Bohr, *Phil. Mag.* **30**, 394 (1915).
- B4. S. J. Barnett, *Phys. Rev.* **10**, 7 (1917).
- B5. E. Beck, *AdP* **60**, 109 (1919).
- B6. Cf. W. Braunbeck, *Phys. Zeitschr.* **23**, 307 (1922) and also the discussion at the end of [H1a].
- C1. J. Chazy, *La Théorie de la Relativité et la Mécanique Céleste*, Chap. 4. Gauthier-Villars, Paris, 1928.
- D1. Cf., e. g., *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 4, pp. 324, 327. Scribner's, New York, 1971.
- E1. A. Einstein, *PAW*, 1915, p. 844.
- E2. —, letter to J. Laub, July 22, 1913.
- E3. —, letter to H. A. Lorentz, August 14, 1913.
- E4. —, letter to P. Ehrenfest, undated, probably winter 1913–1914.
- E5. —, letter to H. Zangger, March 10, 1914.
- E6. —, *Viertelj. Schr. Naturf. Ges. Zürich* **59**, 4 (1914).
- E7. —, letter to M. Besso, early March 1914; *EB*, p. 52.
- E7a. —, letter to C. Seelig, May 5, 1952.
- E8. —, letter to P. Ehrenfest, April 10, 1914.
- E9. —, letter to H. Zangger, July 7, 1915.
- E10. —, *Die Vossische Zeitung*, April 26, 1914.
- E11. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.), Vol. 3. Teubner, Leipzig, 1915.
- E12. —, *PAW*, 1914, p. 739.
- E13. —, letter to H. Zangger, July 7, 1915.

- E14. —, letter to H. Zangger, undated, probably spring 1915.
- E15. —, letter to H. A. Lorentz, December 18, 1917.
- E16. —, *PAW*, 1914, p. 1030.
- E17. — and M. Grossmann, *Z. Math. Phys.* **62**, 225 (1913).
- E18. —, [E16], p. 1046, Eq. 23b.
- E19. —, [E16], p. 1083, the second of Eqs. 88.
- E20. —, [E16], p. 1084.
- E21. —, [E16], p. 1085.
- E22. —, [E16], p. 1066.
- E23. — and M. Grossmann, *Z. Math. Phys.* **63**, 215 (1915).
- E24. —, [E16], pp. 1075, 1076, especially Eq. 78.
- E25. —, letter to H. A. Lorentz, January 1, 1916.
- E26. —, letter to T. Levi-Civita, April 14, 1915.
- E27. —, letter to P. Straneo, January 7, 1915.
- E28. —, *PAW*, 1915, p. 315.
- E29. — in *Kultur der Gegenwart* (E. Lecher, Ed.), Vol. 3. Teubner, Leipzig, 1915.
- E30. —, *AdP* **47**, 879 (1915).
- E31. —, letter to M. Besso, February 12, 1915; *EB*, p. 57.
- E32. —, *Naturw.* **3**, 237 (1915).
- E33. — and W. de Haas, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **17**, 152 (1915); correction, **17**, 203 (1915).
- E34. — and W. de Haas, *Versl. K. Ak. Amsterdam* **23**, 1449 (1915).
- E35. — and W. de Haas, *Proc. K. Ak. Amsterdam* **18**, 696 (1915).
- E36. — and O. Stern, *AdP* **40**, 551 (1913).
- E37. —, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **18**, 173 (1916).
- E38. —, letter to H. Zangger, July 7, 1915.
- E39. —, letter to A. Sommerfeld, July 15, 1915. Reprinted in *Einstein/Sommerfeld Briefwechsel* (A. Hermann, Ed.), p. 30. Schwabe, Stuttgart, 1968.
- E40. —, letter to D. Hilbert, November 7, 1915.
- E41. —, letter to H. A. Lorentz, October 12, 1915.

- E42. —, letter to A. Sommerfeld, November 28, 1915. Reprinted in *Einstein/Sommerfeld Briefwechsel*, p. 32.
- E43. —, letter to P. Ehrenfest, December 26, 1915.
- E44. —, *PAW*, 1915, p. 778.
- E45. —, [E44], Eq. 5a.
- E46. —, *PAW*, 1915, p. 799.
- E47. —, letter to D. Hilbert, November 12, 1915.
- E48. —, *PAW*, 1915, p. 831.
- E49. —, letter to P. Ehrenfest, January 17, 1916.
- E49a. —, *Science* **69**, 248 (1929).
- E50. —, [E48], p. 831.
- E51. —, *PAW*, 1916, p. 768, footnote 1.
- E52. —, letter to M. Besso, December 10, 1915; *EB*, p. 59.
- E52a. —, *The Origins of the General Theory of Relativity*. Jackson, Wylie, Glasgow, 1933.
- E52b. — and J. Grommer, *PAW*, 1927, p. 3.
- E53. —, letter to A. Sommerfeld, December 9, 1915. Reprinted in *Einstein/Sommerfeld Briefwechsel*, p. 36.
- E54. —, letter to H. Weyl, November 23, 1916.
- E55. —, *PAW*, 1916, p. 1111.
- E56. —, letter to W. J. de Haas, undated, probably August 1915.
- E57. —, letter to D. Hilbert, undated, very probably November 15, 1915.
- E58. —, letter to D. Hilbert, November 18, 1915.
- E59. J. Earman and C. Glymour, *Arch. Hist. Ex. Sci.* **19**, 291 (1978).
- E60. A. Einstein, letter to D. Hilbert, December 20, 1915.
- E61. —, letter to D. Hilbert, May 25, 1916.
- E62. —, letter to P. Ehrenfest, May 24, 1916.
- F1. A. D. Fokker, *AdP* **43**, 810 (1914).
- F2. —, *Ned. Tydschr. Natuurk.* **21**, 125 (1955).
- F3. E. Freundlich, *Astr. Nachr.* **201**, 51 (1915).
- H1. B. Hoffmann, Proc. Einstein Symposium Jerusalem, 1979.
- H1a. W. de Haas in *Proceedings of the Third Solvay Conference*, April

- 1921, p. 206. Gauthier-Villars, Paris, 1923.
- H1b. W. Heisenberg, *Z. Phys.* **49**, 619 (1928).
- H2. S. P. Heims and E. T. Jaynes, *Rev. Mod. Phys.* **34**, 143 (1962).
- H3. W. Heisenberg, letter to W. Pauli, December 17, 1921. See *W. Pauli; Scientific Correspondence*, Vol. 1, p. 48. Springer; New York, 1979.
- H4. D. Hilbert, *Goett. Nachr.*, 1915, p. 395.
- H5. —, *Math. Ann.* **92**, 1 (1924).
- H6. —, *Goett. Nachr.*, 1917, p. 53.
- H7. —, *Gesammelte Abhandlungen*, Vol. 3, p. 258. Springer, New York, 1970.
- H8. —, two postcards to A. Einstein, November 14, 1915.
- H9. —, letter to A. Einstein, November 19, 1915.
- K1. C. Kirsten and H. J. Treder, *Albert Einstein in Berlin, 1913—1933*, Vol. I, p. 95. Akademie Verlag, Berlin, 1979. This volume is referred to below as K.
- K2. K, p. 98.
- K3. K, p. 101.
- K4. K, p. 50.
- K5. M. Klein, *Paul Ehrenfest*, Vol. 1, p. 194. North Holland, Amsterdam, 1970.
- K6. K, p. 50.
- K7. F. Klein, *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*, Vol. 1, pp. 553, 568, 586. Springer, New York, 1973.
- K8. —, letter to W. Pauli, May 8, 1921; Pauli correspondence cited in [H3], p. 31.
- K9. —, [K7], p. 559.
- K10. —, letter to W. Pauli, March 8, 1921; Pauli correspondence cited in [H3], p. 27.
- K11. —, [K7], p. 566.
- L1. A. Lande, *Z. Phys.* **7**, 398 (1921).
- L2. U. J. J. Le Verrier, *C. R. Ac. Sci. Paris* **49**, 379 (1859).

- L3. H. A. Lorentz; *Proc. K. Ac. Wetensch. Amsterdam* **23**, 1073 (1915).
- L4. —, *Collected Papers*, Vol. 5, p. 246. Nyhoff, the Hague, 1934.
- M1. J. C. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism* (1st edn.), Vol. 2, p. 202. Clarendon Press, Oxford, 1873.
- M2. —, *ibid.*, pp. 200—204.
- M3. J. Mehra, *Einstein, Hilbert and the Theory of Gravitation*. D. Reidel, Boston, 1974.
- M4. G. Mie, *AdP* **37**, 511 (1912); **39**, 1 (1912); **40**, 1 (1913).
- M5. C. Misner, K. Thorne, and J. Wheeler, *Gravitation*, Chap. 21. Freeman, San Francisco, 1970.
- N1. O. Nathan and H. Norden, *Einstein on Peace*, Chap. 1. Schocken, New York, 1968.
- N1a. S. Newcomb. *Astr. Papers of the Am. Ephemeris* **1**, 472 (1882).
- N2. I. Newton, *Principia*, liber 1, sectio 9. Best accessible in the University of California Press edition, 1966 (F. Cajori, Ed.).
- N3. S. Newcomb, *Encyclopedia Britannica*, Vol. 18, p. 155. Cambridge University Press, Cambridge, 1911. N4. E. Noether, *Goett. Nachr.*, 1918, pp. 37, 235.
- O1. S. Oppenheim, *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften* Vol. 6, Chap. 22, p. 94. Teubner, Leipzig, 1922.
- O2. —, [O1], Chap. 4.
- O3. —, [O1], Chap. 5.
- P1. M. Planck, *PAW*, 1914, p. 742.
- P2. W. Pauli, *Relativity Theory*, Sec. 64. Pergamon Press, London, 1958.
- R1. O. W. Richardson, *Phys. Rev.* **26**, 248 (1908).
- R2. B. Riemann, *Gesammelte Mathematische Werke und Wissenschaftlicher Nachlass* (H. Weber, Ed.), p. 496. Teubner, Leipzig, 1876.
- S1. E. G. Straus, letter to A. Pais, October 1979.
- S2. G. G. Scott, *Rev. Mod. Phys.* **34**, 102 (1962).
- S3. J. Q. Stewart, *Phys. Rev.* **11**, 100 (1918).
- S4. K. Schwarzschild, *PAW*, 1916, p. 189.

- S5. —, *PAW*, 1916, p. 424.
- S6. Se, p. 261.
- T1. R. Tolman and J. Q. Stewart, *Phys. Rev.* **8**, 97 (1916).
- W1. See, e. g., S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, p. 16. Wiley, New York, 1972. This book is quoted as *W* hereafter.
- W2. *W*, p. 107.
- W3. *W*, p. 163.
- W4. *W*, p. 198.
- W5. *W*, p. 176.
- W6. C. M. Will in *General Relativity* (S. Hawking and W. Israel, Eds.), p. 55. Cambridge University Press, New York, 1979.
- W7. *W*, p. 188.
- W8. *W*, p. 147.
- 265 W9. H. Weyl, *Space, Time and Matter*, Sec. 28. Dover, New York, 1961.
- W10. *W*. Chap. 12.
- W11. H. Weyl, *AdP* **54**, 117(1917).
- Z1. J. Zenneck, *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*, Vol. 5, Chap. 2, Part 3. Teubner, Leipzig, 1903.



## 第 15 章 新动力学

### 15a. 从 1915 年到 1980 年

爱因斯坦对光的性质思索了 10 年，最后到达狭义相对论。在那些年中，电磁学并非他所专注的惟一的物理学领域，有一段时期，他也思考过统计力学和普朗克辐射定律的意义。另外，他还做过实验。最后导致他 1905 年 6 月论文的几步是他在两个多月思想活动的强烈爆发中迈出的。

爱因斯坦对引力思索了 8 年，最后到达广义相对论。在那些年中，引力并非他所专注的惟一的物理学领域，有一段时期，他也思考过量子物理学和统计力学。另外，他还做过实验。最后导致他 1915 年 11 月 25 日论文的几步，也是在两个多月思想活动的强烈爆发中迈出的。

无论从哪方面说，狭义相对论和广义相对论的发展都是有差别的。1905 年 6 月，爱因斯坦在他关于狭义相对论的第一篇文章里，就立即给出了它的最终形式；相反，1915 年 11 月 25 日以前，他的引力论文不下一打，并常在后来的文章里推翻以前的结论。11 月 25 日的论文是不朽的贡献，但这篇文章又同 1905 年 6 月的论文相反，只是代表新领域的第一个港湾，它发表时惟一可见的灯塔是一周前获得的关于水星近日点进动的理论与实际的一致（那

是怎样的灯塔呀!)。1905 年和 1915 年, 爱因斯坦都提出了新的基本原理。如我多次强调的, 1905 年的理论特征是运动学的, 它的新思想已经由下一代物理学家推向了更广阔的领域; 相反, 广义相对论是新运动学和新动力学的精美交织。它的一个运动学新特点从一开始就完全显露出来了: 洛伦兹不变性失去了整体有效性, 但它的局域不变性仍在继续起着重要作用。然而, 广义相对论方程蕴涵的新动力学却在爱因斯坦生前和死后四分之一世纪里, 都没有被彻底地认识。诚然, 1915 年以来, 我们对广义相对论的理解已经有了巨大进步, 我们对它的信心增强了, 而且还没有遇到什么确切的对爱因斯坦理论的有效性的限制。但是, 即使在纯粹经典的水平上, 今天也不会有人声称他已经完全掌握了所谓广义相对论的非线性动力学中的丰富的动力学思想。

我已经完成了作为广义相对论创立者的爱因斯坦的素描, 现在简单地来谈谈作为广义相对论的实践者的爱因斯坦。他关于统一场论的工作, 这里不谈, 留在第 17 章单独讨论。

