



Auf den Schultern von Riesen und Zwergen

Einsteins unvollendete Revolution

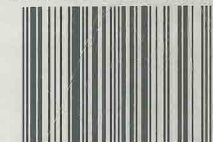
这是一本关于爱因斯坦的书，但远不止此。它不仅有爱因斯坦科学革命的引人入胜的历史，而且也肃清了如下观点，即爱因斯坦的天才想法是因为他只站在巨人肩上的缘故。这是一本信息量很大的书，适宜于所有人。

——《汉堡晚报》(Hamburger Abendblatt)

在对爱因斯坦的工作进行的科学史研究方面，于尔根·雷恩无疑是最权威的人之一。他研究了通往相对论的漫长的、困难的道路，写过大量详细分析的文章。在这本书中，他不只是探讨了爱因斯坦的那些划时代的独特贡献，而且也试图表明，一个新的观点和发现的出现，应该是多种不同的因素集中在一起的结果。

——《物理学杂志》(Physik Journal)

ISBN 978-7-301-15862-3



9 787301 158623 >

定价：39.00元

站在巨人与矮子肩上

[德] 于尔根·雷恩 / 著 关洪 方在庆 / 译

北京理工大学出版社



站在巨人与矮子肩上

爱因斯坦未完成的革命

[德] 于尔根·雷恩 / 著 关洪 方在庆 / 译

Auf den Schultern von Riesen und Zwergen

Einsteins unvollendete Revolution



由爱因斯坦发起的这场令人震惊的科学革命根源何在？难道爱因斯坦真的像人们通常所描述的那样是一个孤独的天才？或者他只是站在——用牛顿的话来说——巨人的肩上？但是那些科学史上的小人物呢？他们所做的工作在这场革命中又起到了何种作用？这些是本书致力于探讨的问题。

本书作者试图通过考察在爱因斯坦的思路历程中起作用的各类因素，来描绘一个不同于以往的爱因斯坦形象。作者提出了一个新的理解科学发展的研究方法，这一方法将科学的发展看成是长时段的知识发展过程中的一部分，是一种某种意义上与地球上的生命进化相类似的“认知进化”。对于这种认知进化而言，科学上的那些不太为人知的人物也可能会起到重要的作用，因此，作为一个思想家，爱因斯坦不只是吸收了大科学家（所谓“巨人”）如牛顿的研究成果和研究方法，而且还采纳了普通的智慧，即同时代的不知名的普通科学家（所谓“矮子”）所使用的思想和方法。

献给我的朋友戴培德(Peter Damerow)



站在巨人 与矮子肩上

Auf den Schultern
von Riesen
und Zwergen

Einsteins unvollendete Revolution

爱因斯坦未完成的革命

[德] 于尔根·雷恩 / 著 关洪 方在庆 / 译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2007-4072

图书在版编目(CIP)数据

站在巨人与矮子肩上:爱因斯坦未完成的革命/(德)于尔根·雷恩著;关洪,方在庆译. —北京:北京大学出版社,2009.11

ISBN 978-7-301-15862-3

I. 站… II. ①雷…②关…③方… III. 爱因斯坦, A. (1879~1955)-人物研究 IV. K837.126.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 171218 号

Originally published in the German language by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Auf den Schultern von Riesen und Zwergen. Einsteins unvollendete Revolution". Copyright 2006 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

书 名: 站在巨人与矮子肩上——爱因斯坦未完成的革命

著作责任者: [德]于尔根·雷恩(Jürgen Renn) 著 关 洪 方在庆 译

责任编辑: 闵艳芸

标准书号: ISBN 978-7-301-15862-3/K·0633

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750673

出版部 62754962

电子邮箱: minyanyun@163.com

印刷者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经销者: 新华书店

650 毫米×980 毫米 16 开本 21.5 印张 319 千字

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

这本书既是关于爱因斯坦的两次科学革命的迷人历史,又是对科学是怎样取得进步的令人深思的考查。科学发展无疑在我们现今社会中起着中心作用,对我们至关重要,理解新概念是怎样取代旧概念的。爱因斯坦在1905年和1915年的两次革命彼此之间是如此不同,对它们显然不能使用过分简单的科学进步模型。雷恩教授是相对论史和相对论理论方面的专家,他在这本书中向读者提供了大量素材,帮助人们对科学改变发展方向时实际上所发生的事情进行思考。

伯恩纳德·F. 舒茨(Bernard F. Schutz)

马克斯·普朗克引力物理研究所(阿尔伯特·爱因斯坦研究所)



目 录

中文版序 / 1

前言 / 3

第一章 科学进步的悖论 / 1

预览:人类知识是怎样演化的? / 3

在偶然与必然之间的进步 / 4

累积还是革命? / 5

尽管发生革命,仍然还进步? / 7

科学家的柏拉图式自我认知 / 8

从柏拉图主义到理性主义 / 10

关于科学史的冲击力 / 12

陌生的世界 / 14

文化史的视角 / 16

传统科学史的视角 / 18

进步与物质文化 / 20

进步和时代精神 / 21

知识的维度 / 23

进步和发展 / 24

物质手段 / 27

科学的历史性定义 / 28

作为冰山之巅的科学 / 30

现实主义原理 / 31

思维模型 / 32

2 ■ 站在巨人与矮子肩上

非单调逻辑 / 33

现实模型 / 35

科学革命的动力学 / 36

第二章 介于传奇与挑战之间 / 43

预览:作为局外人的爱因斯坦如何能掀起一场物理学革命? / 45

爱因斯坦传奇 / 46

1905 奇迹年 / 48

一场革命的前期历史 / 50

第二次革命 / 55

第二次革命的语境 / 57

爱因斯坦和物理化学 / 62

广义相对论的挑战 / 66

第三章 经典物理学的大陆及其边界问题 / 75

预览:爱因斯坦时的物理学状况何如? / 77

经典物理学的大陆 / 77

边界问题 / 80

视野的问题 / 82

不可见的机制 / 85

以太模型 / 87

原子模型 / 89

运动物体的电动力学 / 93

统计物理学 / 96

布朗运动之谜 / 99

处在平衡态的热辐射 / 101

语境中的边界问题 / 104

第四章 经典物理学头脚倒置的改造 / 111

预览:我们何以能把爱因斯坦 1905 年的革命理解为承继传统的
知识增长? / 113

5月的一场会面 / 114

作为伽利略信徒的爱因斯坦 / 117

一种看法的起源 / 123

爱因斯坦早期对以太的考察 / 127

设想用来取代经典物理学的理论 / 132

作为经典物理学与现代物理学之间桥梁的统计力学 / 136

统计力学与辐射理论 / 140

布朗运动的发明 / 146

爱因斯坦的哥白尼式革命 / 151

光量子的第二次发现 / 152

对扩散的一种新解释 / 156

狭义相对论的起源 / 158

第五章 引力的颠覆性 / 173

预览:爱因斯坦如何从狭义相对论走到广义相对论? / 175

与众人期待相反的一场革命 / 176

相对论性引力理论的两难局面 / 178

爱因斯坦逃脱两难困境的途径 / 183

等效原理的结果 / 188

把引力描述为空间和时间的曲率的突破 / 191

爱因斯坦寻求场方程的启发式方法 / 196

双重策略 / 201

通向场方程的道路上的最早几步 / 204

从修补阶段得来的见解 / 206

坦途成了死胡同 / 209

在数学策略和物理策略之间 / 214

第六章 绕着圈子的进步 / 223

预览:为什么爱因斯坦通向广义相对论的道路如此迂回曲折? / 225

框架理论作为爱因斯坦和希尔伯特的跳板 / 226

4 ■ 站在巨人与矮子肩上

- 关于平台阶段的努力 / 228
- 框架理论的巩固 / 231
- 对框架理论的一种数学策略 / 234
- 悄悄地搬走障碍物 / 236
- 回到探险的阶段 / 237
- 求解的钥匙 / 239
- 坐标选择的自由 / 240
- 一个大胆的假设 / 241
- 最后一步 / 242
- 解开死结 / 244
- 终究是数学的胜利? / 245
- 恒星食 / 247
- 象牙塔里的孔洞 / 251
- 未完成的革命 / 253
- 宇宙学的思考 / 254
- 从马赫原理到马赫的以太 / 256
- 从马赫原理到膨胀宇宙 / 257

第七章 作为知识体系转换的爱因斯坦革命 / 269

- 预览:爱因斯坦的革命在知识的长期历史中占有何种地位? / 271
- 创新的禁区 / 272
- 相对论革命的悖论特征 / 274
- 科学简史 / 278
- 创新和生活取向 / 288
- 在科学的经典图景的边界上 / 290
- 科学史的潜力 / 293

人名索引 / 301

专名索引 / 307

译后记 / 321

理论前提

1

人类知识是怎样演化的？

7

爱因斯坦的革命在知识的长期历史中占有何种位置？

历史

2

作为局外人的爱因斯坦如何能掀起一场物理学革命？

主观前提

6

为什么爱因斯坦通向广义相对论的道路如此迂回曲折？

3

爱因斯坦时的物理学状况何如？

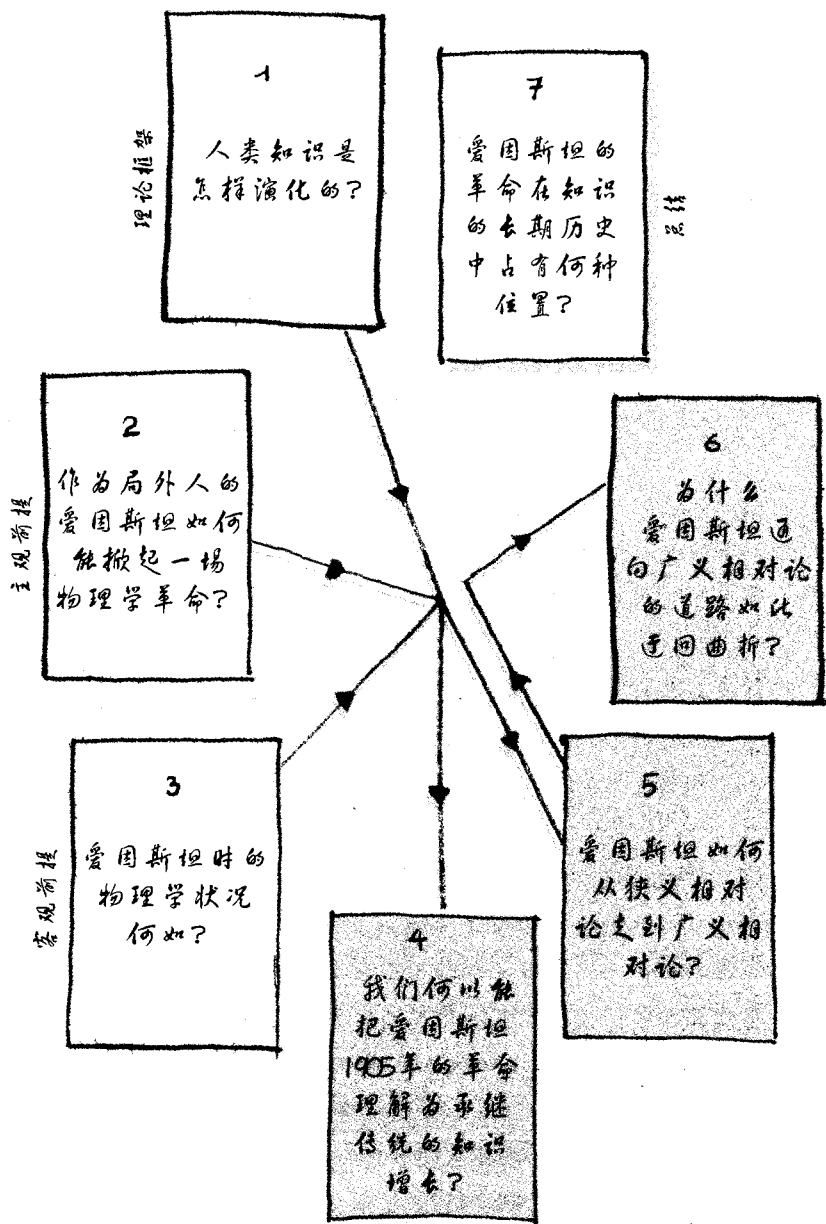
客观前提

5

爱因斯坦如何从狭义相对论走到广义相对论？

4

我们何以能把爱因斯坦1905年的革命理解为承继传统的知识增长？



中文版序

《站在巨人与矮子肩上——爱因斯坦未完成的革命》一书中文版的出版，让我非常高兴，因为我知道，这本书将到达更多人的手中，他们像爱因斯坦所喜爱的那样，深深地致力于如下事业：探究对我们的物理世界的理解，致力于追求一个和平的、社会公正和尊重少数民族的世界。这种探究对于任何愿意和能够追求它的人都是开放的。

爱因斯坦本人就属于一个少数民族，生活在一个不平静的时代。出生于德国的他，在青年时代遭遇了反犹主义的仇恨。后来他勇敢地站出来反对第一次世界大战，在二战中移居国外，晚年他开始对核军备进行批评。爱因斯坦对既成体系总是持批评态度，无论它们是政治上的，还是科学上的。

这本书讨论了他与经典物理学中已得到公认的观点的斗争过程。1905年，他用在一定情况下辐射行动是粒子的提议，以及他将布朗运动解释为物质的原子构造的一个结果挑战了经典物理学，特别是，他提出了让同时代人都惊讶的一个新的关于空间和时间的理论：狭义相对论。

这场科学革命的根源何在？是爱因斯坦一个人完成的，还是他也信赖了其他人？如果是后者，这些人又是谁？他难道只是站在——用牛顿的话来说——巨人的肩上？但是那些科学上的小人物呢？他们所做的工作在这场革命中又起到了何种作用？难道爱因斯坦真的像人们通常所描述的那样是一个孤独的天才？或者，他也从那些不太为人所知的同事和朋友处获得过帮助？这些是本书致力于探讨的问题。

正当爱因斯坦1905年的成就逐渐获得科学界的承认时，他又用1915年完成的广义相对论再一次地毁坏了当时的物理学基础。在十年之内，我们对空间和时间的理解就发生了两次激烈的变化。当人们试图理解科学进步的性质时，就必须对这一奇妙的变化之谜做出解释。

基于马克斯·普朗克科学史研究所的联合研究的基础上,我在这本书中以爱因斯坦为例,提出了一个新的理解科学发展的研究方法。这一方法将科学的发展看成是长时段的知识发展过程中的一部分,是一种某种意义上与地球上的生命进化相类似的“认知进化”。对于这种认知进化而言,科学上的那些不太为人知的主角也可能会起到重要的作用,因此这本书的书名就不只是提到了“巨人”,也提到了“矮子”。爱因斯坦既站在“巨人”的肩上,也站在“矮子”的肩上。

从这样一种长时段的知识发展观来看,西方的知识传统与中国的知识传统之间从来就没有绝对的分离。恰恰相反,即使追溯到古代,都存在类似的促进或阻碍科学的因素,间或在西方科学和中国科学之间发生的互动。例如,正如我们在刚用中文出版的另一本书^①中所讨论的那样,在近代早期,当耶稣会的科学家和传教士来到中国时就是如此。

这样的交流总是需要两方都能理解的调解者、中介者和翻译家。不幸的是,他们的任务和作用常常被低估了。事实上,他们通常遇到了理解双方——在本书中,即作者和潜在的读者——的最困难的挑战。本书的初译是由著名的学者、中山大学物理系的关洪教授来熟练地完成的。很不幸的是,他在完成本书的第一个完整的译稿后不久,于2007年10月30日逝世了。这样一位杰出的学者在他生命的最后阶段来献身于这一翻译工作,本书作者深感荣焉。我也要感谢闵艳芸女士和她在北京大学出版社的同事在出版本书中译本方面的辛勤努力。

最后我想强调的是,这个译本如果没有中国科学院自然科学史研究所与马克斯·普朗克科学史研究所的前伙伴合作小组负责人张柏春教授的提议和方在庆教授的不懈的努力,是不可能实现的。感谢方教授,他竭尽全力,利用自身在现代物理学史方面的高超修养,献出了如此多的宝贵时光,认真仔细地进行了校对和翻译,最终确保了一个可以信赖的译本。

于尔根·雷恩

2009年8月7日

^① 张柏春、田森、马深孟(Matthias Schemmel)、雷恩(Juergen Renn)、戴培德(Peter Damerow)等:《传播与会通——〈奇器图说〉研究与校注》,江苏科学技术出版社2008年版。

前言

1

逝者永不亡。甚或从未逝去。

——威廉·福克纳(William Faulkner)

倘若我未能比众人看得更远,是因为在我的双肩站着一些巨人。

——阿尔·阿贝儿松(Hal Abelson)

那些此前处于科学边缘的学科,现在位于科学的中心。

——格奥尔格·克利斯托夫·利希滕贝格(Georg Christoph Lichtenberg)

本书叙述阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)关于我们对空间、时间、运动、引力、物质和辐射等概念的一场未完成的革命的故事。这场革命是从爱因斯坦 1905 年这个奇迹年开始的,并于 1915 年在他的广义相对论里得到发展。它对今天关于宇宙的起源和命运的理解的探求仍产生持续存在的影响。在知识的历史理论背景下,我们试图将爱因斯坦这场未完成的革命,理解为一场更加广泛的革命的结果。我们也想特别表明,科学上的进步,以及一场科学革命是如何取得的。在科学史上没有别的插曲比爱因斯坦的发现更激动人心,也更宜于让人们了解到为什么像爱因斯坦那样的大思想家能够比他们的前辈看得更远。他们不仅站在“巨人”,即像牛顿那样具有巨大的科学成就的伟大先驱的肩上,而且亦在科学知识、技术知识和一般的常识方面站在一些“矮子”的肩上,而这些知识是在人类历史进程中,经过世代代积累下来的。在这一情况下,这些“矮子”当中尤其包括了被人们遗忘了的爱因斯坦的朋友和援手者,他们的贡献也应当在这里得到承认。

本书每一章开始处都有一段预览,预示了该章主要的论题。在第一章中,通过许多事例描画了作为后续各章语境的、知识演进的历史理论。对这

2 一理论进行的思考,是以马克斯·普朗克科学史研究所进行的研究为基础的,这一研究计划囊括了科学革命的许多不同领域和时期,从在古代高度发达的文明中数学的衍生,到近代早期科学革命的年代,直至20世纪初物理学的剧烈变革;第二章介绍了爱因斯坦革命的某些传记性的要素,并且亦以这种方式给出了第三章的背景材料;第三章试图描述经典物理学知识系统的主要结构,以说明爱因斯坦持有什么样的知识资源来取得他科学上的突破。因而在这一章里也提供了作为第四、第五和第六章主题的科学革命背景的说明;第四章的中心论题是爱因斯坦在1905年的革命性贡献。这一章聚焦于如何从经典物理学的结构产生出后来成为现代物理学基础的新概念的过程;下面两章可以独立于第四章来读,它们用广义相对论的起源来说明这一转变过程的进一步细节,那是爱因斯坦经过多年紧张努力的研究才于1915年完成的。由于使用了一些原始资料,这部分历史被综合性地重构了,从而提供了一个极好的机会来检验第一章提到的某些理论思考;第七章即最后一章也可以独立地阅读,在这一章里总结了基于前面的历史性讨论的这种思考,并且将爱因斯坦在科学上的突破放到人类知识发展的长期历史语境中来考查。这种考查以对科学剧变的当前状况的反思而结束。

3 虽然处理的是像相对论起源这样复杂的问题,文中避去了几乎所有数学公式,应当适于还记得中学里学过一些物理学概念,而对那些困难的部分保持适当的耐心的任何人阅读。读者可能对第五章和第六章特别感到困难,因为在这两章里试图给出爱因斯坦创立广义相对论的工作的重构,而这一重构又是以历史研究的可利用材料和研究成果为基础的。但在这里关注的重点仍然是他的工作中认识过程的本性,而不是其中的技术性细节。然而,为了表达爱因斯坦和他的同时代人所面对的困难,或者至少对此给出一点印象,这些细节的定性描述常常是不可避免的,有兴趣对物理学论证深入钻研的读者们,应当参考在每一章末尾处引述的专业出版物。尝试在这里对物理学和数学问题进行定性描述,还有一个目的,即阐明进入到爱因斯坦的科学革命里的知识构造。像 $\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$ 那样的、表示数学和物理学关系的概念意义的公式,已被证明是理解这种联系的有力手段。这些公式可以显示出超越任意特定的数学表述的相似性。也许这样一些概念性的公式也会在将来

表现出在新的电子媒体中将物理学知识系统化的潜力。

肯定可以设想得到,这些和其他一些结构一起会成为壮大中的语义网络(semantisches Netz)的元素,使得将来因特网的用户能够直接地对知识内容进行操作。这些用户可以使用比传统方法所可能做到的简单得多的方法把不同的知识资源更简单地联系起来,运用这种方法构造出它们的意义,由此支持一种知识综合的过程,而在本书中我们将看到,这种过程在爱因斯坦认识上的突破也是至关重要的。基于这种考虑,像在这里对爱因斯坦的革命所进行的知识的结构分析,对于从约翰·谷登堡(Johannes Gutenberg)^①时代到因特网世界的转变过程中科学知识的结构变化问题,可能很好地得出一种实验室里的实验的意义。

这本书几乎在所有方面都是一种共同努力的结果;它是以近年来我在马克斯·普朗克科学史研究所主持的,以及与我的同事们合作进行的研究为基础的。有关的原始工作可以回溯到由柏林参议院于1991年至1993年的赞助,在马克斯·普朗克教育研究所(Max-Planck-Institut für Bildungsforschung)里由戴培德(Peter Damerow)和我领导的“阿尔伯特·爱因斯坦”研究小组。该小组从属于沃尔夫冈·埃德尔施泰因(Wolfgang Edelstein)领导的部门。现在这本书是以我们在1994年提交的研究报告为起源的。除了本书的题献对象戴培德之外,还要感谢在这项联合成果中做出了重要贡献的其他同事,特别是朱塞佩·卡斯塔涅蒂(Giuseppe Castagnetti)、迈克尔·扬森(Michael Janssen)、约翰·诺顿(John Norton)、罗伯特·里纳斯维茨(Robert Rynasiewicz)、马深孟(Matthias Schemmel)、蒂尔曼·绍尔(Tilman Sauer)和约翰·斯塔切尔(John Stachel)。由于广义相对论的历史多年来是我们研究的中心,它亦占据着这本书的一个特别的地位。我们的许多研究成果直接影响着这本书,因此在每一章的末尾都引证了这些成果。我们不追求资料的完全性,但也在与特定的几章的论题有关之处,选择引用了有兴趣的几种出版物。我们着重的是非专家所能看到的资料,以及那些对本书中陈述的观点有特别影响的论文。

① 谷登堡是15世纪德国金属活字印刷术的发明者。——译者

本书的总目的不是要对我们多年来进行的范围广泛的研究结果提出一种全面综合。我在这篇序言的末尾处提供了关于这种综合的文献。与此相反,我试图运用那些在这里说的“爱因斯坦的革命”,作为尽可能简单地陈述我们对科学的结构性变化的基本见解,为的是与“爱因斯坦研究者”(Einsteinforschern)这个小团体之外的人们分享。我预期我将会陷于一方面被斥之为过分简单化,另一方面又被斥之为晦涩含混的两难境地,并且必须恳求来自我的同行们和友善的读者们的宽容。

本书中的每一章都起源于一些独立的文章,因此都可以单独地阅读。如果觉得某些段落有困难或者太过琐碎,那么可以跳过这些段落而不会影响到比较容易的部分的阅读。在这篇序言开始处的那幅图,画出了各章之间的联系,并且特别注明了为了阅读每一章,需要先读哪几章。

5 本书的另一个特点是,它是合作的成果。假如没有琳迪·迪瓦尔奇(Lindy Divarci)、卡曼·哈默(Carmen Hammer)和乌尔夫·冯·劳赫豪普特(Ulf von Rauchhaupt)的细致耐心的工作,就不会有这本书,他们从头到尾改写了书稿,并且帮助插进了许多例子。没有他们的积极支持,“2005 爱因斯坦年”的其他各种事务将会使得这本书不能按期完成。我还要感谢我的家人在这些紧张的日子里的关心和理解。

卡佳·伯德克(Katja Bödeker)、朱塞佩·卡斯塔涅蒂、戴培德、迪特·霍夫曼(Dieter Hoffmann)、米歇尔·扬森、霍斯特·康德(Horst Kant)、乌尔苏拉·克莱因(Ursula Klein)、克利斯托夫·莱纳(Christoph Lehner)、马尔库斯·珀斯尔(Markus Pössel)、罗伯特·里纳斯维茨(Robert Rynasiewicz)、马深孟(Matthias Schemmel)和迪尔克·温特格林(Dirk Wintergrün)仔细地阅读过书稿的不同部分,并且提出了无数改进的建议。文中大量直接引自英文的文献,由格哈德·赫尔戈特(Gerhard Herrgot)非常细致而投入地译成德文。对于他的献身精神,在此再次衷心感谢!米丽亚姆·加布里尔(Miriam Gabriel)编辑了索引,为我们的成功贡献了她的研究成果。我要对他们全体,以及设计了本书封面且为每一章绘制了插图的、举世无双的劳伦特·陶丁(Laurent Taudin)等人不倦的协作和诚挚的善意表示衷心的感谢。我还要特别感谢我的两位意大利同事法比奥·贝韦拉克(Fabio Bevilacqua)和恩里

科·詹内托(Enrico Giannetto),是他们让我2004年春天在帕维亚大学,有这样的机会在做一个系列讲座时浮现出了写作这本书的最初念头。我还要对设在耶路撒冷的希伯来大学阿尔伯特·爱因斯坦档案馆,以及设在帕萨迪纳的加州理工学院“爱因斯坦文献计划”允许我引用爱因斯坦的一些资料表示友好的谢意。最后,我亦对本书的编辑亚力山大·格罗斯曼(Alexander Grossmann)表示感谢。

推 荐 读 物

本书是同另外一个多卷本的关于广义相对论起源的研究成果的全面深入的系列出版物平行出版的,那是近年来一个国际科学家小组与马克斯·普朗克科学史研究所合作的产物。

Renn, Jürgen (ed.). 2006. *The Genesis of General Relativity*, 4 vols. Dordrecht: Springer:

Vol. 1: Jürgen Renn, Michel Janssen, John Norton, Tilman Sauer and John Stachel *Einstein's Zurich Notebook: Introduction and Source*.

Vol. 2: Jürgen Renn, Michel Janssen, John Norton, Tilman Sauer and John Stachel *Einstein's Zurich Notebook: Commentary and Essays*. 6

Vol. 3: Jürgen Renn and Matthias Schemmel (eds.). *Gravitation in the Twilight of Classical Physics. Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy*.

Vol. 4: Jürgen Renn and Matthias Schemmel (eds.). *Gravitation in the Twilight of Classical Physics. The Promise of Mathematics*.

关于爱因斯坦革命的历史的进一步的研究成果,见以下出版物,上面提到的研究小组的成员们亦对以下的工作有贡献:

Howard, Don and John Stachel (eds.). 1989—. *Einstein Studies*, 11 vols. New York: Birkhäuser.

Janssen, Michel (ed.). 2006. *The Centenary of Einstein's Annus Mirabilis*. Special Issue: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.

Janssen, Michel and Christoph Lehner (eds.). In preparation. *Cambridge Companion to Einstein*. New York: Cambridge University Press.

爱因斯坦论文的权威版本是:

The Collected Papers of Albert Einstein. 1987— (Vols. 1—10). Princeton: Princeton University Press. (中译本目前只出版了五卷:《爱因斯坦全集》,1—5卷,湖

南科学技术出版社, 2002)

这一版本包含了对爱因斯坦的传记和工作的不同方面的无数十分有价值的介绍。还可以推荐的是 Einstein Archive Online(爱因斯坦在线文档), 这是耶路撒冷的希伯来大学“阿尔伯特·爱因斯坦档案馆”以及设在帕萨迪纳的加州理工学院“爱因斯坦文献计划”的一个联合计划:

<<http://www.alberteinstein.info/>>

对爱因斯坦的科学工作及其前因后果的一种一般能够读得懂的介绍, 可以参看三卷本的《阿尔伯特·爱因斯坦——宇宙总工程师》。这三大卷是马克斯·普朗克科学史研究所为了迎接 2005 爱因斯坦年而出版的, 与此同时还举办了与此同名的一个展览。这个展览仍然在以下的网址上作为一个“虚拟展览”陈列着^①:

<<http://www.einsteinausstellung.de>>.

Renn, Jürgen (ed.). 2005. *Albert Einstein—Chief Engineer of the Universe. Einstein's Life and Work in Context*. Berlin: Wiley-VCH.

——. 2005. *Albert Einstein—Chief Engineer of the Universe. One Hundred Authors for Einstein*. Berlin: Wiley-VCH.

——. 2005. *Albert Einstein—Chief Engineer of the Universe. Documents of a Life's Pathway*. Berlin: Wiley-VCH.

此外, 在下列出版物中, 还可以看到部分附有导读性注释的爱因斯坦论文:

Einstein, Albert. 2005. *Albert Einstein: Akademie-Vorträge. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften 1914—1932*. Edited by Dieter Simon. Berlin: Wiley-VCH.

Einstein, Albert. 2005. *Einstein's Annalen Papers. The Complete Collection 1901—1922*. Edited by Jürgen Renn. Berlin: Wiley-VCH.

爱因斯坦在《物理学纪事》(*Annalen der Physik*)杂志上发表的文章可以在因特网上免费查阅:

<<http://einsteinannalen.mpiwgberlin.mpg.de/home>>

爱因斯坦自己亦以一种一般人能够理解的方式来介绍他的思想和理论。以下的出版物仍然位于对他的工作的最可读的介绍之列:

Einstein, Albert. 1922. *The Meaning of Relativity: Four Lectures Delivered at Princeton University, May 1921 by Albert Einstein*. Translated by Edwin Plimpton Adams (1st ed.). London: Methuen. (中译本:《相对论的意义》, 李灏译, 科学出版社, 1961)

——. 1992. *Autobiographical Notes. A Centennial Edition*. Edited by Paul A.

① 有关介绍参见方在庆主编:《一个真实的爱因斯坦》, 北京大学出版社, 2006。——译者

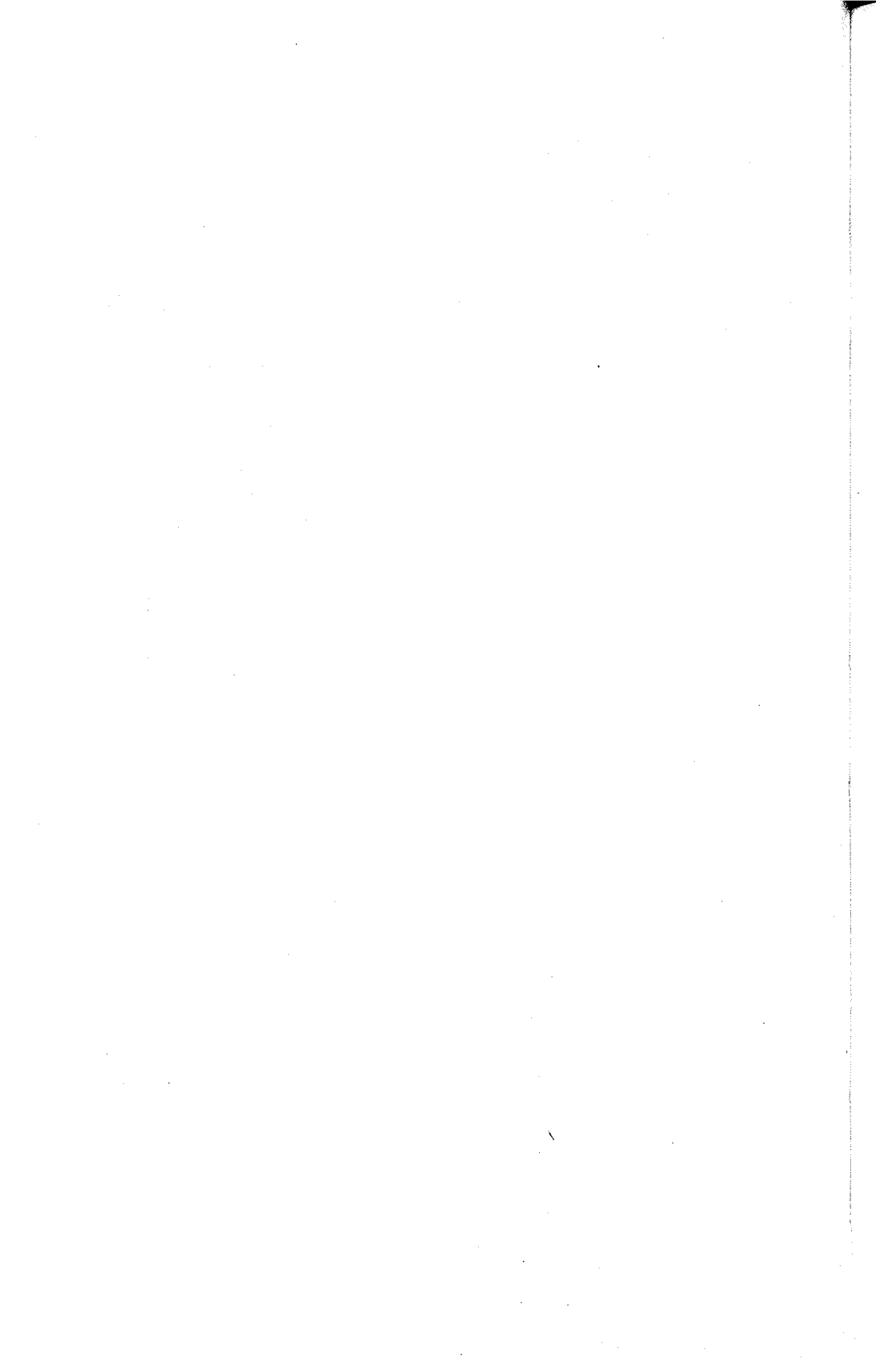
Schilpp. La Salle, Ill. : Open Court. (中译本:《自述》,载《爱因斯坦文集》第一卷,许良英、范岱年编译,1—42页,科学出版社,1976)

——. 1950. *Out of My Later Years*. New York: Philosophical Library. (中译本:《爱因斯坦晚年文集》,方在庆、韩文博、何维国译,海南出版社,2000年4月)

——. 1954. *Ideas and Opinion*: Based on “*Mein Weltbild*” edited by Carl Seelig and Other Sources. New York: Bonanza Books.

——. 1920. *Relativity, the Special and the General Theory: A Popular Exposition* by Albert Einstein. Translated by R. W. Lawson. London: Methuen. (中译本:《狭义和广义相对论浅说》,杨润殷译,上海科学技术出版社,1964)

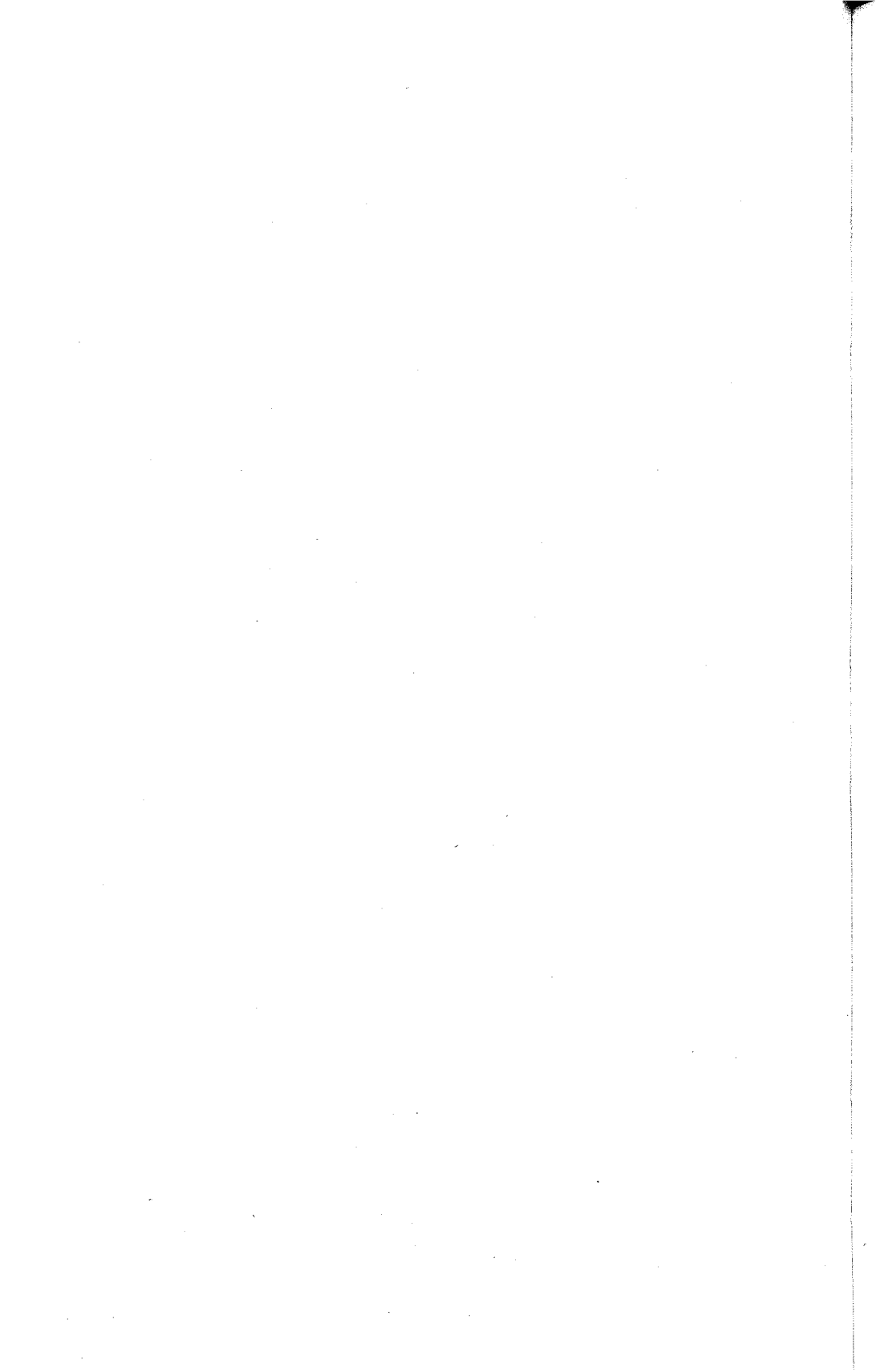
Einstein, Albert und Leopold Infeld. 1938. *The Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*. New York: Simon & Schuster. (中译本:《物理学的进化》,周肇威译,上海科学技术出版社,1962)



第一章 | 科学进步的悖论

9





预览:人类知识是怎样演化的?

10

在科学中究竟如何才能有进步呢?科学革命能够完全改变知识的结构吗?科学革命如何能够与科学的进步取得调和呢?

科学的历史是更加广泛的人类知识历史的一部分,其中也包括了直觉的知识和实用的知识,凭着这些知识,我们就可以使自己在日常生活中掌握方向,或者战胜来自我们环境的挑战。人类的知识是用仪器和符号来具体表达的,知识藉此一代又一代地传承下去。于是它就在漫长的岁月里保持着连续性,就像通过生物进化的遗传保持着生命的延续一样。因此,在科学中新奇事物的出现就应归功于以新的方式运用传统工具的可能性。

知识的建筑里包括各种思维模型(mentale Modelle),我们可以通过思想实验来揭示和预测我们周遭环境的行为。科学理论的大厦是以各种思维模型的综合为基础的,它给予它们以经验上的正当性和适应性。这样一些理论大厦的文字表述连同科学的物质设备构成了知识体系的骨干,这样的体系是由团体掌握的,而每个人则以自己的知识参加到这个团体里来。通过经验增强其稳定性,导致了这种知识体系的不断丰富,但终究亦会产生内部的张力和冲突。

这些系统的膨胀也设立了使它们转变到一种“哥白尼过程”(Kopernikusprozess)的条件。哥白尼革命使得先前处于边缘的星体^①变成一座新的宇宙大厦的中心,科学革命亦这样移动了知识体系里概念上的焦点。因此,科学革命并没有把流传下来的知识埋没掉,而是在反思的过程中把这些知识重新整理改组。

于是,依靠这种知识的传递以及对其反思的变化这两方面的结合,科学的进步就得以实现。在这样的背景之上,可以用同样的方式来理解爱因斯坦的科学革命吗?

① 根据托勒密体系,太阳是围绕着地球转动的。——译者

11 在偶然与必然之间的进步

为什么会有进步？至少在下面的意义下，进步的存在是毋庸置疑的，即只要我们关注的是自然科学研究的进步，并且指的是这种研究跨越不同历史时段给我们带来的知识的不断储备的话。科学进步被认做是现代工业社会的一种不证自明的成分，否则社会的生存就会发生危机。唯一会引起争论的是这种进步及其效果在多大程度上令人满意：是否有足够的资助投入教育和科学，用来产生和制造足够数量的这种“信息素材”(Rohstoff Information)；科学和技术的进步是否以如此快速的步伐前进，以至于有人担忧它的副作用(Nebenwirkung)会对自然和人类产生危险。尽管有人不同意对这些问题的答案，科学的支持者和攻击者都把科学的进步理解作一种不可阻挡的、大步前行的勾勒姆(Golem)^①，其步伐决定着现代工业社会或善或恶的节奏。

对传统的社会稍作一瞥就足以认识到，人类社会的发展并不必定同技术的加速发展相联系，并且与科学的发生和成长完全没有关系。显然，科学只是表达人类文明的许多种可能形式之一，是在历史上特定的条件下衍生出来的一种形式，并且，正如历史也教导我们的那样，它也是能够被消灭的一种形式。仅仅回想起在罗马帝国衰落之时，所有古代典籍和文化都失传了，或者中国在纪元前3世纪统一之后，自然科学的最初苗头被彻底压制就够了。^②这些例子说明了，在确定科学进步的历史本性上遇到如下悖论：最初多少是偶然的历史境况的结果，科学进步在差不多三个世纪的时间里，竟然成了作为整体的社会发展的一具似乎永不停息的发动机。很显然，科学进步既可以是坚固的，也一样是脆弱的。

12 为整体的社会发展的一具似乎永不停息的发动机。很显然，科学进步既可以是坚固的，也一样是脆弱的。

① 勾勒姆是犹太神话中的一种怪物，它是由人创造的类人动物，平时可以为人类做些粗重的工作，但有时亦可能给人类带来毁灭性的灾难。——译者

② 作者这里指的是秦始皇的焚书坑儒所造成的劫难。——译者

累积还是革命？

通过更为细致的考察，科学进步的悖论特征就变得更加显著了。在科学史上有无数的例子表明科学突破的程度会依赖于经济状况、技术条件、民族习惯和思维方式，以及那个时代特有的精神，甚至个人的喜好和奇想——与交响乐、电影或者其他的文化活动没有什么不同。科学无疑依赖于历史的约束和偶然性。即使在科学家的自我认知中，科学有别于我们其他所有的文化表达的一个特征是——科学的“累积”特性：几乎所有科学家个人都深信，他能够比他的前辈们看得更远，因为他的工作能够建立在他们的成就之上，或者，就像牛顿表达的那样，因为他是站在一些巨人的肩上。换句话说，在科学中每一步都建立在前一步之上，并且总在回顾科学的长期发展之中，把科学看做是一种稳定的发展，一种字面意义上的进步，至多暂时被战争或对科学敌对的时代等外部干扰所打断。

科学亦具有革命的特性这一事实，使得它的“累积”特性和持续进步显得可疑。科学思想中翻天覆地的变革和所受到的干涉，怎么能够同科学一旦获得了就永远受到的保护和逐渐的扩展相协调呢？只是在最近几十年来历史学家们和哲学家们才强调科学的革命特征，但后来又给出了通向其他方式的道路。有关的例子包括像从地心说世界观转到日心说，以及从经典的牛顿物理学转到爱因斯坦的相对论力学那样的在科学思想上的革命性剧变。

美国科学理论家托马斯·S.库恩(Thomas S. Kuhn)在他1962年出版的《科学革命的结构》的著名研究里，提出了这样的论点，科学的历史是由一些急剧的变革来表征的。根据库恩的说法，科学革命能够理解成整个世界观13的根本上的剧变，就像一种作为样板的“范式”(Paradigm)取代了另一个一样。在承认科学革命依赖于文化、社会学和心理学诸因素的时候，它们的结构变得可以同政治革命和文化革命相提并论了。于是，科学的历史第一次变成全面的文化历史中的一个组成部分。

然而，与政治和艺术不同，在科学中无疑存留着不可阻挡的(unaufhalt-

sam)进步的观念。对于这样的范式转变怎么能够同科学逐渐前进的图像取得协调的问题,库恩和他的后继者没有给出一个令人满意的答案。他们也没有能够说明新范式从何而来。按照库恩的说法,新的范式并非建立在旧范式的基础上,而是完全取而代之,就像一个革命政府取代了旧政权(*ancien régime*)一样。

虽然库恩对科学革命结构的分析加深了科学进步中悖论的剧烈程度,但多数专门研究者倾向于批评或完全不理睬库恩的观点。这样的反应已经让实际的问题复归于含混的境地。越来越多的科学史家着迷于由科学的文化史着眼所提供的各种可能性,研究在科学与和它有关的各个方面之间的几乎是无限多的各种相互作用,而对处理科学进步这个枯燥的问题则不那么感兴趣了。他们受到了一批逐渐淡出的专家的反对,其中的许多人眼光狭隘,把视线只集中在科学工作的技术性细节上,并且相信有关科学进步的争端好久以前已经以有利于关于进步的传统信念的方式解决了。这些学者做的只是撰写当代的自然科学的编年史,好像旧时的宫廷历史学家为帝王们的所作所为撰写编年史一样;本质上是不需要提出批评和表达保留意见的。

14 科学进步的悖论特征不仅是专家们关注的一个问题,而且也是任何关心我们时代的科学及其前提和结果的人都必定会遇到的问题。特别是,什么是科学创新的先决条件?为了寻求不断冲击着我们的、从全球变暖到全球疫病的全球性挑战,我们必须寻找出何种科学答案来满足亿万人民得以生存的需要呢?在何种程度上科学进步能够被驾驭和推动呢?科学知识通过何种过程来传播、产生和扩散呢?特别在一个给定的历史年代里,从书写、影像、印刷到今天通过因特网,这些媒体对于这种知识的传送起到什么样的作用呢?特别是在每一个历史年代,在产生和传播知识的各种劳作的组织中,公共机构起到什么样的作用呢?这些机构特别指大概从启蒙时代开始的学校、大学、科学院以及研究学会等,它们基本上是按照科学学说的划分而形成的。知识的社会组织,即使其结构依然适用于新的媒体,能够适应于在信息革命的年代里表达知识吗?日益专门化的科学依然处在把它的成果集拢起来,以容纳一种综合的世界观的发展的阶段吗,或者至少容纳我们时代的全球性紧迫问题的解决方案,而不再在一个个的学科范围之内分门别类吗?

对这些问题的答案依赖于各自的观点。从作为参与科学发展的一个同时代的个人角度来看,这种发展显得是一种自然而然的和根本上不可控制的过程:知识在不断增长,而其结果和产生知识的方法的复杂性则明显地增加了。根据这种观点,科学进步看来承担着对我们越来越精确的实在的反思,但最终亦增加了个人理解上的困难。根据这种看法,个人无可奈何地选择把他对科学进步的希望,落到像一种现代的永动机(*perpetuum mobile*)那样的不可能的东西上,并且,另一方面,依照后现代的宿命论的精神,只好放弃对科学进步的运作和结果的模式深入理解。

然而,从一种历史性的视角来看,科学进步显得就大不一样了。在这里,也可以从一个给定的同时代人的角度来看某一给定的时代,但在这种情况下,通过回顾过去,这样一种看法就变得非常丰富了:晓得了哪些路径最后走入了死胡同,学者就有了一种关于科学如何嵌入到社会语境中的总体看法。由这种视角产生的关于科学的图像类似于任何人类活动的历史:它是以被误导的希望、错误和过失、关于优先权的冲突,以及同时发生的一些对抗为特征的,但亦会出现一些终将被证明为独创的疯狂想法。科学是人类的伟大成就和不时犯错的一处表演的舞台,正像政治、社会或艺术一样。但是社会和制度结构起到什么作用,媒体在知识的表达和流通中起到什么作用,以及使累积的知识得以形成一种多少是全面的总看法的概念又起到什么作用呢?从一种历史叙述性说明的视角来看,所有这些作用最终都还原为舞台的背景和意外的事件,它们承办了富于力量和色彩的科学戏剧,并且使得主角们的命运和行为有点更不可理解了。但等到遮住昔日的科学前沿的迷雾散尽,并展现出一种关于获取科学知识的条件和目的观点时,对这些被放弃的战场思考仍然存在:不仅是科学进步是怎样形成的,而且是科学进步到底是不是有可能发生。

15

尽管发生革命,仍然还进步?

会有一种观点完全允许科学的进步特性同它的历史性和偶然性相调和

而避免遇到悖论吗？这样的一种视角亦会提供一种对科学革命的可能性的解释。显然，这样的革命真正颠覆了我们对所理解的世界的基本分类，对科学的认识过程并不必定在每一次革命之后重新开始。

与爱因斯坦的名字联系在一起的那场科学革命提供了这样的一个极好的例子，因为它改变了诸如空间、时间和物质的基本概念，这些概念不仅是科学思想的元素，而且亦为日常经验所必需。科学世界观的两次巨大的剧变——相对论革命和量子革命——亦起源于爱因斯坦 20 世纪初的工作，它们以一种常人难以理解的方式，改变了我们对同时性、速度、因果性、粒子的可数性或可定域性(Lokalisierbarkeit)、区别波动和粒子的可能性以及惯性和引力之间的关系等一系列明显具有基本地位的概念和事态的理解。而且，我们关于作为一个整体的世界的概念，已从一个无限大的和本质上是静止的宇宙，转变为一个从单一的原点爆炸性地膨胀开来的宇宙。

尽管我们对这个世界的理解发生了深刻的变化，作为今天世界的科学图像的基础的、许多个世纪以来的预备工作并没有在“爱因斯坦革命”的结果中被简单地抛弃。相反，在这场革命里，哥白尼、伽利略和牛顿的发现在被驳倒的同时亦被证实了。这怎么会有可能呢？科学进步的事实上的可行性怎么会同科学革命发生的事实相调和呢？

科学家的柏拉图式自我认知

16 当然想象得到，科学的发展是作为一种在理想条件下的逐渐接近而表现它自己的，然而，只有通过绕道而行或者克服障碍才能够达到这一点。基本上，这就是一位当代科学家作回顾时所看到的科学历史前进的途径，从他的现代观点看，能引导他进行科学研究的那些过去的科学成就，就被看做是进步的，而其余的就被很遗憾地被看成是走了弯路。从这种观点看来，亚里士多德的物理学看来走向了错误的方向，而伽利略的物理学则是为牛顿物理学做了准备；后来，牛顿物理学又可以被看做是爱因斯坦相对论物理学的一个高度有用的近似。

例如,伽利略关于各个行星沿着圆形轨道绕太阳运转的假设,就是行星轨道是椭圆形的想法的一个很好的先驱,虽然需要改进。后一种想法最早是由约翰尼斯·开普勒(Johannes Kepler)提出,后来又由牛顿从他的万有引力定律推导出来的。事实上,各个行星的椭圆形轨道还是接近于圆形的。在牛顿的研究结果里,行星的椭圆轨道在空间中维持着一个稳定的取向。爱因斯坦运用他关于引力的相对论性理论,说明了这些行星轨道的几乎不可觉察的进动,看来就是对牛顿方案的一种微小的修正。按照这种观点,伽利略和牛顿的发现永远不会被科学革命完全驳倒,而是除了少数或者重要或者不重要的修正之外,作为在一种更先进的理论中的近似描述被保留下来了。

按照对于科学进步的这种理解,个人对科学的见识不仅建筑在一个又一个的见解之上,而且在范围上也持续扩展,并且最终形成了认识自然界的一个总纲,随后有可能表达出一种统一的“关于一切的理论”(Theorie für alles)的一道包罗万象的公式。虽然许多科学家怀疑这样的一种包罗万象的理论是否真的可以构造出来,或者疑惑这样一种理论在建立之后仍然需要不断地改进,但有关科学进步的明显累积的特征,看来被关于逐渐接近自然界的一种真实图像的这种想法最大限度地支配了。这一概念在哲学史里以各种不同的形式讨论过,有可能可以在柏拉图关于理念的理论里找到它的最精练的表达。它提供了对于我们的认知过程看来被引导到仍然未知的领域,而且可能是不可达到的目的的一种最简单的解释。因为按照柏拉图,真理的认知不是别的,而是一些原始观念的回忆,而我们的一切具体的经验不外是它们的阴影。

柏拉图还在他著名的洞穴譬喻中,描述了观念世界与现实世界之间的关系 17。他把我们的现实世界比作一个洞穴,而我们从这个世界获取的感官印象仅仅是一些阴影。人们终其一生除了这些阴影以外什么也看不到,这样就不可避免地使他们对真实的事物产生误解。但一旦从洞穴的束缚中解放出来,他们就会认识到他们先前看到的東西不过是真正现实的一种模糊的反映。当我们通过哲学和纯粹思维(以及在后来的解释里通过科学),就能够克服我们感官的缺陷,最终认识到理念世界是真正的实在。

根据这种观念,难怪能够把科学知识看做是一种启蒙。就像从黑暗引至

真理的光明的路径一样,虽然这种真理只能够逐渐地显露,而且可能永远也看不到它的全部。无论如何,根据柏拉图的著作,因为真理是由我们所有的科学成就所共同建立的一个参照点,不可以把这些成就看成是互相之间分隔开来的和与它们给定的局部语境纠缠在一起的,但最终被引导到一个共同的目的。也难怪大多数科学家都是在这个意义上的“自发的柏拉图主义者”。因为这些科学家藉以工作的观念,包括像三角形和素数那样的数学观念,或者像力和场那样的物理观念,看来都是永远有效的。这些观念被认为与导致它们出现的人类历史无关,因而人类之外的智慧亦应该能够理解它们。我们只需要回想起运用一些数学定律来同外星人通信的提议,这个当代的想法最早是由卡尔·弗里德里希·高斯(Carl Friedrich Gauss)提出来的,而新近则由于美国天文学家卡尔·萨根(Carl Sagan)的科幻小说《接触》(Contact)而变得家喻户晓。

虽然科学本来就植根于地球,但对柏拉图主义者来说,科学的成功有赖于它把自己脱离这种根底的能力,得以从具体上升到抽象并且在所有善变的现象背后寻找出普遍有效的本质,并且尽可能用数学去把它们构筑成一些普遍的原理和定律。这种对科学目标的理解,受惠于对“更高”的真理的探求,对那些把自己献身于这一使命的个人来说,总包含了一种救世的暗中承诺。科学于是就能够变成一种宗教的替代物——一种专家们的宗教——当然它关于救世的承诺通常只针对选定的少数人。对阿尔伯特·爱因斯坦和马克斯·普朗克——对许多其他杰出的科学家也一样——来说,科学提供了从“仅仅是人类的”(nur Menschlich)活动中摆脱出去的可能性,在对一个永恒的自然界的探求中获得安慰。当然,这种超越人类生活圈子的行为,总是意味着抑制居留在那里的痛苦和畏惧。科学也可能会成为逃避主义(Eskapismus)。

从柏拉图主义到理性主义

对于我们来说,更加重要的问题是,科学的进步是否与科学对日常生活的不可描述和变化无常的摆脱这一点直接相关。当然,这是对一种长期的哲

学传统的坚定信念。这一传统认为清晰的观念、不可动摇的原理或至少是决定性的方法保证了科学的进步。在柏拉图之后,伊曼纽尔·康德(Immanuel Kant)是这一传统的最重要的守护神。他像柏拉图一样,也从与数学和自然科学相关的那些看来是颠扑不破的基本陈述出发,推断出这些陈述并非建立在感觉经验之上。然而,他不是把这些超自然的起源落到一个观念的客观世界上,而是归入人类自身的认知能力。

于是,感觉经验不能够令我们确切地知道:如果一段距离 A 大于第二段距离 B,而 B 又大于一段距离 C,那么 A 就必定大于 C。如果这个结论仅仅来自经验,我们总应当假设在下次对这三段距离作比较时会得出令人吃惊的结果:第一段距离仍然大于第二段距离,并且第二段距离亦大于第三段距离,然而这一次第一段距离却短于第三段距离。没有一个讲道理的人,肯定没有一个科学家会认真考虑这种可能性。但这种肯定性是从哪里得来的呢?不像柏拉图,康德不是把这种肯定性的字面上超感官的起源放在一个观念的客观世界里,而是放在人类的认知能力(Erkenntnisvermögen)本身上。因此。上面所说的这一结论是以一种方式预先设置在我们的感知能力里的,是一种先验(*a priori*)有效的——即先于所有经验的——并且是不可以用经验来驳倒的。

康德自认为他以这种方式亦说明了科学进步的牢固基础,因为所有已经获得的经验就其本性来说,必须适合于已经给出了的、我们的知识系统的建筑;因此康德很自然地试图去描绘被他称为“自然科学的形而上学”的这座建筑的概要(Grundriss)。依照他的期望,这个概要会提供所有后来的科学研究发展的方向,而它自身则本质上不受这些发展的影响。康德相信,这一概要 19
可以从理性的定律推演出来,而它们的有效性必须假定是先于所有经验的。换句话说,他想象出了一种思想机器,对它来说,我们的经验组成不外是经验性的未加工的原料。借助于由这具机器的时钟一劳永逸地设定了的机制,这些经验于是就被加工成自然科学的理性见解了。在这具思想机器的不可改变的部件中,康德列出了对于空间、时间和物质,还有对力的概念的某种理解——但正是这几种科学思想的形式在与爱因斯坦相关联的科学革命中被彻底改变了。

但远在爱因斯坦的革命之前,科学进步的急速步伐已经清楚表明,它强健茁壮的特征很难用康德的思想机器那种硬说成是普遍适用的运作模式来说明。因为这种进步不断产生一些新的概念和对一些老的概念发出疑问,使得在回顾这种发展之时,康德那种设想为普遍适用的概要,不外是在他的日子里对自然科学的一种经过哲学修饰的设想罢了。看来康德所建立的这种传统,亦不是不可能应付自然科学进一步发展的挑战:他原来设计的机器什么时候都可以更新,被一个更现代的机器所取代,在这个新的机器里自然科学的当前概念可以凭着它们的思想功能,作为设想的普遍适用的机制而放进去。由这种纯思想机制调节的自然科学中获取的知识,就可以局限于一个小范围的核心功能,或许是纯逻辑,而科学知识的所有其余成分则被看做真正是经验的。

20

尤其是从近代早期开始,就存在广泛的尝试,试图识别出一种科学方法,用来确保和说明科学的进步,这一努力还在进行。不管科学的内容有多么繁杂,这样的一种方法被假定能够保证科学认知上的进步及其结果的有效性。实际上所有这一类的尝试,都与康德的理性主义分享着科学理性有一个不可能受经验影响的最终核心的观念。这些学说包括,从笛卡儿指导思想的原则,到早期的逻辑实证主义,一直到我们今天的分析哲学在内。

关于科学史的冲击力

科学理性主义的哲学计划一开始就与现代科学的发展密不可分。但是它失败了;所有要使正统的理性独立于科学内容的尝试,最终都无功而返。一切所谓形而上学的“第一因”或者方法论原理,都被发现依赖于与各个时代对应的时代精神;没有找到唯一存在的一种研究逻辑。这是最近的科学史研究得出的一个结论。始料不及的是,这一结果亦挫败了对于进步的信心。但现在这部历史亦使得应当按科学的方法达到合法化的理性基础遭到坍塌的危险。现在科学史试图运用这种必然性的效用,并且由此与某种哲学潮流形成一种非神圣的联盟,趋于与理性和理性主义断绝关系,正如俗话所说的把

“婴孩连同洗澡水一起泼掉”。

谈到科学进步的哲学构造,科学史的冲击力表现在它只在这些理想化的结构面前举起一面实际经验的镜子。最终没有一种普遍的科学方法,即使是像牛顿和爱因斯坦那样的巨人所设计的方法,能够经受得起同历史重构研究的事实作贴近的比较。于是,几乎不会令人感到惊讶的是,对科学的评价实际上仍然缺乏任何普遍有效的解说和标准。这种对科学的评价有时不仅必须区分好的科学和坏的科学,还要从伪科学中辨认出科学来。如果在评价科学时,要求主要用能够以数学上的精确度表示的指标来回答,那就没有什么意义了。更加可靠的是像专家评价那样的社会过程。于是,在实践中,很简单,杰出科学就是杰出的专家们评定为杰出的科学。这样做当然也有风险,风险在于这些专家受制于所尊奉的教条或者优先考虑小组的利益,对科学的进程施加一种专断的影响,这样做更像是阻碍而不是鼓励科学的发展。

但是我们能够做点别的什么吗? 尽管经过了几百年的努力,科学哲学至今未能成功地确立一种令人信服和普遍有效的标准,用来判定能够付诸实际应用的科学理论的可接受性。只要想一想逻辑实证主义的弱点就够了,即使卡尔·波普尔(Karl Popper)的证伪主义(Falsifikationismus)观点,亦已受到了年轻一代的科学史家们的无情揭露。卡尔·波普尔假定,假如一种科学理论的预言被经验性的检验否证了,或者说它被“证伪”了,那这种理论就要被放弃了。但是,实际上每一种科学理论都已经被证伪了,即使是在它完全建立之前,因为总会有些观察或者实验与它相矛盾。而且当它被接二连三地证伪之时,通常会被修改而不是放弃掉。或者考虑到那相当夸张的格言,说的是必须严格区分经验陈述和理论预言。那什么样的经验主张能够建立起来而不必顾及整个抽象的网络,并且因而罔顾理论概念呢?

过去几十年来科学史取得的成果导致了怀疑主义的兴起,它怀疑所有声称能够运用超历史的、普遍适用的标准来清楚地区别科学知识和其他形式的知识,或者甚至只是区别谬误和迷信的尝试。所有已经试过用来切入活生生的科学这片实质上难以穿透的丛林的哲学和科学史的直接路径,都预示着破坏对这一实在的感知的危险。因此,为了得出足以概括一种普遍适用的科学

方法的结果,探究实在的每一个历史案例的研究都由于先天的原因而归于失败。正是由于这种需要,从保罗·费耶阿本德(Paul Feyerabend)的无政府主义宣言开始,通过宣称失败本身就是成功和从方法的强迫症中解脱出来,而使科学史得到了一种好处。

22 也许,把知识的建造当成像把一块块砖简单地码放在另一块上面的进程那样的那种累积式科学进步的构造实际上仅仅是一种幻想,那是以历史传统的碎片,靠对那个时代的品味的理解而竖立的建筑物,就像早年的考古学所做的那样。“理性重构”的大胆观念的确讲的是这种解释,有赖于这种观念,科学哲学有时热切地希望把冥顽不化的历史改造得更易于驾驭。过去的发现真的可以解释成一步一步地接近今天对世界的自然科学的理解,因而把它们的位置指派在一个天衣无缝的整体里吗?哥白尼^①关于行星圆形轨道的假设真的只是过渡到开普勒的椭圆的一步吗?难道爱因斯坦关于弯曲时空连续体的物理学终将只是对牛顿经典物理学的一种微小的修正吗?它只是在考虑到运动接近于光速时,或者只是当我们想达到十分精确时才对吗?

陌生的世界

对历史研究做更为仔细的考察,人们很快就会发现,按一种当代的世界观去综合早期发现的尝试,会造成一种难以被承认的简化。这种简化使人们认识不到伽利略和开普勒的智力世界本质上与今日自然科学的世界观大不相同这一事实。例如,对伽利略来说,各个行星的轨道肯定不是像在经典物理学里相信的那样是由惯性和朝向太阳的自由下落这两方面的结合;相反,它们是他称为的一种“中性运动”(neutrale Bewegung)的体现,这种运动既不是由所有物体都朝向宇宙中心的自然趋势所支配,亦不是退离宇宙中心的一种猛烈的强迫运动。只有这种沿圆形路径的中性运动适合于一个和谐的宇宙。在伽利略的概念世界里,惯性的经典概念还不被人知晓。他的世界是靠

① 原书此处误为伽利略。——译者

亚里士多德的自然哲学形成的,其中天然运动和强迫运动的区别是根本的,并且伽利略关于天然运动的概念可以综合成一种中间类别。与此相反,开普勒对行星运动的分析是在他从第谷·布拉赫(Tycho Brahe)那儿接收的精确的经验数据,以及宇宙论理念的基础上形成的,而这种宇宙论又植根于一个具有和谐秩序的宇宙在古代学说。例如,开普勒设想各个行星轨道大小的安排决定于柏拉图的几种正多面体的镶嵌,这种想法的特征是与现代自然科学的图像不相吻合的。

毫无疑问,正如库恩等人所强调的那样,自我确认是教科书故事的主要目的——这种故事不是承认这样一种智力上的多样性,而是虚伪地描述一种 23 在科学的历史和现实之间的天衣无缝的故事。这些故事最终表达为一种在宗教和政治语境里很熟悉的创立神话,并且通过其权威和范式的地位使当代的科学合法化。伽利略和开普勒为现代科学的衍生,做了罗穆卢斯和瑞摩斯(Romulus und Remus)^①在创立罗马时所做过的事。正如圣塞巴斯蒂安(St. Sebastian)是为了一种崇高真理而成为基督教的殉教者那样,焦尔达诺·布鲁诺(Giordano Bruno)和伽利略也被许多人看成是为科学信念献身的殉道者。并且,即使假如我们关于这些英雄人物的威望的信念被科学怀疑主义和破灭的幻想削弱了,今天科学的运作仍然不可能无视关于伽利略、达尔文和爱因斯坦的神话的吸引;而且还添加了一些像斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)那样的新神话。并且,以文化史为导向的更加新近的科学史反对占着目前主流倾向的这些神话时,它看来就像对一种神圣的冒犯,这种情况也已经被像史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)那样的领头自然科学家察觉到了。

但那是徒劳的。对科学史的新近研究已经把伽利略等人从他们安坐了几个世纪的宝座上拉下来了,并且把他们还原到他们那个年代的语境之中,例如,把伽利略置于在佛罗伦萨的托斯坎纳(Toscana)大公爵的那些朝臣们的社会之中。于是,人们就得重新看待伽利略为了战胜作为对手的学院派而采取的论证策略了。新近的研究表明,不存在所谓由伽利略建立的科学方法的应用范例,相反,他是一个聪明的暴发户,懂得如何去巧妙地操作权力机制

① 罗马神话里的战神父子。——译者

来推进他的事业。在伽利略的著作里,有许多陈述,尤其是关于按推测应是他完成的实验的精确度的陈述,已经在更仔细的审查中被证明是夸大其词的,甚至是错误的,他有时甚至被当做一个骗子和现代科学造假事件的赞成者;因而对他的尊敬很容易地就变成嘲弄,即使人们更愿相信伽利略作为科学方法发明者,而不是作为欺诈者的神话,情况也是一样。

文化史的视角

24 但是,科学的文化史能够为对于科学进步的理解贡献些什么呢?对许多科学家来说,那好像不过是进一步破坏对科学进步的信心的一种分裂的力量。当把科学史延伸到文化史时,起初假设这样做可以摘下蒙在一种假设与语境无关的科学的理性核心这种近视的观点上的眼罩,但这种延伸早就起到了使科学蒙羞的作用。而一旦放出了怀疑主义这个魔怪,就很难把它重新塞回瓶子里去了。对于科学史的每一项用文化的、技术的和社会的语境观点贴近视察人物个性或者个人发现的个案研究,都暗中培育了不仅对传统神话,而且对科学本身的威信的怀疑,尽管这些神话看来仍然是可以信赖的。聚焦点越移近,就越显现出纯粹的偶然性以及“人类-太人类”(Menschlich-Allzumenschlich)的特点,并且更加难以把科学从它的语境中分离出来。

科学越是同其在某种历史状况的语境交织在一起,就越难以对科学史的不同插曲进行比较。看来,在这样的背景下要把一些不可比较的历史插曲结合到一起以得到一种关于进步的综合全景的做法,属于一种年代混乱的错误,甚至是完全不可思议的。什么是这样的一些插曲之间的连接呢?而且如果每一个插曲都属于一个不同的世界,又怎么能够从最后得出什么见解来呢?从文化历史角度来解读科学的历史学家们,将粒子物理学家们的研究对象解释为人工构造物,这至少反映了当代科学复杂的社会和技术组织,同样也反映了一个客观的物理现实。但是什么会把像朝臣伽利略那样的人和今天的粒子物理学家联系在一起呢?

因而我们必定不能轻率地假设,作为一名科学家就在任何历史时期都是

那么回事。的确,在某个历史时代,用相同的一些社会条件,例如用近代早期法庭上的保护人制度来说明研究风格和结果的等同性,常常比研究风格的相似性更易于说明。那时候科学还不是一种专业。像艺术家一样,科学家也需要取悦于一位当权者,不仅是为了获得他们事业所需的资源,而且也从他们那里获得必需的授权。那时候,一位——地位最高的——君主对从事一种工作的许可,就像今天的科学家的一篇成功的同行评审和随后在《自然》(Nature) 25 和《科学》(Science)等一流期刊上发表论文一样。像伽利略、塔尔塔利亚(Tartaglia)、卡尔达诺(Cardano)、笛卡儿、培根和其他许多人那样的同时代研究者,都运用了类似的浮夸计谋来增加他们的说服力。几乎每个人都声称已经超越了古代的哲学,并且已经创立了一门立刻对军事、医学或经济都有用处的新科学。不管这样的声明如何使像伽利略那样的人纳入了科学史,总体上它们都使得每一个英雄降为某个社会群体的一个典型代表。

科学史家亦试图对相对论起源条件的问题做出回答,强调文化、技术或社会环境起到中心的作用。这样的回答看来是比较可信的,如果他们关心的不仅仅是爱因斯坦非凡的成就的话,但在同一时期的其他科学家身上也出现了别样的见解。因而,对于时钟同步化的论题(我们将会看到,它对1905年狭义相对论的出现起到了关键的作用),像在爱因斯坦的工作里一样,也可以在法国数学家昂利·庞加莱(Henri Poincaré)那里找到。在1900年前后,用信号的传送来使多个时钟同步化,确实是全球贸易和通信的一个极其重要的问题,特别是对在伯尔尼专利局工作的爱因斯坦,或是对在巴黎经度局兼职的庞加莱那样的人,他们正处在以自己的方式对这方面的发展起到重要作用的位置上。为什么在那个时代没有一位科学家从时钟同步化那样的实际问题提出关于空间和时间的一个新概念呢?要知道这一概念会有助于他解决在他的科学里面深藏的问题。

当然,在说明上的这种尝试亦被一些问题所困扰。不仅是科学与普通实际问题的相互关系总是同某些东西有关联——它们通常不能说明我们初看之时会看到什么。例如,为什么技术-文化的环境竟会导致空间和时间的传统概念会被放弃呢?在每日的生活里习以为常的信号传送和铁路上时钟的同步化等现象,毕竟很好地遵循着通常的规则。 26

然而,谁会想到要放弃植根于文化、社会和技术环境的变迁的,对于科学创新的说明的可信性呢?正是爱因斯坦关于我们对空间和时间的概念的革新,表明了事实上在可信概念与日常思维之间并没有一条绝对的界线。

由相对论改变了的空间和时间的概念不仅是狭义上的经典物理学里的技术性概念,而且包括了从日常思维得来的直觉观念,例如关于同时性的意义,那是在经典物理学里凭着直觉思维而未经仔细审查就采用了的。因而,这些概念的变化亦起源于一个经常由于技术的发展而改变着的日常世界。这一点难道是不可想象的吗?

传统科学史的视角

概念亦有其历史。对传统科学史来说,让它承认概念史应当由某种不同于伟大头脑的洞见所形成,是相当陌生的。因为在传统科学史里,科学进步终究是某种一个又一个巨人的接力赛跑,他们在时间的长河中传递着他们所独创的观念的接力棒。历史学家们写下了一部被看成是成功事迹编年史的科学史,因而要追问是什么人、是什么事、在什么时候和在什么地方那样的经典问题,对于研究体育竞技要比研究科学更加合适。这些体育运动在整个时期对已经不断变动的问题是不加考虑的。的确,我们如何评价首位自然哲学家亚里士多德基于现在不再适用的关于不同种类物体的一种根本的区别而制定的、重的物体和轻的物体自然下落的规律呢?并且对于海因利希·赫兹(Heinrich Hertz)在一种现在不再相信其存在的媒质——以太中证认出电磁波,又该怎么看呢?

几乎不可避免的是,传统的科学史必须容忍过去对世界的概念和现在的概念两者之间的不相容性。完成这一任务是轻而易举的,因为事实上它的真正方法总是聚焦于一些个别人物,他们的偶然失误只是使他们看来更加值得尊敬。与此相反,新近的科学史则强调这些个人以及他们的成就依赖于其语境,亦找出和详细描述了作为引起这种依赖的媒介的社会构造。这就打开了一扇理解知识产生的大门,这种理解认为科学知识不仅仅是一个个的成就的

总和,而是把知识作为一种集体过程的产物而共享的结果。然而,还难以从这种更广阔的视角得出基本的方法论结论。这样一种结果会被用来处理像亚里士多德关于对自然重物 and 自然轻物之间的区分,或者关于以太的本性那一类作为一个综合的知识体系的一部分的概念,而包括科学史上的被当作传统英雄的个人都参与了这一系统的建造。代替这种做法的是,语境化的研究常常有效地把这些个人亦作为个别人物而相对化了。

这种科学的文化史无意中遇到了一种广泛的公众倾向。人不仅崇拜英雄,亦不时喜欢把他们从他们的宝座上拉下来。文化历史的方法本来不适合于攻其一点来挑战伟大的个别人物在历史上的重要作用,因为它的目的是描述其在历史语境中的作用。但当像伽利略或者爱因斯坦那样的伟大科学家被深深地浸入他们的环境中时,常常会出现一些反面的角色,他们在公众心目中赢得了几乎比原来的英雄更引人注目的形象。一个例子是伽利略的女儿玛利亚·切莱斯特(Maria Celeste),另一个是关于爱因斯坦的相对论的提出有可能应与他的朋友和后来的妻子米列娃·玛利奇(Mileva Marić)分享的猜测。在这两种情况下,有关语境使得科学史上带传奇色彩的英雄,多少返回到我们普通人所熟悉的狭小世界的范围里了。如果像大多数人类的其他追求那样,科学在本质上亦仅仅由权力、金钱、性和声望所推动的话,那就容易理解得多了。

无论公众的兴趣怎样在于重新评价科学史上的英雄,沿着文化史途径的新近研究已经贡献了比传统的科学史做过的更多的一种科学的现实图画。即使这种研究有时过高地估计了局部条件在构造科学内容上的重要性,过去 28 几十年来的工作确实已经清除了在大多数科学史的传统研究里被暗中奉为基础的过时观念。

然而,它们的遗产依然延续着——并不罕见地作为一种负担而延续着,可以不顾知识的复杂建筑,亦在智力上漠视同样复杂的社会结构,但在制度上它仍然是强有力的。先前,似乎把科学家看做一些集邮者就很足够了,科学家交换其想法就像集邮家交换珍稀邮票一样。为了做历史性的研究,我们可以简单地把他们的著作和通信收集成册,再加上一些说明性的注释,这些注释通常仅仅记录了文献本身的来源,但在某些特殊情况下也会记下个人想

法的来源。编辑团队沉醉于在堆积如山的文件中搜寻,他们醒来时只留下了脚注的踪迹。任何要终其一生埋葬在这样的知识中的读者,必须通过散存在各处档案馆和图书馆的成堆的文件追踪这些编辑的足迹。那些提供支持的组织、各个大学的出版社和科学院不是利用现代媒体去把这些分散的资料变得可以在因特网上自由地运用,互相通过网络联系,并且提供一个新的出发点去处理系统的问题,而是依然投入数以百万计的资金于那些难得对公众有意义的出版物,以及已经越来越变成研究工作瓶颈的编辑计划。

进步与物质文化

29 通过对局限于出版物、手稿或者信件这些类型的原始资料的关注,传统的编辑计划倾向于永远持有这样的偏见,认为在科学的理论和实验之间有一个简单的区分,经验是所有创新的最终源泉,因为它提供了素材;而对这些材料进行解释的理论则表达了科学的精华。因为在历史的进程中这些解释将会被抛弃和替换,它们组成了科学史的正常主题——并且按照这种观点,理论在其中形成的文本乃是人类关注的正常对象。与此相反,只是在最近的科学史研究中更多地注意的,不仅是这些文本得以产生的社会环境,而且也是所谓的物质文化——指的是作为经验科学必备条件的那些工具和实际知识的整体常常会在其中擦出第一朵创造的火花。

另一方面,所有的表象都显示,社会条件和物质文化亦在科学发展的大尺度结构中留下了它们的印记。数学作为符号系统运算的研究最早进入了历史的场景,在那些早期的高等文明里使用这样的符号系统作为社会的或经济的管理机构的重要手段。这样的符号系统在巴比伦、埃及、中国和中美洲帝国复杂的管理系统和社会仪式里起着重要的作用,因而由此产生了一个专家阶层,他们致力于制定这些系统的规则,甚至超越了它们直接应用的本来目的。力学在经典的古代进入历史的场景,大约是与不等臂天平的发明同时的,这种天平的功能是用力学里第一条定律——杠杆定律来说明的;动力学里的关键论题之一,是由伽利略等人创立的弹道学,在同时代的那片在政治

上分崩离析的欧洲大地上,武器是一个备受关注的中心问题;化学也是作为一门与像冶金学那样的近代实际兴趣所在的领域密切相关的科学而得到发展的;在热力学的出现和热机技术的流行之间也有着类似的接近的关系,如同在 19 世纪里电动力学和电技术之间的关系一样。

如此惊人的平行发展暗示了,一方面科学的发展和另一方面社会的发展会存在着一种简单的因果关系。是不是像自从古希腊的历史学家希罗多德(Herodotus)的猜测开始,并且直到今天的政治家所希望的那样,科学乃是时代的主要经济需要的反映呢?希腊人发明几何学是不是为了解决在尼罗河的洪水每年泛滥之后,重新分割他们土地的问题呢?假如科学真的能够这样直接地被我们的人类需要所驾驭,我们就应当在原则上特别支持科学对任意给定时代的最迫切的问题给出解决办法的期望,例如现在对疾病和癌症的防治,对能量和食物的供应,以及防止气候灾难的搏斗那样的问题。的确,今天献身于这些研究方向的专家们,亦乐于享受来自政治和公众方面的特殊关注。但不幸的是,社会的兴趣和科学的进步之间的因果关系,并不总是像研究型政客(Forschungspolitiker)所喜欢的或者像他们喜欢愚弄纳税人去相信的那样直接。但即使一种设定了目标的科学承诺达不到其受到支持的目的,它有时候亦会促进在一些截然不同的领域上的进展。“二战”之后美国从事过的、投入了巨额资金而失败了的反重力研究就是这样的一个例子。这个项目本来是要找出消除引力的办法,其致命的效应已经残害了那么多的生命。虽然这个项目徒劳而废,但其所受到的支持仍然明显地促进了 20 世纪 50 年代的广义相对论研究。 30

进步和时代精神

物质文化决定科学发展的观念违反了科学和智力文化并肩发展的传统观念。根据这种观念,确实不能确定科学是由它的环境决定的这种严格的因果关系,而仅仅是多少是自行发展的科学与多少对其发展有利的外部条件之间的相互作用。

本质上这样一种方法是与关于智力和观念的传统历史一致的,亦常常是与其在科学的文化史内的一种现代结局相一致的。从这种研究观点来看,在一个可证实的意义上,科学的繁荣首先在希腊城邦的自由气氛和他们的谈话文化中实现,就变得很明显了。与此类似,由天主教会的教条统治的欧洲中世纪的智力世界,仍然尊奉着亚里士多德的哲学,这种情况直到文艺复兴和近代早期才结束,其时一些自由城市的资产阶级把欧洲文化开放到全世界去。这也显得很自然了。确实,看来十分可信的是,科学和时代精神能够联结得更加紧密。以伽利略、皮埃尔·伽桑狄(Pierre Gassendi)和牛顿为代表的,在近代早期占优势的原子论自然哲学,难道能够不同像托马斯·霍布斯(Thomas Hobbes)那样主张用单个人的特征来说明社会的、同样占优势的同时代社会哲学家相联系吗?把这一观念合理地延伸开去,我们甚至可以论证,原子的分裂与同时代在西格蒙德·弗洛伊德(Sigmund Freud)的心理分析中和在同时代艺术里表达的、关于自主个人的经典观念遇到的危机,在时间上绝不是一种偶然的巧合。

然而,常常难以在细节上证明这种联系。因为如果时代精神真的存在的话,那如何把它同圣灵区别开来呢?时代精神是必须通过接收和传递过程的转达来传播的。但希腊城邦的民主政治到底会如何具体鼓励古代的科学呢?并且,基督教的教条怎么能够在几个世纪之内成功地使得不仅哲学家们、而且未受教育的同时代人都确信亚里士多德的自然哲学是有道理的呢?还有,现今时代政治哲学里的利己主义如何能够对在自然学说里的原子论的接受产生影响呢?奥托·哈恩(Otto Hahn)热心地读过弗洛伊德的著作,并且因此启发了他分裂原子的想法,但在原则上仍然不可能把弗洛伊德的影响同哈恩本来会得到的不管什么样的灵感,例如使用一把胡桃夹子的想法区分开来。成功和想法通常有许多来源,并且想法的历史上有“影响”、“刺激”和“同化”等许多共同项,因此难以判明在科学想法的发源上或多或少巧合的边界条件和系统因子所起到的作用。但没有这样的一种分别,任何要把科学知识的发展解释做综合文化历史一部分的尝试,都必定会停留在“时代精神”本身那种含混的陈旧观念上。

知识的维度

32

因而科学的发展既不是完全自主的,也不是由与它相关的文化或者社会经济环境决定的;毋宁说它是同这一环境相互作用的。但它以什么样的历史上可理解的指标来展现它自己呢?这依赖于在这一相互作用中它在哪一个知识维度上起作用。一旦像在传统的科学史里那样,主要按照哲学观点进行下去,并且首先分析不同文本之间的参照关系,那就难以抓住这种物质文化,即是说,抓住技术发展对科学的“影响”。

在这里首要的问题不大可能是,是否一名科学家通过阅读一份特定的文本而取得新的想法。因而我们会假设文艺复兴的伟大的工程成就,是后来近代早期的科学发展的基础。伽利略自己在他关于力学的最后著作里指出过这种作用,这本书是以关于在威尼斯著名的兵工厂里的工匠和工程师的经验对话开始的。如果有人在读这些章节时不仅把它们当做文学创作或者对那时候的领先技术的致敬,那么他必定会问,这些创业者的经验知识是以什么样的形式进入到同时代的物理学的,特别是它以什么样的方式坚持古代的传统知识,以及它在古代力学到现代动力学的转变过程中起到什么样的作用。科学史的传统哲学手段不能够凭自身来回答这样的问题,特别是近代早期的实际知识很少写成文本,而是更多地像在莱奥纳尔多·达·芬奇(Leonardo da Vinci)的手稿里那样用绘画来表达。

到此为止,我们的讨论展开了知识的几个维度,那是我们要避免对科学史的片面理解而领会进步的可能性所必需的。这些维度中包含了科学的累积特性以及它对社会条件的依赖。这些条件会关系到知识的生产和传送的组织结构,但亦关系到表达知识的媒介,以及科学的技术环境和文化环境。33

科学发展的另一个特征是在根本上背离过去,亦即是出现科学革命。在这一背景之上,我们不能够简单地把科学知识的累积式增长,解释成理论结构一劳永逸地得到一种连续的进展。毋宁说,这种进展是与把知识建筑进行更新性的整理连在一起的。

至于这座科学知识的建筑,它明显具有一种复杂的结构。无论如何,它不仅仅由理论和实验数据组成。科学知识也很明显与其他领域的知识有关,而且不仅与储存在像哲学那样的其他方面的理论传统里的知识有关,而且也与工匠的实际知识以及我们为了对付世界的物质本性,每一个人的个人发展所必须获得的直觉知识有关。科学思想的某些方面似乎不受经验检验的束缚,至少在中等的历史跨度内是那样,这一事实不断引起有关知识的先验结构的猜测——即知识的结构具有先于一切经验的地位。我们亦建立了关于科学的发展具有以某种方式与社会的长期发展,尤其与技术方面的发展相关的大尺度结构。这种大尺度结构的存在表明科学知识必定有一个社会维度,并且只能够被理解为共享的知识。在技术和科学两方面都屡见不鲜的,大约是同时做出而彼此基本上是独立的一些发现的现象,很难看做是巧合;毋宁说,这种现象只能够看做是在这个社会维度上出现的效应。

是否有一种观察角度,从它看科学进步的特性能够无矛盾地同由历史的边界条件形成的偶然发展相调和,这亦只有考虑所有这些维度后才能回答。

进步和发展

34 关键问题在于澄清“发展”指的是什么。我们需要一个发展的概念,它能够一方面兼容在知识的出现上的机遇和任意性的作用,另一方面容纳累积知识的增长能力的概念。在科学史上关于发展的一般概念往往在着重一方面的同时轻视另一方面。当自然科学家们研究他们领域的历史时,他们倾向于从成果来构筑历史,好像是最后完美的成品一直是科学发展的目标一样。于是,他们或明或暗地把一种必不可少的、至多会受到加速或者延缓的影响的特征归于科学的发展。

另一方面,当历史学家们把科学史划分到不同的文化和社会语境时,他们同时断言——或多或少明确地——科学本质上对许多因素的依赖,这些因素对科学本身的发展可能只是偶然的。当把这一观点推进到了极端,就会断言科学的发展乃是它的“生态学”边界条件的结果。根据后面这一种解释,正

是文化推动着这种历史,虽然是以一种无目的方式来推动,最终使科学革新成为仅仅是它的时代潮流的一种副产品。

关于发展的这两种观念,即认为进步是由其目的决定的“目的论”观念,以及认为革新是由机遇支配的“偶然论”观念,在所有其他领域的历史发展中亦早已众所周知。此外,在科学语境和非科学语境这两方面,当然也提出了一些关于发展的进一步观念来进行试验和检验。例如发展一劳永逸地被其初始条件决定的观念,或者发展最终由一种更高级的能力决定的观念,这一观念亦见于关于拯救的宗教历史,以及关于教育的传统观点。还有试图根据这样一些关于发展的观念,反复地尝试去解释哲学的、心理学的、社会的和经济的发展,生物学的进化,甚至我们的太阳系或者整个宇宙的历史,并且都得到不同程度的成功。黑格尔、马克思、拉马克、达尔文、康德、拉普拉斯和皮亚杰等人做过这种尝试。

根据以上的讨论,科学进步的一种令人满意的理解一开始就排除了一些关于发展的比较简单的观念。其中有发展决定于其初始条件的观念,或者仅仅由其目的来决定的观念。因为很明显,那些因素起到的作用多少是偶然的,但无论如何,对科学发展的过程来说,外部的边界条件并不只限于遏制或者加速其进展。科学史本质上是由外部因素形成的解释,亦同样没有什么意义。虽然科学发展和文化发展在局部上是齐头并进的这样一种解释模式看来似乎是合理的,亦很难说明科学成就的经久不衰的特性,那是与它们的起源通常是特有的条件延绵不绝的效应无关的。例如,在科学的论证上会有一些争议的模式,它们起源于希腊城邦的特殊条件,而直到今天依然是有效的。但事实上今天它们看来依然有效的这一点,很难用今天的社会条件仍然保留着自古以来的那个样子来说明。

比较关于发展的不同观念以及在不同领域上的解释力,产生了几个关于科学史发展的概念必须满足的最低要求,以避免上面所描述的进步概念的不足和矛盾。首先,发展的主题应当不能还原为它的发展的外部条件,亦不能假设存在着完全的自主性;其次,与科学相容的发展概念必须使得知识增长的长期性和累积性得到说明;第三,为了公平对待会发生不可预见的科学革新的事实,必须承认一种含有偶然性要素的发展的适当概念。只有以这样的

方式才能够完全相信真正的革新,而不必还原到在其出发点给定的仅仅是一些可能性的展开。

36 因此,关于发展的一种充实的概念,应当在原则上允许有各种不同的发展路径,即使在科学的实际历史上,在比较短的历史跨度里有些路径偏离了发展的主流。如西方科学的全球化所表示的那样,发展的一个主流支配着科学下一步发展的特性,那是历史发展过程的一个普遍的特征。这一特征存在于从偶然的边界条件到对进一步发展所必不可少的先决条件的转换之中。例如,在6500万年前落到墨西哥尤卡坦的巨大陨星的冲击,开始的时候就只是一个意外的事件以及地球上生命发展的一场大灾难;但由于这场灾难引起的后果,特别是恐龙的灭绝,陨星的冲击变成所有后来的生命发展的一种逃不掉的先决条件,它就这样确定地排除了地球生命的其他发展路径。像在生物进化里一样,难以想象科学的发展会从几千年前它被打断的那一天起重新开始走另外一条路,就像中国的科学在纪元前3世纪秦始皇焚书坑儒之后的情况那样。今天,如果要问没有这次中断的话中国的科学会变成什么样子,就像问恐龙的子孙们学会了用刀叉还是用筷子进食一样无聊。

像对科学发展和生物学发展的比较富于成效那样,很容易证明这种比较也会是一种误导。从表面上类似的事情推断其中的因果关系,确实是一种太大的诱惑。从生物学基础出发的任何人,如果没有意识到应考虑人类思想里的许多中间阶段的话,就会落入跳到冒险的结论的危险,而这些中间阶段是由科学之外和科学之内的多少万年的文化史所刻画的。从这一见解看来,可以尝试假设这种思想的基本结构能够直觉地从生物的进化推演出来。这样一种进化的认知理论通常不顾这样的事实:例如空间的取向或者解决实际问题的启发性策略那样的表面上看来是直觉的认知行为,原来是在像语言或者环境那样的不同条件下以不同的方式发展起来的。无论如何,没有对文化和历史的比较研究,从今天观察到的它们的生物学根基就得出智力成就的直接推论,很难让人信服。

显然,生物学不能够提供如何把科学史看成是进步的历史这个问题的答案。这并不意味着对进化的生物学历史瞥上那么一两眼就一定没有用。更准确地说,一种有理论基础的知识史能够从进化的生物理论认识到关于对发

展的一个适当的概念的估价和标准的某些东西；因为一种知识的进化理论，如果能够彻底形成的话，很难会比达尔文的观念大厦的内涵复杂多少。但这样 37 一种历史理论的对象，只能够理解成作为整体的人类历史发展中的一种不可约简的要素的人类知识本身。从人类历史开始之时起，这种知识就在一种既有分岔又牵连在一起的过程中发展，就像地球上的生命那样，根据进化论，它的发展尽管有千变万化的多样性，仍然是一种有内聚性的地球上的过程。从这种见解看来，科学乃是人类共享知识的一部分，正像我们所属的灵长类里的那个目，是地球上的生命的一种划定了界限的，历史上的一个特别部分一样。

物质手段

知识发展的一个部分——一个关键的部分——是关于工具和其他物质手段生产的技能的传送。这种技能只能够作为共享的知识传下去。尽管在今天看来单个史前斧(Faustkeile)之间仍具有明显差别，但它们在历史上的作用不是用来回答关于伟大工匠历史作用的问题。知识的长期历史实际上是关于知识系统的历史，这部历史尽管有不大的波折，还是具有本质上是长期的稳定性和深刻的转变这两方面的特征，那是可以从流传下来的知识的物质表现和从石器到青铜工具的过渡过程中看出来的。

但工具不仅仅是一种在历史进程中各个不同时代的延续和分界的指标。重新回到人类文化的发展和生命发展的类比，我们看到物质文化的传送对应着遗传过程，没有这样的过程延续将是不可想象的。每一世代不必从头建立一种社会和文化，这主要是因为存在物质文化和如何使用它的知识的传承。当然，这种传承包括了挑出要把什么东西传下来的努力，并且这里面包含了一大串社会活动——从选择儿童送入学校直到接受高等教育那样的一整套工作过程。这种挑选过程本身就能促进创新——这种创新的潜力已经具体化在一代又一代传下来的工具库存的物质特性里了。

一种工具的可能应用的局限，总是超出了原来发明它的专门目的。于 38

是,探索这种局限就可以引导出一种工具的一些意想不到的新的潜在应用,这是原来发明人的脑海里从来没有想到过的。例如,托马斯·阿尔瓦·爱迪生(Thomas Alva Edison)原来发明他的留声机是为了记录短暂的对话,减少打电话比用信件通讯所多花的费用;只是在后来,用他的机器来录制音乐才成为它的一种突出的应用。

工具的这种比原先设计的用途更广泛的性质,被黑格尔称为“理性的狡黠”(List der Vernunft);他断言它是人类发展的一种中心机制。这种狡诈的其他方面当然对文明进步的可能性是同等重要的。这包括了发明一种工具所必需的知识与生产它所需要的知识之间的差别,甚至于与使用它所必须运用的知识之间的差别。假若没有这种差别,每一个电视观众都被要求懂得半导体技术,每一个想要更换电视机的电子部件的技工都被要求懂得量子理论了。使得进步有可能的事情之一是工具体现了知识,这些知识不需要在每一次使用工具的时候重新明显地表达出来,但这些知识却随着工具的使用而暗中起作用了。

当工具和社会物质文明的其他表现传承下来的时候,作为长期进步的两个基本要素的传统和创新是彼此紧密地联系在一起的;从而原则上进步都伴随着每一种人类文化的发展。然而,这种可能性实现的程度则取决于外部条件,它们不可能仅仅鼓励对工具的创新潜力蛰伏的探索,而且亦会延缓这种探索或者中断传统,因而使得即使是已经获得的知识也不可能传给后代了。从罗马帝国的衰亡到纳粹对犹太人的大屠杀(Holocaust),历史提供了无数这种中断的例子。

39 科学的历史性定义

在各种不同的文化和历史的语境中,科学采取了一些完全不同的形式;但所有这些人类用来获取知识的形式都共享着一个基本的特点,它体现在每一种物质文化中的创新潜力的探索里。因此,人们可以把科学精确地定义为这种探索。这乃是关于科学的一个真正的历史性定义,并且在这一基础上我

们可以更好地理解它的显著的双重性,这种双重性引起了上面讨论过的对立的两种解释:一方面科学是一种长期投资的事业,另一方面,同样明显的是,科学是永远变化无常的时代精神(*Zeitgeist*)影响之下的附属物。

科学的保留能力及其相对稳定性是以它在技术上的根底为基础的,具有这种基础就使得人类在竞争中越来越强地胜过他的环境。相反的,科学的缺乏持久性和相对脆弱,在于它对在任意给定社会里流行的推动力的依赖。在最近的几个世纪里,由于科学已经从一种精英小团体的业余爱好变成在社会再生产中的一个决定性要素,这种脆弱性日渐减轻了。然而,正是因为人类的生存本身越来越由科学的祸福所决定,这也就使得作为社会事业的科学的那些继续存在的脆弱性变得特别不确定。

也许看来会令人感到奇怪的是,我们在对科学的定义里把工具归于这样一个中心的角色,而表面上看来它只是一种受到鄙视的达到目的的手段。但当我们考虑知识的长期发展时我们离不开工具:只要想一想在欧几里得几何学里直尺和圆规等器具的重要性;想一想在古代和中世纪力学里天平的中心位置;或者想一想后来以火炮为代表对有关运动的近代科学所提出的挑战。在每一种情况下,科学思想的可能性都得益于在一个给定的时期里运用可以用得到的技术所得到的经验。显然,像直尺和时钟那样古老的器具在相对论的创立中依然起到关键的作用,我们在下文里将会详细说明这一点。爱因斯坦对关于直尺和时钟的行为在一个运动实验室和一个静止实验室里有什么差别这个问题的钻研,初看起来似乎是偏好于一种奇怪的思想实验的结果。然而,假如没有钻研到人类知识历史的深层基础,这种研究也难得会揭示我们关于空间和时间的理解的这样深刻的效应;在这种情况下,物质的框架支撑着我们关于空间和时间的概念。事实上,在直尺和时钟的基础上构造出来的欧几里得几何学,两千多年来决定了我们对关于空间关系的理论理解到这样的程度,使得哲学家们都误以为那就是形成人类思想构造的概念了。

作为冰山之巅的科学

在一个长期的时间跨度里,科学的物质文化提供了一种经验基础,而在科学史里通常不考虑这一点。传统的科学史只聚焦于理论成就,但理论知识仅仅是一个巨大冰山的顶尖部分,它的实体包括了很少能够在理论大厦里表达的各种形式的知识。与理论相反,特定的实际知识主要由参与到工作过程中、由口授来传达,并不需要用书写的形式固定下来。实用知识还包含了直觉的知识,那是我们用来在日常生活中确定方向的,并且还告诉我们,例如,无论在什么情况下,我们看到了运动就必定有其原因。不需要广泛的社会过程的传送,所有人都会在孩提成长时,在大致差不多的自然环境中获得这些知识。

41

从社会历史的角度来看科学的发展,实用知识看来是创造的完全必要的先决条件,但从科学本身的观点来看,它肯定包括了一种机遇的因素。因此,近代早期从火炮到造船业的机械技术,就成为了同时代科学的“挑战对象”的武库。这些研究所用到的概念,大多数取自古代,获得或大或小的成功,直到由那些概念固定了的视野最终被超越了为止。没有深入研究从例如炮弹的运动那样的实践提出来的特别实际的问题,像惯性定律那样的理论原理很难在物理学的发展中起到这样的中心作用。根据惯性定律,只要没有外力施加在一个物体之上,它便一直沿一条直线作匀速运动;这完全与我们的直觉物理知识相矛盾,根据那种直觉知识,物体停止在它自己的位置上,除非有连续的作用力使它们保持运动。惯性定律看起来也与对天体的观察相矛盾,因为它们没有受到任何看得见的外力的影响,而非匀速地在绝不是直线的轨道上运动。另一方面,如果动力学的科学作为描述地面上物体的理想运动——如一个炮弹沿一条抛物线的运动,或者一个台球在被另一个台球撞击之后的运动——而发展的话,惯性定律将特别适于作为一个公理式的出发点。因此,即使是像空间和时间概念那样的主要的科学解释方案,亦归因于特定的历史发展。

如果我们把科学当做社会的一个子系统来考查,这样的一些发展亦有一定的必然性。我们能够用从这种具有长期有效性的发展中形成的科学概念来掌握不可胜数的问题。从科学的观点看,在一个给定的历史时代对成为挑战对象的对象选择,仍然具有一种随机的特征;但恰恰是这一点使得有可能在原则上从根本上改变借以做出解释的方案。在惯性定律的情况下,这种根本改变的可能性终于在爱因斯坦的相对论里找到并实现了;但在知识的单个发展的情况下,我们怎样理解这种改变的动力学呢?

