



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

Elsevier Handbook of  
the Philosophy of  
Science

爱思唯尔  
科学哲学手册

物理学哲学 (中)

Philosophy of Physics

---

英文本丛书主编

[以色列] 道·加比 (Dov Gabbay)

[加拿大] 保罗·撒加德 (Paul Thagard)

[加拿大] 约翰·伍兹 (John Woods)

中译本丛书主编

郭贵春 殷杰

---

本卷主编

[美国] 约翰·厄尔曼 (John Earman)

[英国] 杰里米·巴特菲尔德 (Jeremy Butterfield)

本卷译者

程瑞 赵丹 王凯宁 李继堂



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”  
国家重点图书  
出版规划项目

Elsevier Handbook of  
the Philosophy of  
Science

# 爱思唯尔 科学哲学手册

物理学哲学(中)

Philosophy of Physics

---

英文本丛书主编

[以色列]道·加比(Dov Gabbay)

[加拿大]保罗·撒加德(Paul Thagard)

[加拿大]约翰·伍兹(John Woods)

中译本丛书主编

郭贵春 殷杰

---

本卷主编

[美国]约翰·厄尔曼(John Earman)

[英国]杰里米·巴特菲尔德(Jeremy Butterfield)

本卷译者

程瑞 赵丹 王凯宁 李继堂



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

物理学哲学 / 郭贵春, 殷杰主编. 程瑞, 赵丹, 王凯宁, 李继堂译. —北京: 北京师范大学出版社, 2015.12

(爱思唯尔科学哲学手册)

ISBN 978-7-303-19177-2

I. ①物… II. ①郭…②殷… III. ①物理学哲学 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 164895 号

---

营 销 中 心 电 话 010-58805072 58807651  
北师大出版社学术著作与大众读物分社 <http://xueda.bnup.com>

WULIXUE ZHEXUE

出版发行: 北京师范大学出版社 [www.bnup.com](http://www.bnup.com)

北京市海淀区新街口外大街 19 号

邮政编码: 100875

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 109

字 数: 1601 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 350.00 元

---

策划编辑: 饶 涛

责任编辑: 刘文平

美术编辑: 王齐云

装帧设计: 王齐云

责任校对: 陈 民

责任印制: 马 洁

### 版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58805079

# 目 录

第一章 经典力学中的辛约化	1
题词	1
1. 引言	2
2. 辛约化: 综述	9
3. 一些几何工具	32
4. 李群的作用量	61
5. 泊松流形	88
6. 重温对称性和守恒性: 动量映射	115
7. 约化	132
第二章 力学中时间和变化的表征	149
1. 引言	150
2. 哈密顿和拉格朗日力学	156
3. 辛事物	164
4. 拉格朗日场论	173
5. 良态场理论中的时间和变化	183
6. 复杂情况	193
7. 广义相对论里的时间问题	220
第三章 经典相对论	259
1. 引言	259
2. 相对论的结构	260
3. 专题讨论	292
第四章 非相对论量子力学	316

1. 理论 317
2. 运动学形式体系从哪里来? 352
3. 经验内容 366
4. 不确定性 386
5. “测量问题” 402
6. 非定域性 429
7. 数学附录 445

## 第五章 在经典与量子之间 471

1. 引言 471
2. 早期历史 478
3. 哥本哈根：再评述 490
4. 量子化 506
5. 极限  $\hbar \rightarrow 0$  535
6. 极限  $N \rightarrow \infty$  559
7. 为什么是经典的态与可观测量? 586
8. 尾声 602

## 第六章 量子信息与量子计算 648

1. 引言 648
2. 经典信息 651
3. 量子信息 659
4. 借助于纠缠实现的量子传输 686
5. 量子密码学 691
6. 量子计算 714
7. 量子信息视角下的量子力学基础 735