准备写这一章的时候, 书桌上堆满了书。显然, 爱因斯坦的论文都在。另外, 我还有以下这些伸手可及的书: 泡利 1920 年为百科全书写的相对论论文 [ P1 ] 及其英译本 [ P2 ],<sup>①</sup> 它因作者在 20 世纪 50 年代中叶增加了注释而特别有意义; 外尔的《空间、时间、物质》(*Raum, Zeit, Materie*) 的几种版本 (包括第 4 版英译本 [ W1 ]), 不同版本的变化对理解广义相对论在创立以来的头 10 年的演化是

<sup>①</sup> 中译本《相对论》(凌德洪、周万生译, 上海科学技术出版社 1979 年 6 月)即根据 1958 年的英译本 [ P2 ] 翻译的。——译者

很重要的。诺斯(North)关于 1965 年前宇宙学历史的著作 [ N1 ] 美国物理学教师协会出版的宇宙学史料集 [ S1 ] 以及慕尼茨(Munitz) 编辑的宇宙学论文集 M1 [ 我将之作为消遣 ) 其中 , 最老的作者是柏拉图 , 而最年轻的作者是我的朋友夏马 (Dennis Sciama)。这些书放在一起 , 就是 1915—1925 这 10 年的指南 , 它们使我看到这个时期的广阔图景 , 我建议想了解细节的读者 , 去阅读这些容易得到的文献。

我桌上的东西还有很多。温伯格的现代教科书 [ W2 ] 和迈斯纳(Misner)、索恩(Thorne)、惠勒(Wheeler) [ M2 ] 的现代教科书(人们爱称它为“电话号码簿”), 是我的广义相对论从爱因斯坦生前到身后的发展的史料来源。最后, 我这个不完备的小书库还有一些当代的东西, 有引力辐射源和引力辐射探测器研讨会的最新报告 [ S2 ], 霍金(Hawking) 和以色列(Israel) 编辑的爱因斯坦百年回顾 [ H1 ], 普林斯顿举行的爱因斯坦诞辰 100 周年学术会议记录 [ W3 ], 以及国际广义相对论和引力论学会出版的两卷百年论文集 [ H2 ]。让这 5 部著作在我左右, 有两个理由: 第一, 这些关于广义相对论最新进展的权威的最新评论, 提醒我不必写一部完整的广义相对论历史, 因为这个使命无论如何远远超出了本书的范围和作者的能力; 第二, 它们会提醒我, 如果我不能指明广义相对论在今天的实践同爱因斯坦时代相比, 在方法上已经发生了巨大的变化, 那么我的理解就没有什么洞察力。我的确想说明这些变化, 但更详细的情况, 还是希望读者去查阅这些新书。

为了后面更直接的讨论爱因斯坦的工作, 下面, 先来谈谈从 1915 年到现在的历史概况。

1915—1925 年是巩固和创新的 10 年。主要进步包括：1917 年勒维—契维塔在数学中引入平行移动概念，并很快在相对论中广泛使用 [L1] 由于爱因斯坦、希尔伯特、克莱因、洛伦兹、薛定谔和外尔的工作，人们对能量-动量守恒定律有了更好的认识；爱因斯坦关于引力波的第一篇论文以及爱因斯坦、德西特 (Willem de Sitter) 和弗里德曼 (Aleksandr Aleksandrovich Friedmann) 在相对论宇宙学的开拓性探索。投身其中的理论物理学不多，但队伍正在壮大。

还有两个重要的实验进展。1919 年的日食远征队证实，光线弯曲度接近爱因斯坦 1915 年 11 月 18 日的预言 E1 (下一章我还要回来讨论这件事情)。1924 年 12 月，哈勃宣布的一个实验结果，结束了广义相对论的第一个 10 年，也平息了持续一个多世纪的争论：以不可辩驳的事实，证明了河外星系仙女座 M31 的存在 [H3]。<sup>①</sup> 哈勃 1929 年的伟大发现，更加激发了宇宙模型的理论研究，也为这些研究指明了方向。哈勃发现，宇宙在膨胀，星云以正比于距离的速度在退行。用哈勃自己的话说，存在“……一个大致的速度与距离之间的线性关系……这个显著的特点……能使无数资料用来讨论空间的一般曲率” [H3a]。<sup>②</sup> 然而，宇宙学的文献还是太少了，尽管质量很高。<sup>③</sup> 这一时期，也有几次重新回到欧几里得几何的引力论和宇宙论的尝试 [N4] 但都没有什么影响。

在 20 世纪 30 年代、40 年代直到 50 年代初，积极从事广义相

对于宇宙距离的简史，请参阅 [W4]。

<sup>②</sup> 关于后来几十年对哈勃常数值和改进和哈勃定律以前的历史，见 [N2]。

勒卡 (Lecat) 编辑了相对论截止 1924 年初的最详细文献 [L2]，也可参见 [N3]。1917 年至 1932 年间主要的宇宙学论文目录，见 [R1]。

对论研究的人一直很少。谈到那些年代，伯格曼有一次对我说：“只有当你了解你的 6 个好朋友在做什么时你才能知道在广义相对论中发生了什么事情。”宇宙模型和爱因斯坦方程的特解的研究还在进行，也有对运动问题的进一步探讨（自 1927 年起 这些问题就令爱因斯坦感兴趣）问题是，一定的物质分布的运动方程 能否和怎样从引力场方程得到。总的说来，广义相对论在这一个时期的进展是“三个成功”——水星近日点的进动、光线的弯曲和红移——和一个基础，即宇宙膨胀的基础。

然而，20 世纪 30 年代出现了一种新事物，很快受到人们注意，然后，或多或少沉默了四分之一世纪，过后终于成为广义相对论的主题之一。起初，它基本上是一个核物理习题，奥本海默和他的同事塞伯（Robert Serber）决定研究中子星内部核力与引力的相互作用 [O1]，<sup>①</sup>目的之一是改进朗道（Lev Davidovich Landau）对普通星变成中子星的极限质量的估算。（在朗道讨论的模型中，这个质量约是 0.001 太阳质量，他还认为每颗星内部都有中子核 [L2a]）。他们的工作受到了托尔曼（Richard Chase Tolman）的重视。托尔曼与奥本海默和他的伙伴讨论的结果，在 1939 年发表了两篇论文，一篇是托尔曼关于爱因斯坦场方程的流体球静态解 [T1]，紧跟着的是奥本海默和韦尔科夫（George Volkoff）的一篇，题为《论致密中子核》[O2]，这篇文章为广义相对论星体结构理论奠定了基础。它讨论的模型是理想费米中子气构成的静态球状星体。作者发现，只要星体质量  $\leq 1/3$  太阳质量，它就是稳定的（对自由中子气体来说，这一质量目前的最佳值为 0.7 太阳质量 叫奥

我感谢塞伯同我讨论奥本海默及其合作者的有关中子星的论文。

本海默-韦尔科夫极限)①半年后,奥本海默和斯尼德(Hartland Snyder)的论文《关于连续引力吸引》发表了[O3] 论文摘要的第一行写道:“当所有的热核能源都耗尽时,足够重的恒星将发生坍缩[紧随它的收缩]将无限继续下去。”由此,黑洞物理学诞生了。黑洞是惠勒1967年在纽约戈达德空间研究所(Goddard Institute of Space Studies)举行的会议上,为星体坍缩的最终状态取的名字[W5]。这时脉冲星刚发现,中子星和黑洞已不再认为是“只在书本上令人好奇的怪物……射电和光学天文学家为了揭示天空中更多更奇更新的事物[已经开始了]他们的努力合作”[W6]。

这些事情在爱因斯坦身后为我们带来了广义相对论的崭新特点。

爱因斯坦生前,没有开过一次专门讨论相对论和引力论的重大国际会议。②第一次关于相对论的国际会议于1955年7月在柏林举行时,爱因斯坦已经去世3个月了。会议是为庆祝相对论发表50周年举行的,曾邀请过爱因斯坦,他因健康原因谢绝了。不过,他曾写信给大会组织者,恳请将这荣誉给洛伦兹和庞加莱。泡利主持大会议程。浏览会议文献③我们会注意到,所有的问题还是关于旧相对论的(怎么会这样,是另一回事)。来自22个国家的89名代表参加了这次会议,即现在大家知道的GR0,④它标志着

① 详情见 M2]第 627 页。

② 索尔未会议(那些年后,也失去了它的崇高地位)到1958年才开始讨论这些主题[M3]

③ 这些文献在1956年作为《瑞士物理学报》(*Helvetica Physica Acta*)的增刊4出版。

有时也称它为GR1,而没有为重要的教堂山会议编号。会议文献发表情况是,GR0,GR1(*Rev. Mod. Phys.* 29, 251—546, 1957). GR2(CNRS Report, 1962) . GR3 [Conférence Internationale sur les Théories la Gravitation 国际引力论会议).Gauthier-Villars, 1964 和 GR7[S3]. 1970年后在GR会议提交的论文,见《广义相对论与引力论》(*General Relativity and Gravitation*)杂志。

一系列广义相对论和引力论的国际会议的开始：GR1 在北卡罗莱纳教堂山 (Chapel Hill) 召开 (1957), GR2 在罗约蒙特 (Royaumont, 1959), GR3 在华沙 (1962), GR4 在伦敦 (1965), GR5 在第比利斯 (Tbilisi, 1968), GR6 在哥本哈根 (1971), GR7 在特拉维夫 (1974), GR8 在加拿大的滑铁卢 (Waterloo, 1977)。最近一次 GR9, 1980 年 6 月在耶拿 (Jena) 召开, 有来自 53 个国家的约 800 人参加, 这说明, 相对论研究领域的队伍在成长壮大。

那么, 这个壮大是什么引起的, 从什么时候开始的呢? 对这个问题, 夏马回答说: “伯尔尼会议两年后, 德维特 de Witt 组织了教堂山会议……从某种意义上说, 这才是真正的开始; 那就是, 这次会议将相互隔离的人团结到一起来, 告诉大家面临着一系列共同的问题, 无疑也是更重要的一个原因是天文发现的惊人进展, 这大概始于 1954 年天鹅座 A 被认证为一个遥远星系, 它是天空的第二最强射电源, 这意味着: (a) 射电 (而不是光学) 天文学可以观测到一个哈勃半径以外的星系。 (b) 射电星系需要的能量 (根据同步辐射假设) 来自它的静止质能  $\approx 10^8$  太阳质量, 即星系质量的  $10^{-3}$ 。接着, 一系列发现接踵而来, 1962 年的 X 射线源, 1963 年的类星体, 1965 年的  $3^\circ\text{K}$  背景辐射和 1967 年的脉冲星。天鹅座 X-1 中黑洞的认证是从 1972 年开始的; 另一个高潮是克鲁斯卡尔 (Martin Kruskal) 1960 年对施瓦兹席尔德解的研究, ①它打开了现代黑洞理论的大门” [S5]。于是, 新的实验的发展推动着广义相对论研究活动越来越广泛的展开, 并展现出新的研究方向。在

① 这里夏马指的是克鲁斯卡尔 [K1] 和塞克勒斯 (Szekeres) [S4] 独立引入的坐标系。详见 [M2] 第 31 章。

爱因斯坦时代少数几个实践者的身后，现在正崛起着成百上千的新一代。

现在我们来到1982年，由夏马所描述的新纪元已经取得了重要的进展。1980年6月，为了解这一领域的更多的情况，我参加了GR9会议，我的印象在下面会看到。接下来的5节，每一节讨论一个广义相对论的题目，它们都是爱因斯坦在1915年以后积极研究过的。每一节里，我都会说明他做了些什么，还要大概谈谈这个问题后来如何发展。在最后一节里，我将把那些完全属于后爱因斯坦时代的问题都列出来。

## 15b. 三个成功

1933年，爱因斯坦在格拉斯哥讲广义相对论的起源时 [E2]，回忆起在他奋斗经历中，“这些思想上的错误，耗费了我两年艰苦的工作 最后 到1915年，我终于认清了它们的本来面目，又怀着悔恨的心情回到黎曼曲率，它成功地使我发现了这个理论同天文学的经验事实的关系。”

1914—1915年，是混乱的两年，不仅对爱因斯坦个人，对那些努力追随他的思想漩涡的同行也是如此。例如，1915年12月，埃伦费斯特给洛伦兹写信时，把我们所谓的广义相对论称为“1915年11月25日理论”。他问洛伦兹是否同意，依他个人理解，爱因斯坦已经放弃了他1914年关于不可能写出协变形式的引力场方程的论证 [E3]。从1915年12月到1916年1月，洛伦兹和埃伦费斯特之间的通信，既充满热情又颇具个性。62岁的洛伦兹在哈姆演算着，错了，又改正，最后终于明白爱因斯坦在想什么。在给



埃伦费斯特的信中，他写道，“我已经向爱因斯坦辉煌的结果表示了祝贺”[L3]。埃伦费斯特那年 35 岁，住在离莱顿 10 英里的地方，也在发奋研究相对论。他给洛伦兹的回信有点儿绝望，这点绝望最终淹没了他：“您说‘我已经向爱因斯坦辉煌的结果表示了祝贺’，这句话对我来说，它的意义就像一个费里马逊人<sup>①</sup>通过秘密信号认他的伙伴一样”[E4]。

同时，洛伦兹收到爱因斯坦的来信，爱因斯坦为他的称赞感到高兴，还说，“我关于引力的一系列论文，是一连串错误的步骤[Irrwegen]，不过，还是这些错误将我一步一步地引到了目的地。因而，基本方程是完全正确的，可是推导糟透了；这个不足现在也没有消除”[E5]。接着他暗示，也许洛伦兹能做好这件事。“我自己能做，因为一切我都清楚。然而不幸的是，我天生不善于与人交流，所以，尽管我写的东西可以确信是对的，但在别人也是难以理解的。”不久后，洛伦兹又写信给埃伦费斯特：“我写信告诉爱因斯坦，既然他已经达到他的理论顶点，那么用尽可能简单的形式来说明它的原理就是很重要的（这样就可以让每个物理学家或者无论如何也应该让大多数的物理学家），都能使自己熟悉它的内容。我说我本人很愿意尝试这一工作，但如果他自己做的话，会更好些”[L4]