现实主义原理

选择这个问题时,重要的是先要看看对其他领域开展过的研究。毕竟,即使是查尔斯·达尔文对生命进化的理解也得益于这种比较。对现实主义的启发式原理(heuristische Prinzip)说来,这也是对的,根据这一原理,只有那些现在依然能观察到的过程才可以运用于历史变化的解释。这一由查尔斯·赖尔(Charles Lyell)引进的原理对达尔文有重要的意义。在说明各种生命形式的历史性变化时,这一原理意味着他可以仅仅利用那些依然在今天生命形式的变化中起作用的机制的好处。达尔文在同时代的育种实践中发现了这种机制。尽管在从人类做过的选择性育种的模型到自然界的选择性育种的转换中存在着许多困难,遇到过许多障碍,生物学的历史性的和系统性的知识同育种家关于生命形式实际变化过程的实践知识这两方面的融合,乃是达尔文进化论的起源中的关键性的一步。 42

对于人类知识的发展史,这种综合在原则上也是可信的,虽然迄今还很少得到细节上的论证。这里还有某些像化石那样被当做历史文件的东西,以及像骨骼和贝壳那样的已灭绝生命的遗骸,见证着知识的过去形式。而且,正如今天能够观察到的那样,大多数求知过程中的知识转换已被人知:从我们社会的日常教育过程,到从教育研究、学习心理学和认知科学中我们了解许多东西。这些学说对每一种理解人类知识的历史发展的努力,都提供了一种理论上的和方法论上的框架,可以在其中比通常的观念历史更精确地描述

知识转换的结构和过程。

思维模型

43

正是认知科学,给知识的历史提供了一些像“思维模型”概念那样的不常使用的工具,虽然它本身通常并不涉及集体知识大厦的起源、传送和转换。在这个领域内的研究者们主要感兴趣于个人的认知活动,以及某种认知结构如何从对这些活动当时的记忆中识别和找寻出来。但对科学发展的历史理论来说,这样的一些结构乃是一种被传送的知识的宏观结构的一部分,仅当它们属于一个社会的、即是共享的知识库时才是有意义的。

思维模型是知识表达的一种形式,它们特别适用于集合那些以不完全信息为基础的结论及其变动,因而它们有助于用关于知识的转换和发展的一种更适当的图画,去代替关于知识是对还是错的与时代不合的公共评价,包括它们所绘制的一幅知识直线式和累积式发展的图画;思维模型注重的是特殊性,并且没有普遍适用的有效性,因此它们能够说明那些确定的对象和在一定的语境中预料的结果;思维模型能够适应于新的经验,因此,我们借助于它们就能够理解由于实验语境发生了改变而产生的结论变化;思维模型由于把新的经验收入由过去的经验形成的一个认知网络里,就把现在的和过去的经验联系起来了;最后,思维模型形成了一种在知识的不同形式之间的联结,这些形式包括了从实际行动的知识到理论知识,因为它们亦可以探讨一些暗含的推论,那是具体体现在实际程序的逻辑里而没有明白地通过口头或文字的形式表达出来的。

考虑到由认知心理学所设想的直觉知识这一背景,我们就弄清楚了,为什么亚里士多德的自然哲学得以流传两千年之久,以至于今天学习经典物理学的学生们在回答关于运动的原因或者进程的问题时,他们给出的答案更接近于亚里士多德的理解而不是牛顿的物理学。事实上,亚里士多德关于任何“强迫”运动需要一个外部原因的原理,比牛顿关于物体继续沿着一条直线做匀速运动,除非它受到外力作用的惯性原理似乎更加有道理。这种从普通日

常经验的直觉眼光看来似乎有道理的解释模式,是上面所说的思维模型的一个例子;它被称为“运动意味着力的模型”。 44

这一模型假设只要有运动,就必定亦有引起此运动的力,即使这种力不能够直接观察到。对于天体的物理学,亚里士多德关于各个行星不受外部强迫而运动的主张,亦比牛顿关于行星由于受到了来自太阳的一种神秘的吸引力——万有引力——而偏离了其固有的匀速直线运动的观点更加合理。最后,亚里士多德关于空间有(例如上和下等)几个不同性质的方向,以及有(例如地球和地球的运动等)几个不同性质的区域的观念,比牛顿的那种在欧几里得几何学的空间观念基础上形成的一种无限延展、各向同性和均匀一致的空间的观念,凭直觉亦容易接受得多。

非单调逻辑

这样一些解释方案的长期有效性,显然使得科学知识的建筑包含着不只是一个理论维度,而且还有直觉和实际知识——那是可以使用从认知科学得来的概念描述的,就像使用思维模型的概念一样。此外,这个概念亦适合于用来解释科学推理的可改正性及其对经验的依赖性。思维模型表述了所谓非单调逻辑(*nichtmonotone Logik*)的一种应用。非单调逻辑允许推论得到修改而既不改变初始的假定,亦不改变推理的规则;因为在非单调逻辑的修改过程里,一种推理的前提并没有被否定而只是被补充了。这正是它与经典逻辑相区别之处:在经典逻辑里,从一组前提能够推出的一个确定词句,不会在增加了一些前提之后丧失其有效性,这就叫做经典逻辑的“单调性”(Monotonie),因为额外增加的前提会扩大而不是缩小推论分布的范围(Spektrum)。然而,人类的推理常常是非单调的:我们常常得出一些结论,随后根据额外的信息将之放弃。

在认知研究里喜欢用这样的例子来说明非单调的推理,那是一种名为“啾啾”(Tweety)的鸟。从资料上了解到啾啾是一种鸟,我们就推理说啾啾能飞,虽然资料上没有说明这种鸟的任何特点;但如果我们又被告知说啾啾 45

是一只企鹅,我们就会立刻准备撤销先前的推论,而不放弃我们先前使用的任何前提。我们依然相信啾啾是一种鸟,而典型的鸟类都是能飞的。

啾啾这个例子说明了,不仅人类的推理可以被修正,而且这种推理亦依赖于先前的经验。在这个例子里,没有明白地给出鸟能飞这一陈述,而是从我们的经验补充进去的。它代表了一种关于鸟类的标准假定,凭着这条假定就允许超出实际上可以利用的不完全信息而做出推理。在非单调逻辑里,这一类标准假定就称为“默认假定”。这些假定填补了模型中的某些缺口,它们可能发源于早期的经验,或者可以由高阶的思维模型“继承”过来。关于一只鸟的思维模型就这样从关于一种生物的高阶模型里继承了某些默认假定;例如,鸟需要食物也是这样的一条默认假定。

要弄明白认知的进程,我们常常需要运用的是非单调逻辑而不是经典逻辑。当一种推断的结果没有发生的时候,当一种理论预言的效应没有在一个实验里出现的时候,一名科学家会做出什么样的反应呢?按照经典逻辑,只要得出理论的诸前提当中有一个出错了的结论,因此科学家就要放弃那一理论。但通常他决不会那样做,并且在那些情况下,正是非单调逻辑描述了真正发生了什么事,即是说以一种更明确的信息代替了以前那种较一般化的信息。理论并没有放弃,而是根据意料之外的观察而做出改变。特别是,在科学思想里这种异常的情况总是居于一般规则之上,例如,关于在19世纪作为光学和电磁学基础的以太学说。假如我们假设,如同空气是声波的媒介一样,一种静止的以太是电磁波的载体,那么就应该在实验中有可能检测到地球相对于这种以太的运动。检测这种以太风的徒劳努力,决不会使得以太说就此销声匿迹了,人们完全可以引入一些关于物体在以太中的行为的假设来挽救以太说。

同样重要的是,非单调逻辑使得科学思想里的隐含知识变得易于理解。根据经典逻辑,只有看起来明显可以当做前提的那些假设,才可以进入到科学理论里去。非单调逻辑使我们得以理解,科学知识是怎样与世界上的其他知识相关的,即是说由一些默认的假定补充了对一种科学研究对象总是不完全的规定。

没有这样一种默认的假定,科学的交流就是不可想象的,正如人类交流

在其他领域内是由像语言或文字那样的外部手段来传送一样。譬如说,我们要查明是不是在上午 10 时有一列火车从慕尼黑驶向柏林,我们在慕尼黑火车站看到了一张时刻表,上面没有列出这样一趟列车,我们就下结论说,在那个时刻没有火车从慕尼黑出发去柏林,虽然在时刻表上并未明确说没有,在时刻表上甚至没有向我们提到,时间表上没有列出的车次是不会运行的;在这里简单地假定了,火车时刻表的读者已经掌握了时刻表里的数据之外的一条默认的假定,根据这一默认假定,没有列出来的车次是不存在的。

关于我们生活在其中的世界的知识,是理解科学理论的一个先决条件,它当然不局限于这样简单的一些默认假定,却表示着知识的一种巨大的和历史性生长的基础,不过通常被科学史研究者所忽略了,他们甚至不屑于分析其中的结构。这些结构特别表示着包括思维模型在内的科学知识的特征,在这里它们指的是一种特别有代表性的知识结构,通过这种结构人们得以凭借先前的经验对复杂的对象和过程做出推论,即使关于这些对象和过程的可资利用的信息仍然是不完备的。思维模型可以是对一种科学理论理解的未经证实的、隐含的先决条件,而且它们亦可以被同一种科学理论所形成和改变。 47

现实模型

思维模型可以是一般的共同知识的一部分,或者属于某些团体的共同知识。在物理学领域里,首先有由所有人在他们基于环境条件上的个人发展而构造出来的一组标准模型,它们分处不同的文化而彼此相像,并且在长时间里保持稳定。在这些标准模型里,包括了表征着对力、阻抗、固体、空间和时间的直觉理解的模型。上文已经提到过的“运动意味着力的模型”亦是这样的例子;另外一组思维模型决定了,对于力学过程和相互作用的理解,乃是或多或少专门的参与者的专业知识的一部分。这些由语境规定的模型是联系着工具的使用而建立起来的,它们既是实际经验的结果,亦是专业教育的结果;最后,还有一些思维模型是科学知识的一个部分,并且是通过对它们结构的明晰描述和它们应用的条件来传达的。在这些情况下,诸如手稿、专

利描述、样品收集或仪器等对象,形成了科学知识的历史性传送的基础,并且因此亦形成了相应的思维模型传送的先决条件。

48 这些所谓的“外在表象”保证了发展过程的连续性,并且因而在知识的历史性理论中起到了像生物学里的遗传机制那样的作用。与此同时,知识创新只可能在由外部表象传送进来的、知识建筑里出现的个别偏差的基础上发生。外部表象的中心作用也是为什么我们在认知科学的所有概念中唯独注意思维模型的理由。因此,我们可以把思维模型同一种作为知识相应表象的现实模型摆在一起:一种现实模型犹如一根杠杆支持相应的思维模型的运用,但不能够代替它;毕竟,不像思维模型一样,我们不可以把一种现实模型应用于思考一种对象或者一种过程,然后像应用力学里的杠杆定律时那样对它进行估算。而且一般而言,一种现实模型并不反映结构的稳定元素同那些在认知过程中应用这种模型的进程中不断变化的元素之间的差别。另一方面,现实模型在传送由思维模型构造的知识的过程中起着一种决定性的作用,在许多情况下,没有它们知识就不能够被学习、应用和传送。

科学革命的动力学

总而言之,知识的连续性可以在本质上解释为我们所属社会的物质文化的连续性和传送,以及我们处在其中的环境的本性。为了认识这样的连续性并不会无限制地重复,所需要的不仅仅是对知识建筑的更精确的分析,而且是明白它的发展的动力学。正像我们已经看到的那样,在这里起着关键作用的是“理性的狡黠”,正是它开发了在物质文化中固有的创新潜力。原则上,各种手段可以比发明它们的目的更普遍地应用的观念,可以说明科学中新事物的出现。然而,这种理性的狡黠不能直接说明新事物的本性是怎么样的和为什么是那样的,因为在漫长的历史进程中连续进行的科学发展,也不时包含了偶然的跳跃。

基于以上的讨论,我们可以理解科学革命乃是知识系统的一种重构,与发育生物学相类似,这样的一种重构相应于新物种的出现。像生物的进化一

样,一种知识新结构的出现取决于系统内部的可变性。在生物学里,这种可变性是由遗传变异的发生来保证的,在这种变异中个体产生了新的特征。这样一种自我探究使知识系统产生了一种经常性的内部分化,增长了内部复杂性又在知识系统内增加了产生结果(包括实验结果和理论结论)的可能性,并且因此经常地扩大了知识系统应用的领域。但正如一个新的物种要等到新物种对旧物种的条件的差异(常常是由于种群在地理上的分隔)成熟之时才会产生一样,在能够产生新的知识系统之前亦要求出现这样一种差异。 49

在生物学里这种事件常常是由于强加在分离的种群上的外部条件所造成的,像当水平面下降时导致一个湖泊被分隔成几个较小的湖泊,因而阻止了把原来的一种鱼类分开的几部分物种之间的基因交流一样。在知识发展的动力学里,差异的决定性冲击来自内部。即是说,首先从现存知识系统的内部矛盾开始——它也是对一种知识系统的内部网络不断考察的典型结果——最终迫使做出关于提出选择的决定。

其次,差异必须形成一个新的知识系统,它是一种依靠反思性思维,即对思维的思维产生的。这样一种重组把现存系统的某些(通常是有疑问的或者处于边缘的)结果当做一个新系统的出发点,由此产生的结构在很大程度上是新的,但亦由已经在手头的大部分建筑素材组成。

导致这样一种重构的反思过程可以叫做“把事情颠倒过来”,或者简单地说是一种“哥白尼过程”,它也许是在科学史中关于这种把一个现存的知识系统加以重构的最著名的例子。那些我们在这里用科学革命来加以表示的对知识系统的反思性断裂,的确是可以与哥白尼的天文学革命相比较的。他通过把先前的边缘天体——太阳移动到中心而创立了一个新的世界体系。他在这样做的时候实质上不是沿用先前建立的行星天文学的复杂机制,而是从一张白板(*tabula rasa*)开始。

从亚里士多德的物理学、伽利略和他的同时代人的前经典力学,到牛顿时代的经典力学的转换,是以一种十分相似的方式发生的,我们将会在下文里反复地回到这个例子上来。例如,不受任何力的物体沿一条直线作匀速运动的假设,是一个处在前经典力学边缘上的,可能想得到但高度可疑的陈述。 50

它确实是看来有道理的,因为正如伽利略正确地认识到的那样,那是能够推导出抛射体的运动轨道的形状为抛物线的最简单的假设;然而,它同时也是有问题的,因为它与亚里士多德关于每一种“强迫”运动都可以追寻出一种直接原因的假设严重抵触。伽利略的弟子们最早在对伽利略的结果进行反思的过程中,把惯性原理这一假设作为不再能够与亚里士多德学说相调和的经典力学的出发点。

以下各章将表明,类似于伽利略的弟子,爱因斯坦亦把他的先辈们的理论中的有问题的结果作为一个新的知识系统的出发点,这个新系统一方面保存了他们的遗产,另一方面通过引进关于空间、时间、引力、物质和辐射的新概念而不再能够与他们的概念调和。通过由爱因斯坦发动的这场革命的例子,我们将阐明在这一章里概述的知识发展的理论。我们将表明,在这种语境中的进步不仅洗净了它的悖论特性,而且由于同样的理由回归到人类创造力的领域里来了。在反思的基础上,科学创新的源泉以及认真地处理科学的各种可能性的条件,最终亦证明具有相同的本性。

本章以在马克斯·普朗克科学史研究所进行的研究结果为基础,并且得益于戴培德和沃尔夫冈·勒菲弗(Wolfgang Lefèvre)关于在科学发展的智力成就中物质手段所起作用的关键性见解。

推 荐 读 物

本章特别根据:

Damerow, Peter and Wolfgang Lefèvre (eds.). 1981. *Rechenstein, Experiment, Sprache; Historische Fallstudien zur Entstehung der exakten Wissenschaften*. Stuttgart: Klett-Cotta.

——. 1998. “Wissenssysteme im geschichtlichen Wandel.” In *Enzyklopädie der Psychologie Abt. C2: Themenbereich C: Theorie und Forschung*. Series II: Kognition Vol. 6: Wissen. Göttingen: Hogrefe, pp. 77—113.

Renn, Jürgen. 1995. “Historical Epistemology and Interdisciplinarity.” In K. Gavroglu, J. Stachel and M. W. Wartofsky (eds.) *Physics, Philosophy and the Sci-*

entific Community: Essays in the Philosophy and History of the Natural Sciences and Mathematics in Honor of Robert S. Cohen. Dordrecht: Kluwer, pp. 241—251.

——. 2000. “Mentale Modelle in der Geschichte des Wissens: Auf dem Wege zu einer Paläontologie des mechanischen Denkens.” In E. Henning (ed.) *Dahlemer Archivgespräche* Vol. 6. Berlin: Archiv zur Geschichte der MaxPlanckGesellschaft, pp. 83—100.

——. 2003. “The Paradox of Scientific Progress: Notes on the Foundation of a Historical Theory of Knowledge.” In *Research Report 2002—2003*. Berlin: Max Planck Institute for the History of Science, pp. 21—49.

这一章中用到的其他文献:

Feyerabend, Paul K. 1993. *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (3rd ed.). London: Verson.

Freudenthal, Gideon. 1986. *Atom and Individual in the Age of Newton: On the Genesis of the Mechanistic World View*. Translated by P. McLaughlin. (*Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 88.) Dordrecht: Reidel.

Forman, Paul. 1974. “The Environment and Practice of Atomic Physics in Weimar Germany.” *Minerva* 12 (1): 39—66.

Galison, Peter. 2003. *Einstein's Clocks, Poincare's Maps: Empires of Time*. Scranton, PA: Norton.

Ginsberg, Matthew L. 1987. *Readings in Nonmonotonic Reasoning*. Los Altos, CA: Kaufmann.

Pickering, Andrew. 1984. *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Edinburgh: University Press.

Popper, Karl R. *The Logic of Scientific Discovery*. London: Taylor & Francis.

Renn, Jürgen and Matteo Valleriani. 2001. “Galileo and the Challenge of the Arsenal.” *Nuncius* 2: 481—503.

Sagan, Karl. 1986. *Contact*. Munich: Droemer Knauer.

关于思维模型和认知科学:

Davis, Robert B. 1989. *Learning Mathematics: The Cognitive Approach to Mathematics Education*. London: Routledge.

Gentner, Dedre, Albert L. Stevens. 1983. *Mental Models*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Gruber, Howard E. and Katja Bödeker (eds.). 2005. *Creativity, Psychology and the History of Science*. (*Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 245) Dordrecht: Springer.

JohnsonLaird, Philip Nicholas. 1983. *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.

Mental Models Website:

<http://www.tcd.ie/Psychology/Ruth_Byrne/mental_models>

Minsky, Marvin. 1990. *Mentopolis*. Stuttgart: KlettCotta.

Piaget, Jean. 1980. *Die Entwicklung des Erkennens*. 3 Vols. Stuttgart: KlettCotta.

一般科学史:

Bernal, John D. 1969. *Science in History*. Harmondsworth: Penguin Books

D'Abro, A. 1952. *The Rise of the New Physics: Its Mathematical and Physical Theories*. 2 Vols. New York: Dover.

Dijksterhuis, E. J. 1969. *The Mechanization of the World Picture*. Translated by C. Dikshoorn. London: Oxford University Press.

Kragh, Helge. 1987. *An Introduction to the Historiography of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Renn, Jürgen (ed.). 2005. *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe. Einstein's Life and Work in Context*. Berlin: Wiley-VCH.

Rosenberger, Ferdinand. 1965. *Die Geschichte der Physik*. 3 Vols. Hildesheim: Georg Olms Verlagsbuchhandlung.

Simonyi, Károly. 1995. *Kulturgeschichte der Physik: Von den Anfängen bis 1990*. Frankfurt am Main: H. Deutsch.

Toulmin, Stephen Edelston and June Goodfield. 1965. *The Discovery of Time*. London: Hutchinson.

有关马克斯·普朗克科学史研究所的系列论文预印本, 参见 <http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/forschung/preprints.html>

53

近代早期的科学史:

Biagioli, Mario. 1994. *Galileo, Courtier: The Practice of Science in the Culture of Absolutism. Science and Its Conceptual Foundations*. Chicago, Ill.: The University of Chicago Press.

Damerow, Peter et al. 2004. *Exploring the Limits of Preclassical Mechanics*. New York: Springer.

Kuhn, Thomas S. 1957. *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Heilbron, John L. 1982. *Elements of Early Modern Physics*. Berkeley: Univer-

sity of California Press.

Lefèvre, Wolfgang. 1978. *Naturtheorie und Produktionsweise. Probleme einer materialistischen Wissenschaftsgeschichtsschreibung: Eine Studie zur Genese der neuzeitlichen Naturwissenschaft*. Darmstadt, Neuwied: Luchterhand.

Redondi, Pietro. 1987. *Galileo: Heretic*. Translated by R. Rosenthal. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Shapin, Steven. 1996. *The Scientific Revolution*. Chicago, Ill.: The University of Chicago Press.

进化论的提出:

Gruber, Howard E. 1981. *Darwin on Man. A Psychological Study of Scientific Creativity*. Chicago, Ill.: University of Chicago Press.

Lefèvre, Wolfgang. 1984. *Die Entstehung der biologischen Evolutionstheorie*. Frankfurt am Main: Ullstein.

Michael Ruse. 1999. *The Darwinian Revolution: Science Red in Tooth and Claw*. 2nd. ed. Chicago: University of Chicago Press.

知识的历史性理论和在历史和科学史中的长期发展:

Damerow, Peter. 1996. *Abstraction and Representation. Essays on the Cultural Revolution of Thinking*. (Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 175.) Dordrecht: Kluwer.

Daston, Lorraine. 2001. *Wunder, Beweise und Tatsachen: Zur Geschichte der Rationalität*. Frankfurt am Main: Fischer.

Diamond, Jared M. 2005. *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*. New York: Norton.

Dux, G. and U. Wenzel. 1994. *Der Prozeß der Geistesgeschichte: Studien zur ontogenetischen und historischen Entwicklung des Geistes*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Elkana, Yehuda. 1986. *Anthropologie der Erkenntnis: Die Entwicklung des Wissens als episches Theater einer listigen Vernunft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Hacking, Ian. 1983. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press. 54

Heinrich, Klaus. 1986—2000. *Dahlemer Vorlesungen*. Basel: Stroemfeld/Roter Stern.

Kuhn, Thomas S. 1970. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, Ill.: The University of Chicago Press. (Second revised edition.)

Mach, Ernst. 1960. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Ac-*

count of its Development. Translated by T. J. McCormack. LaSalle, Ill: Open Court.

哲学和认识论的观念的历史:

Cassirer, Ernst. 1950. *Problem of Knowledge: Philosophy, Science and History Since Hegel*; with a preface by Charles W. Hendel. Translated by C. W. Hendel. New Haven: Yale University Press.

Fraassen van, Bas C. 1980. *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.

Köhnke, Klaus Christian. 1991. *The Rise of NeoKantianism: German Academic Philosophy Between Idealism and Positivism*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Lange, Friedrich Albert. 1974. *The History of Materialism and Criticism of its Present Importance*. Translated by E. C. Thomas, reprint of the 1879—1881 ed. New York: Arno.

Nagel, Ernest. 1961. *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*. London: Routledge.

Popper, Karl R. 2004. *The Logic of Scientific Discovery*. London: Taylor & Francis.

Salmon, Merrilee H. et al. 1992. *Introduction to the Philosophy of Science*. Indianapolis: Hackett Publishing Co.

Toulmin, Stephen E. 1981. *Foresight and Understanding: An Enquiry into the Aims of Science*. Westport, Conn.: Greenwood Press.

第二章 | 介于传奇与挑战之间

55



预览:作为局外人的爱因斯坦如何能掀起一场物理学革命?

56

爱因斯坦的名字是一位非常规天才科学家的神话的同义语,他仅仅凭着纯粹思维就能够掀起一场科学革命。这一神话使我们倾向于对涉及爱因斯坦的历史性冲突以及与他工作相联系的科学革命得以兴起的种种条件视而不见。

爱因斯坦 1905 年的几篇论文冲击了经典物理学的基础。这些论文分别挑战了光作为一种波动的观念,给出原子存在的严格证据,引出了对空间和时间的新理解,以及辨认出质量乃是能量的一种形式。一名在得到公认的各种科学机构之外工作的青年科学家,怎么能够掀起这样一场多方面的革命呢?

爱因斯坦的传记向我们提供了他得以获取他那个时代的知识的特殊看法的线索。自然现象如何跨越不同学科的边界而联系起来的问题在这里起着一种重要的作用,起着同样作用的还有下列见解:我们用来解释这些现象的概念不是由自然界给出的,而是由人建构出来的。

1905 年开始的关于空间和时间的革命,以狭义相对论的形成表述出来,很快它就被发现是不完全的。试图将牛顿的公认的引力定律放到这一理论框架里的努力没有得到成功,至少在不放弃力学基本原理的情况下没有成功;虽然这一问题并没有导致经验上的紧迫疑惑,亦使得爱因斯坦质疑狭义相对论里时间和空间的概念,并且导致他在 1915 年的广义相对论里继续这一场革命。

那时候他发表了关于物质构造的几篇论文,扩大了他的影响,并且使他得以在 1913 年被召唤去了柏林。本来人们希望他会在解决物质理论的问题上做出决定性的贡献,从而把物理学和化学接合起来,但爱因斯坦的注意力却集中在找到一种新的引力理论的问题上。他最终发现的惊人的解决方案,提出了一些不能够仅仅由爱因斯坦的天才来回答的问题。

例如,他怎么能够提出一种像广义相对论那样的理论,至今提供给了我 57

们对宇宙理解的基础,而不需要知道一些像膨胀宇宙或黑洞的存在那样的现象?这些现象在现代解释里被当做广义相对论的中心内容。他可以利用的只有经典物理学的知识,又怎能足以彻底地撼动它的基础呢?在所有的神话之外,存在着像这样一些构成爱因斯坦革命的挑战性的问题。

爱因斯坦传奇

爱因斯坦不仅在 20 世纪的物理学上留下了他的印记,而且也在科学和科学家的公众形象上留下了印记。他是奇爱博士(Dr. Strangelove)^①的对立面,是对那些智力导致诱惑的浮士德式人物的否定。他后半生拍摄的照片特别显示出一种不落俗套者(Nonkonformist)的形象,一个超出了习俗和权威的人,以至于不再在乎不修边幅、不穿袜子和不梳头发。爱因斯坦伸出舌头的那幅著名的照片表现了某种天真,某种对有教养的多数人的抗议,但也没有超出公众媒体所能承担的限制。爱因斯坦的笑声是贝托尔德·布莱希特(Bertold Brecht)的剧作《伽利略的一生》(*Leben des Galilei*)里的物理学家们的笑声,这些笑声看来不仅来自发现的喜悦,亦潜藏地来自人类地位的脆弱性,一种像在古代的剧院里保留给神祇们的、不受所有世俗权威妨碍的笑声。但是,在他的外观之外,真实的爱因斯坦有多么非传统呢?并且,他的不落俗套在他所兴起的科学革命中又起到什么样的作用呢?

21 世纪初,那些引致爱因斯坦不能适应的冲突,已经差不多被人们忘记了。在关于他的发现或者他的爱情生活的偶然的新闻特写里,难得再提到那些冲突了。今天,爱因斯坦已被接受为文化史伟人祠(Pantheon)中固定的一员,这一点尤其可通过献给纪念他的种种荣誉而得到见证。在德国,他的声望显示了——即使是几年之前还是不可想象的——一种正常状态,爱因斯坦所回忆的同德国和德国人的紧张关系已逐渐消失。爱因斯坦早在 1925 年就

① 奇爱博士(Dr. Strangelove)是 1964 年出品的一部同名美国电影里的一个人物,一位战争狂人。——译者

以痛苦的字句来描述这种关系：

对他们来说我就像一朵发臭的花，而他们依然把我缀在他们西服的钮孔上。（Einstein 1925）

通常归于爱因斯坦的那个逃遁避世的科学家神话的一部分，是他的工作不易被人理解。即使是他关于相对论的著名论文，看来终究仅仅是为专家们写的；然而，他那篇奠定了后来被称为狭义相对论的基础的 1905 年的著名论文，竟写出了“论运动物体的电动力学”那样平凡的、怎么说也没有充分表达实情的标题。爱因斯坦工作的历史起源点是亨德里克·安东·洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz）关于在一个匀速运动的参考系里的光学和电磁学现象这种“专门情况”的研究。爱因斯坦的论文确实是一种专门的研究——虽然它也是迫使物理学家们转变到关于时间和空间的一种新的基本观点的研究。

但不仅是对物理学家，“爱因斯坦现象”的独有特点之一是他的工作远远超出了他的专业范围，对包括哲学、心理学和艺术在内的 20 世纪文化史产生了长远的影响。例如，发生认识论的创立者、儿童心理学家让·皮亚杰（Jean Piaget）在他关于儿童的空间和时间思维的发展过程的分析中，亦引用了来自爱因斯坦的启示。

在他的相对论的辉煌成功之上，以及在第一次世界大战期间他对魏玛共和国的态度的背景之上，爱因斯坦成了和平主义的一个标志。在那段时间里，他扮演着一个世界良心和圣贤的角色，在从德国赔款到如何安置来自东方的犹太人的一切强烈的争议中都有他的参与。后来，在第二次世界大战之后，爱因斯坦继续介入诸如武器控制、反对军备竞赛和建立世界政府等事务里去，1952 年他甚至被提名为以色列的总统。怎么能够由几项专业研究导致所有这些结果呢？

有人断定，首先这是由于爱因斯坦反传统的态度，这也是导致他的科学革命的态度。他确实是物理学圈子的一名局外人，但他的这种情况正使得他能够做出非凡成就。例如，与维尔纳·海森伯（Werner Heisenberg）等人相反，当 1905 年他 26 岁时，他没能跻身于学术机构的有希望的继任者之列，但

他发表了五篇改变了物理学面貌的论文。事实上,在这种情况下,科学革命是由一位物理学家的业余研究发起的,他那个时候是以任职于伯尔尼专利局做一名雇员来谋生的。

1905 奇迹年

在自然科学的历史上有几种不同的科学突破。有一些突破是由诸如望远镜或电子显微镜那样的一些观察或测量新手段引起的。又有一些突破是由于把原来没有关联的多个领域内的现象统一起来而达到的,例如在 19 世纪里光学和电动力学的统一,以及在 20 世纪里电磁作用与弱作用的统一。与爱因斯坦的名字和 1905 这个年份相联系的革命则主要是一场概念上的革命,不仅在物理学上而且也在理解这个世界的日常思维上产生了深远的变化。这里面包含了像时间和空间、速度、物质、辐射、波动、粒子、质量和能量等概念,所有这些概念都受到爱因斯坦的突破的冲击,其中有些是直接受到冲击,有些则是通过其长期影响而受到冲击。

爱因斯坦的五篇关键性的论文都挂着颇为谦逊的、专业的标题。在 1905 年 3 月 17 日发表的一篇文章的标题是“关于光的产生和转化的一个启发性的观点”,爱因斯坦写信给他的朋友、本身是一位在科学上的外行康拉德·哈比希特(Conrad Habicht)谈到这篇文章说^①:

这篇文章处理的是辐射和光的能量性质,并且是非常革命性的……

(CPAE 5, S. 31)

在这篇论文里,爱因斯坦证明在某些条件下,处在平衡态的热辐射的行为就像一群具有确定能量和颜色的光粒子的集合一样。他很快又在 4 月底发表了下一篇论文,提出了测定分子大小的一种新方法。虽然这篇文章的“革命性”不如他的其他文章那样激进,它亦终于在先前徒劳无功的多次尝试

^① 以下几处中译文参照:《爱因斯坦全集·第 1 卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社 2002 年版,第 2931 页。

之后,为他赢得了苏黎世大学的博士学位。他在给哈比希特的信里写道:

第二篇文章是从中性物质的稀薄溶液的扩散和内摩擦(粘滞)对原子的真实大小的一种测定方法。(CPAE 5, S. 31)

到了5月份,爱因斯坦又发表了一篇论文,关系到解决那时候的一个有争议的问题:原子真的存在吗?这是第一次把单个粒子的运动定律写进了统计涨落的公式里去。他在给哈比希特的信里写道:

第三篇文章证明了,根据热的分子理论的假设,悬浮在液体中的、数量级为 $1/1000$ 毫米大小的物体必定会进行着一种由热运动产生的可观察的无规运动;事实上,生理学家已经观察到了这种悬浮着的微小的无机物体的运动,这种运动被他们命名为“布朗运动”。(CPAE 5, S. 31)

在这一年里也许要成为最重要的一篇的文章,那时候还未完成。爱因斯坦继续写道:

第四篇文章仅仅是在这一点上的一份初稿,它谈的是关于运动物体的电动力学,其中提出了对空间和时间的理论的修改。……(CPAE 5, S. 31)

爱因斯坦很清楚这一修改的深远意义。爱因斯坦适时地对哈比希特补充说,这篇文章的运动学部分肯定会令他这个外行感兴趣;但这还不是这场革命性突破的级联效应的结束,在这一年写给哈比希特的另一封信里,爱因斯坦写了关于在9月份发表的论文《论运动物体的电动力学》的事:

对电动力学研究的结果已经扫过我的头脑。即是说,相对性原理连同麦克斯韦的基本方程要求质量是一个物体内所含有的能量的直接量度;光亦携带着它的质量。在镭的情况下,会发生质量的可观减少。这种考虑是有趣的和诱人的;但就我所知而言,全能的上帝也许会嘲笑整个事情,并且也许会把我弄得团团转。(CPAE 5, S. 33)

它没有把爱因斯坦弄得团团转。这篇文章确立了后来用公式 $E=mc^2$ 表达的著名的爱因斯坦质能关系,它开发了在物理学和技术上的进一步革命性变化的潜力。

61 一场革命的前期历史

经典物理学是几个世纪以来对自然现象研究的成果。一位孤独的青年科学家怎么能够在一年的时间之内,如此有效且永恒地找出经典物理学基础中的问题呢?如果我们屈从于神话而且仅仅聚焦于爱因斯坦的天才,就有可能忽略了允许这个天才得以尽情发挥的一些特定的条件。当爱因斯坦出生在一个把电气技术作为谋生手段的家庭时,就已经受惠于这种环境而对科学感兴趣了。他的父亲赫尔曼·爱因斯坦(Hermann Einstein)那时候正在制造发电机和其他电气设备,这些东西使得年轻的阿尔伯特面对着那个时代的顶尖技术的智力上的挑战。此外他还得益于对他的兴趣的一种早期支持,特别是来自一位学医的大学生马克斯·塔尔穆特(Max Talmud)的建议,他是在1889年晚秋由当地犹太社团安排在爱因斯坦家里搭食的。

塔尔穆特对爱因斯坦的特别建议之一是阅读阿龙·伯恩斯坦(Aaron Bernstein)关于自然科学的通俗读物,它们在科学普及的水平上,向其读者展示了当时自然科学状况的一种迷人的、甚至是百科全书式的概览。这些读物向爱因斯坦给出了一种把他从专家式的狭隘观点解脱出来的异常广阔的知识,而且使他熟悉了国际上的科学精神,包括它对世界观和政治的影响。在伯恩斯坦的著作里总是突出那些仍然没有解决的科学之谜,阅读这些著作有助于引领这个孩子的注意力指向后来导致他那些革命性文章的问题。

在这样的熏陶之下,作为一名学童的爱因斯坦已经培育出了他自己的科学观念,首先是围绕着神秘的以太及其作为光和电磁现象等等的载体的作用。16岁时,他已经写了一篇短文,讨论磁场对以太中光的传播的可能影响,并且从一个跟随着光速旅行的观察者的观点,推测一支光束看起来会像什么样子。在这一早期的思想实验中,已经探讨了后来引导他建立狭义相对论的问题。

62 作为从1896年到1900年在苏黎世多科工学院(Polytechnikum,后来的苏黎世联邦工学院,ETH)学习物理学的一名学生,爱因斯坦在能够形成对

科学有实质贡献的丰富观念之前,先让自己掌握了那个时代的物理学成就。在学习的期间并不是没有发生抵触和失望,因为他讨厌死板的反复练习和不动脑筋的记忆;可是他通过自学从书本上获得了大量知识。他常常要靠一位学数学的同学马塞尔·格罗斯曼(Marcel Grossmann)的笔记来复习,而这位同学后来不时在数学上帮助爱因斯坦摆脱困境。正是格罗斯曼在爱因斯坦四处求职无望的时候,于1902年为他谋得了伯尔尼专利局的一个职位。这一职位提供的薪金保障,使爱因斯坦得以继续他多年以来紧张的科学工作,并且间接地有助于导致他1905年的突破。

作为一名大学生,爱因斯坦继续着他各方面的广泛涉猎。在几年前重新发现的、爱因斯坦同他的同学,后来的妻子米列娃·马里奇(Mileva Marić)的通信中,这一点尤其得到了印证。在爱因斯坦写给米列娃的信件里,透露了他对于整个先前未知的科学兴趣的范围,其中包含那时候刚刚发现的关于X射线的实验,以及他对于金属研究的关注。此外,爱因斯坦的早期通信表明他是同时代教科书文献的一位热心的读者,并且是专业刊物的近期文章的热心读者。在那里也提示了爱因斯坦第一次科学争论的线索,那显然是关于统计物理学的。在这些早期通信里还包含了他对各种各样问题的许多想法,其中包括与他1905年那几篇文章有关的想法。

这些信件亦让人们一窥爱因斯坦反叛精神得以形成的那个年轻人的波希米亚人世界。受到那时候的物理学权威阻挠的他,在那里找到了支持和鼓励。它给予爱因斯坦以自信,凭着这一点他得以度过这段艰难的日子,例如当他由于伙食待遇的争执而离开了一所私人寄宿学校的临时性职位时,正像他所表达的那样,“他砰的一声就走掉了”。在他写给米列娃的信中他是这样说起他在这次对抗中的原则性立场的:①

(想一想多放肆,在我的位置上!)……放肆无礼万岁!它是我在这个世界上的守护神。(CPAE I, S. 323)②

① 关于这场冲突的细节,可参看:A.弗尔辛:《爱因斯坦传》中译本,薛春志,遥遥译,时代文艺出版社1998年版,第90—92页。——译者

② 这句话出自爱因斯坦1901年12月12日致米列娃的信,中译文见:《爱因斯坦全集·第1卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第307—308页。——译者

爱因斯坦在这一段时期中所构思的无数想法和推测,以及他同他的朋友们所讨论的问题后面,是一种迷恋,以为我们通过使用模型的方法就能把自然现象统一起来。这种迷恋亦植根于科学普及书籍的阅读。在 67 岁时,爱因斯坦在他的《自述》里依然回忆起这种受教育的深刻体验:

当我还是一个相当早熟的少年的时候,我就已经深切地意识到,大多数人终生无休止地追逐的那些希望和努力是毫无价值的……第一条出路是宗教,它通过传统的教育机构灌输给每一个儿童。因此,尽管我是完全没有宗教信仰的(犹太人)双亲的儿子,我还是深深地信仰宗教,但是,这种信仰在我 12 岁那年就突然终止了。由于读了通俗的科学书籍,我很快就相信,《圣经》里的故事有许多不可能是真实的。其结果就是一种真正狂热的自由思想,并且连带着这样一种印象:国家是故意用谎言来欺骗年轻人的;这真是一种令人震惊的印象。这种经验激起了我对所有种类的权威的猜疑,这是一种对于在任何特定的社会环境里都会存在的信念的怀疑——这种怀疑态度此后再也没有离开过我,即使后来从因果联系的审视缓和了这种冲突之时,这种怀疑亦没有停止过。
(Einstein 1992, S. 2, 4)^①

通过阅读这些书籍,科学成了年轻的爱因斯坦的生活取向,也成了宗教的替代物;一种超越朴实无知的希望和意愿的提高了的道路。特别是,伯恩斯坦的通俗读物开启了一种不仅受尊敬的而且是可以亲身参与的科学之门。与同时代的那些分门别类的专门学者相反,伯恩斯坦的著作既没有受到各门科学之间,亦没有受到科学与社会之间的鲜明界限的束缚。

伯恩斯坦对界限的超越不仅提供了科学世界的一种取向,他还运用了科学观点的宽广来作为政治关系的狭隘的对比;因此伯恩斯坦立刻领着他的读者走进想象中的宇宙旅途,并且问及从那里俯瞰德意志的这些小小的州会是什么样子,以及我们用一架望远镜是否能够认出黑森州达姆施塔特(Hessen-Darmstadt)这个小地方来。他用一种对以教育和科学为中心的生活意义的

^① 中译文参照许良英、范岱年编译:《爱因斯坦文集·第 1 卷》,商务印书馆 1976 年版,第 12 页。

有点忧郁的反思来完成对这种宇宙旅行的描绘：

怀着这种混合的感觉，我们心里什么也没有留下，除了与伴随着宇宙奇迹的平静的引力分开，伴随着像从压抑的谦卑、从傲慢自豪的遥远的引力，以及通过对我们的召唤，用我们精神的庄严教养去履行我们存在的任务而得到的舒适和安慰。并且，当我们完成这种日常的任务从工作中和在精神中得到的平静，我们就会与那些知识分开，以便为了将来和进一步寻找后继者而生活。（Bernstein 1867—1869, Bd. 17, S. 44）

在伯恩斯坦的书里所收集的他那个时代的自然科学的综述，是与把自然科学的无数专门分支在概念上统一起来的希望联系在一起的。爱因斯坦有了这些阅读材料作为一个出发点，就得以提出一种与他的大多数成熟的物理学家同行不一样的观点，而那些同行们有时候看不到他们正在研究的不同专门课题之间的桥梁式的联系。

无论如何，没有这种隐秘的想象，即是说，缺乏团体的影响，年轻的爱因斯坦的科学世界观很难如此富于成效。在爱因斯坦的信念共同体（Glaubensgemeinschaft）里的第一个人是塔尔穆德，那是他在科学世界遨游的第一位同伴。爱因斯坦在苏黎世的大学生活以及在专利局的前几年，周围有一些朋友，他可以同他们讨论科学的基本问题，而不必顾及学科之间的界限或者已经确立的学派的权威。在这个与那个时代的艺术家的波希米亚式群体很相像的反叛者群体里，科学问题成为生活自身的问题。除米列娃之外，爱因斯坦最重要的伙伴包括米凯莱·贝索（Michele Besso），一位不成功的工程师和成功的梦想家。在爱因斯坦 1905 年提出相对论的文章里，贝索是唯一的一位受到致谢的人，因为，正如爱因斯坦后来所回忆的那样，决定性的观念是在他同这位朋友的交谈中形成的。在本书第四章里我们将回到这个问题的细节。爱因斯坦在同这一个圈子的朋友们交往时，练成了对已经确立的科学的批判性反思，而在通常的学术环境里，人们专注的则可能是这些科学理论的各种特殊应用。

对于被当做过于专门化和由“盲从权威”（Autoritätsdusel）误导的专业化的科学[Fachwissenschaft]的反叛，是与对于中产阶级道德的蔑视相伴而行的。爱因斯坦那几年的通信提供了这种态度的雄辩证据，并且这种态度在他

1902 年与康拉德·哈比希特和莫里斯·索洛文(Maurice Solovine)共同建立的乌托邦式的“奥林匹亚科学院”(Akademie Olympia)里得到更多的佐证。终其一生,相比正式的科学院,爱因斯坦都更加喜欢这个自己组织的科学院。在这里他被讽刺地尊崇为 *antistes infallibilis ecclesiae pauperorum spiritu*, 即精神乞丐的教堂里的一贯正确的住持。作为科学院的院长,他被赋于“未骨骑士阿尔伯特”(Albertus Ritter von Steissbein)的荣誉称号。

在“奥林匹亚科学院”的友善聚会里,他们喜爱的读物是那些对当代科学的概念性和方法性问题进行批判性评述的书籍,其中包含了恩斯特·马赫(Ernst Mach)、昂利·庞加莱和像巴鲁赫·德·斯宾诺莎(Baruch de Spinoza)和大卫·休谟(David Hume)那样的哲学家,以及像米格尔·德·塞万提斯(Miguel de Cervantes)和查尔斯·狄更斯(Charles Dickens)那样的作家写的书。因此这个“科学院”和它的圈子绝不是一个胡闹的社团,而是一个思想家的集合,爱因斯坦不断从其中汲取力量,即使他已经成为一个著名科学家的时候,他亦不止一次地对他所在的普鲁士科学院的科学同事们缺乏开明的思想感到失望。

在他的奇迹年(*annus mirabilis*)之前的两年里的通信,见证了爱因斯坦的同伴们在讨论中对他有多么重要的意义。他不耐烦地等候着这个“科学院”的每一次聚会,在 1903 年 11 月写给哈比希特的信里可以看到这样的表述:

两个孤儿似的院士正坐在这里,梦想有一个非凡的会议(没有重要议题)。好了,起来吧,你这懒院士!(CPAE 5, S. 24)^①

而在 1904 年春天发出的另一封信里亦有类似的字句:

我将带着喜悦和其他的心情——我们已经将这些存放在了储藏罐中以备适时之需——欢迎你,并且高兴地在克拉姆巷(Kramgasse)49 号 2 楼招待你。索洛文仍然联系不上,不过他一定很快就会来。赶快来吧,毕竟你还有辆自行车!……急切地盼望世界上最懒得写信的人的回音。你的忠实的 A. E. (CPAE 5, S. 26)^②

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第 5 卷》,范岱年主译,湖南科学技术出版社 2002 年版,第 22 页。

② 同上书,第 24 页。

决定性的突破亦是同样地在爱因斯坦写给他的一位早年同伴的信里宣布的,在给哈比希特的一封信前面已经引述多次的信件里他写道:

在咱俩之间笼罩着一种沉默的严肃气氛,倘若我现在用一些无关紧要的唠叨打破它,我就几乎会感到我是在亵渎圣灵了。但是,这个世界上尊贵的东西不总是要遭到这样的命运吗? 66

那么,你这些时候究竟在忙什么呢?你这条冰冻的鲸鱼,你这堆烟熏的、风干的和罐装的灵魂碎片,或者无论别的什么我会扔到你头上的东西,那里面有我70%的愤怒和30%的怜悯。你只有后面的那30%可以用来感谢我,在你如此胆怯地于复活节也不露面之后,我没有寄给你一个装满切碎了的洋葱和青蒜的罐子。但为什么你还不把你的博士论文寄给我呢?你这可怜人竟然不知道,在 $1\frac{1}{2}$ 个会带着兴趣和愉悦拜读它的人当中,我就是其中之一吗?我答应你回寄我的四篇论文。(CPAE 5, S. 31^①)

爱因斯坦在瑞士的学生生活的语境延续下来起着一种重要的作用,即使在奇迹年之后也是如此,特别是在广义相对论的早期历史那段时间里。那时候爱因斯坦开发了一种计算水星近日点运动的方法,这种效应后来成为广义相对论里最重要的天文学试金石,而这一方法是与他的另一个朋友贝索讨论过的。广义相对论本身的建立则是在爱因斯坦的另一位前面已经提到过的同学、数学家格罗斯曼的不可忽略的参与下完成的。

第二次革命

当爱因斯坦作为一名局外人创立狭义相对论后不久,他对空间和时间的第二次革命性修改完成于1915年,那时他已是普鲁士科学院的一位受尊敬

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,湖南科学技术出版社2002年版,第24页。

的院士了。广义相对论仍是一名科学家反时代潮流之作,虽然它最初受到了一般认为是狭义相对论里的一个问题的启发。广义相对论的完成无疑属于20世纪物理学里最重要的理论进步,亦是爱因斯坦一生中最伟大的科学成就之一。1915年11月4日爱因斯坦在普鲁士科学院的会议上递交他“关于广义相对论”的短文时,吹响了胜利的号角。从来不缺乏自信心的爱因斯坦宣告说:

67 如果谁真的抓住了这个理论,那他就逃脱不了它的吸引力……
(CPAE 6, S. 216)

四个星期之后爱因斯坦向科学院陈述了包含至今有效的引力场方程的论文,并且总结道:

综上所述,我们终于完成了作为一种逻辑结构的广义相对论。最普遍表述的相对性假定(它使得空间-时间坐标成为一些物理上无意义的参数)不得不导致了一种非常特别的引力理论,得以说明水星近日点的运动。(CPAE 6, S. 248)

爱因斯坦对他的成功的张扬,当然亦与他差不多十年之内对于广义相对论和引力理论的紧张研究这一事实有关。从一个历史学家的立场看来,这一理论的衍生与这一理论本身同样“神秘”。幸而有一份关键性的文件保存下来了,那就是爱因斯坦著名的“苏黎世笔记本”,它使我们得以“越过他的肩膀”去观察这个创造过程的一个决定性的阶段。这本在1912—1913年间写下的笔记使我们不仅得以审视一位孤独的科学家的思想世界,而且看到一种知识系统的转换机制,它的结果是对在20世纪头十年出现的概念问题的正确回答。当时,这些问题尚未得到理论上的理解。

狭义相对论激化了早已存在于牛顿引力理论和电动力学之间的冲突。电动力学处理的是以一种非常高的但依然是有限的速度,即光速传播的效应;然而,牛顿的引力定律看来并没有直接与引力场和电磁场都在空间中以一定的速度传播的要求相调和。因此,1905年的相对论要么应当补充以一种新的引力理论,要么本身被修改。

像其他同时代的物理学家一样,爱因斯坦在发明了狭义相对论之后,很

快就专注于解决经典力学和电动力学之间的冲突这个“遗留问题”，起初他有信心地期望得到一个类似于他在1905年解决那个明显要大得多的问题时得到的解，但后来知道那是个错误，因为要解决这个问题就使爱因斯坦面对着两难的选择：要么改动像伽利略所说的所有物体的自由下落都遵从一样的定律那种力学的基本原理；要么再次给他的相对论带来问题。当爱因斯坦决定保留力学的原理并且寻求一种相对论的推广时，他遇到了他的物理同行们的怀疑，他们仅仅接受狭义相对论作为空间和时间的物理学概念的一种新的基础。 68

爱因斯坦于1907年开始了他在引力问题上的工作，并且对它的解设置了一些一般性的条件。这些条件的构成促使他很快就得到了几个惊人的结果，例如他预言了光的行进会因为受到引力的作用而偏折；但在五年之后，即在1912年，他只得承认，这样一个问题是不能够用他一直以来运用的数学方法解决的。即使在建立了一组复杂的数学标准并且继续努力了一年之后，亦只是使他自己终于坚定地相信，原先提出的问题是不可解的。然后他就只是尝试去发现部分的解。

然而，在1915年，在他提出这个问题八年之后，也是在他的同事们难得有谁觉得这个研究项目有什么意义之时，他戏剧性地接连三个星期里发现了原来问题的解。在这三个星期里，他每个星期的末尾都向普鲁士科学院提交一个报告，而每一个新的报告都否定了前一个的内容。最后他得到了所谓广义相对论的场方程，它基本上满足了1907年写下的诸条件。爱因斯坦怎么可能在没有对于那个解的任何暗示的情况下，就能够在八年前为这个解设定了那些条件，并且后来又顶着一些领头的物理学家的判断和不顾反复遇到的挫折，在许多年里继续走这条路呢？最终的成功是一种偶然的巧合，还是多年工作的系统结果而不顾显然不可预知的最后转变呢？这种成功与爱因斯坦作为柏林的一位杰出的科学家而改变了的工作条件之间有何联系？ 69

第二次革命的语境

爱因斯坦在1913年被召到了柏林，并且在1914年担当了被任命的位

置,这无疑是他的生活中的一个重要的转折点。只是在他到了柏林之后,他才进入公众的生活。在这个时期,他变成了影响力远远超出科学范围的一位受尊敬的知识分子,以及一位献身于民主与和平理想的斗士。爱因斯坦在柏林的岁月同在瑞士的早年时光(中间有一段在布拉格的插曲)对比的反差,初看之下确是惊人和令人费解的。爱因斯坦在去柏林之前没有任何卷入政治的迹象,并且与他物理学和化学的现代问题感兴趣的早期表现相反,他在柏林的时候总是退缩到一些特别深奥的问题里去:首先是相对论的推广,然后是包括了引力和电动力学的统一场论。

但在1914年,不仅是爱因斯坦,一切都改变了。在德国入侵比利时的时期,爱因斯坦仅仅在柏林呆了四个月。他没有卷入到普遍的战争狂热里去,以他对时事的特别态度,他在同事中感到孤立。由于他对普鲁士军国主义的消极态度,爱因斯坦肯定以某种程度的怀疑主义态度去看待他迁居到柏林这件事。然而,他不是作为一名政治活动家,而是作为一名研究科学家去柏林的。与他的同事们相反,爱因斯坦依然采取反对战争的立场,并且为了回应93名战争支持者签署的《致文明世界的宣言》(*Aufruf an die Kulturwelt*),他在1914年10月在《致欧洲人的宣言》(*Aufruf an die Europäer*)上签了名。《致文明世界的宣言》代表着有利于德国战争宣传机器的文化和科学的传播,其目的在于抵挡针对德国在比利时的战争罪行的国际性抗议浪潮。

70 为什么爱因斯坦对于他那时候面临的挑战的反应与他的同事们有这么大的差别呢?这个问题特别由于它与爱因斯坦的科学上的冲突相平行而使我们感兴趣。一个人如何能这样判断社会冲突而且对它们做出反应,如果这些冲突后面隐藏着复杂的社会机制,并且其结构和规律性并不明显地表露在外?要卷入的明显不仅仅是政治和道德方面,而且涉及认知问题。世界观、意识形态及其支撑机构,进而一般的政治运动,通常传达到个人的只是这些结构的一种简化了的和不可靠的图像,这种图像对个人提供的常常是发展他自己的观点的智力手段。

依爱因斯坦的情况看来,他的家庭背景、在瑞士那些年的经验,特别是他作为一名科学家的自我认知等起着一种重要的作用。通过对国际合作的明确强调,这种自我形象有一种暗含的政治特征,并且也把年轻的爱因斯坦读

过的通俗科学读物与其他东西联系起来,其中1848年的资产阶级革命起着一种重要的作用。爱因斯坦作为一名中学生时放弃了德国国籍^①,主要是为了逃避兵役,并且在很大程度上明显地认同瑞士的民主传统。但是,无论是他在德国学术圈子里罕见地持有的民主主义和国际主义的态度,还是与第一次世界大战的爆发相联系的那些戏剧性的事件,都没有直接使他成为政治上的积极分子。他在第一次世界大战的前夕决定接受柏林的召唤时,必定会有一种内部移民(*innere Emigration*)的强烈感受。

他的政治活动最初起始于国家领导集团试图把科学家和艺术家拽到政治竞技场里去的时候,在许多方面,那是一场后来在国家社会主义的旗帜下对文化和科学施行的意识形态工具化的预先表演。仅仅是作为他不能分享的多数人意见的对立面,激起了爱因斯坦卷入到和平主义和民主主义里去。科学的社会作用的戏剧性的变化,必定包含在他卷入政治的历史性原因之内。作为社会一部分的科学现在变得十分重要了,战争的宣传需要科学之助,并且它亦使爱因斯坦面对着由于在他的个人发展进程中业已得到的力量而能够接受的挑战。

但即使是在战争突然爆发之后,占据着爱因斯坦头脑的主要仍然是狭义 71
相对论引起的空间和时间概念的变化以及它对引力的理解产生的结果。从这个问题在原则上的重要性看来,爱因斯坦不是没有理由期望,他那些处在那个时代物理学首府的同事们会借助他的力量去认真地解决引力问题。但即使当他接受这个职位之时,他也清楚他的这种希望落空了。他作为科学院的一名院士的任命是由马克斯·普朗克、瓦尔特·能斯特(Walther Nernst)、海因利希·鲁本斯(Heinrich Rubens)和埃米尔·瓦尔堡(Emil Warburg)签署的,他们已经把爱因斯坦建立引力的一种相对论性理论的努力——以及他关于光量子的假设——看做如果没有那些情况的话就是一位优秀的青年研究人员的一种可以原谅的过失:

在他的思考中他也可以偶尔过甚其词,就像他关于光量子的假设一样,我们不应该过分地责备他;而不敢大胆地冒风险就不能在自然科学

① 爱因斯坦于1896年初放弃德国国籍。——译者

里引进任何真正的创新。现在他正在紧张地研究一种新的引力理论；成功与否只有将来才知道。(Kirsten und Treder 1979, S. 96)

爱因斯坦很快就清醒地明白了，他在柏林的同事们并不欢迎他为之激动的那些问题。在接受任命之后不久，他写信给贝索表示他的失望。他看重贝索的合作胜过许多能力强得很多的柏林物理学家，他以“奥林匹亚科学院”的有点自负的语气写道：

对于我的引力理论的文章，物理学家的友爱互助显得相当消极。……劳厄(Laue)对一些基本的考虑不表态，普朗克亦不表态，而索末菲也很像是如此。(成年的)德国人(瞎子!)完全没有一种自由而无偏见的品性。(CPAE 5, S. 588f.)^①

除了政治上的反差之外，这段话里表达出的紧张，部分原因在于，爱因斯坦对引力问题的专注和与他被召唤到柏林有关的动机和期望之间存在反差。这次召唤的动机确实是希望他会量子问题的解决作出贡献，并且希望他会在产生于同量子假设的联系的新的物理概念的基础上，创造一种亦会对实验化学产生效果的统一理论。这是与要创造一种跨学科的研究计划的打算相联系的，这个计划应当运用物理学关于物质的微观结构以及物质和辐射之间的相互作用的新近结果，以建立化学的理论基础。

在1913年2月14日，物理化学家弗里茨·哈伯(Fritz Haber)致普鲁士文化部长胡戈·安德烈斯·克吕斯(Hugo Andres Krüss)的信里，对这一点写得特别清楚。克吕斯早在1912年已经建议召唤爱因斯坦到哈伯担任所长的威廉皇帝物理化学和电化学研究所任职。哈伯同意这一计划，并且已经获得了对它的财政上的支持。他是这样描述把爱因斯坦任命到他的研究所的理由的：

对我来说，决定的理由是理论化学发展的状况，这个方向从亥姆霍兹(Helmholtz)的时候起就成功地选定和开展了，在范特霍夫(van't

^① 中译文参照：《爱因斯坦全集·第5卷》，范岱年主译，湖南科学技术出版社2002年版，第544—545页。

Hoff)的领导下,热力学方面的成就基本上达到了这个目的,并且现在致力于把辐射理论和电力学(Elektromechanik)纳入其中。有了爱因斯坦加盟我们的研究所,就能够无可比拟地推进这项基本任务。(CPAE 5, S. 511)^①

物理学里面的概念变化,确实是同物理学与化学两者日益增长的相互结合分不开的。这一点可以从在 20 世纪的前四分之一的时间里,原子这个物理学和化学的共同概念的兴起而看出来。在工业化年代里,化学的迅速进步使得物理学的基本概念发生突如其来的改变,这是由化学视野范围的扩大和这种结合仍然与社会的实际需求保持联系这两方面的因素共同决定的。当玻尔在 1913 年引进他的原子模型时,这种发展达到了第一个高峰,使得化学原子论与对经典物理学原理的放弃两者之间的联系变得特别清楚。

在这一背景之上,那时候爱因斯坦的经历并没有同时与物理化学家的名字和化学工业的代表人物紧密地联系在一起。在他的经历里重要的一步是受到了 1911 年会议的邀请,那是由物理化学家瓦尔特·能斯特发起和由化学企业家埃内斯特·索尔维(Ernest Solvay)资助的。

哈伯是否错误地在科学上估价了爱因斯坦?我们今天得到的爱因斯坦 73 的图像,无论如何都是以他在相对论物理学领域的两个划时代的成就,以及他关于热和辐射的出版物与关于量子力学的看起来更像是偶然之作的论文为主的,虽然今天由此得到了无数物理学的、技术的和实际的成果。然而,爱因斯坦的同时代人,特别是负责把他召唤到柏林的那些人,明显对爱因斯坦怀有不同的期望。上面所引述克吕斯的信件列出了与爱因斯坦最接近的、又不是同他一起工作和讨论的专业上的同事,以及在寻求一种相对论的普遍理论工作上的竞争者,但除了普朗克之外,实验化学家和物理学家感兴趣的只是物质的组成以及辐射和物质之间的相互作用那一类问题。类似地,在爱因斯坦被提名为普鲁士科学院院士的文件里,他关于一种普遍的相对论的研究工作被明显低估了:

^① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第 5 卷》,范岱年主译,湖南科学技术出版社 2002 年版,第 473 页。

他在其他通常是更急切的问题方面的创造,已经被证明为对实际的物理学具有非常大的意义。他在这方面通过从量子假设推导出固体比热的方程,最引人注目地第一个证明了量子假设对原子和分子的能量和运动的意义,虽然后来没有在细节上给出确证,亦正确地提供了关于一种新的动态原子论的进一步发展的完整基础。(Kirsten und Treder 1979, S. 96)

爱因斯坦和物理化学

乍看起来,如果说作为一位理论物理学家的爱因斯坦的研究关系到物理化学,似乎是一种误解。爱因斯坦 1907 年发表了一篇关于固体比热的文章,把普朗克的原子振子模型推广到一种能够用普朗克对于辐射理论的见解导出的关于固体热行为的结论。与爱因斯坦的工作完全独立,能斯特也已经表达出后来提升为热力学第三定律的一条热学定理。从这条定理能够推知,当温度接近于绝对零度时,所有元素的比热都趋向一个确定的极限。能斯特设计了一个测量不同物料的比热对温度,特别在低温下对温度的依赖关系的深入研究计划。1910 年他不仅成功地在实验上确证了他的热学定理,而且亦证明了爱因斯坦的固体量子论的理论结果。能斯特对他的实验结果和爱因斯坦的理论相符合这一点印象很深,以至于他以此为理由去伯尔尼访问爱因斯坦。后来能斯特成为爱因斯坦最重要的支持者之一,并且他也是爱因斯坦被召唤到柏林去的行动策划人之一。

可能这种理论物理学的结果和它在物理化学家的实验室里的证实之间仅仅是一个幸运的巧合,老练的能斯特由此在断言爱因斯坦是一位“玻耳兹曼再世”(CPAE 5, p. 233)时,推出了以理论上的大胆和实验上的敏感相结合为特征的一些影响深远的结果。显然能斯特希望爱因斯坦在把理论物理学的概念性突破与在物理学和化学上的实验研究联系起来的方向上做出重要的贡献,这是那时候正在越来越系统地和详尽地研究的问题。他不是独自抱有这种期望的。1914 年 2 月,几位领头的柏林物理学家制定了一个计划,要

建立一个威廉皇帝物理研究所,并且推荐爱因斯坦担任所长。这个研究所的目的是:

为了解决重要的和紧迫的物理学问题而创造具有不寻常能力的物理学研究者们的一种邻接的和成功的联合,其目的在于通过数学-物理学的考察,特别是通过在各个实验室里的研究者各自进行的实验研究,找到一种系统方法对有关问题进行更适宜而彻底的解答。(《柏林国家秘密档案》[*Geheimes Staatsarchiv Berlin*], Rep. 76-Vc, Sek. 2, Tit. 23, Litt. A, Nr. 116, Bl. 4—5)

对这个新的研究机构所期望的综合功能也更清楚地记载在另一份同时期的报告里,在这份报告里写下了这个机构应当是什么样子:

与已在达莱姆(Dahlem)设立的威廉皇帝化学研究所,特别是与威廉皇帝物理学和电化学研究所两者之间建立紧密合作。(1914年6月6日科佩尔基金会[Koppel Stiftung]致威廉二世[Kaiser Wilhelm II.]皇帝^①的信,见《柏林国家秘密档案》[*Geheimes Staatsarchiv Berlin*], Rep. 2.2.1, Nr. 20008, Bl. 188—194)

由于战争的缘故,这个研究所直到1917年才得以成立。由威廉皇帝学会评议会提议,爱因斯坦、哈伯、普朗克、鲁本斯和瓦尔堡成为董事会的成员。正如在这个研究所建立之前爱因斯坦所起的作用一样,在这个新的位置上,爱因斯坦也属于起重要作用的那一群人。其中的能斯特和哈伯是物理化学家,鲁本斯和瓦尔堡是实验物理学家。他们连同像普朗克和爱因斯坦那样的理论物理学家对新研究所的共同责任,明显主要是由其建立者要继续寻求物质的量子理论发展的理论方面和实验方面之间的平衡的兴趣来决定的。

在19世纪下半叶,把物理学方法引进化学的结果,产生了热化学和电化学这样的学科分支,促进了对于物质与诸如热和电等不同形式的能量相互作用的理解。关于物质与辐射的相互作用的相应进展却主要受到了还没有一种令人满意的辐射热力学理论这一困难的阻碍。这一状况由于普朗克和爱

① 此处原文误为威廉一世。——译者

因斯坦的有关文章而得到改变。正如我们将要看到的那样,爱因斯坦的功劳主要在于引进了一种对普朗克辐射公式予以物理解释的概念,因而亦对它在其他领域上的应用作出了贡献。

76 因而,爱因斯坦被任命为一所威廉皇帝研究所的所长这件事发生的背景,是为了发展出一种物理学家和化学家要做等同贡献的、关于物质及其相互作用的理论。这一发展以物质的原子论的进步为标志,这种进步是由化学最强有力地推进的,但它的具体实施则在本质上依赖于对辐射和物质之间相互作用的物理认识所带来的新见解。不像其他许多物理学家那样,爱因斯坦从他的学生时代起就从物理学以及物理化学的观点涉入物质的原子结构,并且在这个领域内获得了一些早期的科学成果。因此,完全不会令人惊讶的是,在像能斯特、鲁本斯、哈伯和瓦尔堡那样的研究者看来,爱因斯坦特别适合于指导物质及其与辐射相互作用的理论的进一步发展。

因而,爱因斯坦之所以得到在柏林的突出位置,主要是由于他早期研究的成功与在那时候支配着物理学发展的,把物理学和化学联结起来的趋向之间的吻合。威廉皇帝学会想以普鲁士科学院的其他合作计划为榜样,在意欲建立的新研究所进行合作研究。哈伯和他的合作者曾经向普鲁士国务部写过一份申请书:

虽然在不同的专家之间的这种合作,在物理学里还几乎是一件全新的事,但在科学的其他分支里早就接受了,特别是由普鲁士科学院任命的德意志历史纪事委员会(*Monumenta Germaniae Historica*)已经这样做了。(Kirsten und Treder 1979, S. 147)

但这样的合作并没有实现。把物理学和化学综合到一起的计划失败了,虽然确实具有这种安排所需的手段。柏林的动议失败了,其原因非常复杂,但很清楚,与普鲁士科学院的紧密联系及其在研究支持上的传统模式起了相应的作用。而且,爱因斯坦在他迁往柏林之前,已经怀疑他是否能够成功地构建一种一致性的量子理论,这其中还包括对他自己能否有助于揭露物质和辐射的经典理论中的一些悖论给出满意的解答。甚至在索尔维会议之时,他的注意力越来越集中于研究量子假设的一些个别的理论和实验结果,而不再

尝试自己去找到一个完备的理论。事实上,关于把物质的经典物理学作为一种极限情况,当做对 20 世纪 20 年代成功地建立了量子力学这种统一理论的贡献的研究,今天来讲仍然是有价值的。但这种理论的发展不再是爱因斯坦一个人的事了。他主要是作为它的一名苛刻的批评者介入到量子力学后来的发展中的。

虽然爱因斯坦直到被国家社会主义党人迫使离开移民之时仍然是那个新研究所的所长,但他领导研究所的事务只到 1922 年 10 月,那时候他正准备赴日本访问,之后就工作任务移交给马克斯·冯·劳厄了。走这一步的间接原因明显是由于针对爱因斯坦的反犹活动而引起的政治气候的不断恶化;另一个动机无疑是他的科学兴趣已经离开量子理论而转移到了关于引力的新理论,后来又到了引力和电磁力的统一场论。但反过来这种兴趣上的变化——至少部分地是科学结构改变的结果——在某种程度上已影响到了研究所的责任和活动。这里面包括了爱因斯坦的学术工作——他在柏林的工作主要是在广义相对论理论的框架内,寻找物理学的各个分支学科在概念上的整合——与他作为研究所所长必须专心处理的组织工作之间越来越大的分歧。按照惯例每件事情都要在越来越细分的科学工作的方向上前进,在其中知识的概念综合的任务只占据着一个靠近边缘的位置。爱因斯坦进一步的科学生命——从在柏林没有成功地成为一名科学组织者起,到在普林斯顿的一位孤独地思考着统一场论的学者——好像是从基本问题的研究转移到通常研究的边缘区域的一幅直接的写照。

无论如何,公众的注意力聚焦于在柏林的爱因斯坦。这部分地是由于那些岁月里科学发展的特殊性,即理论物理学已经变成不受约束的一门独立学科而造成的。爱因斯坦在瑞士的岁月里发表的那些激烈地改变了经典物理学基本概念的论文对于此种发展提供了可供仿效的先例。这种发展在 20 世纪 20 年代中期量子力学的形成上达到了它的巅峰并暂告一段落。在思想上对基本范畴进行理论上的修改,不仅应用于作为一门独立学科的物理学,亦冲击了有可能达到一种统一的科学世界观的信心,而在 19 世纪末人们还以为那种世界观已经臻于完善了。理论物理学对这种发展的突出贡献——它同 19 世纪至 20 世纪之交在其他方面的文化突破有很多的共同点——造就

78 了这门学科的代表人物,使他们成为受到公众关注的角色。当理论物理学家们把对世界的理解符号化之时,由于其内容的复杂性和所使用语言的抽象性,亦使得一般公众难以接受。于是,爱因斯坦就扮演着这种符号化的代表人物,这是 20 世纪的任何其他科学家都做不到的。

广义相对论的挑战

当爱因斯坦从地面物理学转向宇宙物理学时,他看来要从以下两个方面抽身出来:一方面要从量子理论的困难以及由高度专业化的物理学家和化学家研究着的划分得越来越细的问题中抽身出来;另一方面要从在那个时代的条件下同样困难的挑战中抽身出来,后面这个问题从赫尔曼·外尔(Hermann Weyl)1918 年 12 月写给爱因斯坦的一封信里似乎可以看出来:

当在最靠近我们的世界上的定律正处在如此猛烈的变化,在一切方面都受到危险和灾难的威胁的时候,我们是否有权利担心支配着最遥远世界的定律?(CPAE 8, S. 967)

正好在那个时候,那些会产生工业上有价值的结果的科学问题的研究,处于会引起更危险的、更必需的和更难以忍受的风险的境地。从爱因斯坦的朋友哈伯参与了为化学战提供材料的研究一事中就可清楚看出这一点。与此相反,相对论提供的是一种智力上的避难所,在这里关于自然界的一种统一理论的前景,给出了至少是在自然现象领域中能找到一种永恒秩序的希望,在那个时候在人类圈子里对这样一种秩序总是每日都感到失望的。

79 要把爱因斯坦在几乎整个第一次世界大战时期都紧张地投入到广义相对论的研究里去解释为主要是对现实的逃避,那就错了。爱因斯坦投入这项研究,是由于他准备好面对经典物理学的中心概念问题,特别是没有能够调和经典力学和从 19 世纪中叶以来支配物理学的场论的问题;即使是在战前这已经是构建狭义相对论的理由了。由爱因斯坦——一个在科学的专业机构之外的局外人来找到这个问题,这件事本身就表明,这决非是他生活中的

一个偶然事件,而是科学发展中结构改变的结果。如上所述,除了一些与实验相关的问题外,物理学学科之内的专门化已经把一些基本的问题边缘化了,并且倾向于吸引哲学家而不是物理学家的注意了。的确,我们在下面将会详细说明,爱因斯坦对相对论的推广,是从马赫对经典力学的哲学批评开始的。

在这种背景下,爱因斯坦在希望引起他的同事对新理论的兴趣,以及劝说天文学家去试验其观察结果时遇到了失败,是不足为奇的。在广义相对论还没有完全构建好的时候,他已经为了对他的理论结果做出经验上的检验,尝试过从天文学家那里寻求支持。很显然,是为了唤醒天文学家的兴趣,他1915年在普鲁士科学院做出关于他根据新的理论对于水星近日点运动的计算的口头报告。至少在德国,他的天文学同事宁可保留他们学科的传统观察计划,而不去应付新物理学的挑战,那是被认为与他们的课题不相关的事情。在对新理论感兴趣的极少数天文学家中,有一位埃尔温·芬利·弗罗因德利希(Erwin Finlay Freundlich),他是设在波茨坦的王家天文台的助理。但他的顶头上司、天文台台长和普鲁士科学院院士赫尔曼·施特鲁韦(Hermann Struve)拒绝了爱因斯坦提出的允许弗罗因德利希进行这一工作的请求。当爱因斯坦终于成功地筹措到得以使弗罗因德利希兼任这一工作的资金时,弗罗因德利希已经不再被允许在施特鲁韦的天文台里工作了。

直到1919年,当一支英国日食远征队观察到广义相对论所预言的光线受到太阳引力场的偏折时,爱因斯坦的理论才被广泛承认,而他亦因此成了世界名人。在20世纪20年代,相对论是一种时髦的风尚,尽管有些人贬之为“犹太的”或者“布尔什维克的”物理学,而大多数人都庆贺它是一个新时代的开始。

爱因斯坦作为广义相对论的创始人这一事实,卷入到了科学政治化的漩涡之中,前面已经指出过,这也同知识发展结构的性质有联系。有关相对论的争论,不仅表明科学突破在其中发生的有疑问的语境,而且说明了这一理论多么猛烈地击碎了关于空间和时间的日常概念。而且当理论物理学的概念结构变得更加远离惯常的和公认的思维方式时,它也通过它的技术成果对人们的日常生活产生越来越强的影响。然而,比起理论物理学看上去越来越

高深莫测来说,这种发展不大容易被看见。只有当人们考虑到那些将理论的变化与社会发展的过程相关的不那么直接的联系时,它才会被人们看见。此外,关于广义相对论衍生的例子还特别清楚地表明了,科学的国际性与国家主义的要求是不可调和的。相对论成了科学的国际性特征的一个符号,一方面因为它给爱因斯坦带来了国际声誉,另一方面因为它的进一步阐发有赖于从整个欧洲和美洲来的科学家组成的一个小组。这两方面都在第一次世界大战及其后的年代里国家主义浪潮中得到一种直接的政治意义。

当政治上的纷争仍然系于历史的瞬间之时,爱因斯坦的广义相对论今天依然是现代宇宙学的基础。它有助于描述这样的一个世界,爱因斯坦甚至无法猜测其存在——当他创建广义相对论时,他心目中的宇宙仅限于我们的银河系。广义相对论的远见甚至是更令人惊奇的,因为爱因斯坦能够用来检验他的理论对于经典物理学的偏差的,主要是局限于我们的行星系统里的少数微小的效应。但他如何能够明显靠着反思就创建了一种理论,它所蕴含的深度远远超出了它的发明者所能猜测出来的范围呢?事实上,这一理论能够描述宇宙膨胀、引力透镜、黑洞和引力波,虽然在构建广义相对论的时候所有这些都还未被人了解。关于自然界的何种知识是这一似乎是随意发明出来的理论的基础呢?

81

我们将在第五章和第六章里详细看到,广义相对论是爱因斯坦在经典物理学知识的不同领域寻求新的和更合适的概念,以及在它的研究中可运用的数学方法之间的张力状态中创造出来的。爱因斯坦的目的是一种推广了的相对论,那是一种也能适用于加速参照系的理论,并且在这种理论里,在这样的参照系里惯性力表现得就像与引力具有相同的本性一样。这是一个革命性的方案,而被爱因斯坦判定为失败了的一种尝试的结果,是把引力拟合到狭义相对论里优先选择匀速运动参照系的方案。虽然爱因斯坦在1907年已经构建出这一方案,并且虽然他最迟在1912年手中亦掌握了实现这一方案所需的数学方法,但他在柏林成功地完成他的理论之前,仍然需要再经过三年时间的紧张研究。

相比于1905年的几项突破的惊人巧合,长期以来,这一异乎寻常的发展的原因似乎无法更为详细地加以澄清。尽管爱因斯坦的天才可以用来解释

创建狭义相对论的那个奇迹年,而广义相对论拖了这么多年才得以发现的原因又被猜测为由于爱因斯坦在数学上公认的弱点,或者由于他自己的一种平庸而固执地坚持的物理学上的偏见。在以下各章里我们将证明不是那样一回事,克服了基本概念上的困难之后就有可能做出两个大的突破,并且这两个突破可以理解为对经典物理学的知识系统的重构的两个阶段。

仅仅在长期的预备工作之后,才有可能重构这个系统,正如今天能够在可利用的历史文献的基础上详细地重建这段历史一样。在爱因斯坦的出版物之外,有关的文件主要是直到他离开柏林之前的通信和研究笔记,在其中他系统地记录了他的理论推理过程。特别是前面提到的苏黎世笔记本,已经被证明是重构广义相对论历史的关键来源。通过物理学知识体系所产生的效果而让爱因斯坦的研究改变了的状况可由如下事实来表明:他关于新理论的初步想法主要是他仍然在瑞士工作的时候在私人笔记和通信里的论题,但在他迁移到柏林之后,很快就变成在普鲁士科学院里讨论的题目,后来更是公开争论的题目了。 82

以下我们将从知识的历史理论的观点来重构其历史原因,以尝试回答上面提出的一些关于爱因斯坦的物理学革命的构造条件的问题。我们在下面将会看到,通过这种重构来看待爱因斯坦神话,使得我们有可能解决在第一章里讨论过的科学进步的悖论问题,至少对这一场革命而言。

本章基于由柏林参议院支持、并且后来由马克斯·普朗克科学史研究所接手的阿尔伯特·爱因斯坦工作小组(Arbeitsstelle Albert Einstein)所主持的研究,参加者有朱塞佩·卡斯塔涅蒂、戴培德、维尔纳·海因里希(Werner Heinrich)、蒂尔曼·绍尔和本书作者。

推 荐 读 物

本章特别根据:

Castagnetti, Giuseppe et al. 1994. *Wissenschaft zwischen Grundlagenkrise und Politik. Einstein in Berlin*. Berlin: MaxPlanckInstitut für Bildungsforschung, Fors-

chungsbereich Entwicklung und Sozialisation. Arbeitsstelle Albert Einstein.

Castagnetti, Giuseppe and Hubert Goenner. 2004. "Einstein and the Kaiser Wilhelm Institute for Physics (1917—1922): Institutional Aims and Scientific Results." Preprint 261; Max Planck Institute for the History of Science.

Renn, Jürgen. 1999. "Einstein Mythos oder Herausforderung?" *Die Welt*. Berlin: 20 February 1999.

———. 2005. "Annus Mirabilis 1905—Einsteins Wunderjahr". *Spektrum der Wissenschaft* (Special edition: *Einstein und die Folgen*) 1: 12—20.

Renn, Jürgen. 2005. "Wissenschaft als Lebensorientierung: Eine Erfolgsgeschichte?" In E. Herms (ed.) *Leben: Verständnis. Wissenschaft. Technik. Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Theologie*, Vol. 24. Tübingen: Gütersloher Verlagshaus, pp. 15—31.

83

Renn, Jürgen, Giuseppe Castagnetti and Peter Damerow. 1999. "Albert Einstein: alte und neue Kontexte in Berlin." In J. Kocka (ed.) *Die Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Kaiserreich*. Berlin: Akademie Verlag, pp. 333—354.

这一章中用到的其他文献:

Bernstein, Aaron. 1867—1869. *Naturwissenschaftliche Volksbücher*. 20 Vols. Berlin: Duncker.

Brecht, Bertolt. 2001. *The Life of Galileo*. Translated by J. Willett. Methuen Modern Plays. London: Eyre Methuen.

CPAE 1. 1987. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 1. *The Early Years*, 1879—1902. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss Years: Writings*, 1900—1909. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 5. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5. *The Swiss Years: Correspondence*, 1902—1914. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 5E. 1995. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5. *The Swiss Years: Correspondence*, 1902—1914. English edition translated by Anna Beck, consultant Don Howard. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 6E. 1996. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 6. *The Berlin Years: Writings*, 1914—1917. English edition translated by Alfred Engel, consultant Engelbert Schucking. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 8. 1998. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 8. *The Berlin Years: Correspondence*, 1914—1918. Princeton: Princeton University Press. (Part

A: 1914—1917, pp. 1—590. Part B: 1918, pp. 591—1118.)

Einstein, Albert. 1905. “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.” *Annalen der Physik* 17: 132—148.

——. 1905. “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.” *Annalen der Physik* 17: 549—560.

——. 1905. “Zur Elektrodynamik bewegter Körper.” *Annalen der Physik* 17: 891—921.

——. 1905. “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?” *Annalen der Physik* 18: 639—641.

——. 1906. *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (30 April 1905.) Dissertation. Bern: Buchdruckerei K. J. Wyss.

——. 1914. “Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 1030—1085.

——. 1915. “Zur allgemeinen Relativitätstheorie.” *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLIV: 778—786.

——. 1915. “Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag).” *Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLVI: 799—801.

——. 1915. “Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 831—839.

——. 1915. “Die Feldgleichungen der Gravitation.” *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin), 2. Halbband, XLVI-II—XLIX: 844—847.

——. 1925. *Diary Trip South America*, April 1925. The Hebrew University, 84 Jewish & University Library, Albert Einstein Archives, Call number: 29133.00.

——. 1992. *Autobiographical Notes. A Centennial Edition*. Paul A. Schilpp (ed.). La Salle, Ill.: Open Court.

Einstein, Albert and Marcel Grossmann. 1913. *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig: Teubner.

——. 1914. “Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie.” *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 63: 215—225.

Kirsten, Christa and HansJürgen Treder (eds.). 1979. *Albert Einstein in Berlin 1913—1933*. 2 Vols. Berlin: AkademieVerlag.

Kollross, Louis. 1955. "ErinnerungenSouvenirs." In C. Seelig (ed.) *Helle Zeit Dunkle Zeit: In Memoriam Albert Einstein*. Zurich: EuropaVerlag, 1955, pp. 17—31.

Mach, Ernst. 1960. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*. Translated by T. J. McCormack. LaSalle, Ill: Open Court.

关于爱因斯坦的生活和工作:

Beller, Mara, Robert S. Cohen and Jürgen Renn (eds.). 1993. *Einstein in Context*. (*Science in Context*, Vol. 6.) Cambridge: Cambridge University Press.

Bührke, Thomas. 2004. *Albert Einstein*. Munich: Deutscher Taschenbuch Verlag.

Cassidy, David C. 2004. *Einstein and Our World*. New York: Humanity Books.

Clark, Ronald W. 1973. *Einstein: The Life and Times*. London: Hodder and Stoughton.

Fölsing, Albrecht. 1997. *Albert Einstein: A Biography*. Translated by Ewald Osers. New York: Viking.

Frank, Philipp. 1947. *Einstein, His Life and Times*. Translated by G. Rosen. New York: A. A. Knopf.

Galison, Peter. 2003. *Einstein's Clocks, Poincare's Maps: Empires of Time*. Scranton, PA: Norton.

Goenner, Hubert. 2005. *Einstein in Berlin: 1914—1933*. Munich: Beck.

Hentschel, Ann M. and Gerd Graßhoff. 2005. *Albert Einstein "Those Happy Bernese Years."* Bern: Stämpfli.

Hermann, Armin. 1994. *Einstein: Der Weltweise und sein Jahrhundert: Eine Biographie*. Munich: Piper.

Highfield, Roger and Paul Carter. 1993. *The Private Lives of Albert Einstein*. London: Faber and Faber.

Hoffmann, Dieter. 2006. *Einsteins Berlin*. Berlin: Wiley-VCH.

Hoffmann, Dieter and Robert Schulmann. 2005. *Albert Einstein (1879—1955)*. Teetz: Hentrich & Hentrich.

Holton, Gerald. 1973. *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

85 —. 1995. *Einstein, History and Other Passions*. Woodbury, NY: American Inst. of Physics.

Holton, Gerald and Yehuda Elkana (eds.). 1982. *Albert Einstein. Historical and Cultural Perspectives*. Princeton: Princeton University Press.

Howard, Don and John Stachel (eds.). 2000. *Einstein: The Formative Years 1879—1909*. (*Einstein Studies*, Vol. 8.) Basel: Birkhäuser.

Janssen, Michel (ed.). 2006. *The Centenary of Einstein's Annus Mirabilis*. Special Issue of: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.