## 第七章 量子场论的概念基础 772

1. 量子化场概念导论 772
2. 标量场 774
3. 旋量场 789
4. 规范场 795

5. 布劳特—恩格勒—希格斯机制	805
6. 么正性	810
7. 重整化	817
8. 反常	823
9. 渐近自由	827
10. 拓扑扭曲	830
11. 禁闭	834
12. 展望	836
第八章 代数量子场论	842
导论	842
1. 代数学前言	843
2. 可观测量代数网的结构	852
3. 非局域性及其 AQFT 中的开放系统	864
4. 粒子图景	871
5. 在 AQFT 中值的确定性问题的确定性	877
6. 量子场和时空点	882
7. 不等价表象的问题	894
8. 局域化的可输运自同态的范畴 $\Delta$	899
9. 从场到表象	923
10. 从表征到场	932
11. 重构定理的基本含义	961
附录 对称张量 * 范畴的抽象对偶性理论	990
第九章 经典统计物理基础概论	1054
1. 引言	1054
2. 正统热力学	1065
3. 分子运动论——从伯努利到麦克斯韦	1075
4. 玻耳兹曼	1088
5. 吉布斯统计力学	1134
6. 统计力学的现代方法	1150

7. 随机动力学	1188
第十章 量子统计物理	1241
1. 引言	1241
2. 早期成就	1244
3. 公理化修整	1257
4. KMS 平衡条件	1284
5. KMS 条件、QSP 和热力学	1293
6. QSP 何去何从?	1327
第十一章 宇宙哲学中的问题	1370
1. 引言	1370
2. 宇宙学概论	1372
3. 问题 A: 宇宙的唯一性	1407
4. 问题 B: 宇宙在空间和时间上的巨大尺度	1411
5. 问题 C: 早期宇宙中的无约束能量	1425
6. 问题 D: 解释宇宙——起源的问题	1427
7. 问题 E: 作为存在背景的宇宙	1432
8. 问题 F: 明确的哲学基础	1435
9. 关键问题	1442
10. 结论	1468
第十二章 量子引力	1489
1. 引言	1489
2. 方法	1493
3. 方法论问题	1506
4. 空间和时间的本质	1510
5. 与其他未决问题之间的关系	1524
6. 结论	1528
第十三章 经典物理学中的对称性与不变性	1540
1. 引言	1540
2. 物体的对称性与定律的对称性	1541

3. 对称性与群论：早期历史	1546
4. 什么是物理学中的对称性？定义与种类	1552
5. 对称性在经典物理学中的应用	1555
6. 广义相对论中的广义协变性	1559
7. 诺特定理	1565
8. 经典物理学中对称性的解释	1570
<b>第十四章 现代物理学中的决定论</b>	<b>1582</b>
1. 引言	1582
2. 引论	1583
3. 经典物理学中的决定论和非决定论	1589
4. 狭义相对论物理中的决定论	1610
5. 普通量子力学中的决定论与非决定论	1616
6. 经典广义相对论中的决定论	1627
7. 相对论量子场论中的决定论	1642
8. 决定论和量子引力	1644
9. 总结	1648
<b>索 引</b>	<b>1661</b>



N. P. 兰兹曼

“但最糟糕的事情是，我确实不能明确(矩阵力学)向经典理论的过渡。”见海森堡(Heisenberg)给泡利(Pauli)的信(1925年10月23日)。<sup>①</sup>

“亨德里克·洛伦兹(Hendrik Lorentz)把建立经典与量子理论之间正确关系作为之后研究的最基本的问题。该问题困扰着他，同样也困扰着普朗克(Planck)。”见[Mehra and Rechenberg(梅拉和雷琴堡), 2000, 721]。

“因而量子力学在物理学理论中占据着一个非常特殊的位置：它涵盖了作为一个极限情形的经典力学，然而同时它自身的构建又需要该极限情形。”见[Landau and Lifshitz(朗道和利弗席兹), 1977, 3]。

### 1. 引言

多数现代物理学家和哲学家们承认，适当的量子力学解释

---

<sup>①</sup> “Aber das Schlimmste ist, daß ich über den Übergang in die klassische Theorie nie Klarheit bekommen kann” (德语, 意同上引文, 译者注), 见[Pauline(波林), 1979, 251]。