洛伦兹亲切的忠告一定激励着爱因斯坦为他的新理论写第一篇纲要[E6]。<sup>②</sup>这篇美妙的 50 页的文章在 1916 年 3 月完成，而

<sup>①</sup> 费里马逊(Freemason)是远古部落社会的人，他们相互帮助，亲如手足，有一些相互传达信息的手势和暗号。——译者

<sup>②</sup> 这篇文章曾在《物理学纪事》上发表[E7]，在 1916 年又出版了单行本，发行量很大，还被译成英文[E8]。

且被普遍接受了。这可能鼓励爱因斯坦写更多的东西，他的表达并不像想的那么差。1916 年他完成了《狭义与广义相对论浅说》( *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie gemeinverständlich*)<sup>①</sup>一书，这是他最著名的著作 [E8a]。在日食远征队的结果激起巨大反响后 (见第 16 章) 这本书的需求量急剧增加，它的第 10 次印刷发行于 1920 年到 1972 年已重印了 22 次。

爱因斯坦在 1916 年 3 月文章的最后一小节，提出了 3 个新预言：红移，光线弯曲和水星近日点进动。最后一段记录了水星的反常现象，那时只有这个实验可以证实他的理论。对于红移，在 1916 年还几乎一无所知，而光线弯曲在 1919 年才首次观察到。

在评论 1979 年实验相对论的状况时，威尔金森 (David Wilkinson) 指出：

早先的 [ 这 ] 两个成功 [ 近日点进动和光线弯曲，是 ] 几十年艰辛而缓慢的实验进步的结果。大约过了 60 年 广义相对论才在百分之一的精度水平上获得经验证明。[ 理论 ] 进步.....所要求的技术和实验方法的发展远远超过了 20 世纪 20 年代初的能力。[W7]

英译本叫 *On the Special and the General Relativity Theory, a Popular Exposition*, 1920 年版 (Methuen, London)，爱因斯坦常开玩笑说，这本书应该叫 “gemeinunverständlich”，普遍地难以理解。(本书的中译本由杨润殷译，胡刚复校，上海科学技术出版社，1964 年版。——译者)

我建议，读者如果想更多了解现代相对论的技术和社会的各方面，请参考威尔金森的这篇文章。关于广义相对论（宇宙论除外的现状 读者应该查阅夏皮罗的报告 你会发现 红移 无论天体的还是地面的）、光线弯曲、水星和其他星体的近日点进动以及现代对等效原理的更精细的检验，在误差范围内都得到了很好的验证 [S6]。另一个现代评论，对这些现状有如下总结：

迄今为止 [ 广义相对论 ] 战胜了所面临的每一个困难 但在新的领域里，新的困难正在升起。广义相对论能否从这些困难中获得新生，有些人充满怀疑，有些人怀着虔诚的希望，有些人满怀最大的信心。 [W8]

现在，我要放下广义相对论的理论和实验比较的话题，然而，我要祝愿并且相信，未来的火箭、卫星和行星探索实验会获得巨大成功。

关于这三个成功，爱因斯坦后来又怎么看呢？前一章我讲过了，在发现水星近日点进动的正确值时，他非常激动。在给洛伦兹 1916 年元旦祝愿（“我愿您及您的全家新年幸福，愿欧洲真正和平”时，他还相信这是一个重要发现。“我现在正为历尽艰辛获得的理论的明晰和它与水星近日点运动的一致而感到快乐”[E9]。如我们将在下一章看到的，1919 年日食远征队的结果也令他激动不已。但是后来，自然而然地，他偏于强调理论的简单性，而不太关心它的结果。1930 年，他写道，“我认为广义相对论的主要意义，不在于一些小小的观察效应的预言，而在于它的基础的和谐和简单”[E10]。他越来越强调形式的方面。1930 年他又

表达了对广义相对论思想的想法，说它“纯粹是形式的观点，而不是对自然的特定假设……非 [ 广义的 ] 相对性的理论不仅包含了对事物的陈述，[ 而且 ] 还包括对事物和描述这些事物所需要的坐标系的陈述，另外，从逻辑观点看，这个理论不会比广义的理论更令人满意，广义相对论的内容与坐标系的选择无关” [E11]。1932 年他走得更远：“在我看来这个理论 [ 广义相对论 ] 几乎不具有内在可能性…… $g_{\mu\nu}$  和  $\phi_{\mu}$  [ 电磁势 ] 并不对应于连续统结构中的一个统一概念” [E12]。

于是我们看到，爱因斯坦从成功地面对实验事实的快乐转到了高度的抽象，并最终对他自己在寻找统一场理论过程中取得的成绩表示不满。他不再用微小的效应来增进物理学知识，我们今天也没发现任何可以确认能威胁物理学原理的小效应，对这些原理的运用，我们也许还是很笨拙的。

然而，广义相对论的确预言了新的传统类型的小效应。其中一个效应，也引起了爱因斯坦注意，那是 1936 年，曼德 (R. W. Mandl) 向他指出 [M4]，如果一个观察者同一颗“近”星和一颗“远”星完全在一条直线上，他会发现远星的环状虚像，这是它的光经过近星发生弯曲的结果。这个观点当然不是新的。爱丁顿已经知道，如果不完全在一条直线上，则我们可以得到远星的两个点像 [E12a]。不论怎么说，令曼德高兴的是 [M5] 爱因斯坦接着发表了他关于强度与观察者到两星中心连线的延长线的距离的关系的计算 [E12b]。<sup>①</sup> 他相信“，没有希望观察到这个现象。”然而，1979 年发现，明显的双类星体 0957 + 561A, B 实际上是同一个类星体

① 后来对这个效应的计算，参见 [S6a]

的双像 [W8a]，另外有一个星系起着引力透镜的作用 [Y1]。

## 15c. 能量与动量守恒；比安基恒等式

在 F. 克莱因文集中，有一组文章讨论以下两方面的联系：一方面是几何，另一方面是群论和不变量理论，这就是他自己的爱尔兰根纲领 (Erlangen program)。最后 3 篇讨论广义相对论。(对克莱因来说，“相对论和相对论与他过去的爱尔兰根纲领思想之间的联系……为他带来了数学灵感和数学产物的最终爆发”[W9]。) 三篇之一完成于 1918 年，题目是《关于爱因斯坦引力论中的动量和能量守恒的微分定律》[K2]。在引言中，克莱因发现“如我们将看到的 在下面的 守恒定律 中 我真的不再需要计算 而只用变分计算的最基本公式就行了。”这一年，诺特定理出现了。

1915 年 11 月，希尔伯特和爱因斯坦都还不知道通向守恒定律的光明大道。希尔伯特要走得近些。我在这里回顾一下在 14d 讨论过的几个结论。他的引力方程来自正确的变分原理：

$$\delta \int (L - \frac{1}{2\kappa} R) \sqrt{g} d^4 x = 0 \quad (15.1)$$

变分条件是  $g_{\mu\nu} \rightarrow g_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}$  这里  $\delta g_{\mu\nu}$  为无穷小，而且在积分区域边界上为零。他还不加证明地提出下述定理：如果  $J$  是  $n$  个场的标量函数，而且，

$$\delta \int J \sqrt{g} d^4 x = 0 \quad \text{当} \quad x^\mu \rightarrow x^\mu + \xi^\mu \quad (15.2)$$

则  $n$  个场之间存在 4 个恒等式。他相信，这些恒等式意味着电磁现象是引力的结果，但他没能看到这个定理立刻就产生守恒定律 [H4]。继续 1915 年的工作，他在 1916 年 12 月发表的文章

[H5]，还是没有改变对方程 (15.2) 的解释(从希尔伯特同爱因斯坦的关系来看，注意下面一点是很有意思的：希尔伯特在文章中说他的主题是“爱因斯坦相对性原理的新物理学” [H6])。至于爱因斯坦，他在 1914 年 [E13] 和 1915 年 11 月 4 日 [E14] 从变分原理导出了引力场方程，但两次都错了。在 1915 年 11 月 25 日的论文中 [E15] 能量—动量守恒的出现，是作为一个理论的限制条件，而不是广义协变性的几乎直接的结果。这一次，他没有用变分原理。

我再最后重复一遍，在关键的 11 月，希尔伯特和爱因斯坦都不知道比安基恒等式。我们来看，这些事情以后是怎样发展的。

爱因斯坦 1916 年 3 月的纲要 [E6] 在守恒定律上是很薄弱的。变分原理虽然引进了，但那只是在纯引力的情况下，数学也是错的；<sup>①</sup>物质似乎是以合理方式引进的，但没有系统 ([E6] 第 16 节)；守恒定律是通过具体计算，而不是靠不变性论证确立的 ([E6] 第 1 节)。1916 年 10 月，爱因斯坦回到能量—动量守恒上来 [E16]，<sup>②</sup>这次他给出了普遍证明 (没有坐标条件)：对任意物质的拉格朗日量  $L$  能量—动量张量  $T^{\mu\nu}$  满足：

$$T_{;\nu}^{\mu\nu} = 0 \quad (15.3)$$

这是引力场方程的一个结果。我马上还要回来谈这篇文章，但先必须注意另一个发展。

1917 年 8 月，外尔终于得出变分原理 [方程 (15.2)] [W10]。

① 正如巴格曼向我指出的，爱因斯坦先特设了坐标条件  $\sqrt{g}=1$ ，然后为这个条件引入没有拉格朗日乘子的变分原理。

② 这篇论文的一个英译本，收在著名的《相对论原理》经典论文集 [S7] 中。文集还收入了爱因斯坦、洛伦兹、闵可夫斯基和外尔的其他论文。

(他说) , 让我们假定  $\xi^\mu$  为无穷小, 而  $\xi^\mu$  及其导数在积分区域边界上为零 则当  $J=L$  时, 方程 (15.3) 成立 ; 而  $J=R$  时 我们得到 :<sup>①</sup>

$$(R^{\mu\nu} - 1/2g^{\mu\nu}R)_{;\nu} = 0 \quad (15.4)$$

克莱因在 1918 年初发表的他给希尔伯特的一封信 [ K4 ] 表明 , 在哥廷根学术界, 这个原理 [ 方程 (15.2) ] 很快就清楚了, 而且正确地用到广义相对论的情形, 得出 8 个 而不是 4 个恒等式  $J=L$  时 4 个,  $J=R$  时 4 个。

最有趣的是, 专家们在 1917 年还不知道, 外尔根据变分原理导出方程 (15.4) 是在用一种独特的新方法来获得一个熟悉已久的旧结果。希尔伯特、克莱因 当然还有爱因斯坦 都没有认识到 方程 (15.4) 即缩并的比安基恒等式 早在 1880 年就由德国数学家福斯( Aurel Voss ) 首次导出了 然后 里奇在 1889 年、克莱因从前的学生比安基在 1902 年, 也分别独立得到过这个恒等式。<sup>②</sup> 在外尔的《空间、时间、物质》的 5 个版本( 第 5 版于 1921 年出版 ) 和泡利 1921 年的评论 [ P1 ] 中, 都没有出现过比安基的名字。1920 年, 爱丁顿在他的《空间、时间与引力》一书中写道: “我怀疑有人已用直接的代数方法证明了这些等式” [ E17 ]。第二年 他自己也证明过 [ E18 ]。1922 年, 有人给出一个简单推导 [ J1 ] 接着指出 方程 (15.4) 来自

$$R_{\lambda\mu\sigma;\tau} + R_{\lambda\tau\nu;\sigma} + R_{\lambda\mu\sigma;\tau\nu} = 0 \quad (15.5)$$

这就是我们现在知道的那个比安基恒等式。这里  $R_{\lambda\mu\sigma}$  是黎曼曲率

推导方程 (15.3) 和 (15.4) 的方法, 见 [ W11 ]。关于这个问题的其他贡献见 [ P3 ]。外尔结果与克莱因结果之间的关系, 见 [ K3 ]。

② 更详细的历史情况, 见舒顿关于里奇计算的书的第二版 [ S8 ]。

张量  $H7$  ]。<sup>①</sup> 这篇文章的作者哈沃德 (Harward) 指出, “我自己发现了这个定理 [方程 (15.5)], 但我不相信以前就没有人发现过。” 他的猜测当然是很对的。事实上, 方程 (15.5) 是老一辈发现的。后来, 荷兰数学家舒顿 (Jan Schouten) 和斯特瑞克在 1924 年使它受到了青年一代的注意: “注意到这个定理 [方程 15.5] 就是在法国和意大利特别有名的比安基恒等式, 是很有意思的” [S9]。

从现代观点来看, 恒等式 (15.3) 和 (15.4) 是著名的诺特定理的特例。诺特参与过哥廷根关于能量-动量守恒定律的讨论, 她是 1915 年 4 月去哥廷根的。不久, 就有人向她征求意见。“艾米·诺特帮助我明确了能量守恒的问题……”, 这是希尔伯特写信告诉克莱因的 [K4] 克莱因告诉希尔伯特: “你知道, 诺特小姐一直在指点我的工作 [K4]。那时, 诺特本人曾告诉一个朋友, 她所属的一个哥廷根小组正在为爱因斯坦进行最困难的计算, 但是, “我们谁也不知道这有什么用” [D1]。她自己关于连续变换群下的不变性与守恒定理之间的关系的著作在 1918 年发表 [N5]。诺特定理成为现代理论物理学的一个基本工具。在她的著作中, 这个定理不过是个副产物。她去世后, 爱因斯坦写道: “依当今大多数杰出数学家的判断, 诺特小姐是自女子能享受高等教育以来最有创见的数学天才” [E19]。

