

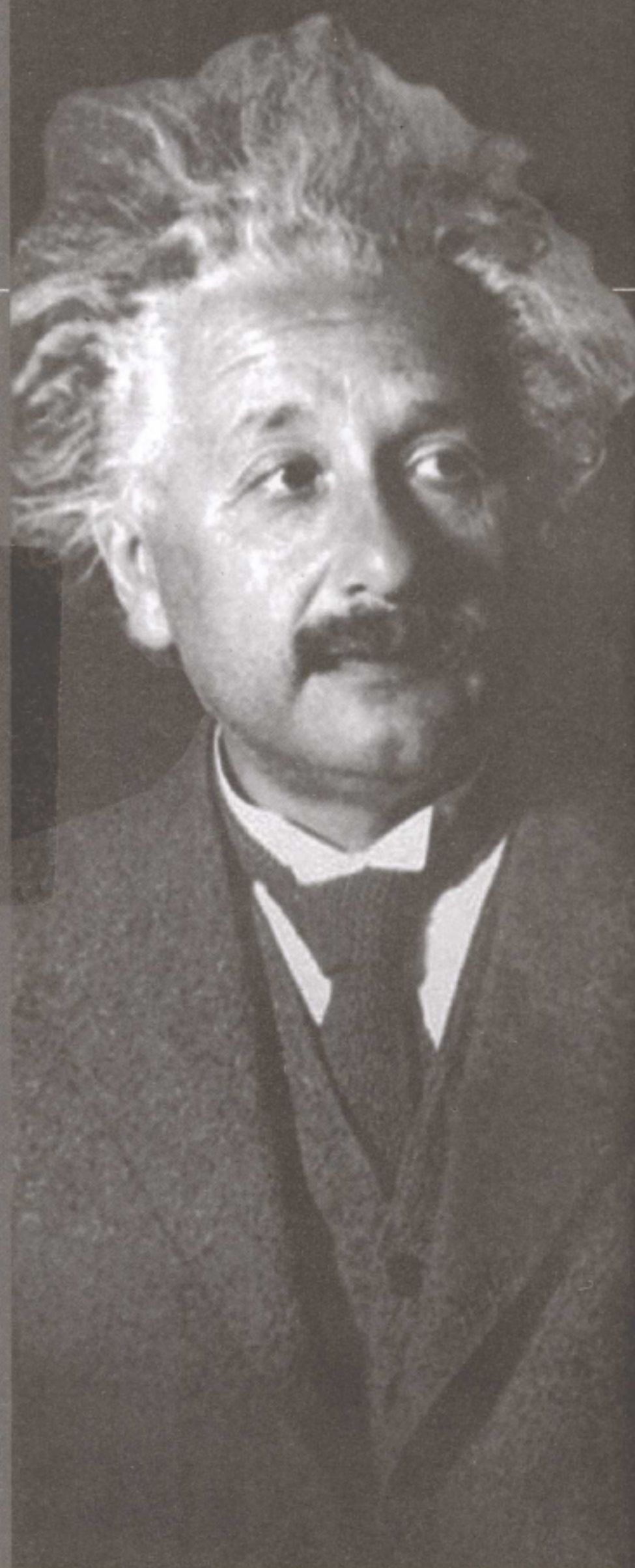
爱因斯坦全集

第六卷 | 柏林时期 (1914—1917)