应该至少满足两个标准。第一，它必须要阐明其数学体系的物理意义，并由此获得理论的经验内容。所有量子理论的创始者们都清楚地认识到了这一点（我们仅以一种复述的方式指出）。<sup>①</sup> 第二（这是本论文的主题），它必须至少说明经典世界的表象。<sup>②</sup> 正如我们上面第二段引文中所表明的，普朗克看到了它指出的困难，且他首次注意到了他的黑体辐射公式在高温处的极限趋同于经典的表述。虽然玻尔(Bohr)相信量子力学应该通过经典物理学来解释，但在理论的创立者中，他似乎是唯一对从量子理论中得到经典物理学这一问题缺乏领会的。然而，通过对应原理(玻尔是为了回答上述第一个问题而非第二个而提出的)，玻尔做出了对该问题最为深刻的贡献之一。海森堡最初认识到了该问题，但却错误地相信他已在关于不确定关系的著名论文中解决了它。<sup>③</sup> 爱因斯坦(Einstein)出了名地不相信量子理论的基础本性，而薛定谔(Schrödinger)从一开始就意识到了该问题，之后用他极其著名的猫来突出这一问题，且在他职业生涯的不同阶段为该问题的解决做出了重要的技术贡献。埃伦费斯特(Ehrenfest)表述了用他名字命名的著名定理。冯·诺伊曼(von Neumann)也看到了困难所在，并通过他对量子力学中测量过程的著名分析来解决这一困难。

这一问题事实上甚至比量子理论创立者们预见到的更为严重。薛定谔猫在

---

① 量子理论的历史在许多书中都有表述。最详细的介绍是[Mehra and Rechenberg, 1982—2001]，但有一些篇幅较小的作品也与该多卷系列同样优秀，如[Jammer(雅默)，1966；van der Waerden(范德瓦尔登)，1967；Hendry(亨得利)，1984；Darrigol(达里戈尔)，1992]和[Beller(贝莱尔)，1999]。更多的信息也可以在传记中找到，如[Heisenberg, 1969；Pais(派斯)，1982；Moore(摩尔)，1989；Pais, 1991；Cassidy(卡西迪)，1992；Heilbron(海伯伦)，2000；Enz(恩兹)，2002]，等等，也参见[Pauli, 1979]。尤根·雷恩(Jurgen Renn)领导的关于矩阵力学历史的一项新计划正在进行。

② 哥本哈根解释表明了这两点是非常不同的，该解释专门针对第一点而完全忽略第二点。虽然如此，在量子力学的其他绝大多数解释中，致力于满足所涉及的两个标准的不同机制间存在实质性的交叠。

③ “人们可以看到从微观力学到宏观力学的过渡现在非常容易理解：经典力学完全是量子力学的一部分。”见海森堡给玻尔的信，1927年3月19日，正好在3月23日海森堡[1927]投稿之前。来自《量子物理学历史档案》(Archives for the History of Quantum Physics)中“玻尔科学通信”(Bohr's Scientific Correspondence)。

实验上的实现让大多数物理学家们感到比原先预想的要轻松[Leggett(莱格特), 2002; Brezger *et al.* (布瑞格等), 2002; Chiorescu *et al.* (秋瑞库等), 2003; Marshall *et al.* (马歇尔等), 2003; Devoret *et al.* (德沃尔特等), 2004]。此外, 棘手的叠加绝不仅限于物理实验室, 由于其混沌运动, 土星的卫星亥伯龙(尺度约为纽约的大小)被估计会在 20 年内散布在它的轨道上, 如果把它处理为一个孤立的量子力学波包的话[Zurek and Paz(朱瑞克和帕兹), 1995]。而且, 退相干理论学家们已经说明了“测量”不仅是由实验物理学家们在他们实验室中开展的过程, 而且要是没有人类干预的话无时无刻不在自然中发生。在概念方面, 如玻姆(Bohm)、贝尔(Bell)和他们的追随者是一方面, 量子宇宙学家们是另一方面的不同派别都论证道, 在客体和观测者之间的“海森堡界线(Heisenberg cut)”可能不能够成为物理学基本理论的基础。<sup>①</sup> 在过去的几十年里, 这些以及其他显著的见解已经引起了量子力学解释, 特别是引起了用量子力学来说明经典物理学对这些问题的广泛关注。