我们现在回到爱因斯坦 1916 年 10 月的文章, 它的主要一点与其说是微分的, 倒不如说是积分的守恒定律。如我们今天知道

<sup>①</sup> 通过缩并方程 (15.5) 并利用黎曼张量的对称性质, 可以得到方程 (15.4) [W12]。



的，这不是一个平凡的问题。方程 (15.3) 可以等价地写成如下形式：

$$\frac{\partial \sqrt{g} T_{\mu}^{\nu}}{\partial x^{\nu}} - 1/2 \sqrt{g} T^{\alpha\beta} \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^{\mu}} = 0 \quad (15.6)$$

第二项——说明引力场与物质之间可能的能量交换——使我们不能通过简单的对空间区域的积分，将微分形式转换为积分形式，爱因斯坦发现了克服这个技术困难的方法，他第一次把方程 (15.6) 写成无散度的形式 [E16]。他注意到，由于曲率标量对  $g_{\mu\nu}$  的二阶导数是线性的，因此可以惟一定义一个量  $R^*$  通过关系

$$\int R \sqrt{g} d^4 x = \int R^* d^4 x + \text{表面项}, \quad (15.7)$$

它只与  $g_{\mu\nu}$  及其一阶导数有关。然后定义一个  $t_{\mu}^{\nu}$

$$t_{\mu}^{\nu} = 1/2 \left( R^* \delta_{\mu}^{\nu} - \frac{\partial R^*}{\partial (\partial g^{\alpha\beta} / \partial x^{\mu})} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x^{\nu}} \right) \quad (15.8)$$

借助引力场方程，可以证明方程 (15.6) 能够变成另外的形式

$$\frac{\partial}{\partial x^{\mu}} (\sqrt{g} T_{\nu}^{\mu} + t_{\nu}^{\mu}) \quad (15.9)$$

这样 我们可以定义

$$P_{\mu} \equiv \int (\sqrt{g} T_{\mu}^4 + t_{\mu}^4) d^3 x \quad (15.10)$$

为封闭系统的总能量—动量。爱因斯坦强调，不论形式如何，方程 (15.9) 是完全协变的。但是，量  $t_{\mu}^{\nu}$  不是一个广义协变的张量密度，而且，它只有在仿射变换下才是张量。

这些结果的特别意义在于，它们表明，爱因斯坦不再害怕黎曼几何，他已经精通它并且在创造性地运用它了。那些年，只有当物理学需要的时候，他才会处理一些艰难的数学问题。我差不多可以听见他说，“广义相对论是正确的，我们应该能够为封闭系统的

总能量和动量赋予物理意义，我会发现该怎么做的。”我认为，他在 1916 年 10 月的论文中，从方程 (15.9) 走到 (15.6) 而没走相反的路，不会是偶然的。关于方程 (15.9) 的推导和  $t_{\mu}^{\nu}$  的仿射张量的证明，我请读者参考泡利的评述 [P4] 和朗道与栗弗席兹 (Lifshitz) 关于能量—动量张量的讨论 [L5]。<sup>①</sup>

方程 (15.9) 的发现，翻开了广义相对论研究的新篇章。新问题来了。由于  $t_{\mu}^{\nu}$  不是一般性的张量密度，那么，能量和动量的定义在多大程度上与坐标系的选择无关呢？接下来的两年里，克莱因、勒维—契维塔、洛伦兹、泡利、薛定谔等人，<sup>②</sup>都在讨论这个问题。当然还有爱因斯坦本人，他在 1918 年又一次回到这个问题上来。他写道：“[方程 (15.9) 的] 意义在一般情况下是相当可疑的。”他注意到，在任何给定的点  $t_{\mu}^{\nu}$  的值可以是任意的，而能量—动量在整个空间的积分仍然有确定意义 [E19b]。后来的研究证明，只要度规在空间无限远处适当地接近闵可夫斯基度规，则  $P_{\mu}$  可以很好地定义。

许多相关的问题仍然在爱因斯坦去世以后兴起的领域中继续深入地研究着。例如，能否计算有限区域内的总能量？能否将能量分为引力和非引力部分？纯引力能量是否存在？引力体系的总能量是正的吗？这些问题（还有很多没有满意的答案）的情况报告参见特劳特曼 (Trautman) 的文章 [T2]。我最后要提到的问题是 GR9 的一个全会报告的主题，这个难题（多年来我们知道的正能量纲）的提出是因为  $t_{\mu}^{\nu}$  本身不是正定的。不过，1979 年发现，总能量

此书的中译本《场论》(任朗、袁炳南译，高等教育出版社，1959) 是根据 1948 年俄文版译出的。这里提到的讨论见该书 § 11—19。——译者

<sup>②</sup> 关于这方面的早期工作，泡利在 [P5] 中有过叙述，也可以参见 [E19a]。

量的非正定性还是能够证明的 [ S10] 我从 GR9 回来后 才知道原始的证明可以大为简化 [ W13]。

## 15d. 引力波

在 GR9 期间，直到我听了帕萨迪纳的索恩和莫斯科的布拉金斯基所作的关于为探测引力波而设计的实验的现状的全会报告，我才更加强烈地感到，广义相对论是属于未来的。索恩说，虽然引力波到现在还没有发现，但在 20 世纪内我们是可以观测到它的。15 个实验小组，有的还是跨国的，正为此准备着。

这些实验小组不打算像赫兹发现电磁波那样用地面的方法。原子伴随引力辐射的跃迁几率，比它在光子发射情况下的跃迁几率要小约 10 的 50 次方。我们只好在天空寻找最好的引力辐射源 特别是那些外来的、强烈的、罕见的星体景象 如恒星核向中子星或超新星的塌缩，或者黑洞的形成。这些源产生的强度比地球上所能获得的源大约高  $10^{50}$  倍。引力天线需要建得足够灵敏以克服强烈的背景干扰问题。在声学探测器、韦伯棒（以韦伯（Joseph Weber）的名字命名 他在 20 世纪 60 年代关于引力波的开拓性工作激发了今天全世界的努力 [ W14]）单晶体以及诸如激光干涉仪的电磁检测器等方面的工作正在取得进步。这些仪器被设计来探测从 100Hz 到 10kHz 的频率范围。人们还在考虑利用在空间探测器以多普勒跟踪方法寻找引力波（ $10^{-2} - 10^{-4}$  Hz 范围内）。探测仪器的研究带来一门新兴的技术：量子电子学 [ C1]。我们的希望不仅是观测引力波，还要让它为一门新的实验天文学服务。引力波通过物质时，它们的吸收和散射比中微子还要少得多，所以，

它是我们探索超致密物质内部情况的最好工具。可以预言，引力波将为我们提供超新星核、中子星和黑洞演化的动力学信息。而且，它完全可能提供实验的准则，使我们能在正统的爱因斯坦广义相对论和它的一些现代变种理论之间做出抉择。

关于引力波物理学的兴味盎然而极具挑战性的方方面面的具体内容和参考文献，可以在本章前面提到的那些书中找到。另外，我还要特别向大家指出 1978 年的研讨会记录 [ S2 ] 韦伯在 GRG 一书中写的一章 [ H2 ]，道格拉斯 ( Douglass ) 和布拉金斯基和威尔 ( Will ) 在霍金—以色列 ( Hawking-Israel ) 书中写的几章 [ H1 ] 以及索恩在 1980 年完成的对那些评论的评论 [ T3 ]。这些文章揭示了天体物理学、粒子物理学和广义相对论的相互促进，还表明数值相对论在日新月异的计算机帮助下取得了长足的进步。

爱因斯坦提出了引力波的四极公式。

还在相对论之前，洛伦兹就在 1900 年猜想“引力”可以归结为一种以不高于光速的速度传播的行为” [ L6 ]。引力波 ( onde gravifique ) 这一术语第一次出现于 1905 年 那时 庞加莱在讨论将洛伦兹不变性推广到引力问题 [ P6 ]。1916 年 6 月 爱因斯坦第一次以明确的形式表述了这些定性的思想 [ E20 ]。他利用了弱场近似：

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (15.11)$$

这里  $\eta_{\mu\nu}$  是闵可夫斯基度规， $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ ， $h_{\mu\nu}$  中高于一次的那些项忽略不计。在无源情况下，他证明

$$h'_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - 1/2 \eta_{\mu\nu} h^a_a \quad (15.12)$$

这个量满足  $\square$  (是达朗贝尔算子)

$$\square h'_{\mu\nu} = 0 \quad (15.13)$$

方程成立的条件是坐标系满足“规范条件”

$$\frac{\partial h'_{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = 0 \quad (15.14)$$

(方程 15.14) 有时叫希尔伯特条件, 因为他第一次在一般情况下证明了这个方程对一阶  $h_{\mu\nu}$  总是满足的 [H5]。)

爱因斯坦不仅指出, 在弱场近似情况下存在以光速传播的引力波, 而且还指出, 在 10 个  $h'_{\mu\nu}$  中, 只有两个具有独立的物理意义 或者 如我们现在说的 只存在两种螺旋状态。他还提出 不论从电磁观点看, 还是从引力观点看, 存在无辐射的稳定的原子内部轨道, 都是一样神秘的! “看来, 量子理论不仅需要修正麦克斯韦的电动力学, 而且还要修正新的引力论”。也许, 他重新对量子力学的关注驱使他在几个月以后做出了对量子电动力学的巨大贡献: 1916 年秋, 他引入了自发跃迁和诱导跃迁概念, 并重新推导了普朗克的辐射定律 [E21]。

在 1916 年 6 月的同一篇论文里, 爱因斯坦还尝试计算了一个线性尺度为  $R$  的受激发的孤立力学系统所释放的引力辐射总量。他还引入了两个近似: (1) 只考虑波长  $\lambda$  满足  $\lambda/R \gg 1$  的情况; (2) 力学系统内部的所有速度都  $\ll c$ 。那时, 他误以为恒球对称力学系统会释放引力辐射。直到 1918 年他才修正了这个错误, 提出了四极公式 [E22] 力学系统的能量损失由下式给出:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{G}{5c^5} \sum_{ij} \ddot{Q}_{ij} \ddot{Q}_{ij} \quad (15.15)$$

① 爱因斯坦的结果差了一个因子 2。这个因子在方程 (15.15) 中已经修正了, 而且已将方程写成现代形式。点代表对时间的导数。当然, 方程 (15.15) 代表引力多级展开中的主项。关于展开的讨论, 请参阅 [T4]。

这里

$$Q_{ij} = \int \rho(x_i x_j - 1/3 \delta_{ij} r^2) d^3 x \quad (15.16)$$

是质量四极矩 而  $\rho$  是源物质密度。

1918 年后, 爱因斯坦又回到过引力波问题上来。1937 年, 他和罗森研究了精确引力方程的柱面波解 [ E23] 这在 [ W15 ] 中有进一步分析。

引力波是否存在? 四极公式的推导是否正确? 如果真是那样, 那么这个公式是否适用于上面提到的那些将为我们提供最强引力辐射源的极端情形呢?

关于这些问题, 有一篇影响深远而重要的文献, 它从 1922 年谈起, 开头引用了爱丁顿的评论, 他相信引力波是一种乱真信号, 而且“以思想的速度……传播” [E24]。1937 年, 爱因斯坦大概以为引力波不存在 (参见第 29 章), 我们在 [ H8 ] 看到: “在当今的理论物理学家中, 普遍存在一种强烈的观念, 相信存在着引力辐射。” GR9 会议上, 四极公式的有效性是全会报告和讨论会的一个主题。在 1980 年快结束的时候, 出现了一篇文献, 它是“论有关爱因斯坦四极公式有效性的争论” [W16]。

回答以上问题的困难, 固然来自引力的非线性特征, 它不能归入爱因斯坦的线性化近似中。没有人怀疑, 方程 (15.15) 对引力波的非引力源, 在长波低速近似下, 是正确的, 如弹性振动棒的情况。问题的困难在于如果物质源和引力场本身同时作为引力波的源, 会发生什么事情。这些难题的提出, 同我们上节提过的能量域的定义有些关系。关于最新评价, 我特别请大家参阅 [ E25 ] 和 [R2], 不那么严格的评论, 可以读 [T5]。我本人对这些问题研究

不够 不敢妄加评论。<sup>①</sup>

最后谈谈上天赐予我们的礼物，脉冲双星 PSR1913+16，这是“已知能以相对论的引力为工具决定天体物理学参量的第一个系统”[W17]。这一系统使我们有可能去检验广义相对论所定量预言的因引力四极辐射的能量损失而产生的周期变化是否正确。在 GR9 上报告的这个损失为四极预言的  $1.04 \pm 0.13$  倍 这个结果当然没能证明四极公式的有效性，不过也没冲淡人们直接观测引力波的渴望。然而，我们似乎更应该注意，脉冲双星坚定了我们信念，四极公式离目标不会很远，而实验相对论专家们对引力波的探索，也不会是徒劳的。

## 15e. 宇宙学

Die Unbegrenztheit des Raumes besitzt... eine grözere empirische Gewisheit als irgend eine äußere Erfahrung. Hieraus folgt aber die Unendlichkeit keineswegs...