A. J. Kox, Martin J. Klein, and Robert Schulmann / 主编
吴忠超 / 主译

[美] 阿耳伯特·爱因斯坦 / 著 湖南科学技术出版社

The Collected
Albert Einstein
Volume 6: The Berlin Years: Writings,
1914—1917



The Collected Papers of
Albert Einstein

ISBN 978-7-5357-5788-3



9 787535 757883 >

定价: 150.00元

爱因斯坦全集

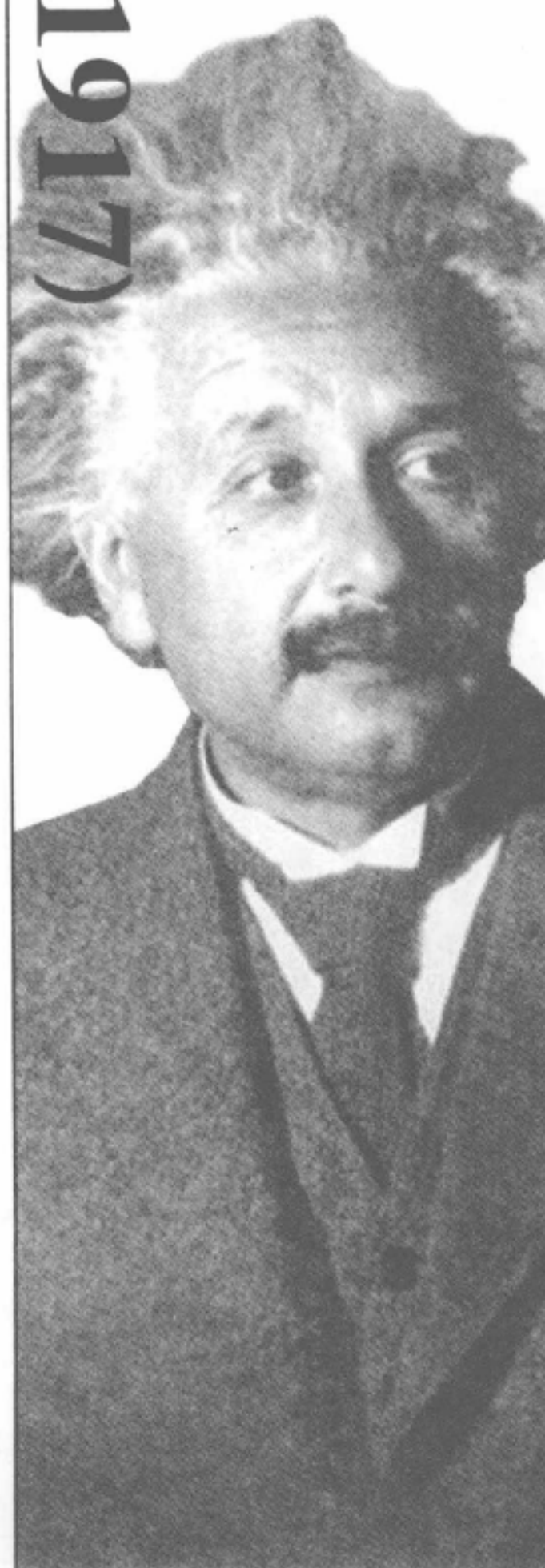
第六卷

柏林时期

(1914—1917)

The Collected Papers of
Albert Einstein

[美] 阿耳伯特·爱因斯坦 / 著 湖南科学技术出版社



The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 6: The Berlin Years: Writings, 1914—1917
Copyright©1997 by The Hebrew University of Jerusalem
Chinese (Simplified Characters only) Hardback copyright © 2009 by Hunan Science & Technology Press

Published by arrangement with Princeton University Press in association with Arts & Licensing International, Inc.

ALL RIGHTS RESERVED

湖南科学技术出版社通过美国 Arts & Licensing International Inc. 获得本书中文简体版全球出版发行权。

著作权合同登记号: 18-2003-132

图书在版编目 (CIP) 数据

爱因斯坦全集. 第六卷 / (美) 爱因斯坦 (Einstein, A.)
著; 吴忠超译. —长沙: 湖南科学技术出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-5357-5788-3

I. 爱… II. ①爱…②吴… III. 爱因斯坦, A. (1879~1955) —全集 IV. Z471.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 124938 号

爱因斯坦全集

第六卷 柏林时期 (1914—1917)

著 者: [美]阿耳伯特·爱因斯坦

主 编: A. J. Kox, Martin J. Klein, and Robert Schulmann

主 译: 吴忠超

策划编辑: 李永平

责任编辑: 杨许国

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-84375808

印 刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市青园路 4 号

邮 编: 410004

出版日期: 2009 年 5 月第 1 版第 1 次

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 33.5

字 数: 601000

书 号: ISBN 978-7-5357-5788-3

定 价: 150.00 元

(版权所有·翻印必究)