下面将对这些观点进行详细讨论, 而且事实上我们对经典和量子力学间关系的讨论将部分是历史性的。然而, 除了那些(历史性的)之外将是技术化的和数学上严谨的论述。由于手头的问题是如此复杂, 以至于在该领域中不严谨的数学几乎肯定会导致不可靠的物理学和概念上的混乱(尽管在理论物理学中到处有欠缺数学的人取得不可否认的成功)。除了冯·诺伊曼, 量子力学先驱者们并不持有这一态度, 虽然要承认他们的许多理念仍然是当前讨论的核心, 但是这些理念本质上却没有解决这一问题。因而我们假定读者熟悉量子力学的希尔伯特(Hilbert)空间形式体系,<sup>②</sup> 并且在论文的某些部分(特别是第 6 节和第 4 节中的部分内容)同样需要熟悉  $C^*$  代数的基本理论和它在量子理论中的应

419

<sup>①</sup> 更不用说由量子宇宙学家们提出的从某种量子引力理论得到经典时空的问题了。这当然也是从量子理论中得到经典物理学总纲领中的一部分, 但遗憾的是本文不会讨论它。

<sup>②</sup> 除了成熟的代表作, 如[Mackey(麦基), 1963; Jauch(约赫), 1968; Prugovecki(普如古维奇), 1971; Reed and Simon(里德和西蒙), 1972]或[Thirring(西凌), 1981]。读者可以参考更新的, 如[Gustafson and Sigal(古斯塔夫森和西加尔), 2003]或[Williams(威廉姆斯), 2003], 也见[Dickson(迪克森), 2005]。

用。<sup>①</sup> 除此之外，预先了解一些量子理论的概念问题是有益的。<sup>②</sup>

哪一种理念解决了用量子理论说明经典世界表象的问题？在我们看来，没有。虽然自量子力学创立之初就提出了许多新的理念，且几乎可以肯定这些理念在问题的最终解决中将发挥作用，而应该总会找到最终解决。这些理念无疑包括：

- 小的普朗克常数极限  $\hbar \rightarrow 0$  (微局部分析数学领域时代的到来)；
- 具有自由度  $N$  的大系统的极限  $N \rightarrow \infty$  (仅在  $C^*$  代数方法出现之后以一种严肃的方式被研究)；
- 退相干和一致历史。

数学上，第二个极限可以看作是第一个极限的特殊情形，尽管其背后的物理情况应该是非常不同的。不管怎样，在详细分析之后我们得到的结论是，上述三个理念单独任何一个并不能够说明经典世界，但是通过结合这三者还是有些许希望，人们在未来有可能这样做。

由于本论文的论题是未竟的事业，到目前为止人们对于经典与量子理论之间的关系，有可能采用一些内在一致却相互矛盾的哲学立场。有两种极端的立场，不论是否坚持其中之一，记住它们总是有用的，它们是：

1. 量子理论是基本的和普遍有效的，经典世界仅拥有“相对的”或“视角化的”存在性；

2. 量子理论是近似的和导出的理论，可能是不正确的，经典世界绝对地存在。

有如下一种立场，我们对测量问题<sup>③</sup>的最新理解致使该立场内在不一致。

---

① 对  $C^*$  代数的物理倾向性介绍见 [Davies(戴维斯), 1976; Roberts and Roepstorff(罗伯茨和勒普斯托夫), 1969; Primas(普利马斯), 1983; Emch(埃姆什), 1984; Strocchi(斯多奇), 1985; Sewell(休厄尔), 1986; Roberts, 1990; Haag(哈格), 1992; Landsman(兰兹曼), 1998; Araki(荒木), 1999] 和 [Sewell, 2002]。权威的数学教科书包括 [Kadison and Ringrose(卡迪孙与林罗斯), 1983; 1986] 和 [Takesaki(竹崎), 2003]。