Bernhard Riemann, Habilitationsvortrag, 1854. <sup>②</sup>

1. 爱因斯坦和马赫 1916年2月，爱因斯坦正在准备他的关于广义相对论的第一篇纲要时，听说马赫逝世了。他停下自己的

<sup>①</sup> 我要感谢埃勒斯 (J. Ehlers) 和哈瓦斯 (P. Havas) 在这组问题上有启发性的讨论。

<sup>②</sup> 德文：“无论哪种关于外在世界的经历……空间的无界性总会有更大的经验可靠性 但是绝不能据此以为空间是无穷无尽的。”这是黎曼 1854 年 6 月 10 日在哥廷根大学作无薪讲师的就职演讲，题目是《关于几何基础的假设》(Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen)，这篇演讲标志着黎曼几何的诞生。——译者

工作，写了篇谈马赫的短文 [E6] 寄给《自然科学》(Naturwissenschaften) 杂志；而他的提纲，《物理学纪事》在一周以后才收到。爱因斯坦谈马赫，不像普通的悼念，他头一回表现出非凡的天才，以敏锐的笔触来描绘一个人和他的工作，把他放到他所处的时代中，去公正地评说他的功过。

马赫是一个很有成就的数学、实验物理学和哲学教授，在文章里，爱因斯坦颂扬了他多方面的贡献，但最高的评价还是留给了马赫那部对力学所做的历史的和批判的分析的书 [M6] 那是一部在学生时代就深刻地影响过爱因斯坦的著作 [E27] 那时是贝索向他推荐的 [E28]。在伯尔尼，他又和奥林匹亚科学院的伙伴们重新读过 [S11]。1909 年爱因斯坦曾给马赫写信说，在他的所有著作中，他最欣赏这一部 [E29]。<sup>①</sup> 起初，马赫似乎很赞同相对论，因为在同年写给马赫的另一封信中爱因斯坦写道：“我很高兴您喜欢相对论” [E30]。在这篇纪念文章里，爱因斯坦在广泛摘录马赫对牛顿的绝对空间和绝对运动等概念的著名批判后指出，“这里摘录的部分表明，马赫已经清楚地认识到了古典力学的薄弱方面，而且离提出一个一般的相对性理论已经不远，而这差不多还在半个世纪以前！” [E26]。马赫在他那部 19 世纪的经典著作里，的确批判了牛顿关于人们可以区别绝对转动和相对转动的观点：“我不能同意这个观点。依我看只存在相对运动而且我可以说在这方面，转动和平移之间没有区别” [M]。<sup>②</sup> 爱因斯坦在写自己的

<sup>①</sup> 爱因斯坦给马赫的 4 封信还保留着，但没有马赫给爱因斯坦的信。赫尼克 (Herneck) [H9] 和霍尔顿 [H10] 曾讨论过这些信件 另外他们还详细介绍了这两个人之间的关系。

在这种联系下，读者也许愿意重温一下牛顿的旋转水桶实验和马赫对它的分析 比如可以参阅 [W18]。1916 年 2 月，爱因斯坦作了一个关于傅科摆的演讲 [E31]。



1916 年纲要时，头脑中就浮现着马赫关于转动的讨论：它的第二节小标题为“关于合理推广[狭义]相对性假设的理由”开头是这样说的：

经典力学和狭义相对论都同样地有一种认识论的毛病 [指匀速平移比其他任何类型的相对运动有更优越的地位]，首先强调这一点的可能是马赫。 [E26]

1910 年，马赫明确表示了他对洛伦兹、爱因斯坦和闵可夫斯基等人的工作的看法 [M8]。1913 年 1 月前后，爱因斯坦给他写信说，对他“表现出来的对新 [即爱因斯坦-格罗斯曼] 理论的友好兴趣”他感到多么的高兴 [E32]。然而，到晚年，马赫反对相对论了。1913 年 7 月 他在一部著作中写道：“我拒不接受现在的原子信念 同样 我也必须……断然否认我是相对主义者们的先驱。”而且，在他看来，相对论似乎“正越来越成为教条” [M9]。这本书直到 1921 年才出版。尽管如此，爱因斯坦仍一如既往地尊重他。他在 1930 年写道 [E33]：“几乎可以毫无疑问地认为，这 [马赫的反应] 是由于他年事日高而逐渐失去了接受新思想的能力的结果。因为理论的总方向是和马赫的思想一致的，所以有理由认为，马赫是广义相对论的先驱。”爱因斯坦在逝世两周前，接受了最后一次采访。他显然愉快地回忆了访问马赫的往事，还谈到他敬佩的 4 个人：牛顿、洛伦兹、普朗克和马赫 [C2]。他们以及麦克斯韦，是爱因斯坦承认过的他的真正的先驱者，他没有再提到过别的人。

在讨论马赫对爱因斯坦的影响时，有必要澄清 3 个问题之间

的差别。

第一，马赫对一切运动的相对性的强调。我们刚才已经看到，对这一点，爱因斯坦曾经而且一直是无条件尊重的。

第二，马赫的哲学，或者，也许更恰当地说，他的科学方法论。“马赫反对并打破了 19 世纪物理学的教条主义”，这是难得一见的爱因斯坦对马赫的哲学地位的赞扬 [E34]。1922 年，爱因斯坦向一群哲学家发表了如下的看法：“马赫的体系 [由] 存在于经验数据之间的关系的研究 [构成]；在马赫看来，科学就是这些关系的总和。这是很不好的观点；事实上，他所做的不过是编目，而不是在创造一个体系。马赫是个很出色的力学家，但却是个拙劣的哲学家。<sup>①</sup> 他的这种短视的科学观使他拒绝接受原子的存在。如果马赫活到今天，他的思想可能完全是另外一个样子”[E35]。在后来的岁月里，爱因斯坦也几乎没有改变过对马赫哲学的否定，同样，他也一直欣赏着马赫的力学。就在临终前，

爱因斯坦说，他始终相信，科学概念的发明和在这些概念基础上的理论构建，是人类精神的一种创造特征。这样，他自己的观点就同马赫对立起来了，因为马赫认为，科学定律不过是用来描述一大堆事实的一种经济的办法。 [C2]<sup>②</sup>

第三，马赫关于惯性的动力学起源的猜想，这一点将我们引到

<sup>①</sup> “Autant Mach fut un bon mécanicien, autant il fut un déplorable philosophe.”

<sup>②</sup> 爱因斯坦在他的自传中谈到，发现狭义相对论所需要的批判推理能力，因为读了马赫的哲学著作而获得了决定性的提高 [E27]。我可以大胆地猜测，在临终之际爱因斯坦又想到了马赫的力学。

了爱因斯坦关于宇宙学的工作。

2. 爱因斯坦与马赫原理 马赫力学的主要创见是废除了惯性定理陈述中的绝对空间。如果把这个定律写成：一个不受外力作用的系统 要么静止 要么相对于  $\times\times\times$  匀速运动。那么，

对牛顿来说  $\times\times\times = \text{绝对空间}$

对马赫来说  $\times\times\times = \text{理想化为刚性坐标系的固定星体}$

“当……我们说一个物体在空间保持不变的方向和速度时，我们的意思只不过省略了参照于整个宇宙”[M10]，这是马赫的原话，黑体也是他用的。他还进一步论证，对整个宇宙的参照，可以限制为对远距离有重物体的参照，这样，固定星体就被理想化为一个刚性坐标系，因为物体的相对运动对于邻近物体来说，平均为零。

接着，马赫提出一个新问题。<sup>①</sup> 牛顿的惯性定律所说的运动，指那种相对于绝对空间的匀速运动，这个定律是运动学第一原理。马赫则相反，他自己的惯性定律所说的运动指的是物体相对于静止星体的运动。我们曾用引力动力学解释行星轨道，用电动力学解释带电粒子间的相对运动，那么，我们是不是也该为这种运动寻求一种动力学解释呢？马赫没有这样说过，然而这种动力学观隐含在他的问题中：“如果整个空间开始运动，而所有星体都混乱地拥挤在一起，惯性定律会有什么变化呢？我们如何应用它？又如何表达它呢？……只有在这种宇宙纷乱的情况下，我们才能认识到所有物体 [他强调的] 和它们各自的运动在惯性定律中是多么的重要”[M11]。在马赫的著作中，我们看不到所有物体的重要性是

① 也见 H11]。

如何表现出来的，他从来没有为他的惯性定律的新解释提出过什么明确的动力学纲领。马赫创立的是他的惯性定律，而不是马赫原理。读他论惯性的文章同读圣经差不多，内容很明白，但总使人或对或错地感到，文字背后藏着什么更深刻的意义。现在我们来，爱因斯坦是怎样读马赫的。

爱因斯坦来到布拉格并且打破了对引力的沉默后不久，发表了一篇短文，题目是“存在一种类似于电动感应效应的引力作用吗？”[E36]。在这篇文章里（以布拉格时的原始引力理论为基础），他证明，如果一个空心有质球被加速绕着通过球心的轴旋转，那么放在球心的物体的惯性质量会增大，这个现象预言了伦斯一瑟林效应（Lense-Thirring effect）[T6]。

马赫登场了。

爱因斯坦在文章中宣称“这个结论很可能产生这样一种猜想，质点的总惯性是由于其他物质存在的结果，因为存在着它同那些物质的某种相互作用……这不过是马赫在他对这个问题的彻底考察中发表的观点。”从此爱因斯坦常常引用马赫的这个观点。在爱因斯坦—格罗斯曼论文里我们读到“马赫的大胆思想：惯性产生于[一个给定的]质点同其他[物质]的相互作用”[E37]。1913年6月爱因斯坦给马赫写信谈到光线的弯曲和感应现象他说，如果这些现象都发现了，那将是“对您的对力学基础的天才考察一个辉煌的证实”[E38]。爱因斯坦在1919年秋的维也纳演讲中，又提到马赫的惯性观点，把它叫做“惯性的相对性假设”[E39]。不过，这个假说和惯性问题，在他后来的所有文章里都再没出现过，直到1917年，他才又提出这个问题，这一年他提交的一篇论文[E40]翻开了物理学新篇章：广义相对论宇宙学。

在这篇论文交给普鲁士科学院几天前，爱因斯坦写信告诉埃伦费斯特，“我……在引力论上又犯了些错误，这个理论差不多要把我送进精神病院了” [E41]。在文章里，他提到“一条崎岖不平的道路”，他已经沿着这条路达到了新时代的第一个宇宙模型，一个各向同性的、均匀的、没有边界而空间有限的静态宇宙。建立这个理论，他花的时间可能相对长一些。因为 1916 年 9 月，德西特就谈到他同爱因斯坦讨论过关于“惯性的完全的物质起源”的可能性，以及关于这个思想在“必然一定是有限的世界”中的实现 [S12]

爱因斯坦的文章，无疑受到马赫思想的启发。然而，他在开篇却重新分析了另一个问题，即牛顿静态宇宙的困难。<sup>①</sup>他指出，牛顿—泊松方程

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho \quad (15.17)$$

只允许平均物质密度  $\rho$  在  $r \rightarrow \infty$  时比  $1/r^2$  更快地趋于 0，否则，引力势将会无限大，从而一个粒子受到的来自宇宙中所有物质的引力将会不确定。（不久他认识到，这个理由是错误的 [E41a]。）他还证明，即使对相当大的  $r$ ， $\phi$  保持有限，困难依然存在。因为，只要星体的总能量大于星体逐个地被驱逐到无限远（这是自宇宙存在以来无限时间里星体碰撞的结果所需的能量）那么，我们仍不可能获得星体的玻耳兹曼平衡分布。另一方面（他指出），如果方程(15.17)用

$$\Delta\phi - \lambda\phi = 4\pi G\rho \quad (15.18)$$

<sup>①</sup> 对 19 世纪宇宙学的详细情况和参考文献，请特别参考 [P7] 和 [N6]。关于更广泛的历史回顾，见 [M1] 和 [M12]。

286 来代替 这是一个有着 19 世纪思想根源的建议，这里  $\rho$  是均匀密度 那么方程的解

$$\phi = -\frac{4\pi G}{\lambda} \rho \quad (15.19)$$

在动力学上就可以接受了。

这个解在物理上也可以接受吗？常数  $\rho$  意味着一个各向同性的、均匀的宇宙。1917 年，人们想象这样的宇宙由我们的银河系和银河系以外的一种可能的虚空构成。这时，仙女座星云还没有确定在银河之外。我们今天认为，单个星系是实际上各向同性的均匀的物质分布的一种局部扰动的结果，而这种分布的各向同性和均匀的程度本身还有待说明 [ S13]。爱因斯坦没有这样的物理学根据来确认这两点性质，他只相信一个事实，即这些性质使他第一次能在他即将揭示的模型中，实现惯性的相对性起源。至于这个模型是静态的形式，在那个时代是很自然的，在 1917 年 还不知道有什么大尺度的星系运动存在。

我们回头来看从方程 (15.17) 到(15.18) 的过渡。爱因斯坦的论文主要有 3 点。首先，他在广义相对论中实行同样的过渡，将

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (15.20)$$

用

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (15.21)$$

来替代。其次，他为方程 (15.21 ) 构造了一个解，以解决牛顿的无限疑难。最后，他以一种动力学方式实现了惯性的相对性。方程的解即爱因斯坦宇宙后来被抛弃了。但人们还是忘不了它是为整个世界的新拓扑结构提出的第一个严格认真的建议。我们来看他是怎么得到的。

爱因斯坦曾假定，在远离行星轨道的地方，度规是平直的，在这个假定下，他很成功地把方程 (15.20) 用于行星的运动。现在他认为，这样的边界条件对整个宇宙来说是不令人满意的。他提出两个理由，第一个，还是牛顿的 [引力势] 无限的老问题。第二个，在这里 马赫登场了 [度规 平直性条件意味着‘一个物体’的惯性受 (有限距离的) 物质的影响，但不由它来决定。如果仅存在一个单个的质点，它也会有惯性…… [但是] 在一个和谐的相对性理论中 不能存在相对于‘空间’的惯性 而只能有物质彼此相对的惯性。”这样，爱因斯坦开始为马赫的思想寻找一种具体形式，由于  $g_{\mu\nu}$  决定惯性作用，那么，反过来，它们也完全由宇宙的物质分布来决定。他看到，没有办法用方程 (15.20) 满足这个需要。另一方面，在他看来，<sup>①</sup>方程 (15.21) 确实提供了答案，就是下面这个解 ( $i, k=1, 2, 3$ ):

$$g_{ik} = \delta_{ik} + \frac{x_i x_k}{r^2 - \sum_i x_i^2} \quad g_{i4} = 0, \quad g_{44} = -1 \quad (15.22)$$