Janssen, Michel and Christoph Lehner (eds.). In preparation. *Cambridge Companion to Einstein*. Cambridge: Cambridge University Press.

Levenson, Thomas. 2003. *Einstein in Berlin*. New York: Bantam Books.

Neffe, Jürgen. In press. *Einstein: A Biography*. Translated by S. Frisch. New York: Farrar, Straus, and Giroux.

Overbye, Dennis. 2000. *Einstein in Love: A Scientific Romance*. New York: Viking Penguin.

Pais, Abraham. 1982. "Subtle is the Lord ...": *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Clarendon Press.

Renn, Jürgen and R. Schulmann (eds.). 1992. *Albert Einstein Mileva Marić. The Love Letters*. Princeton, Princeton University Press.

Renn, Jürgen (ed.). 2005. *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe: One Hundred Authors for Einstein*. Berlin: Wiley-VCH.

Seelig, Carl. 1960. *Albert Einstein. Leben und Werk eines Genies unserer Zeit*. Zurich: Europa Verlag.

Stachel, John. 2002. *Einstein from "B" to "Z"*. (*Einstein Studies*, Vol. 9.) Boston: Birkhäuser.

有关通俗科学读物的作用:

Daum, Andreas. 1998. *Wissenschaftspopularisierung im 19. Jahrhundert: bürgerliche Kultur, naturwissenschaftliche Bildung und die deutsche Öffentlichkeit. 1848—1914*. Munich: Oldenbourg.

Frederick Gregory. 1977. *Scientific Materialism in Nineteenth-Century Germany*. Dordrecht: Reidel.

Shinn, Terry and Richard Whitley. 1985. *Expository Science: Forms and Functions of Popularisation*. Dordrecht: Reidel.

关于科学史的语境:

Barracca, Angelo et al. 1979. *Scienza e industria 1848—1915*. Bari: Laterza.

Barkan, Diana Kormos. 1999. *Walther Nernst and the Transition to Modern Physical Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Eckert, Michael. 1993. *Die Atomphysiker: Eine Geschichte der theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule*. Braunschweig: Vieweg.

86 关于对相对论的争论:

CPAE 7. 2002. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 7. *The Berlin Years: Writings, 1918—1921*. Princeton: Princeton University Press, pp. 101—113.

Goenner, Hubert. 1993. "The Reaction to Relativity Theory in Germany, III: A Hundred Authors against Einstein." In J. Earman et al. (eds.) *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity*. (Einstein Studies, Vol. 5.) Boston: Birkhäuser.

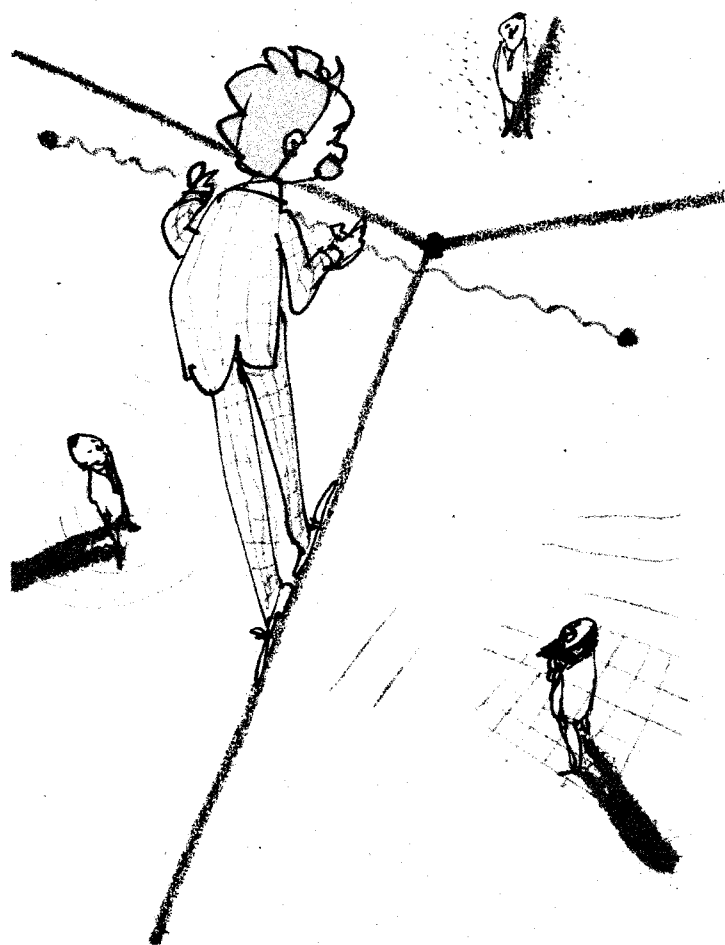
Hentschel, Klaus. 1990. *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins*. Basel: Birkhäuser.

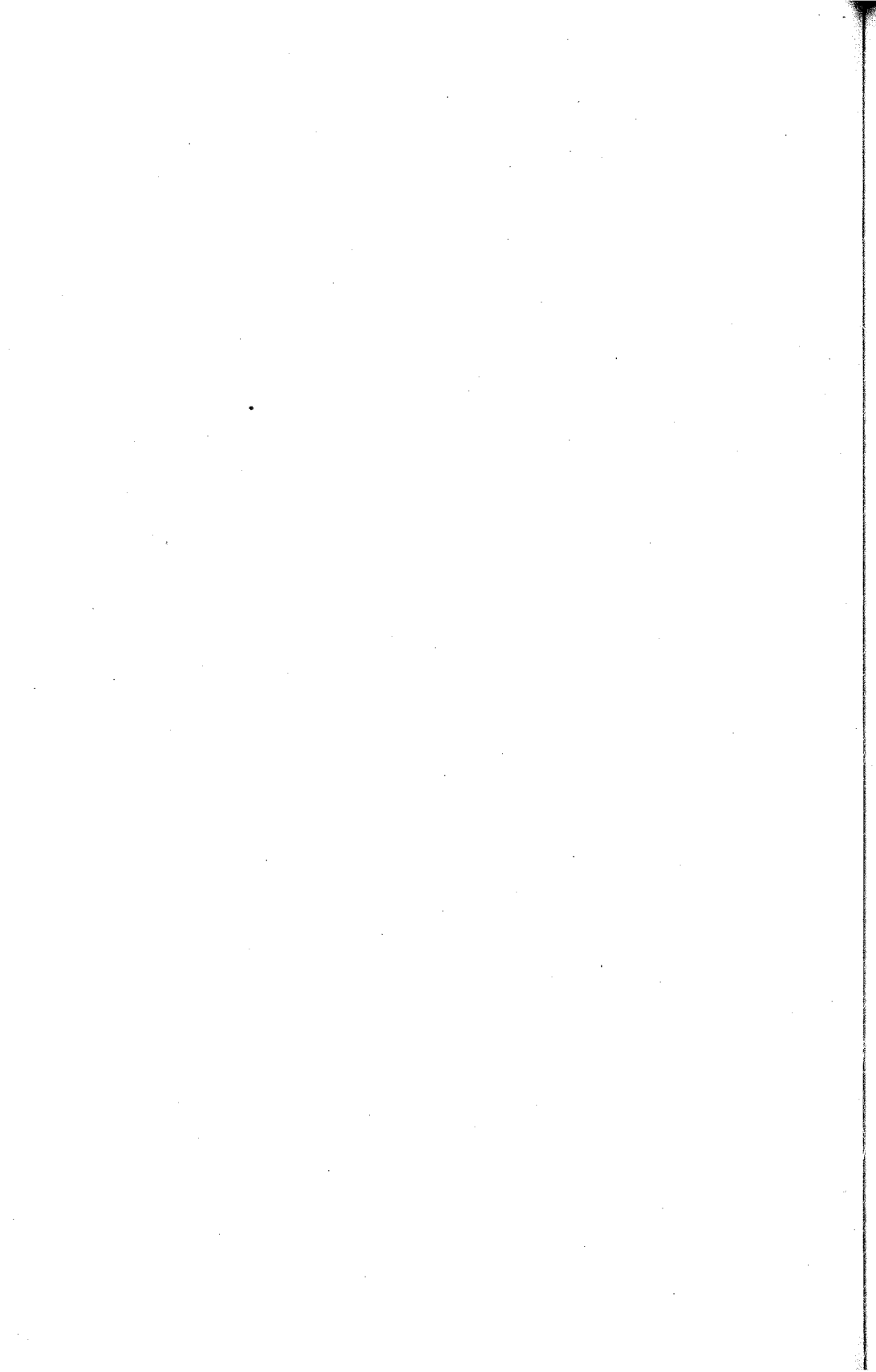
Wazeck, Milena. 2005. "Wer waren Einsteins Gegner?" *Aus Politik und Zeitgeschichte* 25—26: 17—23.

———. 2005. "Einstein in the Daily Press: A Glimpse into the Gehrke Papers." In J. Eisenstaedt and A. J. Kox (eds.) *The Universe of General Relativity*. (Einstein Studies, Vol. 11.) Boston: Birkhäuser.

第三章

经典物理学的大陆及其 边界问题





预览:爱因斯坦时的物理学状况何如?

88

19 世纪,物理学已经发展成为一门具有坚实概念基础和严密程序方法的学科。制度化的教学和研究以及富于成效的出版体系亦已变成了一种传统。

这种发展的起始点是经典力学,它是在 17 和 18 世纪随着空间、时间、力和运动等基本概念而建立起来的。这些概念提供了对全部物理学的一种普遍生效的框架,并且形成了一种机械论世界观;但在关于热现象和电磁现象理论的研究中,亦建立了具有独立概念基础的新领域。这些新的理论只是在按照思维模型用隐秘机制去说明非力学过程的时候,才需要用到力学。最突出的例子是原子论和无处不在的以太。以太被当做传播电磁现象的载体,因而亦是光的载体,就像承载水波或者声波的媒质一样。

这样的一些不可见的机制对那些需要用经典物理学几个领域的知识来理解的问题起着重要的作用,因此就有了在力学和电动力学之间,在热物理学和电动力学之间,以及在力学和热物理学之间的几种边界问题。这些边界问题激发了概念上的矛盾,最终冲击了机械论世界观并因而兴起了相对论、量子物理学和原子物理学的革命。

只有在科学史的这种宏观背景下,我们才能够理解导致近代物理学兴起的那场科学革命。

经典物理学的大陆

19 世纪末,一个要决定成为一名专业科学家的人有一种选择:他可以钻研延伸到新的未开发的科学领域的论点,吸引他的可能是考古学、海洋学或进化生物学。但如果他不对这样一些冒险感兴趣,宁可平静地专注于一种已经成熟的学说中的一些已经很好地设定下来了的特殊问题,他有可能会成为

一名物理学家。

89

但在这样一种稳当的前景下面的深处却酝酿着新的危机。从 19 世纪中叶开始,就形成了一种张力,它还没有立刻被新晋的专家们觉察到。像地壳构造板块一样,物理学的三个中心领域——力学、热力学和电动力学——正在转移着它们的相对位置。电动力学和热力学在概念基础上离开以力学为中心的物理学的主要大陆越来越远了。它们亦在彼此的边界或者与力学的边界上发生摩擦,并且面临着在某些确定的交叉问题上发生冲撞的危险。生长到问题的山峦之中的皱褶看来仅仅是每一个这样的概念大陆上的居民的边界线。只有通过全局性的审视,才能够显示出这些问题多么富于爆炸性。

经典物理学的这三个中心区域,每一个都按照知识的特征结构处理着许多互相关联的问题:这里首先包括了使得有可能决定各种物理对象和过程的定性行为的基本性质的所有思维模型;此外,经典物理学的知识系统由具有特定理论形式的、或具有像数学表述式那样的表现形式的,以及关于典型实验状况的实际知识经过详细阐述的概念系统组成。这种知识系统通过 19 世纪物理学的组织贯彻到中学和大学的教学里,在教科书和科学刊物里,以及通过参加研究计划而传承下来了。

90

物理学的最古老的学科组成是力学。它是在现代早期作为知识的一个重要的主体而建立起来的,接续着可以追溯到古代的一种传统。在 18 世纪和 19 世纪里,力学达成了它的经典形式。它的最重要的思维模型包括“加速度意味着力的模型”,它源于把物体的运动区分为两类的做法:一种要求有被说成是“力”的原因的运动,和所谓的“惯性运动”,后者是由惯性原理所支配的,不需要任何解释。惯性运动包括所有匀速直线运动^①以及静止的状态;与此同时,所有加速运动都必须看做是由力所引起的。因为取决于参照点的选择,一种给定的运动可以表现为加速的也可以表现为匀速的,这种区分只相对于一个确定的描述框架才是唯一的,它可以是在一定的时间坐落在一定的位置上的实验室,这样就构成了一个“参照系”。在牛顿力学里,“绝对空

① 惯性运动必定是匀速直线运动,但匀速直线运动不一定是惯性运动,例如可以是受到几个合力为零的作用力的运动。——译者

间”用来做定义这样的参照系的基准,并且自身就代表了一个特定的参照系——但任意相对于绝对空间做匀速直线运动的其他参照系也是如此。于是,在19世纪末就把这种相对于绝对空间做匀速直线运动的所有参照系规定为惯性系,从而引进了“惯性系”的概念。牛顿力学的定律应当在这样的任何一个惯性系中成立的主张,被称为“伽利略相对性原理”。

如果一个物体相对于一个惯性系作加速运动,它必定受到了另外一个或者多个物体施加给它的力。加速度的大小取决于力的大小以及物体对这种外力的抵抗。在经典力学里这种抵抗本领是物体的一种内部的、称为“惯性质量”的特性。此外,在牛顿力学里物体还有另一种叫做“引力质量”的质量。不像惯性质量那样,引力质量量度的不是对于外力作用的抵抗,而是代表它自己是一种叫做引力的力的源泉。按照牛顿的万有引力定律,两个互相吸引着的物体之间的引力,与两个物体的引力质量的乘积成正比,且与它们之间的距离的平方成反比。尽管牛顿力学里的这两种质量在概念上起着完全不同的作用,但两者竟然是精确成比例的。对由于重力而产生的自由下落运动来说,从这种不同寻常的比例关系可以推知,所有物体都以同样的加速度下落而与其质量无关。

从19世纪中叶开始,在专门知识的大厦里开发出了与经典力学平行的电动力学(包括光学)和热力学,前者归功于詹姆斯·克拉克·麦克斯韦、海因利希·赫兹和亨德利克·安东·洛伦兹等科学家的贡献,而后者则归功于威廉·兰金(William Rankine)、约瑟夫·汤姆逊(Joseph Thomson)和鲁道夫·克劳修斯(Rudolf Clausius)等人。这些分支越来越远地与力学的原先大陆分开,并且脱离出来变成多少是独立的知识领域。它们确实与力学共享了诸如空间和时间等基本概念,但它们也包含与力学不同的特有的思维模型、概念和理论,并且在每一个分支领域里按其传统传播。

电动力学关系到的不仅仅是物体之间的电磁作用,而且还有电磁辐射和光。它含有这样的思维模型,即带电体在它的附近产生电场的模型。它的基本概念包括导体和绝缘体、电荷、电流、电势差、电场和磁场。它解释了以下的过程:带电粒子之间的吸引和排斥、电流产生磁场和电磁感应,即是说,变动的磁场产生电压。电动力学的主要数学表述式包括偏微分方程和矢量分析。

热力学的主要思维模型包括热机；它的基本概念包括能量、热量、温度、压强、体积和熵。熵是一个系统里不能够转变为功的那部分能量所占比例的量度；从统计物理学的观点看，它代表了系统无规程度的量度。热力学用这些概念来描述像气体对温度、压强或者体积变化的反应，以及热和机械能的相互转换。它的两条基本定律专门通过热机模型来处理热现象，而不涉及具体工作物质和热传递的具体方式。偏微分方程是表述这些热力学关系的主要方法。

边界问题

92 经典物理学分为力学、电动力学和热力学三个部分，但这三个分支以及它们的理论基础之间不能够和平共存，谈不上达到一种稳定的和谐。在 19 世纪后期所进行的建设物理学的理论基础的各种尝试，亦是在对整个经典物理学的知识体(wissenskorpus)寻找一些潜在的基础。那时候的科学家讨论的是一种机械式的世界观，一种电动力学式的世界观，以及一种依赖于热力学基本概念的世界观。

此外，关于这些不同的知识分支及其内部结构之间的关系，尚有无数未解决的问题。事实上，特别在每一个分开的研究领域，都存在着几种互相竞争的理论方法。这些不同的选择之间的差异可能在于它们知识推演的组织，在于基本理论框架的修改，在于不同典型对象的选取，或者在于可为观察的现象采用的不同定量定律。

荒谬的正是，在 19 世纪里专门化的快速发展使科学分成一门门分隔开的学科，显示了在专门化的过程中人们不仅从知识的较广泛的语境中分出一个个问题；亦推进了属于不同分支学科的有效性区域的知识，且因此不可避免地导致不同的知识结构体发生重叠，而且这种重叠被证明是进一步发展的至关重要的推动力。随着用不同的一些概念组合来解释同一自然现象，问题就出现了，而且只有呈现它们的最终解决方案时，人们才能够评估不同的概念能够彼此调和到什么程度。另一方面，发现在一个具体问题上概念之间不相容性，亦促进了科学的创新。无论是谁要尝试解决一个具体的问题，会同

时被迫重新考虑所涉及的概念,有可能想出办法去改造它们。任何涉及对全部物理学和一个统一的概念基础的尝试,无论如何朴实,也要认真地面对在边界问题上的潜在冲突。因此,经典物理学的边界问题会成为解决它们的出发点。

平衡态的热辐射问题就是这样的一个边界问题,它是爱因斯坦 1905 年那几篇革命性论文的论题之一。它是由热学理论和辐射理论两者的重叠而尝试出来的,而辐射理论又是电动力学的一部分。业已发现,包围在一个空腔里的辐射在达到热平衡时具有的热学性质是与例如腔壁材料的性质等特性无关的;可以由精密的实验测定出这种辐射的普遍适用的一种能量分布,其结果由普朗克在 1900 年提出的辐射公式精确地加以描述。普朗克辐射公式解决了这个位于电动力学和热力学之间的边界上的问题,其形式今天依然有效。然而,这里面隐藏着一个根本的危机:所有可能能量值的波动连续体的经典图像不能与普朗克的辐射公式调和。为了要找出由这道公式描述的、处在热平衡中的辐射的能量分布的一种物理解释,必须采用一些全新的、非经典的概念。 93

也属于爱因斯坦在他的奇迹年里的一篇文章的论题的布朗运动问题,乃是在力学和热力学之间的一个边界问题。悬浮在液体中的微小粒子快速摇晃不停地运动这一现象,实际上在显微镜发明之后就被人发现了。经过英国医生和植物学家罗伯特·布朗(Robert Brown)的详细研究,亦弄明白了这不可能是—种生命现象。如果我们接受特别是由詹姆斯·麦克斯韦和路德维希·玻耳兹曼(Ludwig Boltzmann)发展了的原子论,那就显然会把这种运动解释成悬浮微粒受到液体中许多原子碰撞的结果。然而这种解释遇到了难以克服的困难,由此直接推知的悬浮微粒的运动速度看来与观察不相符合。只有引进一种关于没有确定速度的运动的非经典概念,才有可能解决这个问题。

最后,运动物体的电动力学的问题是在力学和电动力学之间的边界区域产生出来的,并且成了相对论的诞生之处。荷兰物理学家洛伦兹此前做了不断的成功努力以提出一种理论,希望能够判明在这个边界区域里的问题的经验知识。然而他未能成功地使他的理论里的基本假设与经典物理学里的其他分支相符合。为了调和电动力学和力学的基本原理,事实上必须引进关于

空间和时间的非经典的新概念。

94

换句话说,20世纪早期重要的概念上的突破皆源自经典物理学的边界问题。这些边界问题的真正存在,既非出自爱因斯坦的天才,亦非科学革命的普遍结构。事实上这些问题是19世纪与20世纪之交的物理学发展的一个方面,是它所存在于其中的大气候样式的一个方面。如果不考虑这种样式的话,所有要理解1905年革命的起因的企图都必将徒劳无功。只有在这一背景下,才能够弄清楚什么样的特殊审视能够令爱因斯坦把注意力集中到边界问题上,并且把它们看做是挑战。明显还有其他的一些观点,简单地把它们的眼光投向一些特定的问题,而看不出在经典物理学的不同分支领域之间的概念的相容性这样的原理性问题。例如,普朗克把热辐射问题基本上看做热学理论中的一个特定问题;玻耳兹曼把像布朗运动之类的涨落现象看做是力学中的问题;还有洛伦兹把运动物体的电动力学仅仅当做是电动力学的问题而没有看做是力学的基础。

视野的问题

因此,如果仅从一个专家的眼光来看,这些边界问题的范围是不一定能得到承认的。普朗克实际上是从一个专家的观点来看待热辐射问题的,他使用了他的论题的工具和原理,加上几乎是难以置信的毅力,以超乎寻常的技巧找到了问题的解,但他明显没有那样的眼光,看不到本来可以从辐射问题的现状看出来的经典物理学的边界问题。普朗克辐射定律的发现还无疑依赖于其深入的专门化。这也是普朗克的同事阿诺尔德·索末菲(Arnold Sommerfeld)所看到的:

在科学上专心致志的一个好例子是,普朗克在成功的年月里,既不朝左看亦不朝右看,而是盯紧他的目标。(Planck 1948, S. 173)

95

从这种角度进行审视,显然难以感觉到经典物理学基础中的张力和缺口,以及衡量这些张力和缺口会影响到过去是物理学目标的绝对确定性的可

能。在那里像爱因斯坦之类的青年科学家已经看到了经典物理学的大厦的分崩离析,普朗克自己在柏林大学校长的就职演说里是这样讲的:

现今的理论物理学会给人这样的一种印象,它好像是一幢历史悠久的,然而正在衰败之中的大厦,它已经开始一点一点地破碎,它的基础有被动摇的威胁了。但没有什么比这种感觉更加错误了。在物理学理论发展之时,的确发生了巨大和猛烈的变化。但仔细的视察表明,没有什么称得上是摧毁性的工作,而只是完善和扩充,只是使得某些建筑部件移动到别的位置上,就像要找到一个更合适的稳定位置那样。因此,迄今为止,物理学理论下面的基础仍然坚固如初,并且前所未有地安全可靠。(Planck 1934, S. 35)^①

但这种保守的立场完全不是所有同时代的观察家所共同持有的。在19世纪物理学的进步中已经产生了像在电磁学和热力学里产生的竞争性的新的概念基础的事实,导致科学哲学的发展,从而对那时候科学的形而上学基础采取了一种批判的态度。这种批判态度特别表现在奥地利物理学家和哲学家恩斯特·马赫(Ernst Mach)的身上,他的批判主要涉及一直被认为是颠扑不破的力学的概念基础。除了力学之外,已经确立的物理学的其他理论也已经弄清楚了,它的基本概念不能够像在18世纪的科学家和哲学家在牛顿力学的巨大成功的影响之下所通常认为的那样,简单地看做是由人类思维的结构决定的。

即使限于力学的进步,像在莱昂纳德·欧拉(Leonard Euler)、约瑟夫·拉格朗日(Joseph Lagrange)或者威廉·哈密顿(William Hamilton)的工作里表示的那样,对力学的理论上和概念上的基础亦开辟了新的观点。那时候讨论的问题当中有牛顿的绝对空间概念的意义,以及辨认惯性参照系的困难,那些独特的参照系是经典力学定律在其中生效的参照系。像马赫那样的批评家断言,运动的概念甚至惯性质量的概念,完全不能像牛顿所说那样应用于单个物体。他建议应当用物体之间的相对运动来重写整部经典力学,并

96

① 普朗克于1913年就任柏林大学校长。——译者

且以这种方式重新定义“惯性质量”和“惯性系”的概念。特别是,导致在一个旋转着的水桶的水平面弯曲的离心力,不应当像牛顿那样解释为相对于绝对空间的加速运动的效应,而应当是在宇宙中存在着的其他物体的效应。

在马赫的解释里,“牛顿的水桶”首先被看做是处在水桶连同里面的水相对于观察者转动的状态,并且水面是弯曲的;其次是一个水桶在转动但水却静止并且水面是平的状态。根据牛顿对这个实验的解释,在第一种情况下水桶和水相对于绝对空间转动着,使得水面变得弯曲;而在第二种情况下我们仅仅有水对于桶的相对运动,而这种运动不会产生什么效果。那么,根据牛顿的解释,绝对空间是否存在可以从它对于转动着的水体的物理效应推断出来。但马赫反驳说,发生在第一种状态的现象也可以看成是相对运动的效应,如果我们考虑固定的恒星的影响,就可以说水面的弯曲是由于相对于众恒星转动的结果,而不必说成是由于相对于绝对空间的转动了。

在经典力学的实际应用里,我们常常处理的是那些由具体的物质环境产生的力,例如由一个弹簧产生的力。因而,对于力学知识的成功的实际应用来说,惯性参照系起着“实验室模型”的作用,那是经典力学诸定律被证明为有效的,或者假设为有效的思维模型。实际上一种实验室模型也能够适用于明显有加速度的参照系,就像所有地面上的实验室那样。然而,实际上的实验安排很难作为对力学的批评家们——尤其是 19 世纪下半叶的——所提出的基本问题的回答。

但对经典物理学的概念基础的哲学批评,明显不足以引起人们对于处在它的各个分支领域之间的边界上的问题的爆炸力的关注。它仍然只是一种批评,并且没有满足一种适当的关于可利用的物理知识——可以公平地处理在那些边界上产生的张力——的概念基础的挑战。无论如何,作为从方法反思这个特定水平上来应付这种张力的巨大的诱惑的一种哲学批评,它是了不起的。

不可见的机制

从近代科学开始之际,“不可见的机制”(unsichtbare Mechanismen)就是把观念的大厦扩展到超出原来要提供答案的那些问题的范围的一种典型工具。不可见的机制通常是来自于物理学知识,特别是直觉的物理学——如一种刚体模型或者液体模型——的熟知领域的思维模型产生的。如果人们假设一种不可见的机制,实际上代表了某些有理由仅仅是部分地或者间接地可被感觉经验接受的、例如原子那样的概念,那么这种机制就能够成为知识综合的一个起点,因而在这种情况下,这种机制的基本元素就会成为原子论这样的普遍适用的理论框架。在 19 世纪提出的用原子的运动来解释热现象的方法,是力学扩展到超出它的直接应用领域的最熟悉的例子。当热力学正在建立成一门物理学理论的独立分支时,热作为运动的模型获得了新的意义和一种新的认识地位,现在它搭建了在那时候的物理学里的两个独立支柱之间的一道桥梁;而且这一模型还使得在热机中的热能和机械能之间的转换变得可以理解,从而支持了新兴的热力学。这一支持又反过来使力学自身受益,因为热的运动理论把热力学的进步转移到对力学的挑战,最终又导致现代统计力学的诞生。这门新的理论也可以应用于非经典问题,我们将在下一章里讲到这个问题。

98

热的运动理论展示了处在力学和热力学之间的边界问题的状况的某些方面。这一理论特别应用于热过程的不可逆性,这是热力学和力学之间的主要差别之一。如果把两种温度不同的流体混合起来,混合物将采取一个中间的温度;而根据热力学第二定律,这一过程是不可逆的——混合物决不会自发地分离成一个较冷的部分和一个较热的部分,至少在不做功的条件下不可能做到。与热力学所描述的过程不同,假如时间的方向反转过来,力学规律不会发生改变。这一对比最终成为气体运动理论发展中的最重要的问题之一。

从经典力学的早期开始,不可见的机制就用来说明像引力、电力、磁力等

超距作用,或者用来说明光的传播,这些都是基于我们对力学过程的日常经验看来特别感到神秘的效应。例如,光的传播的不可见的机制。把光想象成一些微小的粒子的运动,这首先是牛顿及其后继的追随者所主张的。但克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens)和后来19世纪下半叶的大多数物理学家则认为,光是一种不可见的连续介质——光以太的运动。根据一种思维模型,把以太理解为在直觉物理学里所熟悉的、类似于水或者空气那样的一种媒质。这些媒质表明了,如何可以不需要一种物质运输的过程,而仅仅靠在媒质中局部扰动从一点到下一点的传播,就能够理解一种物理效应的传送,就像水波或者声波那样。

直到19世纪末,经典物理学的边界问题给不可见的机制以深远的影响,但这些影响是逐步才显现出来的,并且有一部分仅仅是在问题实际上解决了之后。这种影响的原因总是相同的:不可见的机制的起源是直觉的和实际的知识,如关于物体在空间和时间中的行为,后来碰到了那些需要满足从不同的经验领域提出的要求的边界问题。

像以太或者原子论一类的不可见机制的基本特性,即使在经过了理论的更替之后也经常保持不变,只有在知识的综合进步投射在知识构造上引起了会导致它瓦解的反响时,才会出现危机。随着对一种不可见机制的要求不断增加,这就出现了典型的——人们称之为“费加罗问题”——要求过度(Überforderung)问题,就像博马舍(Beaumarchais)和罗西尼(Rossini)笔下的费加罗(Figaro)那样,必须同时对付多个互不相容的任务。^① 首先,这样的一种在过多的要求下就变得无用的机制,当然可以令人信服地换成另外一个被认为是更合适的机制,正如令人信服地把热作为一种物质的图像换成热是一种运动的图像一样。但通过对不同的可能性的认真研究,最后倾向于这样的认识:用不可见机制综合经典物理学知识的失败,不在于所选择的正确的力学解释,而在于把这些机制同经典物理学的直觉的和实际的知识基础捆绑在一起。从经典物理学到现代物理学的转变确实是以第一次用同样具有普遍

① 法国剧作家博马舍(P. A. Caron de Beaumarchais, 1732—1799)著有以费加罗为主人公的三部剧作,后来意大利音乐家罗西尼(G. Rossini, 1792—1868)将其中的《塞尔维亚的理发师》谱成歌剧。剧中的费加罗(Figaro)是一个机智的“多任务”角色。——译者

性的理论模型替代直觉的和实际的模型为标志的。我们现在将通过以太模型和原子模型这两个例子来说明这点。

以太模型

在以太观念后面的是物理效应如何能够不靠可以感知的物质输运而传送的问题,就像上面提到的超距作用那样。这种解释的一个可能的候选者是基于一种连续介质模型的不可见机制。在光的情况下,当光的波动性在 19 世纪上半叶被发现之后,这种解释得到了强有力的支持。的确,如果把光解释成一种光以太状态的变化的话,光的波动性质就是很自然的结果。当麦克斯韦正在研究电磁学的时候,他认识到光是电磁辐射的一种特殊情况,从而使光学成为电动力学的一部分。因为麦克斯韦的电动力学也是以一种以太模型为基础的,从此电磁以太就起到了光学以太的作用。 100

一般而言,一种在直觉和实际知识上综合出来的不可见机制,通常都比那些只用来说明物理过程所必需的(知识)具有更多的性质。即使电动力学以太不是由通常的力学经验直接提炼出来的,但它的基本设计仍然是一种力学的媒质。另一方面,很难为这种以太构造一种满足随后的一些要求的力学模型:这种模型既要能够得出包含在麦克斯韦理论里的丰富的电磁学和光学的经验结果,又要与其他领域的物理知识相容。仅仅为了解释光的性质,需要的是具有一种弹性媒质的力学性质的以太,不过这种媒质不能够使像地球和太阳那样巨大的物理质量在其中运动时遇到阻力的影响。而且,为作为一种力学媒质的以太假设的特性,使得以太必须相对于它所浸入的宏观上可观察的物体或者是静止的,或者是运动的。这个有两可答案的物体后来在处理运动物体的电动力学和光学的边界问题上,引出了极为丰富的结果。

早在 18 世纪物理学家就已经知道了的光行差现象,是有利于一种静止以太的主要论据。这一效应可以追踪到由一颗恒星发出的光的速度和地球运动的速度的叠加,使得星光就好像是从另一个方向来到似的,星光偏离的角度则取决于地球的运动方向。光行差亦容易从日常经验得到理解。垂直

落下的雨丝加上一个步行者的运动,使得步行者必须把他的雨伞稍微倾向前方以避免淋湿,因为对他来说,雨丝就像是从一个倾斜的方向落下来。

101 假设光是在一种类似于以太的媒质中的波动,我们只能够以引进以太处于静止状态的额外假设的这种简单方式来进行论证。由于通常我们还必须考虑光在望远镜里的玻璃透镜一类的透明介质中的传播的事实,从而导致了一个额外的困难。但在折射的介质中光速随折射率而变化,使得我们看到的恒星位置产生轻微的晃动,这种效应取决于光在其中传播的媒质。光行差终究是两种速度叠加的结果,而当光在媒质中传播的时候,其中的一种速度在变化。但观察表明,无论光是在真空中还是在一种透明媒质中传播,光行差都是一样的。这一事实在1818年被奥古斯丁·菲涅耳(Augustin Fresnel)解释了,他假设随着地球的运动穿过本来是静止着的以太这种媒质,以由它们自己的速度决定的一个确定的比率,曳引着一部分以太随着行进。这一假设正好补偿了通常的光行差效应依赖于折射率的偏差。巧合的是,同样的补偿也发生在所有其他的折射现象中,因而它们的行进就像地球完全没有穿过以太运动一样。因此在这些光学现象里不能够检测到这样的运动。

但是,这种由运动媒质拉动以太的真正意义是什么呢?如果以太实际上被曳引了,那么光速也应当随着这种曳引运动而变化。这是阿尔芒·斐索(Armand Fizeau)在1851年进行的实验研究中的中心问题。他研究了光在流水中的传播,以测定光速依赖于媒质速度的变化关系。他的实验提示了在实验室里测定的光速与在流水中的光速之间的关系,有利于以太在一定程度上被流水曳引的机制,并且近似地证实了菲涅耳的曳引假设。只是在30多年之后,这个实验才以更高的精确度被重复,确认了菲涅耳的结果。在普遍假设存在着静止以太的背景下,现在就有了如何解释以太会被运动着的媒质轻微曳引前行的问题。

102 然而,一种以静态以太为基础的理论要遇到许多更加严重的问题。物体在一种静态以太中的运动,应当表现出一些可以观察得到的结果。但假如真的是这样,以太模型就不能够与经典力学里的相对性原理相调和,根据这条原理,同样的物理定律必定在代表着互相做匀速直线运动的两个惯性系的实验室里都同样成立。由于以太模型意味着相对于静态以太的光速必定总是

相同的,而与发射光的物体的运动状态无关,所以相对性原理被破坏是这个模型的一个不可避免的结果。例如,在同时做(匀速直线运动)的两个实验室里测定光速,那么这两次测量就不可能得出同样的结果,因为其中至少有一个实验室必定相对于以太在运动着。在一个单独的地面上的实验室里,也可以做出接连测量光速的一种更简单的布置,在这种情况下,首先光线是在地球运动的方向上穿过以太来到的,然后用一面反射镜把这支光线偏折到与地球运动方向相垂直的方向。这一类的实际实验是由阿尔伯特·迈克耳逊(Albert Michelson)和爱德华·莫雷(Edward Morley)完成的,他们得到的结果是地球通过以太的速度对光速没有影响,并且可以简单地说没有检测到“以太风”,这一术语是对在快速行进的列车上体验得到的空气拂过的“风”的一种模仿。因而,在这一点上,运用以太模型对光学效应的解释触到了一个悖论:一方面,由对光行差的观察和斐索所做的那一类实验,要求一种本质上静止的以太;另一方面,穿过这种以太的运动并不表现出按照这种以太模型所应当具有的物理效应。

原子模型

原子论是主张物质是由微小的不可见单元组成的学说,在19世纪时经常使用它来说明物理学和化学里许多不同领域内的现象,虽然起初这些说明并没有一种总体的语境。19世纪晚期的原子论与古代的和近代早期的原子论是不同的,因为它是一种富于弹性的概念性工具,而不是一种关于自然界的普遍理论的基础。在这方面一些突出的例子包括洛伦兹提出的麦克斯韦电动力学的原子论版本,即所谓“电子论”,以及电解质导电的离子理论,和在有机化学和无机化学里原子模型的应用。

103

所有这些原子论的不同变种清楚地表现出它们共同的起源。它们都把关于一种固体的思维模型从直观物理学转换为一种不可见的微观世界。原子被想象成类似于我们的宏观环境中的物体,是一些在空间和时间中占有确定位置的可以逐个辨别的单元,如果它们不结合在一起的话就能够彼此独立

地运动。此外,它们还被赋予一些在我们的宏观经验中的物体熟悉的进一步性质,例如形状、硬度和电荷等等。赋予它们的具体性质取决于特定的语境:洛伦兹的电子论当然假设原子能够携带电荷,而气体的运动理论则一般地设想它们是弹性的微小台球;在化学里,化学反应定量关系的复杂性被约简为关于分子中原子组成的一些简单的假设。

尽管原子的假说这样广泛地以各种方式被使用,原子是否真正存在的问题仍然在争论之中。把原子的观念适应于不同的一些学科分支的十分特别的说明性要求,导致了在上面提到过的费加罗问题意义上的相容性。例如,气体运动理论并不明显地与电学理论里理解的原子论相容,更不要说化学里的原子论了。

104 在化学原子论里原子是与物质守恒的观念相联系的,并且因而使得它自己早期能够说明可逆的化学反应,只要假设原子有一些不同的性质。第一个关于物质的不连续性质的提示,是在19世纪初由约翰·道尔顿(John Dalton)提出的对一种元素在不同的化学化合物里的质量比可以由一些小数目的整数来表征。除此之外,这一提示亦来自一个同原子论应用的中心范围相距甚远的领域,即17世纪和18世纪的机械论的科学。因此,非常难以确立道尔顿对原子论的说明与自然科学其他分支之间的关系。提出一种物质的原子建构的一致性观念是困难的,因为为了把物理学和化学知识联合起来,人们需要对于原子的结构和性质做出一些那时候看来难以接受的假设。

尽管原子论的发展——由约翰·道尔顿和洛伦佐·阿伏伽德罗(Lorenzo Avogadro)在世纪之交开始——遇到了很多困难,但也被证实为是适当的,因而是对可解的谜团的一个挑战。关于化学化合物仅仅是凝聚起来的知识,本质上亦足以把原来的微粒概念解构到“原子”和“分子”的概念里去,使得能够把反应方程式与求和公式纳入到大多数无机化合物的一种一致性关系里去。1860年在卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)举行的化学大会上,意大利化学家斯塔尼斯劳·坎尼扎罗(Stanislao Cannizzaro)特别对化学和物理学里的原子概念的分离提出了抗议。

然而,那时候的物理学还远不能说明化学里的原子概念。支配着化学和物理学概念的紧张状态,特别表现在有机化学里。在这里,19世纪产生了一

个关于分子的新概念,最先以所谓“结构理论”的名称来表达自己的,根据这种理论,化合物的结构最少是与它的物质组成的化学行为同样重要的。在一个分子里各个原子之间的相互作用现在不再被当做是互相的化学吸引,而是被当做一个原子对另一个原子的、由所参与原子的化合价决定的有规则的附着形式。这一发展一方面导致了一种延续了原子模型内部差别过程的不可见的分子几何模型,而另一方面亦导致了那些既不是凭普通想象亦不是在同时代的物理学理论里变得似是而非的分子里的原子之间相互作用。原子模型的这些观念是打算专门用来把化学知识组织起来的,而不是拿来综合到一种更广泛的理论语境里去的。

原子论在其中起到关键作用的另一个问题是关于热的本性的问题。在近代早期的时候已经有了这样的观念,认为热可以归结为一些微小粒子的运动,而通常像是一些特别的火粒子或者热粒子。因而这种热像物质那样运动的力学观念可能向两个方面发展。一是热像一种无重的流体的理论。18世纪的量热学实验就暗示着热可以存放到适当的“容器”里并且可以从一个物体“流”向另一个物体;热倾向于扩散开来并且尽可能地填满它的容器。因此热的行为像一种流体的观念,似乎与普通的流体不同,它是一种“无重”(imponderabel)的流体,意思是没有通常的重量。这种流体模型不仅可以解释在直觉物理学里熟悉了的热现象,而且也可以解释一系列的实验结果。这里面包括不同物质比热的差别,以及热在化学反应中的参与,即在化学反应中或者吸收热或者放出热的现象。

另一方面,有一些很早的尝试,把热仅仅看做是微粒的运动。虽然那时候有可能提出服从经验的气体诸定律的原子的力学模型,但在19世纪中叶之前这种观念并没有流行开来:首先,这种观念没有比关于热的物质理论提供更多的好处或者额外的解释能力;其次,那时候在物理学的其他部分里,例如在电学里,占支配地位并起着关键作用的亦是一些无重物质的观念^①。在19世纪上半叶,一系列的发展对热的流体模型提出了怀疑,转而支持热是原子甚至是以太的一种运动的观念。按这种方式形成了热和光相似的思路,例

① 例如“电流体”。——译者

如谈到热的反射和折射等现象。机械能与热能够相互转化的事实大力支持能量守恒定律建立之后,热作为一种物质的观念就变得完全过时了,于是有可能设想,通过一种热的运动理论证明力学是热学理论的基础了。

106 这种运动理论的进一步发展带来一种对原子论来说至关重要的理解,即关于整体及其各个部分的关系的理解。原先没有理由假设单个原子的行为本质上与许多原子的集合有什么不同。这一假设在气体运动理论里出现了困难的第一条线索是气体的缓慢扩散与运动理论所要求的气体原子运动的高速度之间的矛盾。后来这一困难在根本的层次上重现为宏观变化的不可逆性与原子运动的可逆性之间的矛盾,这是与在力学和热力学之间的边界问题的讨论有关系的。我们将更加详细地回到这些困难上来。

在物理学历史上第一次对两个问题的解答都求助于统计观念,那是在种群理论(Bevölkerungstheorie)里提出来和运用过的理论。因此原子论不再仅仅依据直觉物理学的聚集模型,在那里各个部分和它们的组合物之间是没有根本差别的,而且依据一种由科学创造的思维模型,在这种情况下重要的是统计行为。这种新的模型现在能够正视部分和整体表现出的不同行为了,并且开辟了区分原子行为的差别的新的可能性,同时并不需要任何与此对应的宏观差别。例如,在气体的热力学理论里,像麦克斯韦和玻耳兹曼研究过的那样,并没有与气体分子速度分布相对应的宏观等价物;另一方面,气体运动理论里亦没有与这种分类的可能性相对应的原子内部结构的差别。与此相反,原子一般处理为力学意义上的质点,并且我们将会看到,这种原子的模型在证实了它们具有各种不同的内部结构之后就会出现危机,就像不仅从已经讨论过的化学模型,而且也直接从光谱分析中将会看到的那样。这不仅说明分子的复杂组成的问题,而且是在原则上什么样的热学理论可以同
107 化学以及其他领域的可用知识相容的问题。

尽管 19 世纪存在引起对原子假设怀疑的、在原子论的各个分支之间的这种相容性问题,累积的线索表明这一假设会继续在物理学的观念基础上发挥作用。到了世纪之交,出现了越来越多的机会使用古老的原子假设作为一种解释性的模型,特别是对于在实验研究的前沿正在产生的新知识。这样的例子层出不穷:一些新型辐射的发现,提出了它们由波动还是由粒子组成的

问题,例如塞曼效应和光电效应之类的物质和辐射之间的相互作用的研究。这些效应确认了物质的原子式模型,或者给出创建新模型的刺激;对溶液的微观研究,弄清楚了某些溶液不是均匀的而是悬浮着许多胶状微粒。还有其他许多例子。

现在令人惊奇的是测定阿伏伽德罗常数所使用的方法的多样性。阿伏伽德罗常数是在一克分子^①物质里的分子的数目,用来测定它的方法是多种多样的,包括流体的毛细管效应、气体运动理论、用薄膜做的实验,令人惊奇的是,还可以通过对热辐射的测量来确定这个常数。于是,对微观世界尺度的估计,竟可以借助这样一些不同的方法测量出来,其结果至少在数量级上是彼此符合的。这些结果不但加强了对原子假设的信心,而且越来越紧迫地要把原子假设应用的各个方面彼此联系起来,以构造能够与所有可利用的认识相容的、原子的一种单一的模型。

对于像以太和原子一类的不可见机制面临的挑战的最终分析,关系到物理学各个分支的综合,以及统一它们的概念的能力。然而,对于这样一种统一的基础的见解变得越来越成问题了,只要没有别的选择,这些分支就必须与力学领域里的直觉的和实际的知识结合。人们仍可证明,有可能发现经典物理学边界问题的解,该解公平地处理了可利用的经验知识。当每一个这样的解自身显示得好像是经典物理学的胜利时,它们的总体则无可挽回地要让位于新的理论了。 108

运动物体的电动力学

显然,经典物理学的衰落看来是一个坚定不移的趋势。对于上面讨论过的每一个边界问题,物理学家手头不止有一个可以解决的方法,但真正的进步看来倾向于一种完全的和满意的解。电动力学的领域无愧为一种有助于解释那时候已知的电磁现象和光学现象的理论,包括解释从那些互相在做匀

① mole,原称“克分子”,现在叫做“摩尔”。——译者

速运动的参照系过程里观察到的现象。尽管麦克斯韦的电磁学理论许诺把光学现象和电磁现象结合到一个统一的基础之上,但正是洛伦兹 1875 年在他的博士论文里才真正开始系统地探索这一综合。

但电磁理论扩展到光学现象之后,亦继承了上面提到过的所有那些问题,这些问题与地球穿过以太的假想运动有关,并且从 19 世纪初就已经在光学的语境中展开了讨论。洛伦兹的理论是建筑在静止以太模型的基础之上的。这种理论关于一种绝对静止的以太的假设受到无数论据的支持,其中包括已经讨论过的斐索实验,根据这个实验,斐索通过研究在一种运动媒质中的波动传播,可以提供一种可信的解释。

洛伦兹假设以太不再遵循牛顿运动定律,而且它的行为完全由电动力学的定律决定。洛伦兹的以太对它所包容的物体施加以力,而以太自身却不会受到在牛顿关于作用等于反作用的定律里所说的反作用力。为了描述普通物质在电磁场中的行为,肯定不能避开力学定律,洛伦兹就在他的理论里,在以太之外再加上原子论的不可见机制。在他的假设里,物质是由带电的基本粒子组成的。

然而,这些粒子本身又是在普通的力学经验里的离散个体观念之上形成的,并且遵从着力学的定律,而根据洛伦兹,粒子所带的电荷是与以太有相互作用的。这种相互作用的机制是宏观电动力学里电介质媒质与电荷的相互作用的模仿。这些电荷的存在使周围的以太生成了相应于一种电磁“场”的特殊状态,因此它在以太中的传播就会影响其他电荷。场概念的引入根本上是对于汉斯·克里斯蒂安·奥斯特(Hans Christian Oerstedt)、安德烈·马里·安培(André Marie Ampère)、迈克尔·法拉第(Michael Faraday)和其他人的贡献的反应,他们的工作表明,两个粒子之间的电磁相互作用影响的特性,可以用在它们周围连接着它们的力线来表示。

根据洛伦兹的理论,电荷只是通过产生场来同以太发生作用,并且亦受到由场对带电的基本粒子施加的“有质力”(ponderomotorische Kraft)的作用。洛伦兹在他的理论里成功地综合了电动力学的定律和力学的定律,使用了涉及两种具有完全不同的本性的实体的复杂的不可见机制;其代价则是在场和物质之间的一种本质上的二元论。

从技术上讲,洛伦兹的理论仍然没有得到修正。他甚至写下了从一个静止参照系中的已知定律导出在一个运动参照系的现象的变换公式,他第一次在1895年给出了近似的公式,然后在1899年是精确的公式,最后在1904年有了一个综合的系统理论,并且运用他的变换就能够在原则上解释运动物体的电动力学的所有现象。法国数学家庞加莱称之为“洛伦兹变换”,而这一变换后来成为相对论里的核心特征。洛伦兹理论的成熟形式已经包含了从今天的相对论得出的许多重要的现象,例如从不同的参照系观察到的同一过程的长度收缩和时间延缓的效应,还有物体的质量随其速度而增长。然而,在洛伦兹的理论里,这些问题仍然具有与相对论不同的意义。 110

为了解释一个地面上的实验室穿过静止以太的运动没有任何观察得到的效应,洛伦兹自己看到他关于电动力学的成功理论在这上面还是有欠缺,需要加上一个关于穿过以太运动的物体行为的假设。1892年他已经给运动参照系引进了一种当做辅助变量的新的时间坐标,由此他就可以解释为什么用地面上的光源所做的实验,不会由于穿行以太的运动而产生 v/c 量级的效应(v 是这种假想运动的速度, c 是光速)。后来他又为了解释能够检测到 $(v/c)^2$ 量级效应的迈克耳逊-莫雷实验的零结果,而引进了在运动参照系里长度收缩的假设。

由于那些辅助假设而扩展了的理论,不再受经典物理学概念基础的束缚。他引进了在运动参照系里的长度和时间的特殊的辅助量,扩展了洛伦兹电动力学的表述,增加了一些从经典物理学看来其物理解释成问题的要素。洛伦兹关于运动物体的电动力学的公式依然与所有可利用的知识相容,特别是甚至与力学里的相对性原理相容,而这一原理是与一种建筑在以太基础上的电动力学不相容的。

洛伦兹对他的坐标变换有一种特别的解释,而这种解释与后来的相对论根本上是不相同的。对他来说,那不是个变换的问题,不是一个保证在静止参照系里的诸定律亦能在匀速运动的参照系里生效、因而能够满足相对性原理的问题。洛伦兹坚持的是经典力学里的所谓伽利略变换,它只能保证力学里的相对性原理的有效性。对洛伦兹来说,他所提出的变换完全不是为了取代经典力学里的变换,而仅仅是一种补充条件。它们首先属于电动力学,

111 并且是他的所谓对应态定理的一部分,再运用上面提到的那些辅助量,就可以预言在运动参照系里的电动力学过程。在洛伦兹的解释里,这些过程是真正进行的过程,它们遵循着与以太静止时的同样过程里十分不同的一些定律。通过运用他精心设计的一些辅助量,洛伦兹成功地证明了,这种按特定定律运行的过程,不会对可观察的现象留下什么痕迹。但他没有把他关于在运动参照系里的空间和时间的辅助量,看做是直接的观察量。

总而言之,洛伦兹理论超常的经验上的成功,以及导致这种成功的复杂构造和所用到的论证,让它非常有名。此外,这一理论拥有在它直接有效的区域之外的许多问题的答案,例如它关于以太的基本假设与力学原理的相容性的问题;由此它提供了一种哥白尼过程的自然出发点。在什么程度上可以把从洛伦兹理论到相对论的过渡看做是一种哥白尼过程呢?我们将在下面更详细地讨论这个问题的答案。在这里只限于指出:在洛伦兹的理论里以太是一个中心的概念,而空间和时间的那些新变量仅仅是一些辅助量。如我们将在第四章中看到的那样,在相对论里以太的概念不再起任何作用,而在爱因斯坦革命的中心,洛伦兹的那些辅助变量则变成了关于空间和时间的基本概念。在这种概念中心的移动里,特别是在相对运动着的参照系之间的洛伦兹变换里,几乎没有触及演绎方法。

统计物理学

112 在力学和热力学之间的边界问题上,亦接连发生一种可相比拟的情况。在这里也有这些问题的几乎完全的解,但它的特征加剧了在经典物理学里有关分支的概念上的冲突。正如我们看到的那样,19 世纪的统计物理学是怀着把力学的原理扩展到整个热现象领域的热切期望而发展起来的。麦克斯韦和玻耳兹曼关于气体运动理论的工作,就是以这种期望作为坚固的基础的。它们建立在气体作为在空间中自由运动且偶尔相互作用的粒子的集合这种思维模型之上,假设这种相互作用会把动能均匀地分布在系统之内,直到达成一种作为热平衡状态特征的统计上均等的分布。运动理论可以

解释宏观系统的许多掩藏在只是描述性的或者“唯象”的热力学中的性质,而它们是不能够用一个系统的微观组成来直接说明的。

此外,运动理论产生了一系列关于气体的微观组分的惊人预言,例如以麦克斯韦和玻耳兹曼的名字命名的分子速度分布。关于这种分子按不同速度的分布遵从类似于众所周知的高斯钟形分布的概率定律,我们已经在关于原子的不同行为的讨论中指出过。它规定了在一个给定温度中的具有特定温度(范围)的分子所占的比例。这种分布又是把气体理解为一种统计系统(达到平衡状态)时的临界条件,特别是它使在力学的基础上说明扩散之类的气体的输运性质成为可能。

然而,如上所述,运动理论仍然面临着一些巨大的困难。它们是一些根本性的困难,以至于激起了原子和分子是否完全不存在的疑惑。有两个特别突出的这方面的挑战:一个是对于在热平衡时能量均等分布的怀疑;另一个是对于达到热平衡的过程的怀疑。根据所谓能量均分定律(Gleichverteilungssatz),气体原子成分的每一个自由度都贡献等量的平均能量,因而亦贡献等量的气体比热。考虑到对气体的化学组成以及特别是对关于自由度的光谱分析,从对气体比热的测量结果来看,人们不得不断定,实际并非如此。麦克斯韦甚至相信,没有前后一致的分子的力学模型能够说明比热问题。如果加上转动和振动自由度的考虑,只会使比热的值更加远离实验的结果。因此,麦克斯韦正确地主张:

在这里我们面对面地站在直到现在分子理论一直面对着的最大困难。(Maxwell 1890, S. 433)

但即使是对由简单原子组成的气体那样的系统,能量均分定律也并不是完全微不足道的,因为它毕竟有太多的自由度,其行为尚待分析。为了绕过那些在确定这样一个具有许多自由度的系统的时间演化中的不可克服的困难,玻耳兹曼引进了“虚系综”(virtuelles Ensemble)的概念。在这里,用对由原来系统的无数个复制品组成的系综的分析,代替了对一个系统的时间演化的分析;系综里的各个成员都遵从同样的动力学定律,但分别相应于在系统满足的条件下的所有可能的初值分布。玻耳兹曼成功地证明了在这样的一

个系综里的能量均等分布。但不清楚同样的手续能不能应用于更复杂的系统或者甚至是像热平衡中的辐射那样的非力学系统,或者在一块金属里的自由运动的电子,特别是当我们考虑到对于这些系统的动力学细节所知甚少的情况。在玻耳兹曼关于气体理论的主要著作里,他自己确实很努力把关于能量均分定律有效性的结论与这样一些复杂系统联系起来,并且在这样做的时候要依靠追加的一些经验事实。最重要的事实是一个物体将会达到与其初态无关的一个稳定的末态,在其中可以观察到的对它的微观参数的最终平均,总是采取同样的一些数值。

114 但正是这种过渡到热平衡状态的过程,使运动理论面临着上面提到过的两个巨大的困难:在力学的可逆定律和热力学过程的不可逆性之间的紧张关系。为了证明麦克斯韦-玻耳兹曼分布是由运动理论描写的一个物理系统的唯一的平衡态分布,玻耳兹曼追踪一个系统从一个任意初态到平衡态分布的演化过程。他引进了一个 H 函数来表征在每一时刻的状态,并且证明了他的著名的“ H 定理”,按照这条定理,这个函数必定是严格随时间减小的——除非已经精确地达到了麦克斯韦-玻耳兹曼分布,这样就使我们认识到那是仅有一种稳定分布。此外玻耳兹曼指出,与麦克斯韦-玻耳兹曼分布对应的 H 函数乘以 -1 ,就等于由克劳修斯引入的、描写系统的熵。因此他提出,函数 H 可以被看做是熵概念的一种推广,因为它总是随时间增加的性质,对应于由热力学第二定律所要求的自然过程的熵增加。

但在 1876 年,奥地利物理学家约瑟夫·洛施密特(Joseph Loschmidt)提出反对意见说,由力学定律的可逆性必定能够推知,对于每一种 H 函数减小的演化过程,必然相应地存在着一种 H 函数增加的反过程。那么, H 函数怎么能与熵联系起来呢?为了回答这一悖论,玻耳兹曼引进了 H 函数的一种统计解释,并且主张,我们可以证明,导致平衡状态的那些初态的数目远远大于在一段给定的长时间内能够达到非平衡态的那些初态的数目。但即使是给出了这种新的解释,玻耳兹曼也没能堵住他的批评者的口。无论如何,这一进展必然导致对经典热力学基础的修改,因为这一解释注定要违反热力学第二定律,根据玻耳兹曼,这条定律就不能说是绝对成立,而只能说是在统计意义上成立。

布朗运动之谜

对热力学第二定律的统计解释的怀疑,也是用悬浮粒子和溶液分子之间的碰撞来解释布朗运动的一个严重的障碍,因为那时候布朗运动把热力学第二定律的难以接受的统计特征摆到人们的眼前了,它的确代表了经典物理学的一个真正的边界问题,其意义在于它是对经典的、唯象的热力学,也是对热力学的副本——热的运动理论的挑战,在这一理论里对一个具体的研究对象运用了在重叠的领域里的各种不同的观点。从纯粹的运动理论观点看,我们确实可以把一个物体看做是一种巨大的原子或者分子,它总是经常受到它的许多较小同伴的冲击,从而参加到后者的热运动里去。从力学的定律,我们可以计算出这些原子在所占有的热能份额下的平均速度,但又不可能把计算出的悬浮物体的速度与观察到的这些物体的实际运动联系起来。 115

让我们更深入地看看布朗运动的历史。上面已经提到,对这些在液体中做不规则运动的微小粒子的观察,可以回溯到植物学家罗伯特·布朗(Robert Brown),他在1828年发表了他细心观察的结果。他研究了悬浮的液体中的许多不同种类的微粒——从植物花粉到埃及狮身人面石像的碎末,并且亦探究了各种各样的可能原因——从液体中的暗流涌动到微粒与液体中形成的小气泡的相互作用。

布朗及其后继者沿着这一途径,成功地排除了许多关于那些悬浮微粒的不规则运动的潜在解释,特别是这种现象涉及有机物质的一种独特性质,以及是“生命”的某种表现的观念。然而,至少直到19世纪中叶,布朗运动仍然没有成为在物理学家当中受到广泛关注的一个课题。在那时候一系列的论文谈到布朗运动所受特殊条件的影响,例如液体的温度、毛细效应、液体中的对流、蒸发、光投射到微粒之上、电力或环境的影响。

从今天的观点看,这些早期的研究也许会显得没有什么意义,是我们能够忘记掉的前期历史的一部分。但物理学家们的集体智慧终究被证明在把布朗运动认作热运动的一种形式的过程中做出了至关重要的贡献:首先,从 116

整体上看实验表明了这种现象是无处不在的；其次，他们排除了一些先验上是可能的、但依赖于现象得以产生的特殊情况。爱因斯坦那么快就对布朗运动做出解释，被看做是他所依据的物质原子结构的明证。尤其是考虑到差不多一个世纪以来尝试过的对布朗运动的各种不同的解释在经过透彻的检验之后最终都被放弃了的事实，就更显得如此了。

从 19 世纪中叶开始，许多科学家把热的运动理论看做是布朗运动的一种可能的解释。这一点也不奇怪，因为运动理论成为了在力学的基础上说明热现象的一种越来越有用的工具。在这一参照的框架之内，有很多因素可以考虑用来说明布朗运动，例如液体的温度和黏滞性、粒子和液体的不同比热，以及粒子的大小和速度。此外，还有在运动理论领域之外的因素，例如电的相互作用，仍然不能够排除并且刺激着进一步的研究。但这些现象的潜在的复杂性不是它依然是一种“认识上的孤立”的唯一理由，并且在热的运动理论研究的主流中不会变成一个关键的论题。

布朗运动在 19 世纪物理学里的边缘角色亦与由运动理论出发的看法相关。如果把热解释为一种运动的观点正确的话，它的实际焦点更多关注于唯象热力学定律的重构，而不是发现对于这些定律的背离，即使必然会出现统计涨落的现象。例如，玻耳兹曼的气体理论明显排除了气体中的分子的热运动会导致可以观察到的涨落效应的可能性。另外一个边缘化的理由是把运动理论应用于布朗运动的固有困难。

117 从 1870 年起不少科学家探究过布朗运动可以解释为悬浮粒子受到液体分子接连碰撞的观念。然而当对布朗运动的运动理论解释变得越来越像有道理之时，一旦做出定量的论证时就出现严重的问题。1879 年，细胞学家卡尔·冯·耐格里(Karl von Nägeli)提出了一个反对布朗运动的运动理论解释的观点。它是以上面提到过的能量均分定理为基础的，根据这一定理，一个处在热平衡状态的物理系统的平均能量，均匀地分布在系统的每一个内部自由度上，而且每一个自由度分配到的能量与其绝对温度成比例。于是就可以算出液体分子的平均速度，再运用弹性碰撞的定律，就可以得出悬浮粒子的速度了。耐格里由此下结论说，这样一种相当大的悬浮粒子的速度小到难以察觉。

把布朗运动设想成一种与液体中的许多较小的分子一起达到热平衡的非常大的分子运动的解释中的内在矛盾,1900年被费利克斯·埃克斯纳(Felix Exner)所确认,而他实际上也是运动学解释的一个支持者。他做了多方面的实验,并且观察到了较大粒子的布朗运动的速度较小和这种速度随温度增加等与运动理论相符的定性结果。但当他运用他的测量结果去计算分子的动能时,他得到的数值比从热的运动理论预期的要小得多。因此,在世纪之交布朗运动已经成了对经典物理学的一场真正的挑战,即使这一挑战还没有被普遍认识到,因为大多数物理学家明显地把布朗运动看做是一个边缘问题。总而言之,在实际上排除了所有其他解释之后,运动理论成为了解释布朗运动的一种最切实可行的选择,但它并没有给出对现象的一种令人满意的定量理解。这种两难困境,只有依靠一种哥白尼式的进程中的重新解释才能加以克服。在新的解释中,先前关于布朗粒子的运动速度这个中心议题失去了它的关键地位。它的位置被统计涨落现象取代了,在本来的热的运动理论里,这种现象仅仅被看做是一个边缘的问题。

处在平衡态的热辐射

118

对于平衡态的热辐射这个边界问题,初看起来似乎没有那么矛盾重重,因为我们已经得到了这样一个解,看来基本上可以纳入经典物理学的框架之内。1900年普朗克成功地建立了一条黑体辐射能量的频率分布定律,它经受住了迄今为止的所有实验的检验。黑体辐射是一种理想的热辐射源的思维模型,假设它能够完全吸收任何入射的、各种波长的电磁辐射。这一由古斯塔夫·基尔霍夫(Gustav Kirchhoff)提出的概念,成为对处在热平衡状态的电磁辐射的理论和实验研究的基础。

从现代观点看,普朗克建立的定律代表着量子论的开始,因为在现代的理解里假设在一个空腔内部的平衡态辐射的行为不像波动的一种叠加,而像一些微小的不可分的能量子的集合,它们的统计性质不同于经典粒子。

从普朗克的博士论文开始,他的研究计划集中在热力学第二定律以及它

与力学过程的可逆性相反的性质。我们看到,玻耳兹曼尝试过通过给热力学第二定律以统计意义而消解力学与热力学之间的这一冲突;但普朗克第一个把他的希望寄托在电动力学上。他想他已经用一个电学振子的模型发现了一种在辐射的吸收和发射之间的不可逆的基本过程。我们可以把普朗克的振子想象成一个无质量的小弹簧,在其端点上载有电荷,可以往复振动。这样的一个振子可以吸收一列平面波,然后以球面波的形式重新发射出去。普朗克相信,这些振子的这种和别种性质,特别是辐射阻尼的现象,能够使它们在建立黑体辐射的热平衡中起到关键的作用。热辐射的问题就这样进入了普朗克研究计划的范围,好像迈克耳逊-莫雷实验进入洛伦兹的研究范围一样,都是作为当时被注重的中心问题的侧面进入的。

119

普朗克用电动力学来建立作为一条绝对有效定律的热力学第二定律的尝试中,最值得注意的一点是这一尝试同时拒斥了原子论和统计方法——即使这些研究最终从普朗克辐射定律导出了辐射的原子式构造。总之,普朗克在开始时相信,在以力学的原理为一方和以热力学为另一方的冲突当中,力学定律的可逆性本来会应用于原子的运动,因而亦应用于原子本身。1897年玻耳兹曼指出,电动力学的基本方程像力学的方程那样对时间是可逆的,并且因此不可能从纯粹的电动力学推出不可逆的过程。普朗克在接下来的研究里,一点一点地引进了他原先并不欣赏的、玻耳兹曼的气体理论里的方法,但没有接收其中的原子概念。他宁可在经典电动力学里补充关于热平衡中的辐射行为的一些独立的假设。由于这个原因,他原来的研究计划实际上失败了,因而对他来说,热辐射定律的探求便处在一个中心的位置上。

在普朗克推导黑体辐射经验上适当的定律的不懈努力中,至关重要的是实验研究的进展所起的作用,特别是塞缪尔·兰利(Samuel Langley)、弗里德里希·帕邢(Friedrich Paschen)、奥托·卢默尔(Otto Lummer)、彼得·普林斯海姆(Peter Pringsheim)、费迪南德·库尔鲍姆(Ferdinand Kurlbaum)和海因利希·鲁本斯(Heinrich Rubens)的实验。像洛伦兹改写他的电动力学以适合新的经验事实,却没有想到放弃他原来理论的概念基础一样,普朗克的下一步也没有超出经典物理学的概念体系。而且,像洛伦兹走向他的电动力学最终版本的道路的特点是相继引进了一个个辅助假设一样,普朗克通向他

的辐射定律的道路亦绝不是一帆风顺的。1920年6月2日,普朗克在他的诺贝尔受奖演说里回忆道:

当回顾20年前根据大量实验事实首次阐明物理作用量子这一概念及其大小,以及最终导致发现作用量量子的这一段漫长而曲折的道路时,我觉得整个的发展似乎是对歌德很久以前的一句名言提供了一个新的证明。这句名言是:“人要奋斗,就会有错误。”(Planck 1922, S. 148^①) 120

原先普朗克曾经尝试从热力学和电动力学的定律,推导出关于不同频率的热辐射能量分布的维恩定律。就像洛伦兹在面对迈克耳逊-莫雷实验的结果时需要做出新的假设一样,当普朗克在推导维恩定律时亦需要一条额外的假设,他发现了振子的熵的一道表达式,这一表达式很快就引起了争论。因此,普朗克的振子简直就是假设与热辐射达到热平衡的一种特殊的物质。有一些很好的理由期望这一规定大体上不会影响到他的论证。普朗克首先断言,他所假设的振子的熵的表达式是唯一能够与热力学第二定律相容的公式。但到了后来,由这一表达式描写的维恩定律与在帝国物理技术研究所对黑体辐射的新的测量不相符。于是,普朗克发现他自己不得不再次修改他的论证。

在这种反复修改的进程中,普朗克在接近1900年年底时,终于成功地推导出以他的名字命名的辐射定律。普朗克的推导运用了联系着系统的熵和对应于一个给定的热力学状态的微观排列的可能数目的玻耳兹曼公式。这道公式表示,熵正比于这种可能性即概率的对数。普朗克运用了对一组不同频率的振子的组合运算,确定了一种给定的能量分布的这一概率。玻耳兹曼型的组合技术的运用,实际上要求把振子的能量分割为一个个的单元。能量子就这样混进了经典物理学。普朗克自己并没有设想辐射的量子结构,也没有怀疑经典的辐射理论。在1907年写给爱因斯坦的一封信里他说得很清楚: 121

^① 中译文取自:《诺贝尔奖获得者演讲集》物理学·第一卷,北京:科学出版社1985年版,第358页。

绝对真空(自由以太)是否具有原子式的性质呢?由你的论述看来,在一个(有限)的空间部分中的电磁状态是由有限数目的量确定的,你对这个问题的回答似乎是肯定的,而我的回答,至少按我目前的观点,是否定的。因为我要寻找的不是真空中作用量量子(光量子)的意义,而是它们吸收和发射的处所,并且假定真空中的这些过程由麦克斯韦方程精确地描写。(CPAE 5, S. 49f^①)

像普朗克的大多数同时代人一样,他也尝试用一些有异于经典力学的概念去阐明作用量量子的意义,但适得其反的是,这样做的结果只是把经典物理学硬推向微观物理学的领域,在那里又肯定需要一些新的假设。换句话说,这里的宏观物理学与微观物理学的分野起到了一种,用伊姆雷·拉卡托斯(Imre Lakatos)的话说,“将怪物排除在外”(Monster sperre)^②的作用,从一开始就拦阻了引进作用量量子时的革命性结果。只是在多年之后,并且只有在爱因斯坦在他关于光量子假设的革命性论文里指出了热辐射的平衡不可能有经典解释之后,物理学界才认识到这种尝试是多么地站不住脚。

语境中的边界问题

总而言之,我们可以说 1905 年爱因斯坦掀起的、激发了我们上面讨论的边界问题的这场科学革命绝不是偶然的。即是说,这些边界问题关系到的不仅是任何单个的问题,而且是在经典物理学的各个板块之间的重叠区域上的问题,在那里高度综合了各种知识系统的碰撞。因为通过以太和原子一类模型的图像已经在很大程度上达到了这样的综合,因此经典物理学内部的概念冲突首先落在这些模型上了。这一背景亦有助于理解为什么在奇迹年里表面上显得很专业的那些论文,最终导致了以太的废除、原子存在的证实以及

122

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社 2002 年版,第 47 页。

② “将怪物排除在外”是拉卡托斯 1976 年在《证明与反驳》一书中首创的术语,是指将一个假说精致化,以便将令人厌恶的反例排除在外。——译者

光具有波动性也具有粒子性的惊人结论。

然而,只要人们坚持如下想法:即从经典物理学向现代物理学的转变本质上是由单独的个人在无形观念的密不透风的世界里产生,那么边界问题的冲击力依然是说不清楚的。事实上每一个边界问题都是知识体系发展的长期传统的顶点,每个个人都通过学习、运用和研究对其发展作出贡献。即使是爱因斯坦在他的著作里用来克服经典物理学内部矛盾的那些大胆观念和哲学论证,其根源亦在这种知识体系里面。

经典物理学的知识体系不仅由熟悉的专门学科组成,而且也包括哲学的、普及的和业余的科学传统,在这些层次上继续对科学概念进行的生动讨论,早就成为学院式的科学里的一种成规的一部分。例如,奥地利物理学家和哲学家恩斯特·马赫(Ernst Mach)对牛顿力学里绝对空间一类的基本概念提出批评,而法国数学家、物理学家和哲学家昂利·庞加莱(Henri Poincaré)在他的普及科学读物里讨论了在物理学里定义时间概念的别样方法。但在迎接20世纪之时,物理学的文化遗产发展得超出了对物理学基础的当代分析,并且亦超出了早期对自然界和科学的一长串哲学反思。然而,参与讨论这一问题的不同代表人物对这份遗产不是一味推崇,而是给出相去甚远的评价,而且被越来越专门化的趋势更加经常地推向背景之中。

经典物理学的知识体系中不仅包括理论知识的维护和发展,而且也包括在科学之内和之外的实验和技术经验的实际应用。在同时代的实际问题与独创性的实验和理论研究之间存在着密切的联系,即使是热辐射的能量分布或者关于空间和时间的新概念那样的抽象问题亦不例外。

例如,普朗克辐射公式不容置疑的成功,与对黑体的实验系统的健全密切相关,而它又是平衡态中的热辐射的思维模型的实际复现物。只有在这种稳定性的背景下,才可能对这样的一种黑体的辐射进行精确的测量,并且保证了普朗克公式理论上的可靠性,而不必顾及这一公式是否能够从经典物理学中推导出来。在帝国物理技术研究所里做的热辐射实验,目的亦在于设立一种在工业中用于灯泡亮度的测量标准。一般而言,在19世纪里电气工业的快速发展所导致的结果,形成了对电动力学以及它越来越精巧的实验技术起到突出作用的重要语境。化学工业的迅速发展也对化学和物理学提出了

新的挑战,使得越来越重要的物理化学和热力学成为化学过程定量化的基础。像铁路、电报和越洋电缆等新的运输和通信手段的网络的快速扩展,也对同时代的科学家和工程师在空间的配合和时间的同步上提出了新的挑战,并且肯定激励他们去思考这些概念的操作意义。简而言之,这些在传统的科学史中所喜欢讨论的话题,代表着的不僅僅是包括了技术人员和工程师的实际知识的,而且包含着以相对论之前关于空间、时间、物质的辐射的概念为标记的那些实际知识的那座冰山的巅峰。

从实际经验发现的知识的健全性,只有建立在经典物理学的边界问题的冲击力之上。这一点表现在经典力学大师们的几乎是无懈可击的成就上,具体表现在普朗克的辐射公式、玻耳兹曼的运动理论以及洛伦兹建立在麦克斯韦电磁学基础之上的电动力学理论上。

本章是对于作者原先部分地与朱塞佩·卡斯塔涅蒂、奥利维尔·达里戈尔(Olivier Darrigol)和西蒙娜·里格尔(Simone Rieger)等人合作的一系列论文的总结。

推荐读物

本章特别根据:

Renn, Jürgen. 2007. "Classical Physics in Disarray: The Emergence of the Riddle of Gravitation." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Introduction and Source. (The Genesis of General Relativity, Vol. 1., Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 250.)* Dordrecht: Springer.

Renn, Jürgen, Giuseppe Castagnetti and Simone Rieger. 2001. "Adolf von Harnack und Max Planck." In K. Nowak and G. Oexle (eds.) *Adolf von Harnack: Theologe, Historiker, Wissenschaftspolitiker*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, pp. 127—155.

Darrigol, Olivier and Jürgen Renn. 2000. *Statistical Mechanics*. Preprint No. 139. Max Planck Institute for the History of Science.

在这一章里用到的进一步的文献:

Barracca, Angelo et al. 1979. *Scienza e industria 1848—1915*. Bari: Laterza.

Beaumarchais, Pierre Augustin Caron de. 2001. *The Marriage of Figaro*. Translated by Stephen Mulrine. London: Nick Hern.

Boltzmann, Ludwig. 1877. "Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsätze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht." *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. MathematischNaturwissenschaftliche Classe* 86: 373—475.

———. 1964. *Lectures on Gas Theory*. Translated by S. G. Brush. Berkeley, CA: University of California Press.

Boltzmann, Ludwig and Fritz Hasenöhl (eds.). 1909. *Wissenschaftliche Abhandlungen*. 3 Vols. Leipzig: Barth.

Brown, Robert. 1826. *A Brief Account of Microscopical Observations on the Particles Contained in the Pollen of Plants, and on the General Existence of Active Molecules in Organic and Inorganic Bodies*. London: British Library (unpublished).

Brush, Stephen G. 1986. *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*. Vol. 1: *Physics and the Atomists*. Vol. 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*. (*Studies in Statistical Mechanics*, 6.) Amsterdam: NorthHolland.

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2: *The Swiss Years: Writings, 1900—1909*. Princeton: Princeton University Press, in particular:

"Einstein's Dissertation on the Determination of Molecular Dimensions", pp. 170—182.

CPAE 5. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5. *The Swiss Years: Correspondence, 1902—1914*. Princeton: Princeton University Press. 125

Einstein, Albert. 1907. "Die Planck'sche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme." *Annalen der Physik* 22: 180—190.

Janssen, Michel and John Stachel. 2004. *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies*. Preprint 265. Berlin: Max Planck Institute for the History of Science.

Lakatos, Imre. 1978. *The Methodology of Scientific Research Programmes*. New York: Cambridge University Press.

Loschmidt, Josef. 1876—1878. *Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft*. 4 Vols. Wien.

Maxwell, James Clerk. 1890. "On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies (A Lecture)". In: W. D. Niven (ed.) *James Clerk Maxwell: The Scientific Papers*, vol. 2. Cambridge: Cambridge University Press.

Nobel Foundation. 1967. *Nobel Lectures Physics 1901—1921*. Amsterdam: Elsevier.

Planck, Max. 1934. "Neue Bahnen der physikalischen Erkenntnis 1913." In *Max Planck: Wege zur physikalischen Erkenntnis; Reden und Vorträge*. Leipzig: Hirzel.

———. 1948. *Max Planck in seinen Akademie-Ansprachen: Erinnerungsschrift der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. Berlin: Akademie Verlag.

Rheinberger, HansJörg et al. (eds.). 1994. *Objekte, Differenzen und Konjunkturen: Experimentalsysteme im historischen Kontext*. Berlin: Akademie-Verlag.

关于化学史:

Klein, Ursula. 1994. *Verbindung und Affinität: Die Grundlegung der neuzeitlichen Chemie an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert*. Basel: Birkhäuser.

———. 2003. *Experiments, Models, Paper Tools: Cultures of Organic Chemistry in the Nineteenth Century*. Stanford, Calif.: Stanford University Press.

Rocke, Alan. 1984. *Chemical Atomism in the Nineteenth Century: From Dalton to Cannizzaro*. Columbus: Ohio State University Press.

关于经典力学的历史:

Einstein, Albert and Leopold Infeld. 1995. *Die Evolution der Physik*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.

Harman, P. M. 1982. *Energy, Force, and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

126 Jungnickel, Christa and Russell MacCormmach. 1986. *Intellectual Mastery of Nature: Theoretical Physics from Ohm to Einstein*. Vol. 1. *The Torch of Mathematics 1800—1870*. Vol. 2: *The Now Mighty Theoretical Physics 1870—1925*. Chicago: University of Chicago Press.

McCormmach, Russell. 1982. *Night Thoughts of a Classical Physicist. Fiction in English. American Writers, 1945 Texts*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Rosenberger, Ferdinand. 1965. *Die Geschichte der Physik*. 3 Vols. Hildesheim: Georg Olms Verlagsbuchhandlung.

Segrè, Emilio. 1984. *From Falling Bodies to Radio Waves: Classical Physicists and their Discoveries*. New York: W. H. Freeman.

Stichweh, Rudolf. 1984. *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740—1890*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

关于经典光学和电动力学的历史:

Buchwald, Jed Z. 1985. *From Maxwell to Microphysics: Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*. Chicago: Chicago U-

niversity Press.

——. 1989. *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*. Chicago: Chicago University Press.

Darrigol, Olivier. 2000. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

关于经典热力学和统计物理学的历史:

Brush, Stephen G. 1986. *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*. Vol. 1: *Physics and the Atomists*. Vol. 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*. (Studies in Statistical Mechanics, 6.) Amsterdam: NorthHolland.

Elkana, Yehuda. 1974. *The Discovery of the Conservation of Energy: Science Owes More to the Steam Engine than the Steam Engine to Science*. London: Hutchinson Educational Ltd.

Heilbron, John L. 1988. *Max Planck: Ein Leben für die Wissenschaft 1858—1947*. Stuttgart: Hirzel.

Klein, Martin J. 1970. *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*. Amsterdam: North Holland Publishers.

Kuhn, Thomas S. 1978. *BlackBody Theory and the Quantum Discontinuity 1894—1912*. Oxford: Clarendon Press.

Nye, Mary Jo (ed.). 1986. *The Question of the Atom: From the Karlsruhe Congress to the first Solvay Conference, 1800—1911: A Compilation of Primary Sources*. (The History of Modern Physics 1800—1950, Vol. 4.) Los Angeles: Tomash Publishers.

Truesdell, Clifford. 1980. *The Tragical History of Thermodynamics: 1822—1854*. New York: Springer.

关于统计学的历史:

Daston, Lorraine. 1995. *Classical Probability in the Enlightenment*. Princeton: Princeton University Press.

Gigerenzer, Gerd et al. 1989. *The Empire of Chance: How Probability Changed Science and Everyday Life*. Cambridge: Cambridge University Press.

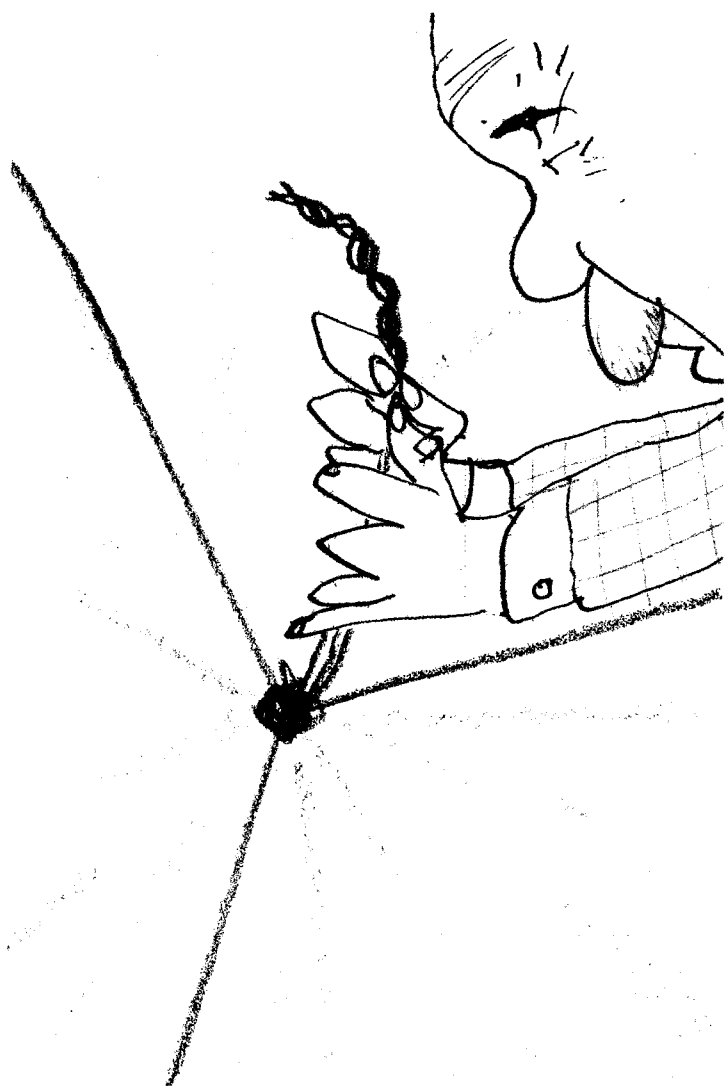
Hacking, Ian. 1975. *The Emergence of Probability*. Cambridge: Cambridge University Press.

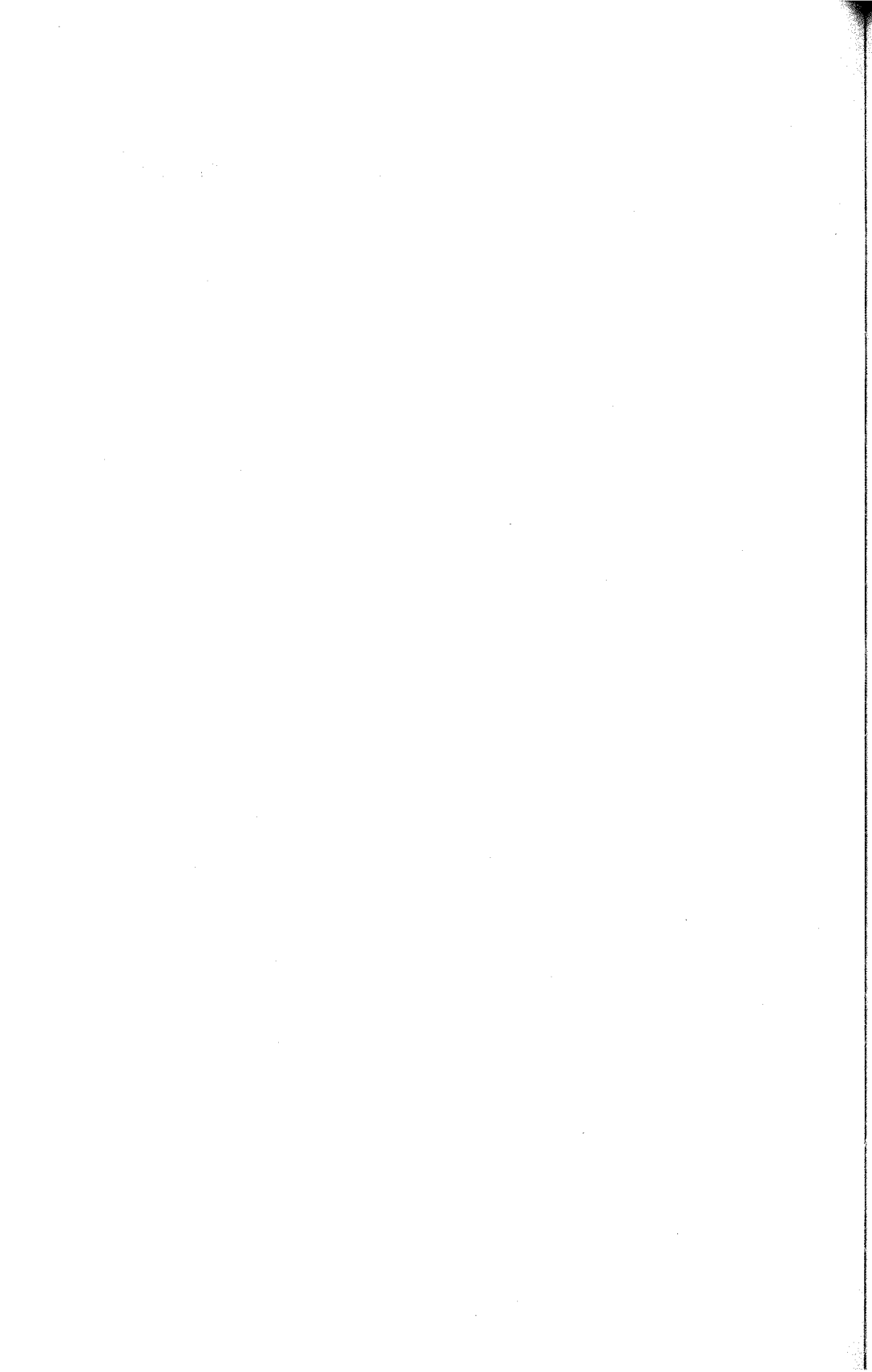
——. 1990. *The Taming of Chance*. Cambridge: Cambridge University Press.

Stigler, Stephen M. 1986. *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty before 1900*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press.

第四章

经典物理学头脚倒置的改造





预览:我们何以能把爱因斯坦 1905 年的革命理解为承继传统的知识增长? 130

即使掌握了关于所有历史前提和传记材料的知识,爱因斯坦对现代物理学的科学革命的贡献亦不会失去一点点令人惊讶的特征。只有认识到这场具有哥白尼过程的革命的结构,才有可能从一名年轻的专利局雇员(指爱因斯坦——译者)所取得的影响如此深远的科学研究方式上揭开那层神秘的面纱。

爱因斯坦站在一些巨人和矮子的肩膀上,即是说,他的成功只可以想象为建立在积累了许多代人的经典物理学知识的基础之上,但他把其结构颠倒过来了。他通过对经典物理学大师们已经提出来的边界问题的解答的一种新的解释而做到这一点。

他获得这种知识时的视角(Perspective),是他的突破的至关重要的条件之一。它使得他一开始聚焦于作为对概念基础的挑战的那些经典物理学边界问题,而不是在给定的经典框架里面需要解决的具体问题。

对年轻的爱因斯坦来说,这些挑战开始时采取具有思辨性质的、与经典物理学相反的建议的形式,是出自他对于原子观念的特别关注而提出来的。起初,爱因斯坦的思索并没有对经典物理学提供什么真正的别样选择,至少在还没有确认边界问题的解与经典物理学的基础不相容的时候是这样。

然而,他关于物质和辐射的原子式结构的考虑确实变成了他对统计物理学的阐述的出发点,那是一种能够把热学的普遍定理与关于微观世界组成的不同假设两者联系起来的理论。特别是,这种理论允许对于建筑在机械论世界观上的模型以及由它们得出的有疑问的结果进行深入的研究。统计物理学以一种基本的方式察觉到,经典物理学的大师们对边界问题的解答实际上是经典物理学的基础不相容的。只有在这一背景下,爱因斯坦的推测终于造成了对于经典物理学重新解释的形势。

131 5月的一场会面

在上一章中给出的在19世纪至20世纪之交物理学状况的简短的总体概括,帮助我们弄清楚了爱因斯坦是在一个特异的时刻登上历史舞台的。我们应当如何正视他的出现方式与推翻经典物理学的客观条件相符呢?从[爱因斯坦]后来的回忆我们知道,在1905年5月的一个美好的日子里,他到他的朋友和伯尔尼专利局的同事米凯莱·贝索(Michele Besso)的住处,再一次讨论他心爱的话题——运动物体的电动力学。虽然贝索不是一名物理学家,但却是一位尽管有时候心不在焉的饶有兴趣的外行人,他亦属于那样一个小圈子,圈子内的讨论受到年轻的爱因斯坦的高度评价。尤其是,贝索总是不怕提出一些看来很天真的问题,而这些问题正有助于把讨论引向对传统成规的突破。

因此,在那些日子里恰好需要这样。尽管爱因斯坦和贝索是怎样有缘相遇的没有留下任何详细的记录,这事也值得我们想一想。爱因斯坦总是不知疲倦地一遍又一遍详细说明他的问题。贝索不会不耐烦地倾听爱因斯坦反复的诉说。与爱因斯坦两年前结为夫妇的同学米列娃(Mileva),也曾经很熟悉他的这种入迷的状态。在他们两人的关系开始之时,爱因斯坦曾经成功地把她也拉进了他为之着迷的事业。因此到后来他还偶尔谈到了“我们在相对运动方面的工作”(CPAE 1, S. 282^①)。米列娃也许曾经帮助他理清思路走出困境,但她的作用越来越不像一位智力上的伴侣,最终转变成为一名家庭主妇的角色。爱因斯坦在伯尔尼的朋友圈子,以及他在苏黎世多科工学院的同学,都知道爱因斯坦有一个远大的计划。甚至在那些年里与他的朋友和老师多次讨论之后,其中的一些细节已经为人所知,只是还没有取得根本的突破。有几次爱因斯坦已经以为他快要解决他那重大的问题了。他的那些朋友对此亦习以为常了。

然而,在1905年5月底的那一天里,他做出了与先前不同的几件事。爱

① 中译文见:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第265页。

因斯坦自己承认差不多要放弃了。他依然努力再一次向贝索说明那几乎是 132
无望的状况。也许贝索会有一个好想法。他有一次在给米列娃的信里写道：
“我非常喜欢他，因为他敏锐的思想和他的朴实无华。”(CPAE 1, S. 258^①)
贝索像往常一样耐心和用心地听取爱因斯坦的说明，即使在一些技术细节上
他不大明白。但这一次他异乎寻常地多次打断他的朋友，因此两人的讨论就
像是在兜圈子。他们一次又一次地回到在相互运动的参照系里像电场和磁
场那样的量的行为。后来爱因斯坦主要用一个在一列火车上的观察者和一
个站在轨道上的观察者来说明这样的两个参照系。他从根本上就不相信两
个互相在做匀速运动的观察者之间的相对运动能够在物理上检验出来，即使
运用对电磁现象和光学现象的测量也是如此。例如，如果一条磁铁相对于一
根导体运动，在磁铁周围产生的感应电场，就会使导体中有电流流过。现在
如果磁铁静止而导体运动，那么这些磁铁周围没有电场，但导体里依然会产
生等量的电流。根据经典电动力学，这是由于有一种“电动势”。一种真正令
人满意的理论，不像那些老套的教科书，应当对这一电流给出一种并且是同
一种的解释，而与从磁铁运动还是从导体运动的观点来看无关，

但要构建出一种在原则上相对运动不会引起差别的理论，却是极为困难
的。爱因斯坦在好几年里顽强地探究这种理论，并没有在这样的困难面前止
步。那时候在这方面只有我们已经在上一章里讲过的洛伦兹理论，那是一种
能够说明实际上所有已知的电磁学现象和光学现象，包括在运动参照系里的
这些现象的十分可信的理论。因此，在爱因斯坦和贝索于 1905 年 5 月的那
个至关重要的日子里的讨论中，这一理论无疑是一个重要的话题。即使爱因
斯坦已经在所有细节上洞悉了这一理论，但它那复杂的技术性内容，使得贝
索再三地提出这样的问题：什么是这种理论或者它的变种实际上具有的精确
含义呢？这种意义能够直接测量出来吗？你真的以为你可以构思出对这样 133
一种野心勃勃的理论的满足相对论原理的等价替代物吗？

这样的问题是贝索的典型问题。也正是他在苏黎世与爱因斯坦在一起

① 中译文参照：《爱因斯坦全集·第 1 卷》，赵中立主译，长沙：湖南科学技术出版社，第 240 页。

时,使爱因斯坦注意到马赫的著作,在这些著作里马赫力图排除物理学里一切没有得到直接经验的证据支持的概念。并且,无论可以怎样谈到洛伦兹的极端成功的理论,它里面并非不存在这样的一些概念。特别是在洛伦兹的理论里有以太的含糊概念,同时间相关的一种不可以直接测量的辅助变量,以及关于物体在它穿过以太的方向上经受着一种古怪的长度收缩的假设。

爱因斯坦和贝索声嘶力竭地交谈着。一束启迪的光芒突然照亮了爱因斯坦的脸庞,但他仍然保持沉默,并且很快就找个借口离开了贝索。贝索轻轻哼了两声,但他知道他的朋友是不会把事情藏在个人心里的。当爱因斯坦第二天再去贝索那里的时候,他没有打招呼问候,而只是简单地说了一句:“谢谢你,我完全解决了我的问题了。”至少这句话在爱因斯坦后来的叙述中被传下来了。五个星期之后,1905年6月30日,爱因斯坦把他那篇题为“论运动物体的电动力学”的划时代论文,投送给《物理学纪事》(*Annalen der Physik*)杂志,从而建立了狭义相对论。这篇论文没有列出任何参考文献,并且仅仅向他的忠实朋友和同事贝索致谢。

这就是可以说出的爱因斯坦怎样发现了狭义相对论的故事,其中当然添加了一些自由发挥的修饰。不幸的是,像在伟大发现的历史里常常见到的那样,在历史的记录里并不存在这样生动地描写的至关重要的一刻。但重构历史的概要提示在当时的文件和后来的回忆里的确有这一类的证据。在上面除了已经提到过的爱因斯坦的相对论论文里的致谢词之外,还包含了在这篇论文发表之前的几个星期里爱因斯坦和贝索的交谈起到了关键作用的迹象。这一证据还包括了当时的通信,它们见证着在这里描述的那些论题,确实在爱因斯坦与贝索的交谈中占着中心的地位。亦存在着贝索在爱因斯坦对马赫的热情上所起作用的历史证据,但即使能够把这次交谈的所有细节都重构出来,或许有可能从一位女管家的笔记里找到了详细的记录,那么这种资料会给对像相对论的提出那样的科学革命的理解增加一些什么呢?