② 值得信赖的著作包括，如 [Scheibe(沙伊贝), 1973; Jammer, 1974; van Fraassen(范·弗拉森), 1991; d'Espagnat(德斯帕那特), 1995; Peres(佩雷斯), 1995; Omnes(翁内斯), 1994; 1999; Bub(巴布), 1997] 和 [Mittelstaedt(米特斯泰特), 2004]。

③ 特别见 [Mittelstaedt, 2004]

3. 量子理论是基本的和普遍有效的，且经典世界(仍)绝对地存在。

在某种意义上，立场 1 源自于海森堡[1927]，但在当代却开始于埃弗雷特(Everett)[1957]。<sup>①</sup> 目前，绝大多数的退相干理论学家、一致历史学家和模态解释者似乎都支持这一点。立场 2 无疑有着很长且强大的渊源，包括爱因斯坦、薛定谔和贝尔等人。最近的支持来自莱格特和“自发塌缩”理论学家如佩尔(Pearle)、吉拉迪(Ghirardi)、瑞米尼(Rimini)、韦伯(Weber)和其他人。正如我们将在第 3 节中看到的，玻尔的立场不能依照这些条件来分类，我们的三种立场具有一种本体论的特性，他大概认为每一种都不具有吸引力。

当然，我们必须确定所涉及的术语指的是什么。对于量子理论，我们指的是包含本征向量一本征值联系的标准量子力学。<sup>②</sup> 量子力学的模态解释[Dieks(狄克斯)，1989a; 1989b; van Fraassen, 1991; Bub, 1999; Vermaas(弗马斯)，2000; Bene and Dieks(贝内和狄克斯)，2002; Dickson, 2005]否认该联系，使得其立场接近或等同于立场 1。当我们一般地谈论量子理论时，我们既不认可也不否认投影假设。

说“经典世界”指的是什么有点困难。在当前的讨论中，我们显然不能把经典世界定义为独立于观测而存在的世界——正如玻尔那样，见 3.1——但是它也不能被看作由现有经典物理学规律描述的那部分世界。因为，若立场 1 是正确的，则这些定律仅是近似有效的，如果可能的话。因而，我们将其简单地表述如下：

经典世界是观测揭示给我们的那样，其行为——在适当的准确性下——满足经典物理学规律。

<sup>①</sup> 注意，虽然立场 1 绝不意味着所谓的多世界解释，在我们看来后者同样“仅是无意义的词汇大杂烩”[Leggett, 2002]。

<sup>②</sup> 令  $A$  是希尔伯特空间  $\mathcal{H}$  上的自伴算符，有相应的投影值测量  $P(\Delta)$ ， $\Delta \subset \mathbb{R}$ ，故有  $A = \int dP(\lambda)\lambda$ 。本征向量一本征值联系规定，当且仅当  $A$  确定地取  $\Delta$  中的某个值时，系统的态  $\Psi$  处于  $P(\Delta)\mathcal{H}$ 。特别地，若  $\Psi$  是本征值为  $\lambda$  的  $A$  的本征向量时，故有  $P(\{\lambda\}) \neq 0$  和  $\Psi \in P(\{\lambda\})\mathcal{H}$ ，则  $A$  在态  $\Psi$  中取值  $\lambda$  的概率为 1。一般地，在态  $\Psi$  中，可观测量  $a$  取  $\Delta$  中的某个值(“在测量时”)的概率  $p_\Psi(\Delta)$  由玻恩—冯·诺伊曼(Born-von Neumann)规则  $p_\Psi(\Delta) = (\Psi, P(\Delta)\Psi)$  给出。