THE COLLECTED PAPERS OF

Albert Einstein

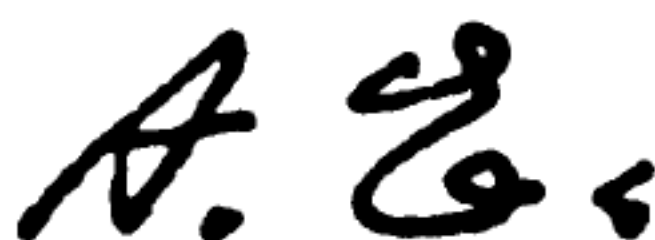
VOLUME 6

THE BERLIN YEARS:
WRITINGS, 1914–1917

A. J. Kox, Martin J. Klein, and Robert Schulmann
EDITORS

József Illy and Jean Eisenstaedt
CONTRIBUTING EDITORS

Rita Fountain and Annette Pringle
EDITORIAL ASSISTANTS



Princeton University Press

1996

主 办 者

耶路撒冷的希伯来大学
和
普林斯顿大学出版社

编辑顾问委员会

Peter G. Bergmann	Itamar Pitowsky
Aryeh Dvoretzky	Nathan Rotenstreich
Freeman J. Dyson	Charles Scribner, Jr. ‡
Gerald Holton	John A. Wheeler
Walter Hunziker	Harry Woolf
Reuven Yaron	

编辑委员会

Mara Beller	Abraham Pais
Robert S. Cohen	Gideon Rakavy
Gerald Holton	Fritz Stern

捐 赠 者

Harold W. McGraw, Jr.

资 助 者

《爱因斯坦全集》(原书)之得以付梓,端赖下列资助者对编辑工作的慷慨资助,现耶路撒冷的希伯来大学以及美国普林斯顿大学出版社谨对他们表示感谢。

大 学

波士顿大学(美国)

基 金 会

国家人文学科基金会(美国)

Alfred P. Sloan 基金会(美国)

Dr. Tomalla 基金会(列支敦士登公国)

Pieter Zeeman 基金会(荷兰)

公 司

太阳微系统股份有限公司(美国)

个 人

Jan Philipp Reemtsma

中文版出版说明

阿耳伯特·爱因斯坦不仅是 20 世纪最杰出的物理学家,而且是一位富有哲学探索精神的思想家,同时又是一位具有高度社会责任感的真正意义上的知识分子。对他的科学成就、科学思想、政治言论及生平的深入研究,势必成为科学史界普遍关注的话题。美国普林斯顿大学出版社自 1987 年出版《爱因斯坦全集》(*The Collected Papers of Albert Einstein*)第一卷以来,已陆续出版多卷,随着资料不断地收集,全集出齐将超过 25 卷。

全集不仅包括爱因斯坦的全部学术论文,还涉及有关和平、宗教、犹太人问题等社会政治言论,还有他与家人及朋友的往来书信,各种听课、备课笔记以及其他有关他个人的全部材料。这些材料是目前研究爱因斯坦最权威、最全面的资料。其中许多材料是首次公开发表。《爱因斯坦全集》的编辑出版,是国际科学史界的一项大工程,它不仅可以填补科学史上的一些空白,而且可以澄清一些广为流传的讹误,其学术价值和文化积累意义是不言而喻的。我社聘请国内科学史界和物理学界资深专家教授及年轻学者翻译出版《爱因斯坦全集》,这对我国学术界来说无疑是一件幸事。读者将最大限度地追踪爱因斯坦的思想、生活及科学活动,从中领略到科学和文化在现代社会中的深远影响。

《爱因斯坦全集》中文版是根据普林斯顿大学出版社出版的 *The Collected Papers of Albert Einstein* 德文版精装本翻译的,翻译过程中还参阅了此书的英文版平装本。为了便于前后各卷的统一,全集中除爱因斯坦外的人名均未译。地名及专有名词在正文中第一次出现时附注了原文。各卷的边码均指示德文原版书的页码,以利读者核对