只要，

$$\lambda = \frac{1}{r^2} = 1/2\kappa\rho c^2 = \frac{4\pi G\rho}{c^2} \quad (15.23)$$

这里  $\rho$  是常数物质密度。在这个爱因斯坦宇宙中，不再会出现牛顿的无限问题，因为它已经被消除了；三维空间是封闭的球面，而且具有与时间无关的曲率。另外，如果没有物质，也不会有惯性，也就是说，对于非零的  $\lambda$  如果  $\rho=0$  方程 (15.21) 就不可能成立。当然，这个解还没有将惯性同遥远的星体联系起来，不过，看来它还是一个良好的开端。

<sup>①</sup>他也注意到，这个方程保留了守恒定律，因为  $g_{\mu\nu;\rho}=0$ 。

那时，爱因斯坦对惯性的相对性深信不疑。1918年，他指出它和下面3个原理同等重要，这些原理，应该是任何一个令人满意的引力理论的基础 [E42]：

1. 由广义协变性所表述的相对性原理

2. 等效原理

3. 马赫原理（这是这个名词第一次进入文献）：“Das G-Feld ist *restlos* durch die Massen der Körper bestimmt”，<sup>①</sup> 就是说  $g_{\mu\nu}$  完全由物质的质量，或更一般地，由  $T_{\mu\nu}$  决定。1922年，爱因斯坦指出，有的人没有这个原则也能满意地向前又说“然而这种满足对后代来说，将会是不可思议的” [E42a]。

以后的年月里，爱因斯坦对马赫原理的热情越来越小，最后淡忘了。下面，我把他后来有关宇宙学的活动，大概地列一个编年表：

**1917** 爱因斯坦曾经认为修正的方程 (15.21) 在没有物质的情况下根本不可能有解。当然，他本人从来没有这么明确地说过，但我们似乎有理由这么想。然而，他的论文刚发表，德西特确实找到了  $\rho=0$  时方程 (15.21) 的解 [S14, W19] 这样，宇宙学项  $\lambda g_{\mu\nu}$  没有除去“相对于空间的惯性”，爱因斯坦一定很失望。1918年，他想方设法要消除德西特解 [E42b] 但马上就认识到，它没有错。

**1919** 爱因斯坦提出 [E43]，也许带电粒子是由引力结合在一起的。根据方程 (15.21) 他假定  $T_{\mu\nu}$  纯粹来自电磁 从而  $T_{\mu}^{\mu}=0$  这

<sup>①</sup> 德文：“G场完全地由物体的质量决定。”所谓“G场”，用爱因斯坦自己的话说：“我们用‘G场’来表示那些基本张量描述的空间状态” [E42]。——译者



就给出迹条件  $\lambda=R/4$ 。这样，是磁束缚着引力。这个思想可以认为是爱因斯坦关于统一场理论的第一次尝试。1927年他还为这种模型的数学特征写了篇短文 [E44]。另一方面，在爱因斯坦后来的岁月中，一个思想产生出来，发表了，接着又无声无息地消失，对他来说，都是很平常的事情。

1922 弗里德曼证明，方程 15.20) 允许非静态解，而物质分布还是各向同性的和均匀的，它对应着一个膨胀的宇宙 [F1]。爱因斯坦先以为这个推理是错误的 [E45]，然后发现自己的反驳有一个错误 [E46] 他说这个新结果是“明了的”。

1923 外尔和爱丁顿发现，检验粒子在德西特宇宙中彼此后退 这促使爱因斯坦给外尔写信说，“如果没有准静态的宇宙 那么宇宙学项也不需要了” [E47]。

1931 鉴于弗里德曼的理论工作“不受实验事实 [和哈勃实验发现] 的影响”而且“广义相对论能以自然的方式 即不用  $\lambda$  来解释它”爱因斯坦正式放弃了宇宙学项 说它“在理论上一点儿也不令人满意” [E48]。1932 年，他和德西特一起发表了同样的声明 [E49] 从此他再没有用过  $\lambda$  项 [E50]。

1954 爱因斯坦给一位同事写信说，“事实上，人们根本用不着再谈马赫原理了” (Von dem Mach'schen Prinzip sollte man eigentlich überhaupt nicht mehr sprechen) [E51]

事实并非如此。爱因斯坦以后，马赫原理尽管衰落，却从未消逝。在广义相对论的热情重新燃起的后爱因斯坦时代，马赫原理已经成为一个重要的研究课题。在 GR9 上，一个讨论小组争论了这个问题，特别是我们用这个原理去理解什么？这个问题能够激

起热情。我听说,《物理学杂志》(*Zeitschrift für Physik*)不再接受关于广义相对论的论文,根据是,讨论马赫原理的文章引起太多的争议。关键问题在于,例如,我们是将马赫原理作为一个可接受理论的惟一基本的要求(如爱因斯坦 1918 年所想的)还是将它作为一个选择的标准,以便在理论中对马赫解和非马赫解进行选择。<sup>①</sup>就我的理解,应该说,马赫原理并没有给当时的物理学事业带来决定性的进步。还可以说,惯性的起源曾经是而且现在仍然是粒子和场的理论中最令人头痛的事情。马赫原理从而也许会有一个未来——但不能没有量子理论。

## 15f. 奇点 运动问题

1917 年,爱因斯坦写信给外尔,“是否要将电子看成一个奇异点,物理描述是否完全容许真实的奇点,这个问题是极有意思的。为解释电子的有限惯性,我们在麦克斯韦方程里决定了一个有限半径”[E52]。也许那时候,当然,还有以后,在他心目中(除了一个短暂的时期外),这个问题的答案是毫无疑问的:奇点是极其讨厌的。不能容许奇点的信念激发他发表了一篇论文,想证明施瓦兹席尔德奇点 [ $r=2GM/c^2$ ] 不会[自然地]出现 原因是物质不能任意地聚集……否则,组成的粒子将达到光速”[E53]。<sup>②</sup> 文章发表于 1939 年,也就是在奥本海默和斯尼德提出他们关于星体坍缩

关于这个原理的不同观点的详细评论和文献概览,见 [G1]。

实际上,在施瓦兹席尔德半径的奇点不是内禀奇点。后来证明,施瓦兹席尔德解除  $r=0$  外,是解析完备的双叶流形。双叶性是爱因斯坦和罗森 [E53a] 在 1935 年第一次引入的 不过 他们认为 在  $r=2GM/c^2$  处的奇点是内禀的。

的论文 [O3] 两个月之前。遗憾的是，我不知道爱因斯坦对那篇文章有什么反应。至于大爆炸，爱因斯坦最后说，“我们也许……不能保证方程在场和物质密度极高的情况下的有效性，但也不能得出结论说，‘膨胀的开端’一定意味着一个数学意义的奇点。”在这一点上，他很可能是对的。

爱因斯坦在后来的年月里为自己提出的科学任务以 3 个愿望为基础，每个愿望对他来说都是至关重要的：统一引力与电磁力；从一个根本的因果理论导出量子物理学；用连续场的无奇异解来描述粒子。这里，我就最后一点作些说明（统一场论和量子理论在以后的章节中讨论）。爱因斯坦已经看到，麦克斯韦引入的场概念是一个革命性的进步，但是还前进得不够。另外，他也相信，在电磁场源以及其他场的描述中，所有的应属于牛顿力学的世界图景的东西，都应该根除。1931 年，他表达了这种观点：

在 [电动力学] 中连续场伴着实物粒子 [场源] 一起 [表现] 为物理实在的代表，这种二重性，尽管妨碍着任何系统的思想，但直到今天也没有消失。自麦克斯韦时代以来，人们认为物理实在性是由连续场代表的，它服从偏微分方程，而不能做任何机械的解释……必须承认，这个思想蕴含的纲领迄今还远没有完全实现。以后建立起来的成功的物理体系倒是这两种纲领 [牛顿的和麦克斯韦的] 的折中，而正因为它们是折中的，这些体系都带着一种暂时的和逻辑不完备的特征，尽管它们在某些单独的范围内已经获得了巨大进步。 [E55]

就我所知，这段话最清楚地表达了爱因斯坦完全用处处连续的场

来描述世界图景的深刻信念。

不过，也曾有过一个短暂的时期，爱因斯坦认为，也许奇点是不可避免的。那是在 1927 年左右，他写道：“近年来，所有用连续场解释自然基本粒子的努力都失败了，在这些失败之后，人们越来越强烈地怀疑，我们想象实物粒子的方式是不正确的，关于这一点，我们不想在这里多说。于是我们被迫把基本粒子想象成奇点或者世界线……我们被引上了这样一条思路：除了引力场和电磁场外，没有别的场变量‘宇宙项’可能是个例外！相反，人们假定存在着奇异世界线。”[E56]。这些话见他和格罗梅准备的一篇文章，在这篇文章里，爱因斯坦第一次研究了运动问题。下面我们来看这是一个什么样的问题。

对于引力方程 (15.20) 的左端，我们是完全熟悉的： $R_{\mu\nu}$  和  $R$  是  $g_{\mu\nu}$  及其导数的函数，而与其他因素无关。那时候，我们对右端的源  $T_{\mu\nu}$  却所知甚少。但是，左端满足恒等式 (15.4)，这一点纯引力信息意味着  $T_{\nu}^{\nu} = 0$ ，于是广义相对论为我们带来了能量—动量守恒的新认识：引力独自束缚它自己的源以满足这个定律。现在，我们考虑一个简单的例子，源是无结构的点粒子，如引力单极子，它的运动必须受  $T_{\nu}^{\nu} = 0$  的制约。问题是，从这些引力起源的约束来看，源的运动方程仅服从引力场方程吗？换句话说，爱因斯坦在 1914 年就已经引入了的单独的测地线运动假设是不必要的吗？爱因斯坦和格罗梅证明，在弱的外引力场的情况下，这确实是正确的。

几周后，外尔写信给爱因斯坦，感谢他送的新论文校样和“这篇文章”对我的关于物质的旧思想的支持”[W20]。他另外还提到自己 1922 年的一篇文章 [W21]，那里曾得到过相同的结论。事实

上，正如哈瓦斯特别讨论过的 [ H12]，<sup>①</sup>爱因斯坦是独立提出运动问题的，当然，既不是惟一的一个，也不是第一个。

爱因斯坦给外尔的回信特别有意思，它有助于我们理解他那时对这个问题的兴趣。“我把这一切都看得很重，因为，知道这样的场方程是不是被已经确立的量子事实 [ Quantenthatsachen ] 所否认是很重要的 [ E58 ]。这是在 1927 年，海森伯和薛定谔的理论才刚发现不久。

爱因斯坦对广义相对论的最后的重要贡献，又是关于运动问题的。这是与英费耳德 ( Leopold Infeld ) 和霍夫曼 ( Banesh Hoffmann ) 一起关于  $N$  体问题的研究 [ E59, E60 ]。这些文章，不再将引力场处理为外加的，而是将它和它的 ( 奇异的 ) 源的运动同时放在一起考虑。在引进一种新的近似方法下，场不必是弱的，但场源的速度还是比光速小。他们的结果并不新鲜，洛伦兹和德洛斯特、德西特、福克 ( Fock ) 以及勒维 - 契维塔等人，早就获得过相同或几乎相同的结果 ( 同哈瓦斯的私人交谈 )。文章得到的那些方程在必须包括牛顿作用的场合才有用。“ [ 这些方程 ] 在太阳系行星轨道的分析中有广泛的应用。例如，加州工学院喷气推进实验室 ( Cal Tech Jet Propulsion Laboratory ) 为了高精度地确定行星和飞行器的轨道，曾用它们的修正形式来计算天体的位置 ” [ M13 ]。

埃勒斯在 GR9 关于运动问题的报告中，强调了在广义相对论中确定孤立体系的困难，从而运动问题不能当成一个孤立问题来

<sup>①</sup> J. 在埃勒斯编辑的一卷以现代观点研究运动问题的论文集 [ E57 ] 里 我们看到有几篇重要文章，哈瓦斯的这篇是其中之一，他还在文章里简单推导了爱因斯坦 - 格罗梅结果。

对待。相反，它应该同诸如广延物体或者引力辐射之类的描绘相联系（也见 E61]）。<sup>①</sup> 粒子物理学家也许会补充一点，运动问题大概不能脱离这样的事实：物体具有康普顿波长，而这个参量对于大物体来说几乎是没有什么意义的——反之亦然。

## 15g. GR9 还有别的新东西吗？

GR9 纲领表明，我们在前几节讨论过的所有问题仍然吸引着人们强烈的兴趣。作为本章的结束，我将会上讨论的其他问题罗列出来。场方程的精确解除了计算机研究外，也有新的解析方法的考察。其他的传统兴趣还包括柯西问题。<sup>②</sup> 会议还讨论了当代实验结果（值得注意的是 PSR1913+16 的近星点的巨大进动）和未来的地球与星际实验，以及正在考虑的广义相对论的精确检验；还争论了相对论热力学这个迄今还有争议的题目。会议还报告了我们对相对论的普遍结构的认识，特别提到奇点定理、黑洞和宇宙监督。我们听说，所有可能的宇宙中，最好的还是弗里德曼宇宙，它不仅是人类纪元的宇宙，自时间开始以来，它就是那样。这些宇宙开端（特别是在最初几分之一秒内）的评论，以宇宙的重子不对称性为基础。会上还有关于宇宙中微子含量和  $3^\circ\text{K}$  背景辐射的讨论。