对于“在适当的准确性下”意味着什么应该没有多少怀疑的空间：灰颜色的存在并不意味着黑和白不存在！

我们可以将经典世界的绝对存在性按照玻尔的方式定义为其存在性独立于观测者或测量装置。与摩尔[1939]关于外部世界存在的论证相对比：

421

如何来证明？通过举起我的两只手，当我用右手做特定的手势时说“这是一只手”，当我再用左手做特定的手势时补充说“这是另一只”。

那些坚持立场1的人们主张说经典世界仅作为相对于特定具体要求的表象而存在，其中涉及的具体要求可以是一个观测者（海森堡），一组观测者和态（如在退相干理论中），也可以是由特定的一致历史集合定义的某个宇宙粗粒，等等。若观测者这一概念是在充分抽象和普遍的意义理解的，则同样可以构造立场1，宣称经典世界仅从观测者（或相应的可观测量类别）的视角而言存在。<sup>①</sup> 例如，薛定谔猫“悖论”在引入适当的视角时就马上消解了，参见6.6节。

另一方面，那些坚持立场2的人们相信，经典世界在绝对意义上存在（正如摩尔那样）。因而，立场2类似于常识实在论，虽然在立场1与2之间的区分很大程度上与科学实在论问题无关。<sup>②</sup> 因为立场1的拥护者们通常仍然相信一些观测者无关实体的存在（即在量子领域的某处），但否认该实体组成了我们周围的观测世界。这为经典世界这一重要的概念作出了一个相当模糊的解释：除了围绕多世界解释无意义的讨论之外，一个有趣的结论是这样的见解，即若量子力学是基本的，则经典世界的观念内在的并不清晰的和粗略的。因此，在这点上太过于精确就会事与愿违。<sup>③</sup>

① 术语“视角化的(perspectival)”是理查德·希利(Richard Healey)向作者提议的。

② 此语境中关于实在论的更详尽讨论见[Landsman, 1995]。词语“客观的”和“主观的”作出的区分似乎是无益的：陈述“我的孩子们是世界上最可爱的人”乍一看是主观的，但可以通过“柯拉斯·兰兹曼发现他的孩子们是世界上最可爱的人”的重构转换为客观的陈述。类似地，命题（或许是由于退相干）“局域的观测者发现世界是经典的”是完全客观的，虽然它描述了一个主观经历。也见[Davidson(戴维森), 2001]。

③ 参见[Wallace(华莱士), 2002; 2003]，同样见[Butterfield(巴特菲尔德), 2002]。这一点在玻尔和海森堡那里仍然成立，见[Scheibe, 1973]。

虽然立场1被立场2的拥护者们认为是防守性的，如果不是因为胆怯的话，但一个非常有意义的数学事实是，迄今为止它似乎得到了量子力学数学体系的支持。在对他称为“为了一切实用目的(FAPP = For All Practical Purposes)”的测量问题求解(和对经典世界是量子理论的表象进行解释的更普遍尝试)的嘲讽中，贝尔[1987; 2001]和在他之后的其他人错误地把一种深刻的认识论立场当作是一种可怜的防御性举措。<sup>①</sup>事实上，我们要将立场2推荐给胆小者，因为证实或证伪立场1似乎都是整场争论真正的挑战，我们把本论文中的技术化内容看作是对进展的一个梳理，该进展实际上在朝着对它的证明迈进。确实，总结我们的结论，我们声称有好的证据支持：

422

1. 经典物理学在极限 $\hbar \rightarrow 0$ 或 $N \rightarrow \infty$ 时从量子理论中产生，假如系统处于特定的“经典”态，并只由“经典”的可观测量来记录；
2. 退相干和一致历史将很可能解释，为什么系统处于这些态，并以这样的方式被观测到。

然而，即使有一天该方案能够起作用，关于经典世界是量子理论的表象的解释将对众所周知的问题“从‘与’到‘或’”的外部解决为基础：若量子力学预言了具有特定概率的不同可能结果，为什么我们仅看到一个？<sup>②</sup>

本论文更详细的大纲，可以参考上述的内容列表。绝大多数的哲学讨论出现在关于哥本哈根解释的第3节中，因为无论其优势何在，它不可否认地设定了整个关于经典与量子关系的讨论平台。<sup>③</sup>论文的其他小节将是几乎纯技术化的。除此之外我们试图要避免争议，但当不可避免时争议仅限在第3至第6节增加的后记中。最终的后记(第8节)表达了我们对此论题的深刻思考。