原文。全集各卷注释及索引中的页码除特别指明外,均指德文原版书页码即中文版的边码。中文版将原版索引拆分为三,一是名词索引,包括社会政治经济和文化机构名称、地名和地址以及科学技术词汇,以人名命名的科技术语也在其中。二是人名索引。此外尚有引文索引。名词索引按汉语拼音顺序排,人名索引及引文索引按拉丁文字母顺序排。

《爱因斯坦全集》的翻译出版工作浩大而繁杂,这使得我们的工作难免留下某些遗憾。恳请海内外读书界、著译界和出版界的朋友、同仁提出宝贵的意见和建议,以利改进工作,促使此项翻译出版工程圆满完成。

湖南科学技术出版社

2009年5月

第六卷序

—

- 在本卷所涉及的这段时期,爱因斯坦的生活和事业进入了一个崭新的阶段,我们把它描绘为柏林岁月。他是普鲁士科学院的领薪院士,这一职位使他处于当时科学界的中心——这是他离开偏远的瑞士联邦技术大学的教职后发生的重大变化。这个新职位对他的个人生活也具有重大意义:在柏林岁月里,爱因斯坦变得越来越像个社会名人,人们越来越频繁地征求他关于非科学问题的观点。的确,这个关于柏林岁月的第一卷已经包括一些非科学的篇章,其中两篇与第一次世界大战有关(文件 8 和 20),另有一篇简短陈述了德国学校体制下传统的中学终考弊端[Einstein 1917h(文件 49)]。爱因斯坦不快乐的私人生活也在柏林岁月的前几个月达到了顶峰:还在苏黎世的时候,他与妻子 Mileva 就开始疏远,最后终于导致分居。与爱因斯坦在柏林仅仅度过了几个月,Mileva 就带着两个儿子 Hans Albert 和 Eduard 返回了苏黎世。在战争年代,爱因斯坦与其表姐 Elsa Löwenthal (她的风采也是吸引他到柏林来的原因之一)的联系进一步持续并紧密了。在 1919 年 2 月与 Mileva 离婚后,他在同一年 6 月与 Elsa 结婚。

自 1912 年夏末从布拉格返回苏黎世以后,爱因斯坦一直倾注大量时间和精力的一项任务——引力论的研究,在柏林岁月的头几年得以完成。1915 年 11 月发表了 Einstein 1915f, 1915g 和 1915i(文件 21, 21 和 25),导出了一般协变场方程,使该理论得以完善。它在 Einstein 1915h(文件 24)中成功地解释了观测到的水星近日点的异常运动,使该理论得到决定性的实验支持。尽管爱因斯坦继续推导出该理论的更多结论,并写了一篇重要的综述论文[Einstein 1916e(文件

30)]和一本普及著作[*Einstein 1917a*(文件 42)],但是他仍有时间再次从事其他感兴趣的事情,特别地,返回到量子理论上来。他的两篇论量子理论中辐射的发射和吸收的论文(*Einstein 1916j* 和 *Einstein 1916n*[文件 34 和 38])代表了该领域的主要进步。

本卷的其他特色包括爱因斯坦与荷兰物理学家 Wander Johannes de Haas 合作对 Ampère 分子电流的存在性进行实验研究的有关论文,以及他在一起专利纠纷中首次以技术专家身份出庭的有关文件。[3]
本卷以两个附录结尾:第一篇附录总结了爱因斯坦在柏林大学(分别 [4]
于 1916/1917 年和 1917/1918 年)的两次讲课的学生笔记,还收录了他自己在 1914/1915 年有关相对论课程的讲稿,该讲稿在这里以文件 7 出现。第二篇附录是一名听众对爱因斯坦于 1915 年初夏在 Göttingen 作的关于相对论的系列演讲的一部分所做的笔记。