此外，会议还在广义相对论背景下讨论了量子力学，而不仅限

<sup>①</sup> 例如在方程(15. 11) 与 (15. 14)所定义的近似条件下，源以常速运动，真是太巧了( !)[E57]。

<sup>②</sup> 肖凯一布吕阿夫人 (Mme Yvonne Choquet-Bruhat) 告诉我，当她有一次同爱因斯坦讨论这个问题时，他不太感兴趣。

于霍金辐射（这是 20 世纪 70 年代的重大理论发现，它表明粒子在黑洞的背景几何中连续地创生），还包括量子引力和超引力。对与会者来说，最后两个问题比其他任何问题更提醒人们，广义相对论还有好多事情要做。

### 参考文献

- C1. C. Caves, K. Thorne, R. Draver, V. Sandberg, and M. Zimmerman, *Rev. Mod. Phys.* **52**, 341 (1980).
- C2. I. B. Cohen, *Set. Amer.*, July 1955, p. 69.
- D1. A. Dick, *Elem. Math. Beiheft* 13 (1970).
- E1. A. Einstein, *PAW*, 1915, p. 831.
- E2. —, *The Origins of the General Theory of Relativity*. Jackson, Wylie, Glasgow, 1933.
- E3. P. Ehrenfest, letter to H. A. Lorentz, December 23, 1915.
- E4. —, letters to H. A. Lorentz, January 12 and 13, 1916.
- E5. A. Einstein, letter to H. A. Lorentz, January 17, 1916.
- E6. —, *AdP* **49**, 769(1916).
- E7. —, *Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*. Barth, Leipzig, 1916.
- E8. — and H. Minkowski, *The Principle of Relativity* (M. N. Saha and S. N. Bose, Trans.). University of Calcutta, Calcutta, 1920.
- E8a. —, *Über die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie Gemeinverständlich*. Vieweg, Braunschweig, 1917.
- E9. —, letter to H. A. Lorentz, January 1, 1916.
- E10. —, *Forum Phil.* **1**, 173 (1930).
- E11. —, *The Yale University Library Gazette* **6**, 3 (1930).
- E12. —, unpublished manuscript, probably from 1932.
- E12a. A. S. Eddington, *Space, Time and Gravitation*, p. 134. Cambridge University Press, Cambridge, 1920.
- E12b. A. Einstein, *Science* **84**, 506 (1936).
- E13. —, *PAW*, 1914, p. 1030, Sec. 13.

- E14. —, *PAW*, 1915, p. 778.
- E15. —, *PAW*, 1915, p. 844.
- E16. —, *PAW*, 1916, p. 1111.
- E17. A. Eddington, [E12a], p. 209.
- E18. A. Eddington, *Espace, Temps et Gravitation*, Partie Theorique, p. 89. Hermann, Paris, 1921.
- E19. A. Einstein, letter to *The New York Times*, May 4, 1935.
- E19a. —, *Phys. Zeitschr.* **19**, 115, 165 (1918).
- E19b. —, *PAW*, 1918, p. 448.
- E20. *PAW*, 1916, p. 688.
- E21. —, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **18**, 318 (1916); *Mitt. Phys. Ges. Zürich* **16**, 47 (1916).
- E22. —, *PAW*, 1918, p. 154.
- E23. — and N. Rosen, *J. Franklin Inst.* **223**, 43 (1937).
- E24. A. S. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity* (2nd edn.), p. 130. Cambridge University Press, Cambridge, 1960.
- E25. J. Ehlers, A. Rosenblum, J. Goldberg, and P. Havas, *Astrophys. J.* **208**, L77(1976).
- E26. A. Einstein, *Naturw.* **17**, 101 (1916).
- E27. — in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (P. Schilpp, Ed.), p. 21. Tudor, New York, 1949.
- E28. —, letter to M. Besso, March 6, 1952; *EB*, p. 464.
- E29. —, letter to E. Mach, August 9, 1909.
- E30. —, letter to E. Mach, August 17, 1909.
- E31. —, *PAW*, 1916, p. 98.
- E32. —, letter to E. Mach, undated, around January 1913.
- E33. —, letter to A. Weiner, September 18, 1930.
- E34. —, letter to C. B. Weinberg, December 1, 1937.
- E35. —, *Bull. Soc. Fran. Phil.* **22**, 91 (1922); see also *Nature* **112**, 253 (1923).
- E36. —, *Viertelj. Schrift Ger. Medizin* **44**, 37 (1912).
- E37. — and M. Grossmann, *Z. Math. Physik.* **62**, 225, (1914) see p. 228;



- also, A. Einstein, *Viertelj. Schrift Naturf. Ges. Zürich* **59**, 4(1914).
- E38. —, letter to E. Mach, June 25, 1913.
- E39. —, *Phys. Zeitschr.* **14**, 1249 (1913), Sec. 9.
- E40. —; *PAW*, 1917, p. 142.
- E41. —, letter to P. Ehrenfest, February 4, 1917.
- E41a. —, letters to M. Besso, December 1916, August 20, 1918; *EB*, pp. 96, 134.
- E42. —, *AdP* **55**, 241 (1918); also, *Naturw.* **8**, 1010 (1920).
- E42a. —, *AdP* **69**, 436 (1922).
- E42b. —, *PAW*, 1918, p. 270.
- E43. —, *PAW*, 1919, pp. 349, 463.
- E44. —, *Math. Ann.* **97**, 99 (1927).
- E45. —, *Z. Phys.* **11**, 326 (1922).
- E46. —, *Z. Phys.* **16**, 228 (1923).
- E47. —, letter to H. Weyl, May 23, 1923.
- E48. —, *PAW*, 1931, p. 235.
- E49. — and W. De Sitter, *Proc. Nat. Ac. Sci.* **18**, 213 (1932).
- E50. —, *The Meaning of Relativity* (5th edn.), p. 127. Princeton University Press, Princeton, N. J., 1955.
- E51. —, letter to F. Pirani, February 2, 1954; also, D. Sciama in [W3], p. 396.
- E52. —, letter to H. Weyl, January 3, 1917.
- E53. —, *Ann. Math.* **40**, 922 (1939).
- E53a. — and N. Rosen, *Phys. Rev.* **48**, 73 (1935).
- E54. [E50] p. 129.
- E55. — in *James Clerk Maxwell*, p. 66. Macmillan, New York, 1931.
- E56. — and J. Grommer, *PAW*, 1927, p. 2.
- E57. J. Ehlers (Ed.), *Isolated Gravitating Systems*, Varenna Lectures, Vol 67. Societa Italiana di Fisica, Bologna, 1979.
- E58. A. Einstein, letter to H. Weyl, April 26, 1927.
- E59. —, L. Infeld and B. Hoffmann, *Ann Math.* **39**, 65 (1938).
- E60. — and —, *Ann Math.* **41**, 455 (1940).

- E61. J. Ehlers, *Ann N.Y. Ac. Sci.* **336**, 279 (1980).
- F1. A. Friedmann, *Z. Phys.* **10**, 377 (1922).
- G1. H. F. Goenner, in *Grundlagenproblemen der modernen Physik*, BI Verlag, Mannheim, 1981.
- H1. S. W. Hawking and W. Israel (Eds.), *General Relativity, an Einstein Century Survey*. Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- H2. A. Held (Ed.), *General Relativity and Gravitation*. Plenum Press, New York, 1980.
- H3. E. P. Hubble, *Astrophys. J.* **62**, 409 (1925); **63**, 236 (1926); **64**, 321 (1926).
- H3a. —, *Proc. Nat. Ac. Sci.* **15**, 169 (1929).
- H4. D. Hilbert, *Goett. Nachr.*, 1915, p. 395.
- H5. —, *Goett. Nachr.*, 1917, p. 53.
- H6. —, [H5], p. 63.
- H7. A. E. Harward, *Phil. Mag.* **44**, 380 (1922).
- H8. S. W. Hawking and W. Israel, [H1], p. 90.
- H9. F. Herneck, *Einstein und Sein Weltbild*, p. 109. Verlag der Morgen, Berlin, 1976.
- H10. G. Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought*, p. 219. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1973.
- H11. H. Hönl, Einstein Symposium 1965, Ak. Verl. Berlin, 1966, p. 238.
- H12. P. Havas in *Isolated Systems in General Relativity* (J. Ehlers, Ed.), p. 74. North Holland, Amsterdam, 1979.
- J1. G. B. Jeffery, *Phil. Mag.* **43**, 600 (1922).
- K1. M. D. Kruskal, *Phys. Rev.* **119**, 1743 (1960).
- K2. F. Klein, *Goett. Nachr.*, 1918, p. 71. Reprinted in *Felix Klein, Gesammelte Mathematische Abhandlungen* (R. Fricke and A. Ostrowski, Eds.), Vol. 1, p. 568. Springer, Berlin, 1921.
- K3. —, [K2], Sec. 8, especially footnote 14.
- K4. —, *Goett. Nachr.*, 1917, p. 469. Reprinted in Fricke and Ostrowski, [K2], Vol. 1, p. 553.

- L1. T. Levi-Civita, *Rend. Circ. Mat. Palermo* **42**, 173 (1917).
- L2. M. Lecat, *Bibliographie de la Relativité*. Lamertin, Brussels, 1924.
- L2a. L. D. Landau, *Nature* **141**, 333 (1938).
- L3. H. A. Lorentz, letters to P. Ehrenfest, January 10 and 11, 1916.
- L4. —, letter to P. Ehrenfest, January 22, 1916.
- L5. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, (3rd edn.), p. 304. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1971.
- L6. H. A. Lorentz, *Proc. K. Ak. Amsterdam* **8**, 603 (1900); *Collected Works*, Vol. 5, p. 198. Nyhoff, the Hague, 1937.
- M1. M. K. Munitz, *Theories of the Universe*, The Free Press, Glencoe, Ill., 1957.
- M2. C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation*. Freeman, San Francisco, 1973.
- M3. J. Mehra, *The Solvay Conferences on Physics*, Chap. 15. Reidel, Boston, 1975.
- M4. R. W. Mandl, letter to A. Einstein, May 3, 1936.
- M5. —, letter to A. Einstein, December 18, 1936.
- M6. E. Mach, *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung, Historisch-Kritisch Dargestellt*. Brockhaus, Leipzig, 1883. Translated as *The Science of Mechanics* (4th edn.). Open Court, Chicago, 1919.
- M7. —, [M6], English translation, pp. 542, 543.
- M8. —, *Phys. Zeitschr.* **11**, 599 (1910).
- M9. —, *The Principles of Physical Optics*, preface. Methuen, London, 1926.
- M10. —, [M6], Chap. 2, Sec. 6, Subsec. 7.
- M11. —, *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy* (2nd edn.; P. Jourdain, Tran.), pp. 78, 79. Open Court, Chicago, 1911.
- M12. C. W. Misner et al., [M2], pp. 752–762.
- M13. —, [M2], p. 1095.
- N1. J. D. North, *The Measure of the Universe*. Oxford University Press, Oxford, 1965.

- N2. —, [N1], Chap. 7.
- N3. *Nature* **106**, issue of February 17, 1921.
- N4. J. D. North, [N1], Chaps, 8 and 9.
- N5. E. Noether, *Goett. Nachr.*, 1918, pp. 37, 235.
- N6. J. D. North, [N1], Chap. 2.
- O1. —J. R. Oppenheimer and R. Serber, *Phys. Rev.* **54**, 540 (1938).
- O2. — and G. M. Volkoff, *Phys. Rev.* **55**, 374 (1939).
- O3. — and H. Snyder, *Phys. Rev.* **56**, 455 (1939).
- P1. W. Pauli, 'Relativitätstheorie,' *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*. Teubner, Leipzig, 1921.
- P2. —, *Theory of Relativity* (G. Field, Tran.). Pergamon Press, London, 1958.
- P3. —; [P1] or [P2], Sec. 54.
- P4. —, [P1] or [P2], Secs. 23 and 57.
- P5. —, [P1] or [P2], Sec. 61.
- P6. H. Poincaré, *C. R. Ac. Sci. Paris* **140**, 1504 (1905); *Oeuvres de H. Poincaré*, Vol. 9, p. 489. Gauthier-Villars, Paris, 1954.
- P7. W. Pauli, [P1] or [P2], Sec. 62.
- R1. H. P. Robertson, *Rev. Mod. Phys.* **5**, 62 (1933).
- R2. A. Rosenblum, *Phys. Rev. Lett.* **41**, 1003 (1978).
- S1. L. S. Shepley and A. A. Strassenberg, *Cosmology*. AAPT, Stony Brook, N. Y., 1979.
- S2. L. L. Smarr (Ed.), *Sources of Gravitational Radiation*. Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- S3. G. Shaviv and J. Rosen (Eds.), *Relativity and Gravitation*. Wiley, New York, 1975.
- S4. G. Szekeres, *Pub. Mat. Debrecen.* **7**, 285 (1960).
- S5. D. W. Sciama letter to A. Pais, October 16, 1979.
- S6. I. I. Shapiro, [W3], p. 115.
- S6a. N. Sanitt, *Nature* **234**, 199 (1971).
- S7. A. Sommerfeld (Ed.), *The Principle of Relativity*. Dover, New York.