下面我们将尝试通过把已知的和得到充分支持的传记材料的细节,置于知识体系的变化语境之中,使得爱因斯坦的科学革命易于理解。这种知识体系的典型变化是通过不仅涉及科学知识而且涉及其他知识层次的一些缓慢的过程实现的。在这种背景下,关于相对论起源的问题变成不只是爱恩斯

坦在1905年5月喊出“我发现了”的问题,而且是关于他的眼光怎样投向其他知识层次,特别是确定我们对于空间和时间的常识性理解的层次的问题。我们还要进一步阐明,1905年的突破如何作为那时候物理学可利用的共享知识库与一名科学家的个人见解之间相互作用的结果。无论怎样详细地确定爱因斯坦的见解,亦肯定必须要着眼于他在那至关重要的1900年至1905年间,是怎么注意到在我们上一章里描述过的经典物理学的边界问题的。

作为伽利略信徒的爱因斯坦

由洛伦兹、玻耳兹曼和普朗克发现的对于经典物理学边界问题的解,仍然处于经典物理学的概念框架之内,即使他们的一些假设和理论构造不能够在这个框架之内得到解释。与此相反,爱因斯坦在他的1905年的革命性论文里所提出的解却打破了这一框架,并且用一个全新的框架来代替它,至少在狭义相对论的情况下是如此。

第三章里的叙述说明了,即使是经典物理学大师们的最杰出的成果,也仍然不能代表对现代物理学的突破;还特别说明了普朗克对辐射定律的推导对量子论的起源的意义,就像洛伦兹对他的变换式的推导作为相对论的第一个结果一样。所有这些结果都通过修补(Stopfen)和变形(Verbiegen)从经典物理学的知识体系里费力地得来。而且这些结果本来都是为别的目的的研究方向上的顶峰成就:玻耳兹曼用运动理论来设置热力学的一种力学基础;普朗克原来的目的在于对热力学第二定律的深入理解;洛伦兹在重视以太与物质之间的关系的基础上为建立麦克斯韦理论的一种一致性的表述式而努力。

在这些原来的目标后面,是综合不同的概念传统的问题,与此同时提供了可以用来解决这些问题的仅有手段。玻耳兹曼和普朗克要理解热力学第二定律的斗争使他们面对联系着力学、热力学和电动力学的某些问题,而洛伦兹试图进一步展开麦克斯韦光学理论的结果,亦引申出麦克斯韦的场论与在欧洲大陆流行的原子论者的电学说的综合。在每一个研究计划里着重点的逐渐转移,部分地由于新的实验结果,部分地由于理论的内部困难与矛盾,

它们把在各种不同理论的基础之处的概念体系的范围拉伸到了它的极限。

简而言之,在经典物理学大师们的工作里,我们还找不到新物理学的基本概念;在普朗克工作里的辐射的量子结构,在洛伦兹工作里的空间和时间的概念,在玻耳兹曼工作里的统计物理学的概念——这些概念至少都不是后来以为的那种样子。这是否意味着新物理学的真正创造者还未来到呢?是否能够把这些根源追溯到一种深思熟虑的革命性意向,以及一种有异于普朗克、玻耳兹曼和洛伦兹的保守性工作的、对于新世界观的追求呢?

136 在这一点上回顾一下经典物理学的起源是有益的。把它的末尾同它的开始比较一下就可以特别明白地看出,当知识体系的结构发生变化时,有一种值得注意的机制在起作用。处在中心位置的是在第一章里说过的哥白尼过程,它亦表征了从依然植根于亚里士多德的概念基础上的伽利略及其同时代人的经典前期力学到牛顿时代的经典力学的转变。确实,伽利略在经典力学的起源上所起的作用,就像普朗克、洛伦兹和玻耳兹曼分别在量子假设、狭义相对论和统计物理学的起源上所起的作用一样。半是摩西半是哥伦布的伽利略没有登上他所希望达到的陆地,或者没有认识到这样的结局。伽利略导出了诸如自由落体定律和抛体运动定律那样的结果,使得他切入了经典力学的边界,并且这些重要的结果正落在经典前期力学的知识体系的界限上。为了更好一点地理解这一奇特的位置,让我们靠近一些看看。

考虑伽利略关于抛体运动的典型例子。为了在经典力学里导出这种运动,我们需要两条与亚里士多德的自然哲学直接矛盾的原理,即惯性原理和运动叠加原理。有了这两条假设就容易推出抛体运动的定律:根据惯性原理,一个抛体会沿着它抛出的方向做匀速运动。与此同时,它亦按照自由落体定律所确定的加速运动下落。这两种运动的叠加,形成了抛体的抛物线轨迹。这一推导显示了在抛体运动与经典物理学原理之间的这样一种紧密的和直接的联系,因此很难断定伽利略在他的处理当中没有掌握这些定律。这样的结论很自然地导出伽利略的确是经典力学的创立者的论点。但对于伽利略的工作的更细致的历史性考查表明,他没能给出一般情况下抛体轨迹的形状是抛物线的证明,正如他在经过多年努力之后亦未能成功地给出他的自由落体定律的一种一致性的推导一样。其中的原因是,伽利略的思考仍然深

深深地植根于亚里士多德动力学的知识体系,根据亚里士多德,不能够有一种由惯性定律支配的不受力的运动。

因此,伽利略的那些有名的和不那么出名的弟子们,仍然需要构造那些在伽利略的著作里没有明显写下来的概念,虽然不难论证那些概念已经隐含在那里了;这里指的是惯性原理和运动叠加原理。的确,在伽利略完成他最后一部著作《关于两门新科学的谈话》之前,他的学生博纳文图拉·卡瓦里利(Bonaventura Cavalieri)于1632年发表了对一个倾斜抛出的抛体轨迹的第一个推导。在卡瓦里利的推导里运用了惯性原理和叠加原理,就像现代的证明一样。但这是否意味着卡瓦里利才是经典力学真正的创立者,是敢于想出在古板的伽利略那里找不到的东西的一位青年革命家呢?这是由伽利略手稿的最早解释者之一的拉法埃洛·卡维尔尼(Raffaello Caverni)在19世纪末所鼓吹的解释。这是威尔第(Verdi)歌剧剧本都无法表现出的戏剧性的阴谋论。 137

对于(那些革新者就是伽利略的追随者)这一假说加以反对,根据的是这样的事实,卡瓦里利的推导不是关于运动的系统论述里的一部分,而只是在了一本关于凹透镜的书籍里颇为随意地提到的内容。他在运用惯性原理和运动叠加原理时,没有对它们写出什么重要的意义。与此相反,当卡瓦里利被伽利略攻击为剽窃了他作为师长的40年劳动成果的未成熟著作时,卡瓦里利则声称他要说的只是那些都已经得到公认的伽利略的成就。实际上卡瓦里利不是伽利略的信徒里唯一一个运用新的概念推导出抛物线轨迹的。看来很自然的是,几乎所有他的信徒的著作的内容,都没有在他们的老师的著作里出现。

在埃万杰利斯塔·托里拆利(Evangelista Torricelli)的书本里引入了关于重物运动的内容,清楚地表明了这些信徒多么不想把自己看成革命家,并且其中亦包含了经典力学的基本原理:

我们在这里研究的是重物和抛体的运动,其中许多问题已经得到处理,但就我所知,只有伽利略用几何的方法严格推演过。我承认,当他在这一块田地里大刀阔斧地收割之后,已经没有什么东西留给我们了,我们所能做的只是跟随着这位勤奋的收割者的足迹,去捡拾一些残留的谷

粒,而不在意究竟这些谷粒是无意洒落还是有意丢弃的了;然而如果我们即使找不到那些谷粒,至少能够采集到生长在田间小径上的矢车菊和紫罗兰;也许用这些花朵可以编成一个不那么难看的花环。(Torricelli 1644)

138 由此明白了,从前经典力学到经典力学的转变的情况中,经典前期的力学里的“错误”并不需要谁来“纠正”,经典前期力学的结果会简单地由下一代人重新解释为一种新构成的知识体系——经典力学体系——的支点。这一点能够做到,靠的是采用了有疑问的推导,引进了特设的假定,压制了非唯一性,以及运用了外推方法——一句话,靠的是使用能够有效地解释为确定新体系概念的结果,以延长和拉伸旧体系的结构。例如,现在可以把惯性运动简单地设想为假如重力完全不存在的的话,沿着一条抛物线路径进行的一个抛射体会采取的运动。

这样一种哥白尼过程也能够说明爱因斯坦的革命性成就吗?爱因斯坦同样也构想出了已暗中由经典物理学的大师们为他准备好的概念了吗?在这一意义上洛伦兹会是,亦会不是相对论的发明者,普朗克会是量子理论之父,而玻耳兹曼则会统计物理学的创始人,正像伽利略既是亚里士多德派的一位后来代表,又是经典力学的一位先驱一样。

不考虑爱因斯坦的革命性态度,有几种境况支持统计物理学、狭义相对论、量子假设和布朗运动的原子论解释的起源都由于相似的发展方式。换句话说,这些革命性的成就都被理解成本质上是对于经典物理学极限的“最极端”结果的重新解释。

在详细展开这一主张之前,我们首先指出爱因斯坦的革命与经典物理学的起源之间的一种表面上的外部相似性,即是说像伽利略的众信徒那样,像在统计物理学里由爱因斯坦和美国物理学家乔赛亚·威拉德·吉布斯(Josiah Willard Gibbs)、在光量子假设里由爱因斯坦和保罗·埃伦费斯特(Paul Ehrenfest)、在相对论里由爱因斯坦和庞加莱,以及在布朗运动里由爱因斯坦和玛里安·冯·斯莫卢霍夫斯基(Marian von Smoluchowski)那样,由不同的作者同时提出了近代物理学的新概念。

139 几位科学家能够通过做出同时的发现来转移知识体系的概念中心的这

一事实,是我们正在这里处理的知识发展的结构特征的另一个象征,那是不能够仅仅归于个别科学家的贡献来说明的。虽然年轻的一代常常容易进行这样一种再考虑,就庞加莱——洛伦兹的同时代人——的情况来看,表明了这种过程并不必然与从一代到下一代的转变相关。虽然我们现在还不能够深入探究同时发现的这个好运气的课题,谈谈几条附带的评论也许是合适的。

爱因斯坦从1902年到1904年关于统计物理学的论文是独立的原创文章,且与吉布斯关于统计物理学的基础性文章差不多是同时的。在1905年相似的条件亦导致了光量子假设的形成。埃伦费斯特差不多与爱因斯坦同时独立地注意到普朗克在关于平衡态中的热辐射的能量分布的处理,实际上以两条假设为基础。其中一条假设说,辐射的能量是由一些最小的能量微粒组成的,每一个微粒的能量正比于辐射的频率——这是一个本质上类似于爱因斯坦光量子观念的假设。因为埃伦费斯特以这样一种朴素和简练的方式引进辐射的量子化作为对普朗克工作的一种解释,而没有像爱因斯坦认为的那么富于革命性,因而他的贡献一般没有受到科学史专家们的高度评价。到底孰是孰非呢?与埃伦费斯特相反,爱因斯坦从光量子的引进开始,继续做出进一步的推论,并因此达到了对于联系到例如光电效应一类的实验结果的解释。这种估价的错误在于,它转移了人们对在——非经典的——量子论的起源中,普朗克对自认为是经典结果所做的重新解释的意义的关注。

与埃伦费斯特在光量子假设的起源里所起的作用相似,庞加莱在相对论历史上的地位也是有争议的。他宣告了相对性原理是物理学的中心原理之一,他清楚地看到了关于空间上分离的两个事件的同时性的有疑问的性质,他还把洛伦兹的地方时解释为与光信号同步了的运动时钟上显示的时间,而这正是爱因斯坦在他的相对论里所做的事情。但与爱因斯坦不同,他的这些见解分散地发表在他的几篇文章里,没有在什么地方聚集起来以形成一种一致性的理论。然而,对于我们的讨论来说,要紧的是至少在庞加莱的著作里指出了相对论的中心概念,并且庞加莱和爱因斯坦重新解释了早些时候确立的、特别是由洛伦兹确立的那些结果。 140

布朗运动的情况是类似的。1906年波兰物理学家玛丽安·冯·斯莫卢霍夫斯基向《物理学纪事》提交了一篇关于布朗运动的运动理论的论文,他的

工作受到了爱因斯坦的启发,亦陈述了他独立得出的一些结果。在细节上斯莫卢霍夫斯基的论证与爱因斯坦不同,但他的结果以及他对布朗运动的数学描述,除了一个数值因子之外实质上都与爱因斯坦相同。还有一些平行于爱因斯坦的重要的中间结果,特别是在澳大利亚物理学家威廉·萨瑟兰(Wilhelm Sutherland)的工作里。

普朗克和洛伦兹在他们的角度上,主要把爱因斯坦看做他们自己工作的一名解释者。普朗克1920年在他的诺贝尔受奖演讲里说道,要解答辐射定律的推导是一种“空洞的无意义的形式上的把戏”还是“以坚固的物理概念为基础”这个问题,不是靠“证明了热辐射的能量分布定律,更不是靠对由我想出来的定律的特殊推导”。这一解答靠的是“那些运用作用量量子来帮助他们自己的研究和实验的研究者的不息的强劲工作”的结果,特别是爱因斯坦的贡献。对洛伦兹来说,也许比普朗克更加明显地受到爱因斯坦的新概念的影响,使得在他原来的推导里只被当做是一些辅助量的东西得到了物理意义。在洛伦兹的《哥伦比亚演讲》(*Columbia Lectures*)里,开始的时候介绍了他关于空间和时间坐标的辅助量,然后评论道:

“有效坐标”和“有效时间”等术语的命名,本来是我们自己曾经用来寻求我们的表达方式的便利而使用的,而它们为我们准备了对以上那些结果的一种十分有意义的解释,对此我们要感谢爱因斯坦。(Lorentz 1909, S. 223)

在第二版的一处注释里洛伦兹又评论道:

我失败的主要原因是我固守着主要的观念,只能把变量 t 看做是真实的时间,因而我的地方时 t' 就被看做不过是一种辅助的数学量罢了。(Lorentz 1915, S. 321)

伽利略的信徒们能够阐明经典力学的基本概念,是因为他们并不需要追寻引导伽利略得到他的结果的路径的细节,还因为他们并没有在同样的程度上分享他起初的概念性假设。他们解释他们师长的工作,是从他的最终结果里改变了的观点看,因而能够发现一些已经暗含在这些结果里而没有明白表示出来的概念。当为了在“伽利略的信徒”的意义上,或者更确切地说,在玻

耳兹曼、洛伦兹和普朗克等经典物理学大师的一名信徒的意义上,尝试理解作为经典物理学知识体系的一种可比较结构变化的,爱因斯坦在概念上的创新,那么首要的任务是重构爱因斯坦获得经典物理学的传统知识时的总体看法,那是他后来在一种哥白尼过程里颠倒过来了的。

当爱因斯坦还是一名中学生,且对电动力学的技术细节还不熟悉时就已经对相对运动的问题表示了兴趣。那时候他问过他自己,当一名观察者追随着一支光线运动的时候,他看到的光线会是什么样子,这里有意思的是爱因斯坦转变了关于这种认识的看法。与此相反,洛伦兹逐步深入研究的关于相对于以太运动的问题,是作为一个额外的要求强加到他的研究计划里去的。相似地,作为一名大学生的爱因斯坦已经对最近发现的新的辐射现象具有粒子还是波动的本性的问题感兴趣,其时普朗克却一直坚持辐射必定由波动组成的观念。因而爱因斯坦在对待大师们的结论时,采取把这些方面的问题置于能够引起概念性革新的注意的中心的做法。下面将会更详细地谈到这种特别的看法。

一种看法的起源

我们首先问一个原则性的问题:是不是爱因斯坦借以获得经典物理学知识的特殊视角、他的认识能力的成效与这种知识本身无关——无论这种能力是天赋的还是由于受教育而得来的,或者这些看法本身形成了爱因斯坦置于优先地位的科学知识?这一问题不仅仅只关系到对他个人创造力的理解。假如弄清楚了爱因斯坦的看法本质上与他获得的知识无关,那就不可能像在这里所断言的那样,把他在概念上的创新说成是知识体系发展的结果。在传记资料里,通常假设爱因斯坦的物理学知识在他的创造性过程中的作用,只限于向他提供他的创造过程所需要的一个信息库。至于他的认知过程的结构则假设是自明的,即只受到他的认知或者“创造”的能力的支配,而这些能力本质上是与它们运用于的内容无关的。

下面我们将论证由他积累的知识包含了一种能够应用于解决新问题的

思考的能动结构。根据这种观点,当爱因斯坦在写作 1905 年那些别开生面的文章时所汲取的知识,就要被看成是一种复杂的智力经验的结果,这种经验本来部分地是通过与他那些著名的文章没有直接关系的工作而得到的。爱因斯坦通过这样的经验形成的看法的至关重要的作用,当联系到他获得经典物理学的前辈大师们的知识时就变得特别明白了。

这种获取可以分为两个阶段:首先,爱因斯坦逐步熟悉那些前辈大师的工作,并且尝试去为经典物理学的占支配地位的理论提出一种推测性的替代物;其次,将前辈大师们的工作与他 1905 年前的论文所做的工作相联系,再一次进行研究。对这两个阶段的一种精确地重构的原始资料是很有限的,虽然可以运用他同米列娃 1897 年至 1903 年间的通信。无论如何还是有可能辨认出在他满怀激情地动手处理他 1905 年那些文章的中心问题时,爱因斯坦置于优先地位的科学知识的基本特征。

143 爱因斯坦把他新获得的知识纳入一个概念框架里,这个框架确定他在对原子观念的早期印象支配下的思考方式,他凭着这种思考把许多看来不相干的科学主题联系起来。爱因斯坦已经从伯恩斯坦(Aaron Bernstein)的《自然科学大众读本》(*Naturwissenschaftliche Volksbücher*)里,学到了像原子或者以太那样的概念怎样能够帮助揭示在不同的知识领域之间的“神秘”和“惊人”的关系,而那些领域是由知识的专门化分处在不同的学科分支里的。而且,伯恩斯坦和其他作者用来建立物理学和化学的一些不同领域的联系的概念性工具,在爱因斯坦的头脑里留下了它们的印记,并且可以认为决定了爱因斯坦在他的大学时代对读书和听课的反应。

能够用无数的例子说明这一点。例如,在他听海因利希·韦伯(Heinrich Weber)关于用分子力说明毛细作用的讲课(这一演讲全靠爱因斯坦才得以出名)时所做的笔记中少数边注里写下的“研究!假期!”^①在物质的原子结构之外,爱因斯坦在 1900 年前后感兴趣的问题还包括物质的热学性质和电学性质之间的关系;这种兴趣大概也是由他的老师韦伯激发起来的。爱因

^① 参见《爱因斯坦全集·第 1 卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第 123 页。——译者

斯坦已经决定他的毕业论文要写这一题目,但现在看来他要开始从原子论的观点来看待问题,并且要提出一种关于它的独立理论。1899年10月,他想出了一种方法去测定一个带电体是否具有与不带电的物体不同的比热。爱因斯坦受到了物理化学,特别是离子理论的启发,这种理论已经在许多不同的领域里取得辉煌的成功。他再次在原子论的基础上推测固体的光学行为和热学行为之间的关系,并且研究普朗克关于辐射的热平衡的文章。他提出了光的产生可能涉及动能直接转换为光能的概念。他被菲利普·勒纳德(Philipp E. A. Lenard)关于阴极射线的产生的理论迷住了,在勒纳德看来,阴极射线是由紫外线产生的电子束。像我们将要看到的那样,爱因斯坦关于辐射的原子式结构是从这样的一些兴趣所在发展出来的。此外,他这个时候还研究着溶液的一种分子理论。

144

什么是爱因斯坦在世纪之交多方面努力的兴趣所在,这个问题我们将会在后面详细讨论。在这里我们要指出的是,重要的不是爱因斯坦在这些方面取得的成果——事实上那时候也没有取得多少成果——而是他那时候正在思考的问题的本性,以及他由于这些努力而影响到的他的看法的进一步发展:这些问题里的大多数都属于在第三章里讨论过的经典物理学的边界问题。爱因斯坦的看法的特征是寻求整部物理学的一种概念基础,他希望借助于他的有效的、处在多个学科之间交叉地位的原子论来建立这样的基础。我们从他的一些信件里了解到的论点,的确是试图运用原子观念来说明看来十分不同的一些物理性质之间的联系,例如金属的导电性质和导热性质之间的联系(他把这些性质追溯到金属内部带电粒子的运动),或者在分子间的力与引力之间的联系。在这种意义上,爱因斯坦于1901年春天写信给格罗斯曼说:

我现在相信我的原子吸引理论也能够推广到气体……。那时候,也会使在分子力和牛顿的超距作用力之间的内部亲缘关系的问题更接近于它的解决。……认识到对直接的感性观察来说是完全分离的一些实体,竟可以统一成为一种现象的复合体,那真是一种光辉灿烂的感觉。(CPAE 1, S. 209f^①)

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第274页。

爱因斯坦的原子观念不是由例如力学那样的一种特殊理论确定的,却是作为一种思维模型而起作用,其确切的性质仍然要靠经验发现。因此,他在写给米列娃的信里是这样说到玻耳兹曼气体理论里的原子论的:

一切都非常好,但太不注重与事实的比较。(CPAE I, S. 294^①)

我们将要讲到,爱因斯坦对玻耳兹曼的这种反应,特别表现了他识别经典物理学的弱点的能力,而这些弱点在那些大师看来似乎是不要紧的或者是没有意义的。在爱因斯坦的《自述》里,他回忆了自己在大学时之所以选择学习物理,而不是学习数学的原因:

145 我看到数学划成许多专门的分支,每一个领域都能轻易地耗去我们所享有的短暂一生。结果,我看到我自己处在布里丹的驴子的位置上,无法决定要吃哪一捆干草。大概这是由于我在数学领域里的直觉能力不够强,不足以清楚地把那些真正基础性的、具有根本重要性的东西与其余那些多少是可有可无的博学知识区分开来。……确实,物理学也切成了一块块分开的领域,每一个领域都能够吞没短暂的毕生工作而依然没有满足对更深入知识的渴求。在这里,未得到充分联系的大量实验数据的堆积也是令人生畏的。然而,我在这个领域里不久就学会了嗅出那些会引导到基本原理的东西而把其他任何东西撇在一旁,那些多数的其余内容只会使头脑混乱且掩盖了本质所在。(Einstein 1992, S. 14^②)

如果考虑到爱因斯坦的处在优先地位的科学知识,那就不必要说明一个特殊的人才对物理学和数学知识的这种不同反应,他靠着这种反应从物理学里的不要紧部分区别出本质的东西,而他对数学则做不到这一点。正如爱因斯坦自己指出的那样,正是他的早期智力经历帮助他发展了一种“嗅出那些会引导到基本原理的东西”的直觉。在另外一段回忆里,爱因斯坦把这种智力经历的本性刻画成符合于我们主张的、他所受到的原子论影响成为概览知识的关键作用:

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第278页。

② 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英等译,北京:商务印书馆,第7页。

在我被任命之时我缺乏任何技术性知识。但很快就明白了对于物理学联系的总体看法,要比专门知识和常规技能有价值得多。(Einstein und Besso, 1972, S. 550)

爱因斯坦早期对以太的考察

在1905年的所有论题中,有趣的是关于运动物体的电动力学这个问题,可以追溯到爱因斯坦一生中最先的尝试。在第二章里提到过,16岁时的爱因斯坦已经写下了一篇关于以太的短文。他在那里提出了一些实验,试图在有磁场的情况下,通过磁场对光或者其他电磁辐射的效应来从实验上显示以太状态的变化,其目的显然是要发现这种以太的内部组成。对一个他那种年146纪的孩子来说,他表现出了对电动力学的各种概念和问题的惊人熟悉;年轻的爱因斯坦不仅知道赫兹产生电磁波的实验,还知道他把这种波动解释为一种弹性以太的机械形变的的结果的努力方式。在下一年里爱因斯坦已经问了自己,在以光速追随着一束光波运动的一位观察者看来这束光波会是什么样子。他本来应当看到的是一种不随时间变化的波场,但似乎没有这样一种东西。十几岁的爱因斯坦的这个思想实验,也含有了这个观察者会测量到什么样的光速的问题。这个问题的答案明显依赖于作为理论基础的以太模型。在一种不由运动参照系曳引着的静止以太里,光相对于观察者的速度肯定会发生变化。因而爱因斯坦显然很早就击中了在电磁学和力学之间的边界问题。

爱因斯坦进入苏黎世多科工学院学习之后不久,就开始了对麦克斯韦的电动力学理论的系统研究。像从后来的报道里知晓的那样,爱因斯坦很快就偶然发现了在日后的几年里困扰着他的一个难题。在本书前面对他1905年5月同贝索的关键性讨论的重构内容里提到,爱因斯坦觉得好奇的是,在电动力学里一条磁铁和一根导体的相对运动可以用不同的方式来说明,虽然最终的效应与把磁铁看成运动还是把导体看成运动无关。这一推理向他表明了,说存在着电场还是存在着磁场,取决于观察者的状态,而只有作为统一体

的电磁场才是与参照系无关的存在。磁铁与导体的相互作用与观察者的状态无关的性质,会是力学里的相对性原理的直接结果,如果这一原理亦对电动力学成立的话。这些基本的论证后来在他 1905 年关于相对论的文章里占着突出的地位。

147 爱因斯坦的原子观念亦明显地在他对电动力学问题的考虑中起作用。至少在 1899 年他已经考虑过电流是电荷的流动,在那时候这一点还远不是自明的。我们已经看到,在这个问题上他是从物理化学以及他对电解导电的研究中得到提示的。从爱因斯坦对原子论的观点看来,对磁铁和导体之间的相互作用的解释上的不对称性是特别令人吃惊的。因为,如果不把电流看做是以太状态的变化,而仅仅看做是在空虚的空间中运动的电荷,那么就更容易采取这样一种运动电荷的观点。不过也很难在原则上为磁铁运动还是导体运动两者之间的差别的假设辩护,从力学的相对性原理看来,两种情况似乎是完全等价的,因为以太不再能通过引进一个优先的运动状态来区别它们。爱因斯坦在 1899 年写给米列娃的一封信里,不仅表示了他对电的原子式本性的信心,而且他亦注意到了运动状态能不能归于以太这种观念的疑问。爱因斯坦在他的信件里对于把“以太”这个名称引入电学理论表示怀疑。他相信这种以太的运动是没有物理意义的。爱因斯坦后来回想起还有光行差,这种效应有利于一种我们看到的静止的以太,而且向他显示了通向狭义相对论的道路。他基本上采取了洛伦兹的立场,但还没有详细地研究过他的理论。

爱因斯坦从那时起写的一些信件给人以这样的印象,他正在为运动物体的电动力学的一种独创的观念而奋斗,但还没有登上他成功的高度。他对这些问题的早期考虑以不断地努力从实验取得新的结果为标记,他曾经打算在苏黎世多科工学院或者阿尔高(Aargau)州立学校的实验室里进行这些实验。这些实验明显是要产生一些结论,包括地球穿过以太的一种可能运动的结论。不过我们缺乏能够给出关于这些实验的更精确信息的资料,对此知之不多。

1899 年 3 月,爱因斯坦已经写信给米列娃,谈到他关于辐射的思索已经得到了一种更佳的立足点。在这个夏天里,他与他以前在阿劳的老师、瑞士的 X 射线早期研究者之一的康拉德·维斯特(Conrad Wüest)计划了一些辐

射实验。当时的电学学说存在着两大学派：在欧洲大陆广泛传播的电的原子观念和按照麦克斯韦的传统认为存在着一种连续的电媒质的基本意见。爱因斯坦希望这些合作实验能够回答这两大学派的哪一个与自然界符合的问题。 148

他们计划的这些实验推迟了。但不久之后，在 1899 年夏末，爱因斯坦又有一个想法，要发现一个透明物体相对于光以太的运动对在这个物体内光的传播速度的影响。我们不知道爱因斯坦对在运动系统里的光学的先前发展有多么熟悉，也不知道他要做的是不是更高精度的斐索实验或者斐索实验的某种变形。但他的计划没有通过。阿劳学校的校长维斯特明显有别的更要紧的事，于是他对爱因斯坦计划的态度是，用爱因斯坦的话说，“后母式的”。

被斐索实验确证的菲涅耳曳引系数的引入这一无可争议的成功，至少对爱因斯坦来说意味着出现了一个未解决的问题，会有一种什么样的令人信服的解释呢？在运动媒质中光的速度的变化真的是由于以太被部分地曳引，还是另有似乎更加有道理的机制，例如洛伦兹提出的电磁波受到曳引的解释呢？爱因斯坦在给米列娃的一封信里写道：

关于这件事我还想到了一个理论，在我看来这个理论有很大的可能性。还是不再多说它了吧！你的可怜的小脑袋里塞满了你必须骑上的什么人的旋转木马。情况既然如此，我还是不应当自行前进。（CAPE 1, S. 230^①）

后来爱因斯坦想起了，除了光行差之外，斐索实验是第二位重要的构成相对论的支柱。这两种现象都可以用静止以太的论点来解释。但要回答的一个更困难的问题是如何去调和这两个结果与力学里的相对性原理，这一原理是所有匀速运动的参照系都有相同的有效性这一性质所要求的。毕竟，有相当多的证据要求这一原理也应当在电动力学里成立。于是，不仅关于磁铁和导体的思想实验，而且迈克耳逊-莫雷实验以及其他显示地球穿过以太运动的证据的同样徒劳无功的尝试，都有利于相对性原理。 149

① 中译文参照：《爱因斯坦全集·第1卷》，赵中立主译，长沙：湖南科学技术出版社，第210页。

这样就开辟了一个具有深远意义的理论和实验研究的舞台。爱因斯坦肯定没有气馁,并且开始钻研威廉·维恩(Wilhelm Wien)关于以太是否参与物体的运动这个问题的最重要实验的总结性文章。维恩特别指出,迈克耳逊-莫雷实验是与静止以太的观点不相容的实验之一,但他没有作详细的说明。维恩自己没有为以太运动的问题给出最终的答案,并且在他的论文的最后建议做一些进一步的实验,他为此写道:

如果这些研究的结果完全弄清楚了,就会明白其他那些认为以太静止的、非常简单的理论是应当接受呢还是应当否决。(Wien 1889, S. XVII)

爱因斯坦明显从阅读维恩的论文受到鼓励,他直接写信给其作者并且与他通信,遗憾的是我们一点也不知道其日期。

直到1901年秋天前后,又有了爱因斯坦在实验方面努力的新证据。在这一段时间里,他继续获取他那个时代的知识。然后他在1901年年底前写信给米列娃说:

我现在要认真研究洛伦兹和德鲁德(Drude)关于运动物体的电动力学都写了些什么。(CPAE I, S. 330^①)

此时爱因斯坦自己关于电动力学的思想显然往前踏出了一大步。从他写信给米列娃谈到他关于在运动媒质中光速变化的一种理论之时起,已经差不多过去两年了。在这期间他至少是在感情的层次上越来越紧密地与她谈到他的计划,正如他同他的朋友们一样。他的同学雅各布·埃拉特(Jacob Ehrat)要替他买书,而且在1901年4月初他与贝索交谈了四个小时的内行话,谈的是以太和物质的原则区别和绝对静止的定义,以及有关的其他话题。因而,爱因斯坦那时候决不是后来他才变成的一个“喜欢独处的人”(Einspänner)。

而且他还让他的老朋友格罗斯曼也注意最新的知识动向。9月份爱因斯坦写信给格罗斯曼说,他已经想到了一种相当简单的方法去探测物质

^① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第314页。

相对于以太的运动。正如他在信件里写的那样,与先前的计划明显相反,爱因斯坦这一次的方法是以普通的干涉仪实验为基础的,他也向格罗斯曼通告过这件事。从后来的一份回忆里我们可以得出这样的结论,爱因斯坦设计过一台检验地球相对于以太的运动的实验,靠的是用一个热敏元件测量两条光线的能量差,其中一条光线沿着地球运动的方向,另一条则垂直于那个方向。当他想出这种实验安排时,他明显依然没有想到迈克耳逊-莫雷实验的细节,那是基于类似的比对而设计的。他使用普通的干涉而不是热敏元件的想法,使得爱因斯坦计划中的实验更加接近于迈克耳逊-莫雷实验,但我们仍然不知道他的实验的精确构成。考虑到实现这样的实验有相当大的困难,以及爱因斯坦当时不稳定的职位,他几乎没有机会实际完成这一实验。在爱因斯坦写给格罗斯曼的一封信上,我们发现一句深深的叹息:

要是无情的命运能给我一次付诸实行的时间和安宁就好了!
(CPAE 1, S. 316^①)

然而,爱因斯坦还可能要写下这样一台实验的计划,连同他对预期结果试图给出的解释。这一尝试显然假设物质和以太是原则上分离的,正如洛伦兹在他的理论里所假设的那样。像洛伦兹一样,爱因斯坦相信以太是没有力学性质的,并且尤其是不能够运动的。那么爱因斯坦预期他的实验会得出什么样的结果呢?他那时候仍然期望能够检测到地球在以太中的运动吗?关于这个问题的资料是互相矛盾的。无论如何,没有直接的证据证明爱因斯坦那时候想要简单地抛弃以太。只是到了1901年秋天他才热衷于研究运动物体的电动力学,他希望把这个问题写成一篇重要的文章。这一冒险行动是关于以太和物质之间的相对运动的想法为基础的,爱因斯坦试图把问题转到光和运动物体的电磁理论上去,而这个问题就应当变得能够做出实验检验了。计算里的一些偶然错误使他怀疑他的想法,但纠正了那些错误之后又只会坚定了他的信心。他还因为他的想法受到他的物理学教授阿尔弗雷德·克莱纳(Alfred Kleiner)的积极肯定而受到鼓舞。在同克莱纳交谈了整

^① 中译文据:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第300页。

个下午之后,爱因斯坦骄傲地向米列娃报告,克莱纳劝说他把他的理论观念和看来是最简单的和最实际的实验方法写出来发表。

在现存的通信里,主要从与米列娃的通信里,可以了解到大量有关的情况。因为她和爱因斯坦显然经常彼此谈论这个宏大的方案,在他们的信件里不需要作详细的解释,这就使得后来的历史学家感到不满意了。但即使我们掌握了一份他所要写的重要论文的草稿,它真的就是了解相对论起源的钥匙吗?很难,因为那时候的重要论文肯定依然与他1905年看到成功的曙光的日子所构思的运动物体的电动力学的版本相距甚远。我们确实知道的,只是在那篇文章完成之前不久才取得决定性突破。在世纪之交年轻的爱因斯坦的确属于在运动物体的电动力学领域里的专家。但根据我们对这个问题了解到的一切,他那时候自己的想法和贡献仍然完全局限于在这个领域里的同时代人的共同观点。他是在计划关于在物质和以太之间的相对运动的一些实验,这些研究亦与他的同时代人的工作差不多。他在理论上的思考也明显与同时代的学者们相似,特别是与洛伦兹的理论相似,那是爱因斯坦刚刚开始研究的问题。结果,爱因斯坦的这些早期努力的主要成果乃是使他明白了,关于运动物体的一种电动力学的经验事实都已经掌握在手中了。

设想用来取代经典物理学的理论

即使在爱因斯坦接受“经典”的第一阶段,亦产生了具有深远意义的结果。从同一时代的文字证据和后来的回忆材料里,我们知道早在1901年爱因斯坦就寻找已确立的经典物理学观点的替代物。在1900年至1905年间,152 有时候他的跨学科的原于论思想导致对19世纪传统的光学和电动力学的猛烈冲击。但这种冲击完全不同于由他1905年的文章所导致的革命,并且再一次证实了爱因斯坦的非常规看法并不是后来的解决方案的前奏。毋宁说那是在经典物理学的概念框架之内走到尽头了,这条道路是在发展早期的权宜之计,但后来就放弃了:爱因斯坦决定研究类似于牛顿在17世纪提出来的、关于辐射的一种微粒或者“发射”学说,而不顾从19世纪初开始只是支持

光的波动说、并且最终导致放弃光的粒子说的无数证据。

这样一种非传统的观点,一种新的微粒学说,不仅沿着他的跨学科的原子论路线,而且也涉及那时候不仅对光,也对最新发现的像 X 射线等形式的辐射重新提出的“波动还是微粒”的问题。爱因斯坦应当从他的老师康拉德·维斯特那里听说过这些新发现的射线的特征。它们的确由于使照相底板感光而被当做是一种新型的光,但它们没有显示出像反射、折射、干涉和偏振等光和其他电磁辐射的熟悉性质。因此物理学家们认真地讨论着 X 射线毕竟是不是有微粒本性的问题。

但最要紧的是,爱因斯坦关于辐射的微粒理论看来包含了整个一系列现象的要害,他还是一名学生的时候就已经关注这些现象,例如他那时候已经做了新的实验研究光的产生和转化过程。我们已经提到过他这方面的兴趣,现在让我们更详细地看看。爱因斯坦 1901 年 4 月 30 日写信给米列娃说:

最近我有这样一个想法,当光产生的时候或许会发生运动能量直接转化给光,这是因为分子的动能-绝对温度-光谱(在平衡状态下所辐射的空间能量)的互相对应(Parallelismus)的缘故。谁知道什么时候会在这些坚硬的山岭中掘通一条隧道!(CPAE 1, S. 294f^①)

此后不久,他向米列娃热情地报告了关于勒纳德用紫外光产生阴极射线的工作,这一现象使他相信必定存在着与他上面引文里所说的相反过程,即在这样一种能量直接转换的过程里光被吸收了而它的能量转化为阴极射线的能量。几年之后爱因斯坦针对牛顿的理论,评论了这样的过程: 153

在这一点上,牛顿的光的发射说看来比波动说包含了更多的真理,因为根据发射说,在光微粒发射的过程中它所获得的能量不是完全弥散到无限的空间中去,而是仍然可以被一个基本的吸收过程所利用。想一想由 X 射线产生次级阴极射线的定律。(CAPE 2. S. 573f^②)

在这里科学史明显起到一个观念库的作用,当发现了新的经验事实时,

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第278页。

② 中译文参照:《爱因斯坦全集·第2卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第501页。

我们就有机会从中抽取有用的东西。

爱因斯坦关于辐射的微粒结构的思想也触及了另一个问题,即热辐射的问题,他亦在他4月30日的信里提到这一点了。在1901年4月初写给米列娃的信里,爱因斯坦提到了他对这一理论的担忧:

不难说明是什么使得我反对普朗克关于辐射本性的考虑。普朗克假定一种完全确定类型(固定的周期和阻尼)的振子引起能量转换给辐射,对这个假设我真的没有兴趣。也许他的最新理论会是更加普遍的。
(CPAE 1, S. 286^①)

爱因斯坦的反对直接指向普朗克关于热辐射与一个物理系统的物质材料之间相互作用的图像,那是后者为了得出辐射能量按辐射的不同频率分布而采取的假设。他不相信普朗克的振子能够以这样想象的方式导致这种分布。在他自己对热辐射问题的分析里,爱因斯坦喜欢直接转换光的能量的过程,上面已经引述过,他在4月底提到了“分子的活力”和热辐射能谱之间的相互对应。但精确地说来,什么地方是这种对应点所在呢?

154 爱因斯坦在他的议论里提到的“分子的活力”,指的是在确定温度的气体中具有不同速度的分子的分布,即是由麦克斯韦和玻耳兹曼在气体运动理论里所推导过的那种分布。那个时候的“活力”这一传统名称可以追溯到莱布尼兹,指的是正比于速度平方的动能。我们已经在第三章里看到,这种不同速度分子的分布遵从类似于高斯型的钟形曲线。那时候爱因斯坦显然采取了由维恩定律描写的热辐射能谱,那也已经在第三章里讨论过了。

维恩定律确实与气体中分子速度的麦克斯韦-玻耳兹曼分布惊人地相似,这种相似性必定就是爱因斯坦说到分子的活力对应于热辐射的能谱的理由了。相应的能量都是以指数的方式进入到分布定律里,并且如果把辐射能量的分布换成辐射的粒子数分布,而辐射的能量正比于其频率,那么就显示出一种理想的相似性了。换句话说,维恩定律可以被看做是在给定的温度下,确定具有给定的颜色和能量的光量子的份额的一条分布定律。因此,爱

^① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第1卷》,赵中立主译,长沙:湖南科学技术出版社,第209页。

因斯坦的对应性就导致了一种革命性的解释,即是说热辐射可以被看做是一种光微粒的气体。至于在不同频率之间的辐射的能量均分问题是普朗克的振子所不能相容的,依爱因斯坦的意见,亦可以在他的解释里通过简单的计算做出证明而得到适当的处理。

对爱因斯坦来说,必须要有一种惊人的论据来论证光的粒子说能够提供对许多问题的一个新的观点。即使是运动物体的电动力学,也要以在这一基础上的新眼光出现。它的推理要依靠这样一种微粒理论,它能够在力学的诸定律和电动力学的定律之间取得一致,至少在对电动力学做了适当的修改之后做到这一点。在光的粒子说里,光速只是对光源来说才是恒定的——这正是为什么它被称为光的发射理论的原因。相对于一种静止以太的光速不再保持恒定,而是依赖于光源的速度,就像一颗炮弹的速度依赖于把炮弹发射出来的那门火炮的速度一样。在这样的一种理论里,力学的熟知定律,特别是相对性原理和速度合成定律都可以适用。的确,光的粒子说可以对光行差给出一种简单的解释,依靠的只是光的速度与地球运动速度的合成公式,不需要对以太处于什么样的运动状态那种我们只能够猜想的问题做出假设。

155

斐索实验的结果也强烈支持在一种透明媒质里的光的速度不可能与光源的运动无关而保持恒定的结论,至少如果我们接受了经典物理学里的速度相加公式时是如此。如果在一位随着媒质运动的观察者看来,媒质里的光速总是速度 c ,那么从静止的观察者看来光速就应当是 $c + v$,如果光的传播方向与媒质的应当方向相反,并且 v 是媒质的应当速度的话。但这不是在斐索实验里发现的情况。因此,从在上述假设下的这一实验里知道,在运动媒质中的光速不可能保持恒定,但会随媒质的运动状态而变化。这种依赖关系可以用光速会随着媒质和光源之间的相对运动而变化的假设来说明。这一假设在光的发射理论的基础上又变得似乎有道理了,我们已经看到了在那种理论里,一名观察者测量到的光速是依赖于光源的运动的。斐索实验对这一理论的支持,可能是为什么爱因斯坦在相对论的构成里对这一实验给予创新意义的原因之一,即使它终究没有可能在一种发射理论之内找到能够与洛伦兹理论相竞争的一种解释。斐索实验确实有利于在辐射现象的领域里的相对

性原理,即使这一点依赖于一些终于变得站不住脚的理论的语境。

156 爱因斯坦——不仅是爱因斯坦——在 20 世纪来临之际认为复兴光的一种微粒理论有意义的,这一事实又一次表明,运动物体的电动力学属于经典物理学的边界问题所处理的范围,在那里,正如建筑在电动力学的基础上的光传播定律引起争议一样,像相对性原理和速度相加定理等力学原理的有效性问题就会成为引起争论的焦点。这些边界问题乃是洛伦兹提出的电动力学以太理论和爱因斯坦追寻的光的发射理论的典型出发点。

这两种计划之间的本质区别在于以下的事实,以太理论,特别是洛伦兹的版本,实际上想要说明光学和电磁学的所有已知现象,而发射理论则导致一些特殊的假设,即使对一些简单的问题亦是如此;因而为了说明光被镜面反射的现象,必须假定反射的光一般地具有与入射的光不同的速度。还有一个更加基本的困难,即人们必须认识到,光不仅以强度、颜色和偏振为其特征,而且还要以某种方式以光的速度为其特征,但却没有为后者规定怎样用普通的实验来了解它的这一特征。于是,与以太理论不同,发射理论至多仍然处在它的幼稚时期。其他物理学家也已经沿着这一路径去探究过,例如瓦尔特·里兹(Walter Ritz),但亦都没有成功。因而,像我们已经看到那样,与爱因斯坦对运动物体的电动力学的、以实验为导向的研究的主要结果有关的所有事实,都已经摆出来了;现在我们看到了,他的理论思考的主要结果就是那样了,他对电动力学的理论看法亦是如此,而且麦克斯韦和洛伦兹的经典理论也是于事无补的。

作为经典物理学与现代物理学之间桥梁的统计力学

157 我们刚才讨论过了,爱因斯坦在他获得经典物理学知识的第一阶段,想出了一些对已建立理论的推测性替代物,然而它们在概念上仍然依赖于经典物理学或者甚至返回到更早的理论。现在提出这样的问题:爱因斯坦 1905 年的突破是怎么在这些早期推测的基础上形成的呢?那些推动爱因斯坦寻

找物理学的不同领域之间的联系要素的证据的物理学具体问题又一次成了关键因素。早在1901年至1902年间,这些问题已经连同阐述热的运动理论的挑战摆在了他的面前;那时候他已经从玻耳兹曼的著作中学习了气体理论,正要用统计力学详细阐述热的运动理论,统计力学使他能够把可以运用原子图像的领域推广到那些其微观动力学有异于气体、甚至在细节上还不清楚的物理过程。我们在下面将详细讨论,正是统计力学的建立为年轻的爱因斯坦提供了把他的推测变成一场物理学革命的条件。

考虑到爱因斯坦多方面的兴趣,包括液体的原子理论、扩散过程、金属的电子理论和热辐射以及其他一些课题;对他来说,运动理论的这样一种推广必定是在玻耳兹曼已经达到的成就之后的最紧急的一步。爱因斯坦确实起初觉得他对统计力学的发展只是为玻耳兹曼的理论“填补一处缺口”,而不是在概念上有别于它的一种创造。但玻耳兹曼的19世纪运动理论只是一种将物理学的力学基础的范围加以推广的手段,而统计力学也相应地变成对这些基础加以怀疑,并克服其中的问题的一种手段。像我们将要看到的那样,它使得爱因斯坦能够认识到,经典的辐射理论是站不住脚的,并且因此把他对以太概念的思辨性的拒绝转变为在他进一步的科学进程中的一个不容否定的先决条件,并且它也成为最终导致1905年革命的一个不容否定的先决条件。

是什么使得统计力学能够起到在经典物理学和现代物理学之间的桥梁的作用呢?尽管运动理论典型地开始于一个宏观系统里的几种原子组分之间的相互作用,例如气体分子之间的碰撞,但统计力学并不注重于系统性质随时间的演化,因此它的应用比运动理论要普遍得多。统计力学的注意力更加集中在一个虚设的系综的统计性质上。我们在第三章讲到玻耳兹曼关于气体运动理论的工作时已经引进了这个概念,它的确领先于统计力学的许多方面。我们回想起一个虚设的系综表示同一系统的数目很大的许多个本质上完全相同的复制品。所有这些副本都遵从同样的动力学规律,但它们各自的组分原子的具体组态是各不相同的:亿万个原子有无数种放大了才看得清楚的组态方式而仍然构成具有相同的给定体积、压强和温度的宏观气体。从微观来描述一个系统的时间演化这种困难且通常是不可能的做法,现在被由

所考虑的系统的这样的大量不同的副本构成的统计平均所取代了,这些副本遵循着同样的动力学,但分布在与系统所受到的给定约束条件相容的所有初始取值上。

处在平衡状态中的不同种类的热力学系统是由不同的统计系综表示的,它们的名字是由美国物理学家吉布斯起的。例如,一个孤立的系统是用“微正则系综”代表的,在其中所有成员都近似地具有相同的能量。一个不是孤立的而是与一个温度保持恒定的热库相接触的系统,可以用“正则系综”来代表,其中的各个成员的能量遵从用一个指数函数表征的、确定的统计分布。

在麦克斯韦和玻耳兹曼等 19 世纪热的运动理论的杰出代表的著作里,可以找到统计力学一些个别要素的表达。但只有到了吉布斯于 1902 年出版的《统计力学的基本原理》一书里,才给出作为一门完整的和独立的统计力学的第一种理论表述。同在 1902 年,爱因斯坦亦发表了他关于统计物理学的一系列论文中的第一篇《热平衡和热力学第二定律的运动理论》;接着是 1903 年发表的《热力学基础的理论》和 1904 年发表的《关于热的一般分子理论》。这三篇论文不仅与吉布斯各自独立地确立了统计力学的理论表述,而且提供了爱因斯坦对热辐射问题研究的基础,亦是他把布朗运动和其他涨落现象看做原子存在的证据的分析的理论基础。

毋庸置疑,对 20 世纪物理学的发展带来了巨大冲击的统计力学,成为了科学史上的一种概念性的创新。它的那么多建筑砖石都来自麦克斯韦和玻耳兹曼,并且时间上居于这一创造之前的这一事实,提示我们这一创新主要是由于看法的转变,由于在一种哥白尼过程的意义上用新的眼光看待业已存在的结果而对它们重新给出解释。在爱因斯坦的情况,这种新的眼光完全是由统计方法的应用带来的许多新问题所提供的,这些问题并不直接属于运动理论可以应用的范围。

在上一章里描述的同时代人对原子论的应用,难得反映在玻耳兹曼的气体理论里,爱因斯坦主要就是从他的著作里获得关于运动理论的知识。毫不奇怪,上面引述过的,爱因斯坦在 1901 年 4 月写给米列娃的信里对玻耳兹曼的气体理论远不如对相对论那么关心。爱因斯坦在阅读这本书时,由于他对当时原子论的应用有丰富的一般知识,能够注意到一些不那么具备广阔的

知识的读者容易忽略的缺点。但在另一方面,他在气体理论方面的准备则不如其他的读者那么充分,这指的是他对玻耳兹曼的全部著作还不熟悉。因此,他可能没有按照玻耳兹曼较早成就的眼光去看那本书,也没有看到推动玻耳兹曼研究的目的。爱因斯坦宁可把他自己的兴趣放在气体理论中陈述的结果上,因而他能够通过把它们放到一种新的语境里,提出对这些结果的一种新的解释。

这一新的语境包括爱因斯坦对金属的电子理论的最特别的兴趣。1901年4月,他研究了德鲁德在这个问题上的论文。在一种特别的,非常简单的气体模型的基础上,德鲁德假设在金属里有一种可以运动的带电粒子,他的理论解释了在金属的电导率和热导率之间的、已经在经验上确立了的关系。在这里,热导率也被看做由于自由运动的带电粒子之间的碰撞引起的。到5月底,爱因斯坦读到了在这个问题上的另一篇文章,文中证明了,在电导率和热导率之间的关系的解释,并不依赖于原子模型的这样一些细节上的假设。160 这篇文章的作者马克斯·赖因加努姆(Max Reinganum)论证说,这种解释依赖于关于自由的电荷携带者的颇为普遍的统计性质,特别是依赖于能量均分的有效性,即是说,依赖于带电粒子的平均动能与金属原子相等的假设。读了赖因加努姆的文章之后,爱因斯坦决定不发表他自己关于这个问题的想法,并且转而在5月底6月初左右,写了一封私人信件给德鲁德。^①

在他的信里爱因斯坦对德鲁德的理论提出了“两点实际的反对意见”,这可能指的是德鲁德的统计假设以及出自运动理论的启发,特别是能量均分能否应用于电子理论的情况。在同一封信里,爱因斯坦告诉德鲁德,他正在谋求一个职位。他在1901年7月初收到德鲁德的回信。虽然没有留下关于它的文字记录,但从别的资料里我们了解到结果是令人失望的,也许对信中的科学内容和他的求职希望都是如此。这封信里提到了玻耳兹曼的工作。德鲁德毫不犹豫地马上对爱因斯坦这样的一名科学的新手明确表示,像玻耳兹曼那样的大师当然是不可能有错的。初看起来我们也许会对德鲁德在他的

① 这封信未收入已经出版的《爱因斯坦全集》,但在《全集》第1卷里的110和112文件(都是给米列娃的信)里提到了这封信。——译者

回信里竟提到玻耳兹曼感到惊讶。看来德鲁德感到在爱因斯坦的挑战面前，保卫玻耳兹曼比保卫他自己的电子理论更加重要。如果我们记得爱因斯坦关于统计物理学的论文是从其先前的历史中衍生出来的，那么所处的语境就会变得清楚了。它们尤其适于支持他对德鲁德的批评，事实上不多不少也正是对玻耳兹曼气体理论的批评，尤其是当我们注意到爱因斯坦以为他已经在玻耳兹曼的工作中发现的一处缺口时更是如此。爱因斯坦想要通过发展统计力学来填补对统计物理学诸定理的辩护上的这个缺口，例如在比气体普遍得多的系统的能量均分定理的问题上。

爱因斯坦通知他的朋友说，他会很快发表一篇对德鲁德的批评性回答。他只能同意他的慈父似的朋友约斯特·温特勒(Jost Winteler)对教授们的批评：

- 161 您关于德国教授们所说的一番话是一点也不夸张的。我又结识了这类人当中另一个可悲的样品——一位一流的德国物理学家。对于我针对他的理论里的一个会在他的结论中导致直接过错的论点提出的两条中肯的异议，他的回应竟是指出他的另一位(一贯正确的)同事亦持这种论点。我将写一篇巧妙的论文来惩罚他。被权威冲昏头脑是真理的最大敌人。(CPAE 1, S. 310^①)

统计力学与辐射理论

德鲁德的电子理论不是爱因斯坦研究统计力学的唯一理由。在1901年春天他还以热烈的兴趣阅读了普朗克关于黑体辐射的几篇论文。其中一篇处理的是原子大小的确定，因而可能是爱因斯坦特别感兴趣的。但他也对普朗克运用上面已经提到过的振子概念来处理物质和辐射的相互作用的工作感兴趣。在普朗克的模型的基础上，爱因斯坦进一步提出，在微观的尺度上

① 中译文参照：《爱因斯坦全集·第1卷》，赵中立主译，长沙：湖南科学技术出版社，第294页。

物质都只是由普朗克假设的那种电学振子组成。做出这一假设之后,爱因斯坦由这一猜测性的假设推断,物质的光学性质和热学性质之间应当有一种关系。特别是,爱因斯坦断定我们按这条路子能够说明对于杜隆-珀蒂定律的偏离,这条定律把固体的热容和它的原子结构联系起来了。根据爱因斯坦的假设,杜隆-珀蒂定律应当只对内能均等地分布在每一个组分的基本振子上的物体才能够成立,并且爱因斯坦进一步断言,只有物体吸收在整个能谱上的辐射才有可能。因此,透明的物体因为对可见光不是吸收而是透过,就应当是杜隆-珀蒂定律的例外,因为并不是它们的所有内部自由度都能够被“激活”。

爱因斯坦 1900 年的以上想法与他 1907 年关于比热的量子理论惊人地相似。在两种情况下,都是对杜隆-珀蒂定律的偏离的说明,以及辐射和热学性质之间关系的建立的尝试。两种方法都用到普朗克在物质的分子组成的一种理论的语境中对辐射的研究。爱因斯坦后来的理论基于单个振子的能量只能取一些分立数值的、与经典物理学相反的假设。虽然年轻的爱因斯坦的猜测性想法没能率先导出对经典物理学的这一突破,它亦提供了一个模型,其细节可以在后来符合于这样一些新的看法。对我们而言,更重要的是,这一想法亦为爱因斯坦提供了批评普朗克的辐射理论的框架。事实上,在形成了他的想法之后不久,爱因斯坦就开始怀疑具有固定的周期和阻尼的振子能不能承担热平衡状态下的能量交换。162

这一看法不仅破坏了他自己的观念,而且亦破坏了普朗克的热辐射理论。于是,爱因斯坦既放弃了他早期关于比热的振子理论,也放弃了对普朗克的研究代表了对于辐射问题的令人满意的答案的信心。当爱因斯坦第一次关注普朗克的工作时,他的重点正好是辐射问题。这一问题也成为他后来的概念革新的萌芽:在平衡状态中的热辐射和能量均分定律之间的关系,亦在金属的电子理论里起到关键的作用。爱因斯坦运用统计力学,成功地为此条定律给出了它的理论基础,使得它也可以应用于那样一些非力学的系统。

统计力学以这种方式变成洞察物理学的新的概念基础的工具,而不只是把宏观世界的类似性质直接地转达到微观世界的可能性。爱因斯坦关于熵和概率的联系的解释(这种联系最早是玻耳兹曼对像气体那样的力学系统提出来的)起到了特别的作用,它也是普朗克用来试图找出辐射定律的一种理论基

础。1904年爱因斯坦在他的统计力学里推导出玻耳兹曼原理,即系统的熵是它的微观状态的概率的量的关系,从而为它给出了一种更普遍的基础。

163 爱因斯坦在他1905年关于光量子的论文里,运用了玻耳兹曼原理来对热辐射的本性做出推论,而他相信那是与普朗克的观念相矛盾的,即使这种矛盾并没有明白地表达出来。后来他在给贝索的信里,回顾了那个时候:

对我来说,1904年至1905年时我是你的听众;我接受你关于量子问题的通信时,剥夺了你的部分名望,以及由于你而把普朗克当做一位朋友。(Einstein und Besso 1972, S. 238)

贝索明显已经劝阻了爱因斯坦对普朗克1904年发表的辐射理论的批评,而且特别是对于他对能量均分问题的处理的批评。对爱因斯坦来说,他明显在与德鲁德的交往中汲取了教训——即使是科学上的革命也偶尔需要灵活的外交手腕。

在玻耳兹曼原理的帮助下,爱因斯坦能够特别推广在热辐射和气体之间的对应关系,那是他在1901年就已经发现了。玻耳兹曼原理允许在维恩辐射定律和理想气体之间建立另一种关系,这一关系体现在维恩定律和与统计无关的光量子假设之间的一种直接的联系。爱因斯坦的论证基于涨落的考虑,在这种考虑中玻耳兹曼原理用来从在一个确定的体积里一定数目的粒子的概率推出一个热力学状态的熵。用同样的方法也能从对找到确定数目的原子的熵的一种简单审视过程中推出理想气体的熵。

164 从热辐射的辐射定律能够很普遍地得出作为体积函数的指定频率辐射的熵的表达式。如果我们以维恩定律为基础,那么就可以由爱因斯坦的论据,用玻耳兹曼原理去推出辐射的概率分布。结果表明,在维恩定律有效之处,其分布的行为的确像辐射一样是由一些独立的光量子所组成,它们的能量与其频率成正比。反过来,如果我们采取了光量子假设,也可以用处理理想气体的熵的类似方法,运用熵和概率之间的玻耳兹曼关系式推导出维恩定律。因而这种推理暗示着理想气体与光微粒气体之间的相似性,只要后者的能量分布遵从维恩定律。

1904年爱因斯坦应该熟悉对热辐射的微观构造的这种看法;他在统计

力学的第三篇论文里,包含了对热辐射的涨落的考察,那是与这种推理密切联系的。表面上看,这一考查只涉及辐射的经典性质。但通过仔细的考查我们发现,尽管如此,爱因斯坦的兴趣还在于试探经典概念的限度。在上面引述过的写给贝索的信件里,显示出爱因斯坦在1904年已经在辐射的量子特征上做工作了。爱因斯坦考查的出发点是他关于一个统计系统的能量涨落的公式,他在这道公式里已经把这种涨落写成平均能量的温度的函数。这种能量涨落的观察会给出关于统计系统的微观结构的结论。

那时候爱因斯坦设想,热辐射是从经验上表现出存在着这种涨落的唯一系统。他假设有一个空腔,其尺寸选择得可与黑体辐射能谱的最大波长相比较,那么这个空腔里的辐射的能量涨落就会与其平均能量同属一个数量级。现在 he 可以从已经在经验上确认了的热辐射定律,即维恩位移定律和斯特藩-玻尔兹曼定律,连同他关于辐射腔体尺寸的假设,计算出发生的涨落的确会有平均能量的数量级。

这一结果值得注意的特点是,它的推导中没有对辐射的微观结构做出任何特定的假设。由于这一充分的理由,现在可以运用关于热辐射的能量涨落的论据来获得这种本来面目的微观结构的信息。结果表明,把这些涨落解释为热辐射的不同成分之间的干涉的麦克斯韦电磁学理论,不能与关于这些涨落的经验知识相容,就像在热辐射的已知定律里所表达的那样。然而,热辐射的能量涨落能够借助于光量子假设而得到说明。更确切地说,热辐射的能谱由普朗克公式描述了的事实,意味着这些涨落一部分具有波动的特性,另一部分则可以用辐射的微粒本性来解释。爱因斯坦1909年才发表的这一见解,可能在1905年之前就形成了,而他1909年的论文意味着波粒二象性的诞生,并且这一概念将会决定量子理论随后的发展。爱因斯坦还用同另一个模型的联系把它推进得更远,在这个模型里有一块暴露于热辐射中的镜面,由于经受着辐射压强而进行布朗运动。我们将在讨论到与这种类型的运动的联系时回到这个模型上来。

关于热辐射的涨落现象的观点是与在经典辐射理论的语境中完全不能达到热平衡的看法密切相关的,在爱因斯坦1905年关于光量子的论文里,一开始就详细谈到这个问题。只有具备这种看法,他才能够站在使他的猜测性

想法发展为经典物理学的一场革命的立场上。为了理解这一突破的意义,有必要回过头来再读一次普朗克的论文。我们在第三章里讨论过普朗克对他的辐射定律的推导,是以在一个特定的模型里对处于热平衡的热辐射的普遍模型的分析为基础的,在这个特定的模型里热辐射与振子进行着热交换。在靠纯热力学的论证推导出振子的平均能量分布的尝试失败之后,普朗克求助于从玻耳兹曼那里学来的一种统计方法,并且他将其改装成这样的方式,先是得出振子然后得出热辐射的平均能量。

但当关于热辐射能量分布的知识坚固地植根于与经典物理学诸定律结合的精密实验结果之时,普朗克的统计论证却不能够锚定在经典物理学的一个同样确立了的领域上。它们尤其由于给出了正确的结果——热辐射的已知定律——而得到了证实。普朗克的推导的基本问题是,它没有真的澄清了这一定律与经典物理学的基础之间的关系。特别是,普朗克的推导留下了这样一个未解决的问题:是否还有任何这种不会导致矛盾的关系。

但是能做什么来把振子的统计行为吸收到经典物理学的可利用知识里,而没有一个规范的领域与这种行为相关呢?爱因斯坦对这个问题的反应是开发一种思维模型的网络,它给予振子以超出它们在普朗克的辐射理论里的辅助构造的作用。我们已经在爱因斯坦关于对杜隆-珀蒂定律的偏差的思辨性解释的讨论里看到过这样的例子了。一般而言,爱因斯坦对这一类模型的处理有别于他把振子和其他物理对象联系到一起,从而建立在普朗克的振子和经典物理学的不同领域之间的关系的方式。在爱因斯坦 1905 年关于光量子的论文里,讨论了振子和辐射与气体相关的一个模型:

考虑一个由一些完全反射壁包围的空间,其中含有一定数目的气体分子和电子,它们在空间中自由地运动,并且在彼此靠得非常近时相互施加保守力的作用,即是说,它们能够像在气体运动理论里的气体分子那样互相碰撞。(CAPE 2, S. 151^①)

在一处脚注里他说明道:

^① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第2卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社 2002 年版,第 133 页。

这一假定等价于在热平衡状态下气体分子和电子的平均动能彼此相等的假定。(……)

然后他引进了振子模型:

进一步假设,有一定数目的电子由于受到某种力而束缚在空间的一些彼此距离甚远的点上,这种力直接指向这些点,并且其大小正比于从这些点伸出的距离。当这些电子非常靠近那些自由分子和其他电子时,亦会与它们一起参与保守力的相互作用。我们称这些束缚在空间各点上的电子为“振子”;它们发射和吸收具有确定周期的电磁波。

普朗克也同样地处理过这个模型,但没有像爱因斯坦那样为了导出普朗克公式与经典物理学的不相容性而运用能量均分定理。对于两个分隔开来的系统,其中之一含有气体和振子,另一个含有辐射和振子,爱因斯坦在给出了在两个系统里的振子平均能量的表达式之后,指出这两项能量应当是相等的,如果“频率为 ν 的辐射能量不持续减小亦不持续增加的话”,即是说,如果达到了热力学平衡的话。(CAPE 2, S. 154^①) 167

在这样一个组合模型里,确实必定存在着热力学平衡状态。在这个状态里几种组分的能量分布必定与它们彼此分开来时是相同的,否则的话,能量就要从一种组分流向另一种了。因此,就有了这样的可能性,从关于一种组分的知识推断出另一种组分的统计行为。特别是,运用由气体运动理论给出的关于气体分子能量分布的知识,就可以推出振子的平均能量。从振子的行为就像力学系统那样的假设出发,根据统计力学可知,它们的平均能量必定与由气体理论的均分定理确定的气体分子相同。

不同模型的互相连结在这一点上使两条互相冲突的论证路线发生了一次撞击,第一条是从统计力学开始的路线,第二条是与普朗克辐射定律相联系的路线。因为,根据第一条路线振子的平均能量本来是与频率无关的,这一结果是与从普朗克辐射定律推出的同频率无关的平均能量分布相矛盾的。

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第2卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第134页。

而且,最后从爱因斯坦的模型又可以推导出辐射公式,与普朗克的推导相反,那是没有疑问可以锚定在经典物理学上的。事实上,运用从气体理论得到的能量分布,易于沿着普朗克的推理路线,推导出今天被称为瑞利-金斯定律的一条辐射定律,爱因斯坦在1905年的论文里对此作了证明。与普朗克对自己的定律的推导相反,这一推导现在不再建立在不可靠的基础之上,因为在普朗克的推导里涉及的成问题的知识领域,即一个振子能量状态的计数,已经
168 被在经典物理学里具有坚实基础的气体运动理论所替代。但是,结果表明,最后得到的辐射定律^①不仅与黑体辐射的精确测量相抵触,而且甚至作为对热平衡状态的一种描述也是无意义的。它反而导致了“紫外灾难”,这是后来埃伦费斯特取的名词。这一名称的意思是,根据均分定理,像假想的以太那样的连续介质应当把能量分配传送到所有的振动模式上。但由于它能够以任意高的(“紫外”)频率振动,这种能量分配是没有止境的。

简而言之,爱因斯坦关于热辐射、气体和振子的组合模型,连同他对一个普遍种类的物理系统的均分定理的推导,得出了一个惊人的结论。在振子和辐射能量之间的普朗克关系,引导出的不是黑体辐射能量分布的普朗克公式,而是一个不同的结果。虽然这一结果是正确地经典的辐射理论推出来的,却是完全不能接受的,因为它会导致辐射的热平衡是不可能达到的。与此同时,这一结果使连续以太的观念出了问题。于是,从爱因斯坦的推理可知,普朗克的辐射公式是与经典物理学不相容的。从这一点看来,爱因斯坦早期关于寻求经典物理学的主导观点的代替物的猜测,落到了一个不同的状况;在一种经典的观念世界里,不再可能有非正统的推理路线,而是第一次提示出要有一个全新的观念世界。

布朗运动的发明

在我们转向这个新的观念世界之前,我们要澄清关于爱因斯坦1905年

^① 即所谓“瑞利-金斯定律”。——译者

的其他贡献的根源的某些未解决的问题。我们看到了他对运动物体的动力学的深思熟虑,以及源自他早期的科学兴趣的辐射结构的问题。但最初他关于布朗运动的论文是如何开始的呢?一开始,这显得是一个谜。他有篇论文的标题里没有提到布朗运动。他写道“我不知道‘布朗运动’在很久之前已经被观察到了”。(Einstein 1992, S. 44^①)因此,爱因斯坦必定要在某种程度上“发明”出布朗运动,这里使用了科学史家马丁·克莱因(Martin Klein)的
169
说法。虽然爱因斯坦肯定听说过这种运动,但在他的处置里没有精密的实验数据,也没有只从理论推理导出布朗运动的性质。关于爱因斯坦论布朗运动的论文起源之谜,开启了几个进一步的问题:爱因斯坦怎能在没有实验数据的情况下,纯粹从理论推理预言一种现象的非经典性质呢?他对布朗运动的研究与在1905年吸引了他注意力的其他课题有什么样的关系呢?爱因斯坦如何选中了布朗运动这个问题,并且他如何能够提出一种显然逃过了他的前辈们眼光的解决办法呢?

我们已经讨论过,爱因斯坦的观点,与许多同行科学家不同,他具有远远超出专门化学科分支狭隘边界的广阔视角,同时他又以原子论为工具来系统地检验各种物理现象之间的隐秘联系。与此同时,他意识到像“原子”和“以太”那样常常被当做同时代科学论证的不成问题的前提的概念,实际上处于证据不足的状况。爱因斯坦在大学里的那几年,热的运动理论乃是恩斯特·马赫、威廉·奥斯特瓦尔德、格奥尔格·赫尔姆(Georg Helm)和玻耳兹曼激烈争辩的论题。马赫拒绝承认不能够直接感知的实体的存在,因而对原子的存在十分怀疑。

但爱因斯坦对布朗运动问题的观点,不仅是由他寻求原子假设的证据而展开的,而且首先是属于他先前研究的课题中特别的一组问题。在爱因斯坦的后来被他自己贬低为“一名新手的无价值的工作”的、关于布朗运动的两篇论文中的第一篇里,他已经有机会使自己熟悉在他关于布朗运动的论文里会起关键作用的几个论题,例如关于扩散的本性以及热力学对溶液理论的应

^① 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英、范岱年编译,北京:商务印书馆1976年版,第21页。

用。在1903年他已经使用了水力学的论据,提出了怎样去计算液体中的离子的大小的一种想法,以及使用扩散过程来计算中性盐分子大小的方法。爱
170 因斯坦把他提出的这一想法写进了他的博士论文,那是他在经过失败的尝试之后终于在1905年获得通过的。

这篇博士论文提出了一种测量原子大小的新方法;它说明了怎样通过考虑溶解在溶液中的大分子的行为去确定阿伏伽德罗常数。计算的程序包括写出两道有两个未知量的方程,从这两个量就可以计算出阿伏伽德罗常数和分子的大小。其中的一道方程描述了加进糖分子时溶液黏滞度的变化,而另外一道方程则表示了糖分子的扩散系数与溶液黏滞度之间的关系。这里的扩散系数确定了与溶解物质浓度的差别平衡的扩散速度。第一道方程是由相当复杂的水力学计算推出来的。把扩散与黏滞性联系起来的另一道方程,结果也对布朗运动的分析至关重要,因此详细地考虑它的起源也是很有意义的。

爱因斯坦一方面考虑在液体中的微粒并且分析它们在扩散中的行为,另一方面又考虑渗透压。因而他关注着两种热学过程:一种决定着溶解物质在液体中的行为;另一种在最后的分析里能够还原到个别微粒的运动。在每一种情况下,关键之处都是寻找作为整体的溶液的行为和个别微粒的运动之间的桥梁。至于渗透压的情况,这种桥梁已经存在于溶液理论里了,那是由亨利克斯·范特霍夫(Henricus van't Hoff)和能斯特相继建立起来的。这一理论的确给出了气体运动理论的一个精确的副本。它可以把用一块允许液体透过但不允许溶解微粒透过的薄膜量度的渗透压,处理得好像气体压强同阿伏伽德罗常数的联系那样。在扩散的情况下,这种联系是由施加在液体中的微粒的力、液体的黏滞度和微粒沉降的终末速度的斯托克斯定律建立的。如果假想引进了这样一种力,并且假设它同渗透压达到平衡的话,那么就可以
171 消去这种假想的力而得到在扩散、黏滞性和渗透压三者之间的一道直接的关系。但因为渗透压是与阿伏伽德罗常数有关系的,这样就能够导出在扩散、黏滞性和阿伏伽德罗常数三者之间的爱因斯坦关系式。于是,爱因斯坦得出了扩散系数的一道表达式,其中含有原子的大小。

在爱因斯坦的博士论文里,他运用了这一方程连同联系着原子大小和黏

滞度变化的水力学方程,从关于扩散和黏滞性的实验数据推出原子的大小。在他关于布朗运动的论文里,他重新推导出黏滞-扩散方程,这回用的是统计物理学的方法,因为只有采用这一方法,才能够为像渗透压和悬浮微粒等概念的应用提供依据。这一概念毕竟原来只是为在溶液的热力学里处理溶解物质的分子而引进的,能不能把它运用到悬浮微粒的集合,还是要迈出未知是否正确的一步。

但是,爱因斯坦怎样从对应当可以观察到的悬浮在液体中的微粒涨落的思考中做出预言,而迟至1904年他仍然相信只能够在热辐射里从经验确定这种涨落呢?明显可以看出,正是对溶液理论和辐射理论这两方面不同思考的结合,使他形成了关于布朗运动的观念。爱因斯坦综合了他的博士论文研究成果和他在统计力学语境中对涨落的研究及其对热辐射的应用的结果。于是他手中掌握了在一个物质系统里建立可观察涨落的模型所需要的所有联系,他对布朗运动的研究就是这样的一个例证。

首先是热辐射的涨落可以直接同一种物质过程联系。设有一个充满热辐射的空腔,里面装有一面反射镜,它就会由于入射的辐射和辐射压强的摩擦力而显示出类似于布朗运动的行为。爱因斯坦后来在他的著作里详细讨论了这一思想实验,但他明显在1905年已经有了这一想法。爱因斯坦在1952年1月写给劳厄的信上说,他肯定在1905年就认识到麦克斯韦的理论会导致辐射压强的不正确的涨落,因而亦会导致沉浸在由普朗克定律描述的热辐射中的一面镜子的错误的布朗运动。因此,这面同时具有力学性质、电动力学性质和热力学性质的镜子,可以被看做是在那时候爱因斯坦主要关心的三个问题之间的一个“缺失的环节”。然而,很难说这面镜子是在做典型的布朗运动还是相反。无论是哪一种情况,都可以运用关于涨落和耗散(由摩擦引起的能量损失)的一种思维模型,其中的涨落是直接与环境摩擦相关的。在热辐射腔中的一面活动镜子的情况中,辐射压强对镜子所施加的力相当于一种摩擦。

172

其次是关系到爱因斯坦用来推断热辐射的涨落的应当可以观察到的论证。这一论证也能用来把溶液中大分子的模型转换为悬浮微粒的模型。对热辐射的情况他曾经论证,对于波长足够大的辐射,这样的涨落应当是能够

观察到的,这指的是波长可与空腔的尺寸比较的情况。由相似的论证可知,如果把溶解物质的分子扩大到一定的程度,它们的涨落就会变得可以观察到。换句话说,只需要在我们的头脑里把含有大分子的溶液变换成含有虽小但仍然可以观察到的微粒的悬浮液。在那时候,这一步推理似乎是特别有道理的,因为在19世纪的化学里,公认的关于溶液和悬浮液的区别,到了20世纪初已经逐渐失去了它的绝对的意义。特别是使用新发明的超级显微镜,已经能够研究许多胶质溶液的组成,使得人们弄明白了在溶液和悬浮液之间其实没有绝对的区别。在反射镜和悬浮微粒之间的另一种相似性是,在两种情况里都不是由它们的质量决定的所预期的无规行走位移的尺度,在反射镜的情况下是由其表面的面积、在悬浮微粒的情况下则由其直径决定的。确实如此,足够大的物体的质量会使得它由能量均分定律决定的速度小到可以忽略不计。

173 在爱因斯坦的博士论文里提出的论证的重要作用,在于为关于可观察的涨落现象的具体推理,提供了一个细致的技术框架。把博士论文里关于溶解物质分子的模型与他对可观察的涨落现象的研究结合起来,爱因斯坦很自然要转而考虑悬浮微粒所必定会显示的不规则运动。爱因斯坦已经提出了描述扩散系数对分子或者微粒大小的依赖的公式,它应当使得有可能从悬浮微粒的不规则运动推出关于原子尺寸的知识,至少在这种情况下他成功地把观察到的个别微粒的运动与扩散联系起来。为了填补这一最后的缺口需要概念上的另一步,必须把布朗运动看做是直到那个时候经典物理学里的一种未知过程。

在我们进到这最后一步之前,对作为一种边界问题的布朗运动的问题,按照爱因斯坦自己在他关于布朗运动的论文开始处所表达的方式再看一看是有益的。他论证说,从唯象性的热力学理论的观点看,悬浮在液体中的微小颗粒应当与周围的液体达到热平衡,并且因而应当不再进行不规则的运动。根据经典热力学,第二定律不只是一条统计性的命题,它主张的是绝对的有效性。然而,从运动理论看来,这些悬浮微粒与原子分子的差别仅在其大小。因而,它们处在液体的平衡状态之中,必定总是经受着碰撞,因此它们本身应当分担着这种热运动。

因而这些微粒的不规则运动表明了经典物理学的两个领域之间的冲突,类似于在运动物体的电动力学里相对性公设和光速恒定假设之间的冲突,亦类似于在热辐射情况下波长连续的假设和能量均分定理之间的冲突。爱因斯坦对这些冲突的反应,在这三种情况下都是类似的,而且都以类似的方式区别于他的同时代人,他们倾向于以一种更加专门的观点来看待这些冲突。我们有理由假定,这样的冲突来自在每一个专门领域的基础里暗含的某些缺陷,但爱因斯坦靠着他对经典物理学知识的审视连同他的哲学背景,对这些解答都抱着怀疑的态度。对于布朗运动问题,爱因斯坦结合了对运动理论和热力学的看法,即是说微观物理学和宏观物理学两方面的结合,而不是把一个还原到另一个。他别开生面地为“介观”物理学领域建立了新的定律,因而第一次确立了物理学知识的这个自主领域的地位。 174

爱因斯坦的哥白尼式革命

爱因斯坦 1905 年的几篇论文是以几种方式相互关联的:第一,它们都是从解决电动力学的理论问题引起的广泛物理学兴趣进行追寻的结果;第二,它们也确是面对着经典物理学而尝试运用原子观念且包含了新的非经典性质去找出一直看来没有联系的相邻领域的一个综合性的计划。因为这种尝试最终失败了,并且爱因斯坦诸如光的发射理论那样的一些猜测性观念走进了死胡同,于是他就有理由去寻找解决问题的另一种反思层面,哪怕只得到部分的解答;因此,第三,1905 年那几篇革命性的论文可以被看做是哥白尼过程的结果,在其中不是对整个经典物理学而只是对它部分的重要结果进行了“头脚倒置”(vom Kopf auf die Füße)的改造。

这些文章终究是一个更加庞大的、更加野心勃勃的计划的一些片断,这一事实也说明了为什么它们之间的联系只是下意识地表述出来,并且甚至可以在许多地方得到证明,但爱因斯坦自己却有意无意地隐匿这种联系。因此在他关于运动物体的电动力学的论文里,他证明了能量和频率从一个参照系转换到另一个参照系时,采取同样的变换形式,如果新的空间-时间理论与光

量子假设(在这一假设中光微粒的能量依赖于它的颜色,亦即是依赖于它的频率)之间是相容的话,那就必然是这样的。但他自己并没有明白地说出这种联系。上面已经提到,在1905年的几篇论文里,没有明显提到爱因斯坦对热辐射和对布朗运动的两种处理之间的联系。爱因斯坦只是在多年之后才在他的著作里回过头来讲这些联系。

爱因斯坦主要关心的,关于光量子假设、布朗运动和运动物体的电动力学的那三篇最重要的论文,并没有构成一门新物理学的综合性计划,而是形成在原来的物理学,特别在概念性上已形成紧张局面的力学、电动力学和热力学之间边界问题上的研究。通过把这些张力集中到一点并且证明像热辐射、电磁感应和布朗运动那样的问题不能够在经典物理学的基础上得到满意的说明,他在经典物理学大师们所做出的解答之外开辟了新的境界,把眼光投向经典物理学的边界区域上的问题。他早期猜测性的方法,现在成了指示出逃离经典物理学两难境地的道路的启发式观点。因此,爱因斯坦关于光量子的论文取了那么一个标题“关于光的产生和转化的一个启发式观点”绝不是偶然的。对爱因斯坦来说,相对论的新的时间-空间学说也具有一种启发式框架的特征,在这个框架里可以找到有关问题的精确解答。

光量子的第二次发现

所谓“哥白尼过程”就是我们上面提出来的从经典物理学的边界问题的有疑问的解答中产生出的一种新物理学的基本机制。但它的细节是什么?对于热辐射的问题,爱因斯坦关于光的粒子说的猜测性想法可能是决定性的出发点。我们已经看到,看来他在早期就确立了关于这样一种微粒理论与热辐射中不同能量分布的维恩公式之间的关系。与此同时,爱因斯坦也检验了经典辐射理论在其他方面的极限,特别是联系到他关于涨落现象的思考。

那么他肯定知道热辐射的涨落不能够仅仅在经典发射理论的基础上得到说明。到了1904年,他还没有认识到这些涨落的行为类似于理想气体中或者溶液中的涨落,如果热辐射能够被看做一种光微粒的气体,即是说如果

它是在维恩辐射定律有效的范围之内的话。当然到那个时候,爱因斯坦已经弄清楚了,有时候不是维恩定律而是普朗克定律才是经验上正确的。因而在没有理由把维恩定律以及基于光的粒子说对它的推导看得那么认真。只有爱因斯坦那时候提出了辐射的热平衡状态不可能有一种经典解释的论证这一事实,为这些论证给出了一种新的意义,即是说给出了一种非经典的辐射理论的启发式提示。

事实上维恩公式现在可以解释为借助于能量均分定理从经典物理学推出的辐射公式的副本,并且它是不可接受的,因为根据这一定律是不可能达到热平衡的。这两道公式,维恩定律以及后来以瑞利-金斯定律为人所知的经典定律,可以从这个观点看做普朗克定律在相反的两种条件下,即恒定温度下的热辐射分别在高频率值和低频率值的极限下的情况。爱因斯坦对于热辐射涨落的思考,使他看到了波粒二象性的表现,亦有利于把普朗克辐射定律“托起”在两种极端情况之间。

爱因斯坦在他 1905 年关于光量子的文章的论证里,实质上是把他早期关于辐射的一种微粒理论的猜测性思考的顺序反过来;因而这些论证以某种方式代表了光量子的第二次发现。这一点特别清楚地表现在他把玻耳兹曼原理当做一种启发式工具来使用,由此在爱因斯坦后来关于统计物理学的一般研究,以及对辐射理论的特殊研究里达成了本质上的关联。在爱因斯坦关于光量子的论文里,他没有像普朗克那样,为了得出系统的熵而通过关于系统微观状态的假定,用玻耳兹曼原理来从一个概率函数推出结论。他反过来运用这一原理,从假设已知的熵函数得出对隐藏着的微观结构的看法。因而他现在能够运用这样的事实,作为普朗克定律的一种良好近似的维恩定律,适宜于从对应于这条定律的熵函数去推断,在这些条件下的热辐射的行为,就像一些具有能量 $E=h\nu$ 的独立光微粒的集合一样,这里的 h 是普朗克引进的常数,而 ν 是光量子的频率。爱因斯坦创造性地把玻耳兹曼原理看做一种启发式工具来使用,或许是在重新解释维恩定律时所做的一项发明。这种再解释把一种猜测性的想法转换为一种引导物理学从经典物理学的两难境地中走出来的启发式观点。

由这些思考促成的他 1905 年关于光量子的论文可以分成三个部分:第

一部分借助于能量均分定理证明了辐射的经典理论是不可能的,因为它会导致紫外灾难,这在上面已经提到过了,因而就给新的假设留下了空位;在第二部分里,在玻耳兹曼原理的基础上提出了爱因斯坦中心命题的理论论证,即传播中的光不是连续分布的,而是由数目有限的、在空间中局域化的一些能量量子组成,它们在运动中不会分割开来,并且只能够作为整个的实体被吸收或者创生;第三部分处理的是根据他的观点对已经确立的经典理论提出的、能够用他关于光的新概念解决的问题。在用光量子假设的帮助来处理的实验争端之一是光致发光,这是一种给定频率的光转变为另一频率的光的现象;光电效应,这是暴露于光照之下的金属表面释放出电子的现象;还有紫外光使气体离化的实验现象。

178 尽管光量子假设在定性地和定量地说明这些现象中得到成功,但这一假设在同时代人中的接受是有保留的。而且即使爱因斯坦在 1921 年由于在光量子假设的基础上说明了光电效应而获得了诺贝尔奖之后,美国物理学家罗伯特·安德鲁·密立根(Robert Andrew Millikan)在他自己的诺贝尔受奖演说里仍然把爱因斯坦的局域光量子描绘为没有得到证实的。那么,爱因斯坦怎么会有勇气和信心足以发表他那篇关于光量子的论文,并且为什么他不在 1904 年已经基本上认识到辐射的非经典结构的时候发表呢?这些问题再一次使我们直接注意到在 1905 年的新观念爆发中那些看来是那么多多种多样的结果之间的隐藏着的联系。爱因斯坦明显有充分的理由在 1904 年小心翼翼而在 1905 年则大胆前进,其中的理由确实与他在其他方面的研究有密切关系。

对这些问题的具体回答是与辐射的微观结构和宏观结构的关系相关的,直到爱因斯坦在运动物体的电动力学研究上取得重要进展之时这一关系才变得清楚。在 1904 年他可能已经掌握了反对辐射的经典理论的一些论点,以及有利于他的光量子假设的一些论点。所有这些论点都把他在他的学生年代里关于辐射的微粒结构的天真猜测,转变为现在变得可疑的经典理论的一种认真的替代物。

但光量子假设真的适合于取代旧的理论吗,并且它与麦克斯韦和洛伦兹久经考验的辐射理论有什么关系呢? 1904 年时这些都可能依然不清楚,虽

然那时候爱因斯坦可能已经知道光的发射理论是站不住脚的。另外,从他关于热辐射的涨落的考虑引申出来的波粒二象性也能得出这一结论。此外,辐射的热平衡问题表明了,正如他后来陈述的那样:“无论是力学还是电动力学(除了极限情况之外)都不能断言是精确有效的。”(Einstein 1992, S. 48^①)^②爱因斯坦慢慢地对“以已知的事实为基础通过建设性的努力推导出真正的定律的可能性”感到失望。迟至1905年5月,他已经认识到光的波动理论指的是对时间平均的观察,并且可能永远不会被“别的理论代替”(CAPE 2, Dok. 14^③)在这一背景之上,爱因斯坦明显发展了一种新的电动力学的框架,足以看清楚光量子假设是与这个对辐射微观结构的理解的框架相容的,即使这个框架的物理意义及其与空间和时间新概念的联系还不清楚。至少作为一种启发式观点,他发表关于辐射的微观结构的时机到了。 179

与此相反,爱因斯坦对光量子假设的思考也对他关于运动物体的电动力学那篇文章具有意义深远的影响,因为这些思考把他原来关于放弃以太的试探性的想法转变为他后续研究的一个不可或缺的先决条件。在我们谈到引导爱因斯坦到1905年的狭义相对论的最终和最紧要的一步之前,让我们再一次回顾在爱因斯坦对辐射理论的全神贯注与他对涨落现象的特别兴趣之间的密切联系。因此,紧接着他关于光量子的论文发表之后,他先在1905年4月30日完成了他的博士论文,又在同一年的5月份完成了他关于布朗运动的论文,就一点也不足为奇了。把布朗运动看做是原则上区别于微粒的连续运动的经典概念的一种统计类型的运动这一革命性观念的真正起源是什么呢?这个问题把我们带到1905年的第二次革命性的突破。

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第2卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第23页。

② 爱因斯坦的原话是“无论是力学还是热力学……”。——译者

③ 中译文参照:《爱因斯坦全集·第2卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第132页。

对扩散的一种新解释

我们已经看到,爱因斯坦从热的运动理论推断,微小的悬浮微粒应该有一种渗透压,就好像在分子溶液里一样。如果这种渗透压在空间中的分布是不均匀的话,它就会导致一种作为补偿的扩散过程,这种过程的性质可以由确定微粒在一种黏滞媒质中的运动的斯托克斯定律计算出来。因而,像我们已经讨论过的那样,爱因斯坦就得到了描写扩散系数怎么依赖于黏滞度和原子尺寸的一道方程。这一系数出现在建立溶解物质浓度的空间和时间变化之间的关系的这道偏微分方程里。而这道方程最早是由阿道夫·菲克(Adolf Fick)提出来的,他的工作追随着其他输运现象的模式,类似于让·巴蒂斯特·约瑟夫·傅里叶(Jean Baptiste Joseph Fourier)在热传导和格奥尔格·西蒙·欧姆(180 Georg Simon Ohm)在电导率上做过的工作。爱因斯坦重新解释了这道方程,就像他重新解释了普朗克的热辐射公式那样,并且,我们将会看到,也像他在运动物体的电动力学问题上重新解释了洛伦兹的变换一样,在扩散问题的情况下,爱因斯坦亦基本上保持了可利用结果的技术性框架,但改变了它们概念上的意义。借助于他关于涨落现象的工作的语境,他以这种方式对传统的扩散方程给出根本不同的新解释,确实在理论观念上“发明”了布朗运动。