二

当爱因斯坦于 1914 年 3 月离开苏黎世前往柏林时,广义相对论还不令人满意。自从爱因斯坦和 Grossmann 的“Entwurf”理论发表后的一年里[见 *Einstein and Grossmann 1913*(第四卷,文件 13)],没有什么大的进展。特别是,缺乏广义协变性仍旧是该理论成问题的方面。虽然似乎爱因斯坦当时已经认为广义协变理论是不可能的,甚至 [5]
是不合需要的——他的“空洞论证”在这方面曾经一直是很有用的 [6]
——但当时仍然不清楚该理论在多大程度上是协变的。这个问题是爱因斯坦和 Grossmann 最后一次合作研究的主题,结果是发表了 *Einstein and Grossmann 1914b*(文件 2)。他们以其理论的 Hamilton 形式为出发点,试图比前一篇论文更精确地确定该理论究竟允许哪些
xvii 变换。他们对使该理论成立的那些框架以及联系它们的变换引入了
术语“适应坐标系”和“合格变换”,成功地导出了所有合格变换必须满 [7]
足的条件。他们还声称(没有明确的证明),允许的变换包含了加
速度。

在 1914 年 11 月发表的一篇复杂的长篇论文[*Einstein 1914o*(文件 9)]里,从详细地阐述张量演算开始,系统地发展了该理论。在推 [8]
导场方程之前,是采用新版的“空洞论证”,来证明描述引力场中的物

- [9] 理过程的方程“不可能是广义协变的”。如同在 *Einstein and Grossmann 1914b* (文件 2) 里一样, 变分原理作为推导场方程的出发点, 而与之相对照的是, 在前一篇论文里从一开始就指定 Hamilton 量, 而现在爱因斯坦先提出从中可导出具体的 Hamilton 量的一般条件。结果证明, 用这种方式获得的 Hamilton 量导致了“Entwurf”场方程。如同爱因斯坦总结的: “现在我们以纯粹形式的方式, 即没有直接用到关于引力的物理知识, 得到了非常明确的场方程。”

- [10] 一年后, 爱因斯坦完全改变了主意。关于他在这一年里如何与该理论斗争, 直到最后得出结论, 认为必须抛弃这个理论, 这一过程已经被谈论了多次, 这里只能扼要重述一下。没有太多的当时的资料供我们来推想爱因斯坦在那一年里的思维过程, 我们必须在很大程度上依赖于在以后的各种场合下爱因斯坦自己所做的陈述。从现有的资料来看, 似乎是到 1915 年秋, 爱因斯坦已经意识到该理论有三个主要缺陷: 在 *Einstein 1914o* (文件 9) 中确定 Hamilton 量所使用的论证是错误的; 该理论对于旋转不是协变的; 结果证明水星近日点运动太小了。对于所有这三点都可以给出一些背景介绍。

xviii

- [11] 第一个问题, 爱因斯坦认识到他确定 Hamilton 量的方法其实不是那么回事, 这可能源于他与意大利数学家 Tullio Levi-Civita 关于 *Einstein 1914o* (文件 9) 中爱因斯坦对场方程的推导过程的一个关键点的讨论。第二点与爱因斯坦的信念有关。他坚信, 合格变换应该包括旋转, 因为该理论必须把 Mach 原理合并在其中, 后者被看成是关于旋转运动的相对论和由远距物质确定惯性的理论。实际上, 他的 Mach 观点引导他探索广义协变场方程。在爱因斯坦写给 Erwin Freundlich 的一封信中, 包含一些有趣的信息, 披露了爱因斯坦得出没有将旋转包括在容许变换中的结论的有趣过程。第三个问题, 该理论没有能正确地解释水星近日点的运动, 和爱因斯坦早先与他的朋友 Michele Besso 合作, 根据“Entwurf”理论对水星运动所做的计算相关。这些计算(原先不为人知, 在第四卷中以文件 14 给出)导致的结果大约小了两倍。

[12] 爱因斯坦一旦认识到这三个缺陷的严重性, 就决定重新开始: “因为这些原因, 我对我导出的场方程完全失去了信心, 并企图找到办法

xix

以自然的方式来限制这些可能性。”他回到广义协变性上,快速连续地发表了包含有最终理论的精髓的一系列论文。在头两篇论文中关于场方程形式和能量-动量张量的迹的初始错误,在第三篇和最后一篇论文中得以纠正。有趣的是,这些论文根本不与“空洞论证”有关,而这个论证在爱因斯坦早期思考中曾经起过关键作用。只有通过爱因斯坦的通信,我们才能知道,当他认识到并非度规场,而只有时空重合的全部才有物理意义的时候,他就拒绝了“空洞论证”。