- S8. J. Schouten, *Ricci-Calculus* (2nd edn.), p. 146. Springer, Berlin, 1954.
- S9. — and D. J. Struik, *Phil. Mag.* **47**, 584 (1924).
- S10. R. Schoen and S. T. Yau, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1457 (1979).
- S11. Se, p. 98.
- S12. W. de Sitter, *Proc. K. Ak. Amsterdam* **19**, 527 (1917), footnote on pp. 531, 532.
- S13. — D. Sciama, [W3], p. 387.
- S14. — W. de Sitter, *Proc. K. Ak. Amsterdam* **19**, 1217 (1917); **20**, 229 (1917).
- T1. R. C. Tolman, *Phys. Rev.* **55**, 364 (1939).
- T2. A. Trautman in *Gravitation* (L. Witten, Ed.), p. 169. Wiley, New York, 1962.
- T3. K. Thorne, *Rev. Mod. Phys.* **52**, 285 (1980).
- T4. —, *Rev. Mod. Phys.* **52**, 299 (1980).
- T5. —, *Rev. Mod. Phys.* **52**, 290 (1980).
- T6. H. Thirring and J. Lense, *Phys. Z.* **19**, 156 (1918).
- W1. H. Weyl, *Space, Time and Matter* (H. L. Brose, Tran.). Dover, New York, 1951.
- W2. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*. Wiley, New York, 1972.
- W3. H. Woolf (Ed.), *Some Strangeness in the Proportion*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
- W4. S. Weinberg, [W2], Chap. 14, Sec. 5.
- W5. J. A. Wheeler, *Am. Scholar* **37**, 248 (1968); *Am. Scientist* **56**, 1 (1968).
- W6. S. Weinberg, [W2], p. 297.
- W7. D. T. Wilkinson, [W3], p. 137.
- W8. C. M. Will, [H1], Chap. 2.
- W8a. D. Walsh, R. F. Carswell, and R. J. Weymann, *Nature* **279**, 381 (1979).
- W9. H. Weyl, *Scripta Math.* **3**, 201 (1935).
- W10. —, *AdP* **54**, 117 (1917).

- W11. S. Weinberg, [W2], Chap. 12, Secs. 3 and 4.
- W12. —, [W2], Chap. 9, Sec. 8.
- W13. E. Witten, *Comm. Math. Phys.* **80**, 381 (1981); see further R. Schoen and S. T. Yau, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 369, 1981; G. T. Horowitz and M. J. Perry, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 371, 1981.
- W14. J. Weber, *Phys. Rev.* **47**, 306 (1960); *Phys. Rev. Lett.* **22**, 1302 (1969).
- W15. — and J. A. Wheeler, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 509 (1957).
- W16. M. Walker and C. M. Will, *Phys. Rev. Lett.* **22**, 1741 (1980).
- W17. C. M. Will, [H1], Chap. 2.
- W18. S. Weinberg, [W2], pp. 16, 17.
- W19. See, e. g. , [W2], pp. 613ff.
- W20. H. Weyl, letter to A. Einstein, February 3, 1927.
- W21. —, addendum to a paper by R. Bach, *Math. Zeitschr.* **13**, 134 (1922).
- Y1. P. Young, J. E. Gunn, J. Kristian, J. B. Oke, and J. A. Westphal, *Astrophys. J.* **241**, 507 (1980).

*Abraham Pais*

‘SUBTLE IS THE LORD ...’

THE SCIENCE AND THE LIFE OF ALBERT EINSTEIN

©Oxford University Press 1982

经英国牛津大学出版社授权

简体中文版 2003 年 © 中国北京商务印书馆



Albert Einstein 1896.  
Aus einem Gruppenbilde der Naturitäts-  
Klasse der „Gewerbeschule“ Aarau.

1896 年时的爱因斯坦

(爱因斯坦档案馆)



## 《世界名人传记丛书》出版说明

广大读者，特别是青年读者，爱读传记书，渴望从中吸取营养，鞭策和激励自己的人生，世界名人传记更是青年们钟爱的读物。这些名人都是历史人物中的佼佼者，他们中的大多数都曾站在时代的风口浪尖上奋力拼搏，或以其深邃的思想睿智推动了世界文明的进步，或以其叱咤风云的政治生涯深刻地影响了历史的进程，或以其在自然科学领域的巨大成就造福于人类。当然，任何名人或伟人都与普通人一样受到历史的局限，存在着这样或那样的不足。

商务印书馆历来重视传记书的翻译出版工作。80年代以来，此项译事更加有计划地进行，在翻译界和读书界的鼎力支持与协助下，已经以专著或通俗读物单行本形式出版百余种。但由于这类传记过去以单行本印行，难见系统，不便于读者研读查考。因此，我们决定先从过去已出版的这类书中，选择各个时代、各个国家、各个民族中有代表性的名人的传记编印成这套《世界名人传记丛书》。同时也陆续增加一些新选题。采用原译本排印，译文未能重新校订，体例也不尽统一；原来译本可用的序跋均予保留，个别序跋有所修订。增补的新译本，我们当力求其更富于科学性和知识性，保持现有选本内容翔实和文字生动的特点，从而更好地满足读者的需要。

商务印书馆编辑部

献 给

乔纳森 (Jonathan ) 和丹尼尔 (Daniel)

“没有宗教的科学是跛子，没有科学的宗教是瞎子。”爱因斯坦在解释他的个人信仰时曾这样写道：“一个宗教信仰者的虔诚，在于他从不怀疑那些既不需要也不可能具有理性基础的超越个人的目的和目标的意义。”他不是祷告者，也不做礼拜，却生活在一个深刻的信念——一个不可能具有理性基础的信念之中：一定存在着等待发现的自然规律。他毕生追求的，就是去发现这些规律。关于他的实在论和乐观主义，他自己说得很明白：“上帝难以捉摸，但他并不邪恶”（*Raffiniert ist der Herrgott aber boshaft ist er nicht*）。当一个同事问他这句话是什么意思时，他回答说：“大自然隐藏她的秘密，是因为她本性高傲，而不是凭什么狡黠的手段”（*Die Natur verbirgt ihr Geheimnis durch die Erhabenheit ihres Wesens, aber nicht durch List*）。

## 中文版序

爱因斯坦在欧洲度过了青壮年，晚年定居美国，他只是在中年时出访过其他一些地方。43岁那年，爱因斯坦携他的第二位妻子到过东方。在这次远行中，他们到了上海和香港。诸如此类的接触有助于唤醒爱因斯坦对孔夫子学说持久的钦佩。

尽管爱因斯坦与其他文化的直接接触有限，却一生都强烈地希望全世界各国人民和谐共存。他常常表达这样的观点：科学能够在促进民族之间的共同理解方面起到重要作用。在一篇题为《科学的共同语言》的论文中他写道：“如果我们真诚而热情地期望安全、幸福和人们才能的自由发展，我们并不缺少接近这种状态的手段。”这意味着：“科学概念和科学语言的超国家性质是由于它们是由一切国家和一切时代的最好的头脑所建立起来的。”

科学永远是爱因斯坦的主要献身对象，而人类的命运也是他的主要关心对象之一。本书试图对这位世纪伟人的诸方面做出公正的评述，但愿它能有助于激发我的不同年龄的中国朋友们自由地发挥他们各自的才华。

亚伯拉罕·派斯

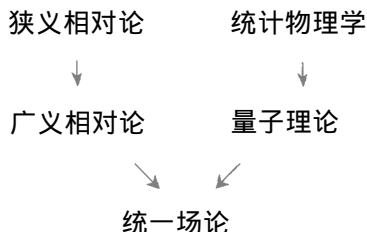
## 致 读 者

打开本书的目录，看到那些带星号的条目，你会发现这几乎全是一部关于爱因斯坦的科学之外的（nonscientific）传记。翻开第一章，你可以不费气力地浏览全书；你可以读到作者的一些个人琐忆和为此进行的一般性评价的努力。

我的主要目的是要提供一部阿尔伯特·爱因斯坦的科学传记。我将尽力说明爱因斯坦时代的物理世界的概念，以及他如何改造它们，并留下了哪些科学财富。我想写的是一段开放的历史，说它开放，是因为爱因斯坦的著作为我们留下了一些未解决的原则问题。它们的答案，正是当今物理学所主要追求的目标。有些问题的讨论，不能离开数学细节，但我尽量将它们减到最低限度，凡是可能的地方，我都请读者去参考标准的教科书。没有任何事情像科学那样对爱因斯坦来说是他的生活 他的事业 他的避风港，他的特立独行的源泉。为了认识这位伟人，我们必须追溯他的科学思想和成就。但这还不够，他还是一位有很高天赋以及独到风格的德语作家，一个音乐爱好者，一位哲学研究者。他深切关心人类的处境 在晚年 他常把每天读《纽约时报》看成如他的肾上腺素治疗一样 必不可少）他是丈夫 是父亲 是继父 他是犹太人；他还是传奇人物。所有这些角色，都会在我们做标记的那些章节的故事里表现出来。

如果有人要我用一句话来概括爱因斯坦的一生，我会说：“他

是我所知道的最自由的人。”如果要用一句话来写他的科学传记，我会写：“同他以前和以后的任何人相比，他更好地发明了不变性原理，更好地运用了统计涨落。”如果让我用图说明，我会这样来画：



题目便是：“阿尔伯特·爱因斯坦的科学和生活。”这幅图的每一个标题和每一个箭头，都是我对爱因斯坦的成功、他的理想图景 (version) 和他的弱点的最简洁的概括。很大程度上，我们这本书就是要试图解释这张框架图所隐藏的关系。全书结束的时候，我们还会看到它。

在写作本书的过程中，许多人的热情慷慨的智慧、知识和批评，对我来说，真是助莫大焉，在此向各位深表谢意。给我帮助最大的是海伦·杜卡斯 (Helen Dukas)，当今没有谁比她更熟悉爱因斯坦的生活了。她是普林斯顿爱因斯坦档案馆的可靠向导。真是太好了，亲爱的海伦，谢谢你！另外，我还获益于与约斯特 (Res Jost)、特雷曼 (Sam Treiman) 和乌伦贝克 (George Uhlenbeck) 的重要讨论。他们每一位都读过几乎整部手稿，提出了很多改进建议，给我许多鼓励。我怀着感激之情记录以下的专题讨论：与巴格曼 (Valentine Bargmann)、霍夫曼 (Banesh Hoffmann) 和施特劳斯 (Ernst Straus) 讨论爱因斯坦的生活、广义相对论和统一场论；与迪克 (Robert Dicke)、哈瓦斯 (Peter Havas)、佩里 (Malcolm Per-

ry)、施夏马 (Dennis Sciama) 和斯塔切尔 (John Stachel) 讨论相对论与波勒尔 (Armand Borel) 讨论庞加莱与柯恩 (Eddie Cohen)、卡克 (Mark Kac) 和克莱因 (Martin Klein) 讨论统计物理学与科克斯 (Anne Kox) 讨论洛伦兹与切尼斯 (Harold Cherniss) 和吉尔伯特 (Felix Gilbert) 讨论从古希腊的原子论到魏玛共和国的许多问题。特别感谢苏黎世联邦工业大学 (ETH) 的格劳斯 (Beat Glaus) 和苏黎世大学的拉谢 (Günther Rasche) 他们曾帮助我顺利地利用苏黎世的档案。所有这些人, 以及那些无数回答过我的问题、让我受到启发的人们, 我再次向你们表示感谢!

本书是在普林斯顿高等研究院 (The Institute for Advanced Study in Princeton) 完成的, 我要感谢沃尔夫 (Harry Woolf) 的友好和院长基金的资助。斯隆基金会 (Alfred P. Sloan Foundation) 在我的准备过程中给予的多方帮助, 也令我难以忘怀。我还要深切感谢爱因斯坦和泡利的家属以及位于海牙的 [荷兰] 国家档案馆 (Rijksarchief)《洛伦兹通信集》和莱顿的玻义哈佛博物馆 (Boerhaave Museum)《埃伦费斯特通信集》, 他们慨允我引用未发表的材料。还要感谢斯德哥尔摩的 (瑞典) 皇家科学院诺贝尔委员会 (K. Vetenskapsakademiens Nobel Kommitteer), 特别是纳格尔 (Bengt Nagel), 他让我获得了有关爱因斯坦获诺贝尔奖的文件。

很幸运, 我还得到了我亲爱的妻子莎娜 (Sara) 的建议和支持。

这篇前言的内容是在海伦·杜卡斯生前写的, 她于 1982 年 2 月 10 日去世, 我仍保留着原来的样子。

## 关于参考文献

每一章都列有参考文献，在正文中以方括号标志，如 [E3]、[P1] 等。在列举文献时，我们会经常使用以下的缩写：

*AdP*: *Annalen der Physik* (Leipzig).

《物理学纪事》(莱比锡)

*EB*: *Albert Einstein-Michele Besso Correspondance 1903 — 1955* (P. Speziali. Ed. ). Hermann, Paris. 1972.

《阿尔伯特·爱因斯坦—米歇尔·贝索通信集(1903—1955)》

*PAW*: *Sitzungsberichte*, Preussische Akademie der Wissenschaften.

《普鲁士科学院会议报告》

*Se*: Carl Seelig, *Albert Einstein*. Europa Verlag, Zürich .  
1960.

卡尔·泽利希：《阿尔伯特·爱因斯坦》



## 凡 例

1. 版式悉遵原著，旁注原书页码，以方便检索。

2. 人名、书刊名、不常见的地名等专有名词，第一次出现时附原文。人名一般只译姓，需区别时加名或字母，译法均从习惯或遵辞书。

3. 原文中的德文、法文、拉丁文等外文均保留，译文处理方式也遵原著（有时直接译在后面，有时加括号，有时以注的形式出现）。个别德文片段的翻译与作者英译有所不同，是直接照德文译出的。

4. 译者在认为必要的地方加注，与原注同列，署“译者”以示区别。主要说明重要文献的中文本情况，供读者参阅；也有些关于文化背景の説明，补充翻译的不足。

5. 对于原文中出现的不少疏忽或错误，译者做了必要的更正，不另说明。

6. 有些译法与国内流行译法不一致，是非好坏，请读者评判。