爱因斯坦没有设想扩散方程描写的是一种溶解物质的总的分布,而是把它解释为悬浮微粒的不规则位移的一种概率分布。在这里他得益于他早期在统计力学上工作的经验。他以这种方式成功地识别出把悬浮微粒的不规则运动看做为扩散现象基础的基本过程。

他假设存在着一种比观察的时间短得多,又能够长到足以把悬浮微粒在两次相继的时间间隔之间的运动处理成彼此独立的时间间隔。于是悬浮微粒的位移就能够用一种概率分布来描写,它规定经过了一个时间间隔之后,有多少数目的微粒移动了一段给定的距离。在对扩散方程的这种重新解释的基础上,以及在把它同爱因斯坦的扩散系数表示式结合起来之后,这道偏微分方程的解就产生出一个微粒的均方位移作为时间函数的表达式。爱因

斯坦建议运用这一公式从实验上测定原子的分子的真正大小。爱因斯坦在他新近完成的博士论文里先提出了一种测定原子大小的方法,那是最早由普朗克在他关于热辐射的理论里第一次提出来的;现在,爱因斯坦又得出了另一种确证原子假说的精确方式。

当爱因斯坦关于布朗运动的论文对许多领域产生了广泛影响之时,它的主要结果确实成了 20 世纪初接受原子论的证据。首先在实验上得到明白结果的是让·佩兰(Jean Perrin)的先驱性工作,他的实验已经写在无数的论文和专著里了。佩兰于 1908 年启动他的实验,并且主要是按照爱因斯坦关于这个问题的思路进行的。佩兰也注意到了范德霍夫关于理想气体和溶液之间的类似性可以推广到胶体溶液和悬浮液,而这种类似是获得原子假说的证据的一种极佳的途径。然而,最值得注意的是佩兰能够详尽地证实爱因斯坦关于悬浮微粒统计行为的几乎所有预言,使得他能够把关于布朗运动的这项“发明”转变为原子假说的激动人心的实验证据。

181

早期的实验或者是纯粹定性的,或者像后来的诺贝尔奖获得者特奥多尔·斯维德伯格(Theodor Svedberg)所说,那是一些定性的但依然受到运动理论观念束缚、假设布朗粒子的速度是实验上要测量的量的工作。佩兰却清楚地认识到爱因斯坦和斯莫卢霍夫斯基的工作为布朗运动建立起一个新的概念基础,正如他在他 1913 年出版的畅销书《原子》里所说:

爱因斯坦和斯莫卢霍夫斯基以同样的方式定义了布朗运动的活跃程度。先前我们不得不通过尽可能接近一个颗粒的路径来测定“激荡的平均速度”。这样得到的值对一微米量级的颗粒总是几微米每秒。但这样对活跃程度的估算是完全错误的。(Perrin 1990, p. 109)

1909 年爱因斯坦写信给佩兰表示感谢:

我本来想过不可能以这样高的精度来研究布朗运动,你选这种材料来做实验真是太幸运了。(CAPE 5, S. 216^①)

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第 5 卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社 2002 年版,第 203 页。

具有讽刺意义的是,年代久远的原子假说的证实来自这样一个历史时刻,支持这一假说的材料竟然隐藏在对原子的经典理解的极限之处。关于物质和辐射的微观世界的证据——尤其由于爱因斯坦的贡献——最终导向了一门新的物理学:量子的物理学,它使得微粒的经典图像变得站不住脚了。

182 在这种原子论的颇具讽刺性的命运后面潜伏着在第三章里讲过的、关于不可见机制的费加罗问题。它受制于一个越来越困难的,最后由于应用范围的持续扩大而变成不相容的条件。这一命运也落到了爱因斯坦 1905 年论文的中心——以太——这另一种不可见机制的头上,这一情况特别表示在热辐射的问题上。下面我们转到他在狭义相对论的道路上的最后几步,这一命运对爱因斯坦关于运动问题的电动力学这篇论文的冲击就更加清楚了。

狭义相对论的起源

最晚到 1905 年初,爱因斯坦清楚地看到了,不仅关于运动物体电动力学的
所有事实都是有效的,而且在理论上没有什么能够代替麦克斯韦和洛伦兹
的电动力学,只要这种电动力学描写的是对时间的平均效应。关于光的发射
理论的猜测性尝试的结果是不成功的,因而爱因斯坦看到,他自己面对着的是
在这种境况下把他的革命性看法与辐射的微观结构调和起来的任务。因为
光量子的能量依赖于它们的频率,就产生了如下的一些问题:当从一个静
止参照系过渡到一个运动参照系时,能量和频率会表现出怎样的变换行为。
辐射压强的概念也提出了这样一个问题,它对于爱因斯坦考虑暴露
在热辐射中的一面镜子的非经典行为是至关重要的。因而,能量和频率的变换性质,
以及作用在一面理想的反射镜上的辐射压强的理论,成为爱因斯坦关于运动
物体的电动力学那篇论文的中心论题乃是完全不足为奇的。所有这些都提示着,
这篇文章不是像传统的看法那样,认为可以代表回溯到麦克斯韦和洛伦兹的场论的
最高成就,而事实上它是爱因斯坦寻找这一理论的代替物的努力失败的结果。
正是由于这个理由,这篇文章关注的焦点乃是那些应用,他在上面辛勤地工作,
为的是探究经典物理学的限度。

爱因斯坦关于辐射微观结构的看法与由经典电动力学表达的它的宏观结构之间的调和这一问题,受到了两个方面的冲击:首先是我们能够尝试从光量子假设和相对性原理两者相容的要求中导出一些推论,其次是从场论和相对论相容的要求中导出一些推论。就场论方法来说,上面提到的那些问题应该成为爱因斯坦的指导思想。就后一种方法来说,结果发现,当运用对称性论证,启发式地推广到一个运动参照系时,则相对性原理在电动力学里亦精确地有效——至少如果我们假设只有电场和磁场一起具有物理实在性的话。因此将洛伦兹关于电场和磁场的变换加以推广竟是惊人地容易。

爱因斯坦确实看到,洛伦兹在1895年的论文里提出的理论尽管取得了普遍的成功,却仍然受到某些缺点的困扰。确切地讲,这些不足之处推动了洛伦兹自己以及庞加莱继续改进这一理论,直到它最后取得了这样的结论,意味着地球相对于以太的运动是无法观察的,而爱因斯坦显然是喜欢这一点的。空间和时间坐标过渡到一个匀速运动参照系的相应变换公式,也很容易再一次运用到电场和磁场之上。按照这种样式,另外一个问题,即运动电子质量的问题也就迎刃而解了,因为作用在加速运动的电子上的力,可以先在它的静止参照系里计算出来,再变换回到观察者所在的参照系。在爱因斯坦的论文里,这一问题亦处在一个中心的地位上。

换句话说,爱因斯坦能够在已经确立了相对性原理的启发式推理的基础上,建立一种强有力的运动物体的电动力学,并且洛伦兹理论在时间平均的意义上是基本正确的。洛伦兹理论的主要问题是它的一些基本要素没有明确的物理意义。我们能够说的只是,当把原来的参照系变换到一个匀速运动的参照系时,时间和空间坐标的行为遵从洛伦兹变换,而不遵从经典物理学里的伽利略变换。这种依然似乎有道理的“原初相对论”(Proto-Relativitätstheorie)——借用科学史家罗伯特·里纳斯维茨(Robert Rynasiewicz)的术语来说——明显足以使爱因斯坦在1905年3月发表他那篇关于光量子的论文。

但光量子假设的成功亦向爱因斯坦呈现出一个悖论。洛伦兹理论能够以上面所述的方式与相对性原理相符合,正如由洛伦兹自己说出来的那样,而庞加莱亦在进一步发展这一理论时说过。但当爱因斯坦以他对热辐射的

观点来考虑这一理论时,他必然会觉得像是从脚下抽走了垫足的地毯一样,没有留下什么建立理论的坚实基础,因为他的看法直接与这一理论的基本假设——一种静止的以太相抵触。爱因斯坦 1905 年创造的狭义相对论,源自这种对经典物理学的基本危机的特别看法与洛伦兹的工作以及以上概述的他的后继者对运动物体的电动力学问题的综合性回答两者的结合。

爱因斯坦面临的状况事实上比洛伦兹严峻得多。因为在爱因斯坦那里,完全没有作为电磁现象载体的以太的地位,不像洛伦兹那样,爱因斯坦不仅不存在对洛伦兹理论里引进的时间和空间变量等辅助变量给出物理解释的基础,而且也不存在洛伦兹理论里至关重要的假设——以太中的光速是恒定的——的基础。没有以太之后,例如对长度收缩就说不出了理由了,而这种收缩原来是洛伦兹为了解释迈克耳逊-莫雷实验的结果而引入的。

因此现在爱因斯坦终于处在伽利略信徒的位置上了,他也能够采取在传统概念体系的“最终”成就之上含蓄地定义的方法,构成一些新的概念。这里所讲的最终成就,指的是洛伦兹理论的改进,即上面所说的“原初相对论”理论。爱因斯坦能够认识到需要物理解释的这种原初相对论的诸概念,首先是关于空间、时间和速度的概念。尝试在洛伦兹理论的框架上导出这些概念的意义,例如以太的行为、分子力等等,都可以被看做是失败了。突出的事实是,所有属于运动学的关键概念都已经被爱因斯坦示意说,在电磁理论的具体层次上寻找这些概念的意义都是一种误解。光行差现象和非索实验都确认了这一点,其中的问题主要在于速度相加以及它同相对性原理的关系。另一方面,正如科学史家约翰·诺顿(John Norton)所强调的那样,运用这些实验,就可以在与电动力学无关的情况下,澄清洛伦兹为时间所设的辅助变量的意义。

于是,爱因斯坦的特别看法精确地聚焦于对于最后的解答来说是关键的那些要素:一是洛伦兹关于在运动参照系里的时间和距离引入的辅助假设;二是光速的恒定性和相对性原理。从这样一些普遍的原理出发来建立一种新理论的观念,对爱因斯坦来说肯定是熟悉的。他后来确实回忆过,在他关于相对论的工作的最后阶段里,他认识到了为了寻求解答,必须跳出原来的层次。在这里他的特殊眼光再一次起到了作用,这一次是在他对力学和热力

学之间的边界问题的处理上。在其《自述》里,爱因斯坦写道:

我尝试得越久而且越加失望,我就越加相信,只有发现一条普遍适用的形式上的原理,才能够引导我们得到确实的结果。我看到在我面前的一个例子就是热力学。在那里普遍原理是在这样的一条定理里给出的:自然界的规律是这样的,它们使得不可能制造(第一类和第二类)永动机。那么,怎样能够找到这样一条普遍原理呢?经过10年的反思,我从16岁时已经想到过的一个悖论里悟出了这样一条原理。(Einstein 1992, S. 48^①)

爱因斯坦在他的《自述》里继续描述这个关于一名以光速运动的观察者追随着一条光线的悖论。这个观察者应当看到静止的场;与此同时,按照相对性原理,任何现象都指示出,一名运动的观察者看到的光线的情形应当与在地面上的一名观察者相同。针对他构建新的电动力学的失败的背景,爱因斯坦必定把这一悖论看做是一个根本的运动学问题,它清楚地表明了经典的速度加法、相对性原理和光速的恒定性与观察者无关的假设这几方面的不相容性。与洛伦兹的情况相反,这里说的后两方面的要素在爱因斯坦那里被看做是具有等同的重要性,虽然它们并不能马上取得调和一致。

186

后来,在与格式塔心理学家(Gestaltpsychologe)马克斯·韦特海默(Max Wertheimer)的一次谈话里,爱因斯坦证实了,在寻找一条普遍的形式原理的问题时,想到了下面的一些问题:

光速也许是最快的可能速度吗?是不是也许不可能把任意运动加速至超过光速?要想速度增加,就需要越来越大的力来推动它。或者需要用来把速度增加到超过光速的力是无限大?(Wertheimer 1957, S. 207)

显然,爱因斯坦受到这种方式的鼓励,引入与以太学说无关的光速不变原理,并且把这一原理当做新理论里除了经典的相对性原理之外的第二条公

① 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英,范岱年编译,北京:商务印书馆1976年版,第23—24页。

理。这也使得如下要求变得似乎有理：当过渡到一个匀速运动的参照系时，洛伦兹变换是重新计算时间和空间坐标的正当方法。

187 但什么才是洛伦兹的电动力学对运动物体的运动学行为的真正含义呢？我们明显要下结论说，在运动参照系里物体和过程的行为表现都与在静止参照系里不同。如果我们能够仅仅在运动学的基础上、而不必在电动力学的层次上说明这种奇特的行为，那么也许解决问题的钥匙已经在手里了。为了找出这一答案，需要把在原初相对论里的空间、时间和速度等古怪的概念，同这些概念的习惯用法联系起来。那么，在这一更加普遍的理解层次上看，对于空间、时间和速度，从电动力学的结果又能得出什么含义呢？如果把在洛伦兹变换公式里出现的空间和时间坐标解释为物理上有意义的量，那么这些变换就意味着，在一个相对于一名观察者运动的参照系里，构造完全相同的量杆和时钟，这就为这名观察者定义了不同于他自己所在参照系中的长度和时间单位，这与测量静止状态下的量杆和时钟有关。这一行为当然亟须一种解释，但现在不是需要像在洛伦兹那里作为一种物理上的辩护的有疑问的尝试的那种电动力学层次上的解释，而是在运动学层次上的解释。

直到这一点，爱因斯坦的思想顺序的每一部分，实际上几乎都起因于他的特殊看法遇到洛伦兹的电动力学理论的需要。但现在要作进一步反思，它实质上超出了这一理论，或者更精确地讲，要回过头来考察这一理论的背后因素。那时候，首要的问题是有没有任何方法去证实在一个运动参照系里的物体和过程的古怪行为。如何测量在这样一个参照系里的量杆和时钟的行为呢？极有可能是贝索在1905年5月里的那个美好的日子向爱因斯坦提出这些言简意赅的问题。结果可以用迈克耳逊-莫雷实验的例子来说明。根据韦特海默的报告，事情是这样的：

在他要理解，或者更确切地说，要看看对他来说情况是否已经真正清楚了的热情愿望支配之下，他再三再四地面对在迈克耳逊情况下的要点，特别是其中的中心点：在整个测量装置沿着至关重要的方向运动的条件下，对光速进行的测量。……当发生这种至关重要的运动时，要对时间进行的测量。“我确实看清楚了”他问他自己，“这种关系，这种在

时间的测量和运动的测量两者之间的内部联系了吗？我看清楚了在这样的情况下时间测量是怎样进行的吗？”(Wertheimer 1959, S. 218—219)

这一问题或者类似的问题确实使爱因斯坦认识到，弄清楚在相对运动着的两个参照系里同时性的意义这个问题，是解决他的问题的关键性的一步。

这样的一些问题与他读过的哲学著作发生了共鸣，特别是休谟和马赫的著作，他曾经同他在“奥林匹亚科学院”的朋友们一起集中地研读过马赫的著作。在这样的知识背景下，他领悟到时间的概念并没有简单地给出，而只是代表着一种相当复杂的构成物，并且要确定在不同地点的同时性，需要有一种必定是基于实际方法的定义。

正是在这一点上，爱因斯坦对同时性的洞察变成了前面说的他的推理链上的一个似乎有道理的结果，并且与此同时，把它的重要意义作为解决他的问题的关键性的一步。初看起来，爱因斯坦确定在不同地点上的同时性的方法，即是用以一种有限速度传播的光信号去把在空间中分隔开的多个时钟同步化的方法，与他尝试去解决的那些复杂的物理问题没有什么关系，也并不必然会超出经典物理学。相反，这样的程序却与我们关于时间测量的日常观念十分一致，并且它甚至已经在同时代的技术实践中使用了，这是爱因斯坦通过阅读科学普及读物知道的。 188

但求助于这种实际方法的定义，明显使得在对于相对运动着的参照系确定同时性之时存在着某种任意性。开始的时候，按照爱因斯坦对同时性的定义，它仅仅局限于在一个参照系里面，不管这个参照系是静止的还是运动的。在这种背景下，人们才第一次想到，时钟和量杆的行为会依赖于参照系的运动，就像洛伦兹理论里建议的那样。这就意味着，如果认真地把在洛伦兹变换里古怪的空间和时间坐标当做实际上可以测量的量，亦不会与运动学的基础发生矛盾。但问题依然存在：怎么能够对这些特别的坐标变换的选择给出物理上的说明呢？

由于爱因斯坦通过他的时间同步程序认识到，速度和时间这两个概念之间存在不可分离的联系，在不同的参照系的时间定义之间关系的任意性，现在可以通过两种方式清除掉：一种方式是引进假设说，爱因斯坦确立同时性

的方法应当与运动状态无关地导致同样的一些结果,因而断定有一种绝对时间,就像在经典物理学里假设的那样;另一个假设说的是,不是时间而是光速应当与运动状态无关地保持不变——这是爱因斯坦看到洛伦兹电动力学的
189 成功后,自然会不顾其非直觉的结果而更喜欢的假设。如果选择了第二种方式,那么同时性就是相对的且依赖于运动的状态——而且我们就会在狭义相对论的运动学里面看到令人吃惊的结果,从在一个运动参照系里时钟走慢到量杆缩短。

这种运动学实质上可以从洛伦兹理论中得到,只需要把他的推理方向反过来即可。这正是哥白尼过程的典型特征。像伽利略的信徒可以从伽利略关于抛体的抛物线轨迹和这种轨迹由匀速运动和自由下落运动叠加的结果出发,反过来构成惯性原理一样,爱因斯坦也可以类似地把导致产生洛伦兹变换的有疑问的论证过程反过来提出相对论的原理。在洛伦兹的理论里,从对应态定理已经可以看到,电动力学的方程也是在一个匀速运动的参照系里成立的,并且测量得到的光速特别导致在一个运动坐标系里的相同结果,就像地球是在一个相对于以太静止的参照系里一样。但如果我们将这一论证反过来,那么洛伦兹变换就可以从相对性原理以及光速不变这条新的非经典原理产生出来。于是全部物理学都被重构了,因而洛伦兹变换不再是辅助性的构造了,它是直接由基本原理得出来的,并且取代了经典力学里伽利略变换的地位。因此,爱因斯坦引进了这些原理,恰好对应于伽利略的信徒对惯性原理和运动叠加原理的构成。

把这种重构当做一种背景,现在看来有可能爱因斯坦与贝索在1905年5月的讨论真的是相对论起源的关键时刻。它显然引导了爱因斯坦达到反思的决定性一步,使他能够把理论上的和实际上的两个层次的知识,以一种新的方式结合起来。我们已经看到,爱因斯坦关于时间概念的基础的反思,连同实际知识和相关的对在不同地点测量时间的思维模型,以及关于光的传播的理论陈述,都是以关于运动物体的电动力学的理论知识为基础的。

190 只有通过这种互相链接,对电动力学的专门研究才能够影响到我们关于时间和空间的概念,而爱因斯坦1905年的论文就成了一场科学革命的出发点,这场革命不再局限于专家们的范围了。从两种层次知识的相互作用促发

了这场革命的事实,亦说明了它的时代特征,即是说,为什么一个休谟的或者甚至是一个亚里士多德的思想亦不会导致同时的相对性这种看法。最终确定了爱因斯坦的时间概念的光速恒定假设,只是起因于经典物理学知识系统的长期发展,并且代表了19世纪电动力学的精华以及它与力学之间的边界上的问题。那些主要从科学革命发生的当时情况和当地条件着眼的研究者,实在有低估这样的长期条件的风险。

这一章的基本看法根据里纳斯维茨关于狭义相对论起源的几篇论文,以及他与本书作者对爱因斯坦1905年几篇论文的相互关系的联合研究;作者与约亨·布特纳(Jochen Büttner)和马深孟对量子革命的联合研究的结果,还有米歇尔·扬森、约翰·诺顿和约翰·斯塔切尔提出的建议亦进入到这一章的内容里。

推 荐 读 物

本章特别根据:

Büttner, Jochen, Jürgen Renn and Matthias Schemmel. 2003. "Exploring the Limits of Classical Physics Planck, Einstein and the Structure of a Scientific Revolution." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34: 37—59.

Renn, Jürgen. 1993. "Einstein as a Disciple of Galileo: A Comparative Study of Concept Development in Physics." In M. Beller, R. S. Cohen and J. Renn (eds.) *Einstein in Context*. (*Science in Context*, Vol. 6.) Cambridge: Cambridge University Press, pp. 311—341.

——. 2000. "Einstein's Controversy with Drude and the Origin of Statistical Mechanics: A New Glimpse from the 'Love Letters'." In D. Howard and J. Stachel (eds.) *Einstein: The Formative Years, 1879—1909*. (*Einstein Studies*, Vol. 8.) Boston: Birkhäuser, 107—157.

——. 2005. "Annus Mirabilis 1905 Einsteins Wunderjahr." *Spektrum der Wissenschaft* 1: 12—20 (Special edition: *Einstein und die Folgen*).

——. 2005. "Einstein's Invention of Brownian Motion." In J. Renn (ed.) *Einsteins Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Weinheim: Wiley-VCH,

——. 2005. “Wie Einstein die Relativitätstheorie fand.” In F. Steiner (ed.) *Albert Einstein: Genie, Visionär und Legende*. Berlin: Springer.

Renn, Jürgen and R. Schulmann (eds.). 1992. *Albert Einstein Mileva Marić. The Love Letters*. Princeton, Princeton University Press.

Renn, Jürgen and Robert Rynasiewicz. 2006. “The Turning Point for Einstein’s *Annus Mirabilis*.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37: 5—35.

Rynasiewicz, Robert. 2005. “The Optics and Electrodynamics of ‘On the Electrodynamics of Moving Bodies’.” In J. Renn (ed.) *Einstein’s Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Berlin: Wiley-VCH, pp. 38—57.

这一章中用到的其他文献:

Boltzmann, Ludwig. 1964. *Lectures on Gas Theory*. Translated by S. G. Brush. Berkeley, CA: University of California Press.

Cavalieri, Bonaventura. 1632. *Lo Specchio ustorio overo trattato delle settoni coniche: et alcuni loro mirabili effetti intorno allume, caldo, freddo, suono, e moto ancora*. Bologna: Ferroni

Caverni, Raffaello. 1891—1900. *Storia del metodo sperimentale in Italia*. 6 Vols. Firenze: Civelli.

CPAE 1. 1987. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 1. *The Early Years, 1879—1902*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss Years: Writings, 1900—1909*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 4. 1995. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 4. *The Swiss Years: Writings, 1912—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 5. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5. *The Swiss Years: Correspondence, 1902—1914*. Princeton: Princeton University Press.

Drude, Paul. 1902. “Zur Elektronentheorie der Metalle.” *Annalen der Physik* 7: 687—692.

192 Ehrenfest, Paul. 1905. “Über die physikalischen Voraussetzungender Planck’schen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge.” *Wiener Berichte II*, 114: 1301—1314.

——. 1906. “Zur Planckschen Strahlungstheorie.” *Physikalische Zeitschrift* 7: 528—532.

Einstein, Albert. 1902. “Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.” *Annalender Physik* 9: 417—433.

——. 1903. “Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik.” *Annalen der Physik* 11: 170—187.

——. 1904. “Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme.” *Annalen der Physik* 14: 354—362.

——. 1905. “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.” *Annalen der Physik* 17: 132—148.

——. 1905. “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.” *Annalen der Physik* 17: 549—560.

——. 1905. “Zur Elektrodynamik bewegter Körper.” *Annalen der Physik* 17: 891—921.

——. 1905. “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?” *Annalen der Physik* 18: 639—641.

——. 1906. *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (30 April 1905). Dissertation. Bern: Buchdruckerei K. J. Wyss.

——. 1909. “Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems.” *Annalen der Physik* 10: 185—193.

——. 1909. “Über die Entwicklung unserer Anschauung über das Wesen und die Konstitution der Strahlung.” *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 7: 482—500.

——. 1992. *Autobiographical Notes. A Centennial Edition*. Edited by Paul A. Schilpp. La Salle, Ill.: Open Court.

Einstein, Albert and Michele Besso. 1972. *Correspondance 1903—1955*. Edited by Pierre Speziali. Paris: Hermann.

Fick, Adolf. 1855. “Ueber Diffusion.” *Annalen der Physik und Chemie* 4: 59—86.

Frey, Erwin and Klaus Kroy. 2005. “Im Zickzack zwischen Physik und Biologie.” *Physik Journal* 4: 61—67.

Galilei, Galileo. 1655. *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove [nuoue] scienze attenenti alla mecanica & i movimenti [mouimenti] locali*. Bologna: Dozza.

Gibbs, Josiah Williard. 1902. *Elementary Principles in Statistical Mechanics*. New York: Dover.

Ishiwara, Jun. 1971. *Einstein Kyozyo-Koen-roku*. Tokyo: Kabushika Kaisha. 193

Kaiser, Walter. 1987. “Early Theories of the Electron Gas.” *Historical Studies*

in the *Physical and Biological Sciences* 17: 271—297.

Klein, Martin J. 1970. *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*. Amsterdam: NorthHolland Publ. Co.

Kollross, L. 1955. "ErinnerungenSouvenirs." In C. Seelig (ed.), *Helle Zeiten Dunkle Zeiten: In Memoriam Albert Einstein*. Zurich: Europa Verlag, pp. 17—31.

Lorentz, Hendrik Antoon. 1895. *Versuch einer Theorie der electischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: E. J. Brill.

———. 1904. "Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Smaller than that of Light." *KoninklijkeAkademie van Wetenschappen de Amsterdam*. Section of Sciences. Proceedings 6: 809—831.

———. 1909. *The Theory of Electrons*. New York.

———. 1916 (author's date; 1915). *The Theory of Electrons*. Second edition. Leipzig: B. G. Teubner.

Millikan, Robert Andrews. 1925. *The Electron and the Light-Quant from the Experimental Point of View: Nobel Address Delivered in Stockholm 23 May 1924*. Stockholm.

Perrin, Jean. 1990. *Atoms*. Woodbridge: Ox Bow Press.

Planck, Max. 1900. "Über irreversible Strahlungsvorgänge." *Annalen der Physik* 1: 69—122.

———. 1901. "Über die Elementarquanta der Materie und Elektrizität." *Annalen der Physik* 4: 564—566

———. 1967. "The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory." In *Nobel Lectures, Physics 1901—1921*. Amsterdam: Elsevier.

———. 1958. *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. 3 Vols. Braunschweig: Vieweg.

Poincaré, Henri. 1905. "Sur la dynamique de l'électron." Académie des sciences (Paris). *Comptes rendus* 140: 1504—1508.

———. 1906. "Sur la dynamique de l'électron." *Circolo Matematico di Palermo. Rendiconti* 21: 129—175.

Reinganum, Maximilian. 1900. "Theoretische Bestimmung des Verhältnisses von Wärme und Elekctitätsleitung der Metalle aus der Drude'schen Elektronentheorie." *Annalen der Physik* 2: 398—403.

Smoluchowski, Marian von. 1906. "Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen." *Annalen der Physik* 21: 756—780.

194 Sutherland, William. 1905. "A Dynamical Theory of Diffusion for Non-Electro-

lytes and the Molecular Mass of Albumin." *Philosophical Magazine and Journal of Science* 9: 781—785.

Svedberg, The. 1906. "Über die Eigenbewegung der Teilchen in kolloidalen Lösungen. Zweite Mitteilung." *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie* 12: 909—910.

Torricelli, Evangelista. 1644. *De Motu Gravium*. In *Opere di Evangelista Torricelli*, Vol. 1. Faenza: Montanari, 1919.

Wertheimer, Max. 1959. *Productive Thinking*. Enlarged edition, edited by Michael Wertheimer. Connecticut: Greenwood Press.

Wien, Wilhelm. 1898. "Über die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen." *Annalen der Physik und Chemie* 65: (Addendum): i—xvii.

Wheaton, Bruce R. 1983. *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*. Cambridge: Cambridge University Press.

关于爱因斯坦的奇迹年:

Albert Einstein und das Wunderjahr 1905. Special edition: *Physik Journal* (2005) 4.

Einstein und die Folgen. Special edition: *Spektrum der Wissenschaft* (2005) 1.

Galison, Peter. 2003. *Einstein's Clocks, Poincare's Maps: Empires of Time*. Scranton, PA: Norton.

Renn, Jürgen (ed.). 2005. *Einstein's Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Berlin: Wiley-VCH.

Renn, Jürgen, and Dieter Hoffmann. 2005. "1905 A Miraculous Year." *Journal of Physics B: Atomic, Molecular & Optical Physics* 38: 437—448.

Stachel, John (ed.). 1998. *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Stachel, John. 2002. *Einstein from "B" to "Z"*. (Einstein Studies, Vol. 9.) Boston: Birkhäuser.

Steiner, Frank (ed.). 2005. *Albert Einstein: Genie, Visionär und Legende*. Berlin: Springer.

关于爱因斯坦的智力发展道路:

Bernstein, Aaron. 1867—1869. *Naturwissenschaftliche Volksbücher*. 20 Vols. Berlin: Duncker. Bordoni, Stefano. 2005. *Una indagine sullo stato dell'etere. Un ragazzotedesco interroga la fisica di fine Ottocento*. Pavia: La Goliardica Pavese, Università degli Studi di Pavia.

- Einstein, Albert. 1950. *Out of my Later Years*. London: Thames and Hudson.
- 195 —. 1988. *Mein Weltbild*. Edited by Carl Seelig. Frankfurt am Main/Berlin: Ullstein.

Holton, Gerald. 1973. *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

—. 1986. *The Advancement of Science, and its Burdens: The Jefferson Lecture and Other Essays*. Cambridge: University Press.

Howard, Don and John Stachel (eds.). 2000. *Einstein: The Formative Years 1879—1909*. (*Einstein Studies*, Vol. 8.) Basel: Birkhäuser.

Pyenson, Lewis. 1985. *The Young Einstein: The Advent of Relativity*. Bristol: Hilger.

Renn, Jürgen and R. Schulmann (eds.). 1992. *Albert Einstein-Mileva Marić. The Love Letters*. Princeton, Princeton University Press.

Schilpp, Paul Arthur (ed.). 1988. *Einstein, Albert: Philosopher-Scientist*. La Salle, Ill.: Open Court.

关于统计力学和布朗运动的历史:

Brush, Stephen G. 1976. *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*. Vol. 1: *Physics and the Atomists*. Vol. 2: *Statistical Physics and Irreversible Processes*. (*Studies in Statistical Mechanics* 6.) Amsterdam: North Holland.

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss Years: Writings, 1900—1909*. Princeton: Princeton University Press, 尤其是:

“Einstein on the Foundations of Statistical Physics”, pp. 41—55.

“Einstein’s Dissertation on the Determination of Molecular Dimensions”, pp. 170—182.

“Einstein on Brownian Motion”, pp. 206—222.

Klein, Martin J. 1970. *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*. Amsterdam: NorthHolland Publ. Co.

Nye, Mary Jo. 1972. *Molecular Reality. A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin*. London: MacDonald.

关于光量子假设的历史:

Cassidy, David C. 2005. “Einstein and the Quantum Hypothesis.” In J. Renn (ed.) *Einstein’s Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Berlin: Wiley-VCH, pp. 15—22.

196 CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss*

Years: Writings, 1900—1909. Princeton: Princeton University Press: “Einstein’s Early Work on the Quantum Hypothesis”, pp. 134—148.

Kuhn, Thomas S. 1978. *BlackBody Theory and the Quantum Discontinuity: 1894—1912*. Oxford: Clarendon Press.

Heilbron, John L. 1988. *Max Planck. Ein Leben für die Wissenschaft 1858—1947*. Stuttgart: Hirzel.

Stachel, John. 2002. “Einstein’s LightQuantum Hypothesis, or Why Didn’t Einstein Propose a Quantum Gas a DecadeandaHalf Earlier?” In *Einstein from “B” to “Z”*. (*Einstein Studies*, Vol. 9.) Boston: Birkhäuser.

狭义相对论的介绍:

Giulini, Domenico. 2005. *Special Relativity: A First Encounter; 100 Years Since Einstein*. Translated by author. Oxford: Oxford University Press.

Goenner, Hubert. 2005. *Einsteins Relativitätstheorien: Raum, Zeit, Masse, Gravitation*. Munich: Beck.

Hoffmann, Banesh. 1983. *Relativity and Its Roots*. New York: Scientific American Books.

关于狭义相对论的起源:

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss Years: Writings, 1900—1909*. Princeton: Princeton University Press,尤其是: “Einstein on the Theory of Relativity,” pp. 253—274.

Janssen, Michel. 1995. *A Comparison between Lorentz’s Ether Theory and Special Relativity in the Light of the Experiments of Trouton and Noble*. Dissertation, University of Pittsburgh, <<http://www.mpiwgberlin.mpg.de/en/quellen/index.html>>.

———. 2002. “Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Lorentz versus Einstein,” *Physics in Perspective* 4: 421—446.

———. 2004. “Relativity.” In M. Horowitz et al. (eds.) *New Dictionary of the History of Ideas*. New York: Charles Scribner’s Sons.

Janssen, Michel and Matthew Mecklenburg. “Electromagnetic Models of the Electron and the Transition from Classical to Relativistic Mechanics.” 2006. In V. F. Hendricks et al. *Interactions: Mathematics, Physics and Philosophy, 1860—1930*. (*Boston Studies in the Philosophy of Science*, vol. 251). Dordrecht: Springer. 197

Miller, Arthur I. 1981. *Albert Einstein’s Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905—1911)*. New York: Springer.

Norton, John. 2004. “Einstein’s Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics”

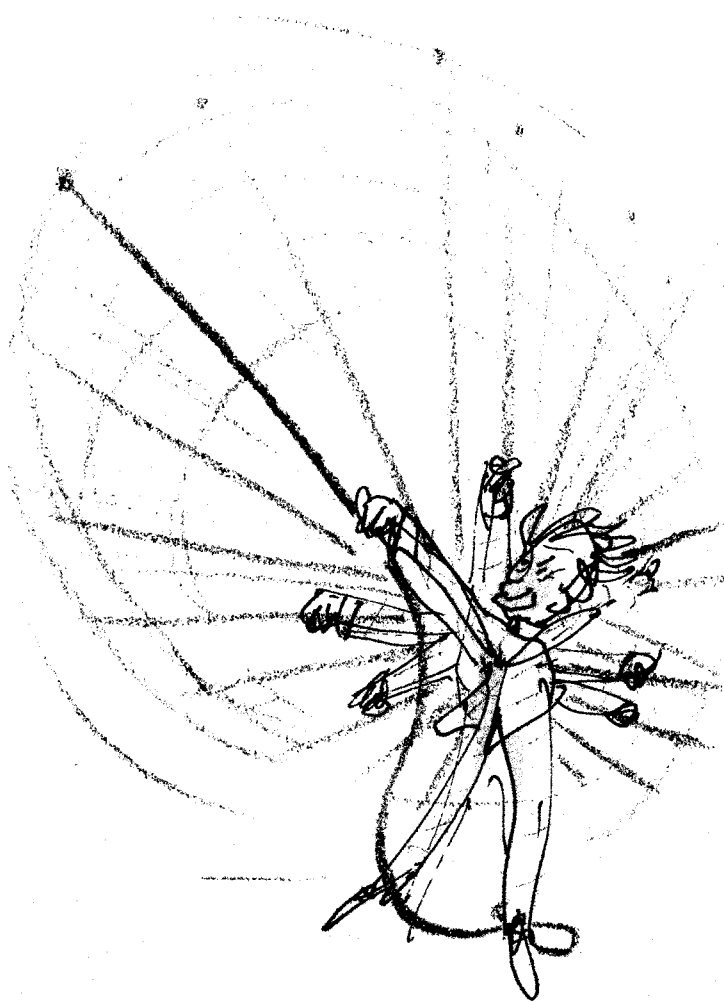
namics prior to 1905.” *Archive for History of Exact Sciences*, 59: 45—105.

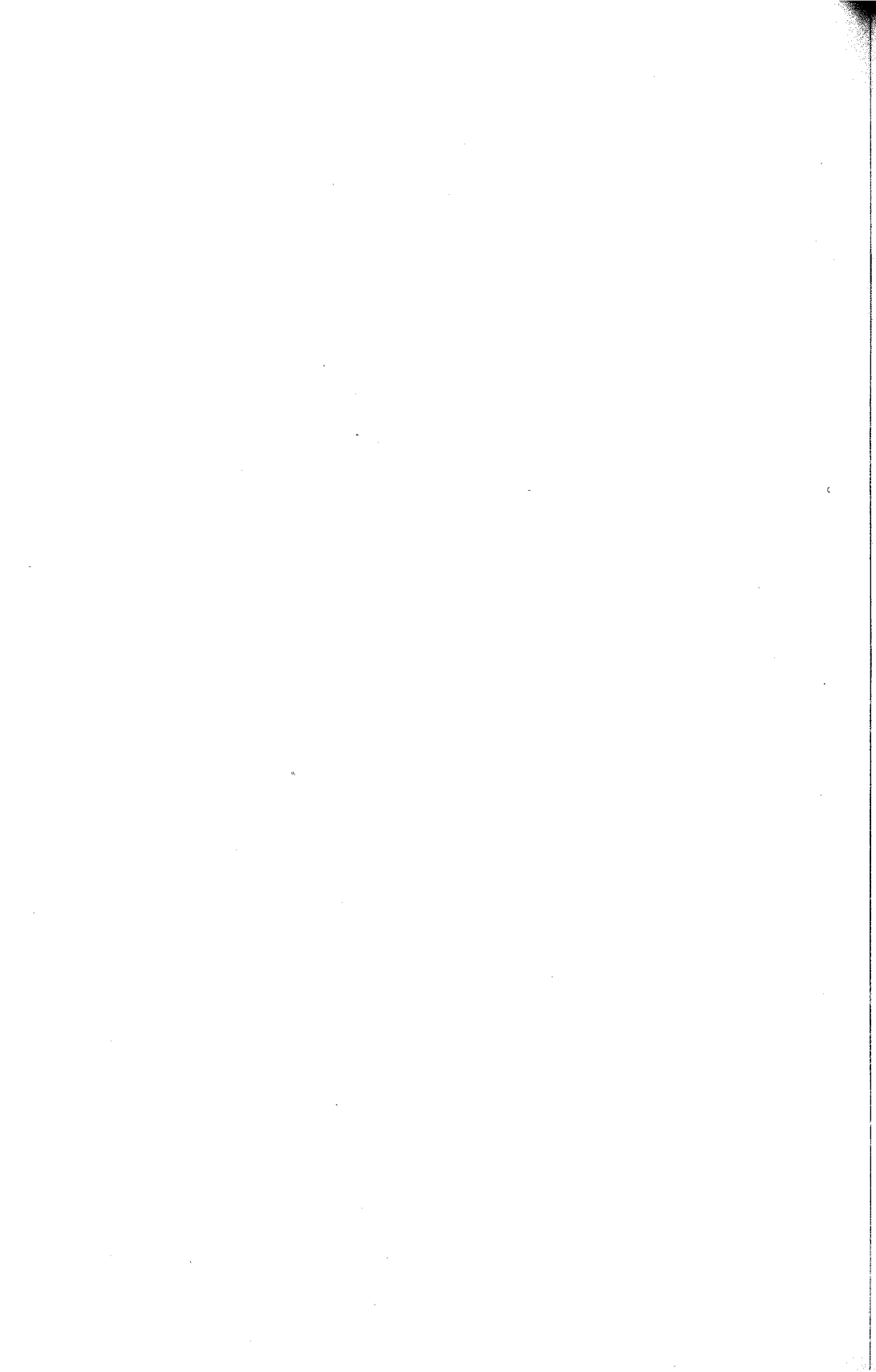
——. (即出) “Einstein’s Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies that Led him to it”. In M. Janssen and C. Lehner (eds.) *Cambridge Companion to Einstein*. Cambridge: Cambridge University Press.

Stachel, John. 2002. *Einstein from “B” to “Z”*. (*Einstein Studies*, Vol. 9.) Boston: Birkhäuser, in particular: “‘What Song the Syrens Sang’: How Did Einstein Discover Special Relativity?,” pp. 157—169.

第五章 | 引力的颠覆性

199





预览:爱因斯坦如何从狭义相对论走到广义相对论?

200

爱因斯坦 1905 年的几篇论文,仅仅是一场影响深远的革命的开端,在这场革命里与空间、时间、物质、引力和辐射相关联的各种图像和概念,以及这一类直觉物理学的其他各种思维模型,都会在物理理论的构成中失去它们的基本作用。1905 年的狭义相对论是这一发展的出发点,它要求全部物理学都要适应于它所给出的空间和时间的新概念。新的空间和时间概念像以前一样起到为所有物理过程提供一个固定舞台的作用。当物理学知识适应于由狭义相对论给出的框架时,亦产生了一些反作用。特别是,当试图将经典的引力定律适应于相对论的要求时,导致了与已经证实了的物理学知识的冲突,例如所有物体以相同的加速度下落的命题。根据经典物理学,这一命题来源于惯性质量和引力质量的等同。

爱因斯坦在 1907 年认识到了,这种等同使得有可能想象引力效应与作用于一个处在加速参照系里的观察者的惯性力相仿。这种相仿不仅保持了惯性质量和引力质量的等同,并且与狭义相对论里含有的意思结合,还导致了这样的惊人结论:空间和时间的概念要再一次进行修改。他认识到,从此空间和时间必然失去了提供给物理学演出的一个舞台的作用。空间和时间改为由引力场来决定,而引力场本身又取决于宇宙间质量的分布。广义相对论的基本概念就这样形成了,但要等到 1915 年它才得以完成。

电磁场理论给如何构成一种引力场论提供了把这些看法综合起来的一个模式。与电动力学相反,在引力的情况下没有给出关于是否存在一种诸如电磁感应或者引力波那样的动态场的线索。但爱因斯坦特殊的洞察力使他在理论中纳入了惯性力,这些惯性力可以解释成那样一些动态场效应的例子。通过这种方式,爱因斯坦就能够运用经典物理学里关于惯性力的知识,来作为构造他的理论的一种附加的知识来源。这种结构也能够以其他方式指明它自己来自经典物理学的方向。

201

在对引力场方程的寻找中,爱因斯坦要在下面两种要求之间做出取舍:

要么由牛顿引力理论,要么由一种适宜于描写弯曲时空的数学表述所给出的条件推导出必要条件。当他在这两种出发点之间摇摆不定时,他终于做到了把构成一种新的引力理论所必需的那些基本知识来源结合起来,虽然开始的时候以一种今天看来是错误的形式表达出来,即是由爱因斯坦和格罗斯曼在1913年发表的“框架理论”(Entwurf Theorie)。

与众人期待相反的一场革命

爱因斯坦1905年那些先驱性的论文,仅仅是一场对于经典物理学的知识系统进行具有深远意义的重构的开始。他所引进的空间和时间的新概念与人们的常识并不相容,因此反对者甚众而理解者甚寡,即使是在不久之后许多物理学家都明白了,只有使用他的观念才能够满意地解决运动物体的电动力学问题之后也是如此。把布朗运动解释为一种随机过程的思想,也仅仅得到缓慢的理解和接受。最引起争议的是光量子假说;正如我们已看到的,迟至1914年,当爱因斯坦就任柏林普鲁士科学院院士时,普朗克还觉得有必要在这一点上原谅爱因斯坦。

202 与为爱因斯坦提供准备的经典物理学知识体系的长期发展一样,爱因斯坦的革新亦只是通过一个长期的过程才得以成长壮大。这些知识资源与其他已知的和新近研究的知识资源混合起来,使得所得到的这种知识的综合体既是稳定的而又处于冲突之中。因而,爱因斯坦的观点得到承认之时,已经同它们的进一步改进联合在一起了。他的光量子假说推开了量子理论之门,仅仅是在更广泛领域内的物理学和化学知识能够与热辐射问题联系起来之后才得以发展,同时亦使得普朗克的作用量量子终于变成了不过是量子革命的一个象征罢了。虽然起初看来并非如此,相对论革命也远没有达到它的终点。下面我们将集中论述它的更长远进展,这些进展最终导致了我们对一般宇宙结构观念的基本看法。

1905年的相对论已经建立了对空间和时间的一种新的理解,而且所有的物理相互作用都要适合于这一框架。此外,狭义相对论还把能量守恒定律

和动量守恒定律统一为单一的一条定律,而且亦证明了一个封闭系统的质量等同于它的能量。这种新的理解要求做一次概念上的“大扫除”,使得可以利用的物理学知识符合于相对论的结果。当赫尔曼·闵可夫斯基(Hermann Minkowski)于1908年提出了一种能够在整体上表示在空间和时间中发生的物理过程的数学表述之后,这种扫除就变得容易多了。这一数学表述由某种四维几何流形组成,其中表示物理参照系的特定坐标,可以选择成对每一个物理事件用四个数、即三个空间坐标和一个时间坐标来刻画。相似于普通的三维欧几里得空间,也可以为这个空间给出一种“度规”,它确定任意两个在空间和时间中发生的事件之间的“距离”。与在普通的欧几里得框架中度规可以选择具有两个点之间的空间距离的直接物理意义相反,在闵可夫斯基四维时空里的标准度规不仅决定空间上和时间上的距离,而且根据狭义相对论,也可以给出物理学因果结构的一种简明的表示。在闵可夫斯基时空度规里,一个事件如果能够因果地影响另一事件,两者之间必须隔开能够允许第一个事件通过一种传播速度不超过光速的相互作用与第二个事件发生联系的一段四维距离。

把物理学知识改写到狭义相对论里新的时空框架,对某些类型的相互作用来说并不困难,例如对电磁学就是这样,因为狭义相对论本来就出自对麦克斯韦电磁场理论形式的研究。但说到引力,即是两个质量之间的万有引力,在这方面就会出现203问题。因为牛顿的引力定律原来设想为一种没有时间推迟的超距作用,所以这一定律的经典形式与狭义相对论的时空框架并不直接相容;没有任何物理效应能够以比光更快的速度传播,这正是从狭义相对论得出的结果之一。

在这种情况下,古老的牛顿引力理论需要彻底地改造了。这不只是爱因斯坦一个人才明白的事。尝试为引力理论给出新基础的、爱因斯坦的竞争者之一的马克斯·亚伯拉罕(Max Abraham)在1912年的一次演讲开头是这样说的:

现代物理学不允许有以无限大速度传播的力。它不支持牛顿定律作为真正基本的引力定律;它宁愿努力从给引力赋予有限传播速度的微分方程得出这一超距作用的定律。(Abraham 2007, S. 347)

然而,尚不清楚这种新的引力理论看来会如何,能够做什么启发式的假说,以及一种新的引力理论应当满足什么样的标准。

1907年,爱因斯坦面对着这一挑战。在那一年的9月里,他接受实验物理学家约翰内斯·斯塔克(Johannes Stark)的请求,写一篇关于相对论的综述文章,他用了两个月的时间完成这篇文章。当他在11月份初写完了第一部分时,他还没有决定是不是也要谈到引力——至少他在那时候写给主编斯塔克的一封信里没有提到这一点。论文是在12月4日投送出去的,其中包含了关于引力的非常短的一节。在这一节里,爱因斯坦讨论了怎样去调和牛顿的引力定律与由狭义相对论得出的物理效应传播速度有限的要求。

204 无论从爱因斯坦的个人境况,还是从一些实际问题来看,这时候他远没有革命的兴趣。爱因斯坦那时候仍然是伯尔尼专利局的一名雇员,但在某种意义上他已经通过他的出版物和通信而属于物理学界的一员了。参加“奥林匹亚科学院”和在那里的阅读活动成为他的智力生活中心的日子,已经一去不复返了。从一种客观的观点看来,关于引力的相对论性理论的工作看来也是那时候其他人的日程表上的一个研究课题,也够别的一些科学家忙活的了,其中包括了我们多次提到的亚伯拉罕·庞加莱、闵可夫斯基、洛伦兹,还有古斯塔夫·阿道夫·路德维希·米(Gustav Adolf Ludwig Mie)和古纳尔·诺德斯特罗姆(Gunnar Nordström)。尽管如此,用库恩的话来说,同时代的科学家们颇为“如常地忙于”研究一种相对论性的引力理论,而爱因斯坦依然试图从解决这个问题来掀起关于空间和时间概念的另一次革命。这一点是怎样做到的呢?

相对论性引力理论的两难局面

有一个明显的办法可以使经典的引力理论与狭义相对论的原理相容。然而,按照爱因斯坦的观点,这种显而易见的推广方法的问题在于所得出的引力理论会破坏一切物体以相同的加速度下落的伽利略原理。因而这一方法导致了一种左右为难的局面,即只可能在放弃经典力学的一条基本原理的

等效原理

广义相对论

代价之下,才能够对引力理论做相对论推广。爱因斯坦的推理显然是非常简单的,就像他的许多理想实验一样,并且可以从后来的一些谈论重构出来。这样说就行了,设想有一块石子落下,在它开始的同时有一个抛体在与石子相同位置的相同高度上水平地射出。根据经典物理学,两者将在同一时刻击落地面。当从以与抛体相同的水平速度运动的一个参照系看来,两者的角色反过来了。在这个参照系里,抛体是垂直下落的,而石子则经历着反方向的抛体运动。根据经典物理学,这两个物体都将再一次于同一时刻击落地面。但由于狭义相对论里同时的相对性,即两件事是否同时依赖于参照系的运动状态,在一个参照系里是同时的这两个事件,在另一个相对运动着的参照系里就不可能是同时的。

205

对引力理论作相对论性处理的早期尝试还会面对着狭义相对论的一些动力学结果,那是由于对质量概念的理解做了修改而引起的。狭义相对论不仅导致像“空间”和“时间”那样的运动学概念的变化,而且还有这些运动学结果之外的一些动力学结果。后来又明白了,能量亦具有惯性,因而每一个得到或者失去能量的物体,亦会随着得到或者失去惯性质量。在经典物理学里一个物体的惯性质量对应着它的引力质量,虽然这两种质量在概念上是截然不同的,并且看起来好像存在着两者总是相等的这种非常值得注意的符合关系。因此,在狭义相对论里惯性质量概念的变化,并非没有对在新的相对论力学里的这种关系的理解提供暗示。上面已经说过,质量-能量关系意味着得到或者失去能量的物体也随着改变它的质量,那么这种改变会影响到它的引力质量吗?这必定是伽利略原理亦应当在相对论的语境下仍然有效的要求。因为,引力质量的作用就好像是一个加速物体的“油门踏板”,而惯性质量的作用则好像是一个“制动踏板”。如果“加油”和“制动”这两种效应总是调节得对所有不同组分的物体都达到平衡的话,它们就会以相同的加速度下落,就像伽利略第一次指出的那样。但假如像由狭义相对论要求的那样,“制动”的效果依赖于能量的含量,那么伽利略原理是否有效,就会成为“油门踏板”是否亦依赖于能量的问题了。

换句话说,在相对论性的引力理论里,一个物理系统的引力质量应当以一种精确的已知方式依赖于其总能量。爱因斯坦回想起这一点,断定“如果

理论不能够自然地达到这一点,就应当放弃”,并且为了在狭义相对论的框架内提出一种新的引力理论,他再加上了一种观点:

206 结果表明,在以上概述的纲领的框架里,完全不能满足,或者无论如何不能以自然的方式令人满意地表述这种情况。这就使我相信,在狭义相对论的结构内,是不可能有人满意的引力理论的。(Einstein 1992, S. 60^①)

得出这一结论,完全不像他在上述回忆中所说的那么直接。这一回忆是在已经做出艰辛和棘手的发展之后,从一般的相对论观点而得出的。虽然力学不再是物理学的领头学科,爱因斯坦亦做出有意识的决定,要保持惯性质量和引力质量的等同作为经典力学的一个本质方面,虽然这一方面在经典力学里不是一个重要的论题。然而对这种等同的偏离,会对如伽利略关于一切物体都会以相等的速率下落那样的自明命题发出疑问。

→ 这一冲突使得人们熟知的伽利略原理成为爱因斯坦新的引力理论的一块试金石。这就好像创建一种相对论性引力理论的过程把经典物理学里这一先前还不受注意的要素变得引人注目了。即使在经典力学里,伽利略原理也好像是一种奇异的巧合而不是一种植根于概念结构的基本特性。但当爱因斯坦在他寻找一种相对论性的引力理论的语境下考虑这一原理时,这里面看来似乎藏有对惯性和引力的更深入理解的钥匙。但确切地说,伽利略原理回答的是什么样的一个问题呢?爱因斯坦指出,它适合于马赫对力学的特殊观点,它对惯性参照系的优越地位以及相对于绝对空间的加速度概念提出了问题。在这种背景之上,他认识到了伽利略原理回答的问题必定是如何把相对性原理推广到加速运动的情况。

简而言之,在经典力学与狭义相对论之间的冲突当中,爱因斯坦决定保留引力质量与惯性质量的等效性结果,因此他就要情愿接受引力理论将会摆脱狭义相对论框架的束缚。他的理由是这样的:

从下落物体的本性得知的惯性与引力加速度等同的事实,可以表述

① 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英等译,北京:商务印书馆,第29页。

如下:在一处(空间范围很小的)引力场里,如果我们引进的不是一个“惯性系”而是一个相对于它作加速运动的参照系的话,事情就会像在没有引力的空间里那样进行。 207

如果我们把物体对于后一参照系的行为,解释成由“真实的”(而不只是表观的)引力场引起的,那么就有可能根据与原来的参照系同样充分的理由,把这个参照系看做是一个“惯性系”。(Einstein 1992, S. 61, 63^①)

根据通常理解的经典力学,惯性参照系和加速参照系的情况是根本不同的。但如果在一个大小均匀且方向相同的引力场里所有物体都以一样的方式下落,就像伽利略原理所规定的那样,那么一个也在下落的观察者可以想象,至少在一段有限的时间里他是生活在一个惯性系里,虽然他自己是以不断增加的速度下落着。事实上,他会注意到他不仅失去了自己的重量,而且随他一起下落的物体也没有任何力的作用,就像引力场被他自己的加速运动抵消了一样。因而,观察者所在的加速参照系就会无法与一个惯性系区别开来。反过来,这种加速系和惯性系的不可区分可以转换成伽利略原理有效的一条标准。如果新的引力理论要包含这一条原理,它就会是一种推广了的相对论,一种也能够容纳加速参照系的相对论。爱因斯坦创建狭义相对论的经验,可能亦对他对于伽利略原理的革命性再解释做了贡献,尤其有助于他认识到电场和磁场仅仅相对于一种特定的运动状态而存在。与此类似,在广义相对论里引力场和惯性力,即由于参照系的加速度而表现出来的力,亦仅仅具有一种相对于某种参照系存在的性质。

爱因斯坦把伽利略原理解释成一个自由下落的参照系和一个惯性参照系之间的等效性的看法,导致了他著名的等效原理,它是构建广义相对论的最重要的启发性线索之一。等效原理陈述的是,在一个大小均匀且方向相同的引力场里的所有物理过程,等效于在一个没有引力场的匀加速参照系里发生的过程。可以用在不存在任何力的空间里的一部自由下落的升降机或者 208

① 以上两段中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英等译,北京:商务印书馆,第29页。

作加速运动的宇宙飞船做例子来说明这条原理。本质上它意味着在经典物理学里的两种已经为人熟悉的思维模型现在建立起关联了。

假如爱因斯坦那著名的升降机仅作为一个思想实验出现,那就仍然存在着一个谜:为什么他在心中对此保留那么长的时间,而且顶着几乎所有同事的反对,要把它当做他的启发式思考的中心要素呢?如果把这件事解释为在思维模型上的一种运作,那就可以明白它怎么能够贡献于经典物理学和相对论物理学的这两个不同知识领域的综合,并且对于这种知识的建筑带来戏剧性的结果。我们回顾一下:思维模型里包含能够以从经验得到的信息填充的真空,或者某种默认假设的失败。再一次从两种情形考虑爱因斯坦的升降机实验室,两者是由经典物理学里的不同概念来描述的:在第一种情况下在一个惯性系里有一任意的外力对实验室加速。这表示着关于一个具有惯性力的系统的思维模型,它的缺口包括了系统的运动状态、作用在系统内部的惯性力,和由后者引起的各个物体的运动;在第二种情况下实验室是在一个惯性系里静止的,并且有引力场作用着。这种情况表示一种带有引力的系统的思维模型,它的缺口包括系统的运动状态、作用在这个系统中的各个物体的引力,以及由后者引起的运动。

现在,爱因斯坦指出,一名处在实验室内部的观察者不能够区别这两种情况。如果只知道在某个实验室里各个物体以均匀的加速度下落到地板上,那么这个实验室都满足每一种思维模型里的缺口的条件,并且这两种模型就以这种方式发生了关联。在这种综合里放弃了在经典物理学里关于加速参照系和惯性参照系的本性之间的不必要区别,亦放弃了关于惯性力和引力之间的不必要区别。即使在爱因斯坦明确表达第一个引力的广义相对性理论之前的那些年月里,这一综合模式已经是对他有启发意义的方针。这种启发使他得以把先前在物理学里分门别类的各种知识领域关联到一起,并且在一种仍然在构造之中的引力理论的经验结果的基础上推出定性的结论,其中包含了对水星近日点运动的解释,对光线受到大质量天体偏折的预言和光在引力场中的红移。

爱因斯坦逃脱两难困境的途径

虽然相对论性引力理论的问题确是 1907 年前后当时物理学发展议程表里的一个项目,爱因斯坦对这个问题解答的贡献亦只能在他对各种物理问题的独到看法的背景上理解。为了解决摆在爱因斯坦和他的同时代人面前的、关于在狭义相对论的框架内发展一种引力理论的困难,有两种基本的抉择。当人们再次审视那时候物理学家可资利用的不同知识来源,以及他们会从什么地方批评对牛顿引力理论的修正时,情况就变得明白了。即使在狭义相对论已经树立起来之后,修正牛顿引力理论的大部分手段,仍然要取自经典物理学的武器库,特别是要取自经典力学和经典电动力学,这在上一章里已经讲过了。因为这些领域具有不同的概念结构:经典力学的基本特征是质点之间的中心力的作用,电动力学则是连续场随时间的传播;要借助于这些领域去解决引力问题,就会遇到在两种不同概念之间取舍的问题。引力问题已经以这种方式孕育着解决经典物理学基本问题的萌芽,并且成为力学和场论之间的一个边界问题。我们已经在第四章里看到,这一类边界问题乃是替代旧理论的新理论生长的出发点。

不只是技术上的考虑在研究者们对于可用的选择的不同反应中起到作用,而且一般而言,对他们专业状况上的哲学反思也会起到作用。像亚伯拉罕和米等同时代的科学家会为了得到上述意义的相对论性引力理论而轻易地放弃伽利略的原理,即是说,从今天的观点看来,他们意图通过直接推广牛顿的引力定律,在狭义相对论的意义上建立一种相对论性的引力理论,虽然这样做要付出抛弃经典力学里处于中心地位的一些原理的代价。作为电磁学世界观拥护者的他们甚至有这样做的很好理由:在这样的世界观看来并不绝对需要维持经典力学的所有方面的原理,特别是因为,例如在米的理论里对引力质量和惯性质量的等效原理的必然偏离还远低于可测量的限度。210

对其他研究者来说,力学基础的问题处于居先的位置。马赫在对经典力学的批判中,特别抨击了牛顿运用前面描述过的水桶实验对存在绝对空间的

证明。虽然这一批评并没有包含多少物理内容,但首当其冲的却是牛顿力学的哲学基础,这就当然亦发出一种改造力学的号召。某些同时代的物理学家事实上亦看到了,这不仅是原来打算要做的哲学上的澄清工作,而且也引申出寻找一种普遍的相对论性力学的机会。这种情况可以由一个插曲清楚地说明:当爱因斯坦在维也纳作一个关于广义相对论的讲演时,有人向他指出,他的讲演里的几个想法已经包含在一位完全不为人所知的维也纳物理学家文策尔·霍夫曼(Wenzel Hoffmann)1905年的论文里了。霍夫曼决不是孤身一人地试图从马赫的批评出发来系统地阐述力学诸定律,其中只出现物体之间的相对运动的方式,并且每一个无论处在什么运动状态的物体,都有同等的资格来作为力学的参照系。

在这里,能够使得人们对引力问题做出不同反应的知识来源,再一次变得十分清楚了。尽管相对论性引力理论的支持者们向经典场论的武器库寻找可用的工具,马赫的追随者们却严格地从经典力学的世界开始,仅仅考虑坚实的物体及其相对运动。因此,看得出来这两种策略分别是在电磁世界观和力学世界观这两种竞争着的观点的语境中构思出来的。

211 这两种方法分别遇到了对应于它们不同出发点的全然不同的问题:对于从场论出发者来说,是要在一种新的概念基础上重构力学知识状况的问题,例如引力质量和惯性质量的等同问题;对于从一种普遍的相对论力学出发者来说,问题的关键在于,要在概念上找到一个对应物,它能与19世纪的物理学得益于场论所取得的巨大进步相当,这是一个即使在今天物理学家们仍然为之忙碌着的问题。

这两种互相补充的策略的困难能够更加具体地通过引力理论来赢得注意:把牛顿的引力理论嵌入一种相对论性场论的尝试,已经不仅面临着上面提到过的应付经典力学的理论问题,而且亦在很大程度上缺乏来自经验的提示。爱因斯坦用一种适当的比较来表达这一点:它就好像仅仅给出了静电场中的库仑定律就要建立麦克斯韦的电动力学方程一样。说到引力,事实上除了静止的引力场之外什么也没有观察到,没有关于引力波的事例,而牛顿的引力理论则是在经典物理学里久经考验的定律之一了。从实验物理学或者观察天文学的观点看,没有什么令人信服的理由说存在着对这一定律的

偏离。

尝试建立一种普遍的相对论力学的物理学家们，首先关注的完全不是引力的理论；只是在爱因斯坦提出了他关于广义相对论的第一份手稿之后，他们才跟着宣称要做引力问题的研究。鉴于他们严格的力学出发点以及对于牛顿力学基本概念的疑问，他们一开始就抛弃了经典物理学的大部分资源。因而，他们遇到的困难在许多方面比起场论理论的纲领来说是更加基本的困难，不足为奇的是，~~直到今天为止~~，只有几位门外汉沿着这个方向做过研究。他们手上唯一掌握的线索，只有可以说是超出牛顿力学的单独的一种现象，即牛顿的水桶实验。与牛顿相反，他们把这个水桶实验看做是在相对运动中的质量之间的相互作用。这就暗示着存在一种除了这种现象之外在物理学里完全未知的力。从这一线索出发，他们努力于寻找支持这样一种相互作用的其他新的经验事实，例如在快速旋转的一些大质量系统里发生的现象，但均未获成功。

让我们再回到爱因斯坦。由于爱因斯坦放弃了构造一种引力的狭义相对论理论的尝试，并且转向相对论原理的推广，他看来置身于马赫的追随者的行列之中，而马赫把他对牛顿力学的批评的哲学意向解释为修改力学的一种提议。爱因斯坦的等效原理甚至可以理解为是对马赫对牛顿水桶实验解释的一种直接的抄本，即从转动参照系的世界变换到了线性的加速参照系世界。即是说，在水桶相对于宇宙转动的情况下，由它的转动引起了惯性力；这种情况对应于在宇宙中的一个匀加速的实验室，其中的惯性力亦产生一种等效的引力场。两者的区别仅在于，在一种情况下它是一种动态的引力场，而在另一种情况下则是一种静态场。爱因斯坦的著名的升降机实验不是别的，而是对牛顿用水桶描述的思想实验的一种简化的最终分析，仅有的区别在于以一种线性的加速度代替了转动。

爱因斯坦自己在无数当时的评论以及后来的回顾中，坚定地认为应把他的广义相对论理解作马赫对牛顿力学批评的回答。为什么他那时候比亦在寻找这样一种答案的其他物理学家取得大得多的成功呢？如果我们更精确地考虑，相对于上面描述的那种从电磁的和力学的两种对立的世界观出发的策略，爱因斯坦所处的位置，令我们想起歌德的话：“右也是先知，左也是先

知,享受现世生活者坐中间。”^①爱因斯坦的步骤确实不能简单地归入这两种策略中的任一种。

213 与那几位追随马赫批评的门外汉不同,爱因斯坦是把引力问题当做场论和力学之间的边界问题来处理的。他从场论开始,以这种方式就能够使用场论的一套高度发展的手段。因而在这方面,他属于同时代的物理学家的大多数。但他亦与大多数不同,因为他认真地对待马赫对力学的基本概念的批评性分析。值得注意的是,在爱因斯坦看来,这一批评正好直接针对那些马赫的“追随者”们心目中的一种无可争辩的问题,即针对物理学的力学基础。我在这里引用一段爱因斯坦后来的回顾:

我们不必惊奇,可以说上一世纪所有的物理学家,都把经典力学看做是全部物理学的、甚至是全部自然科学的坚实和确定的基础……正是马赫在他的力学史里颠覆了这种教条式的信念;当我还是一名大学生的时候,这本书在这方面给了我深刻的影响。(Einstein 1992, S. 19^②)

与那些仅仅从他们的专业角度吸收马赫对牛顿力学基础的批评的物理学家相反,爱因斯坦把马赫当做一位哲学家来阅读,并且领悟到马赫的力学史的中心哲学意向,它是针对长期以来物理学里力学所持的特殊状况而言的。

在这种背景下,爱因斯坦能够把马赫对牛顿的惯性概念的特定批评与他自己对引力理论的研究联系起来,就一点也不足为奇了。他没有尝试在力学的修改里解决惯性的问题,而是不惧怕把惯性处理成引力场论中的一种相互作用。这种做法给了他攻克问题的钥匙,那是起初看来在我们描述的两种策

① 这句话的原文为“Prophete rechts, Prophete links, das Weltkind in der Mitten”,是1774年夏天歌德写在一本纪念册上的诗《科布伦茨的午餐》(Diner zu Coblenz)中的最后一句。歌德在自传《诗与真》(Dichtung und Wahrheit)第三部第十四章中有详细叙述。在一次莱因河游览中,歌德与通俗哲学家巴西多(Johann Bernhard Basedow)和瑞士神学家拉瓦特尔(Johann Kaspar Lavater)坐在一起吃饭。当这两位高谈阔论时,歌德却在专心致志地享用美食。这句引语常用来指那些对其他人的意见不感兴趣,不管它们是否有用,是否让人愉悦,都不受影响的人。“享受现世生活者”(Weltind)也许就是歌德本人。作者在这里指爱因斯坦不受其他策略的影响。——译者

② 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英等译,北京:商务印书馆1976年版,第9页。

略的语境中是那样无望解决的;事实上他已经恰好发现了在这两种互相排斥的策略之间的那个“缺失的环节”。

在场论理论家们不成功地寻找一种可以使他们的眼光越过静态引力的“库仑定律”进到引力的动力学的线索之处,爱因斯坦却成功地在马赫的指引下认识到像牛顿的水桶那样的转动参照系的惯性效应,属于一种静态引力场的情况,它是由运动质量所引起的,本身并不依赖于时间。他把这种情况解释为类似于电动力学里的静磁场,那也是一种由运动质量引起的不依赖于时间的场,不过在那里的运动质量是带有电荷的。

而且,正当相对论力学的支持者们徒劳地寻找相对运动着的远离质量之间的神秘之力的线索时,寻找在牛顿的水桶这个他们熟知的情况里水面弯曲原因之处,爱因斯坦不费什么事就辨认出这种力正是人们熟知的万有引力的一种新的表现。因为如果引力不再仅仅被看做是一种静态的场,而是一种动态的场,那么它就确实会引起运动质量之间的一种特别的相互作用,正如在电动力学里运动着的带电质量之间的相互作用一样,那是不同于静电学里描述的那些作用的。在这种分析的背景下,把在一个加速参照系里的任意惯性力约简为相对运动着的质量之间的相互作用,而不是放到绝对空间中的做法便是可能的了。马赫把牛顿的旋转水桶里的惯性力解释成宇宙中许多恒星的效应,因而寻找一种这样的理论便是可能的:把相对性原理推广到转动参照系,从而以为在那里发生的惯性效应乃是在运动质量之间的那样一种未知的相互作用的特殊情况。

在物理学里引进惯性力作用的尝试,如果仅仅是为了改造经典力学,那是没有什么前途的;但把这种观念与一种引力场论的想法结合起来却会得到巨大的成功。因为这种结合使它有可能从两个几乎不可能解决的难题中打造出一种同时解决这两个问题的答案。这里的一个问题是对于运动质量之间的目前尚属未知的相互作用的实际上没有希望的研究。另一个问题是对一种引力场论的目前尚属未知的动力学效应的同样无望的研究;这种效应可能存在的理由,只是由于对电磁学动态效应的类比,就像电磁感应或者电磁波一样。像爱因斯坦所做的那样,把这两个问题结合起来,人们就可以构想作为这种引力的动力学效应例子的惯性力,从而获得构建一个引力的场理

相对论力学

论的重要线索。这一理论现在应当是一种统一的“惯性-引力场”，或者像物理学家称呼的那样，“引力-惯性场”（Gravito-Inertial-Feld）。

等效原理出现的需求

等效原理的结果

把惯性力包括在构造一种新的引力理论的尝试之内，引出了一些意义深远的结果。爱因斯坦能够运用不同类型的惯性力来作为检验新理论的案例，例如发生在升降机或者宇宙飞船里面的那些事情，或者作用到像在牛顿的水桶那样的一个转动参照系里的事情。从这种试验案例他能够推出定性的结论，并且导出对于新理论所需数学工具的要求。

事实上，在爱因斯坦的启发式方法当中，水桶模型已经成为仅次于升降机模型的第二位至关重要的思维模型。凭着这两种思维模型，他能够非常有效地把物理学里不同领域的知识联系起来，并且达到了一种惊人的新见地。特别是，它们使他能够依靠加速运动来研究引力场的一些特殊案例。而加速运动又可以运用狭义相对论的方法来研究。在这种虽然是部分成功地把经典力学和狭义相对论的知识综合起来的基础上，爱因斯坦甚至能够预言还在构造之中的引力理论的一些经验结果，这在上面已经提到过了，例如在引力场中的光线偏折和红移。

在引力场中光线的曲率可以由在一个加速参照系里的光线路径必然由于实验室的运动和光的运动两者的叠加的推理而得出。在引力场中这一论证必定生效的结论，也符合于能量不仅具有惯性质量而且具有引力质量的假设，因此光必定经受着引力的吸引。与此同时，这就等于说假设引力改变了空间中的光速，使得它就像一种透明的媒质，因而使光线弯曲了。（这样一种光线的弯曲与严格地依附于狭义相对论的论证以及它关于光速恒定的基本原理是不相容的。）这样一种弯曲确实存在的事实，因为1919年著名的英国日食探险队观察到了恒星发出的光线受到太阳附近引力场的偏折而在实验上得到确证。然而，观察到的定量结果是由这种简单推理得出的结果的两倍。

不完备
如SR中
要
等效原理
中光线的
7.2

爱因斯坦从简单的思维模型做出如此令人惊骇的预言之一，是引力透镜的存在：一些离我们很远的大质量天体使得在同它们对准了的方向上的距离遥远得多且发光强得多的另一些天体在地球上看到的成像发生畸变。爱因斯坦在1912年就确定了这种引力透镜的性质，那是在他完成广义相对论理论的三年之前。后来他不再提及这一想法，因为在那时候所知道的宇宙尺度的基础上，他怀疑他设想是恒星的这种物体，是不是会被观察到。事实上这样的观察直到20世纪70年代才成功，而充当引力透镜的是整个星系。我们将会在下章里更详细地谈到这个例子，因为它说明了经典物理学的知识来源如何有可能即使在广义相对论最终构成之前，已经可以看出了一些要由这一理论推导出来的效应，而不在乎这一理论在细节上最终会呈现出什么样子。

爱因斯坦的升降机模型不仅是一种能够使新的引力理论做出值得注意的预言的启发式工具；它也突出了从狭义相对论的观点来看这一理论提出来的挑战。我们运用升降机模型可以探究会伴随着这样一种新理论的概念上的某些变化，尽管从现代的眼光看来这一模型只是用来说明狭义相对论和广义相对论的局域相容性。例如，在引力场中光线的偏折暗示光速不再可以假设为恒量，这是违反狭义相对论的原理的。这一定性的结论被在一个加速参照系中对时间同步化的分析所支持，就像在爱因斯坦1907年的论文里所描述的那样，这就意味着对于在引力场中的时间概念的描绘，要比在狭义相对论里严格得多。时间可以通过一个同步化的时钟网络来定义，这种同步化是对于任何伴随着时钟运动的惯性系进行的，使得我们可以把加速参照系里的不同地点联合起来。但因为这些不同的局域惯性系相对于彼此在做相对运动，在这些网络之间不能达到协调，因为根据狭义相对论，同时性意味着这些参照系中的每一个都有点不同。因此，不再可能简单地谈论一个加速参照系里（或者存在着引力场的一个系统里）的“时间”，因为我们不再能够期望，两个开始的时候在引力场中的同一地点上同步化了的时钟，当把其中一个时钟运输到具有不同引力势的另一区域时仍然保持着同步；在这种意义上，在包含着爱因斯坦的等效原理的引力理论里，时间的“均匀性”将会失去意义。

转动参照系的内涵提出了另一个概念上的挑战，那是针对长度收缩的，因而亦暗含了在空间概念上的变化。爱因斯坦和马克斯·玻恩(Max Born)

接指出了在任意引力场中运动方程问题的解。即是说,沿着这样的一个曲面的两点之间的运动在没有经受到其他力的情况下,是沿着一条测地线走动的,因为在曲面上的两点之间的所有路径里,以这条测地线的距离为最短。因而,测地线就是在欧几里得几何里的直线的推广。这一观念能够立刻转变为从一个任意的加速参照系里观察到的不受力运动的情况。这样的运动亦可描述为通常是用来描述这种参照系的曲线坐标系里的一条四维时空测地线。因此,从惯性力与引力之间等效性的假设的观点看来,把这一观念推广到任意引力场好像是有道理的,即使是那些不能够用一个加速参照系表示的引力场也可以这样做。

在引力作用的这种改写了的描述里,引力场现在不再被当做是牛顿物理学里的一种力了,而只是一种推广了的时空连续的几何性质的表现。这个新的世界确实是闵可夫斯基空间的推广,就像曲面是平面的推广一样。上面我们介绍过作为距离概念推广的度规概念。在一个平面的特征由在平面上任何一处都有相同表现的一个度规来表示的同时,一个曲面的几何性质可以用一种到处变化的度规来表示,它在曲面的不同位置上相对于一种给定的坐标距离表示出各种不同实际距离的度量。那么,在地球表面这个曲面上,地理经度一度的角距离,从赤道到北极圈对应着不同的真实距离。结果明白了,这种变化的度规就是引力势的适当表示。由于它的起源,这种度规把可以从等效原理得出的关于引力惯性场的性质,连同由狭义相对论给出来又具体化为闵可夫斯基表述的关于时空因果结构这两方面的知识同时具体化了。

和力概念脱约了引力概念

把引力描述为空间和时间的曲率的突破

(引力场力)

让我们仔细看看这一突破是怎样到来的。直到1911年,爱因斯坦主要是通过等效原理来研究能刻画新的引力理论特征的影响和概念变化,显然还没有认真地对这一理论开展实际的工作。只是在1912年,他受到亚伯拉罕的一篇论文的挑战,后者声称要阐明这样的一种理论,至少对静态引力场的特殊情况。他尝试用对静态引力场的一种场论去描述在一个匀加速参照系里

的惯性效应,为此,他研究了(在等效原理的基础上~~从~~从一个加速参照系来看)在一个惯性参照系里一种不受力的运动会经受引力的一种什么样的运动。在写出了在惯性系和加速系之间变换的方程之后,看出所得到的结果是与可利用的事实相容的,特别是联系到光的传播,他就得到了空间、时间和光速的变换方程,在这里的光速假设是可变的。于是,他尽可能模仿在狭义相对论里已知的运动方程,写出了粒子的新的运动方程。但不久就明白了,这样得到的理论里的场方程是与能量守恒的基本原理不相容的。这一问题迫使爱因斯坦修改他的场方程,那是他在短时间之后发表出来的。

爱因斯坦的竞争者亚伯拉罕依然相信,他已经在闵可夫斯基的四维几何表述式里解决了引力问题,并且在于1912年1月发表的论文里给出了他的理论的一种简洁和惊人地优美的形式。然而,他的相对论性引力理论仍然受到一些缺陷的困扰,那指的是这样一种狭义相对论的推广同伽利略原理之间的冲突,而那正是爱因斯坦1907年由于同样的这些缺陷,而没有把那种经典引力理论的最显而易见的推广做下去的原因。尽管如此,看来起初亚伯拉罕一下子就投入到在闵可夫斯基表述中解决相对论性引力理论的问题里去了,即使要付出破坏这一基本原理的代价。这也必定是爱因斯坦最初的感想,因为他在终于对亚伯拉罕的理论做出否定性的评价之后,于3月底给贝索的信中这样写道:

221 亚伯拉罕的理论是空中楼阁,即是说,只考虑从数学的美出发,那是完全站不住脚的。我真不懂,这位聪明人怎么能让他自己被这样浅薄的东西牵着走。真的,我起先(有14天!)也完全被他的公式的美妙和简单“吓唬”住了。(CAPE 5, S. 436f^①)

爱因斯坦起初在两个星期里必定真的被亚伯拉罕的理论唬住了,他终于拒绝这一理论的理由,不只是它与经典力学的原理不相容,他还认识到这一理论含有一些自相矛盾之处。亚伯拉罕的理论采取了爱因斯坦关于引力势与可变的光速相联系的结论,这是违背狭义相对论原理的。在与亚伯拉罕热

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第406页。

烈的争论中，爱因斯坦认识到亚伯拉罕使用闵可夫斯基表述是与光速可变的假设不相容的。

但事情并不像亚伯拉罕想的那么简单。特别是光速恒定的原理，并且连带四个维度的等效都将不再成立。(CAPE 5, S. 430^①)

如果光速取成为可变的，那么四个时空坐标假设含有不同意义的事实，必定也会是爱因斯坦在给亚伯拉罕的一封信里提出的批评的中心点，这封信没有保留在亚伯拉罕后代的手里，但必定在1912年2月15日之前就送给他本人了。这可以由亚伯拉罕对这次通信的反应推断出来，这指的是在这一日期发表的对上面提到的那篇论文的一份简短的修正。这份通信意味着亚伯拉罕第一个在1912年2月建议，用一种由引力势决定的、依赖于时空坐标的一种可变量度规来确定闵可夫斯基空间中两点之间的距离，以取代原来的恒常的度规，而那种可变量度规则是与可变的光速联系在一起的。至少在那时候，无论是亚伯拉罕还是爱因斯坦都没有从这一提示导出任何结果来，而只是在两人之间爆发出一场激烈的争论。尽管爱因斯坦把亚伯拉罕的理论看做不过是一种没有物理意义的形式上的练习，亚伯拉罕却根据爱因斯坦的反对做出断定，认为所有有关的相对论理论都要放弃了。

令人惊奇的是，在亚伯拉罕发表的短信里竟然出现了一种推广了的度规，因为它已经提示了有些东西将会成为广义相对论的主要数学对象。然而，无论是亚伯拉罕还是爱因斯坦那时候的工作都没有提供一种语境，使人们能够注意到这样一种关键的作用。与此相反，在引进可变光速的时候，就失去了在闵可夫斯基空间中的度规的基本性质之一——它在洛伦兹变换下的不变性，爱因斯坦当然会注意到这一点。因此，亚伯拉罕引进的这种表述，明显代表的不是闵可夫斯基空间的适当推广。另一方面，爱因斯坦关于静态引力场的理论，在那时候还没有包含会使他得以越出静态场这种特殊情况的一种普遍框架的指示。简而言之，由爱因斯坦和亚伯拉罕进行的关于引力的一种相对论性理论的尝试，偶然落入了这样一种左右为难的局面，无论是数

① 中译文参照：《爱因斯坦全集·第5卷》，范岱年主译，长沙：湖南科学技术出版社2002年版，第399页。

学表述还是物理启发,看来都不能提供怎样从这一点进行下去的提示。

当爱因斯坦重新考虑他曾经为静态场的特殊情况写出的运动方程,并且找到了解决这种两难局面的方法时,他必定感到了一阵惊喜。这一转折点记载在他 1912 年关于静态理论的第二篇论文的追加附记里。当他重新整理在静态引力场中的运动方程时,爱因斯坦尽可能如实地追随狭义相对论里原有的方程。普朗克对这种情况曾经用所谓变分法去写出了一个粒子的运动方程;变分法从 19 世纪以来已经得到高度的发展,并且可以回溯到欧拉、拉格朗日等大师的研究,现在亦能够没有困难地适用于狭义相对论。

已经证明了,变分法在经典力学里是有用的,它被用来表示为“变分原理”的一条简单假设推导出复杂的运动方程。变分原理是以所谓“极值条件”为基础的,这一原理讲的是所谓“拉格朗日函数”的积分应当取其极值。这里说的“拉格朗日函数”是某些依赖于运动全程的量的求和。拉格朗日函数或者拉格朗日量的积分也叫做“作用量”,尽管变分原理本来叫做“哈密顿原理”。在这种处理方法里中心的量是对全程的时空路径上的积分,表示的是运动随时间演化的历史,而作用量就是在每一条这样的路径上计算的。在所有这些路径中,原则上有可能实现这些作用量的极值。通过这种方式就有可能,例如从局限在一个曲面上的一个粒子的许多条可能的路径,挑选出实际上代表在给定约束下粒子的“自然运动”。另一个例子是,通过多种不同折射率的媒质的光线,可以从实际路径必定是满足费时最短的要求而计算出来,此外的所有其他路径都会花费较长的时间。

在普朗克的变分原理里的物理量是沿着粒子路径的一个积分。这一积分要取一个极值的要求,在闵可夫斯基空间里有一种直接的几何解释,就像在我们提到过的、关于在经典力学里沿着一个曲面运动的思维模型里那样:作为在时空中的一条路径的、一个不受力的粒子的历史或者世界线,是由一条测地线给出的,它是在曲面上把粒子的起点和终点连接起来的可能最“直”的曲线。现在弄明白了,在静态引力场中这种运动的相应公式,恰好在形式上与普朗克在没有引力的闵可夫斯基空间里的公式相同,唯一的差别是现在的光速必定要取作可变的了。当然,不管所有这些与狭义相对论情况的相似性,这一差别亦具有几项有深远意义的结果,例如光速的可变性意味着时钟

走得快慢要依赖于它所处地点。

爱因斯坦不仅惊异于这些运动方程的简洁形式以及它们与狭义相对论的类似,而且惊异于由此看出的进一步推广静态引力场的特殊情况的可能性。事实上,变分方程的一种直接推广会提供一道公式,其中不仅含有代表引力势的单独一个函数,而且包含也是代表引力势的整整 10 个独立函数的联合体。面对着这样一种复杂的情况,只有这样一种引力场中的运动方程的境况,能够依靠经典物理学里沿着一个曲面运动的那种熟悉的思维模型做出物理解释。依靠几何学概念而不需要求助于牛顿的力的概念,这一思维模型能够描述一个粒子约束在一个曲面上运动的路径,否则它就是自由的运动了。我们已经谈到过,这种情况提示要把惯性定律直接推广到曲线运动,就像基于推广的相对性原理的一种新的引力理论所期望的那样。在这样一个曲面上的不受力的运动确实沿着测地线进行,这在上面已经指出过了。 224

爱因斯坦在大学学习的时候就已经知道了沿着一个曲面运动的模型。他在那里学过依靠高斯的曲面理论描述的这样的粒子的运动。我们不确切地知晓他在什么时候和在什么样的环境下认识到有可能用这样的模型去解释他的运动方程。然而,他的理论的进一步发展里肯定有为数不少的戏剧性结果是由这一模型得来的,因为首先它使得有可能把包含在爱因斯坦的静态引力场理论里的物理知识与关于弯曲表面和弯曲空间的数学知识综合起来。举例来说,证实了对一般动态引力场适用的曲面模型,起初还是对静态情况的运动方程的一种纯粹猜测性的推广。特别是它变得有可能立即推演出,在一般的引力场中检验粒子——即是说,本身对引力场没有贡献的那些粒子——不受力的运动是由测地线表示的,并且引力势一般亦是由一组度规函数的 10 个独立分量表示的。

其次,这一解释对于一种相对论性的引力理论在概念上的理解,具有一些影响深远的结果。事实上,爱因斯坦早期为了空间和时间概念而对等效原理含意所做的考查,现在可以同新近在曲面理论和它的进一步发展里用到的概念系统地联系在一起;这些概念中包括例如曲线坐标、线元、度规以及由它构成的其他张量,张量指的是那些不是由单个函数、而是像度规那样由多个分量构成的对象,它们以一种确定的方式从一个参照系变换到另一个参照 225

系。更普遍地说,这些和其他一些概念上的推论,来自于下列事实:曲面模型可以依靠一种延伸了的闵可夫斯基表述而精致化为一种弯曲时空模型。现在可以在推广了的惯性运动的意义上,把在引力场影响下的运动设想为一种由时空性质决定的自然运动了。

再次,爱因斯坦在高度发展的数学理论所含有的一种思维模型的范畴之内对运动方程的解释,为相对论性引力理论的构造,特别是为引力场方程的寻求开辟了丰富的技术资源。到了1912年年中,爱因斯坦手中已经万事俱备,只是不熟悉这些资源,但他得到了来自他的朋友格罗斯曼的帮助,后者那段时间成了设在苏黎世的多科工学院(ETH)的数学教授。事实上,高斯的曲面理论恰好是(满足广义相对论所需要的数学表述)得以发展起来的历史上的出发点之一。在格雷戈里奥·里奇-库尔巴斯特罗(Gregorio Ricci-Curbastro)和列维-契维塔1901年发表的关于所谓“绝对微分”论文里,把黎曼、克里斯托弗尔以及其他人的方法扩充成为一种完整的计算方案。这种所谓的绝对微分在一段长时间里实际上不为物理学家们所知,而爱因斯坦在1912年对此亦知之甚少。但爱因斯坦从布拉格迁往苏黎世之后,与格罗斯曼的来往使他有机会掌握这些数学方法。在1912年他写信给索末菲说:

我目前正在专门研究引力问题,而且相信我能够在这里的一位数学家帮助之下克服所有困难。但有一点是肯定的:在我的一生里从来不曾对任何事情那么费心尽力,并且我由此对数学产生了巨大的敬意,以我的无知之见,直到现在我还以为数学中更精微的部分纯粹是一种奢侈哩。(CAPE 5, Dok. 421^①)

爱因斯坦寻求场方程的启发式方法

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第467页。

1912年年中他得出了在相对论性的引力场中运动的一般定律,而且其中包含了已经引导他远远超过从通常的程序使经典物理学的知识适合于狭义相对论框架的一些步骤。这一不寻常的道路是以开始于等效原理的启发,并且终结于把弯曲的四维时空的度规作为引力势的适当表示这一同等独特的见解为标记的。在从这一点继续前进的道路上,实际上都已经竖好了一串标杆。爱因斯坦已经发现了什么是构建在引力场中的一个粒子的运动方程所需的东西。但还缺的是引力场的场方程,它决定着引力场是怎样由它的源,即怎样由能量和物质产生的。爱因斯坦在他对引力的相对论性理论的寻求当中,让自己朝向一个十分熟悉的模型,即植根于经典物理学传统的洛伦兹的电磁学理论,它将场方程和运动方程集于一身。亚伯拉罕提出的引力场论也明白地采用同样的模型。而且,爱因斯坦设想引力和惯性力的统一,是对狭义相对论里表现得那么成功的电场和磁场的统一的模仿。在那里不是单独的电场或者磁场,而是作为整体的电磁场才具有在参照系之间的变换下不变的意义。

于是,爱因斯坦构建一种相对论性场论的尝试,几乎在每一个方面都可以由洛伦兹的电磁理论给出的模型做出指引。让我们再从别的方面仔细看看这个模型:与粒子由超距作用的力相互影响着的描述不同,“洛伦兹模型”的描述不限于相互作用着的粒子,而且延伸到它们的全部环境。洛伦兹模型依靠充满着空间的场来描述周围的环境怎样被考虑作场源的物质影响,而且亦描述了这种场又是怎样决定着物质的运动。因此,根据这一模型解释的物理过程的数学表述必须包括两个部分,场方程和运动方程。

场方程描述的是,像粒子那样的一个场源怎样使它的周围进入能够由场——或者由一种可以用来导出场的势——描述的一种状态。因为我们要详细叙述爱因斯坦如何寻求场方程,那么有意义的是要根据洛伦兹模型精确地理解场方程的结构。这一方程分成两边,右边表示的是场或者势的源,左边依靠一种所谓微分算符的数学手段去精确地描述源是怎么产生场或者势的。一种典型的场方程具有以下的形式:

$$\text{算符(势)} = \text{源} \quad (1 \text{式})$$

这一象征性的方程表示出自洛伦兹模型的场方程的基本结构。为了得

到一种实际的数学方程,它把以下仍然需要具体化的概念联系起来了。例如,算符代表的是迄今为止还不清楚的微分算符,即是我们得以把势写进去的未知数学手段,令它精确地投到右边的源里。当发生在空间和时间的每一个事件都对应着势的一个值和源的一个值时,这样一道场方程称为局域的。例如,我们可以想象在一个确定的地点和一个确定的时刻上物质的密度是源的局域值。从“微分算符”的手段看来,引力势或者引力场的正确值对应于源的这个局域值。这正是场方程的中心功用,并且因此微分算符的正确选择在构建一种引力理论时就起到这样一种至关重要的作用。在经典物理学里,对应的场方程已经知道是“泊松方程”(Poisson Gleichung),它用一种势来描写牛顿引力定律的效应。在这里的算符规定为所谓“拉普拉斯算符”,势是经典电磁势,而源则是产生势的引力质量的密度。我们可以把这些规定,当做为了方程的思维模型而从经典物理学知识做出的默认假定。顺便说一句,爱因斯坦的研究过程的最后已表明,从经典物理学得到的场方程的思维模型,需
 228 要对广义相对论加以修正,因为在那里源不能够独立于势来规定。在第六章的最后,我们将会回到这个问题。

运动方程描述由源产生的场或者势,怎样从施加在承受着这场或者势的一个试验物体上的力决定其运动。它一方面基于经典力学里加速度意味着力的模型,这一模型可以象征性地表示如下:

$$\text{质量} \times \text{加速度} = \text{力} \quad (\text{牛顿定律}) \quad (2 \text{ 式})$$

式中的质量指运动物体的惯性质量。另一方面,根据洛伦兹模型,作用在试验物体上的力是在粒子所在地点场强与它的荷的乘积:

$$\text{力} = \text{荷} \times \text{场} \quad (3 \text{ 式})$$

因此一道典型的运动方程分成两边,左边规定场对试验物体的作用,这种作用是它的质量的函数;右边描述场对试验物体施加的力,它是试验物体的荷和场强的乘积。因此,这种方程具有以下典型形式:

$$\text{质量} \times \text{加速度} = \text{荷} \times \text{场} \quad (4 \text{ 式})$$

在引力的情况下,荷代表试验物体的引力质量。如果假设惯性质量与引力质量总是相等,结果就有:

$$\text{质量} \times \text{加速度} = \text{质量} \times \text{场} \quad (5 \text{ 式})$$

简化为

加速度 = 场

(6式)

因为在这种情况下的场是引力场,这道象征性的方程亦是伽利略关于自由下落的加速度与落体的组分无关的一种清楚的表达,因为它指出了加速度不依赖于物体而依赖于场。

为了把洛伦兹关于场论的模型运用于一种相对论性的引力理论,当然必须首先为引力场以及它的源找出一种适当的数学表示方法,然后把经典场论里的泊松方程推广到引力势的情况,而这一点正是这一理论的中心困难。从经典物理学里已知的量,牛顿引力势和引力质量,可以初步采用作为这些量的可能有道理的默认假定。但我们已经看到,在爱因斯坦研究的进程中,不久就显现出,他关于相对性原理的推广和关于引力和惯性的统一,暗含了一个对于引力势的更加复杂的默认假定,即是一种四维弯曲时空的度规。

从洛伦兹模型的启发式引导作用看来,好像是由一道适当选择的场方程完成引力的相对论性理论,一旦一道运动方程和引力势的一种可以接受的表示都找到了之后,下一步乃是一种步骤清楚的构建任务。但结果表明,寻找场方程的任务竟是爱因斯坦为之奋斗的一种相对论性的引力理论所要面对的最大的障碍。他所要面对的令人气馁的问题之一是,用度规张量表示引力势的做法要求场方程不只是对一个函数,而是对一个有 10 个分量的对象而建立的。于是,爱因斯坦很快认识到,为了对付这一挑战需要一位能够胜任的数学家的支持,正如他的传奇故事里所惊呼的那样:“格罗斯曼,救救我,不然我就要疯掉了!”其次,替代在经典物理学里的泊松方程的地位的引力场方程,不仅要与爱因斯坦在他对这一问题的较早工作里形成的不同想法,诸如必须引进空间和时间的新概念等问题相容;而且还要与关于引力及其与其他物理相互作用的关系的知识相符合。这些知识是在经典物理学和狭义相对论中积累起来的。

爱因斯坦首先要牢记,在正常境况下的引力场的作用量是已知的,并且已经在牛顿的引力理论里描述清楚了。因此相对论性的引力场方程在这些境况下要给出与牛顿定律相同的结果。这一要求可以叫做爱因斯坦的“对应原理”。新的场方程肯定亦要与在物理的相互作用中的能量守恒和动量守恒

相一致,因为这些守恒定律当然是物理知识的基石。这一要求可以简称为“守恒原理”。除了这些已经确立了的知识来源之外,爱因斯坦早期由等效原理指引的研究工作已经产生了几种发现,特别是对于引力的惯性的独一无二的特征的见解,亦要包含在所寻求的场方程的结果之内。我们已经提到,这一观念不仅仅是从升降机模型和水桶模型提出来的,更一般地说,它是通过选择将加速参照系里的惯性效应看成是一种推广的引力——惯性场,从而便将加速参照系和惯性参照系置于一种等同的地位上来做到的。我们沿袭爱因斯坦的用语,把这一启发式的期望称为“广义相对性原理”。爱因斯坦如此期望,所有参照系都有相同的资格来描述物理过程,并且,正如我们今天所阐明的那样,不存在一个绝对的结构,将他的方程以一种特定的形式表现出来。他相信广义相对性原理在以下的意义上是能够实现的,即是说使引力场方程满足在尽可能普遍的坐标变换之下保持其形式不变的数学要求,在数学上可以把它表达为场方程“协变”的要求。从今天的观点看来,这真的只是对理论的数学表示的一种要求,但连同他的其他启发性准则,终于引导爱因斯坦走在了正确的方向上。

正如我们看到的那样,1912年的突破连同其对四维可变量度规的关键作用的认可,以及一个引力场中普遍的运动方程表达式,所有这些乃是物理知识和一种数学知识的思维模型——曲面模型之间完美配合的结果。但当爱因斯坦此后不久着手处理他寻找的普遍的引力场方程时,他的好运气离他而去了。上面所说的所有要求都没有在数学描写中给出适当的表达式,那些内容亦肯定不属于那时候物理学的惯常做法。特别是,当时没有能够以一种那时候的物理学家熟悉的适当的数学框架来清楚地给出表达。因此,甚至不清楚上面所说的这些要求是不是互相协调的,因为这个问题是能够在概念的层次上回答的,而只能够在同时包含了所有准则的具体数学表示的基础上给出回答。当综合与构建与普遍的引力场方程有关的数学和物理学知识时,问题明显不在于仅仅找到一个合适的思维模型,像在与等效原理有关的思维模型里那样,以达到跨越经典物理学的边界,或者去推广已经存在的思维模型,就像把关于曲面的模型推广到关于弯曲时空的模型那样。

结果表明,寻求相对论性的场方程要求一种复杂得多的研究过程。这里

何以它不被包含在
对应原理的要求中?
(比假设更)

但结果
GR中
两者
没有

而不再物理的

231 内容亦肯定不属于那时候物理学的惯常做法。特别是,当时没有能够以一种那时候的物理学家熟悉的适当的数学框架来清楚地给出表达。因此,甚至不清楚上面所说的这些要求是不是互相协调的,因为这个问题是能够在概念的层次上回答的,而只能够在同时包含了所有准则的具体数学表示的基础上给出回答。

Why?