甚至在1915年11月的三篇论文的最后一篇发表以前,爱因斯坦就用他的广义协变场方程计算水星近日点的运动,得到了每百年43弧秒的结果,与观测结果非常满意的一致。爱因斯坦后来告诉他以前的合作者 Adriaan Fokker,当他看见这个结果的时候,激动得心都发颤。

在最后一篇论文发表后的几个月,爱因斯坦准备花些时间写一篇评论文章,以一致的、易理解的方式介绍并解释整个理论。文章发表在《物理学杂志》[*Einstein 1916e*(文件30)],但也以单行本的形式广泛销售(*Einstein 1916f*)。它给出该理论一个极好的概观。同一年,爱因斯坦还完成了一部关于狭义和广义相对论的通俗介绍的书 *Einstein 1917a*(文件42)。它立刻获得了成功,直到今天仍是经典著作。新理论还引起了其他研究细节和结果:一篇关于该理论的 Hamilton 形式的论文[*Einstein 1916o*(文件41)],本卷给出的文件31的早期手稿,以及一篇关于引力波的论文[*Einstein 1916g*(文件32)],该论文因为一个严重错误在1918年不得不撤回。

三

xx

1917年春,爱因斯坦发表了他的第一篇宇宙学论文,*Einstein 1917b*(文件43)。这可以说成是现代宇宙学诞生的标志。爱因斯坦在宇宙学方面的兴趣来自于他的一个信念,上面已经提到过,即引力论应该以某种方式包括 Mach 原理。爱因斯坦在完成广义相对论后这么快就转向宇宙学,这也可以从下面的事实来理解,即宇宙的几何结构不像牛顿宇宙学那样被认为是先验的,而是必须适合广义相对论的框架,在此意义上,宇宙学是广义相对论的不可缺少的部分。关于宇

[23] 宇宙学方面的考虑已经出现在 *Einstein 1916e* (文件 30) 中。的确, 此文引言部分给出的论证直接接触及 Mach 原理, 它涉及两个球, 其中之一在旋转。已经找出解释旋转球和非旋转球在形状上的差别的物理原因为远距物质的存在; 而像牛顿那样, 认为原因在于绝对空间, 是“完全虚构的原因, 而不是可观测到的东西”。根据爱因斯坦的虚空不可能有几何结构, 孤立单独的物质不可能有惯性, 也不可能给无限远处的空间赋予结构。

爱因斯坦正是以这样的信念作为他的宇宙学论文 [*Einstein 1917b* (文件 43)] 的出发点。Mach 原理的爱因斯坦版的结果是, 在无限远处, 度量张量的分量应该退化: 对于各向同性场, 空间分量变成零, 而类时分量变成无穷大。对于中心对称静态场, 事实证明不可能达到这些条件。爱因斯坦的办法是假定宇宙在空间上是有限的、闭合的、静止的, 质量分布是均匀的, 而且不需要边界条件。但是, 为了做到这一点, 爱因斯坦必须修改他的场方程, 使其包括后来称作“宇宙常数”的量。这样, 爱因斯坦就尽可能地把 Mach 思想并入其中, 但是却没能彻底地解决旋转运动的相对性问题。

[24] 这篇论文标志爱因斯坦与荷兰天文学家 Willem de Sitter 对旋转运动的相对性和惯性的相对性开始了讨论, 讨论的形式既有通信也有发表的论文。讨论的主要议题是 De Sitter 自己的宇宙学解, 该解表明虚空宇宙可以表现出整体弯曲。虽然这种解的存在对爱因斯坦的惯性相对性思想是一个沉重打击, 但是他没有放弃自己的宇宙学观点。当 Friedmann, 随后是 Lemaitre, 发现非静态宇宙解时, 他也没有改变主意。直到 1931 年, 爱因斯坦才终于接受了宇宙的非静态特性, 放弃了宇宙常数, 认为它是不必要的, 并损害了他场方程的简单性。 xxi