面包括对解答的各种候选项的系统评价,以及最终甚至要求详细阐明一种已经完成的理论,然后再一次把它放弃。在这一过程的进行之中,某些支配着爱因斯坦的启发式方法和引导他寻找场方程那些知识的基本结构,不得不做出修改。正是由于这种对基本知识结构的颠覆,使得爱因斯坦 1912 至 1915 年间对场方程的寻找,对于理解从经典物理学到现代物理学的转变,成为一个非常富于启迪意义的插曲。

双重策略

不同的知识来源怎么能够由爱因斯坦的启发式方法结合起来,他又是怎么处理提出一道可接受的场方程所必需的知识综合过程呢?特别是,在他寻找场方程的过程中起到中心作用的洛伦兹模型,又怎么能够符合于具体表达在启发式的对应原理以及能量和动量守恒里的物理要求呢?而且,这些物理知识的结构又怎么能够适合于由数学提供的工具呢?在爱因斯坦发表了他的广义相对论场方程之后,他很快就评论了综合知识的这一挑战,指出真正的困难不在于方程的数学表示,而是认识到它同经典物理学里的泊松方程以及同守恒定律之间的联系:

写出这些一般的协变方程自然是容易的;然而,困难的是认识到它们是泊松方程的推广,以及不容易看出它们满足那些守恒定律。

(CPAE 8, S. 207)

只有在不仅考虑爱因斯坦可利用知识的数量而且考虑其结构组织时,才能够理解这种知识综合的动力学。从知识的历史理论的观点看来,洛伦兹模型并不简单地是一个抽象的方案,关于引力场性质的知识都可以或多或少成功地强行往里装。作为可利用的物理知识的一种思维模型,它不仅含有缺口,而且亦含有默认的假定,它们能够把在爱因斯坦设计一种相对论性的引力场论的进程中发展起来的一幅模糊的图象修饰完善。尽管开始的时候由于缺乏科学信息,本来会以为实际上不可能找到场方程的,即使是一个似是

應該說，
數學本身的發展
亦依賴於物理學的發展。

顯示物理學與數學的聯繫。

是物理學的，它有結構形式的科學理論與範。

而非的候选项,而洛伦兹模型里植根于早期经验的默认假定,事实上能够填满这些缺口,为缺失的知识提供一种临时性的替代物。

如果结果表明,这样一种候选项与对引力场方程的其他要求不相容,那么这完全不是说从这个候选项构建起来的理论已经被否定了,因而应当再度开始一次新的尝试。通常适应于一个或另一个默认的假定就足够了,或者在研究给定的候选项时用已获得的知识来代替它。

在经过几次反复试验后,爱因斯坦在1912年秋季的某一天得出如下想法,构建一个可供选择的场方程的最适合的起始点是一个具有清晰的物理意义的对象,它是根据洛伦兹模型的样式构建起来,并且由植根于经典物理学和狭义相对论的默认假定补充完成的。在这里,首先每一件事都指向场方程左边的主要构成的一种特定表述——重构爱因斯坦对场方程的寻找的科学史家们把它叫做“核心算符”。至少对某些坐标体系来说,它就是经典力学的泊松方程左边所提示的一种推广。此外,对于弱引力场来说,这一核心算符正好约简为符合于爱因斯坦静态引力场理论所期望的形式。因此,核心算符首先满足了对应原理,即是说,从它可以不困难地推导出众所周知的牛顿引力定律。然而,仍然要检验它是否亦满足所有其他可应用的启发性条件那样的候选项,或者说它是否仍然需要修改以满足这些要求。

从一个在对应原理的意义上从物理上看来有道理的对象出发,接着是将该对象与诸如守恒定律和广义相对性原理等其他启发式的要求相适合。爱因斯坦在这方面已有不少经验。爱因斯坦寻找引力场方程的“物理策略”也由此而来。具体来说,这一策略开始设想以核心算符作为牛顿极限情形的推广,把它修改到诸如能量和动量守恒定律等其他物理学基本定律亦行之有效,并且最终找到一组令它不变的坐标变换。这种物理策略是从与传统的欧几里得几何里的综合拟设(Ansatz)比较的意义上说的,它从“已知”(在这种情况下是对引力的经典理解)出发去构建“未知”(在这种情况下是根据广义相对论设想的引力)。

爱因斯坦也跟踪一种作为补充的“数学策略”。它首先通过一个高度发展的数学知识库丰富洛伦兹模型,由此这个模型就获得了它的默认假定。这个知识库的一部分乃是里奇和列维-契维塔的绝对微分,它暗含着由度规形

成的某种微分表示式。然后这些表示式又可以临时插入到对场方程的洛伦兹模型里的算符缺口里去,它们不仅是数学上精确定义了的,而且能够在很大的一类坐标变换中保持其形式不变;它们因此提供了一种推广的相对性原理的直接实现方法。换句话说,这种程序具有这样的优点,爱因斯坦利用这些优点开始对付满足他的推广的相对论的中心要求的对象,这里指的是与在特定的坐标系的描述无关的要求。 234

仍然需要核对这些候选项是否满足对场方程的其他要求,特别是源自经典物理学知识的启发性期望,以及要找到对应原理和守恒定律的表达式。因而,这种手续的严重缺点是为熟悉的物理概念引进的这些数学对象的意义不是十分清楚的。因此需要为了给出可能的一致性的物理解释而对给定的数学对象进行系统的改写,而且这就是这个策略的一个必要的部分。特别是,一个候选项要满足的牛顿定律的要求,可以在弱静态场的特殊情况下重新获得,并且能量和动量守恒的要求也得到了保证。此外,允许的一组坐标变换还要满足这样的条件,即它们足以能包含那些导致参照系的均匀加速和均匀转动的特殊情况。 why? 不行? 不行?

这种数学策略可以与解析几何相比较,它是从“未知”(在这种情况下是从一个物理意义还不清楚的数学对象出发)到“已知”(在这种情况下是物理上有意义的引力场方程)。在数学策略和物理策略的情况下,洛伦兹模型的默认假定导致引力场方程的具体数学表达式,然后就有可能核对已知可接受的引力理论要满足的标准是否得到实行而且彼此相容。 1912 1913

在1912到1913年间爱因斯坦对场方程的研究中,他打造了由物理策略和数学策略这两方面的策略组成的“双重策略”,并且终于使得他能够成功地综合了作为构建广义相对论的基础的知识。爱因斯坦在这两种策略之间的游移不定,是他在1912至1915年间对引力问题的整个处理的特征,这种处理引导他从静态引力理论,前进到1913年同他的朋友格罗斯曼联名发表的框架理论,再到最终的广义相对论。 235

数学上
未知
↓
已知

通向场方程的道路上的最早几步

现在让我们回到爱因斯坦寻求场方程的起点。正如我们在上面已经详细讨论过的那样,1912年夏天,他想方设法要解决运动方程的问题,以及推导出描写在给定的引力场中的粒子运动的在坐标变换下不变的方程。这一成功带来了希望,并且使得推广相对论的计划变得切实可行了。这也许是爱因斯坦1912年8月16日在给他的年轻同事路德维希·霍普夫(Ludwig Hopf)的信上这样写的原因:

关于引力的工作进行得很好。我现在已经发现了最普遍的方程,除非我完全错了。(CPAE 5, S. 501^①)

这封信上的日期应当是相当精确地标记了爱因斯坦开始在他的“苏黎世笔记本”上记笔记的时间。他在开始写这些笔记之前已经建立了运动方程;无论如何这些方程已经作为既成事实(*fait accompli*)记载在这本笔记本里了。在那里概述的论证的中心议题是找到了场方程,并且以一种一致性的方式对相对论性的引力理论做出推论。

爱因斯坦给这本笔记本写的标题是“相对论”(Relativität),而它原来有96页。笔记本里的各个条目不是按照一种始终一贯的时间顺序来写的。爱因斯坦使用这本笔记本,既从封面里边开始,又从封底里边开始,而他这种从两头开始写的笔记,大概在前面四分之一处相遇,而且两边的文字看起来就互相颠倒了。顺便提一下,爱因斯坦后来的回忆亦支持对这些笔记里写下的时间顺序的重构,并且它对于广义相对论起源的解释具有关键的重要性。看来这本笔记本显示出了与格罗斯曼的帮助有关的一个重要的转折(Ein-
236 schnitt),格罗斯曼向爱因斯坦介绍了关键的数学概念,即所谓黎曼张量,并且从现在的理论观点看来,由此向他指明了通向广义相对论的一条坦途;不

① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第463页。

过,爱因斯坦和格罗斯曼很快就舍弃了这条坦途。

笔记中有关引力的词条是从一些可以解释为爱因斯坦认为是确定无疑而收集在一起的前提开始的。他已经研究了静态的引力理论——闵可夫斯基表述,以及我们已经说起过的高斯曲面理论,包括由黎曼和克里斯托弗尔奠定了基础的对它的推广。我们已经看到,高斯关于曲面的理论连同狭义相对论里的四维表示,提供了一个数学框架,在这个框架中引力问题可以再解释为引力势是由四维度规描写的。笔记本里有9页的内容是爱因斯坦试图为这样一种引力的度规理论推出一些直接的结果。在这一步上,他明显还不熟悉那时已可用的种类齐全的数学方法,特别是不变量理论高维微分几何以及里奇和列维-契维塔的绝对微分方法。

在他第一次对出现的两个关键问题的试探性摸索的进程中,爱因斯坦尚未准备好动手解决这些问题,这部分地是由于他还缺乏必要的数学技巧的缘故。涉及我们讨论过的中心任务的第一个问题,是为引力场方程找到一个具有所需要性质的微分算符。第二个问题是要表征已经得到信任的静态引力场,以及在延伸了的闵可夫斯基表述里一个转动参照系中的场这两种特殊情况时遇到的困难。第二个问题的一种解答,代表着把物理学知识和数学知识综合起来的重要的一步。因为,假若有有可能把关于静态引力场的广泛知识与关于在加速参照系里的惯性力的知识都吸收到新的表述里,这一表述将会由于扩充了物理上有意义的内容而丰富起来。特别是,它会暗示静态理论中的用单个函数表示的标量引力势,对应于度规张量的一种特殊情况,在那种情况下度规张量里只有一个函数分量是有意义的。这种静态引力势的特殊度规,因此成为洛伦兹模型的一项默认假定,它给出了在度规表述与关于静态场的物理知识,特别是包含在牛顿引力理论里的物理知识之间的联系。然而,后来明白了,仅仅这样一种似是而非的默认假定是与最后的广义相对论以及具体表达这些知识的方式不相容的——这远非一种默认假定的非典型命运!

苏黎世笔记本是对爱因斯坦为了获得一种新的复杂的数学表述的艰辛尝试的一份记录。它最初的几步没有得到任何具体的成功。这只是激起了爱因斯坦更大的兴趣,在他的常常是初步的计算中间,十分明显地透露出策

略性的见解,并且对他的整个继续研究的过程都产生深远的影响。在这里我们可以认识到反思过程的另一种功用,即个别的经验中构成策略性的见解。尽管在爱因斯坦寻求场方程的情况里,哥白尼过程基本上包含着对启发性原理给出新的砝码,以及对数学表述的重新解释,爱因斯坦对他最初几步的反思,促成了某种启发式策略的最早显现,特别是关于我们提到过的双重策略,即是说,他在物理策略和数学策略之间的摇摆。

此外,爱因斯坦在他最初的粗略尝试中,亦学到了某种一般的启发式想法怎样能够转化为具体的计算运作。例如,在这一联系中,他也开发了凭着数学策略改写一道既满足推广的相对性原理,又满足对应原理和守恒原理要求的候选场方程的程序。正如我们将要在下面看到的那样,爱因斯坦在一种临时性的场方程上运用试验和纠错的方法,学到了这样一种改写能够由一种附加的“坐标条件”限制可以允许的坐标变换而达到。换句话说,在他的各种启发性原理之间的平衡,最后只能够由对推广的相对性原理多少是强加的限制而达到——这对于爱因斯坦关于一种广义相对论的雄心勃勃的目标来说,确实是一个高昂的代价。

从修补阶段得来的见解

在爱因斯坦寻求场方程的开始阶段,当他还几乎没有任何策略性的见解时,他的决定性见解之一乃是在场方程的右边构成一个默认假定,我们把它象征性地称为源。在经典物理学里,引力场的源就是引力质量。那么,什么是它在相对论性理论里的对应物呢?我们看到在狭义相对论里不仅发生了“空间”和“时间”等运动学概念的变化,而且也发生了质量概念的变化。特别是由物理学家劳厄做出的对于连续介质和延展物体的相对论的研究,我们得知物质和能量的惯性特性不再适合由一个单独的标量描写,而是要由一个所谓的能量-动量张量的具有 10 个独立分量的复杂对象来描写。

这一见解对于如何适当描写相对论性引力场的源的问题,也有直接的暗示。因为一方面有狭义相对论里质量和能量的等当,另一方面有爱因斯坦对

于引力质量和惯性质量等效的要求,所以能量的每一种形式都应当能够作为引力场的源而起作用。此外,现在的目的在于为场方程的右边寻找符合理论的不变性要求的表达式,更精确地说,在于找到具有与由度规张量构成,因而本身亦具有张量性质的方程左边同样的变换性质的表达式。虽然他们的同时代人也讨论过其他一些选择,所有的论证都有利于把能量-动量张量作为方程右边的默认假定。此外,在苏黎世笔记本的较早一页里,爱因斯坦处理了构建在引力场中连续介质的运动方程的问题,他在这里使用的也是显现出众所周知的数学结构的能量-动量张量,而这正包含了他对推广的相对性原理的理解。这一方程不仅描写了连续介质在引力场中的运动,而且也与能量和动量的守恒取得了平衡。因而在这一情况下,数学策略和物理策略导致同一结果,而这正对广义相对论的起源具有持久的重要性。

239

场方程左边的情况有所不同。在这里爱因斯坦面对着一种结构性的问题。组成方程左边的引力势和作用在势上的微分算符这两个量,不适合于采用那种默认假定。即是说,这样的两个默认假定实际上来自不同的世界。在牛顿物理学里熟悉的经典泊松方程里的微分算符,作用于一个单个的标量函数,就是在那种语境下的引力势。然而,爱因斯坦对引力势的默认假定不再是在经典理论里表现为单个函数的标量势了,而是具有10个独立分量的四维度规张量,爱因斯坦仍然不熟悉它的数学性质。问题是如何推广经典理论里的微分算符,使得它能够应用于度规呢?

有两种可以选择的方法来回答这个问题,它们分别对应于上面所讲的物理策略和数学策略。第一种方法是脚踏实地的,把经典的算符一步一步地改变到能够应用于度规,所以反过来也有一种途径,从这个推广了的算符回到在经典物理学里熟悉的微分算符,如果物理条件与经典物理学里应当适用的一样的话。这一方法就是上面提到过的把中心算符作为经典的微分算符的直接推广的起源。那么它就自然会满足对应原理,由此保证了广义相对论与经典的引力理论的对应关系。

另一种方法是试图找出一种在经典物理学里出现过的微分算符的数学推广,它先验地满足推广的相对性原理的要求,即是说,在普遍的坐标变换下保持其形式不变。在上面说到的求助于格罗斯曼之前,爱因斯坦并不知道有

240 这样的能够作用于度规的推广。因此,他临时用一种明显是从数学教科书里捡来的对象来处理问题,它就是所谓第二贝尔塔拉米不变式(Beltrami Invariante),它是经典的微分算符的一种数学推广。它确实在坐标变换下保持其形式不变,但起先只是对单个函数定义,就像经典物理学里熟悉的微分算符那样。在使用贝尔塔拉米不变式过程中爱因斯坦面对着两个问题:一是要阐明这个微分不变式与牛顿理论里熟悉的算符之间的确切关系;二是这个定义在单个函数上的微分不变式如何可以应用到有10个分量的度规上。

当他忙于回答这两个问题中的第一个时,爱因斯坦第一次认识到对他的理论(在推广的相对性原理的限制下)可容许的坐标系加以限制,就可以选择那些坐标系,使得在这一理论应当继续有效的条件下,推广了的理论采取牛顿理论的熟悉形式。爱因斯坦以这种方式学会了用可容许坐标变换的限制,作为使数学策略的一个候选项适合于他的理论的物理要求,特别是适合于对应原理的要求的一种工具。

技术上更加困难的问题是怎样把定义于一个单个函数的算符,施加到一个多分量的度规上。这个问题不仅有明显的数学因素,而且包含了这样的物理问题:由贝尔塔拉米不变式提取出来的这样一个算符施加于度规上时,真的能够具有所期望的物理性质吗?因此,在笔记本上记下的研究笔记表示爱因斯坦在(试图进一步规定这些物理性质)和寻找在贝尔塔拉米不变式和四维度规之间的数学联系之间摇摆不定,这是完全不足为奇的。

241 爱因斯坦最初试图从四维度规构造出一个单个的函数,然后把贝尔塔拉米不变式作用到它上面,这样来解决在贝尔塔拉米不变式和四维度规之间的数学联系这个问题。然后爱因斯坦努力于分析这样得到的一个相当复杂的对象,以识别作为物理上有意义的对象的核心算符。他成功之处仅在于对可容许的坐标变换采取了限制条件。从而,这一限制也就提出了如下问题:这是否是达到相对性原理的推广的一种方法?爱因斯坦通过研究受限制的坐标变换是否仍然能够包含他的两种重要的特殊情况(即“升降机”(均匀加速的参照系)和“水桶”(均匀转动的参照系)来对这一点做试验,结果得到了一个否定的答案。

这一插曲表明,爱因斯坦在寻找场方程之初遇到了多大的麻烦。它也支

14.2.10

持了一开始提到的主张：即使是用明显不合适的手段修补一下，也仍可以得出策略性的洞见。在其寻求场方程的这一“修补”阶段，爱因斯坦的基本策略性洞见之一，无疑是认识到核心算符作为物理策略出发点的作用，以及数学策略的目标。爱因斯坦也看出了，应该为核心算符增添几项。这些修正项在爱因斯坦研究的进程中被赋予了各种不同的意义。它们可以是代表在数学策略的一个候选项中找出核心算符的一种尝试，例如运用贝尔塔拉米不变式那样的尝试；但它们也可以是为了保证在场方程和守恒定律之间的相容性而引进一些项的尝试。在每一种情况下，这样一些修正项不会妨碍过渡到牛顿理论的特殊情况和对应原理的有效性的要求都是至关重要的。否则的话，就明显需要用对可允许的坐标变换的某种限制尝试去消除它们。爱因斯坦对场方程左边的默认假定就是：它由核心算符和修正项组成，并且这一假定在他更深入的研究中起着重要的作用，其影响远远超过在苏黎世笔记本上把它写下来的时候。这一假设牢固地建立在经典物理学的知识和爱因斯坦自己的经验之上。可悲的是，它与广义相对论里正确的场方程的结构并不相容，我们将在下一章里讲到这一点。

坦途成了死胡同

242

在苏黎世笔记本里，经过许多页的计算和多次新的开始之后，爱因斯坦走到了以他多少是闭门造车的数学工具所能走到的尽头了。他试图使用贝尔塔拉米不变式作为数学策略出发点的努力，没有产生什么成效。执行一种物理策略的第一次尝试亦失败了。结果明白了，核心算符作为数学策略的目标，比作为物理策略的出发点更加合适。爱因斯坦应当怎样找到那些保证他的候选项与守恒原理相容所明显必需的修正项呢？而且，没有一个合适的数学上的出发点，他应当怎样决定这个算符的变换性质，从而发现在什么程度上他会在推广相对性原理上取得成功呢？无论如何，爱因斯坦猜测修正项和通过直接计算来决定核心算符的变换性质的尝试，都以失败告终。他在错综复杂的各种可能性之中，太容易迷失自己的道路了。

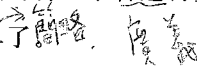
不过事情发生了一种根本的转变,使得从确立的数学对象出发的策略看到了更大的希望。从爱因斯坦后来的回顾可以看出,是格罗斯曼为他找到了必需的数学资源,并且向他指出要把那重要的黎曼张量放进广义相对论的正确的场方程里。事情的这种转变也可以直接由爱因斯坦在笔记里提到格罗斯曼的帮助而得到佐证。事实上,在爱因斯坦的笔记本里第一次出现黎曼张量之处,记下了这样的注解:“格罗斯曼,四阶张量。”在自此以下的几页里,爱因斯坦为了构成他的场方程左边的形式,更加精细地研究了黎曼张量。有了这个以后,他就掌握了推导出正确的场方程以及完成广义相对论的所有必需的先决条件。但这条坦途后来被证明是一条死胡同。

243 爱因斯坦对场方程左边的默认假定,是在他的修补阶段的一个结果,并且决定了他研究黎曼张量的方向。他首先试图计算出黎曼张量是否会产生能够表示成核心算符与修正项之和的一个候选项。他以这种方式第一次遇到了里奇张量,然后他尝试去分解这个张量。在他的计算的末尾,他不得不失望地承认,由此得到的那些修正项并不满足对应原理的条件。于是,基于里奇张量的一道推广了的引力方程不会在牛顿极限情形下变成所希望的泊松方程,因为相应的修正项不会消失。在要使黎曼张量进入到场方程的左边,以适当的形式成为一个候选项的进一步尝试无功而返之时,爱因斯坦显然回想起了他先前对付贝尔塔拉米不变式的经验。这一经历教会了他如何放弃那些讨厌的修正项的方法,就是对可允许的坐标变换加上限制条件。当格罗斯曼第一次建议用黎曼张量时,爱因斯坦可能希望这样做就不需要那样的一些技巧和应急措施了。但在似乎没有别的办法考虑从“粗糙的钻石”中直接提取出一个适当的候选项时,黎曼张量必定显现在他的眼前,他愿意或不愿意也只得屈就于这样的方法。

当爱因斯坦决定走那条路线的时候,他很快看到哪一种对坐标的限制会改变场方程,基于里奇张量采取所希望的形式,使得场方程的左边可以表示成核心算符和修正项之和,就像爱因斯坦所期望的那样。这一坐标条件今天称为“谐和坐标条件”。它仍然被用来使广义相对论的场方程采取一种使我们可以认识到它与著名的泊松方程的联系的形式——这是经典物理学里坐标系正常运用的表示。但在爱因斯坦那个时候,对容许的坐标的限制尚不具

有与今天相同的意义。尽管按照今天的理解,坐标条件仅仅用来在许多原则上可容许的坐标系中选择对问题最合适的一个,按爱因斯坦的初衷,这样一种条件确实是对可能的坐标系的一种真实的限制。毕竟,仅仅靠这样一种限制,它就可以保证能够给出场方程里所需要的核心算符和修正项之和的形式。 244

为什么爱因斯坦把坐标条件解释作对可能的坐标系的选择的一种真实的限制,还有另外一个理由,并且由此成为推广的相对性原理的一种限制。因为不仅对应原理,而且守恒原理也要插上一手。我们看到爱因斯坦已经在他的修补阶段里使他的方程同能量和动量取得了平衡。但因为能量-动量张量亦出现在场方程右边的源项里,站在经典物理学里质量密度的位置上,那么守恒原理就会要求在能量和动量平衡方程和场方程之间满足一个相容性条件。爱因斯坦期望的是从这一相容性条件得出对可容许的坐标系的另一个要求。这个进一步的坐标限制条件,最终来自守恒原理,必须在做出关于可容许的坐标系,并且亦由此关于推广的相对性原理的有效范围的最终陈述之前,与来自对应原理的坐标限制条件取得协调。

因而,即使在爱因斯坦已经迷上了坐标限制条件的技巧之后,由此从黎曼张量导出的一个候选项就能够与场方程适应,这样就使它自己置于极端复杂和模糊的境地。最后,不管开始的时候有过怎样的承诺,在累积了所有对可容许坐标系的限制条件之后,得到的不再能够称作是对经典的相对性原理和狭义相对论的一种扩充了。通过将注意力局限于弱引力场的情况,可以更好地追踪爱因斯坦大刀阔斧地简化他已经得到的方程的复杂性的过程,这一情况当然比牛顿的物理学普遍得多了,但比起对不同的坐标条件的评定来说又实在是太简单了。

爱因斯坦要容纳从对应原理和从守恒原理得来的两种坐标限制,导致理论上出现了一些不能在他的物理期望的基础上接受的要求。它们导致了一种荒谬的要求,即正常的物质是不能归入引力场源里的,因为它的能量-动量张量不具有由于两种坐标限制的要求而应当具有的性质。换句话说,这证明了难以把这种情况的一切有关条件纳入到一种互相协调的关系里,这里指的特别是场方程、两种坐标条件,以及关于场源的默认假定。爱因斯坦可以通 245

过改变(进入到他的理论里的默认假定)中的一个而逃脱这个矛盾的局面。由于看来不可以修改对于场源的默认假定,爱因斯坦看到他自己不得不采取激进的一步——修改场方程。考虑的仍然是弱场,爱因斯坦在1915年最终的场方程的形式里,加上的正是这一项,它就是后来所谓“爱因斯坦张量”的来源。

广义相对论是如何构成的历史,到这一步应该可以告一段落了。但情况并不如此,因为爱因斯坦不满意这一结果,又去寻找其他的解。如果认识到格罗斯曼不仅作为在需要的时刻的一名救助者,而且也是爱因斯坦的一种刺激性的“牛虻”,他离开他曾经达到了的顶峰的理由就更容易得到理解。爱因斯坦曾经转向格罗斯曼,希望从他那里获得适合于他的物理观念的数学表达式。他却缺乏在由格罗斯曼提供的数学见解的基础上改变这些观念的思想准备。换句话说,为了一种物理学理论的需要而发展起来的数学表述,和在这一过程里改变其中的概念之间这种复杂的相互作用,变成了爱因斯坦承受的一场灾难,虽然是一场暂时性的灾难。

在爱因斯坦找到了从今天的观点来说是正确的场方程之后,他依然继续根据他先入为主的物理观念去推算出方程的结果。由于他在推导这一结果的过程中,已经修改了原来的候选项,即是由黎曼张量导出的里奇张量,于是就产生了这样的问题:爱因斯坦张量,即黎曼张量的修改版本,依然享有那些使黎曼张量可以被看做、首先是被爱因斯坦看做有希望的候选项的性质吗?这些性质当中最主要的是能够获得弱场下的牛顿近似,当然也包括从里奇张量得出来的适当的坐标。爱因斯坦通过静态引力场的一些中间步骤推进到这一极限,就像他在他1912年的理论中认为的那样。在他的笔记本开始的记录里,他把这一理论改写到了扩展了的闵可夫斯基表述。我们已经看到,在这里的静态引力场是由一种非常特殊的度规表示的,它可以用一个单个的函数描写。在弱场近似下,这一单个函数是与牛顿引力势联系的。结果表明,修改了的场方程是与静态场的表示不相容的。爱因斯坦以这种方式使他自己相信,新的场方程不满足应当能够导出牛顿极限情形的物理要求。

当察看1915年的广义相对论时,这一结果作为在修改了的场方程与爱因斯坦对静态场的度规的默认假定之间不相容的表达,在技术上是正确的。

在这一理论里,它等于如下命题:静态场一般不能够以这种方式表示,而需要一种多于一个可变量度的度规。这意味着从正确的场方程到牛顿极限情形的过渡不是像爱因斯坦想得那么简单。运用爱因斯坦终于在1915年掌握了的知识,第一次从具有10个分量(度规的分量)的场方程推导出具有一个分量(牛顿引力势)的场方程,就不是一个真正的问题了。

在1915年的相对论里,过渡到只有表示经典引力势的单个函数的一道方程,完全不是在引力场方程层次上展开的问题,而只是在引力场中的物质的运动方程层次上的问题。在爱因斯坦考虑的极限过渡的语境中,引力场方程本身一般不能够约简为那样的一道单个标量函数的方程。换句话说,在广义相对论的场方程里,度规中亦有几个分量是描写弱场的。爱因斯坦在他1921年关于相对论的讲演中,这样总结了牛顿的特殊情况:

我们看到,即使在第一阶近似里,引力场的结构亦根本上不同于能够与牛顿理论取得一致的情形;这一差别在于引力场具有张量的特征而不是标量。以前没有认识到这一点是因为在第一阶近似下,只有(度规

的) g_{44} 分量进入到物质粒子的运动方程里。(Einstein 1990, S. 89^①)

对苏黎世笔记本上记录的重构,亦确证了牛顿理论的推广是一件要克服一些原理上的困难的事。

即是说,这不是一个单独论证的问题,而是一组互相紧扣的思考,它们植根于爱因斯坦的启发性假定,并且最后被证明为与广义相对论不相容。这些考虑包括了所有支持爱因斯坦静态场理论的论证,以及他如何实现牛顿极限情形的观念,其中包含了关于场方程左边应当由核心算符加上修正项组成的默认假定。

在这种重构的背景下,就易于懂得为什么需要经过三年的时间,在新的理论的发展着的表述与从其中生长出来的传统的启发式和概念性前提之间的紧张状态,才能够通过支持一种适合于新表述的概念理解而得到消解。

① 中译文参照:爱因斯坦:《相对论的意义》,李灏译,北京:科学出版社1961年版,第58页。

在数学策略和物理策略之间

248 在里奇张量和爱因斯坦张量这两种方法都失败了之后,爱因斯坦冒着风险投入到在数学策略意义上的进一步试探里去,因为在这些失败了尝试之后,这方面的潜力还没有发掘穷尽。最后他成功地找到了一个候选项,在它身上能够消除在处理里奇张量和爱因斯坦张量时遇到的困难。历史学家们知道这个叫做“11月张量”的候选项,因为爱因斯坦在1915年11月初再一次求助于它,虽然它在今天的广义相对论里不再有什么地位了。一般而言,它是广义相对论的进化史里的奇遇之一,爱因斯坦先后两次研究场方程的最重要的候选项,一次是在1912至1913年间的冬季,那时候他把他的研究记录在苏黎世笔记本里;第二次接近1915年年底,当时他一个星期又一个星期地向普鲁士科学院提交作为引力问题的解的新的场方程,开始是在“11月张量”的基础上,然后是在里奇张量的基础上,最后,11月25日是在爱因斯坦张量的基础上。

全面地考虑以上的情况,更值得注意的是他在这两个阶段里对于不同候选项的适用性做出了不同的选择。尽管写在苏黎世笔记本上的11月张量被当做是数学策略的最有希望的候选项,到了1915年冬天,爱因斯坦最终接受为引力问题的最可行的解答的却是爱因斯坦张量。而在1913年春天至1915年秋天期间,爱因斯坦主要思考的是作为物理策略的结果的框架理论。事实上,爱因斯坦和格罗斯曼联名发表了框架理论里场方程的推导,标志了爱因斯坦在苏黎世笔记本里记载的研究的结束。真的,在这种情况下,在从对应原理和从守恒原理得出的两种坐标限制条件之间再也没有冲突了。但它们对可容许的坐标系的类别限制得如此严格,以至于实际上抵消了从一个候选项开始就立刻可以满足推广的相对性原理的要求的好处。此外,爱因斯坦依然努力于克服那些使得不可能全面地研究他的候选项的技术困难。他只好被迫把自己限于弱场情况。因此,他只设法证明了这种情况下守恒定律的有效性,而对数学策略里这一个以及所有其他候选项来说,守恒原理是否在一

般情况下得以实现的问题仍然未能解决。

在这些困难的背景下,爱因斯坦终究回到了在苏黎世笔记本上记载的研究的末尾之处。在这期间他已经学到了一些东西,使得这一策略显得似乎更有希望。特别是他现在设法不仅把核心算符当做目的,而且也用来作为构建场方程的出发点,由于仍然处在数学策略的语境中,他学到了表面上必需的修正项并不需要去猜测,而是在经典物理学里固有的启发式原理的帮助下并且特别注意到守恒原理,就可以系统地构造出来。令人感到迷惑不解的是,爱因斯坦对数学策略的这种实验的主要结果竟是成功地实行了物理策略,终于引导他得出框架理论里的场方程。

249

这道场方程在某种意义上是相对论性场方程问题的一种保守解。它首先满足植根于经典物理学的两条原理,对应原理和守恒原理。因为框架理论里的场方程的左边恰好具有爱因斯坦所期望的形式,它由核心算符和修正项组成,我们立刻可看到如何从它得到经典引力理论里的泊松方程。此外,爱因斯坦还能够证明,框架理论里的场方程在其中采取同样形式的那一类坐标系不能够以符合他愿望的方式满足推广的相对性原理;但亦能够使他自己恢复信心,因为表面上对可容许的坐标系需要的限制条件,是与守恒原理的要求密切相关的。因而看来有一个说服力很强的理由,在一定程度上使框架理论得以实现推广的相对性原理。在下一章里我们将回到这一点以及框架理论的其他特征。

爱因斯坦在物理策略和数学策略之间的摇摆,表明了无论如何随后的知识综合过程比他设想得到的要远为复杂和富于戏剧性。因为这一过程不仅包括与洛伦兹模型相关的默认假定的逐项调换和逐步改进,而那些改换或者是由物理策略,或者是由数学策略提供的。像我们已经看到的那样,简单地追溯正确的场方程从何而来仍然是不够的。爱因斯坦最终竟变得相信,他原来的问题是完全解决不了的,并且推广的相对性原理也依然是达到不了的。因而,他在1913年春天满足于非广义的相对论和今天不被接受的框架理论里的场方程,并且继续维持了两年之久。

当爱因斯坦抱着框架理论里的场方程的变换群大到足以包括均匀加速和均匀转动等特殊情况的错误观念时,他在写给他的朋友贝索的信里提到,

250

要放弃从数学策略得来的场方程：

关于不变式的普遍理论只是一种麻烦。沿直线行进被证明是唯一可行的道路。真难以理解为什么在我发现近在手头的东西之前竟要在周围摸索那么久。(CPAE 5, S. 604^①)

但在两年之后,当他回到数学策略的场方程时,他在1915年12月10日再次写信给贝索,说起曾经使他动摇而放弃了今天以为是正确表述的原因:

那时候在手上离得最近的是正确的,但格罗斯曼和我相信守恒定律仍未满足。(CPAE 8, S. 218)

因而对爱因斯坦来说,在1915年认为“最直接”的,在1914年却像是全然不同的。在他1915年11月28日写给索末非的信的详细评论中表现了这一点,他在其中强调了数学策略的成功:

一旦对于较早理论里的结果和方法的最后每一点信心都失去了,我清楚地看到只有通过与广义协变理论,即与黎曼协变量的连接,才能够找到一个满意的解。(CPAE 8, S. 207)

这样一来,爱因斯坦在1914年由于从经典物理学的概念出发而把从物理策略出发看做“最直接”,到1915年时,数学策略则成了重新表述他的理论的更加直接的出发点了。尽管框架理论里的场方程只能通过放弃广义相对论才能建立起来,他在1912至1913年的冬天里放弃对正确场方程的预期,乃是由于依然盘踞在经典物理学里的他的启发式方法的阻碍,特别是由于他对于牛顿极限情形以及能量和动量守恒的观念而注定的。

251 但观点的变化是怎么来到而使爱因斯坦在1915年底重新加以考虑呢?两种策略之一,即是说,引导爱因斯坦走向框架理论的物理策略真的是一条死胡同吗?而另外一种策略,即数学策略,是走向广义相对论里正确的场方程的坦途吗?现在我们想强调的是,在他对新的引力理论的研究中,爱因斯坦

^① 中译文参照:《爱因斯坦全集·第5卷》,范岱年主译,长沙:湖南科学技术出版社2002年版,第559页。

坦比较少由几何观念来引导(回顾起来真有点令人吃惊),而毋宁说是由在物理知识和数学表述之间的张力来引导。

这一章紧密联系于作者与米歇尔·扬森、约翰·诺顿、蒂尔曼·绍尔和约翰·斯塔切尔对广义相对论历史的联合研究。在这里对联合研究成果的陈述特别受益于戴培德、米歇尔·扬森和蒂尔曼·绍尔。

推 荐 读 物

本章特别根据:

Castagnetti, Giuseppe et al. 1994. *Wissenschaft zwischen Grundlagenkrise und Politik. Einstein in Berlin*. Berlin: MaxPlanckInstitut für Bildungsforschung. Forschungsbereich Entwicklung und Sozialisation. Arbeitsstelle Albert Einstein.

Renn, Jürgen. 2005. "Before the Riemann Tensor: The Emergence of Einstein's Double Strategy" and "Standing on the Shoulders of a Dwarf: General Relativity a Triumph of Einstein and Grossmann's Erroneous Entwurf Theory." Both in J. Eisenstaedt and A. J. Kox (eds.) *The Universe of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 11.) Boston: Birkhäuser.

——. 2007. "Classical Physics in Disarray: The Emergence of the Riddle of Gravitation." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Introduction and Source*. (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 1., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Renn, Jürgen and Tilman Sauer. 1999. "Heuristics and Mathematical Representation in Einstein's Search for a Gravitational Field Equation." In H. Goenner et al. (eds.) *The Expanding Worlds of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 7.) Boston: Birkhäuser, pp. 87—125.

——. 2007. "Pathways out of Classical Physics: Einstein's Double Strategy in Searching for the Gravitational Field Equation." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Introduction and Source*. (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 1., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

在这一章里用到的进一步的文献:

Abraham, Max. 1912. "Zur Theorie der Gravitation." *Physikalische Zeitschrift* 13: 1—4.

——. 1912. “Berichtigung.” *Physikalische Zeitschrift* 13: 176.

——. 1913. “Eine neue Gravitationstheorie.” *Archiv der Mathematik und Physik* 20.

Abraham, Max. 2007 (1912). On the Theory of Gravitation and (1913). A New Theory of Gravitation. Both in J. Renn and M. Schemmel (eds.) *Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy. The Genesis of General Relativity*, vol. 3. Dordrecht: Springer.

Bianchi, Luigi. 1896. *Vorlesungen über Differentialgeometrie*. Leipzig: Teubner.

CPAE 2. 1989. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 2. *The Swiss Years: Writings, 1900—1909*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 4. 1995. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 4. *The Swiss Years: Writings, 1912—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 5. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5: *The Swiss Years: Correspondence, 1902—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 6. 1996. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 6. *The Berlin Years: Writings, 1914—1917*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 8. 1998. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 8. *The Berlin Years: Correspondence, 1914—1918*. Princeton: Princeton University Press. (Part A: 1914—1917, pp. 1—590. Part B: 1918, pp. 591—1118.)

Ehrenfest, Paul. 1909. “Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie.” *Physikalische Zeitschrift* 10: 918.

Einstein, Albert. 1907. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.” *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 4: 411—462.

——. 1912. “Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes.” *Annalen der Physik* 38: 355—369.

——. 1912. “Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes.” *Annalen der Physik* 38: 443—458.

——. 1913. “Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems.” *Physikalische Zeitschrift* 14: 1249—1262.

——. 1914. “Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 1030—1085.

253 ———. 1915. “Zur allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLV: 778—786.

——. 1915. “Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag).” *Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLVI: 799—801.

——. 1915. “Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 831—839.

——. 1915. “Die Feldgleichung der Gravitation.” *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 844—847.

——. 1916. “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Annalen der Physik* 49: 769—822.

——. 1922. *The Meaning of Relativity: Four Lectures Delivered at Princeton University, May 1921*. London: Methuen.

——. 1992. *Autobiographical Notes. A Centennial Edition*. Edited by Paul A. Schilpp. La Salle, Ill.: Open Court.

Einstein, Albert and Michele Besso. 1972. *Correspondance 1903—1955*. Edited by Pierre Speziali. Paris: Hermann.

——. 2003. *Le manuscrit Einstein-Besso. De la relativité restreinte à la relativité générale*. Paris: Scriptura.

Einstein, Albert and Marcel Grossmann. 1913. *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig: Teubner.

——. 1914. “Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie.” *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 63: 215—225.

Hofmann, Wenzel. 1904. *Kritische Beleuchtung der beiden Grundbegriffe der Mechanik: Bewegung und Trägheit und daraus gezogene Folgerungen betreffs der Achsendrehung der Erde und des Foucault'schen Pendelversuches*. Wien: Kuppitsch.

Laue, Max. 1911a. “Zur Dynamik der Relativitätstheorie.” *Annalen der Physik*. 35: 524—542.

——. 1911b. *Das Relativitätsprinzip*. Braunschweig: Vieweg.

—— (von). 1961. *Gesammelte Schriften und Vorträge*. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn.

Lorentz, Hendrik Antoon, Albert Einstein and Hermann Minkowski et al. 1913. *Das Relativitätsprinzip: Eine Sammlung von Abhandlungen*. Leipzig: Teubner.

Mach, Ernst. 1960. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*. (Translated by T. J. McCormack.) LaSalle, Ill.: Open Court.

Minkowski, Hermann. 1908. “Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen

Vorgänge in bewegten Körpern." *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse. Nachrichten*; 352—404.

254 Planck, Max. 1908. "Zur Dynamik bewegter Systeme." *Annalen der Physik* 26: 1—38.

Reich, Karin. 1994. *Die Entwicklung des Tensorkalküls: Vom absoluten Differentialkalkül zur Relativitätstheorie*. Basel: Birkhäuser.

Ricci, Gregorio and Tullio LeviCivita. 1901. "Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications." *Mathematische Annalen* 54: 125—201.

Scholz, Erhard. 1980. *Geschichte des Mannigfaltigkeitsbegriffs von Riemann bis Poincaré*. Boston: Birkhäuser.

Stachel, John. 1980. "Einstein and the Rigidly Rotating Disk." In Alan Held (ed.) *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein*, Vol. 1. New York: Plenum, pp. 1—15.

———. 2007. "The First Two Acts." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Introduction and Source*. (The Genesis of General Relativity, Vol. 1., Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

关于广义相对论的历史:

这里所呈现的重构主要是基于马克斯普朗克科学史研究所所进行的研究之上。研究成果可在下面这几卷本题材广泛的出版物中找到:

Renn, Jürgen (ed.). 2007. *The Genesis of General Relativity*. 4 Vols. (Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

其他有价值的读物:

Ashtekar, Abhay et al. (eds.). 2003. *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics Festschrift in Honour of John Stachel*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Eisenstaedt, Jean. 2002. *Einstein et la relativité générale: les chemins de l'espace-temps*. Paris: CNRS Ed.

Janssen, Michel. 2005. "Of Pots and Holes: Einstein's Bumpy Road to General Relativity." In J. Renn (ed.) *Einstein's Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 58—85.

Stachel, John. 1995. "History of Relativity." In L. M. Brown et al. (eds.) *Twentieth Century Physics*, Vol. 1. Bristol: Institute of Physics Pub./Philadelphia: American Institute of Physics Press, pp. 249—356.

自1986年以来,广义相对论史的国际会议定期召开。下面的系列出版物与这些会议相关。

Howard, Don and John Stachel (eds.). 1989—2005. *Einstein Studies*, 11 Vols. 255
New York: Birkhäuser.

爱因斯坦在广义相对论出现时最有意义的工作载于《爱因斯坦全集》第4卷和第6卷中,第5卷和第8卷中含有这时期的通信往来。

CPAE 4. 1995. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 4: *The Swiss Years: Writings, 1912—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 5. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 5: *The Swiss Years: Correspondence, 1902—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 6. 1996. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 6: *The Berlin Years: Writings, 1914—1917*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 8. 1998. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 8. *The Berlin Years: Correspondence, 1914—1918*. Princeton: Princeton University Press. (Part A: 1914—1917, pp. 1—590. Part B: 1918, pp. 591—1118.)

为一般读者写的关于广义相对论的现代解释的最可读的一些著作选目:

Bergia, Silvio. 2002. *Das neue Weltbild der Physik*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft.

Ehlers, Jürgen and Gerhard Börner. 1996. *Gravitation*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

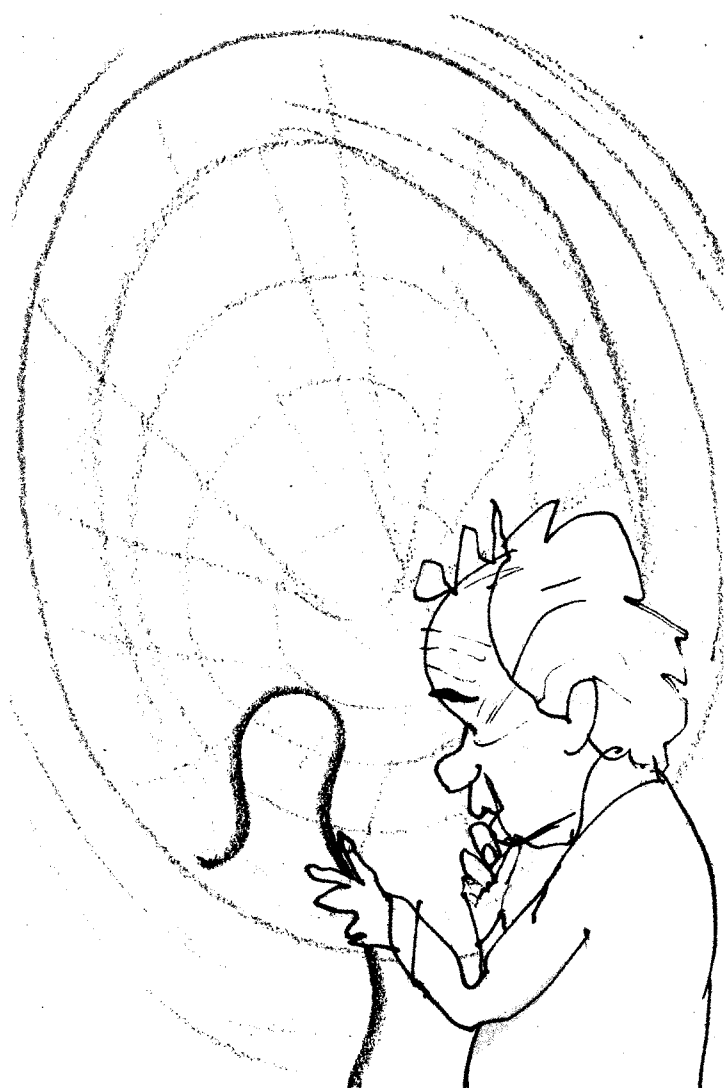
Goenner, Hubert. 1997. *Einsteins Relativitätstheorien: Raum, Zeit, Masse, Gravitation*. Munich: Beck.

Pössel, Markus. 2005. *Das EinsteinFenster. Eine Reise in die Raumzeit*. Hamburg: Hoffmann und Campe.

Rindler, Wolfgang. 2004. *Relativity. Special, General and Cosmological*. Oxford: Oxford University Press, (1969).

Schutz, Bernard. 2004. *Gravity from the Ground Up*. Cambridge: Cambridge University Press.

第六章 | 绕着圈子的进步



预览:为什么爱因斯坦通向广义相对论的道路如此迂回曲折? 258

广义相对论的起源得益于一种哥白尼过程,在这一过程中传统知识以一种新的方式被构建。只有传统知识在某种明确的理论语境中,足够丰富到准备好这样一种深思熟虑的重构的手段时才能够发生这一过程。这一语境是由爱因斯坦和格罗斯曼于1913年联名发表的一种临时性的引力理论——框架理论提供的。在1913年至1915年期间,对这种理论的苦心钻研绝不是一种错误的引导,它是为了要包揽被证明对于广义相对论理论的构成是关键性的更进一步知识资源的先决条件,其中特别重要的是数学和天文学信息的资源。贡献于这一知识库存的增长的,也有一些是没有被当做是科学英雄的、名不见经传的研究者。他们的贡献包括提供与爱因斯坦的方法竞争的可供选择的理论,或者对这种方法的延伸和批评性的讨论。

本质上不可能通过在物理上重新解释一种高度发展了的表述,而实现从框架理论到广义相对论的过渡。只可能通过由于对框架理论的精心研究而扩大了的知识网络的眼光,看出经典物理学知识的资源看来与建议中的处理新的引力理论的数学方法不相容;那指的是爱因斯坦自己在1912年至1913年那个冬天,以及数学家大卫·希尔伯特(David Hilbert)在1915年年底提出来的新理论。1915年爱因斯坦又回到了他曾经在三年前放弃了的那种方法上,有点像一场错误的喜剧的结局。^①然而,事实上科学进步的这一看来是迂回反复的特征,表明了反思的重要作用,它可以使得同样一个结果,在不同的语境中获得不同的意义。

这一分析亦可运用于相对论革命更深入发展的进程,因为当广义相对论的基本场方程在1915年年底构成之时,这一理论还没有臻于完善。对于这些方程的物理解释还是由以前在建立这些方程时运用过的启发式方法所决定的,而这些启发式方法又依然是部分地锚定在经典物理学知识之上的。只

① 《错误的喜剧》是莎士比亚的一部作品,剧中写了一个先悲后喜的故事。——译者

259 有在与新的天文学发现结合着的广义相对论的进一步延展,才表明其中的某些启发性要素是与通过这些延展得知的物理意义不相容的。这种情形特别表现在马赫原理的启发性作用上,根据马赫原理,物质被假定决定着空间的性质,但这只是一种单方面的因果性,终究被证明与广义相对论的本性不相容。广义相对论理论在技术上的不断完善与它的物理解释的逐步深入之间的相互制约,即使到了今天仍然没有完结。

框架理论作为爱因斯坦和希尔伯特的跳板

当一位像爱因斯坦那样特立独行的人物,在广义相对论的登场上扮演着那么与众不同的历史角色之时,几乎不可避免的是要用戏剧性的名词,要用一出戏剧或者一出喜剧的术语来讲述这次开场的故事了。广义相对论历史的传统描述里谈到的是一次又一次的失误与突破,陷入绝望的两难境地,然后终于显露出真理的曙光。他们把这部历史的特征刻画成一位孤独英雄演出的戏剧,一出充满着错误和混乱的喜剧,甚或是一位机智滑头的机会主义者锐不可当地冒出来的经过。戏剧性的叙述自然倾向于强调那些伟大英雄的光辉业绩,同时忽略那些次要角色的贡献;他们津津乐道的是那些伟大观念(或者伟大失败)的神秘感,并且常常置知识的长期发展于不顾。在这种描述方式里,提到失败主要是为了给出成功所需要的对立面,它使真理的胜利显得更加辉煌灿烂,而对于那些失败本身没有表现出多少兴趣。

作为这种戏剧性叙述的一个例子,让我们从基普·索恩(Kip Thorne)关于广义相对论的新发展的迷人描述里引述一段文字。在这段话里把希尔伯特描写成故事里真正的英雄,他在戏剧的最后一刻,把观众的注意力从看起来颇为糊涂和数学上无能的爱因斯坦身上转移过来:

260 1915年秋天,当爱因斯坦正在遭遇一次又一次的数学错误,为得出正确的定律而苦苦奋斗之际,希尔伯特则仔细地钻研他从爱因斯坦夏天到哥廷根访问时学到的东西。当他在波罗的海的鲁根(Rügen)岛上过秋天假期时,想到了一个关键性的观念,并且在几个星期里就得到了正

确的定律,那不是在爱因斯坦艰辛的经验道路上推导出来的,而是用一种优雅而简洁的方法得出来的。(Thorne 1994, S. 130 ff.; 与 Fölsing 1993, S. 419—420 相比较)

希尔伯特确实在 1915 年 11 月 20 日向哥廷根科学院递交了他那著名的论文《论物理学的基础(第一稿)》,其中包含了广义相对论里正确的场方程,比爱因斯坦最终的论文早五天。虽然希尔伯特的文章到 1916 年才发表,许多人亦觉得他应该被授予早于爱因斯坦建立场方程的优先权。

希尔伯特自己强调,他的方法有两个独立的出发点:米关于物质的电磁学理论,以及爱因斯坦把引力理论基于用一个四维度规描写引力势的尝试。希尔伯特高超的数学才能明显使他能够迅速和独立地把电磁场和引力场的场方程结合起来。虽然从广义相对论的观点看来,希尔伯特对米观念的运用使得他起初得到的理论局限于引力场的特定的源——电磁场,不过仍然有许多科学史家和物理史家把他看做是第一个建立起广义相对论的数学框架的人,这个框架既提供了该理论的实质结果,如场方程,同时也澄清了过去模糊的概念性争论,如广义协变场论中的因果性。他对广义相对论的贡献,虽然开始时受到米和爱因斯坦的启发,因而显得是一种独特的和独立的成就。此外,希尔伯特无疑在引力场和电磁场的统一场论中做过先驱性的工作。鉴于所有这些在一段很短的时间内做出的成果,看来希尔伯特确实找到了广义相对论以及进一步发展的一条坦途。而且,像我们将要在最后一章里看到的那样,爱因斯坦只是在长期摸索之后才走上这条坦途,并且亦是在他 1915 年 11 月与希尔伯特两人通信的影响之下。

然而,在近三四十年来关于广义相对论起源的详细研究,不仅包括了对爱因斯坦的成就,而且包括了对其后继者和同时代人成就的研究,这一事实对于那种过分简单的故事提出了疑问,根据那种故事,这一理论的起源从根本来说乃是数学的胜利。当我们回想起,正如我们已经看到的那样,爱因斯坦在 1912 年至 1913 年的那个冬季,已经构成了正确的引力场方程的最初几步,但随后又把它们放弃了,那不是由于数学上的原因而是由于物理上的原因。因此,总得有个理由使爱因斯坦写那一封上面引述过的信件给同希尔伯特有密切接触的索末菲,在爱因斯坦看来,真正的困难不在于要找到正确

的方程,而在于要证明它与在经典物理学里我们关于牛顿引力场所的知识,以及关于能量和动量守恒的知识是相容的。

对于把广义相对论的理论突破简单说成是数学的胜利的说法的疑问,当在希尔伯特的论文校样曝光之时就真相大白了,那些文件差不多完整地保存下来了。它们揭示了两个令人惊讶之处。一处是信封上邮戳的日期是1915年12月6日,明白地显示了希尔伯特在他的文章发表的版本里要你相信的日期——11月20日,即比爱因斯坦的论文早五天的日子,还没有投送出他文章的最后版本;另一处是在某些重要的方面,在校样里展开的理论是与发表版本显然不同的。即使校样当中有一页的一部分显然在后来被撕掉了,也可以看得够清楚了:在发表之前,希尔伯特必定觉得要对在校样上记录在案的版本加以修改。现在已经显现出,在校样上的希尔伯特理论的版本在物理观念上,有几个方面更类似于爱因斯坦的框架理论而不是广义相对论。特别是,在他的理论中的公理之一里,希尔伯特引进了能量条件来对可容许的坐标系加以限制,很像爱因斯坦在他的初步理论里做的那样。因而这两种理论都没有完全实现广义相对论的理想,并且两者都依然要通过满足额外的附加物理条件而选出某些时空坐标。在此背景下,看样子希尔伯特不像手里已经掌握了解决爱因斯坦的问题的钥匙。毋宁说,看来更像是1915年年底的突破不能够在没有对框架理论及其对于广义相对论起源的贡献做出更加详细的考察的情况下得到理解。

关于平台阶段的努力

在1913年春天至1915年秋天,爱因斯坦正处于抓住他的框架理论不放这段时间里,通常被当做也许是他对广义相对论的探索中最沉闷的阶段。当以一种激动人心的热情来重构这一理论的起源时,这一时期被当做是在平台阶段苦苦奋斗的时期,或许甚至是停滞不前的时期,而它的确是在两次大风暴之间的平静时期。这里指的就是爱因斯坦在1912年至1913年那个冬天里对场方程的在原则上正确的悲剧性努力,以及发现了框架理论中不可饶恕

的错误,这一发现直接导致了这一理论的退出,然后在 1915 年秋天逐步地回到了有价值的场方程而取得胜利。

然而,当从一种历史认识论的观点来看待这个中间时期的时候,在 1913 年至 1915 年之间表面上的停滞,可以认为是新的知识仍然植根于经典物理学的概念结构同化的阶段。作为这种知识同化的结果,在两个方面丰富了这套概念结构:一方面是由此使得有可能形成更加广泛的结论网络,另一方面是在这个网络内形成新的解释自由度以及调和其内部冲突的机会。正是在这种逐步丰富的过程中,最终能够创造出对所积累的知识再考虑的先决条件,而这又促使对原来的知识结构进行再组织。通过同化新的知识而丰富了一种给定的知识结构,以及接着对丰富了的结构进行反思式的再组织,这两种基本的认知过程可以用来解释如下明显的悖论:在一个实际上与广义相对论不相容的理论的指引下,使得构建广义相对论的先决条件变得成熟起来。

在“框架理论”的基础上取得的结果,并不是证明了在错误的方向上走了那么多步,其效用明显至多使得离开真理更远;毋宁说这些结果变成一些手段,一来积累了构建最终理论所需要的知识,二来把它按一种新的次序重新整理。要把这两种过程中的一个看做比另一个更加重要是没有什么意义的,因为这两种过程对于科学知识的发展都是很要紧的。

因而,说句反话,只有对框架理论进行详尽的钻研,才能使爱因斯坦创造出回到正确的场方程和建立广义相对论的道路上所必需的条件。由于最终被当成“错误”消除了,那些在对科学进步的一种“理性重构”中看上去似乎是不必要的弯路,从知识的历史理论的观点来看就变得可以理解了。知识的历史理论是概念革命中的一个至关重要的阶段,它涉及诸如空间、时间、力、能量和动量等基本概念整个概念网络。因为仅仅摆出了正确的场方程的数学公式——甚至是没有意义的公式——明显是不足够的。需要的是发展一种新的物理语言,而这种语言赋予了这些基本概念以新的意义,由此使得场方程变成具有第一位的意义。为了创造这种新的语言,需要积聚经典物理学里可以利用的那些知识,并且尽可能把它们表达得条理清楚。这就像爱因斯坦对框架理论所做过的那样,尽管最后发现这一理论是站不住脚的,但当初亦是他锚定于经典物理学概念之上的物理策略的一个结果。

框架理论里场方程的构成并没有遭遇到在综合经典物理学知识的基础上的整个挑战。因此亦需要进一步详细阐述此理论,使得它的范围能够包括经典物理学知识的其他方面,例如关于水星近日点运动的天文学知识。框架理论的扩展形式最终变成构建广义相对论的开始,尽管它有,毋宁说正是由于它有,那么严重的弱点和内部矛盾。因此,框架理论对广义相对论的产生所起的作用,正类似于洛伦兹基于以太的运动物体的电动力学理论对狭义相对论的创造所起的作用。在扩展了的框架理论的基础上,依靠我们指出过的、作为哥白尼过程的深思过程去达到广义相对论,最后并不需要做出多少技术上的改进。

尽管在狭义相对论的情况下,哥白尼过程把以太从电动力学的中心驱逐出去了,并且用空间和时间的新概念来代替它们,就像我们已经在第四章里看到的那样,这一过程现在把锚定于经典物理学的启发式原理的作用,从理论的出发点改成从一种新的概念基础推出的结果了。在这种新的概念基础能够借助诸如黎曼张量和里奇张量等绝对微分的数学手段表达出来的意义上,广义相对论的构建确实可以算做是数学策略的胜利。然而,在最终的分析里可以看到,这一胜利之所以有可能,是因为由物理策略达到的知识综合业已创造了通过哥白尼过程赋予这些数学手段以一种可接受的物理意义的条件。

爱因斯坦所碰到的这些各不相同的成问题的结论,不仅仅是引起了其来自经典物理学和狭义相对论知识的启发式原理的重新考虑,对框架理论进行深思熟虑得到的经验,亦提供了修正他的原理的必要手段。在这一发展的背景下,我们就能够理解为什么爱因斯坦的启发式方法尽管有他的错误和混乱,最终仍然那么成功,以及广义相对论怎么能够作为经典物理学和狭义相对论知识的一种转换的结果而出现。下面对广义相对论如何从“框架理论的精神”中生长出来的重构,将对于那些在通常的科学史中的英雄故事里只是被作为“后母”去对待的人和事,对于“错误”的开端和“错误”的理论,对于这样的理论令人厌烦的苦苦钻研的沉闷阶段,以及对于那些藏在后台不露面的配角做出新的评价。

框架理论的巩固

265

在苦苦钻研框架理论的时候,爱因斯坦仍然基本上运用他在1912年至1913年那个冬天里与格罗斯曼对引力场方程的研究的过程中形成的启发式方法,这些研究资料都记录在苏黎世笔记本里了,虽然现在这种启发式方法用来巩固对框架理论的看法而不是去找出方程正确的解。主要指引着爱因斯坦巩固框架理论的尝试的,乃是在他的不同的启发式原理之间的未解除的张力。这些尝试以两种互相补充的方法为特征。遵循着一种“大胆的方法”,他依然像以前一样寻求相对性原理的推广,即使对框架理论来说,要面对的是在这条道路上显然摆着的许多难以克服的障碍。在一种更注重防御的方法中,他设法去证明框架理论受限制的那些变换性质是正当的。最后爱因斯坦使他自己相信,他终于或多或少地在防御和大胆进攻这两种方法上都取得了成功。可是,框架理论的大厦在爱因斯坦苦苦经营了两年多之后终于倒塌了。怎么会出现这个看来是自相矛盾的结果呢?

框架理论里的运动方程而不是场方程满足广义相对性原理的要求的状况,明显需要一种原理上的解释。爱因斯坦试图通过不同的途径证明优先选择某些坐标系的合理性。1913年夏天,他首次偶然发现这种理由有利于他自己找到能量和动量平衡方程,因为从狭义相对论里知道,这一方程熟悉的形式只在某些坐标系里得以保持。但他很快认识到这一论据是站不住脚的,因为这道方程包括了引力场的能量和动量的表达式,它在坐标变换下的行为与物质的能量的动量的相应表达式有很大的不同。这一差异表示引力场的能量原则上不能够由一个局域的量代表的事实,引力毕竟是与整个空间和时间的几何学联系的一种性质。由于按照等效原理,引力场可以在局域处消失,那也可以没有局域定义的引力场能量。那么,这种关于引力场的能量和动量的特征,也已经在框架理论时期里出现了。

266

在这一论证失败之后,爱因斯坦找到了两种进一步的论证,以证明框架理论的场方程只在某些坐标系里保持其形式不变的事实。其中的论证之一

是以能量和动量平衡方程为基础的,并且是直接来自爱因斯坦的苏黎世笔记本所记录的有关经验得到提示的。正如我们已经看到的那样,那时候他持有这样的观念,他视为根基的两条启发式原理——对应原理和守恒原理,是与对可容许的坐标系限制的要求密切相关的,因为它们似乎代表着对场方程的约束条件。迟至1913年,他还与格罗斯曼一道设法证明,与守恒原理相容的坐标变换恰好就是框架理论里的场方程保持其形式不变的变换。这一论证引人注目地领先于关于守恒定律和变换性质之间的联系的一条普遍的定理,即后来被数学家埃米·诺特(Emmy Noether)建立且以她的名字命名的“诺特定理”。

此外,爱因斯坦还发现了为什么^X不对场方程加上坐标限制,它就不能够满足广义相对性原理的另一条吸引人的理由。这似乎证明了“大胆方法”是正当的,因为除了框架理论所取得的成就外,进一步实现相对性原理似乎是不可能的。这里涉及爱因斯坦的“声名狼藉”的“空洞论证”(Lochbetrachtung),今天看来这一论证是说不通的,我们将在本章末尾回到这个问题上来。我们仍然要在这里强调,爱因斯坦支持他的最终站不住脚的框架理论的那些或多或少是可信的论证,尽管它们确有有疑问的特征,却对概念上的澄清做出了重要的贡献。我们已经在谈到引力场能量的非局域性,以及在谈到诺特定理的基本观念时提到这种看法;空洞论证亦对澄清广义相对论里坐标系的意义有贡献,我们将在下面详细谈到这一点。

267 框架理论的巩固工作中,有一部分是尽可能地尝试把这一理论导入一种与经典的麦克斯韦-洛伦兹电磁场理论相仿的形式里。爱因斯坦设法写出这样的场方程,其结构形式在很大程度上类似于电磁学理论里的相应方程,使用我们的象征性公式,可以把它写成这个样子:

$$\text{散度(场)} = \text{物质} + \text{引力场} \quad (1' \text{式})$$

因而这一方程的左边不再含有势了,但引力场是从它推出来的,并且作用在场上的微分算符可以被看做在经典物理学里熟悉的所谓“散度算符”的一种直接推广。右边现在包含了作为引力场的源的两项:物质的能量和动量以及引力场的能量和动量。在引力场的理论里出现这样奇怪的状况,即引力场可以作为它自己的源,这是由于任何种类的能量,包括引力场自身的能量

都能够产生引力的缘故。从根本上讲,这是由狭义相对论得出的对能量和质量等当这一结果的推论。场作为它自己的源起作用,这一机制使得引力场方程采取了复杂的非线性形式,从而使框架理论以及最后的理论里,找出场方程的解都很困难。度规亦潜藏在方程右边的物质项里,因为需要用它来描述物质在空间和时间中的分布。这种依赖性带来了处理上的困难,不能简单地设想为只由给定的物质独立地决定时空,就像爱因斯坦对新理论的马赫式期待一样;因为在新理论的假设里,排除了不是由物质产生的空间的存在。我们将在本章末尾处讨论这一处理上的困难。

另一点值得注意的是在引力场和引力势之间的联系:因为在1912年年中的突破里建立了用时空的曲率描写引力的理论,在爱因斯坦心目中引力势无疑是由四维时空度规表示的;但关于引力场怎么表示的问题却复杂得多。在经典场论里,场是势的一种空间变化率;在势变动得猛烈之处场就强。因此,在微分学的数学意义上,场是势的一种导数。在经典场论里,这一导数是由势的所谓“梯度”给出的;可以把这一微分算符形象地看做是一座山峰的陡峭程度,而山峰本身就代表势的起伏。但在一种依靠四维度规构成的场论里,这一微分算符代表着什么呢?这个问题似乎有几种不同的答案。现在只知道引力场应当借助于作为度规的一种导数的适当的微分算符而得出来,因为这一度规扮演着引力势的角色。有几种条件确实可以给出一种特定的选择,它看来也是最简单的选择,而且是对经典理论里熟悉的算符——梯度算符的一种颇为直接的推广。

这一选择不仅受到框架理论里场方程的形式的支持,因为这样一种推广的梯度算符允许写出正好与上面引述的(1)式一样的方程,即是说,得出与经典电动力学完全相似的场方程。在引力场中的一个粒子的运动方程看来亦正好有利于这一假设。换句话说,在新的理论里引力场的数学表示不是唯一的,而是由整个一套论证的网络提出来的,并且很自然地依赖于经典场论的经验。因而这一网络支持关于引力场的数学表示的一种默认假定;然而这就表明了,这乃是一种如爱因斯坦在1915年11月表述的那种“致命的偏见”。但怎样解开这个缠得紧紧的死结呢?我们在下面将会讲到,并不是靠那解开

戈尔迪之结(Gordischer Knoten)^①的诀窍,亦不是忽然醒悟过来框架理论之路是一条死胡同,而主要是一直留在这条路径上才做到的。

269 对框架理论的一种数学策略

在1913年春天至1914年年底巩固框架理论的期间,爱因斯坦试图通过作为补充的数学策略,详细阐述原来由物理策略建立起来的这一理论。他由这一启发性的策略,着手于框架理论里场方程的一种新的推导,他在1914年秋天完成了这一工作。框架理论的巩固阶段具有已经指出了的悖论特性。尽管爱因斯坦的结果符合于这一理论,它们也含有这样的手段,使他得以清除早些时妨碍他接受他遵循数学策略而找到的那种类型的引力场方程的绊脚石。即是说,在将框架理论精致化的过程中,爱因斯坦和格罗斯曼一起提出了一种表述,而它又产生了作为一种副产品的这一证明。

这一发展开始于关于框架理论与推广的相对性原理之间的关系这一仍然没有解决的问题。即使在发表了这一理论之后,关于使场方程的形式保持不变的坐标变换的类别的问题,在那时候仍然没有解决。即使在爱因斯坦用来证明在任何情况下对坐标变换必定有一个限制群的事实防御性论证里,起先对于解决这个问题亦没有什么帮助。直到数学家保罗·贝尔奈斯(Paul Bernays)在1913年建议爱因斯坦和格罗斯曼首先通过把场方程约简为一个较简单的数学对象而简化他们的问题,研究这个数学对象的变换性质可比研究场方程本身的变换容易多了。

270 在第五章里已经讨论过的、在运动方程情况下运用的变分法,本身亦提供了从一个数学上比较简单的对象推演出场方程的方法。爱因斯坦和格罗斯曼不仅找到了一种适于用来导出框架理论的场方程的拉格朗日函数的形式,而且找到了这一函数和场方程的变换性质与守恒定律的联系。我们已经

① 戈尔迪(Gordius)是古时小亚细亚的一位国王,他打了一个复杂的死结并传言解开此结的人将成为该地区的统治者。多年之后来自希腊的亚历山大大帝率队至此处,挥剑一举砍断此结。——译者

指出过,从变换性质与守恒定律之间的联系看出的这一具有深远意义的结果,是构成著名的诺特定理的一个要素。从变分原理导出框架理论的场方程这一条新的大道,在很大程度上对应于对数学策略的期待,而爱因斯坦在第二年即 1914 年在这方面继续深入扩展了。爱因斯坦和格罗斯曼没有从由一种已经可以利用的数学理论所得出的一个对象来导出他们的场方程。但他们由此推出场方程的拉格朗日函数,看来是由简单的物理论证,特别是由数学论证唯一确定的。

从物理上讲,拉格朗日量的结构同与经典电磁学里的场方程精确对应的拉格朗日函数有相同的特点,因为它与后者一样由场的二次项组成。引力场自身是由上面已经提到的默认假定给出的,因而他们必定要由度规导出。而且,特别是拉格朗日函数如此清楚和合理地依靠这样构成的场量写出的形式,更加强了这一默认假定。因而框架理论在这一方面上亦精确地对应于植根于经典物理学知识的期待。此外,爱因斯坦 1915 年秋天发现的一种论证,使他相信甚至是框架理论的拉格朗日函数也是唯一确定了,如果它也满足守恒原理的要求的话。他现在总体上能够相信,框架理论是由物理论证以及数学论证组成的一个广泛的网络支持的了。因而似乎他的物理策略和数学策略都会聚在这一理论里了,即使这一理论与标准的数学对象,特别是与黎曼张量和已经提到过的绝对微分方法的其他对象的关系仍然不清楚。

新的数学框架是以变分法为特征的,而框架理论现在也插到这里来了,这种方法有另一个重要的好处。已经指出过,它提供了一个副产品,能够证明它的表达式和方程都满足守恒原理,而且对任意给出的拉格朗日函数亦如此。与此相反,在爱因斯坦记载在苏黎世笔记本的工作里,仅仅能够给出框架理论的场方程的证明——除非是在弱场的情况下,然而那种情况不是一种严格的引力理论的基础。他没有真正注意到这一点,他就解出了与引力场方程的候选项相联系的基本问题之一,这是他于 1912 年至 1913 年那个冬天里中止的工作。

悄悄地搬走障碍物

我们就这样在了解框架理论的演化的悖论特征的秘密方面前进了一大步。关于框架理论里的场方程是怎么从变分原理推导出来的例子,让我们考查一下那些战胜了它的技术工具是怎样在它自己的护持下打造出来的例子。不仅对于核对其他理论里的场方程是否比框架理论里的场方程更容易满足守恒原理是如此,更仔细的视察表明,实际上在追寻苏黎世笔记本里有可能解决的数学策略时看到爱因斯坦遇到的所有技术性问题,都是他对与框架理论有关的论题的研究结果。另一个中心问题是满足对应原理的问题,即是说关于数学上引导出的候选项与牛顿理论的经典极限之间的联系的问题。当爱因斯坦试图估计框架理论在天文学上的结果,以及检查它能否解释水星的近日点运动时,这一问题亦顺便解决了,并且是再一次在没有得到专门注意的情况下解决的。

272 爱因斯坦在1913年同他的朋友贝索试着讨论这个问题。他们发现了一种近似地求解框架理论里的场方程的方法,从而确定了水星轨道的转动。由爱因斯坦和贝索设计的这一方法,在框架理论的情况下产生了一个令人失望的结果,但后来这一方法能够用在与广义相对论的场方程有关的问题上,并且因而提供了框架理论对广义相对论起源的贡献的另一个例子。当爱因斯坦在1915年11月放弃了框架理论并且回到了数学策略的候选项之时,与贝索一起做过的工作使他不费多少力气就得以在这一基础上,检验关于水星轨道近日点移动的理论计算和天文学观察之间是否取得一致。这一确认导致了爱因斯坦的新理论的著名的凯旋式成功,给了他的竞争者希尔伯特以强烈的印象。希尔伯特那时候也试图解决引力问题以及物质结构的问题,他在1915年11月19日写给爱因斯坦的一张明信片上写道:

假若我能够计算得像你那么快,在我的方程里电子就会相应地屈服,并且同时氢原子亦会对它为什么不发出辐射而写出道歉的条子。
(CPAE 8, S. 202)

为了计算水星的轨道转动,需要考虑超出依照牛顿引力理论可以想象的极限的其他效应。因此,不足为奇的是水星问题的处理亦产生了对于这一近似内含在相对论性的引力理论里的新观点。特别是,框架理论已经表明了,为了过渡到牛顿极限情形,实际上并不需要从弱静态场度规的特殊形式出发,这也已经成为爱因斯坦和格罗斯曼使用洛伦兹模型的一个默认假定。就像我们已经看到的那样,这个只有一个有效可变量度的特殊度规,起到了建立了在复杂的度规表述与牛顿引力理论里的单个标量函数之间的桥梁的作用。

在水星近日点运动问题上的深刻思考,现在指向了这一惊人的结果:为了过渡到牛顿极限情形,引力势真的只由一个单个的函数定义还是要写进更多的度规分量,都是不要紧的。这些深思熟虑表明了,额外的那些分量对于这一过渡是无意义的,因为那些分量在这一极限下的一个物体的运动方程里是不起作用的。这一看法对于对应原理的实行,抛出了崭新的见解。在经典物理学的基础上,我们期望洛伦兹模型的两个部分,即场方程和运动方程,在弱静态场和低速运动的情况下,应当各自趋向于相应的牛顿表达式。但现在的结果明白了,对于场方程不是这样的情况,因此并不影响到对应原理的有效性,因为那些在场方程里可能产生的“干扰”分量,并不在运动方程里出现。原则上到1913年年中,即框架理论的鼎盛时期,所有这些都已经弄清楚了。于是,爱因斯坦与贝索的联合工作,搬走了阻止爱因斯坦在1912年到1913年那个冬天接受广义相对论里正确的场方程的障碍。假如表面上看来似乎是停滞的时期里亦有它的英雄,那么他们的名字是格罗斯曼、贝尔奈斯和贝索!

273

回到探险的阶段

已经形成了那么多的新见解,为什么爱因斯坦不在1915年年底之前,早就回到他按照这些见解能够重新捡起来的基于黎曼张量的候选项呢?对这个问题的回答,要联系于爱因斯坦对他自己的研究的看法。在1913年年初发表了框架理论之后,他就结束了探求场方程的阶段而进入一个巩固阶段,在这个新的阶段里,在这样一道场方程里的不同的候选项之间的公开竞争暂

时挂起来了。他认识到新涌现出来的一些可能性预示着会发生一些观点上的改变,那是在框架理论里看来大体上可以接受的范围内不会出现的改变,不会出现认真的替代项的问题。

274 仅当框架理论的问题开始积累到这样的程度,爱因斯坦才会改变他的观点,并且转回到探求正确的场方程的工作。这些问题的效果并不是立刻把框架理论看成是已经被驳倒了,而只是触发了一个反思过程,现在在这过程中可以把新的技术可能性拿来重新评价那些在早些时的争论中排除了的候选项。因此,1915年年底忽然发生的突破,不是由惊人的新的实际观点引起的,而是无声无息地出现的,是由对于在过去两年来积累的结果的反思过程产生出来的。

爱因斯坦在回顾里给出了放弃框架理论的三个理由:它不能够解释水星近日点的转动;它不允许把一个转动参照系处理成等价于一个静止参照系,并且因而不满足他关于一种推广的相对性原理的期待,特别是关于马赫对牛顿水桶实验的解释;以及最后一点,由数学策略推导框架理论里的场方程的过程中,包含了一个可疑的假定。但事实上这一理论开始亦不顾所有这些失误而留存下来了。即使是最后一个问题,发现了在场方程推导中的一处缺陷,爱因斯坦亦并没有放弃框架理论,而只是尝试采取一种物理论证来在技术层面上对这一推导做出成功的修改。

但从数学原理推导框架理论的失败,在爱因斯坦对他已经取得的结果的反思的层次中,仍然具有深远的影响。因为它使得数学策略适合于框架理论就能够证实这一理论的唯一性的希望破灭了。因而爱因斯坦被迫回到唯一可能为框架理论辩护的物理策略。此外,这一推导的失败表明了,肯定不能从数学策略适用于框架理论而得出它是唯一可能的理论的结论。毋宁说,它开辟了审查其他候选的场方程的可能性,并且把它们纳入最早由框架理论得出的那些结论组成的广泛网络里。正是这一新的可能性连同先前发现的框架理论的弱点一起,促使爱因斯坦经过一个沉思阶段之后放弃他改进框架理论的尝试而回到一个探索的阶段。

求解的钥匙

275

这一重新探索的阶段大概延续了一个月,随后爱因斯坦于1915年11月25日向普鲁士科学院提交了最后的广义相对论场方程。这一时期在爱因斯坦发现了框架理论场方程的推导里的错误之后不久开始,那个日期可以确定为11月中旬,然后爱因斯坦回到他在1912年至1913年那个冬天里已经考虑过的那些候选项,首先是“11月张量”,其次是里奇张量,最后回到爱因斯坦张量。因此让我们回到这样的问题,详细讨论向数学策略的那些候选项之间的这一过渡是怎样完成的。框架理论所用的变分法开始有一个拉格朗日函数,我们已经看到,在框架理论的情况下它在结构上对应于能够推出电动力学里的场方程的经典拉格朗日量。即是说,两种情形里都包含场变量的二次式,并且看来保持这一结构作为默认假定是有道理的。现在,从框架理论过渡到以爱因斯坦在1915年11月4日递交的“11月张量”为基础的那一理论,所需要的只是重新解释场变量本身——除了作为这一解释的结果的技术性细节之外。

我们已经看到,在框架理论里的引力场的表达式,是从引力势的度规描写得出来的,其中用到了这样的假设:应当把在经典物理学里建立起场和势之间的联系的微分算符,推广到四维弯曲空间的情况。然而,这一假设的表达并不是没有多种选择的,它只能够由场方程的形式和在框架理论里的运动方程的形式的论证,加上其他论证而提出来。但现在框架理论的场方程已经变得可疑了,并且运动方程的形式也允许有引力场的其他表达式,并且当仔细考虑时,其他表达式也显得十分可能。

这一表达式即所谓克里斯托弗尔符号,它也由度规的导数组成,但其构造比推广的梯度复杂得多,而后者乃是在框架理论的情况里表示引力场的量。在绝对微分法里克里斯托弗尔符号是一个熟悉的量,在讨论这种运算主要针对的对象——黎曼张量和里奇张量时,很自然会出现克里斯托弗尔符号。至此为止,爱因斯坦总是费尽苦心要把克里斯托弗尔符号分解为它的分

276

量,在苏黎世笔记本的记录里可以看到有关的计算。这里的原因简单地可以归纳为克里斯托弗尔符号对爱因斯坦来说没有直接的物理意义,尽管他看到了引力场用度规的导数表示的式子。

但现在如果把克里斯托弗尔符号解释成引力场的数学表达式,那就打开了一种全新的视角。我们已经提到过,运动方程与新的表达式没有什么不协调之处。而且,对于场方程,爱因斯坦只需要在框架理论的熟悉的拉格朗日量里插进引力场的新的表达式,就可以获得一道场方程,其形式与候选方程之一,即他已在苏黎世笔记本上分析过的那个方程——亦即基于“11月张量”的场方程——惊人相似。“11月张量”未能完全实现广义相对论,因为它仍然受到可容许的坐标系的约束。然而,这种约束比起框架理论的情况来是那么轻,使得爱因斯坦能够从框架理论过渡到11月理论,把这一理论当做实现他的相对性原理的一种推广想法的突破口。

当实现了对于可容许坐标系的这种轻微约束之时,对框架理论运用变分法,就得到了爱因斯坦在1915年11月4日洋洋自得地发表的场方程。通过把物理论证配合运用到框架理论的推导里,他成功地得出可以由数学策略,即是说从绝对微分法完全确定的一个对象出发推出来的一道场方程。这样,两种策略就在大多数方面会聚到一起了。这个谜团的一块块碎片以一种令人惊讶的方式重新组装起来了,而在回顾里一切都依赖于对引力场的再解释了。因此,爱因斯坦在他11月4日发表的论文里,把引力场理论的先前版本称为“致命的偏见”,尽管在几个星期之后,他在写给索末菲的一封信里说,认识到用克里斯托弗尔符号表示的引力场是找到正确的解的钥匙。

277

坐标选择的自由

这时候要完善1915年11月4日的解,没有欠缺多少东西。下面各个步骤可以用来追随爱因斯坦的研究的内部动态过程,这些步骤大部分像以前一样决定于启发式原理,以及由框架理论时期形成的新看法。这一新的理论怎么能够被认定为满足守恒原理和对应原理呢?与1912年至1913年那个冬

天相反,爱因斯坦现在能够说明,基于“11月张量”的理论是遵从守恒原理的。这一证明容易由与稍微改变了和重新解释了的框架理论的拉格朗日量对应的场方程的推导得出。像在框架理论里那样,11月理论的守恒原理与以前一样,意味着对可容许的坐标系的一种限制,但现在的限制变得宽松多了。这一观点是与通向最终解答的道路上的其他突破联系在一起的。这一突破触及由爱因斯坦的启发式原理所要求的选择坐标系的约束的意义。

当爱因斯坦认识到,守恒原理对可容许的坐标系的选择的要求是多么宽松的时候,他第一次把守恒原理所要求的坐标约束与对应原理所要求的约束之间的关系解脱开来。在爱因斯坦写在苏黎世笔记本上的工作记录中,这两种坐标约束的结合经常带来困难,并且使得更加广泛地实现推广的相对性原理的希望破灭了。

在11月理论的情况下,由守恒原理容许的坐标系选择变得有相当程度上的自由,这就弄清楚了,由对应原理要求的坐标系选择与出自守恒原理的约束具有完全不同的意义。尽管守恒原理必须无论何时何地都要予以满足,并且因而算做加在理论本身上的一个附加要求,但对应原理的情况却关系到一种非常特殊的情形——牛顿极限情形。对于这种情形,当然有道理从原则上容许的众多坐标系中选择,但为了在相对论性的引力理论里重新得出熟知的牛顿定律,就要满足对应于在通常表示的经典物理学里的要求。一种坐标条件的现代概念的意义,正是为了一个特殊的目的而选择适当坐标的自由,它是由不限制整个理论的特定坐标系的一种条件规定的。爱因斯坦在1915年11月4日发表的论文,第一次利用固定坐标理论的自由,表达了对坐标条件的这种现代理解。

278

一个大胆的假设

在这篇论文之后,仍然有尚未解决的问题,特别是从守恒原理得出的坐标限制条件的物理意义的问题。因为,它是那么轻微,不能承受一种明显的物理意义。因而在数学表述和新理论的物理意义之间的张力并没有完全解

除,而且期望着进一步的发展。在11月4日发表的短文的附录里,爱因斯坦在解除这些张力方面走出了重要的一步。他找到了11月理论表述的一种新的解释,这种解释使他重新启用苏黎世笔记本时期的另一个候选项——里奇张量。爱因斯坦通过把11月理论里的坐标限制条件,重新解释为可以作为引力场源出现的物质类型的一种条件,来处理这个问题。

279 即是说,如果假设作为引力场源出现的场仅仅是电磁场,那么所有物质都终将归结为后者,于是在从里奇张量的基础上构建场方程时,就不需要加上任何更多的坐标限制。因而守恒原理不再意味着对可容许的坐标系要加上任何约束,而毋宁说它成了对于引力场的可容许的源的一种约束。爱因斯坦这种思维方式起到了一石二鸟的效果,对以里奇张量为基础的场方程来说,完全实行了推广的相对性原理的眼光。而且加在引力场源上的约束可以理解为物质起源于电磁场的一种启示。在1912年至1913年那个冬天里,对于引力场源的默认假定做出这样一种修改似乎还不可能。但现在它与希尔伯特同一时期依据米的建议把爱因斯坦的引力理论与物质的电磁理论联系起来的努力符合得很好。爱因斯坦在与希尔伯特的通信里知道了后者的这些努力。除了受到亲睹他关于推广了的相对性原理得以实现这一诱惑外,有可能这种语境促使——或诱使——他提出关于引力场源的一个大胆的假设,即使这一假设不能够在他自己的基本研究方法之内得到证明。

最后一步

无论如何,实现了一种真正的广义相对性原理的突破这一事实,已经有足够的理由使爱因斯坦认真对待他的理论的新版本,并且去寻求会支持关于物质的电磁起源这一大胆假设的进一步论据。新的理论会预言水星的近日点运动以符合天文学的结果吗?爱因斯坦立刻开始在他与贝索曾经开发用来计算水星近日点运动的方法的基础上工作并获得了惊人的成功。11月18日爱因斯坦递交了一篇论文给普鲁士科学院,他在文中从他基于里奇张量的理论计算出了在误差限度内的正确结果。这是他在11月里递交的几篇论文

里,唯一的一篇在科学院做了口头陈述的,这明显是希望谋求天文学家对他的理论的知识的进一步支持。这篇论文特别宣告了物质的一种新概念,那是他的理论的先决条件之一。而这篇论文正式发表的版本里加了一处脚注,指出水星近日点的运动也可以从一种不需要这一先决条件的相对论性引力理论推导出来。发生什么事了?

关于水星近日点转动的工作需要重新评价对应原理,这一点我们已经讨论过了。我们也已经看到了,这样一种评价所需要的手段亦准备好有一段日子了,即是自从爱因斯坦和贝索把他们在框架理论里计算近日点转动的方法改进完善的时候已经准备好了。根据原先的观念,对应原理要求引力势能够约简为一个单个的函数。但对于引力势进入到运动方程里的方式的仔细审查表明,那样一种约简不是必需的要点。然而,像我们已经讨论过的那样,在巩固阶段里这种见解仍然没有产生出什么结果。 280

在重新进行探索的阶段的语境中,这种见解激励着爱因斯坦去克服在数学表述和物理解释之间仍然处于中心地位的张力。这一张力或者表现为一种物理上无意义的坐标限制条件(在“11月张量”的情况),或者表现为关于物质结构的一种猜测性假设(在里奇张量的情况)。如果场方程既不是基于“11月张量”,亦不是基于里奇张量,而是基于对里奇张量再引进一个附加项的爱因斯坦张量,那么以上两种假设都被证明为多余的了。这一附加项可以选择移动到场方程的左边或者右边。如果把它放到左边,里奇张量就变成爱因斯坦张量;如果放到右边,它就改变了关于能量和动量作为引力场的源起作用的方式的默认假定。

无论如何,这一附加项显示出与在1912年至1913年那个冬天的对应原理不相协调。正如我们已经看到的那样,在原来的版本里对应原理是紧密地联系于关于弱静态场的一种默认假定的,据此对这样的场来说只有一个有效的函数,并且根据默认假定,场方程左边是由核心算符加上修正项组成的。但对于水星近日点问题的研究已经表明,过渡到牛顿极限情形时,引力势是否约简为一个单个的函数是不要紧的。这一论据就这样消解了反对建立在爱因斯坦张量基础上的场方程的争论,而按今天的观点看,那样的场方程是唯一能够接受的解答。

281 为了跨出从里奇张量到爱因斯坦张量的最后一步,爱因斯坦在他自己的安排里设置几种不同的可能性。使里奇张量和爱因斯坦张量产生差别的附加项,或者可以从守恒原理不应当意味着还有任何坐标限制的要求而推导出来。或者,仅仅考虑到场方程的结构,从引力场的能量和动量应当以与物质的能量和动量同样的方式进入场源的推理也能够做到这一点。引入了这一附加项,事实上易于纠正在基于“11月张量”或者里奇张量导出的场方程中出现的这一方面的不对称性。也可能,爱因斯坦突然想起,他在1912年至1913年那个冬天里已经采取了从里奇张量到爱因斯坦张量这一步了。

对我们的讨论有重要意义的,仅仅是这最后的一步对应于他的探索过程的内部逻辑,即对应于变换性质和守恒定律之间的紧密联系,这是他在框架理论里已经发现了一种联系。根据这一逻辑,完全实现广义相对性原理的一种理论,应当不被出自守恒原理的坐标限制所约束。与此相反,满足守恒原理的要求应当是基于爱因斯坦张量的场方程自动给出的结果。而且,对于对应原理的新的理解亦在允许场方程里有变动的框架理论里出现了,即改变了能量和动量出现在引力场源里的方式的默认假定,而不必理会如何实行牛顿极限情形。

解开死结

282 让我们总结一下,广义相对论以及它里面基于爱因斯坦张量的场方程,是怎样从框架理论发展出来的。虽然今天把框架理论看做是错误的,而广义相对论则仍然是引力问题的真正的解,但这两种理论起初并没有隔开一条鸿沟。更确切地说,这两种理论都是同一个研究过程的结果,即在爱因斯坦为一种新的引力理论奋斗过程中的一段被看做是停滞的时期里,对于框架理论苦心经营的结果。由于在这一时期里获得的技术上的成就,可以在原则上纳入到框架理论里面,吸收了这些成果之后,原本只是沿着一条线性发展的道路,却又产生出一种做出更多改进的和更加复杂的框架理论。

然而,至关重要的突破乃是一种深思熟虑的过程的结果,在这过程中对

在框架理论里积累和综合起来的知识给出了一种新的解释。这一反思过程实质上是一种哥白尼过程,就像我们到如今已经多次遇到了的那样。它给予原来的理论表述里起初仅仅是偶然的、或者像克里斯托弗尔符号那样没有物理意义的对象以对引力问题的物理解释的中心功用,在这一情况下就是作为引力场的数学表示。由于这一认证对框架理论表述的再解释,至少导致了对爱因斯坦的那些启发式原理的理解,这里面特别指的是对应原理和守恒原理。这一过程最后清理了与这些原理相联系的对坐标系选择的不同条件,它们曾经使得在框架理论的框架内实现相对性原理的推广那么困难,于是这一紧缠着的死结就这样解开了。

爱因斯坦在他后来的著作里常常强调,引力问题的新的解答是以黎曼张量为中心的数学理论的自然结果,由此就能够得到数学策略的候选项。因而他自己对1915年年底的突破的描述,不是看做物理策略和数学策略会聚的结果,而是后者独享的一种成功,我们在上一章的末尾处亦讨论过了这一点。爱因斯坦的这种描述有几个似乎有道理的动机。从广义相对论的胜利这一视角看来,框架理论确实是一种失败,而且从框架理论通向正确的场方程的是一条迂回曲折的道路,假如一直严格地沿着数学策略走,这种迂回曲折本来是可以避免的。而且,在框架理论失败之后,很难为它所得到的结果做出合适的似乎有道理的辩护。相反的是,每一件事都有利于只从正确的解的观点来评价这一理论,并且罔顾它的历史起源。这种压制的过程亦是科学发现的特征。爱因斯坦的情况,正如科学史家杰罗恩·范·东恩(Jeroen van Dongen)指出的那样,他的研究计划具有意义深远的结果。因为在他后来尝

283

终究是数学的胜利?

在这一讨论的背景下,最后再看看希尔伯特同一时期在这样一种统一场

论上的努力,那也常常被看做是数学方法在引力问题上的一次胜利,我们已经在本章一开始讨论过了。记录在希尔伯特著名的论文的校样里的,是他这方面的理论的初步版本,这一版本在许多方面与其说是接近广义相对论,不如说是更加接近于框架理论,这一点我们已在本章开始处指出过了。即使与框架理论相反,希尔伯特的理论已经开始使用绝对微分法这一正确的数学对象,也不会影响这一结论。但当希尔伯特的“框架理论”在数学上更加精巧的同时,爱因斯坦的框架理论却显得是更加现实的一种引力理论,正因为它锚定于与经典物理学和狭义相对论的知识相联系的启发式原理上。

于是,在希尔伯特的能量概念主要用来建立与米关于物质的猜测性理论的联系的同时,爱因斯坦的守恒原理是靠包含于相对论连续介质动力学中有关能量和动量的广泛范围内的知识来具体表达的。与此类似,爱因斯坦的对应原理亦是靠关于引力的经典物理学知识来具体表达的,并且保证了新的理论里存在着牛顿极限情形,尽管这一问题甚至还没有引起希尔伯特的注意。简而言之,就由得到可利用的物理知识支持这一点来说,希尔伯特的理论至多可以同爱因斯坦在苏黎世笔记本里写下来而后来决定不予发表的一些早期候选项相比较。

284 另一方面,爱因斯坦对他的“框架”理论的苦心经营,不仅扩展了它的数学表述,从而亦扩展了它可能得到的结论的范围,并且也增加了这些结论与物理知识碰面的机会。这样创造的张力,给爱因斯坦以反思如何重新组织它的理论的时机,这一点我们已经详细讨论过了。而希尔伯特亦受到的堪可相比的张力,开始时没有在他的理论里造成那么多的内部冲突,但主要是面对着爱因斯坦的结果而形成的。尽管如此,希尔伯特随后发表的论文的修改版,可被理解为释放在数学表述和物理意义之间的张力的过程,就像我们在爱因斯坦的研究过程中所看到的那样。这一明显对理论进展是至关重要的过程,因此决不可以单独归于一个天才的科学家,而也是一种对话的一部分。因此,下面我们将会选用两个例子来说明,这些对话如何影响了爱因斯坦通向广义相对论的道路及它的进一步详尽的研究,在结束之前我们再回到在随后的研究进程中的对爱因斯坦的启发式原理的重新解释这一话题。

恒星食

第一个例子涉及引力透镜的可能性的见解,第二个例子涉及在框架理论的巩固阶段已提到过的空洞论证的表述。这些例子也向我们再一次表明了,我们可以运用类似于思维模型的观念,把相对论革命设想为关于知识的历史的一部分,在那里不仅有那些著名的“巨人”,而且有一些不知名的科学“矮子”亦起到了一部分决定性的作用。

像在上一章里简单提到过的那样,引力透镜现象是以引力场中光的偏折为基础的。一个大质量的天体可以起到一个引力透镜的作用,如果它运动到地面观察者与一个遥远的天文对象的中间位置上的话。引力透镜所导致的光的偏折,产生了遥远天文对象的一个畸变了的像,它有一些十分确定的、表现出鲜明特征的性质,具体取决于有关天文对象的几何布置。引力透镜的典型效应之一是对遥远天文对象发出的光的放大作用,以及形成一种双重的、十字状的、或者圆形的像。可以依靠一种在几何光学里熟悉的简单的思维模型来理解引力透镜的原理。因此,并不奇怪的是,爱因斯坦在 1912 年,即在 285 建立广义相对论之前,已经能够运用这种推理得出引力透镜的现象结果。然而,爱因斯坦的这一推理既没有公开发表,也没有引致对合适的天文对象的探求。只是在过了 24 年之后,当一位捷克业余科学家独立地阐明这一观念之时,才揭开了引力透镜研究的正式历史,并且这些现象在今天的观察天文学里起到了重要的作用。这一独立的“发现”明显是有可能的,因为关于引力透镜的简单的思维模型是公共知识库的一部分,这个知识库是为像爱因斯坦那一类天才科学家以及不知名的业余科学家鲁迪·W. 曼德尔(Rudi W. Mandl)开放的。

1936 年春季的一天里,曼德尔大步走进设在华盛顿的美国国家科学院的大楼,他要找的是科学服务办公室,那是负责科学普及的一个机构。他带来了一个关于通过观察“恒星食”来检验相对论的新的想法,这里的“恒星食”(Sternenfinsternissen)是他自造的名词,而实际上在这一过程中一颗恒星会

变得更明亮。他正在找什么人来帮助他发表他的想法,并且去说服专业的天文学家开展对他的建议的研究。他要干什么呢?他的意图看来是认真的,他的想法不容易被驳倒,并且他这个人不是那么容易摆脱掉的。科学服务办公室的一位官员终于建议曼德尔找一位无可争议的相对论专家来讨论他的想法。普林斯顿又不太远,他可以到那里去一天,自己向爱因斯坦教授说明他的想法。他们可以资助火车票,并且如果爱因斯坦发现他的想法是有价值的話,他可以再回来,他们会看看能够为他做些什么。

286 曼德尔要对爱因斯坦陈述的,是一个从广义相对论、光学、天文学直到进化生物学的各种想法混在一起的狂热计划。他先前已经试图使其他一些科学家信服他的想法,但一直没有成功。当曼德尔于1936年4月17日到普林斯顿访问爱因斯坦时,他发现对方乐于听取他的想法,并且对这些想法感到新奇。曼德尔实质上建议的是一个简单的模型,一颗恒星把另一颗恒星发出的光聚焦起来,如果这两颗恒星一近一远地与地球对准成一直线,那么它们就分别成为一块引力透镜和它要放大的物。他猜测这种聚焦的效应可能已经被观察到了,但这种效应的起源仍然未曾知晓。

在曼德尔设想的那些可能效应中,有新近发现的环状星云,他把它解释做遥远恒星透过引力透镜而生成的像;他还设想宇宙辐射是来自更远星系的辐射受到引力透镜放大的效应;他甚至试图把像恐龙之类的生物物种的突然灭绝,与由于“恒星食”而使得这种辐射在短期内异常增强的效应联系起来。尽管在曼德尔头脑里驰骋的各种大胆想法的跨度那么宽阔,它们却具有一个真确的内核,事实上后来——在几十年后导致对广义相对论的一项天文学的证实。

但起初爱因斯坦抱着怀疑的态度。1936年的时候,他依然像在1912年那样把这种效应看做是观察不到的。此外他还必定由于与曼德尔那些想法联系在一起的狂热猜想而觉得不舒服。不过最终爱因斯坦仍然在曼德尔的坚持下让步,审阅了他的想法,甚至通融地答应满足他发表这些想法的期望。在一个只有依靠强有力的学术地位才能够进入出版渠道的环境中,像曼德尔那样的一名门外汉,如果没有那样的支持的话,是几乎没有机会把他的想法向科学公众表达的。无论如何爱因斯坦顺应了曼德尔的意愿,而且亲自写了

一篇短文投送给《科学》(*Science*)杂志。这篇报告的标题是“由于引力场中光的偏折而使一颗恒星起到类似于透镜的作用”，它发表在1936年12月4日的那一期刊物上。爱因斯坦的这篇论文标志着引力透镜的研究的正式历史的开始。

爱因斯坦做了多大的努力去克制自己不情愿的心理以及他发表这篇短文的心情，明显地表示在他写给《科学》的编辑的一封信里，信中他强调了，他这样做只是为了安抚曼德尔：

让我亦为你在发表那篇短文上的合作表示感谢，那是曼德尔先生硬塞给我的。它没有多少价值，但可以令那个可怜的家伙高兴。（爱因斯坦1936年12月18日写给麦基恩·卡特尔[J. McKeen Cattell]的信。藏于希伯莱大学内犹太人和大学图书馆中的爱因斯坦档案馆，档案号65603）

爱因斯坦显然认识到，这种在他看来必定像是一种“科学幻想效应”的现象是没有什么理论分析的价值的，因为引力透镜似乎一直都在任何观察证实所能达到的范围之外。顺便说说，即使到了今天，那时候讨论的恒星透镜的典型情况依然如此。但为什么爱因斯坦不像其他科学家已经做过的那样简单地把曼德尔打发走呢？是什么使得爱因斯坦终于转向赞成发表的态度呢？虽然爱因斯坦有点居高临下地说到那个“可怜的家伙”，他并没有只把曼德尔看做是一名处在科学圈边缘的胡思乱想的怪人。事实上，爱因斯坦深知这一位捷克移民是需要帮助的许多个受到纳粹帝国主义迫害的人之一，他愿意把他的支持延伸到那些不像杰出科学家那么引人注目的其他人身上，如果不会引起过多麻烦的话。但爱因斯坦在曼德尔坚持之下做出的犹豫决定，以及他的支持的这种既同情又厌烦的特征，并不仅仅出自他政治上的觉悟。

对爱因斯坦在布拉格担任教授的年月里使用的一本笔记本上的记录的分析，表明了他在1912年不仅考虑了相同的想法，而且也完成了他在1936年应曼德尔的要求而做的完全相同的计算。当爱因斯坦第一次有了引力透镜效应的想法时，他还处在学术机构的外围，并且徒劳地寻求对被他的许多同事看来是古怪的想法的支持，这指的是引力场会影响光线的路径的想法。

正像曼德尔在1936年试图去做的那样,爱因斯坦也曾试图使得天文学家按照他的想法去进行研究:

期望天文学家们注意到在这里首次提出的问题,即使这里陈述的考虑也许显得不够成熟甚至是冒险的。(Einstein 1911, S. 908)

但像我们在第二章里看到的那样,爱因斯坦想要使得有地位的天文学家注意到他的想法的企图失败了,而在多年之后曼德尔亦遭到同样的对待。但由于他在布拉格的一名学生莱奥·波拉克(Leo Pollak)的调停之下,爱因斯坦才有机会获得在第二章里提到过的一位年轻的天文学家埃尔文·芬利·弗罗因德利希(Erwin Finlay Freundlich)的帮助,他正想开展对于爱因斯坦的理论的观察结果的探索。多年之后,弗罗因德利希遇到了与曼德尔类似的问题。他只有在克服了他的上级、对此持怀疑态度的著名天文学家赫尔曼·施特鲁韦(Hermann Struve)的阻力之后,才能够从事这一项支持爱因斯坦的计划。这也许是爱因斯坦在1912年4月访问柏林之时会见弗罗因德利希的理由,他们两人的会面是在私下活动的气氛中进行的,爱因斯坦显然同他讨论了自己的大胆想法,包括一种引力透镜的可能性。

那个时候爱因斯坦和他的同时代人以为,宇宙的大小大体上就是我们的银河系,在这种知识的基础上,在他看来,可以检测到引力透镜效应的条件必定是达不到的。我们确实在他于1915年10月15日写给他的朋友海因利希·赞格尔(Heinrich Zangger)的一封信里看到,爱因斯坦已经放弃了把引力透镜效应同天文学观察联系起来的任何希望,即使这是在他完成广义相对论之前一个月多一点的日子里。当1919年的日全食终于证实了光线在太阳引力场中的偏折时,人们看到那真是太走运了,因为这一效应刚刚在可以观察到的边缘之内。后来爱因斯坦依然会回想起,广义相对论是从一度被他的同事们视为一个想入非非的想法衍生出来的。在这一次经验的背景下,就肯定不难理解他对诸如弗罗因德利希和曼德尔等外行人的支持了。

象牙塔里的孔洞

由门外汉做出贡献的第二个例子,指引我们回到框架理论的时代。像爱因斯坦早在1912年就专心考虑引力透镜想法的事实一样,这一例子亦是由一些手稿资料支持的,这些资料使我们对广义相对论的起源和演化得出一些新的见解。它再一次表明并且引人瞩目地表明了,爱因斯坦在他的理论发展的几个关键点上,都得到了非专家们的实质性帮助。这关系到在广义相对论里坐标系和时空点的意义,并且有贝索的手稿为证,上面明白地记录了他自己的思想以及同爱因斯坦的交流。这些思想的交换在其他内容之外,还包括广义相对论里坐标系的意义。在贝索和爱因斯坦之间的讨论的结果,就是上面提到了的“空洞论证”,直至今今天它仍然是物理学家和哲学家热衷于讨论的话题。这一论证起源于与一位外行人的一次交流这一点,更加明白地显示出,即使是最困难的概念问题,也能够后退到非专家们亦可以谈论的知识之上。 289

当爱因斯坦在1913年年中寻找他为何未能实现广义相对性原理的深层原因时,“空洞论证”似乎对此提供了一个确定的回答。这种论证声称一般的相对论性的引力理论会破坏物理上的因果性。假如空洞论证是正确的话,一种给定分布的产生引力的物质不会唯一地决定引力场所满足的广义协变的场方程的一个解。这里说的一个解的意思是决定一种时空的几何的、作为时空坐标的函数的度规。根据空洞论证,在时空中的一个空洞,即在没有引力源的一个区域里,我们可以把这样一种引力理论的一个给定的解变换成另一个不同的解。为此目的,我们首先取场方程的一个解,并且在两个仅仅在空洞内部有差别的不同坐标系中表示出来。我们分别称这个解的两种表示为 $g(x)$ 和 $g'(x')$,其中的 g 和 g' 代表由相应度规表示的引力势,它们分别是时空坐标 x 和 x' 的函数。这里的 x 和 x' 标记着以不同的坐标值表示的同一时空点。在两个坐标系里源的表示依然是一样的,因为我们设想我们是在一个“空洞”,即在一个无源的区域里,因而在空洞之外任何一处,两个坐标系的表

示总是相同的。

如果现在按照规矩把这两种坐标系解释为两个不同的物理参照系,比方说是两个实验室,在每一个实验室里都有可能辨别单个的时空点,那么以下的推理手续就会产生在同一时空点的两种明显不同引力场,它们都是同一理论的解:只拿掉在空洞里的一个时空点上的引力场的值 $g'(x')$ ——这是由它在第二个参照系里的坐标识别的——然后把这一个值移动到在由第一个参照系里具有同样坐标标记决定的一个不同的时空点,于是就得到了 $g'(x)$ 。

290 那么 $g'(x)$ 也是场方程的一个解,但它是与原来的给定的解 $g(x)$ 不同的一个解。假若真的可以对引力势施行这样一种从一个时空点拿掉再移动到另一个时空点的操作的话,场方程就不再保持解的唯一性。那么,广义相对论就不会产生引力势的唯一解。

只是在广义相对论的最后理论于 1915 年建立之后一段时间,才明确地驳倒了空洞论证。终于弄清楚了,在广义相对论里,在空洞论证里使用的单个时空点的势是没有物理意义的。这一理论处理的却毋宁说是多个时空事件的符合,例如两条光线的交会这种符合的发生,是与任何坐标系完全无关的。因此,作为空洞论证基础的拿掉再移动引力势的操作,在广义相对论里也是没有意义的。它对应于把一种真实的物理意义不正确地归结为分隔开的不同坐标系以及由它们确定的时空点的思维模型。然而,只是在关于参照系的物理实在的天真观点的一种相对论性的引力理论的推论,由空洞论证而得以恰当地探究之后,广义相对论特征的这一深刻见解才能获得。

科学史家们长期以来笃信空洞论证深深地植根于一种爱因斯坦被假定持有的形而上学的偏见,那是关于坐标系的物理意义的一种阻碍着构建广义相对论的直接道路的偏见。现在贝索的手稿提出了关于这种论证的兴起和衰落的一个不同的而且平凡得多的版本。这份手稿表明,实际上是贝索首先有了这一想法,要表述一种论证,以证明在框架理论中广义相对性原理失败了。

贝索谦让的性格使他仅仅把自己当做是一名“倾听者”(orrechiante,即是一位伟大主人的听众),他是从空洞论证的一个朴素的版本开始的。他把在一个没有物质的区域内坐标系可以自由选择而不改变任何别的东西这一事

实,解释成它意味着一般而言满足广义相对性原理的场方程不能够有一个唯一的解。因为,在每一个这些可能的不同坐标系中,引力场都采取一种不同的形式。从今天的观点看,贝索只是没有注意到这只是解的非唯一性,而不是它在不同坐标系中的表示的非唯一性。这样的一种非唯一性当然并没有对理论的实质性内容的唯一性提出挑战。 291

贝索显然立刻就开始怀疑他自己的论证,然而那是由一种有点不同的观点来阐明的。因为他写下了关于对空洞论证的异议的一处注释,说在引力理论里必须唯一存在的不是引力势,而只可以对像一个物体的运动那样的实际物理现象要求有这样的唯一性。因而,这一异议早已占先于后来对空洞论证的解决,因为它问的是理论里的对象的物理意义。但爱因斯坦不顾贝索对他自己的论证的怀疑态度,觉得它明显是如此有趣,使得他对它重新进行解释,正如在贝索的手稿里暗示的那样。在爱因斯坦的解释里,贝索关于坐标系选择的自由的天真论证——它意味着在一个给定的解的表示中的一种无害的非唯一性——变成使用这一自由去构建新的解的可能性的一种论证,这即是空洞论证。只是在1917年,在他终于做出了广义相对论的确定的、广义协变的场方程两年后,爱因斯坦才最后承认,贝索原先的怀疑实际上是正确的。 292

未完成的革命

在本章里,我们重构了爱因斯坦用他的启发式方法,怎样导致在1915年里建立了广义相对论的那个复杂的过程。这一重构特别表明了,在启发式方法与对数学表述的物理解释的形式中出现的中间结果的具体表示之间的相互作用起到的关键效用。但是,在1915年11月关于建立场方程的总结性论文发表之后,这种相互作用并没有停止。在爱因斯坦的启发式方法和新理论的含意之间的张力,标记着至少到1930年的进一步演化,并且在某些方面一直延续到今天。以下将会依靠马赫的论证的启发式意义,对广义相对论的起源和进一步演化做出说明。在第五章里我们已经详细论述了这些考虑及其产生的影响。那么在下面的研究中,我们将对1915年后这一理论按最初启

发法所进行的持续精致化所产生的反响。这些反响再一次表明了与相对论革命相关的知识革命的长期性特征。像建立场方程那样的突破不一定能够提供一种“标准科学”的坚实基础,从而使得剩下的主要任务就是解决技术问题了。这样的突破只能够是在稳定的平衡态上暂时得出来,并且不会一劳永逸地免除承受着新的张力的知识继续综合与分离的过程。

在建立广义相对论之后,爱因斯坦执著地试图在马赫对经典力学批评的意义上解释新的理论。他运用这一批评去强调把经典的相对性原理推广到加速运动的道理。实际上,在1919年光在引力场中的偏折获得令人瞩目的证实之前,这些论证确实已经用来指出,这一理论优于停留在狭义相对论框架内的其他不同的理论方案。因而,当爱因斯坦声称,新的理论是符合于马赫的哲学思考时,他在某种程度上用这一论证代替了最初所缺失的实验证据。

但爱因斯坦亦用这些论证来允许根据他原来的启发法,给出对于新的理论的一些未研究过的技术方面的物理解释。例如,他认识到通常只在决定了场源的物质分布之外,还要规定解的边界条件后,场方程才可以决定引力场。怎么能够在物理上解释这一要求呢?它能够联系于根据马赫的观念提出的,关于物体的惯性完全取决于空间中的物质分布的观点吗?

293 宇宙学的思考

在爱因斯坦要按照马赫式的启发法得出边界条件问题的一个满意解答的尝试失败之后,他在1917年又提出了一种全新的方法来解决这个问题。在他著名的论文《关于广义相对论的宇宙学思考》里,他引进了一种满足他对宇宙构成的一切期望的时空,包括作为引力场源的质量分布的惯性特征的说明。这一时空描写的是一个空间上封闭的静态宇宙,在这个空间中的质量是均匀分布的。在这个解里爱因斯坦完全避免了规定适当的边界条件的问题,与此同时,他还相信它对应着那个时候所知道的宇宙的一个或多或少是现实的图像。

然而,他所做的这些,只有在付出一个代价,即必须修改导出这一时空解的场方程时才有效。这一修改要在 1915 年的场方程里引进额外的一项(即下文提到的“ λ 项”),它含有一个称为“宇宙常数”的普适常数。对爱因斯坦来说,宇宙常数是关于一个静态宇宙的马赫式哲学概念的救生圈。当他最后认识到它不会达到这一目的时,他又放弃了它,虽然它真的是一项合理的附加项;这就表明了,与他在 1915 年写下的文字相反,爱因斯坦并没有找到符合他的要求的最普遍的场方程。今天,宇宙常数在广义相对论的基础上对宇宙的加速膨胀的说明中起到了关键的作用。下面我们来看看得出这一见解的途径如何紧密地联系于马赫式的启发式方法,更确切地说,联系于这种方法的逐步消退。

爱因斯坦起先忽略了新的理论与天文学之间的关系,也没有探究场方程的各种解的性质。在对于广义相对论里被说成是马赫式特性的讨论中,爱因斯坦的主要对手是荷兰天文学家威廉·德西特(Willem de Sitter)。与爱因斯坦相反,德西特致力于研究场方程的不同解的天文学结果。1917 年,爱因斯坦以一种几乎是道歉的口气写信给德西特说:

294

当然,从天文学的立场看,我建立了的只是一座空中楼阁。可是对我来说,相对论的概念是否能够一直贯彻到底,或者它会导致矛盾冲突,这是一个亟待解决的问题。我现在满足于我能够设想,这个观念能够发展完善而不会遇到矛盾。我现在不再为这个问题烦恼了,而以前它曾经折磨我那么久。(CPAE 8, S. 411)

在爱因斯坦的“宇宙学思考”发表后不久,德西特证明了,即使修改后的场方程允许有一个没有物质起到场源作用的解,但在这样的时空里运动的试验粒子仍然具有惯性的性质。对爱因斯坦来说,这一发现不是引起了一种惊喜而是不愉快的反应,他发现自己对这一发现很难忍受,甚至开始时还试图给予反驳。1918 年,爱因斯坦对德西特的解发表了一篇批评性的短文,其中写道:

如果德西特的解是到处有效的,那就表明“ λ 项”的引入没有实现我预期的目的。因为,按照我的意见,广义相对论仅当它表明了空间的各

种物理量都仅仅由物质完全决定时,它才是一个令人满意的理论体系。因此,没有 $g_{\mu\nu}$ 场能够在不存在产生它的物质的情况下存在(即是说,没有可能存在那样的时空连续性)。(Einstein 1918, S. 271)

从马赫原理到马赫的以太

逐渐地,爱因斯坦对给广义相对论提供一个马赫关于惯性解释的期望发生了变化,从作为理论本性的要求,退到这一理论可以运用的一个特解的标准。他不久就认识到,把惯性效应只归于在这一理论里物质的存在,是不可能普遍正确的。为了精确表示他的启发式期待,爱因斯坦在 1918 年明白地引进了他自己版本的“马赫原理”。这一原理要求引力场完全由出现在场方程右边的物体的质量决定,这些物体的质量在方程里表示成作为场源的能量-动量张量的形式。爱因斯坦以这种方式把马赫原来的观念从力学语言转译为场论的语言,因为在这一语境中,能量和动量被考虑成起源于连续介质的相对论理论里的场论概念。

然后,爱因斯坦开始详细阐述广义相对论的场论解释,其代价则是越来越强调他最初的启发式方法的力学根基。这亦改变了他对马赫的观念的态度。1920 年 10 月 20 日,他在莱顿的一次讲演里使用了以太这个历史悠久的概念去说明在广义相对论里发展起来的对于空间的新的理解。他这一次反对马赫关于惯性效应是由宇宙间的所有质量引起的解释,因为这种惯性效应设想有一种超距作用,而这种假设既与场论亦与相对论不相容。

与他原来的启发式方法相反,爱因斯坦将惯性效应改为直接归于空间的本性,现在他把惯性理解为是由物理量赋予的,并且因而又称为以太。然而,与洛伦兹的以太相反,爱因斯坦设想的“马赫的以太”是由度规张量表示的,并且假设它不仅制约着物质而且至少部分地被物质制约着。这种由物质的存在发生影响的能力,在爱因斯坦的概念框架里,显然是马赫关于由物体之间的相互作用产生惯性效应的观念的最后的庇护所。

沿着马赫在哲学上对经典力学的批评的路线,对广义相对论进行再解释

的计划,在1920年之后在爱因斯坦的研究里不再起到重要的作用。这种兴趣的转移,特别由于他的研究计划从1919年开始,已经重新定位于把引力和电磁力统一起来的统一场论的方向上。爱因斯坦在他的莱顿演讲里指出,可以想象一个没有电磁场的空间,但不可以想象一个没有引力的空间,因为引力场是用来构成空间的;他在报告结束时说,物质(对他来说,物质是由电磁场表示的)可能只是空间的次级现象。

从马赫原理到膨胀宇宙

296

为什么爱因斯坦这一时期的著作里没有突出地讲到马赫原理,虽然亦肯定没有完全放弃它,这是另有原因的。对马赫原理详尽阐述的结束,是与1917年的宇宙学模型相关的,而在1918年的定义就更是达到了这样一点,即马赫原理是否能够在广义相对论里实现这个问题变成它能否被天文学数据证实或者驳回的问题了。1921年1月27日,爱因斯坦谈到了关于在他的宇宙模型的语境中说明惯性的可能性

仅靠经验能够最后决定这两种可能性里哪一种在自然界中是现实的。经验如何能提供一个答案呢? (Einstein 1921, S. 129)

无论如何,那时候他仍然相信对由固定恒星组成的大的天文系统的研究,会证实与他的马赫式期望相容的一个宇宙模型。换句话说,虽然在1920年至1930年期间,爱因斯坦把他的主要希望和研究努力都投入到统一场论的创建中去,但只要马赫原理与天文学数据不矛盾,他仍然把这一原理保留在一种备用的位置上。

爱因斯坦对马赫原理的信念使他怀疑其他各种宇宙模型的可能性。1922年他著文批评俄国数学家亚历山大·弗里德曼(Alexander Friedmann)给出原先的场方程的一些对应于动态宇宙的解的论文。他误以为他在弗里德曼的解里发现了一处计算错误,那是他一开始就以怀疑的态度去察看的。可是,一年之后他又承认他在否定弗里德曼的动态解时犯了一个错误,并且发表了撤回他先前的批评的声明。从这时候起,爱因斯坦不再像以前那样怀

着充分的自信期望着对他的马赫式信念的天文学验证了。

然而,1930年前后,形势肯定开始发生改变了。爱因斯坦比以前更加肯定地表示,他自己是赞同空间与物质的联系居于首位的——这与他原来的马赫的启发式方法形成了鲜明的对比。这时候他明显主要受到他在思想上深深陷入了的统一场论观念的驱动。在1930年的一篇论文里他总结了他的立场。像以前一样,他承认认识论的考虑优先于物理概念,他写道:

但空间概念是怎么构成的呢?如果我想象一切物体都拿走了,空虚的空间还在那里吗?或者甚至空间的概念要依赖于物体的概念吗?我回答道,是的,的确如此。(Einstein 1930b, S. 173)

但他经过了对关于物理学基础的研究的状况的考虑之后,写下了一段评论,事实上恰好颠倒了这种优先的关系:

曾经被牛顿当做是物理实在的、看做一种物质对象的空间,它在近几十年来吞没了以太和时间,并且似乎亦吞没了场和粒子,使得它成为实在的唯一媒介了。(Einstein 1930b, S. 180)

在同一年里,爱因斯坦在一次讲演中更加激烈地阐述他的观点:

我们已经达到的奇怪结论是这样的——现在看来,空间要看成是原初的东西,而物质是从它导出来的,亦即是说,是一种次生的东西。现在空间无处不在,而且正在把物质吃掉(eating up)。我们以前总是把物质看做原初的东西而空间则是次生的结果。现在空间要报仇了,即是说,它正在吃掉物质。(Einstein 1930a, S. 610)

在他对统一场论的研究工作中,爱因斯坦从他起初对马赫以为物质应当起原初作用而空间只是起次生作用的信念出发,走过了一条漫长的道路。然而,马赫原理这个问题仍然没有解决,因为它现在密切地联系于爱因斯坦的宇宙学观念,而那主要是符合于它的同时代人的思维方式的。事实上,在1917年至1930年期间,争论的主要问题是,哪一种静态宇宙代表着实在的一个比较好的模型,而1922年由弗里德曼提出的以及1927年由乔治·昂利·勒迈特(Georges Henri Lemaître)提出的膨胀宇宙的问题,那时候大体上都远在观察宇宙学的视界之外。然而,在天文观察的基础上对马赫原理做出

决定的基础已经准备好了。

这一决定是与有利于一种膨胀宇宙的天文学证据的积累一同到来的,这一决定性的贡献是1929年发表的、当时在威尔孙天文台工作的天文学家埃德温·哈勃(Edwin Hubble)的研究成果。爱因斯坦1931年在加州理工学院讲学的时候听到了这个消息。当他回到了柏林,几乎立刻就发表了一篇关于宇宙学问题的文章,他在文中陈述了,哈勃的结果使他关于静态宇宙的假设站不住脚了。但这些结果容易用原来的场方程的动态解来解释,并且因此它们亦——至少是暂时地——决定了宇宙常数以及马赫原理的命运。

有时候爱因斯坦甚至十分直率地表达他对于他早期的马赫式启发式方法的拒绝。例如,在1954年2月2日写给物理学家费利克斯·皮拉尼(Felix Pirani)的信里,他说他不再认为应当像马赫原理所要求的那样,引力场明显完全由物质的能量-动量张量决定。因为只有在时空中的物质分布一开始就给定了的情况下,才有可能做出这样的决定。但这样就预先假定了关于一个给定时空的知识,由此又要求知道关于度规的知识,而那应该只是后来由场方程决定的。一条蛇咬住它自己的尾巴了;在广义相对论里不应当有这种只由物质决定时空的单方向的因果链条。在同一封信里,爱因斯坦表示拒绝马赫原理,并且写下自己的意见说,人们应当完全不再谈论马赫原理,它相当于回到了只把“有质的”物体看做是实在的成分以及设想理论里所有不能由它们决定的要素都要避免的年代。他还补充说,他自己长期以来处在这一“固定”的观念影响之下。在他的自述里也有一段表达了相似意向的话:

马赫猜测,在一种真正合理的理论里,惯性应当取决于各个质量之间的相互作用,正好与牛顿的其他各种力一样,这是一个我长期以来以为在原则上是正确的观念。然而,它暗中预先假定了,基本的理论一般应当采取牛顿力学的类型;在其中质量以及它们之间的相互作用是原初的概念。马上就要认识到,在这种决心上的尝试不适合于一种一致性的场论。(Einstein 1992, S. 26^①)

① 中译文参照:《爱因斯坦文集·第1卷》,许良英、范岱年编译,北京:商务印书馆1976年版,第13页。

自从爱因斯坦在马赫对经典力学的批评的影响下,迈出朝向广义相对论的最初几步之后,他在几十年的进程里形成的见解,最终不可能使他原来的启发式方法与这种知识进步取得一致——虽然马赫原理在解释广义相对论中起到的作用,一直是一个引起活跃争论的话题。

我们在这里对马赫式的启发式方法详细说明了道理,对于在研究广义相对论的道路上伴随着爱因斯坦的其他启发式的要素亦是有效的。即使是洛伦兹模型,一种场论的思维模型,也会由于理论的完成和进一步演化而引出问题。毕竟,我们刚刚看到了不再可能简单地指定引力场的源以及由它们确定引力势。在一种比经典场物理学更充分发展的理论里,场方程和运动方程之间的关系也显得不同了,因为在广义相对论里运动方程不是独立于场方程的,而毋宁说它是场方程的结果。与此相似,支配着过渡到牛顿极限情形的对应原理,以及守恒原理(都在完整的理论里获得了一种新的意义)。爱因斯坦的启发式方法与著名的维特根斯坦的梯子具有许多共同之处,后者的意思是,一个人在达到了目的之后应当丢掉自己使用过的手段;只是,按照这里表达的意思,在这样的启发式方法的目的与它们有助于构建在达到目标之后就抽掉自己的梯子的理论之间没有实质性的差别;按照在这里陈述的看法,在这样的启发式方法的帮助和它们有助于构建的理论之间,亦没有实质上的差别。

本章亦是对根据大量资料撰写的《广义相对论的起源》的研究成果的一种概要。与迈克尔·扬森、蒂尔曼·绍尔和约翰·斯塔彻尔的联合工作被直接引进了正文的内容。关于希尔伯特的叙述是以同利奥·科里(Leo Corry)和约翰·斯塔彻尔的联合工作为基础的。

推荐读物

有关广义相对论的文献资料,请看第五章末尾。

本章特别根据:

Castagnetti, Giuseppe et al. 1994. *Wissenschaft zwischen Grundlagenkrise und*

Politik. Einstein in Berlin. Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Forschungsbereich Entwicklung und Sozialisation, Arbeitsstelle Albert Einstein.

Corry, Leo, Jürgen Renn and John Stachel. 1997. "Belated Decision in the Hilbert-Einstein Priority Dispute." *Science* 278: 1270—1273.

Janssen, Michel. 2007. "What Did Einstein Know and When Did He Know It? A Besso Memo Dated August 1913." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Commentary and Essays.* (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 2., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Janssen, Michel and Jürgen Renn. 2007. "Untying the Knot: How Einstein Found His Way Back to Field Equations Discarded in the Zurich Notebook." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Commentary and Essays.* (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 2., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Renn, Jürgen. 2005. "Standing on the Shoulders of a Dwarf: General Relativity a Triumph of Einstein and Grossmann's Erroneous Entwurf Theory." In J. Eisenstaedt and A. J. Kox (eds.) *The Universe of General Relativity.* (*Einstein Studies*, Vol. 11.) Boston: Birkhäuser.

———. 2007. "Classical Physics in Disarray: The Emergence of the Riddle of Gravitation." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Introduction and Source.* (*Genesis of General Relativity*, Vol. 1., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

———. 2007. "The Third Way to General Relativity: Einstein and Mach in Context." In J. Renn and M. Schemmel (eds.) *Gravitation in the Twilight of Classical Physics, Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy.* (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 3., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht, Springer.

Renn, Jürgen and Tilman Sauer. 2003. "Eclipses of the Stars Mandl, Einstein, and the Early History of Gravitational Lensing." In A. Ashtekar et al. (eds.), *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics Festschrift in Honour of John Stachel.* Dordrecht: Kluwer.

Renn, Jürgen, Tilman Sauer and John Stachel. 1997. "The Origin of Gravitational Lensing. A Postscript to Einstein's 1936 Science Paper." *Science* (275) 5297: 184—186.

Renn, Jürgen and John Stachel. 2007. "Hilbert's Foundation of Physics: From a Theory of Everything to a Constituent of General Relativity." In J. Renn and M.

Schemmel (eds.) *Gravitation in the Twilight of Classical Physics, The Promise of Mathematics*. (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 4., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

在这一章里用到的进一步的文献:

CPAE 3. 1993. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 3. *The Swiss Years: Writings, 1909—1911*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 4. 1995. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 4. *The Swiss Years: Writings, 1912—1914*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 6. 1996. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 6. *The Berlin Years: Writings, 1914—1917*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 7. 2002. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 7. *The Berlin Years: Writings, 1918—1921*. Princeton: Princeton University Press.

CPAE 8. 1998. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 8. *The Berlin Years: Correspondence, 1914—1918*. Princeton: Princeton University Press. (Part A: 1914—1917, pp. 1—590. Part B: 1918, pp. 591—1118.)

Dongen van, Jeroen. 2002. *Einstein's Unification: General Relativity and the Quest for Mathematical Naturalness*. Ph. D. Thesis. University of Amsterdam.

Einstein, Albert. 1911. "Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes." *Annalen der Physik* 35: 898—908.

———. 1914. "Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie." *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 1030—1085.

———. 1915. "Zur allgemeinen Relativitätstheorie." *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLV: 778—786.

———. 1915. "Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag)." *Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* XLVI: 799—801.

———. 1915. "Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie." *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 831—839.

———. 1915. "Die Feldgleichungen der Gravitation." *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 844—847.

———. 1916. "Ernst Mach." *Physikalische Zeitschrift* 17: 101—104.

———. 1916. "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie." *Annalen der Physik* 49: 769—822.

——. 1917. “Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.” *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 142—152.

——. 1918. “Kritisches zu einer von Hrn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen.” *Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 270—272.

——. 1918. “Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie.” *Annalen der Physik* (44) 5: 241—244. 302

——. 1919. “Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?.” *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*: 349—356.

——. 1920. *Äther und Relativitätstheorie. Rede. Gehalten am 5. Mai 1920 an der Reichs-Universität zu Leiden*. Berlin: Julius Springer.

——. 1921. “Geometrie und Erfahrung.” *Preußische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte* 1: 123—130.

——. 1922. *The Meaning of Relativity: Four Lectures Delivered at Princeton University, May 1921*. London: Methuen.

——. 1930a. “Professor Einstein’s Address at the University of Nottingham.” In *Science* 71: 1850, pp. 608—610.

1930b. “Space, Ether, and the Field in Physics.” *Forum Philosophicum*, I, 180—184

——. 1931. “Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie.” *Preußische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*: 235—237.

——. 1936. “Lenslike Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field.” *Science* [N. S. WB], 84, 2188: 506—507.

——. 1954. “The Problem of Space, Ether, and the Field in Physics.” In C. Seelig (ed.) *Ideas and Opinions*. New York: Crown Publishers, 276—285.

——. 1992. *Autobiographical Notes. A Centennial Edition*. Edited by Paul A. Schilpp. La Salle, Ill.: Open Court.

Einstein, Albert and Marcel Grossmann. 1913. *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig: B. G. Teubner.

——. 1914. “Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie.” *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 63: 215—225.

Ellis, George F. R. 1989. “The Expanding Universe: A History of Cosmology

from 1917 to 1960." In D. Howard and J. Stachel (eds.) *Einstein and the History of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 1.) Boston: Birkhäuser, pp. 367—431.

Fölsing, Albrecht. 1993. *Albert Einstein: Eine Biographie*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Goenner, Hubert. 1970. "Mach's Principle and Einstein's Theory of Gravitation." In R. S. Cohen and R. J. Seeger (eds.) *Ernst Mach. Physicist and Philosopher*. (*Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 6.) Dordrecht: Reidel, pp. 200—215.

———. 1981. "Machsches Prinzip und Theorien der Gravitation." In N. Jürgen et al. (eds.) *Grundlagenprobleme der modernen Physik*. Mannheim: Bibliographisches Institut, pp. 83—101.

Hilbert, David. 1916. "Die Grundlagen der Physik. (Erste Mitteilung)." *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematischphysikalische Klasse. Nachrichten*; 395—407.

———. 1917. "Die Grundlagen der Physik (Zweite Mitteilung)." *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematischphysikalische Klasse. Nachrichten*; 53—76.

Janssen, Michel. 2005. "Of Pots and Holes: Einstein's Bumpy Road to General Relativity." In J. Renn (ed.) *Einstein's Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 58—85.

303 Renn, Jürgen (ed.). 2005. *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe. One Hundred Authors for Einstein*. Berlin: Wiley-VCH.

———. 2005. *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe. Documents of a Life's Pathway*. Berlin: Wiley-VCH.

Thorne, Kip S. 1994. *Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis*. Aus dem Amerikanischen von Doris Gerstner and Shaikat Khan. Munich: Droemer Knauer.

Thorne, Kip S. 1994. *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. The Commonwealth Fund Book Program. London: Picador.

Torretti, Roberto. 1983. *Relativity and Geometry*. Oxford: Pergamon Press.

Vizgin, Vladimir P. 1994. *Unified Field Theories in the First Third of the 20th Century*. (*Science Networks, Historical Studies*, Vol. 13. Edited by E. Hiebert and H. Wussing.) Basel: Birkhäuser.

关于构建场方程的努力:

Janssen, Michel. 1999. "Rotation as the Nemesis of Einstein's Entwurf Theory."

In H. Goenner et al. (eds.) *The Expanding Worlds of General Relativity* (*Einstein Studies*, Vol. 7). Boston: Birkhäuser, 127—157.

Janssen, Michel and Jürgen Renn. 2007. "Untying the Knot: How Einstein Found His Way Back to Field Equations Discarded in the Zurich Notebook." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Commentary and Essays*. (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 2., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Norton, John D. 1984. "How Einstein found his Field Equations. 1912—1915." *Historical Studies in the Physical Sciences* 14: 253—316.

Renn, Jürgen and Tilman Sauer. 1999. "Heuristics and Mathematical Representation in Einstein's Search for a Gravitational Field Equation." In H. Goenner et al. *The Expanding Worlds of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 7.) Boston: Birkhäuser, pp. 87—125.

Stachel, John. 1989. "Einstein's Search for General Covariance, 1912—1915." In D. Howard and J. Stachel (eds.) *Einstein and the History of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 1.) Boston: Birkhäuser, pp. 62—100.

关于广义相对论的天文学结论:

Duerbeck, Hilmar W. and W. R. Dick (eds.). 2005. *Einsteins Kosmos: Untersuchungen zur Geschichte der Kosmologie, Relativitätstheorie und zu Einsteins Wirken und Nachwirken*. Frankfurt am Main: H. Deutsch.

Goenner, Hubert. 1994. *Einführung in die Kosmologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Kennefick, Daniel. 2005. "Astronomers Test General Relativity: Lightbending and Solar Redshift." In J. Renn (ed.) *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe. One Hundred Authors for Einstein*. Berlin: Wiley-VCH, pp. 178—181.

Kerszberg, Pierre. 1989. *The Invented Universe: The Einstein De Sitter Controversy (1916—1917) and the Rise of Relativistic Cosmology*. Oxford: Clarendon Press. 304

Kragh, Helge. 1996. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press.

North, John David. 1990. *The Measure of the Universe: A History of Modern Cosmology*. New York: Dover.

Smolin, Lee. 1997. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press.

Weinberg, Steven. 1992. *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for*

the Ultimate Laws of Nature. New York: Pantheon Books.

关于空洞论证:

Howard, Don and John D. Norton. 1993. "Out of the Labyrinth? Einstein, Hertz, and the Göttingen Answer to the Hole Argument." In J. Earman et al. (eds.) *The Attraction of Gravitation. New Studies in the History of General Relativity*. (Einstein Studies, Vol. 5), pp. 30—62.

Janssen, Michel. 2005. "Of Pots and Holes: Einstein's Bumpy Road to General Relativity." In J. Renn (ed.) *Einstein's Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 58—85.

Stachel, John. 1993. "The Meaning of General Covariance: The Hole Story." In John Earman et al. (eds.) *Philosophical Problems of the Internal and External World: Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*. Konstanz: Universitätsverlag/Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 129—160.

关于爱因斯坦对统一场论的尝试:

Goldstein, Catherine and Jim Ritter. 2003. *The Varieties of Unity: Sounding Unified Theories 1920—1930*. In A. Ashtekar et al. (eds.) *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics Festschrift in Honour of John Stachel*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, S. 93—173.

关于希尔伯特的贡献:

Corry, Leo. 2004. *David Hilbert and the Axiomatization of Physics, 1898—1918: From "Grundlagen der Geometrie" to "Grundlagen der Physik"*. Dordrecht: Kluwer.

Corry, Leo, Jürgen Renn and John Stachel. 1997. "Belated Decision in the Hilbert-Einstein Priority Dispute." *Science* 278: 1270—1273.

Renn, Jürgen. 2005. "Einstein, Hilbert und der geheimnisvolle Schnipsel." *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung*, 14 November 2005, pp. 76—77.

305 Rowe, David. 1999. "The Göttingen Response to General Relativity and Emmy Noether's Theorems." In J. Gray (ed.) *The Symbolic Universe: Geometry and Physics, 1890—1930*. Oxford: Oxford University Press, pp. 189—234.

———. 2001. "Einstein Meets Hilbert: At the Crossroads of Physics and Mathematics." *Physics in Perspective* 3: 379—424.

Sauer, Tilman. 1999. "The Relativity of Discovery: Hilbert's First Note on the Foundations of Physics." *Archive for History of Exact Sciences* 53: 529—575.

———. 2002. "Hopes and Disappointments in Hilbert's Axiomatic Foundations of Physics." In M. Heidelberger and F. Stadler (eds.) *History of Philosophy and Sci-*

ence. *New Trends and Perspectives*. Dordrecht: Kluwer, pp. 225—237.

2004. "Einstein Equations and Hilbert Action: What is missing on page 8 of the proofs for Hilbert's First Communication on the Foundations of Physics?." *Archive for History of Exact Sciences* 59: 577—590. Vizgin, Vladimir P. 1989. "Einstein, Hilbert, and Weyl: The Genesis of the Geometrical Unified Field Theory Program." In D. Howard and J. Stachel (eds.) *Einstein and the History of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 1.) Boston: Birkhäuser, pp. 300—314.

关于贝索的作用:

Earman, John and Michel Janssen. 1993. "Einstein's Explanation of the Motion of Mercury's Perihelion." In J. Earman et al. (eds.) *The Attraction of Gravitation. New Studies in the History of General Relativity*. (*Einstein Studies*, Vol. 5.) Boston: Birkhäuser, pp. 129—172.

Einstein, Albert and Michele Besso. 1972. *Correspondance 1903—1955*. Edited by Pierre Speziali. Paris: Hermann.

———. 2003. *Le manuscrit EinsteinBesso. De la relativité restreinte à la relativité générale*. Paris: Scriptura.

Janssen, Michel. 2003. "A Glimpse Behind the Curtain of the Wizard/Un coup d'œil derrière le rideau du magicien." In *The EinsteinBesso Manuscript: From Special Relativity to General Relativity/ Le manuscrit EinsteinBesso: De la Relativité Restreinte à la Relativité Générale*. Paris: Scriptura und Aristophile.

———. 2007. "What Did Einstein Know and When Did He Know It? A Besso Memo Dated August 1913." In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Commentary and Essays*. (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 2., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

关于曼德尔的作用:

Renn, Jürgen and Tilmann Sauer. 2003. "Eclipses of the Stars Mandl, Einstein, and the Early History of Gravitational Lensing." In A. Ashtekar et al. (eds.) *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics Festschrift in Honour of John Stachel*. Dordrecht: Kluwer. 306

关于弗罗因德利希的作用:

Hentschel, Klaus. 1997. *The Einstein Tower: An Intertexture of Dynamic Construction, Relativity Theory, and Astronomy*. (Translated by A. M. Hentschel.). Stanford, CA: Stanford University Press.

关于马赫对力学的批评对于提出广义相对论的作用:

Barbour, Julian B. and Herbert Pfister (eds.) 1995. *Mach's Principle: From*

Newton's Bucket to Quantum Gravity. (*Einstein Studies*, Vol. 6.)
Boston: Birkhäuser.

Janssen, Michel. 2005. "Of Pots and Holes: Einstein's Bumpy Road to General Relativity." In J. Renn (ed.) *Einstein's Annalen Papers: The Complete Collection 1901—1922*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 58—85.

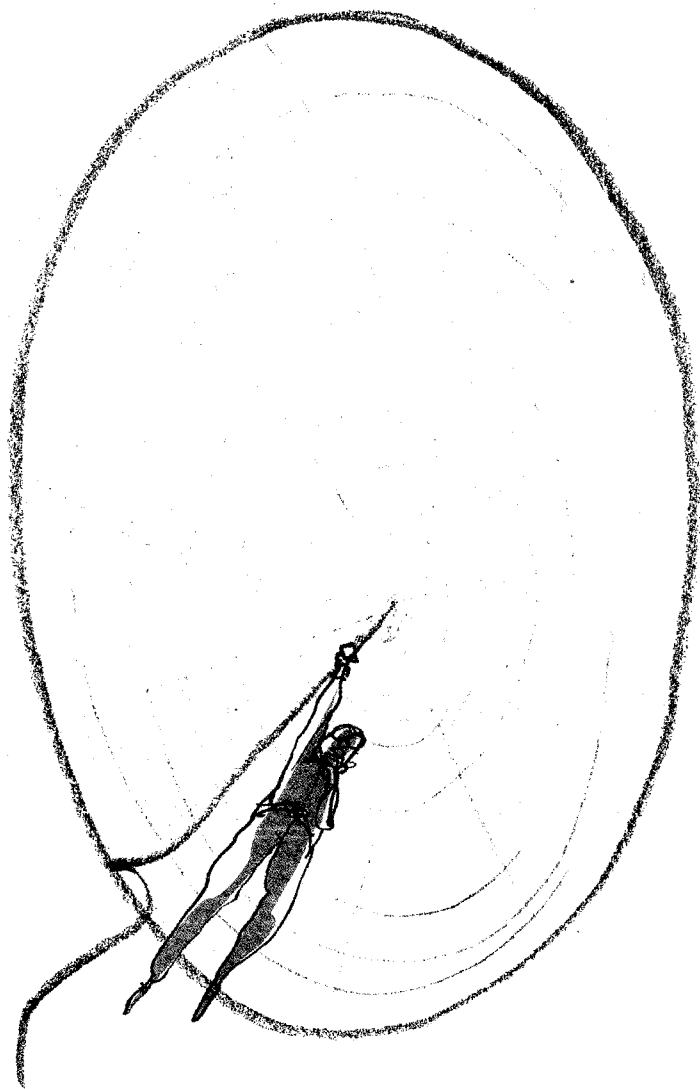
Renn, Jürgen. 1997. "Von der klassischen Trägheit zur dynamischen Raumzeit: Albert Einstein und Ernst Mach." In W. Kroker (ed.) *Naturwissenschaften und Industrie um 1900. (Die Technikgeschichte als Vorbild moderner Technik, Vol. 21.)* Bochum: GeorgAgricolaGesellschaft, Bochum, pp. 25—38.

Renn, Jürgen. 2007. "The Third Way to General Relativity: Einstein and Mach in Context." In J. Renn and M. Schemmel (eds.) *Gravitation in the Twilight of Classical Physics, Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy.* (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 3., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Wolters, Gereon. 1987. *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen.* Berlin/New York: de Gruyter.

第七章

作为知识体系转换的 爱因斯坦革命



预览:爱因斯坦的革命在知识的长期历史中占有何种地位?

试图理解作为爱因斯坦科学革命标志的创新的起源时,我们常常受到首先探求与他的人格和个人命运相联系的特征的吸引。然而,把这场革命当做一个个人一连串发现的结果所做的分析,必定会面对一些悖论,它们只能在知识长期演化的角度上看才能够解决。

从这一观点看来,爱因斯坦的革命显现为一个知识体系的转换,其要素可以追溯到古时科学形成的时代。特别是,决定对空间、时间、物质、引力和辐射的理解的那种思维模型,打上了长期传统的印记,在这一漫长的进程里,它们经历了各种变化,但依然没有失去它们在力学里的直觉的、实际的和理论的知识上的立足点。

只有在19世纪里各门经典自然科学中的知识爆炸,提供了这些模型与机械论世界观脱钩的先决条件。因而,爱因斯坦的革命代表了机械论世界观的终结,同时亦提出了关于经典自然科学的终点的问题。将来会不会长此以往都是科学划分为各个学科再细分为各个分支学科的时期呢?或者,与此相反,爱因斯坦的革命是否表明了,将来的科学必定演化出更加灵活可变的结构呢?

完全不同的科学资源的综合以及知识的描述和解释之间的相互作用,在科学突破中起到了至关重要的作用,它指向了创新的一个重要的必备条件:对于科学知识内容的深思熟虑能够回过头来对它的结构起到作用,这是问题的本质。最新的电子信息技术能够以一种重要的方式改进这样一种反作用的条件。加强由反思形成的一种科学的文化能够将科学从不断增长的专业化和产业化的潜在威胁中解放出来,给人类以一种自我觉醒,将科学看做为理解自我和理解世界之人类事业的中心。

309 创新的禁区

爱因斯坦对于我们关于空间、时间、物质、引力和辐射等概念的革命,到今天仍然没有结束。我们已经看到了,这场革命最早回溯到他 1905 年的几篇关键性的论文,他在其中对这些概念的经典理解提出了疑问,而且由它掀起的余波,包含了对宇宙的理解的一种未完成探求,我们依然期望由此得到不仅对我们周围的微观世界和宏观世界,并且对我们变化着的人类世界(Menschenwelt)的一种统一的理解。没有这种期待的话,联系于这种探求而获得有用见解的希望,亦会预示着可能会产生一种毫无结果的终极理论,从而消解为一种白日梦,或者落入因这种终极理论不可能达到而产生的失望和怨怼里去。

当谈到爱因斯坦在物理科学的革新时,听起来总觉得说的是一道标识,一眼能令当今科学技术获得清晰活力的泉水的符咒。因此,对于这一改革得以成功的各种条件的理解就变得极为重要了。毫不奇怪的是,各种奇迹疗法和江湖庸医所许诺的,正是这样一种不老泉。大多数这样的尝试对于使得这场革命有可能发生的条件做出相当肤浅的假说,要把爱因斯坦的革命与现在相联系。他们一味寻找那些在他个人创造力方面的条件——在他的头脑里,在他假设为孩童般的性情里,在他与女子们的关系里,或者在他确认想象胜于知识的信念里。

从在第一章里概述过的知识的历史理论的观点看,那样的一些秘方灵药是没有什么价值的。我们要说的是,只有察看产生与这一革命相关的新概念的整个思想实验室(das gesamte intellektuelle Laboratium)的运转,才能够揭示导致爱因斯坦的革命的那些条件。只有以这种方式才能够弄清楚,爱因斯坦在科学上的革新不是造假和行骗,而是一种知识体系转换的结果,在这种结果中保持从文化的开端沿袭下来的传统,与通过科学革命的变动去更新它是同样重要的。因此,我们下面将会对这一转换过程进行特写式的回顾,然后确定它在自从科学发轫之时起的知识发展历史的全景中的位置。在做出这一定位之后,接着对由于今天发生在科学中的转换过程而提出的挑战作一

个简短的展望。

科学史的新近研究——我们的叙述就是以此为基础的——不仅从根本上改变了爱因斯坦在我们心目中的形象,而且改变了我们对科学革命结构的理解。爱因斯坦不再显得是 20 世纪里的一名孤独的先驱,而毋宁说是有助于完善经典物理学,并且在事实上对它的基础的革命做出了贡献的一位科学家。此外,按照在这里陈述的观点,一场科学革命与其说像某种全新的东西横空出世,不如说更像一种地质学的过程,因为在一种肤浅的观点看来是突然的爆发,实际上都经过了一个漫长的酝酿过程。可以毫不夸张地说,爱因斯坦正好是在一座早已隆隆作响的火山终于爆发之时登上去的。

然而,广义相对论的出现,正如我们在前面两章里讲过的那样,并不直接与这幅图画吻合。相对论革命的第一阶段明显不是孤立的事件,相反,它是对积累在 19 世纪高度专门化的科学中的潜力加以开发的结果。正如我们在第四章里看到的那样,相对论革命起始于在一个哥白尼过程的意义上对洛伦兹电磁学理论的再解释,因而本质上延续着经典物理学的传统,即使是在一个改换了的标识之下。狭义相对论的起源无疑是一个更加宏伟的过程的一部分。由庞加莱以与爱因斯坦相似的思想方式对洛伦兹理论进行再解释这一事实就足以说明问题了。相反的是,广义相对论在很大程度上起源于单独一个人的工作,他采取了对当时的物理学反潮流的立场,而支持他的只有几个门外汉。广义相对论的起源点是一个普遍认识到的问题,即牛顿关于引力的经典理论与 1905 年的狭义相对论不相容的问题。但不论是爱因斯坦的研究路线还是他的理论,在 1915 年 11 月暂时解决了这一冲突之时,都出乎同时代人的意料之外。 311

近年来,通过对广义相对论起源的历史的透彻研究,已经把在一种传记式取向的科学史的意义上解释这种独特的和戏剧性的事件的进程的传统尝试驳倒了。在习惯的传说和提出解释的方案里,基本上用“错误的喜剧”的公式去套在所有的工作上,以及几乎不可避免地以为爱因斯坦的胜利是一个孤独的天才的英雄式的突破,只需要否定这些传统的说法,从而将视野放到对关于相对论革命之历史理解的真实挑战上,就像我们在下面再一次对这场革命的第二阶段的特别关注一样。

大可以是其子理论
 提出这个问题是使
 之明。

相对论革命的悖论特征

关于广义相对论起源的历史重构的中心问题,可以用三个悖论来表达:

• **知识缺失的悖论** 怎么可能创造像广义相对论那样的理论,它能够说明在它起步时还不知道的广泛范围内的现象,而这些现象只是在后来观察天文学的几次革命的进程中才得以发现呢?是什么样的知识给予这一理论如此的稳定性,虽然它开始的时候看起来并不比它的竞争对手更强,因为还没有什么现象是不能够被传统物理学说明的。?

• **迂回启发的悖论** 爱因斯坦怎么能够在成功地找到方程的正确解之前几年,就制定出引力场方程应该满足的条件呢?他怎么能够建立一个会很快引导他到一个正确的数学表达式的启发式框架,然后得出它实际上是不可接受的结论,而在三年之后又回到完全一样的表达式呢?

• **断续进展的悖论** 广义相对论连同它的非经典结果,诸如空间和时间对物理相互作用的依赖——虽然这些特性是与它的概念框架不相容的——怎么能够是在经典物理学和狭义相对论物理学内部的研究的结果呢?

312

这些悖论很难在一种传统的观念历史里解决。我们不能忙于对付那些潜在的挑战而不考虑通常忽略了但对于科学知识的历史认识论至关重要的那些维度:知识发展的长期特征、知识的复杂建筑和知识动力学的难解机制。因此,下面我们总结一下这些维度在澄清相对论革命的悖论特征方面所起到的作用。

对于知识缺失的悖论的一个适当的回应,可能是要用科学知识的长期发展的见解去看。没有这样的看法,就仍然理解不了为什么一种对描述引力的现代理论的生长,依靠的竟是接近于亚里士多德的世界观的时空结构连同它的各个天球的机制,而不是依靠牛顿从人类世界的经验得来的力的概念的说明。我们在第五章里已经讲过了,广义相对论的惊人稳定性所赖以建立的知

识,是经过几个世纪的物理学、天文学和数学研究而积累下来的。例如,行星运动的定律,包括水星近日点的古怪移动,都在这一理论建立之前好久就为人所知道了。广义相对论的数学语言,非欧几何和绝对微分法也是这样,都是在19世纪期间就提出来了,并且远在相对论降临之前,就被卡尔·施瓦兹施尔德(Karl Schwarzschild)等富于想象力的天文学家用来与天文学观察相联系了。

这些知识资源都可以被看做是在20世纪早期研究引力问题的科学家可以共享利用的知识的一部分。他们解决这个问题的各种尝试,彼此之间的差别主要在于运用什么和不运用什么知识资源的观点。但即使是个人的观点亦可以理解为经典科学的知识体系的某一方面。当我们认识到流行的观点乃是一位工作在经典科学的某一支领域里的(专家的观点),而非专家的观点) 313 则被归入哲学或者科普,因而被推到了科学事业的边缘之时,这一点就变得特别明白了。

对第二个悖论的回答是,爱因斯坦怎么能够在知道了他的问题的解之前几年,就依靠对他所能利用的共享知识资源的结构的考虑,制定出引力场方程应该满足的条件。我们已经看到,这些资源是知识体系里能够对他的研究提供启发式引导的积极成分中的一部分。事实上,当我们认识到它是由从经典物理学传承下来的一种定性知识表示结构指引的:即具体表达在洛伦兹电子论中的一种可仿效方式的场论的思维模型,爱因斯坦的探求的特征就可以理解了。

爱因斯坦在1907年至1912年间对一种相对论性的引力理论的探求,建立在放进了模型里的两个默认假定之上,即场用势(度规)表示,场源用能量-动量张量来表示。但他没有对描述场怎样产生源的微分算符设法确定一个满意的默认假定。他的困难不在于懂得太少,而是在建立场方程时要考虑太多的知识,来回答引力是力学和场论之间的边界问题的假定。

像我们已经看到的那样,一个对于微分算符物理上似乎有道理的默认假定(核心算符),是在牛顿静态引力场的知识的基础上提出来的,也是在电动力学的场论里静态场和动态场之间的关系的经验基础上提出来的。在这些初始假设上建立的理论是满足对应原理的,它会自动地与牛顿理论相容。同

样,从黎曼张量推导出来的一些数学对象,对于构建一个将爱因斯坦的等效原理合并在一起的场论(微分算符),提供了一种似乎有道理的默认假定。在这些初始假定上建立的理论,会如同爱因斯坦设想的那样自动地满足推广的相对性原理。在经典物理学的知识体系之内,洛伦兹模型亦植入与其他思维模型的关系的一个网络里了,它起到了这种模型的任意可接受的执行方式的一种控制结构的作用。特别是,新的理论要满足一条守恒原理,它是经典物理学和狭义相对论里的类似原理的推广。

简而言之,爱因斯坦的启发法被经典物理学的可利用的知识过度决定了(überdeterminiert)。这也说明了为什么它是那么强有力,同时又是那么容易受到偶然的边界条件的影响。所加上的不同要求的相容性是不容易先验地确立的,而是要通过详细阐述洛伦兹模型在数学上的具体化来核对的,做法是从一个或者另一个默认假定出发,然后一步一步调节到合乎启发法的标准。因此,爱因斯坦在从对应原理出发的物理策略和从推广的相对性原理出发的数学策略之间的摇摆,就可以被解释为一种追求,它是另一种将经典物理学知识最终会聚在一起的路径。

关于第三个悖论,即继续进步的回答,只可能在考虑了知识不仅包括为一座现成的建筑添砖加瓦,而且也包含使这一建筑发生变换的反思过程后做出。在爱因斯坦对引力场方程的探求的情况下,对洛伦兹模型的丰富发展是以由他的启发式原理、对应原理、守恒原理、等效原理,以及推广的相对性原理表达的各种相对稳定的高阶认知结构来指引的。爱因斯坦的学习经验肯定不是仅仅由这些高阶结构的缜密的同化过程所指引的,它亦由与此颠倒的反思过程所指引,根据他对他的启发式原理的实行和具体化的经验所得,修改这些高阶结构。在适应和调节之间的相互影响,到高阶结构的同化和在经验的基础上对其修改——每一步都由写出数学表述来做媒介——是导致作为一种非经典物理理论的广义相对论得以产生的知识动力学中至关重要的过程。

在这一背景下,值得再一次对引力场方程的演化过程的四个实质性的阶段作最后的回顾:

在苏黎世笔记本上做了记录的,1912年秋天的修补阶段,是以几乎完全

没有复杂的数学运算为特征的。不过,通过对他第一次试图沿着他的启发式路线构建一道场方程的做法进行反思,爱因斯坦设法建立那些对他后来系统实行这些原理有战略意义的高阶结构。特别是,他发展了数学策略和物理策略。

接着是从1912年年底到1913年年初的**系统探求阶段**,那也可以依靠苏黎世笔记本上的记载把它重构出来。在这个阶段里,爱因斯坦和格罗斯曼一起系统地审查了根据他的启发式原理提出的几个候选项,那是在物理策略和数学策略之间交错进行的。在这期间,启发式原理的相对比重逐渐减弱了,而守恒原理则显得是主要的挑战。令人费解的是,追随着数学策略所得到的主要结果,却是沿着框架理论的物理策略的路线引导出来的;框架理论是在1913年春天发表的,今天看来那是一种错误的理论。

巩固阶段是由爱因斯坦在1913年至1915年年中这段时间里写的论文和通信作为文字根据的。在这一阶段里,他详细阐述了框架理论,本质上跟着他早些时的启发法,但现在在巩固的意义而不是在探究的意义上来使用。然而,令人费解的是,巩固阶段的主要结果是创造了对场方程候选项重新探索的先决条件。当试图使用数学策略来使框架理论合法化的时候,爱因斯坦发现从所得到的数学表述并不能挑选出仅仅一种理论,而是给出机会来重新审查先前否决了的那些候选项,去除了在过程中实现守恒原理的困难。基于在这期间有关结果的不断扩大的网络联系,这种重新审查现在能够对爱因斯坦早先的认识进行一种反思性的重组。

对解决断续进展这一悖论有决定性意义的**反思阶段**,有爱因斯坦1915年11月的一系列通信为证。在这些通信里的第一封,爱因斯坦回到了以黎曼张量为基础的场方程,其意义在于对迷恋于框架理论时达到的结果的重新解释。作为这一再解释的推论,爱因斯坦原来的启发性原理亦得到了一种新的物理解释。

从仍然植根于经典物理学的框架理论过渡到非经典的广义相对论的关键步骤,是对由爱因斯坦提出的表述中某些要素的物理解释进行了改变。这一改变被证明是堪与从洛伦兹理论到狭义相对论的过渡相比的一种哥白尼过程。然而,在从框架理论到广义相对论的过渡中,爱因斯坦是“他自己的洛

伦兹”，说明了在发生相对论革命的第二阶段之时他更加孤立了。

在希尔伯特同时对引力问题所做的研究里，缺乏对物理解释所做的可相比较的努力。然而，在他的原始论文的随后修正里，终于做出了这样的努力，并且证明了一种调和个人观点和共享知识资源的过程。简而言之，从历史认识论的观点看，即使是相对论革命中最富于创新的阶段——反思阶段，亦不能归于单个杰出个人的专利，而只能看做是体系的转换的一个方面。

科学简史

那么，我们到哪里去寻找爱因斯坦的革命的根源，并且哪里是它在知识的长期演化中的位置呢？在第三章里我们主要处理了经典物理学的知识结构，在其演化中产生了成为爱因斯坦革命的中心问题。但由于这场革命，这些结构里有一些回溯得很远，甚至回溯到科学一开始发生之处。因此，我们

317 断定我们的分析连同对科学的历史的一种全面回顾，总结了前面的几章并且捡起了在第一章里接触过的几个论题。这主要是指出爱因斯坦的革命亦能够从经历了一个世纪那么长的演化过程的机械论世界观的终点这个角度来看，而它又是从古老的自然哲学那里继承得来的。两种知识体系共享了从科学之外，由日常世界或者由技术实践的直觉和实际知识塑造的认知结构的中心任务。这里面包括了对空间、时间、引力和物质以及对科学本身的评价，而在欧洲科学史上，它是作为哲学的继任者，亦起到了宗教的一名竞争者的功用。在把爱因斯坦的概念置于科学的长期演化的语境中来看时，这两方面都是重要的。它对古代的基本概念的激烈修改，指示出在局限于一个较窄的时间语境中的分析所不能揭示的相互联系。并且，它对爱因斯坦对他那个时代的知识的特定视角的依赖，让人们注意到了科学的一种反思维度。这种维度只有在作为启蒙时刻的历史背景下才能被理解。

科学在古代是作为体力和脑力劳动分工的一项副产品而出现的，并且它为知识分子的精英们提供了合法地位和生活取向。科学从我们用来使自己

适应日常生活的直觉和实际知识中提取它的概念,并且在实际应用中解决协调空间和时间,以及对付我们周围环境中的物体那样的问题。只有在对在这些语境中涉及的活动和器具进行系统的研究过程中,才能够产生出超越这些语境的应用范围的科学概念。均匀的和各向同性的空间的概念起源于对于确定方位的罗盘和建筑行业用以画线的直尺等器具的思考,而亚里士多德的自然哲学里的宇宙空间里安排了各种天球,乃是对我们能够在周围观察到或者影响到的不同类型的运动的反映,从抛体的强迫运动到自由下落的自然运动,再到天体的永恒运动都是如此。

我们捕捉各种物体的变化和它们之间的相互作用时所得到的概念,情况也是类似的。这一类概念的最早几个,显现在苏格拉底之前的哲学体系里, 318 但它们亦以相似的方式出现在中国哲学里。这些哲学体系被理解为神秘主义的竞争者。它们的目的是对世界的内在思索,而它们又要回答宗教所要回答的同样问题,那是一些关于自然界的总体理解和人类在自然界中的位置的问题,也是关于生和死的问题。

对自然界的这些早期思索与神话模式的差别的说明,其目的在于断言某些简单的自然过程是普遍的并且把这些过程放到自然界的一种重大的基本过程的位置上,由此可以推出其他一切东西来。例如,泰勒斯(Thales)关于一切都可以还原于水及其变形的学说,或者阿那克西美尼(Anaximenes)教导的那样,基本的过程乃是气的增稠和减薄。这样一类在各种模型的基础上对自然描述的任意性,在古希腊的时候就已经受到了批评。巴门尼德(Parmenides)是通过对我们关于实在的陈述的语言的反思,来代替神秘的解释的。他的做法是把简单的自然过程普遍化。他宣称只有一种存在,它是球形的,不可毁灭的并且具有固定的边界。所有的变化都只是幻想。巴门尼德将他的学说作为一种宗教式的启蒙来陈述,使得哲学取代了宗教的地位,至少起到启蒙的作用。他由此开辟了一种传统,在这种传统里不仅是哲学,而且后来科学也具有某种“专家宗教”(Expertenreligion)的作用,其有关灵魂拯救的承诺只是对少数人而言的。

古代关于自然界的伟大理论,原子论、柏拉图学说和亚里士多德学说提出了前苏格拉底的各种解释方案,并且把它们发展为一些综合的哲学体系;

但与前者相似,他们本质上依赖于对在他们的经验基础上得到的基本直觉和实际知识的反思。因而,原子论就是由从直觉知识到微观世界的转换所引发的。在留基伯(Leukipp)和德谟克里特的想象中,原子是许多微小而绝对不可摧毁的、在绝对空虚的空间中运动的存在单元。对于物质无限可分的反思导致了关于这样一些绝对性质的假定:假如物质不能够无限分割,我们就必定会达到某种不可分割的东西;反过来,能够任意分割的东西就不再是物质,因而必定就是绝对的虚空。

与前苏格拉底的自然哲学里的其他观念不同,原子论看来能够抵挡由巴门尼德的批评提出的挑战。但从巴门尼德及其学派的批评可以导出其他一些结论,特别是关于认识的批评作用。柏拉图从数学里抽象概念的存在,导出了一个观念世界,他宣称那是获得知识的唯一合理的出发点——这同巴门尼德的“存在”并非没有相同之处。

亚里士多德诉诸于隐藏在直觉知识的思维模型里的更丰富的经验储存,并且只取其核心部分,他试图用一个综合的理论体系去保证它所谓的普遍有效性。他的全部实在概念的中心是物质与形式之间的关系,它仿效人类和自然界制造过程的经验,其目的就是使原料形成某种确定的形状。亚里士多德区分作为天上的元素的以太和四种地上的元素,它们共同填充了世界各处而没有留下任何虚空。原子论和亚里士多德学说对虚空能否存在的问题的答案的差别,影响着直到爱因斯坦那时候的科学史。

关于我们对引力的效应有什么看法的理解,也受到几乎两千年前亚里士多德的自然哲学的支配。他把效应分成两类:地上物体的运动和天上物体的运动。地上重物的下落运动被认为是这样的物体朝着自然位置——即地球中心——的自然运动。与地上物体由于受到外力而做的强迫运动相反,这种自然运动是不需要外部原因的,而只是一个重物按其本性的内在倾向的结果。沉重天体特有的运动与地上物体不是一个类别,它被认为是永恒的圆周运动。

所有这些解释都直接联系于内含在亚里士多德学说里的直觉物理学的思维模型。像我们在第一章里详细讲过的那样,“运动意味着力”的模型是处理强迫运动的基础,尽管“重量产生下落”的相应模型亦提供了解释重物的自

然运动的基础。这样一种思维模型包含在像亚里士多德的自然哲学那样的学说里,对这一模型的解释潜力提出了比直觉物理学更加深远的要求;特别是它促使在使用这一模型时的普遍性、一致性和精密性。

不能够明确归于这一类或者那一类的情况,例如开始时受到外力驱动而过些时又由于它的重量落到地面的抛体运动,因此呈现为这种理论的一个难题。当抛体脱离了给予它开始的运动的推动者之后,是什么样的外力驱动着抛体的运动呢?而且在抛体运动的进程中这种外力与它自然下落的趋势是怎样互相抗衡的呢?曾经有一些复杂的尝试要解决这一类问题,例如把周围的媒质看做是使抛体保持运动的看不见的外部原因。这些说明了一种正在综合进一种理论框架里的直觉物理学思维模型面对着的新型挑战。像抛体运动那样的问题,经受着对亚里士多德自然哲学的批评性讨论和修正,并且在近代指引了一种新的力学的兴起,但只是在这一类问题已经变成对同时代的实践家和理论家的一种明确的挑战之后才得以实现。

在近代时期开始之时,哥白尼以观察天文学和计算天文学的长期传统作为提出一种对天上事件的新解释的基础,它给传承下来的知识带来了一种新的秩序。在保持老的体系里诸如行星的圆形轨道假设等基本要素之时,他把轨道的中心从地球移动到太阳,因而促使了世界观的一种广泛变化,亦影响到了物理学。因为哥白尼的日心体系不仅对亚里士多德把宇宙看做是洋葱式的分层空间的观点发出质疑,而且也对在前面再一次描述的运动的理321解提出挑战。特别是在天体的真实运动和表观运动之间的差别成为了一个爆炸性的问题,对于这个问题的研究最终制造了引进运动相对性的现代概念的机会。因此,在某种意义上,只有一种建立在广义相对论基础上的新宇宙学是从爱因斯坦将相对性原理推广到电动力学——这导致了狭义相对论的产生——的考虑中得出的,才能前后一致。由于新的见解,关于运动的思维模型植入到关于自然界的综合理论里,几乎必定会在两个方向上产生反作用,并且会改变对于运动和对于宇宙的理解。

在近代早期科学革命开始之时,不仅出现了一种新的天文学的世界观,而且出现了一种给人以深刻印象的一般而言的知识膨胀——主要出自从城市中心的工场里新出现的研究型工程师,而且其传播得益于诸如印刷物那样

的媒体。由此形成的结果是,新的科学表现出朝向实际的明显取向,首先是知识的长期积累和转变的过程,其次是出现了一批新的精锐分子,他们能够开发这种知识的潜力以战胜实际的挑战。这些科学家-工程师在那个时候的大型技术企业的语境中组合了一种经验基础,它达到了远远超过直觉物理学的视野,同时亦超越了古代的实际知识。在那个时期积聚的知识,乃是在科学革命的时代里产生新科学的主要经验来源。

伽利略、开普勒和他们的同时代人的前经典力学和天文学,是试图把那个时期的新的知识来源适应于从古代和中世纪时代传下来的知识结构的努力的产物。但近代早期的特征不只是新的知识内容,而且是新的知识图景。与在那时候占支配地位的亚里士多德世界观相反,近代早期的学者们探求的是用同样的原因说明天上现象和地上现象的一种语境。因此,他们偏爱的是那些把这些传统上分离开来的领域里的知识统一起来的解释。

322 由于它那庞大的动力学,这一发展亦给知识以提出对生活的取向和更好生活的种种希望的新的作用,并且其影响不限于科学家和置身于这一革命之中的参加者。这一类作为生活取向的科学,就像被理解为专家们的宗教的古代哲学那样,并不受惠于位于生活之上的稳固性;它可以也叫做“作为希望工场的科学”。实际取向的科学与对一种自我信赖和理解世界的希望之间的联系,亦标记着年轻的爱因斯坦的世界,就像我们已经在第二章里说过的那样,并且向他供给了启蒙的乐观——亦在对传统知识提出疑问的可能性。

近代早期知识的膨胀不可避免地迟早会引起同基于亚里士多德哲学的天主教会官方世界观的冲突——类似于在宗教内部的对抗运动(Gegenbewegungen)的特征的冲突。与此同时,带着挑战目的与同时代的技术实践接触,产生了新的一些思维模型,例如加速运动,使得现在这些新的思维模型同传统的那些思维模型发生了相互关联。伽利略或者牛顿的近代原子论以及笛卡儿或者惠更斯关于火与水、气或火相比拟的充满空间的连续体的概念,都是古代想象的直接延伸。在19世纪,这些媒质最终变成作为传播光和电磁现象媒体的无所不在的以太,就像爱因斯坦在同时代的一些理论里看到的那样。

在伽利略、开普勒和笛卡儿的后继者中,经典力学成为近代时期里首要

的自然科学,它似乎提供的不仅是最主要的例证,而且是所有深入的自然科学的基础。它似乎代表了全面的机械论世界观的出发点,并且打开了统一处理地面上和天空中的物理学的视角。这种视角最后在牛顿手上实现了,他是在一种新的思维模型,即“加速度意味着力的模型”的基础上实现的,使得有可能用同一种万有引力来说明天上行星的运动和地面上落体的运动。但这种模型依然植根于直觉物理学。它仅仅是“运动意味着力”的模型的一种修改,而且像后者一样包括了力的拟人式概念。“加速度意味着力”的模型作为经典力学的基本说明方案,发源于对在前经典力学和天文学里已经积累的更加广泛的经验的反思。与这一模型联系的物理解上的变化,乃是一种知识综合过程的结果而不是它的前提。

323

从这种见解看来,牛顿力学的引力连同像不需要媒质传递的超距作用那样的特性,或者它在所有物体上的加速效应,在一位个别的天才看来显得不再是奇特的而是强加的观念。它看上去更像是一种由在前经典的和经典的科学里积累下来的知识所支持的一种观念,一种足以说明经典物理学三百多年里的稳定性的环境。然而,从前经典物理学综合得来的牛顿物理学的出现,不仅说明了它的稳定性,而且也说明了它能够在某个时候被修改的事实。事实上,牛顿物理学没有提供建立将来物理学演化的基本类别的框架,而只是关于知识组织的一种临时的结构,它像所有结构一样要经受历史的变化冲击。

在伽利略和牛顿之后,特别是在启蒙时期,人们试图尝试建立普遍有效的作为终极教条式的哲学-方法学的基础并且把它转换到其他知识领域,以确保经典力学的成功,希望这样做会保证所断言的科学知识的普遍性,以区别于传统哲学里差不多像经常变幻不定的个人经验那样的偶然性。这一普遍性的断言是由康德提出的,特别是针对他声称是人类思想的不可动摇的基础的空间和时间的概念。在康德的认识论里有对理智的先验论主张的最完美的表达——这里的“先验论”指的是不受暂时经验影响的意思。从这一背景看来,就可以理解为什么爱因斯坦对康德声称先于任何经验的我们关于空间和时间的图景所做的修改,也同科学从这样的先验论断言中解放出来有联系。

324

这种常常与科学自身相对化的危险联系在一起,像我们在第一章里讨论过的那样,也是由一位历史久远的先驱准备好了的。考虑到对法国大革

命后果的激烈不满,启蒙的热情就消退了。实现它的理想的尝试亦表现出了它的局限。这些局限最终亦由于德国唯心主义之思辨性的自然哲学的方案的失败而显现出来了,它不再能够设法把那个时代的科学知识综合到一个理论体系里了。弗里德里希·威廉·约瑟夫·谢林(Friedrich Wilhelm Joseph Schelling)或者黑格尔的自然哲学,仍然能够理解为解除对科学的束缚的一种尝试。它起初的目的在于克服启蒙时期的局限,由此就会再次解除对科学的束缚,并且与此同时把科学提升到机械论世界观的狭窄视野之外,其中有些见解甚至在某些方面偶尔领先于爱因斯坦后来对经典力学的批评。

325 在经典物理学和直觉物理学的期待之间的张力,至少唤醒了科学家对牛顿的教导以及它的某些特性的惊异之情。例如,牛顿关于作为一种超距作用的引力的观念,受到了他的同时代人以及后世科学家的批评,因为这并不代表从直觉物理学可以设想出一种靠媒质接触而传递的作用。因而,科学家采取了许多尝试去提出一些引力效应的模型,以驳斥或者避开这种反对。牛顿物理学另一个被经常讨论的问题就是惯性运动的让人迷惘的性质。自然运动的自持性质以及天上运动是不受外部原因或者可以辨认出来的外力影响

的看法,看来也永远不会完全消逝,即使是亚里士多德的世界观早就被抛弃了之后也是如此。牛顿物理学在说明行星和其他天体的运动上极为成功,但它不能够压住某些反对的声音,例如对于行星的轨道运动那么人为地区分为由于保持运动的内部趋势的惯性分量,和由于太阳的不可见引力而引起的加速分量的观念。

但长期以来,这样的一些问题留给了像黑格尔之类的门外汉或哲学家,他在这个意义上批评牛顿,因而领先于爱因斯坦关于行星运动是一种自然运动的观念。在经典力学的进一步发展,这种类型的推理实际上起不了作用。但当科学知识逐渐增长之时,特别是在力学范围之外的新现象,例如光学和电动力学里的现象的发现和兴起之后,情况起了变化。经典物理学里的新的分支学科的出现,要求对它明显的和隐含的基础做出新的评估。

在19世纪的进程中,从力学导出的、诸如空间和时间那样的科学概念,通过经济和技术的发展日益渗透到日常生活里去,这种趋势可以从度量单位制的标准化和铁路运输的扩张看出来。同时还有几方面的发展,挑战着这些

概念似乎是普遍适用的性质。这里面包括的例子有非欧几何在数学上的可能性,而且关于经典的空间概念的有效性问题,把思想上普遍适用的定律的问题,转移为经验上可以证实的问题。

关于经典物理学的见解的源泉,一部分与以前一样来自实际知识,对像蒸汽机那样的非力学技术做出越来越大的贡献。但主要的源泉乃是特别运用这些技术来增长知识的实验,例如在萨迪·卡诺(Sadi Carnot)确定了一种理想热机的效率的例子里就说明了这一点。反过来,科学对实际用途的承诺的履行则越来越推迟了。科学越来越成为欧洲社会再生产的基础。在19世纪的进程中,科学本身成长成为一种主要的业务,专门关心的不再是关于世界系统如何设计的争论,而是纳入了确定的学科内的知识的生产,在这些学科里每一个都有自己的方法准则。 326

像在第三章里讨论过的那样,力学仍然是公共的参照点,并且那些用力学模型去说明像热、电或光等非力学相互作用的尝试,起先甚至增强了力学独一无二的重要性。用来说明热现象的基础起先以为是热质,而后来则换成热不外是原子的运动的观念。麦克斯韦接续着法拉第关于电力线和磁力线的想法,并且亦在波动光学的传统之内,成功地尝试依靠一种力学的以太来说明电磁现象。在这一背景之上,依靠这种同样的媒质来说明引力的探索似乎是有道理的。以这种解释的尝试为例,人们能够阐明经典物理学演化的一个基本特点,即,一种完全以力学为基础的统一解释模型的失败。牛顿关于两个质量的万有引力定律,甚至具有与两个静止的带电粒子之间互相吸引的库仑定律完全相同的形式。在每一种情况下,力都是与两个粒子之间的距离的平方成反比,而且在第一种情况下力与两个质量的乘积成正比,在第二种情况下与两个电荷的乘积成正比。因而很自然地把质量解释为一种“引力荷”(Gravitationsladung),它激起了周围以太的一种扰动,因而产生了引力场,而引力场又通过以太传播从而作用到另一个引力荷之上。

除了给承载这样一种引力场的以太建立一种适当的模型的困难外,不论是电磁场之外或以某种方式由它们产生的引力的以太模型,都要求引力作用具有迄今未知的一些性质。这里特别包括了引力效应传播的有限速度,以及可能存在的像引力波那样的动态效应,那是一个在那时候没有以可利用的经

327 验知识的观点为基础的一个假设。因此,去发展一种以太模型是一件相当冒险和麻烦的事情。仿效电磁场理论的例子去构造一种引力场论的尝试,面临着几乎是不可胜数的困难。事实上这两种情况确实在基本的方式上是不同的。在电磁力里有两种相反符号的电荷,但在引力里只有一种荷-引力质量,而它总是以吸引的方式存在。这一困难特别导致了引力场在做外功时的一种增强效应,例如两个远距离的质量彼此接近时那样。因此那个时代的人都以为难以建立一种与能量守恒相容的引力场论。

当知识增长之后,接着就变得难以设计基于力学知识的一些一致性的思维模型了,它们在经典物理学领域的各种应用上,以及在同时代的化学的应用上都被证明为正当的。因此,以太和原子遭遇了在第三章里讨论过的费加罗问题:它们要实现在各种领域——从光学到热学到引力——内的不断增长的无数功能,最终变得不再在经典物理学里的互相协调了。与此同时,像我们在第三章里讨论过的那样,麦克斯韦的电动力学和克劳修斯的热力学已经羽翼丰满,成为物理学里的独立分支,它们的中心概念“场”和“熵”根本不需要力学为之辩护。像马赫那样的哲学家们和科学史家们从这种状况里找出对于力学本身的基本概念进行批判性评述的机会。于是,在19世纪末演化出一种全新的状况。

328 经典物理学分为三个领域,力学、电磁学和热力学。这些领域彼此之间并不仅仅是由空间、时间和物质等仍然是共同的根基的经典观念,而且是由像能量那样的重叠着的新概念联系起来的。此外,在这些概念大陆之间发展出来的叠合区里,积聚着和承载着引发科学地震的潜力。像在第三章里详细讨论过的那样,这些边界问题是维恩、普朗克、洛伦兹和玻耳兹曼等人研究的中心课题。经典物理学的大师们从他们各自专业的见解优先研究这些问题,尽管只是从一个更宽广的视角,并且包括了像在马赫的著作里表达的对经典物理学基础的批判性反思,才能够显示出他们的震动力度。

在工业时代中生长起来的科学的勾勒姆(Golem)看来,强大和弱小是一对临时的伙伴。这适用于它的理论维度,亦适用于它作为生活取向(Lebensorientation)的作用。因为科学的胜利进行曲被证明是一种世俗化的进步,它越来越远离在近代早期时最初具有的救世承诺。它成为人类公共财产的愿

望已经转变为在科学共同体里占一席之地的野心。而科学的统一日益变成一个不是关乎其内容而是制度化方法的问题。

科学统一的理想不仅是在方法上而且在内容上,本质上只在 19 世纪的普及科学里保留下来了——除了在像马赫或者庞加莱那样的有哲学取向的科学家的工作里——它们假设对于科学作为生活取向的作用有一种强有力的又是矛盾的影响。一方面,科普著作变成一些平民观念的载体,用科学的进步来要求更公平的社会和政治条件。另一方面,科普著作倾向于把这一进步解释为救世的承诺,伪科学复兴运动就一次又一次地源于这种观点之上。不管它要构成不加鉴别的神话的倾向,普及科学也能够贡献一种把批判性的反思和倾向性的知识统一起来的看法,像在第二章里描述过的,对年轻的爱因斯坦的影响那样。

从爱因斯坦倾向性知识(Orientationswissen)的观点看来,经典物理学的边界问题以及由经典物理学大师给出的解,成为了 1905 年革命的出发点,我们在第四章里已经分析过了。爱因斯坦自己进行的主要研究,以及在他的学生时代同“瑞士波希米亚人”的他的朋友们的讨论,形成了一个智力工作室,在其中把这些结果转化为一部新物理学的基础。爱因斯坦工作的实质不是新的,而是在几个世纪以来积累的知识的结果。其中新的是其结构,在其中传统知识通过一种重构和再解释而呈现出我们已经用关键词哥白尼过程识别的性质。关于空间和时间的新概念取代了以太的位置。波粒二象性取代了光的波动图像的位置,它不再能够用经典物理学的概念来掌握。而且,新的粒子取代了经典的原子及其运动,它们的存在不再只是一个假设,但它们的性质只能够依靠统计性的定律来描写。 329

爱因斯坦对物理学革命性更新的先决条件,落脚在他能够维持流传下来的方式,亦在相同的程度上落脚在允许他认识到后者的局限性的他的倾向性知识。爱因斯坦的倾向性知识的一个重要部分是他对知识的长期发展的眼光,那亦在他自己的普及著作里面清楚地表明了。由于这一总体看法,他在 1905 年的突破之后没有忽略经典物理学的革命根本没有完成,并且值得继续详尽地研究它的传统基础。没有别的科学贡献比 1915 年的广义相对论更加雄辩地证实了这一点,那是本质上由马赫的历史性-哲学性的批判推动的,