四

本卷中有两份文件, 文件 12 和文件 19 与众不同。它们是爱因斯坦在一起涉及专利纠纷的法庭诉讼中, 以专家证人的身份草拟的鉴定意见。1914 年秋, 爱因斯坦卷入了德国企业 Anschütz 公司和美国 Sperry Gyroscope 公司之间的一起纠纷。争端是关于旋转罗盘的设计。这件事使爱因斯坦和这家德国企业的业主 Hermann Anschütz-

Kaempfe 之间产生了亲密的友谊。

[25]

旋转罗盘可以追溯到 19 世纪 Léon Foucault 陀螺相对于旋转的地球,其旋转轴方向的稳定性方面的工作。随着船上铁器的使用和电气设备的增加,使得磁罗盘的使用越来越成问题,这时候旋转罗盘就显得是个诱人的选择。荷兰人 Martinus Gerardus van den Bos 在 1885 年获得了早期形式的旋转罗盘的专利,但是他的发明从来没有真正工作过。1903 年, Hermann Anschütz-Kaempfe 设计了一个旋转罗盘,用在去北极探险的潜水艇上(此次探险没有成行)。该设计获得了专利,在德国海军的支持下,1905 年在 Kiel 建立了一家工厂。

[26]

[27]

在美国,发明家 Elmer Ambrose Sperry 也开发了一种旋转罗盘。Anschütz 和 Sperry 在有潜在高额利润的市场上发生了竞争,因为当时正是第一次世界大战前几年加强军备的时候。当 Sperry 在 1914 年 5 月向德国海军销售罗盘的时候, Anschütz 决定在柏林,皇家第一州立法院控告 Sperry 专利侵权。Sperry 的辩护基于这个论断,即 Anschütz 的专利没有在 Van den Bos 的旧专利上增加任何东西(同时旧专利已由 Siemens 和 Halske 所购),所以是无效的。此案中辩论的另一点是说 Sperry 使用的阻尼法已经被 Anschütz 取得了专利。

xxii

[28]

法庭提议指定一位双方都认可的专家。指定了爱因斯坦,让他在 1915 年 1 月 5 日首次出庭。显然他没有准备好,因为在他的陈述中,有好几处自相矛盾。法庭于是要求他以书面报告的形式回答许多问题,为此将给他支付 1000 马克。

[29]

[30]

爱因斯坦的报告在文件 12 中给出。其中他说 Anschütz 的专利没有改进 Van den Bos 的专利。Anschütz 不同意,法庭也不相信。在 1915 年 3 月 26 日又一次开庭(爱因斯坦没有出席)后,要求他亲自检查 Sperry 罗盘,就 Van den Bos, Anschütz 和 Sperry 罗盘之间的差别写一篇进一步的报告。爱因斯坦决定在 Sperry 罗盘上做大量试验。该试验于 1915 年 7 月 10 日在 Kiel 完成。在他 1915 年 8 月 7 日的第二份报告(文件 19)中,爱因斯坦纠正了他前面的结论,说 Anschütz 罗盘的水平稳定性确实改进了 Van den Bos 罗盘,他还断定 Sperry 的阻尼法就是 Anschütz 以前的专利中所描述的方法。1915 年 11 月 16 日的法庭判决听从了爱因斯坦的报告,禁止 Sperry 制造、销售使用

[31]

[32] Anschütz 受专利保护的方法的旋转罗盘。

五

在这一时期,爱因斯坦在量子理论方面只写了少许论文,但是其中几篇却非常重要。这些文章中仅有的未发表的手稿(文件 26)讨论了理想气体的熵常量的理论计算。几年前由 Otto Sackur 和 Hugo Tetrode 也独立地完成了这个计算。1916 年 1 月爱因斯坦就这一课题讲演过,这篇手稿就是与那次讲演有关。他演讲的目的是揭示出 Sackur 和 Tetrode 使用量子理论概念的方法的基本方面,从而能够更加看出这一课题“没有提供任何实质上新的东西”。

xxiii

[33] 本卷里四篇发表过的量子理论的论文中,有三篇至少部分地涉及爱因斯坦研究工作中反复出现的主题:为了导出 Planck 辐射定律,需要什么条件和假设? 这是 *Einstein 1914n*(爱因斯坦在柏林写的第一批论文之一)(文件 5)的主要议题。这里他避免使用联系熵和概率的 Boltzmann 原理,而是借助于量子理论的基本思想,用纯粹的热力学论证导出 Planck 分布。他的论证特别有意思的是,当从量子理论的观点考察物理和化学过程时,发现这两者之间存在基本的相似性。在此文的第二部分,爱因斯坦转向另一个他已经思考了多年而且以前讨论过的题目:Nernst 热定理的正确性。