因而能够以一种令人惊讶的新方式解开引力这个谜,我们已经在前面两章里分析过了。在牛顿把引力设想为人类发挥的力量的拟人式模型之处,爱因斯坦能够在非欧几何的意义上用空间和时间的曲率来说明引力,并且超越了空间和时间是我们感知的普遍适用的脚手架这一观念。

创新和生活取向

在对爱因斯坦革命的历史和长远的前期历史的这一评述的基础上看,我们可以说什么是使得科学革命有可能发生的条件呢?这个问题是否有一种不含糊的答案呢?如果你认为这个问题提得没有道理,那么你也可以质疑任何断言内容多于简单的描述性报告的科学史的合理性。不过,轻率的回答是危险的。那样的回答通常对创新采用一种技术决定论的理解,假设创新有一种自身的价值,而罔顾文化的、社会的或者伦理学的语境。最后,在这样一种见解之下,创新变成了独立于社会后果的科学、技术和经济的生活的同义语。但20世纪的历史会对我们这样一种简单化的看法提出警告。当国家社会主义在德国得势之时,许多科学家担心科学的事业甚于担心他们的已失去工作、被迫害和被杀害的犹太人同事。20世纪里科学的罪孽使我们看清了,科学的创新决不是科学及其看来是无情的进步的内部事务。创新的概念最终表示的仅仅是对知识的全面演化的一个反思的维度,知识的一种反映。用耶胡达·埃尔卡纳(Yehuda Elkana)的话说,那是科学自身处在世界的环境中形成的知识。谁要是谈论创新而没有想到它在本性上作为对我们的社会状况的反映的一个因素,谁就放弃了有意识地决定创新的重点的方向。科学进步日益增长的深刻结果,使我们把它当做文化的一部分,当做社会的一部分和当做一种生物物种,使得它实际上在关于创新的讨论中不可避免地包括了这样一些思考。

回首顾望在过去时代里的知识图景,我们立刻看到它们对于文化价值的依赖,亦依赖于每一个受限的知识视野,如不断重复出现的“科学的终结”的观点所说的那种情况一样。回首顾望,这些看来是如同技术进步的预言——

像在1949年的一份科学普及杂志里宣称的那样,未来计算机的重量会小于1.5吨——一样的天真。但尽管真正的创新常常在很少有人预期的地方出现,展望的态度仍然对科学进步的条件产生有深远意义的影响。因为知识图景反映了决定获取知识的策略,并且因而最终反映了建立科学的组织性和体制性结构的期望。从这种见解看来,科学进步也可以被看做是一种共同演化,是结合着知识、知识图景和获取知识的策略这几方面的演化。因此,科学知识越来越快的积累以及对它的生产所需要的资源的不断增长,使它必须适应获得知识的策略,并且去核对作为它们基础的知识图景是否在不久之前已经被加速的发展所超越。

331

我们可以从爱因斯坦的革命的历史,特别是从漫长的史前史里获得这种见解,得到两个对我们的论题来说是重要的结论:第一,科学仅仅是冰山之巅,而那主体则是变动不居的知识世界。科学的、技术的和实际的知识,以及常识的直觉,所有这些都是组成一个总体系的各个部分。科学的人类历史具有与地球上生命的历史并非不相似的动力学,是由必然和自由两者共同决定的;正如马克思讲的那种意思,它是由人类产生的,但不是由他们支配的。第二,思想对思想的反映,是造成知识体系的结构性变化的可能是第一位的基本机制,并且因而也能够指引它,达到它能够被指引的程度。我们对世界的理解的分,不受一种预设逻辑的固定限制,而这些分类是可变的,并且它们原则上经受着我们不断的评估。这样的一种评估是否会影响到这些分类和它们的应用的解释潜力或者道德含意,这个问题更应当归入社会劳动分工而不是在主观和客观判断之间的一个抽象的鸿沟。无论如何,弗里德里希·戈特利布·克洛普施托克(Friedrich Gottlieb Klopstock)说的一句话是适用的:“谁盲目地选择,谁将会被祭坛的烟雾遮住眼睛。”(Klopstock 1839, S. 302)①

因此,从一种有关知识的历史理论的观点来看,值得做如下追问:那些看

① 这句话的德文为“Wer blind wählet, dem schlägt Opferdampf in die Augen”,引自克洛普施托克的《颂歌》(Oden)第二卷中的《俊妇》(Die Grazien)。对于这一警句的意思,历来有不同的解释。其一为:盲目的选择导致了牺牲者的烟雾,因而模糊了已做出选择的人的视野;另一解释是,已经升起的祭坛尘烟使得已做出的选择看不清楚。——译者

上去似乎是偶尔将科学包含在内的沉重面纱,并由此挣得了“盲目的工具理性”(blinde instrumentelle Vernunft)坏名声的不可避免的必然性,在多大程度上,是因为没有对一种自由加以承认的结果,如,劳动分工的结果变成了它自己的目的,或者屈从未经审查的约束。每一种可能性都指向在科学发展的条件和在由它提供的生活取向这两方面的欠缺。爱因斯坦在自己的时代里,把这样的欠缺当做机会,去建立在他对科学统一的探求里联系分隔开来的各个领域的桥梁。即使在方法上来说,他的工作象征着从未经检验的约束中解放出来,差不多就像是由这种解放暗含的创新潜力。最后,特别是在他的晚年,爱因斯坦毫不犹豫地把科学当做涉及人类存在的问题时作为一个整体去执行的任务。今天对科学反思的不足,已经给怀疑论和无知留下了一块危险的真空,只有当科学做好准备在由不可避免的专业化所导致的不同边界上架起新的桥梁,同时越来越强地对生活取向做出贡献之时,这种情形才能得到弥补。但这对科学提出了一种挑战,只有在几千年来宗教给予人性的挑战能够与之相比,宗教哲学家克劳斯·海因里希(Klaus Heinrich)的著作里这样表达过,使人类社会意识到它自身,并且使个人能够分享和参与这些物种的命运。

在科学依然不断增长的专门化,以及来自开发利益的对它们自主权的威胁的背景下,这样一种断言似乎是不现实的。还有是保证亿万人过上人道生活的挑战。考虑到只有科学能够应付这一挑战,一个合理的要求是,促使不仅科学所需要的社会资源得到适当的许诺,而且要问是否科学自身充分运用、开发了它的潜力去公平对待这一挑战,甚至是否它的潜力能被耗尽,所有这些问题,都只有在考虑到它在人类物种的生活总取向上所起的作用时才能回答。

在科学的经典图景的边界上

今天我们仍然设想科学的结构主要表达为一种“科学的经典图景”。我们已经被这一想法牵着走了那么多时,使得我们很难想象科学还能够不受这

一图景的标准和价值的指引而起作用。根据这种经典图景,似乎我们很自然地应当把基础研究和应用研究区分开来,把教学和研究工作组织到各门学科里去,以及以为重大的突破通常是少数杰出的个人的工作,他们的成果的品质在被同行权威审查之后,在他们的领域内最佳的刊物上发表。按照这种观点,严格的制度保证了在科学内部研究工作的权限结构。对单个个人的创新的鉴定,以及专门刊物的作用和作为这些成果的品质过滤器的权威评述,都是关于科学知识的生产和分配的一种内部一致的体系的要素,这一体系确实长期以来运转得相当良好。

333

然而,一种对历史的回顾很快就表明了,这一体系不是像它的自我认知那样永远有效的。这一体系有多么不成熟可以从下面这个例子反映出来,当爱因斯坦收到一份评述时感到惊奇,因为毕竟他投送出他的文章,是为了发表而不是为了让某些指定的同行有权在发表之前进行匿名审阅。^① 也很清楚的是,今天这一体系面临着越来越多的挑战。首先仅仅是科学本身(在个人和财政资源、组织机构和工业应用等意义上)的规模问题,以及它所产生的出版量规模的问题。对于规模的这一挑战的最自然和普通的回答,是它通过管理机构强加的和外部可证实的标准,稳定了在科学的经典体系里固有的价值。

但在科学标准实际上在外在化的进程中,最终会导致潜在价值的弱化,因为它降低了生活的智力交换以利于社会控制的机制,例如用正式的评估来代替个人的判断,用列举出版物的名称来代替内容的阅读,一句话,用定量代替定性。虽然这些控制的机制依然是由科学的经典图景宣布为合法的,它们已经早就产生了自己的次级价值,并且总是有变成迷信的特征的危险。次级价值特别导致的是在出版物里出现的是信息的一些越来越小的碎片,而科学则可能会淹没在信息的海洋之中。这一危机的外部征兆是出版的传统渠道的泛滥和科学刊物价格的飞涨。

① 原著没有指明这件事的来龙去脉。译者估计可能指1936年爱因斯坦把关于引力波的一篇稿子投送给《物理学评论》(*Physics Review*)后,他对于编辑部寄来的一份审阅意见的反应。见:关洪:《胡宁传》,北京:北京大学出版社2007年版,第37节;或者Kennefick D 1999, *Controversies in the history of the radiation reaction problem in general relativity*, in *The Expanding Worlds of General Relativity*, H. Goenner et al. (eds.), Boston: Birkhauser. ——译者

334 新的电子媒体和通信网络的引进和飞速发展代表着对当代科学的另一个挑战。它们制造出漫无节制的出版物,但它们亦提供了科学信息的生产、组织和流通的新方式。这里包括了使科学知识和我们的文化遗产的资源在因特网上以相当低的费用和实际上没有时间延迟的传送的可能性;这种机会亦使得那些不适于通过印刷媒体传送的那些信息,例如观察和实验数据、计算机程序、动画片、高分辨率图像、视频和音频资料等可被利用,一句话,在科学的信息供应上提供了极大的方便;并且形成了全新的交互式工作方法。

这种信息流通的方式事实上不仅提供了科学主张的更精确的和更易于控制的机会,而且主要是提供了上网和处理可利用信息的全新工具。这种潜力的开发预示了保证随时存取经过电子编码的科学知识的一种适当的基础结构,并且使得它的交互过程和综合整理是以一种世界范围的合作进行的。今天因特网的增长形成了人类知识的一种全球表示,它会含有科学的一种新的统一的机会,可能是当代的科学面临的最大的挑战。

产生和分发信息的新的可能性已经在自然科学的日常实践中广泛应用了,但在传统的制度和经济结构方面遇到了阻力,在那里拒绝适应那些新的潜力,特别是有这样的论证说,那样的适应会挑战作为科学事业的基础的基本价值,例如科学信息的可靠性。但我们怎么能够肯定对于这种挑战的一种保守态度,事实上不会因为保持科学作为增加人类知识的使命的必要性而被证明为正当的呢?或者这种态度是否简单地是科学的经典图景和相应的控制机制的一部分,它们依然能够产生令它们自己合法化的论据,虽然尽管存在335 着日益增长的差别,它们已经不再胜任今天的挑战。对这些问题的一种严肃的回答,要求在对新的媒体在科学信息的重构和流通上的潜力做出仔细的评价之后进行审查,在审查中必须注意科学的社会维度和认知维度。

对关于科学创新的条件这一问题以及类似的问题寻求答案的困难指向了另一点,新近成为科学的经典图景的有疑问的方面,即是科学的政策能够信赖它的判断的措施,而不需要持续地检查它们对研究和教学的快速变化的结构的适应性,以及它们的真实世界的语境。根据科学的经典图景,评价通常是科学组织对科学所做的事而不是相反。按照这样一种见解,评价就像对科学的其他反思形式一样——例如,经典意义上的方法论——被理解作一

种超出人类经验的程序,它能够被引导得在很大程度上脱离科学的内容。一方面是科学的研究和教学,另一方面是科学的组织,相应属于不同的知识范围,按其本性是互相独立的,就像内容和形式那样。科学家们因而——按照科学的经典图景——最好不去管科学的政策,除非他们登上了年长的社会活动家的高位,那时候他们已经失去了研究的活力,或者已经起到了作为他们专业学科的说客的作用。但已经成为一种普通经验的是,许多科学问题跨学科的本性,要求运用那些不是作为已经确立的科学制度设置的资源,并且这一本性预示了要与社会的、文化的和伦理学的语境交缠在一起,而在传统上那些方面主要在上应用上而不是在基础研究上起作用。因而,与基础研究的各个问题的成功的交互作用,越来越经常地包含了对科学结构和有意识地改变它们的尝试的反思,而这些方面正是与科学政策有关的,或者是通常被排除的维度上的问题。

336

科学史的潜力

在像今天这样急剧变化的情况下,科学史能够提供的一个可以汲取这种尝试的经验库。在这里当然有对与历史上可相比较的剧变情况的特别兴趣。在这种意义上,在科学信息流通的重组中电子媒体的作用,令人回想起近代早期印刷机的发明为科学带来的剧变。并且,科学知识的重构的交叉边界上的问题,在今天所起的作用,使爱因斯坦的未完成革命显得是科学转换的一种预兆,在这一进程中学科的边界可能会完全消融掉。两种历史的时刻的确都是以一些重大的挑战为特征的,只有注意力集中在超出传统边界的智力资源才能克服这些挑战,这些边界或者是像在近代早期那样的实际知识和理论知识之间的边界,或者就像在爱因斯坦的年代里现代物理学出现时在科学自身内部的边界。在近代早期有宏大的工程计划,给科学提供了挑战的对象并且促进了从希腊的自然哲学到当代的实际经验的可利用知识资源的展开。在爱因斯坦时代它表现为经典物理学的内部矛盾,其背后随处矗立着新的、非力学技术形式且快速发展和了工业化之集束化了的的知识能力。

在我们的时代,巨大的挑战不是起因于从在近代早期开始的伟大的文明计划提出的问题。然而,今天的挑战并不关心各个城邦或者国家的地方性命运,而关心的是作为整体的我们的文明,例如气候的演变趋势、食物和营养的问题、全球性疫病或者自然灾害的威胁。因而,由这些挑战产生的总体见解不再以开放的视野为特征,而是以集中关注着我们物种的命运所依赖的系统网络的边界为特征,关乎生态学、社会学、认知科学或者宇宙学的本性。与近代早期相比,重要的不再是关于把我们现在知道的局部知识最大限度普遍化推广的问题,而是设想为普遍适用的知识地方化(Lokalisierung)和语境化(Kontextualisierung)的问题;即使目的在于使得自然成为文化的一个例子,也不再是让自然与文化分离的问题,而是想接受这些范畴之间的不可消解的交缠,不仅只是在互相定界的意义上。

我们的时刻在历史上的特色的一部分是,科学的制度性结构总是被应当受控制的研究过程所挑战,使得研究计划时常不仅要重新找到实现它们的条件,而且也被迫重新思考其经济的、社会的和道德的语境。这就与上面所描述的,在科学的经典图景里的反思层面的或多或少的分离形成强烈的对比。因而,科学组织的问题留给管理层和政治家,或者已经不再活跃在研究第一线的科学家吧。并且,依照这一图景,一种学说的给定的智力框架肯定已经使得那些独立取得的、分散的研究成果,将自动地适合于一个更大的整体——即使是没有一个单独的专家能够在他自己的脑子里实现组织知识的这种综合。简而言之,我们生活在这样一个时代,要求在涉及科学与现实冲突的所有层面,包括策略问题的层面时都要参与进来;同时,我们也是生活在这样一个时代,当一个专门学科的划好了界限的领域里一名服从的士兵就足够了,就像在经典时代本来似乎是足够了的那样。

20 世纪里从第一次世界大战毒气的生产,到与此相关的大屠杀,直到当代大规模杀伤性武器的发展,科学的这些重大罪孽发生之后,我们面对着这一特别是在道德方面的教训,感到科学家个人有责任关注他的研究成果后来的应用。似乎在 21 世纪把这种责任转移到科学本身的中心了。像问题定义这样的智力上的挑战,像在知识的开放可获性或智力资本主义之间进行选择等制度上的和经济学的论题,或者像与干细胞研究联系的道德上的挑战,都

既与每一个个人相关,同时亦与作为一个整体的科学体系相关。

然而,这些挑战不能够被分割为一小块一小块,从而把责任清楚地划分开来,例如分别让科学家、政治家和哲学家来负责。为了对付它们,个人意义上的责任是不足够的,亦不能满足于他们的专家资格专业团体的代表——当然还有站在他们后面的议会外的活动集团的利益——当他们在委员会里彼此会面的时候,或者出现在公众场合的时候。认知的、道德的和社会的语境的交缠甚至会成为 21 世纪科学的特征性质。这种交缠不仅像它看来的那样,表现为科学体系的复杂性的进一步增长;它亦在生活取向上为科学提供机会,以恢复智力上和道德上的自主性。

当然可以利用这种机会,只要作为它的创新潜力的根基的科学自组织的自由,在插入了进一步的等级体系和控制结构之后不是削弱了而是加强了;只要问题的选择能够伴随以反思,并且主要不是由正式的职业结构规定的;只要对智力事业是否能够实现的必要审查,不是用来作为借口,限制科学直接于有利可图的应用;只要科学的社会和制度的结构不保护有利于局部利益的辩护,而鼓励知识分子的流动性和科学家从全球的各个地区和层次得到补充;只要存取科学信息的新的道路不因为把它们转变为商品的用途而堵塞住。

在当前挑战的这一背景下,我们在这里概述了的一种知识历史的那些关键概念,在这里获得了新的意义。但今日当然总是有新的边界问题出现,为了处理它们,要求把各个不同的知识结构领域综合起来,并且变成概念性变化的出发点,例如量子引力的问题那样。在今天的科学里,这些问题常常与关于发展着的体系的极限的疑问联系在一起,例如关于宇宙的情况,它的命运组成了在广义相对论和量子理论之间的边界问题的中心经验性内容。 339

因而,知识综合的论题仍然起着至关重要的作用,我们只能够以长期发展的观点适当地给予评价。使我们得以回答以上所描述的各种挑战的智力资源的综合,今天设定了一种人类知识的全球性交互表示的网络形式,并且可以从今天的因特网起始。知识的历史提供了知识表示的新的形式与它的结构的发展之间的相互作用的局部特征及其发展的许多证据,我们已经在第一章里看到过了。因此,如果仅仅从效率的巨大增长这个角度看的话,我们

可能会低估了隐藏在新的信息技术里的强大的创新潜力。另一方面——这也是爱因斯坦革命的历史的另一个教训——知识的重构是不可能自行发生的,它不可能不经过超越已经确立的边界那样的沉闷乏味的阶段。因为那样的过程涉及一座知识建筑,连同认知的、制度的以及经济的附属结构的重建,而这些附属结构总以它们自己固有的惯性抵抗着这样的重建。因此,知识发展的动力学有多么急于重建,它的成功就有多么需要伴随着一种对于什么样的定向知识以及什么样的历史意识会有生命力的问题的反思过程。

这样的定向知识的有效性又预示着,要克服作为科学的经典图景特征的、在知识的原始层次和反思层次这两种领域之间的绝对分离,因为显然只有按这种方式,关于科学的思考才能够产生关于如何组建它们的内容的结果。反思知识对科学本身结构的反作用的一个突出的例子,正是爱因斯坦把马赫基于历史的和哲学的对于经典力学的批判转化为一种最终引导他成功地建立了广义相对论的启发式研究方法。即使在那个时候,马赫以及爱因斯坦都属于那些从根本上考虑这种反思的人数不多的少数派。在这方面,我们现在的情况由于科学越来越专门化以及随之发生的知识爆炸而变得更糟了。另一方面,它亦通过由知识网络的新技术提供的可能性而得到改善。

最后,变得可以相信的是,在全球网络中所呈现的仍具有巨大信息碎片谜团性质的知识内容,将会进一步发展成一种由这些内容的意义导向的结构,这样它才真正对得起语义网络这一名称。这些内容以这种方式动态地发展着的全球网络自身会呈现一种意义,它不再是一种偶然的結果,并且最好是对盲目探索过程的一种帮助。于是,网络就会是新的媒体的自我反思性质的表示。这一自我反思的性质,也可以称为自组织的能力,那是执行自身直接对它的结构施行的反作用的能力,像在谷歌(Google)搜索引擎里运用的那样,已经可以看到由使用者的反作用对这样一些搜索过程的控制的初步尝试。一个更加明显的交互网络——在那里使用者直接同在网络上表示的全球知识进行交互联系——从长远的观点看来,能变成一种对这种知识进行深思熟虑的构造的手段。对于知识建筑的更深入的理解,当只能够从知识的历史理论得来的时候,亦可以对在这一发展阶段的先决条件给予重大的改进。

具有不断增加的自组织潜能的一种综合的知识表现的突现,会带来什么样的新概念,这个问题不会比从经典物理学的观点来预言爱因斯坦给予空间、时间、物质、引力和辐射诸概念的革命更让人期待了。我们能够更加清楚地认识到,即使是在今天,对于从全球挑战的观点看来我们的知识体系的这样一种转变得以成功的关键条件是:这种转变只能作为由反思标记的科学文化的一部分才能够成功,这种文化的一部分是每一个关注其可变性的人都可以接近得到的。如果我们记得像爱因斯坦那样的单独一个人,能够在对于超越边界的反思是相当困难的条件下,对他那个时代的科学做出成就,我们就可以把阅读他的科学革命的历史,亦当做对于应付今天的挑战的科学文化作出贡献的鼓励。

341

本章内容以同乌尔夫·冯·劳赫豪普特(Ulf von Rauchhaupt)、西蒙妮·里格尔、乌尔斯·舍普夫林(Urs Schoepflin)和米莱娜·瓦泽克(Milena Wazeck)部分联合写作的一系列文章为基础。一些重要的见解和建议出自戴培德、耶胡达·埃尔卡纳(Yehuda Elkana)和克劳斯·海因里希(Klaus Heinrich)。

推荐读物

本章特别根据:

Renn, Jürgen. 1997. "Von der klassischen Trägheit zur dynamischen Raumzeit: Albert Einstein und Ernst Mach." In W. Kroker (ed.) *Naturwissenschaften und Industrie um 1900. Die Technikgeschichte als Vorbild moderner Technik*, Vol. 21. Bochum: Georg Agricola Gesellschaft, Bochum, pp. 25—38.

Renn, Jürgen. 2007. "The Third Way to General Relativity: Einstein and Mach in Context." In J. Renn and M. Schemmel (eds.) *Gravitation in the Twilight of Classical Physics, Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy. (The Genesis of General Relativity, Vol. 3., Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 250.)* Dordrecht: Springer.

———. 2002. "Challenges from the Past. Innovative Structures for Science and the Contribution of the History of Science." In *Innovative Structures in Basic Research*.

Munich: Max-Planck-Gesellschaft, pp. 25—36.

——. 2004. “The Relativity Revolution from the Perspective of Historical Epistemology.” *Isis* (Special Issue: *The Elusive Icon: Albert Einstein 1905—2005*), pp. 640—648.

——. 2005. “Wissenschaft als Lebensorientierung: Eine Erfolgsgeschichte?” In E. Herms (ed.) *Leben: Verständnis. Wissenschaft. Technik.* (Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Theologie, Vol. 24.) Tübingen: Gütersloher Verlagshaus, pp. 15—31.

Renn, Jürgen and Ulf von Rauchhaupt. 2005. “In the Laboratory of Knowledge.” In J. Renn (ed.) *Albert Einstein Chief Engineer of the Universe. One Hundred Authors for Einstein.* Berlin: Wiley-VCH, pp. 26—33.

Renn, Jürgen, Urs Schoepflin and Milena Wazeck. 2002. “The Classical Image of Science and the Future of Science Policy.” In *Innovative Structures in Basic Research.* Munich: Max-Planck-Gesellschaft, pp. 11—21.

在这一章里用到的进一步的文献:

Gregory, Frederick. 1977. *Scientific Materialism in Nineteenth Century Germany.* Dordrecht: Reidel.

342

Janssen, Michel and Jürgen Renn. 2007. “Untying the Knot: How Einstein Found His Way Back to Field Equations Discarded in the Zurich Notebook.” In M. Janssen et al. *Einstein's Zurich Notebook, Commentary and Essays.* (*The Genesis of General Relativity*, Vol. 2., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 250.) Dordrecht: Springer.

Klopstock, Friedrich Gottlieb. 1839. *Sämmtliche Werke, StereotypAusgabe*, 4 Vols. Oden, Vol. 1, Leipzig.

Kuhn, Thomas S. 1957. *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Markl, Hubert. 2001. *Biowissenschaften: Was können wir wissen? Was sollen wir tun? Was dürfen wir hoffen?* A talk given within the framework of the lecture series *Faszination Wissenschaft: Gene und Genome Molekulare Grundlagen des Lebens* on 11 December 2001 in Berlin. Konrad-Adenauer-Stiftung e. V., Berlin.

Schemmel, Matthias. 2005. “An Astronomical Road to General Relativity: The Continuity between Classical and Relativistic Cosmology in the Work of Karl Schwarzschild.” In J. Eisenstaedt and A. J. Kox (eds.) *The Universe of General Relativity.* (*Einstein Studies*, Vol. 11.) Boston: Birkhäuser.

关于科学的创新和未来:

BernersLee, Tim and Mark Fischetti. 1999. *Weaving the Web: The Past, Present and Future of the World Wide Web by its Inventor*. London: Orion.

Cailliau, Robert and James Gillies. 2000. *How the Web Was Born: The Story of the World Wide Web*. Oxford: Oxford University Press.

Crane, Gregory. 1991. "Composing culture: the authority of an electronic text." (*Current Anthropology*, Vol. 32.) Chicago, Ill., pp. 293—311.

Elkana, Yehuda. 1986. *Anthropologie der Erkenntnis: die Entwicklung des Wissens als episches Theater einer listigen Vernunft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Markl, Hubert. 1998. *Wissenschaft gegen Zukunftsangst*. Munich: Hanser.

Mittelstraß, Jürgen (ed.). 1999. *Die Zukunft des Wissens: XVIII. Deutscher Kongreß für Philosophie Konstanz 1999; Workshop Beiträge*. Konstanz: UVK, Universitätsverlag Konstanz.

Renn, Jürgen (ed.). 2002. *Innovative Structures in Basic Research*. (Ringberg Symposium, October 2000.) Munich: Max-Planck-Gesellschaft.

在因特网上关于科学的开放链接:

Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities
<<http://www.zim.mpg.de/openaccessberlin/berlindeclaration.html>>

Bethesda Statement on Open Access Publishing (20 June 2003) <<http://www.earlham.edu/~peters/fos/bethesda.htm>> 343

Budapest Open Access Initiative
<<http://www.soros.org/openaccess/read.shtml>>

Declaration of Institutional Commitment to Implementing the Budapest Open Access Initiative, the "Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities", WSIS Declaration of Principles and Plan of Action (19 Feb. 2004)
<<http://www.eprints.org/signup/sign.php>>

OECD Declaration on Access to Research Data from Public Funding (30 Jan. 2004) <<http://www.oecd.org>>

Wellcome Trust Position Statement on Open Access (1 Oct. 2003) <<http://www.wellcome.ac.uk/en/1/awtvispolpub.html>>

开放链接的背景资料:

News from the Open Access Movement
<<http://www.earlham.edu/~peters/fos/fosblog.html>>

SPARC Open Access Forum and Newsletter
<<http://www.arl.org/sparc/soa/index.html>>

Timeline of the Open Access (Peter Suber)

<<http://www.earlham.edu/~peters/fos/timeline.htm>> Wellcome Trust Report An Economic Analysis of Scientific Research Publishing

<<http://www.wellcome.ac.uk/en/1/awtpubrepeas.html>>

WSIS civil society working group on "Scientific Information"

<<http://www.wsissi.org>>

因特网上免费进入的资源:

Directory of Open Access Journals (Lund University Libraries)

<<http://www.doaj.org>> European Cultural Heritage Online (ECHO)

<<http://echo.mpiwgberlin.mpg.de/home>> Max Planck Society eDoc Server

<<http://edoc.mpg.de>> Open Archives Initiative

<<http://www.openarchives.org>> Virtual Einstein Exhibition

<<http://einsteinvirtuell.mpiwgberlin.mpg.de>>

人名索引^①

A

- 阿伏伽德罗 Avogadro, Lorenzo Romano Amedeo Carlo 104, 107, 170, 171
 阿那克西米尼 Anaximenes 318
 埃德尔施泰因 Edelstein, Wolfgang 3
 埃尔卡纳 Elkana, Yehuda 330, 341
 埃克斯纳 Exner, Felix 117
 埃拉特 Ehrat, Jakob 149
 埃伦费斯特 Ehrenfest, Paul 138, 139, 168, 217
 爱迪生 Edison, Thomas Alva 38
 爱因斯坦, 赫尔曼 Einstein, Hermann 61
 安培 Ampère, André Marie 109
 奥斯特 Oerstedt, Hans Christian 109
 奥斯特瓦尔德 Ostwald, Wilhelm 169

B

- 巴门尼德 Parmenides 318, 319
 柏拉图 Platon 16, 17, 18, 319
 贝尔奈斯 Bernays, Paul 269, 273
 贝尔塔拉米 Beltrami, Eugenio 240, 241, 242, 243
 贝索 Besso, Michele 64, 66, 71, 131,

132, 133, 146, 149, 163, 164, 187, 189, 220, 250, 271, 272, 273, 279, 280, 288, 289, 290, 291

- 贝韦拉克 Bevilaqua, Fabio 5
 波拉克 Pollak, Leo 287
 波普尔 Popper, Karl Raimund 21
 玻恩 Born, Max 217
 玻尔 Bohr, Niels Henrik David 72
 玻耳兹曼 Boltzmann, Ludwig 74, 93, 106, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 119, 120, 123, 134, 135, 136, 138, 141, 144, 154, 157, 158, 159, 160, 162, 163, 164, 165, 169, 176, 177, 327
 伯德克 Bödeker, Katja 5
 伯恩斯坦 Bernstein, Aaron 61, 63, 64, 143
 泊松 Poisson, Siméon-Denis 227, 229, 232, 233, 239, 243, 249
 博马歇 Beaumarchais, Pierre-Augustin Caron de 99
 布拉赫, 第谷 Brahe, Tycho 22
 布莱希特 Brecht, Bertolt 57
 布朗 Brown, Robert 60, 93, 94, 114,

① 人名后所附页码均为原书页码,即本书正文部分的旁码。同理,专名索引中的页码也为原书页码。——译者

115,116,117,138,140,165,168,169,
170,171,172,173,175,179,180,181

布鲁诺 Bruno, Giordano 23

布特纳 Büttner, Jochen 190

C

仓格尔 Zangger, Heinrich 288

D

达尔文 Darwin, Charles Robert 23,
34,37,41,42

达·芬奇 da Vinci, Leonardo 32

达里戈尔 Darrigol, Oliver 123

戴培德 Damerow, Peter 3,4,5,50,
82,251,341

道尔顿 Dalton, John 103,104

德鲁德 Drude, Paul Karl Ludwig 149,
159,160,161,163

德漠克里特 Demokrit 318

德西特 de Sitter, Willem 293,294

狄更斯 Dickens, Charles 65

迪瓦尔奇 Divarci, Lindy 4

笛卡儿 Descartes, Rene 20,25,322

杜隆 Dulong, Pierre-Louis 161,166

F

法拉第 Faraday, Michael 109,326

范·东恩 van Dongen, Jeroen 282

范特霍夫 van't Hoff, Jacobus Henri-
cus 72,170,181

菲克 Fick, Adolf 179

菲涅耳 Fresnel, Augustin Jean 101,
148

斐索 Fizeau, Armand-Hippolyte

Louis 101,102,108,148,155,185

费耶阿本德 Feyerabend, Paul 21

弗里德曼 Friedmann, Alexander 296,
297

弗洛伊德 Freud, Sigmund 31

弗罗因德利希 Freundlich, Erwin Fin-
lay 79,287,288

傅里叶 Fourier, Jean Baptiste Joseph 179

G

伽利略 Galilei, Galileo 15,16,22,
23,24,25,27,29,31,32,50,57,68,
90,110,134,135,136,137,138,141,
183,189,204,205,206,207,209,220,
228,321,322,323

伽利略,维吉尼亚 Galilei, Virginia(玛
利亚·切莱斯特[Maria Celeste]的教
名) 27

伽桑狄 Gassendi, Pierre 31

高斯 Gauß, Johann Carl Friedrich 17,
112,154,218,224,225,236

哥白尼 Kopernikus, Nikolaus 10,
49,117,130,135,138,141,174,175,
189,258,264,320

歌德 Goethe, Johann Wolfgang von
120,212

格罗斯曼,马塞尔 Grossmann,
Marcel 62,66,144,149,150,201,
218,225,229,235,236,239,242,243,
245,248,250,258,265,266,269,270,
272,273,315

格罗斯曼,亚力山大 Grossmann, Al-
exander 5

谷登堡 Gutenberg, Johannes 3

H

- 哈比希特 Habicht, Conrad 59, 60, 65
 哈伯 Haber, Fritz 72, 73, 75, 76, 78
 哈勃 Hubble, Edwin Powell 298
 哈恩 Hahn, Otto 31
 哈密顿 Hamilton, Sir William Rowan 95
 哈默 Hammer, Carmen 4
 海森伯 Heisenberg, Werner 58
 海因利希, 克劳斯 Heinrich, Klaus 332, 341
 海因利希, 维尔纳 Heinrich, Werner 82
 赫尔戈特 Herrgott, Gerhard 5
 赫尔姆 Helm, Georg 169
 赫兹 Hertz, Heinrich Rudolf 26, 90
 黑格尔 Hegel, Georg Wilhelm Friedrich 34, 38, 324, 325
 惠更斯 Huygens, Christiaan 98, 322
 霍布斯 Hobbes, Thomas 31
 霍夫曼, 迪特 Hoffmann, Dieter 5
 霍夫曼, 文策尔 Hoffmann, Wenzel 210
 霍金 Hawking, Stephen 23
 霍普夫 Hopf, Ludwig 235

J

- 基尔霍夫 Kirchhoff, Gustav 118
 吉布斯 Gibbs, Josiah Willard 138, 139, 158
 加布里尔 Gabriel, Miriam 5
 金斯 Jeans, Sir James Hopwood 167, 176

K

- 卡尔达诺 Cardano, Gerolamo 25
 卡诺 Carnot, Nicolas Leonard Sadi 325
 卡斯塔涅蒂 Castagnetti, Giuseppe 4, 5, 82, 123
 卡瓦里利 Cavalieri, Bonaventura Francesco 137
 卡维尔尼 Caverni, Raffaello 137
 开普勒 Kepler, Friedrich Johannes 16, 22, 23, 321, 322
 坎尼扎罗 Cannizzaro, Stanislao 104
 康德, 霍斯特 Kant, Horst 5
 康德, 伊曼纽尔 Kant, Immanuel 18, 19, 34, 324
 科里 Corry, Leo 299
 克莱纳 Kleiner, Alfred 151
 克莱因 Klein, Ursula 5
 克劳修斯 Clausius, Rudolf Julius Emanuel 90, 114, 327
 克里斯托弗尔 Christoffel, Elwin Bruno 218, 225, 236, 275, 276
 克吕斯 Krüss, Hugo Andres 72, 73
 克洛普施托克 Klopstock, Friedrich Gottlieb 331
 库恩 Kuhn, Thomas Samuel 12, 13, 204
 库尔鲍姆 Kurlbaum, Ferdinand 119
 库仑 Coulomb, Charles Augustin de 211, 213, 326
 拉格朗日 Lagrange, Joseph Louis 95, 222, 269, 270, 271, 275, 276

L

拉卡托斯 Lakatos, Imre 121
 拉马克 Lamarck, Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monnet, Chevalier de 34
 拉普拉斯 Laplace, Pierre-Simon, Marquis de 34, 227
 莱布尼兹 Leibniz, Gottfried Wilhelm 154
 莱纳 Lehner, Christoph 5
 赖尔 Lyell, Sir Charles 42
 兰金 Rankine, William John Macquorn 90
 兰利 Langley, Samuel Pierpont 119
 劳厄 Laue, Max von 77, 172, 238
 劳赫豪普特 Rauchhaupt, Ulf von 4, 341
 勒菲弗 Lefèvre, Wolfgang 50
 勒迈特 Lemaître, Abbé Georges Henri 297
 勒纳德 Lenard, Philipp Eduard Anton 143, 152
 黎曼 Riemann, Georg Friedrich Bernhard 218, 225, 236, 242, 243, 244, 245, 264, 270, 273, 275, 282, 313, 316
 里格尔 Rieger, Simone 123, 341
 里纳斯维茨 Rynasiewicz, Robert 4, 5, 182, 184, 190
 里奇-库尔巴斯特罗 Ricci-Curbastro, Gregorio 225, 233, 236, 243, 245, 247, 248, 264, 275, 278, 279, 280, 281
 里兹 Ritz, Walter 156
 列维-契维塔 Levi-Civita, Tullio 218, 225, 233, 236
 留基伯 Leukipp 318
 卢默尔 Lummer, Otto 119
 鲁本斯 Rubens, Heinrich 71, 75,

76, 119

罗西尼 Rossini, Gioacchino 99
 洛伦兹 Lorentz, Hendrik Antoon 58, 90, 93, 94, 103, 108, 109, HO, 111, 119, 120, 123, 132, 133, 134, 135, 136, 138, 140, 141, 147, 149, 150, 151, 155, 156, 178, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 204, 218, 222, 226, 227, 228, 229, 231, 232, 233, 234, 237, 249, 263, 267, 272, 273, 295, 299, 310, 313, 314, 316, 327
 洛施密特 Loschmidt, Joseph 114

M

马赫 Mach, Ernst 65, 79, 95, 96, 122, 133, 169, 187, 206, 210, 212, 213, 214, 259, 267, 274, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 327, 328, 329, 339, 340
 马克思 Marx, Karl 34, 331
 马深孟 Schemmel, Matthias 4, 5, 190
 玛利奇, 米列娃 Marić, Mileva 27, 62, 64, 131, 132, 142, 144, 147, 148, 149, 151, 152, 153, 159
 迈克耳逊 Michelson, Albert Abraham 102, 118, 120, 148, 149, 150, 184, 187
 麦克斯韦 Maxwell, James Clerk 60, 90, 93, 99, 100, 103, 106, 108, 111, 112, 113, 114, 121, 123, 135, 146, 148, 154, 156, 158, 159, 164, 172, 178, 182, 203, 211, 267, 326, 327
 曼德尔 Mandl, Rudi W. 285, 286, 287, 288
 米 Mie, Gustav Adolf Ludwig 204,

209,210,260,279,283

密立根 Millikan, Robert Andrews
177

闵可夫斯基 Minkowski, Hermann
202,204,219,220,221,222,223,225,
236,246

莫雷 Morley, Edward Williams 102,
HO,118,120,148,149,150,184,187

N

耐格里 Nägeli, Karl von 117

能斯特 Nernst, Walther 71,72,74,
75,76,170

牛顿 Newton, Sir Isaac 12,15,16,
20,22,31,43,44,50,56,67,90,95,
96,108,122,136,144,152,153,201,
203,209,210,211,212,213,214,215,
219,224,227,229,233,234,239,240,
241,243,244,245,246,247,250,261,
271,272,273,274,278,280,281,283,
297,298,299,310,312,313,322,323,
324,325,326,329

诺德斯特罗姆 Nordström, Gunnar
204

诺顿 Norton, John 4,185,190,251

诺特 Noether, Emmy 266,270

O

欧几里得 Euklid 39,40,44,202,
218,317,325

欧拉 Euler, Leonhard 95,222

欧姆 Ohm, Georg Simon 179

P

珀蒂 Petit, Alexis Therese 161,166

帕邢 Paschen, Friedrich Louis Carl
Heinrich 119

庞加莱 Poincaré, Henri 25,65,109,
122,138,139,140,183,184,204,310,
328

培根 Bacon, Sir Francis 25

佩兰 Perrin, Jean 181

皮拉尼 Pirani, Felix 298

皮亚杰 Piaget, Jean 34,58

珀斯尔 Pössel, Markus 5

普朗克 Planck, Max 17,71,73,75,
93,94,95,118,119,120,121,123,
134,135,136,138,139,140,141,153,
154,161,162,163,165,166,167,168,
172,176,177,180,201,202,222,223,
327

普林斯海姆 Pringsheim, Peter 119

R

瑞利 Rayleigh, siehe Strutt Reinga-
num, Max 160

S

萨根 Sagan, Carl 17

萨瑟兰 Sutherland, William 140

塞曼 Zeeman, Pieter 107

塞万提斯 Cervantes, Miguel de 65

绍尔 Sauer, Tilman 4,82,251,299

舍普夫林 Schoepflin, Urs 341

施塔克 Stark, Johannes 203

施特鲁韦 Struve, Hermann 79,288

施瓦尔兹施尔德 Schwarzschild, Karl
312

斯宾诺莎 Spinoza, Baruch de 65

斯莫卢霍夫斯基 Smoluchowski, Mari-

an von 138,140,181
 斯塔切尔 Stachel, John 4,190,251,
 299
 斯特藩 Stefan, Josef 164
 斯特拉特(瑞利男爵) Strutt, John
 William, 3. Baron Rayleigh 167,
 176
 斯托克斯 Stokes, George Gabriel
 170,179
 斯维德伯格 Svedberg, Theodor 181
 索恩 Thorne, Kip Samuel 259
 索尔维 Solvay, Ernest 72,76
 索洛文 Solovine, Maurice 65
 索末菲 Sommerfeld, Arnold 71,94,
 225,250,261,276

T

塔尔穆特(塔尔梅) Talmud (Talmey),
 Max 61,64
 塔尔塔利亚 Tartaglia, Niccolò Fon-
 tana 25
 泰勒斯 Thaies von Milet 318
 汤姆逊 Thomson, Sir Joseph John 90
 陶丁 Taudin, Laurent 5
 托里拆利 Torricelli, Evangelista 137

W

瓦尔堡 Warburg, Emil 71,75,76
 瓦泽克 Wazeck, Milena 341
 外尔 Weyl, Hermann 78
 威尔第 Verdi, Giuseppe 137
 韦伯 Weber, Heinrich F. 143

韦特海默 Wertheimer, Max 186,
 187
 维恩 Wien, Wilhelm 120,149,154,
 163,175,176,327
 维斯特 Wüest, Conrad 147,148,152
 维特根斯坦 Wittgenstein, Ludwig
 299
 温伯格 Weinberg, Stephen 23
 温特格林 Wintergrün, Dirk 5
 温特勒 Winteler, Jost 160

X

希尔伯特 Hilbert, David 258,259,
 260,261,262,272,279,283,284,299,
 316
 谢林 Schelling, Friedrich Wilhelm Jo-
 seph von 324
 休谟 Hume, David 65,187,190

Y

亚伯拉罕 Abraham, Max 203,204,
 209,220,221,222,226
 亚里士多德 Aristoteles 22,26,27,
 30,31,43,44,50,136,190,312,317,
 318,319,320,322
 扬森 Janssen, Michel 4,5,190,251,
 299

Z

詹内托 Giannetto, Enrico 5

专 名 索 引

11 月 理 论 Novembertheorie 276,
277, 278

11 月 张 量 November-Tensor 247,
248, 275, 276, 277, 280, 281

1848 年的资产阶级革命 Revolution,
bürgerliche (von 1848) 70

1911 年的索尔维会议 Solvay-Konferenz (1911) 72, 76

1919 年的日全食 Sonnenfinsternis, totale (von 1919) 79, 216, 288

H 定理 H-Theorem 114

X 射线(伦琴射线) Röntgenstrahlen 62,
147, 152, 153

A

阿伏伽德罗常数 Avogadro-Zahl 107,
170, 171

阿尔高州立学校 Kantonsschule Aargau 147

埃伦费斯特佯谬 Ehrenfest-Paradox 217

爱因斯坦的革命 Revolution, Einstein-sche 15, 19, 111, 316, 317, 329, 331,
339

爱因斯坦张量 Einstein-Tensor 245,
247, 248, 275, 280, 281

奥林匹亚科学院 Akademie Olympia

65, 71, 187, 204

B

贝尔塔拉米不变式 Beltrami-Invariante
240, 241, 242, 243

比热 Wärme, spezifische 73, 74

边界问题 Grenzprobleme 88, 91, 92,
93, 94, 98, 99, 100, 107, 111, 114, 118,
121, 122, 130, 134, 144, 146, 156, 172,
173, 175, 185, 190, 209, 213, 327, 328,
338

变 分 法 Variationsrechnung 222,
269, 270, 275, 276

变分原理 Variationsprinzip 270, 271

标准科学 Normalwissenschaft 292

波茨坦的王家天文台 Sternwarte,
Königliche ~ in Potsdam 79

波粒二象性 Welle-Teilchen-Dualismus
165, 178, 329

玻耳兹曼原理 Boltzmanns Prinzip
162, 163, 176, 177

泊松方程 Poisson-Gleichung 227,
229, 232, 233, 239, 243, 249

不变性要求 Invarianzforderungen
238

不可见的机制 Mechanismen, unsichtbare 88, 97, 98, 99, 100, 107, 108

不可逆性 Irreversibilität 98, 106
 布朗运动 Brownsche Bewegung 60,
 93, 94, 114, 115, 116, 117, 138, 140,
 159, 165, 168, 169, 170, 171, 172, 173,
 174, 175, 179, 180, 181, 201
 布里丹的驴子 Buridans Esel 145

C

参照系 Bezugssystem 90, 109, 146,
 174, 183, 202, 207, 210, 218, 226, 289,
 290
 测地线 Geodäte 218, 223, 224
 长度收缩 Längenkontraktion 109,
 110, 184, 217
 场 Feld 17, 91, 109, 132, 145, 183,
 200, 207, 267, 280, 327
 场的变换 Transformationen der Felder
 183
 场方程 Feldgleichung 67, 68, 220,
 226, 227, 229, 231, 233, 234, 235, 237,
 238, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 248,
 249, 260, 262, 263, 265, 266, 267, 269,
 270, 273, 275, 276, 290, 292, 299, 314,
 315
 场论 Feldtheorie 78, 182, 183, 209,
 211, 268, 294
 超级显微镜 Ultramikroskop 172
 超距作用 Fernwirkungen 98
 创新 Innovation 13, 28, 35, 37, 38,
 39, 47, 50, 92, 308, 309, 329, 330, 333
 磁铁和导体的思想实验 Magnet und
 Leiter, Gedankenexperiment mit
 132, 146, 148
 从前经典力学到经典力学的转变
 Mechanik, Übergang von der vorklas-

sischen zur klassischen 137

D

等效原理 Äquivalenzprinzip 200,
 207, 212, 215, 217, 218, 219, 224, 226,
 230, 231, 265, 313, 314
 地质学 Geologie 42
 第一次世界大战 Weltkrieg, Erster
 70, 78, 80
 电磁场 Feld, elektromagnetisches
 67, 77, 109, 132, 146, 226, 278
 电磁辐射 Strahlung, elektromagne-
 tische 91
 电磁感应 Induktion 91, 175, 200, 215
 电磁学 Elektromagnetismus 88, 93,
 108, 185, 215, 260, 267, 270, 310, 327
 电导率 elektrische Leitfähigkeit 179
 电动力学 Elektrodynamik 29, 59,
 67, 69, 89, 90, 91, 94, 99, 108, 109,
 110, 118, 119, 123, 135, 152, 156, 165,
 174, 175, 182, 183, 185, 186, 190, 202,
 209, 214, 263, 264, 268, 325, 327
 电动力学的世界观 Weltbild, elektro-
 dynamisches 92
 电化学 Elektrochemie 75
 电解导电 Leitung, elektrolytische
 146
 电力学 Elektromechanik 72
 电气技术 Elektrotechnik 61
 电子媒体 Medien, elektronische 3,
 334, 336
 动力场 Feld, dynamisches 200
 动力学 Dynamik 29, 32, 41, 136
 动力学的引力效应 Gravitationseffek-
 te, dynamische 215

动量守恒 Impulserhaltung 231, 250, 269
 动体的电动力学 Elektrodynamik bewegter Körper 58, 60, 93, 108, 131, 133, 145, 147, 150, 151, 154, 156, 168, 173, 174, 175, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 189, 201

洞穴譬喻 Höhlengleichnis 17

杜隆 - 珀蒂定律 Dulong-Petit-Gesetz 161, 166

度规 Metrik 202, 219, 222, 224, 226, 229, 236, 238, 239, 240, 246, 267, 270, 275, 276, 295, 313

度规张量 Tensor, metrischer 229, 236

对应态定理 Theorem der korrespondierenden Zustände 110

对应原理 Korrespondenzprinzip 230, 231, 233, 234, 237, 239, 240, 241, 243, 244, 248, 249, 266, 271, 272, 273, 277, 279, 280, 281, 282, 283, 299, 313, 314

F

发射理论 Emissionstheorie 152, 153, 154, 155, 156, 174, 178, 182, 亦见光的微粒理论
 发生认识论 Epistemologie, genetische 58

发展 Entwicklung 11, 33, 34, 35, 37

法国大革命 Revolution, französische 324

反思 Reflexion 49, 50, 174, 237, 258, 262, 274, 282, 314, 315, 316, 338

反犹主义 Antisemitismus 77

范式 Paradigma 13

非单调逻辑 Logik, nichtmonotone 44, 45, 46

非欧几里得几何 Geometrie, nichteuklidische 312, 325, 329

菲涅耳曳引假说 Fresnelsche Mitführungshypothese 101

菲涅耳曳引系数 Fresnelscher Mitführungskoeffizient 148

斐索实验 Fizeau-Experiment 101, 102, 108, 148, 155, 185

费加罗问题 Figaroproblem 99, 103, 182, 327

分子 Molekül 104, 117, 153, 154, 157, 171, 172, 173, 179, 184

分子大小 Moleküldimension 59

分子速度分布 Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle 106

辐射的微观结构 Strahlung, Mikrostruktur der 182

辐射空腔中的镜面 Spiegel im Strahlungshohlraum 172

辐射理论 Strahlungstheorie 155, 161, 亦见热辐射

辐射压强 Strahlungsdruck 182

G

伽利略变换 Galilei-Transformationen 110, 183, 189

伽利略的弟子们 Galileis Schüler 136, 138, 141, 184, 189

伽利略原理 Galileisches Prinzip 68, 204, 205, 206, 207, 209, 220, 228

概率 Wahrscheinlichkeit 162

概率分布 Wahrscheinlichkeitsverteilung 180

杠杆定律 Hebelgesetz 29, 48
 高斯的曲面理论 Flächentheorie, Gaußsche 218, 224, 225, 236
 高斯钟形分布 Gaußsche Glockenverteilung 112, 154
 哥白尼过程 Kopernikusprozeß 10, 49, 111, 117, 130, 135, 138, 141, 159, 174, 175, 189, 237, 258, 264, 282, 310, 316, 329
 哥廷根科学院 Akademie, Göttinger 260
 巩固阶段 Konsolidierungsphase 273, 315
 固体量子论 Quantentheorie, fester Körper 74
 惯性 Trägheit 22, 206
 惯性参照系 Bezugssystem, inertiales 95, 96, 206, 207
 惯性力 Trägheitskräfte 81, 200, 201, 208, 214, 215, 220, 236
 惯性力与引力之间的等效性 Trägheits- und Gravitationskräfte, Äquivalenz zwischen 219
 惯性特征 Trägheitseigenschaften 293
 惯性系 Inertialsystem 90, 96, 102, 207, 208, 217, 220
 惯性效应 Trägheitswirkung 295
 惯性原理 Inertialprinzip, 见 Trägheitsprinzip
 惯性原理 Trägheitsprinzip 41, 43, 89, 136, 137, 189, 224
 惯性运动 Trägheitsbewegung 138, 225, 324
 惯性质量 Masse, träge 90, 96, 205
 惯性-重力场 Trägheits-Schwerefeld,

见引力-惯性场 Gravito-Inertial-Feld
 光的波动理论 Licht, Wellentheorie des 152, 178, 329
 光的传播 Lichtfortpflanzung 61, 189
 光的粒子说 Licht, Teilchentheorie des 152, 154, 155, 175, siehe auch Emissionstheorie
 光电效应 photoelektrischer Effekt 107, 177
 光量子假说 Lichtquantenhypothese 59, 71, 73, 76, 139, 154, 163, 165, 166, 175, 176, 177, 178, 179, 182, 183, 184, 201
 光谱分析 Spektralanalyse 112
 光速 Lichtgeschwindigkeit 61, 67, 102, 146, 148, 154, 155, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 216, 221, 223
 光线偏折 Lichtablenkung 215, 216
 光行差 Aberration 100, 101, 102, 147, 148, 155, 185
 光学 Optik 45, 59, 90, 100, 108, 152, 285, 325
 以太 Lichtäther 148, 亦见以太 Äther
 光致发光 Photolumineszenz 177
 广阔的知识(概览) Überblickwissen 61, 145, 159
 广义相对性原理 Relativitätsprinzip, verallgemeinertes 68, 69, 73, 79, 206, 218, 229, 230, 231, 233, 237, 238, 239, 241, 244, 248, 249, 265, 266, 269, 274, 276, 277, 279, 282, 313, 314
 广义相对论 Relativitätstheorie, allgemeine 56, 57, 66, 73, 77, 78, 79, 80, 81, 200, 227, 236, 258, 259, 260, 261,

263,266,271,275,284,286,288,290,
291,292,293,294,295,296,299,310,
311,314,315,316,329,339

国家科学院 National Academy of Sci-
ences 285

国家社会主义(即纳粹) Nationalsozial-
ismus 77,330

H

哈密顿原理 Hamiltonsches Prinzip
222

耗散 Dissipation 172

核心算符 Kernoperator 233, 239,
241,242,244,247,248,249

赫兹实验 Hertzsche Versuche 146

黑洞 schwarze Löcher 57

黑体 schwarzer Körper 118

红移 Rotverschiebung 209,215

互联网 Internet 28,308,334,339,亦
见电子媒体 Medien, elektronische

化学 Chemie 29,56,69,72,74,75,
76,78,102,103,104,107,172

J

机械的世界观 Weltbild, mechanistis-
ches 92,130,308,317,322,324

加速参照系 Bezugssystem, beschle-
unigtes 81,207,214,217,219,220,
230,236

加速度意味着力的模型 Beschleuni-
gung-impliziert-Kraft-Modell 89,
228,323

加速运动 Bewegung, beschleunigte
89

加州理工学院 California Institute of

Technology 298

胶体溶液 Kolloidlösungen 181

解析几何 Geometrie, analytische 234

介观物理学 Physik, mesoskopische
174

金属的电子理论 Elektronentheorie der
Metalle 157,159,160,161,162

近代的运动学说 Bewegungslehre,
neuzeitliche 39

进步 Fortschritt 10,11,13,14,15,
16,18,19,20,21,23,24,28,30,34,
38,311,314,316,330

进化 Evolution 10,34,36,41,42,48,
88,285

进化的认知理论 Erkenntnistheorie,
evolutionäre 36

经典场论 Feldtheorie, klassische
210,268

经典的引力理论 Gravitationstheorie,
klassische 67, 201, 203, 204, 209,
211,220,234,237,239,240,246,247,
249,310

经典物理学 Physik, klassische 57,
72,77,78,80,219,244,258,261,262,
263,264,266,270,272,275,278,310,
311,312,314,316,323,324,325,327,
328,336

静止参照系 Bezugssystem, ruhendes
110,182,188

静止的引力场 Gravitationsfeld, statis-
ches 220, 222, 223, 224, 233, 236,
246,313

绝对空间 Raum, absoluter 90,95,
96,122,210

绝对微分 Differentialkalkül, absoluter

81, 225, 233, 236, 264, 270, 275, 276,
283, 312

K

开放链接 Open Access 334, 338
看法(观点) Perspektive 12, 23, 26,
64, 141, 142, 144, 169, 185, 200, 262,
273, 312, 315, 330
科学标准的外在化 wissenschaftliche
Standards, Externalisierung der 333
科学的社会作用 Wissenschaft, gesell-
schaftliche Rolle der 32, 70
科学的物质手段 Wissenschaft, mate-
rielle Mittel der 10
科学革命 Revolution, wissenschaftli-
che 1, 10, 12, 13, 15, 33, 48, 50, 56,
308, 309, 310, 321
科学评价 Evaluierung von Wissen-
schaft 20, 335
科学文化 Wissenschaft, Kultur der
341
可变的光速 Lichtgeschwindigkeit,
variable 221
可变度规 Metrik, variable 219, 221,
224, 230
克里斯托弗尔符号 Christoffel-
Symbol 275, 276, 277, 282
空洞论证 Lochbetrachtung 266, 284,
289, 290
恐龙 Dinosaurier 36, 286
控制结构 Kontrollstruktur 313
库仑定律 Coulombsches Gesetz 211,
213, 326
框架理论 Entwurftheorie 201, 235,
248, 249, 250, 258, 259, 261, 262, 263,

264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271,
272, 273, 274, 275, 276, 277, 280, 281,
282, 283, 284, 288, 290, 315, 316

框架理论的场方程 Feldgleichung der
Entwurftheorie 249, 270, 271, 275

扩散 Diffusion 60, 106, 169, 170,
171, 173, 179, 180

扩散方程 Diffusionsgleichung 171,
180

扩散系数 Diffusionskoeffizient 173,
179

L

拉格朗日函数 Lagrange-Funktion
222, 269, 270, 271, 275, 276, 277

拉格朗日函数的变换性质 Transfor-
mationseigenschaft der Lagrange-
Funktion 269, 270, 281

离子理论 Ionentheorie 103

黎曼张量 Riemann-Tensor 236, 242,
243, 245, 250, 264, 270, 273, 275, 282,
313, 316

里奇张量 Ricci-Tensor 243, 245,
247, 248, 264, 275, 278, 279, 280, 281

理论物理学 Physik, theoretische 74,
77

理论知识 Wissen, theoretisches 308,
336

理想气体 Gas, ideales 163

理性的狡黠 List der Vernunft 38, 48

力的概念 Kraftbegriff 219, 224

力学 Mechanik 29, 32, 39, 40, 41, 48,
50, 56, 67, 78, 79, 88, 89, 90, 91, 93,
94, 95, 96, 97, 98, 102, 105, 106, 108,
109, 110, 111, 113, 115, 119, 122, 135,

136,154,155,156,175,206,207,209,
210,211,215,221,292,308,320,322,
323,327

力学相对性原理 Relativitätsprinzip der
Mechanik 90,148

连续介质模型 Modell eines kontinuier-
lichen Mediums 99, 亦见 连续统
Kontinuum

连续(性) Kontinuum 283,322

联邦工大(苏黎世) Polytechnikum
(Zürich) 62,131,146,147

两个思维模型的关联 mentales Mode-
ll, Verknüpfung zweier 208

量子革命 Quantenrevolution 15

量子论 Quantentheorie 75, 76, 77,
78,118,135,138,161,339

量子引力 Quantengravitation 339

洛伦兹变换 Lorentz-Transformationen
109,111,134,180,183,186,188,189,
222

洛伦兹的电动力学 Lorentz' Elektro-
dynamik 109, 110, 111, 133, 178,
182,183,184,186,187,188,189,226

洛伦兹的电子理论 Elektronentheorie,
Lorentz' 103 见洛伦兹的电动力
学 Lorentz' Elektrodynamik

洛伦兹的辅助变量 Lorentz' Hilfsvari-
able 184,185

洛伦兹模型 Lorentz-Modell 226,
227,228,231,232,233,234,237,249,
273,313,314

M

马赫对经典力学的批判 Mechanik,
Machsche Kritik der klassischen

212,213,299

马赫原理 Machs Prinzip 259, 294,
296,297,298,299

迈克耳逊-莫雷实验 Michelson-Mor-
ley-Experiment 102, 110, 118, 120,
148,149,150,184,187

麦克斯韦-玻耳兹曼分布 Maxwell-Bo-
ltzmann-Verteilung 113,114, 亦见分
子速度分布 Geschwindigkeitsvertei-
lung der Moleküle

麦克斯韦的电动力学理论 Maxwells
Theorie der Elektrodynamik 108,
135,146,164, 亦见电动力学 Elek-
trodynamik

麦克斯韦方程 Maxwellsche Gleichun-
gen 60,211

毛细管效应 Kapillarität 107

闵可夫斯基表述 Minkowski-Formalis-
mus 219,220,221,222,236,246

闵可夫斯基时空 Minkowskis Raumzeit
202,222

模型 Modell, 见原子模型 Atommod-
ell, 升降机模型 Aufzugsmodell, 加
速度意味着力的模型 Beschleunig-
ung-impliziert-Kraft-Modell, 运动意
意味着力模型 Bewegung-impliziert-
Kraft-Modell, 水桶模型 Eimermod-
ell, 弯曲时空模型 Gekrümmte-
Raumzeit-Modell, 以太模型
Äthermodell, 曲面模型 Krumme-
Fläche-Modell, 洛伦兹模型 Lorentz-
Modell, 思维模型 mentales Modell,
普朗克的振子模型 Plancks Resona-
tormodell, 现实模型 reales Modell,
重量产生下落模型 Schwere-erzeugt-

Fall-Modell

默认假定 Default-Annahme 45, 46,
208, 227, 229, 232, 234, 237, 238, 239,
241, 242, 245, 246, 247, 249, 268, 270,
272, 275, 279, 280, 281, 313, 314

N

内摩擦 Reibung, innere 60, 172

亦见粘滞 Viskosität

能量动量张量 Energieimpulstensor
238, 244, 294, 298, 313

能量和动量的平衡方程 Bilanzgleichung für die Erhaltung von Energie und Impuls 265, 266

能量均分定律 Gleichverteilungssatz der Energie 112, 113, 160, 162, 166,
167, 168, 177

能量条件 Energiebedingung 261

能量子, 亦见光量子假说 Energiequanten 177, siehe auch Lichtquantenhypothese

牛顿的引力定律 Newtons Gravitationsgesetz 16, 67, 90, 200, 203, 210,
227, 229, 233, 278

牛顿的运动定律 Newtons Bewegungsgesetz 108, 225

牛顿关于作用力等于反作用的定律 actio und reactio, Newtons Gesetz der Gleichheit von 108

牛顿极限情形 Grenzfall, Newtonscher 233, 243, 245, 246, 247, 250, 272, 278,
280, 281, 283, 299

诺特定理 Noethersches Theorem
266, 270

O

欧几里得几何 Geometrie, euklidische
39, 40, 44, 217, 218, 233, 317

P

抛体运动 Wurfbewegung 136, 137,
317, 320

膨胀的宇宙 Universum, sich ausdehnendes 57

偏振 Polarisation 156

普朗克的辐射定律 Plancks Strahlungsgesetz 93, 94, 119, 123, 134,
140, 165, 167, 168, 172, 176, 177, 180

普朗克的热辐射理论 Plancks Theorie der Wärmestrahlung 73, 143, 161,
162, 163, 166

普朗克的振子模型 Plancks Resonatormodell 73, 118, 153, 154, 161, 162,
165, 166, 167

普朗克的作用量量子 Plancks Wirkungsquantum 140, 202

普鲁士科学院 Akademie der Wissenschaften, Preußische 66, 68, 73, 76,
79, 82, 274, 279

Q

启发法 Heuristik 175, 208, 215, 222,
225, 231, 237, 249, 250, 258, 264, 265,
291, 292, 293, 295, 296, 298, 299, 311,
314, 315, 339

启蒙 Aufklärung 17, 323, 324

气体离化 Ionisierung der Gase 177

气体与辐射的相互对应 Parallelismus

von Gas und Strahlung 152,153
 气体运动理论 Gasttheorie,
 kinetische 98, 102, 103, 106, 107,
 111,112,113,116,119,135,144,154,
 157,158,159,160,167,168,170,173
 前苏格拉底 Vorsokratik 318,319
 强迫运动 Bewegung, erzwungene
 22,43,50,317,319,320
 倾向性知识 Wissen, Orientierungs
 328, 329, 339, 亦见 广阔的知识
 überblickswissen
 曲面模型 Krumme-Fläche-Modell
 218,219,224,225,230,231

R

热 Wärme 75,99,105
 热传导 Wärmeleitung 159,179
 热的力学观念 Wärme, mechanistische
 Auffassung der 105
 热的液体模型 Wärme,
 Flüssigkeitsmodell der 105
 热的运动学理论 Wärme, kinetische
 Theorie der 106,112,115,116,117,
 157,159,179
 热辐射 Wärmestrahlung 92,94,107,
 118,119,153,154,157,159,161,162,
 164,165,168,171,172,173,175,176,
 182,184,201
 热化学 Thermochemie 75
 热力学 Thermodynamik 29,75,88,
 89,90,91,92,94,97,98,112,113,
 114,115,119,135,169,171,173,174,
 175,185,327
 热力学第二定律 Thermodynamik,
 zweiter Hauptsatz der 114, 118,

119,120,135,173
 热力学第三定律 Thermodynamik,
 dritter Hauptsatzes der 74
 热平衡状态 Wärmegleichgewicht
 118,167,176,178
 热学 Wärmelehre, 见 热力学 Ther-
 modynamik
 热运动 Wärmebewegung 97,173
 认识上的孤立 epistemische Isolation
 116
 认知研究 Kognitionsforschung 42
 溶液理论 Lösungstheorie 171,174
 瑞利-金斯分布 Rayleigh-Jeans-Verteilung
 167,176
 弱引力场 Gravitationsfeld, schwaches
 233,244

S

塞曼效应 Zeeman-Effekt 107
 散度算符 Divergenzoperator 267
 熵 Entropie 91, 114, 120, 162, 163,
 176,177,327
 渗透压 Druck, osmotischer 170,
 171,179
 升降机模型 Aufzugsmodell 208,
 215,216,218,230,241
 生物学上的差异 Divergenz, biolo-
 gische 49
 时间测量 Zeit, Messung von 189
 时钟同步化 Synchronisation von
 Uhren 25, 139, 188, 亦见 同时性
 Gleichzeitigkeit
 实用知识 Wissen, praktisches 98,
 99,308,317,318,319,325,336
 实证主义 Positivismus 21

势 Potential, 见引力势 Gravitationspotential

思维模型 mentales Modell 10, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 88, 89, 91, 97, 103, 106, 112, 118, 123, 144, 166, 172, 189, 200, 208, 215, 216, 218, 223, 224, 225, 227, 230, 231, 232, 284, 290, 299, 308, 313, 319, 320, 322, 323, 327

守恒原理 Erhaltungsprinzip 105, 220, 230, 231, 232, 233, 234, 237, 241, 242, 244, 248, 249, 250, 266, 269, 270, 271, 277, 278, 281, 282, 283, 299, 314, 315

输运性质 Transporteigenschaften 112

数学策略 Strategie, mathematische 233, 234, 237, 239, 240, 241, 242, 247, 248, 249, 250, 264, 269, 270, 274, 275, 276, 282, 314, 315

双重策略 Doppelstrategie 231, 234, 237

水桶模型 Eimermodell 96, 215, 217, 218, 230, 241

水桶实验 Eimerversuch 96, 210, 211, 212, 214, 215, 274

水星近日点运动 Merkur, Periheldrehung des 66, 67, 79, 209, 263, 271, 272, 274, 279, 312

思想模型, 亦见思维模型 Denkmodell, siehe mentales Modell

斯特藩-玻耳兹曼定律 Stefan-Boltzmann-Gesetz 164

斯托克斯定律 Stokes' Gesetz 170, 179

四阶张量 Tensor vierter Mannigfaltigkeit 242

四维度规 Metrik, vierdimensionale 260, 267, 268

苏黎世笔记本 Züricher Notizbuch 67, 81, 235, 237, 238, 241, 246, 247, 248, 265, 266, 269, 271, 276, 277, 278, 283, 315

苏黎世联邦工学院 Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) 62, 225

速度相加 Geschwindigkeiten, Addition von 101, 155, 156, 185

T

梯度 Gradient 268

天然运动 Bewegung, natürliche 22, 26, 223, 225, 317, 319, 320, 324, 325

天体物理学 Astrophysik 285

天文学 Astronomie 79

挑战对象 Objekte, herausfordernde 40

通俗科学 Populärwissenschaft 61, 63, 70, 85, 122, 188, 313, 328, 330

同化过程 Assimilation 314

同时的发现 Simultanentdeckungen 139

同时性 Gleichzeitigkeit 15, 26, 139, 187, 188, 189, 190, 204, 217

同时性的相对性 Relativität der Gleichzeitigkeit 189

同行评审 Peer Review 24, 333

统计力学 Mechanik, statistische 98, 130, 135, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 167, 180

统计物理学 Physik, statistische 111, 139, 176

统一场论 Feldtheorie, einheitliche
69, 77, 283, 295, 297

W

外在表象 Repräsentation, externe 47

弯曲时空 Raumzeit, gekrümmte 22,
201, 229, 267, 275, 329

弯曲时空模型 Gekrümmte-Raumzeit-
Modell 225, 231

威廉皇帝物理化学和电化学研究所
Kaiser-Wilhelm-Institut für Phys-
ikalische Chemie und Elektrochemie
72, 75, 76

威廉皇帝物理研究所 Kaiser-Wilhelm-
Institut für Physik 74, 75

威廉皇帝学会 Kaiser-Wilhelm-Gesell-
schaft 75

微分算符 Differentialoperator 227,
236, 239, 240, 267, 268, 275, 313

微正则系综 Ensemble, mikrokanonis-
ches 158

维恩的辐射定律 Wiens Strahlungsge-
setz 120, 154, 163, 164, 175, 176,
177

文化史 Kulturgeschichte 13, 24, 36

物理策略 Strategie, physikalische
233, 239, 241, 242, 247, 248, 249, 250,
263, 264, 269, 270, 274, 282, 314, 315

物理化学, 亦见电化学和热化学 Che-
mie, physikalische 73, 76, 143, 146,
siehe auch Elektrochemie und Ther-
mochemie

物理学 Physik 56, 69, 82, 102

物体相对于光以太的运动 Relativbe-
wegung der Körper gegen den

Lichtäther 148, 149

物质的电磁起源 Materie, elektromag-
netischer Ursprung der 279

X

狭义相对论 Relativitätstheorie, spez-
ielle 56, 58, 61, 66, 67, 68, 71, 78,
81, 133, 134, 136, 179, 182, 184, 189,
200, 204, 206, 209, 219, 226, 238, 264,
265, 267, 292, 310

狭义相对论物理学 Physik, speziell-
relativistische 264, 311, 314

现实模型 reales Modell 47, 48

现实主义原理 Aktualismus, Prinzip
des 41

相对论 Relativitätstheorie 39, 41,
135

相对论的引力理论 Gravitationstheo-
rie, relativistische 71, 77, 204, 205,
206, 207, 208, 209, 212, 220, 222, 224,
225, 226, 228, 229, 232, 235, 263, 272,
278, 313

相对论力学 Mechanik, relativistische
211, 214

相对性革命 Relativitätsrevolution
15, 202

相对性原理 Relativitätsprinzip 60,
102, 156, 183, 185, 186

修正项 Korrekturterme 247, 249

虚设的系综 Ensemble, virtuelles
113, 157, 158

悬浮液 Suspension 172, 179, 181

旋转参照系 Bezugssystem, rotierendes
212, 214, 215, 217, 234, 236, 241, 274

学科 Disziplin (wissenschaftliche)

332,337

Y

亚里士多德的世界观 Weltbild, aristotelisches 312,321,324, 亦见亚里士多德主义 Aristotelismus

亚里士多德主义 Aristotelismus 22, 30, 43, 135, 136, 138, 317, 318, 319, 322

遗传机制 Vererbungsmechanismen 47

以太 Äther 26,27,45,46,61,88,98, 99,100,101,102,105,107,108,109, 110,111,121,122,133,135,141,143, 145,146,147,148,149,150,151,155, 156,157,168,169,179,182,183,184, 186,189,263,264,294,295,297,319, 322,326,327,329

因果性 Kausalität 15,259,260,289

阴极射线 Kathodenstrahlen 143

引力 Gravitation 44, 50, 67, 68, 71, 98,199,200,203,205,206,215,219, 220,226,228,229,230,233,236,258, 265,267,289,319

引力 Gravitationskraft 81, 90, 144, 208,219,220,323,324

引力波 Gravitationswellen 80, 200, 211,326

引力场 Gravitationsfeld 207, 208, 211,212,214,215,216,217,218,219, 220,224,225,226,227,228,229,230, 232,235,238,239,244,246,265,266, 267,268,275,276,281,282,286,289, 292,326

引力场方程 Gravitationsfeldgleichung

67,225,226,229,230,231,232,234, 238,246,260,261,265,269,271,311, 313, 亦见场方程 Feldgleichung

引力场论 Gravitation, Feldtheorie der 67,69,200,201,213,214,226, 232,234,236,260,295,327

引力的相互作用 Gravitationswechselwirkung 326

引力的以太模型 Gravitation, Äthermodell der 326

引力-惯性场 Gravito-Inertial-Feld 215,219,230

引力荷 Gravitationsladung 326

引力势 Gravitationspotential 219, 221,223,224,226,227,229,236,239, 246,260,267,268,272,280,289,290, 291,299

引力透镜 Gravitationslinse 80,216, 284,285,286,287,288

引力质量 Masse, schwere 90,205

引力质量与惯性质量的等效性 Masse, Gleichheit träger und schwerer 206, 211,238

永动机 perpetuum mobile 14,185

有机化学 Chemie, organische 103, 104

有质力 ponderomotorische Kraft 109

宇宙常数 Konstante, kosmologische 293

宇宙辐射 Strahlung, kosmische 286

宇宙论 Kosmologie 80,293,294

语义网络 Netz, semantisches 340

原初相对论 Proto-Relativitätstheorie 184,186

原子 Atom 60, 97, 103, 104, 106,

109, 112, 115, 121, 143, 144, 157, 159,
 161, 169, 173, 318, 327, 329
 原子大小 Atomgröße 60, 170, 171,
 180
 原子论者的电学说 Elektrizitätstheorie,
 atomistische 135
 原子模型 Atommodell 72, 102, 106,
 107, 169
 原子主义 Atomismus 31, 72, 88, 97,
 99, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 119,
 142, 143, 144, 145, 146, 147, 151, 152,
 157, 159, 169, 173, 179, 180, 181, 318,
 319, 322
 运动参照系 Bezugssystem, bewegtes
 81, 108, 109, 111, 132, 148, 182, 183,
 185, 186, 187, 188, 189, 204, 205, 208,
 234, 241
 运动的观察者 Beobachter, bewegter
 61, 132, 141, 146, 155, 183, 185, 200,
 207
 运动电子的质量 Masse, bewegter Ele-
 ktronen 183
 运动叠加原理 Superpositionsprinzip
 136, 137, 189
 运动方程 Bewegungsgleichung 218,
 220, 222, 223, 224, 225, 226, 228, 229,
 230, 235, 238, 246, 247, 265, 268, 269,
 272, 273, 275, 276, 299
 运动学 Kinematik 186, 187, 189
 运动意味着力的模型 Bewegung-impli-
 ziert-Kraft-Modell 44, 47, 320, 323

Z

在一个引力场中的时间概念 Zeit, Be-
 griff der $\sim$ in einem Gravitationsfeld

217
 早期的高等文明 Hochkulturen, frühe
 29
 张量 Tensor 224, 238, 亦见爱因斯坦
 张量 Einstein-Tensor, 能量-动量张
 量 Energieimpulstensor, 里奇张量
 Ricci-Tensor, 黎曼张量 Riemann-
 Tensor
 涨落 Fluktuation, 亦见 Schwankungen
 涨落 Schwankungen 116, 163, 164,
 165, 171, 172, 173, 176, 178, 179, 180
 涨落和耗散的相互作用 Fluktuation
 und Dissipation, Wechselwirkung von
 172
 振子 Resonatoren 73, 亦见普朗克的
 振子模型 Plancks Resonatormodell
 振子的能量 Resonatorenenergie 120,
 165
 正则系综 Ensemble, kanonisches 158
 知识表达 Wissen, Repräsentation von
 43, 46
 知识的结构 Wissen, Architektur
 des 3, 10, 33, 44, 47, 232, 312, 313,
 314, 339, 340
 知识的累积过程 Wissen, Akkumula-
 tionsprozesse von 12, 16, 32, 321
 知识的历史理论 Wissen, historische
 Theorie des 42, 309
 知识的转变过程 Wissen, Transforma-
 tionsprozesse von 32, 43, 81, 308,
 321, 331
 知识的综合过程和分化过程 Wissen,
 Integrations-und Desintegrationsproz-
 esse des 97, 99, 104, 208, 215, 231,
 232, 234, 249, 292, 314, 337, 339

知识发展的动力学 Wissensentwicklung, Dynamik der 49, 314
 知识体系 Wissenssystem 10, 27, 37, 48, 49, 190
 知识图景 Wissensbilder 330, 332, 335, 337, 339
 知识组织 Wissensorganisation 323
 直觉物理学 Physik, intuitive 320, 321, 323, 324, 亦见直觉知识 Wissen, intuitives
 直觉知识 Wissen, intuitives 43, 47, 98, 99, 308, 317, 318, 319, 322
 质能关系 Masse-Energie-Beziehung 205, 238, 267
 致欧洲人的宣言 Aufruf an die Europäer 69
 致文明世界的宣言 Aufruf an die Kulturwelt 69
 中国哲学 Philosophie, chinesische 318
 中性运动 Bewegung, neutrale 22

重量产生下落模型 Schwere-erzeugt-Fall-Modell 320
 转动 Rotation 250
 紫外灾难 Ultraviolett-katastrophe 168, 177
 自然哲学 Naturphilosophie 22, 31, 43, 136, 317, 324
 自由落体 Fall, freier 90
 宗教 Religion 63, 317, 318, 322, 332
 综合的模型(式) Modell, integriertes 208
 作用量的极值 Wirkung, Extremwert der 223
 坐标变换 Koordinatentransformation 188, 241, 265, 269
 坐标条件 Koordinatenbedingung 243, 244, 278
 坐标限制 Koordinatenbeschränkung 237, 240, 241, 243, 244, 245, 249, 261, 265, 266, 276, 277, 278, 281

译 后 记

这个译本的正文初稿是由关洪教授翻译的。他于2007年4月27日开始翻译,同年9月底译毕,用了近五个月。其间,他还为《胡宁传》的一些事情忙着。10月2日,他给我一封电子邮件,说自己已完成译稿,“在10月中旬可能会进京一趟,参加纪念胡宁先生的一个会,但通知尚未收到”。我在10月中下旬去美国开会,并随便查了些资料,想着回来后与他联系,不料从编辑口中得知,他已于10月30日不幸因动脉瘤破裂去世。

这一消息实在太突然了。我无法相信天性乐观的关洪已驾鹤西去,直到飞到广州参加追悼会后,才回到现实中。回想与关洪20多年的交往,一幕幕仿佛就在眼前。我们是1985年秋在一次学术研讨会上相识的,那时我还是一位在读的硕士研究生。会上我们为的一件事争了起来,后来不打不相识,因对科学史和科学哲学的共同兴趣,我们的联系密切起来。

关洪毕业于北京大学物理系,师从著名物理学家胡宁。他的身上有一种与生俱来的求真精神,追求学术是他毕生的理想。也正因为此,他的一生充满坎坷,颇为不顺,但从未放弃自己的理想。细想起来,我们之所以能成为忘年交,性格上应有许多相似之处。

关洪是一个理想主义者。这与他出生书香门第,自己又从事科学研究不无关系。受过很好国文训练的他,喜欢咬文嚼字。有时为了某个字改得是否妥当,他常引经据典,与编辑理论,显得有点“不留情面”。尽管我不一定赞同关洪的每一个论点,但从内心深处敬佩他。不为别的,只因他身上的求真精神。在学术问题上,他坚持原则,绝不作乡愿。他指出过一些学术权威的错误。他深知这样做会引来当事者的不满,并导致对他的人身攻击,但他毫不退让。同时,如果一旦发现自己错了,他会毫不犹豫地加以承认,丝毫不考虑所谓的面子,也不像某些仅因年长就自认为权威的人那样文过饰非。学术乃

天下之公器，任何人都不能以权威自居。

关洪是一位热爱生活的人。每逢周末，只要条件许可，他都会到学生舞池展示和放松自己。跟朋友在一起，他爱讲一些“世说新语”式的笑话。在不太顺的处境下，他仍能醉心于自己喜爱的事业，给世人留下了《量子力学基础》、《量子力学的基本概念》、《物理学史选讲》、《一代神话——哥本哈根学派》、《原子论的历史和现状：对物质微观构造认识的发展》以及《空间：从相对论到M理论的历史》等多本影响深远的专著，其中《物理学史讲座》还在台湾出版了繁体中文版。同时，他还翻译了《乱世学人：维格纳自传》、《物理定律的本性》、《基本粒子物理学史》以及《越来越快：飞奔的时代飞奔的一切》等名著，写下了数十篇有影响力的学术论文。但天妒英才，未假以年，殊为可惜。网上有一首悼念关洪的诗，其中几句深得我心：“文章千古凭谁语，尘世孤球任自倾。已尽全心穷物理，未留余力续人生。”

关洪去世后，编辑与我商量如何处理他的译稿。作为朋友，我义不容辞地承担了后续工作。没有想到，这一接手，竟用了两年的时间。

关洪的译稿是根据一个供讨论用的英译稿转译的。起初，我认为只需责任编辑加工一下，不用我做太多工作，译稿就可正式出版了。在对照德文检查了编辑所提的部分修改意见后，我有点犹豫了，可也不能另起炉灶，弃关洪的译稿不用。可能因为走得太匆忙，关洪没有来得及对译稿进行仔细修订。

在随后近两年的时间里，我对照德文对关洪的译稿进行了修订、补充和完善，并将人名索引和专名索引也一并译出。其间我也曾有过放弃或另请高明的想法，但最终还是坚持下来了。必须说明的是，为了照顾英语读者，英译本对少量内容做了删节，比如，去掉了英语读者不熟悉的典故，改写为与内容相符的其他说法。凡属这样的地方，我都恢复从德文重译，对于读者可能不明白的典故，以脚注的形式加以说明。但对于一些德文原文比较晦涩，但英译本较为简洁之处，则选从英译本。考虑到我国能找到的外文读物中，英文读物占绝大多数这一现实，各章后所附的推荐读物，也以英译本为准。在修订译稿的过程中，我与原作者和英译者不时联系，改正了原文中多处排印错误和叙述不够准确之处。

原书作者署名只有一人，但事实上这本书可以看做是众多专家的智慧结晶。从每章后面所附的说明就可以看出，这本书集中了当今世界上研究爱因

斯坦的一些权威专家的观点。作者雷恩在多数情况下更像一位科研组织者，他所在的马克斯·普朗克科学史研究所则创造了绝无仅有的条件，让有关学者们聚在一起，专心致志地进行研究，不用为津贴申请课题。关洪生前对马普所的这种研究氛围非常向往，当他听说有希望能与这些人当面探讨时，非常兴奋，可惜未能如愿。他应该是国内少数几位有资格与国际同行直接对话的科学史家之一。

关洪生前写有一篇未完成的“译者引言”草稿。兹录如下：

本书作者于尔根·雷恩(Jürgen Renn)教授是德国马克斯·普朗克科学史研究所现任所长，一位研究爱因斯坦和相对论历史的专家。他在这方面发表过不少著作，亦对20年前开始陆续出版的《爱因斯坦全集》的编辑工作多所贡献。雷恩继在2005年领衔编辑出版了三卷本的《阿尔伯特·爱因斯坦——宇宙总工程师》之后，2006年又主持编辑出版了四卷本的《广义相对论的起源》。同年，雷恩另一部单独署名的专著《站在巨人和矮子的肩上——爱因斯坦未完成的革命》问世，现在读者看到的就是这部书的中译本。这部书的原文是德文，译者根据作者的同事琳迪·迪瓦尔奇(Lindy Divarci)女士提供的英译稿转译。原书取名的意思指爱因斯坦先后创建狭义相对论和广义相对论，以及他在1905年这个“奇迹年”的其他重要贡献，都不仅以前辈大师们取得的成就为基础，而且也得益于一些名不见经传的朋友和其他人的意见。中文书名中的“矮子”，德语名词是Zwerg，英语是dwarf，亦有“侏儒”的释义。考虑到侏儒是在生理上有先天缺陷的人，而矮子只是不如巨人那么高大的正常人，事实上书中讲的就是“小人物”的意思，所以我们不采用“侏儒”的译法。

本书除了根据正式发表的著作之外，还引用了大量的书信、档案和访谈等材料。特别是，本书根据的部分资料，只是在近年才被发现或者得以利用。例如，爱因斯坦记载了他早期对引力理论研究的《苏黎世笔记本》，是关于广义相对论起源和爱因斯坦对引力理论思考过程的重要资料。在2006年出版的四卷本《广义相对论的起源》里，对此有详尽的论述，本书亦利用了这些最新的研究成果。此外，书中对于爱因斯坦前去柏林普鲁士科学院的背景，对爱因斯坦在广义相对论之前的“框架理

论”的阐述,正式提出“引力透镜”前后的故事和爱因斯坦在其中所起的作用,还有爱因斯坦同希尔伯特关于广义相对论场方程的优先权问题等方面,在国内见得到的其他出版物中似乎还没有看到过如此详尽的叙述。此外,书中在充分肯定了洛伦兹电子论的积极意义的同时,却对普朗克量子假设的实质有别样的评价。总而言之,本书对狭义相对论和广义相对论的产生过程和爱因斯坦所掀起的物理学革命,无论在资料的丰富、论证的深入、观点的新颖和视角的广阔等方面,都明显超过了以前出版过的同类著作。

这部科学史著作的阐述方法,与国内绝大部分读者的阅读习惯有一定的距离。这主要指的是书中除了从科学、哲学、社会和历史等角度阐述之外,还在相当大的程度上从个人的认知过程和人类知识发展过程的角度进行论述。特别是其中关系到认知心理学的一些名词术语,恐怕许多读者是不熟悉的。

例如,书中多次运用的“思维模型”和“哥白尼过程”,如果不明白它们的意思的话,就不容易理解有关的阐述。好在书中第一章里有一节的标题就是“思维模型”,并且在这一章的最后一节里亦有对“哥白尼过程”的解释。建议读者首先把第一章认真读一遍,我就不在这里饶舌了。

可是,也有书中未曾说明的专门名词。例如“启发式方法”(Heuristik,或译“启发法”),这不是一般意义上讲的启发诱导,而是一个有特殊含义的心理学名词。据《中国大百科全书·心理学卷》“启发式方法”条目,它是“人在解决问题所采取的一种根据经验规则进行发现的方法。其特点是在解决问题时,利用过去的经验,选择已经行之有效的办法,而不是系统地、以确定的步骤去寻求答案”;“启发式解决问题的方法是与算法相对立的。算法是把各种可能性都一一进行尝试,最终能找到问题的答案,但它是在很大的问题空间内,花费大量的时间和精力才能求得答案。启发式方法则是在有限的搜索空间内,大大减少尝试的数量,能迅速地达到问题的解决。但由于这种方法具有尝试错误的特点,所以也有失败的可能性。科学家的许多重大发现,常常是利用极为简单的启发式规则”。请读者注意这一解释。

中译本里对一些生疏的人名和其他词语,加了不少的“译者注”。原

书没有注解,所以中译本的所有脚注都是译者注。但译者没有对书中涉及的科学家和科学内容加注,因为这一工作似乎是没有止境的。倘若要为不具备起码的数学和物理学知识的读者补充有关的知识,恐怕要写有一本小册子那么长的附录,我不认为那是一种合适的做法。如果真的缺乏这方面的基础,建议先看一两本介绍狭义相对论和广义相对论的普及读物,再来读这本书。

书中每一章后面附有详细的参考文献目录,中译本照样印出,以供研究者参考。但涉及的文献太多,其中大部分是我所没有见到过,并且在国内亦难以找到的。由于条件所限,译者未能对正文中的引文一一核对。而且,译者只是对作者序言后面所附的“推荐读物”里已经出了中译本的少数几种出版物加了注解。

因为译者水平有限,特别对书中大量论及的认知过程的叙述很不熟悉

关洪的“译者引言”到此为止,最后一句话连句号都没有。关洪给我的这封邮件最后定格于2007年10月2日上午11点19分。我不知道他当时的精神状况如何,是否意识到自己的身体出了问题。乐观的他一定没有想到自己这么快就会离开人世。他特别强调这篇“译者引言”尚未完成,希望我提意见,想着有一天他还会再修改。而事实上,编辑告诉我,他也已准备进行修改,可惜病魔来得太突然了。

想提请读者注意的是,我们的一些译法与现有的译法不太一致。比如,“动态理论”是从Kinematik(相当于英文的kinetic theory)翻译的。而这一名词又来自kinetische Gastheorie(相当于英文的kinetic theory of gases),旧版的《英汉物理学词汇》(科学出版社,1975年)将后者译为“气体分子运动论”,但原文并没有专指分子;新版的《英汉物理学词汇》(北京大学出版社,2002年)又改译“气体动理论”,似乎也不大顺口。其实这一名词的原文是相对于气体的静态理论而言的。原来,在波义耳和牛顿先后提出过的气体的原子模型里,气体的各个原子都是静止不动的(对此关洪在其大作《原子论的历史和现状——对物质微观构造认识的发展》[北京大学出版社,2006年]第2.2节中曾专门做过论述)。在后来的气体模型中,气体分子是不断做自由运动和不时发生碰撞的,所以应当相应称为“气体动态理论”。在现代物理学理论

里,在一个物理系统中不断运动的组分,不一定是分子,也可以是原子、电子或者其他粒子甚至“准粒子”。所以,不分青红皂白地把 Kinematik 译成“分子运动论”就更加没有道理了,这里一律译成“动态理论”。allgemeines Relativitätsprinzip 译为“广义相对性原理”,而 verallgemeinertes Relativitätsprinzip 则译为“推广的相对性原理”,请读者注意两者的差别。类似的地方还有不少,请读者参考书尾的“专名索引”。

现有的译稿与关洪的译稿已有一定的差别,但对一些在我看来能反映关洪译稿特点的内容,则尽量做了保留,想必关洪在天之灵也会同意。

本书即将付梓之际,有幸得到中国科学院物理研究所曹则贤研究员的大力支持。曹则贤研究员通读了译文,给出了一些有益的修改建议。能有关洪、则贤这样的朋友为伴,实为人生一大幸事!

本书的责任编辑北大出版社综合编辑室的闵艳芸为本书的译稿花了不少心血,室主任杨书澜一直支持科学文化书籍的出版,非常有耐心地等待我一再推迟的书稿。没有她们的理解与支持,这本译作的问世是不能想象的。

尽管我们做了最大努力,书中一定还有不少不尽如意之处,望读者不吝指正。

在写这篇译后记时,背景音乐里传来陈慧娴演唱的《千千阙歌》。她那忧伤而深沉的声音深深地打动了我的。

.....

一瞬间,太多东西要讲
可惜即将在各一方
只好深深把这刻尽凝望

.....

临行临别,才顿感哀伤的漂亮
原来全是你,令我的思忆漫长

.....

方在庆

2009年10月9日于北京

作者简介

于尔根·雷恩（Jürgen Renn, 1958—），德国柏林马克斯·普朗克科学史研究所所长，研究重点为：力学知识在古代的兴起，文艺复兴以来实用知识与理论知识的相互作用，从经典物理学到现代物理学的过渡，相对论的兴起，新媒体在科学史中的使用等。

译者简介

关洪（1935—2007），著名科学史家，中山大学物理系教授。著有《量子力学基础》、《量子力学的基本概念》、《物理学史选讲》、《一代神话——哥本哈根学派》、《原子论的历史和现状：对物质微观构造认识的发展》以及《胡宁传》等。

方在庆（1963—），中国科学院自然科学史研究所研究员。研究方向为科学史、科学哲学、科技政策与科学文化。著有《科技发展与文化背景》、《爱因斯坦、德国科学与文化》、《一个真实的爱因斯坦——爱因斯坦画传》等。