[34] 在 1916 年夏,在他完成广义相对论后不到一年的时间,爱因斯坦在量子理论上做出了新的、重大的贡献。那时他写的两篇论文,*Einstein 1916j*(文件 34)和 *Einstein 1916n*(文件 38),与以前所有早期处理 Planck 辐射定律的方法相同,他处理辐射的量子理论所用的论证不依赖于经典电磁理论。新的理论还导出了惊人的结论:在辐射场中,原子发射和吸收的辐射具有特定的方向,而且不是由球形波组成的。

[35] 在这些论文的第一篇 *Einstein 1916j*(文件 34),爱因斯坦考虑一个与外部辐射场保持平衡的原子系统。原子可以通过吸收或发射辐射来改变它的内部能态。关于物质和场之间的这些能量交换,爱因斯坦引入三个基本假设。首先,吸收辐射的概率与辐射密度成正比。其次,有两种发射过程:一种是自发的,遵从类似于放射性衰变的定律;

另^{xxiv}种是受激的,由辐射场诱发,其概率与辐射密度成正比。第三,平衡时,原子内部状态的分布遵从 Boltzmann 分布定律。从这些假设可以很容易导出 Planck 定律。爱因斯坦对他的推导很满意,在一封给 Besso 的信中他描绘道:“Planck 公式的一个惊人简单的推导,我应该说它是这个推导。”他的推导还有一个意外收获,爱因斯坦发现,原子的两个内部能态之间的能量差必须等于 $h\nu$,其中 ν 是在这两个状态间跃迁时吸收或发射的辐射频率,这样就证实了 Bohr 的光谱理论中的一个假设。 [37]

在 *Einstein 1916n*(文件 38)中,重复了第一篇论文中的推导,并增加了对伴随发射和吸收过程的动量转移情况的讨论。爱因斯坦指出,除了能量以外,如果交换的辐射是定向的,那么动量也在原子和场之间转移。如果能量以球形波的形式发射,那么就没有动量转移。然后他做了一个基本而非经典的假设:在辐射场中,所有原子辐射的发射和吸收过程都有 $h\nu/c$ 的动量被转移。他研究了这个假设的定量结果,所用的技巧是他以前多次成功用在量子现象上的技巧:计算在辐射场中运动的粒子所经历的涨落,在这里是动量的涨落。在实际计算 [38] 中,爱因斯坦利用了他以前与 Ludwig Hopf 合作研究发展的方法。最后 [39] 的结果是以辐射密度的方程形式表达的、关于原子和辐射系统的一个平衡条件。Planck 定律满足它,但是 Rayleigh-Jeans 辐射定律不满足它。这被解释为一个强有力的证据,证实了原子发射的所有辐射,不论诱发的还是自发的,确实是定向的:“不存在球形波的辐射。”这一 [40] 非常重要的结论成为迈向光子概念的主要一步。正如爱因斯坦所说:“有了这个,光量子的存在性实际上就被肯定了。” [41]

xxv

本卷中关于量子理论的最后一篇论文, *Einstein 1917d*(文件 45),论述一个完全不同的课题:周期性系统的 Bohr-Sommerfeld 量子条件。如果坐标分离是可能的,这个条件只能以通常形式表示为 $(\int p_i dq_i = n_i h)$; 在所有其他情况下,这个条件具有一般形式 $(\sum \int p_i dq_i = nh)$ 。在他的论文中,爱因斯坦讨论了一种无须分离变量的可能方法。通过把这个条件的一般形式解释为在(坐标)相空间