---

① 在此文献中对“精确性”的坚持使人想起普朗克对不可逆性的绝对本性长期坚持的信念[Darrigol, 1992; Heilbron, 2002]。需要指出，虽然普朗克的固执由于历史的偶然使得他跨出了量子理论的第一步，但他最终放弃了它，而与玻耳兹曼(Boltzmann)站在一边。

② 不得不承认，我们应该把对此问题的坚持归功于立场2的拥护者们。

③ 我们不在理论约化与理论间关系的哲学背景下讨论量子力学的经典极限，参见[Scheibe, 1999]和[Batterman(巴特曼), 2002]。

## 2. 早期历史

本节是对量子力学创始者们关于经典与量子关系的主张与贡献的简要回顾。更多的细节可以在引言中引用的著作和将要引用的具体文献中找到。可观的(但不完备的)书目见于[Gutzwiller(古兹维勒), 1998]。量子理论的早期历史有其自身的意义, 因为它是历史上最为重要的科学革命之一。虽然这段历史不是本论文的主要焦点, 但对我们的论题有着特别的重要性。因为对普朗克工作的常见和错误的解释(即他引入了类似于“量子假设”的观念, 见下文3.2节)似乎会引起这样的信念, 即量子理论和普朗克常数与自然中普遍的非连续性有关。确实, 这种非连续性有时甚至被认为标志着经典与量子物理的根本不同。这种信念在玻尔的作品中异常明显, 甚至在今天依然能引起共鸣。

### 423 2.1 普朗克和爱因斯坦

经典物理学与量子理论间的关系是如此的微妙和混乱, 以至于历史学家和物理学家甚至不能就经典被量子取代的确切方式达成共识! 正如达里戈尔[2001]所说: “在过去的二十年里, 历史学家(和物理学家)关于普朗克于1900年在其黑体理论中引入的量子意义存在分歧。这种混乱的源头是托马斯·库恩(Thomas Kuhn)关于反传统论题的发表, 该论题是指普朗克并不打算用他的能量子表达量子的非连续性。”

众所周知, 如果比较[Mehra and Rechenberg, 1982a]等文献, 普朗克最初在他建立不可逆性的绝对本性的方案的语境中得到了黑体辐射的维恩(Wien)定律(与玻耳兹曼的概率方法相竞争, 并最终取得了成功)。当1900年10月新的高精度测量结果否定了维恩定律, 普朗克第一次推测出了他关于正确定律的表达式:

$$E_\nu/N_\nu = h\nu/(e^{h\nu/kT} - 1) \quad (1)$$

顺便引入了两个新的自然常数  $h$  和  $k$ <sup>①</sup>, 随后在1900年12月4日, 给出了对这一定律的理论推导。在此定律中他引入了下述理念, 即构成黑体的振子的能量

① 从而, 普朗克引入了玻耳兹曼常数  $k$ , 并第一个写下了公式  $S = k \log W$ 。



是以  $\varepsilon_\nu = h\nu$  为单元量子化的(其中  $\nu$  是给定振子的频率)。该推导通常被看作是量子理论的诞生, 诞生的日期就是刚才提到的日期。

然而, 现在清楚的是[ Kuhn, 1978; Darrigol, 1992; 2001; Carson(卡尔森), 2000; Brush(布鲁斯), 2002]: 往好了说, 普朗克并不知道他所说的振子的能量; 往不好了说, 他赋予振子以一连串的能量谱。从技术上说, 特别是他的经验定律的推导最终被证明产生了期望的结果(这依赖于玻耳兹曼的熵概念),<sup>①</sup> 普朗克不得不计算给定的能量数额  $E_\nu$  在频率  $\nu$  时分配给一定数量的振子  $N_\nu$  有多少种方式。当然, 方式有无穷多种, 因而为了找到一个有限数目的回答, 普朗克迫随着玻耳兹曼把  $E_\nu$  分解为具有等同大小  $\varepsilon_\nu$  的大数目  $A_\nu$  份, 从而有  $A_\nu \varepsilon_\nu = E_\nu$ 。<sup>②</sup> 现在, 正如我们所知, 尽管玻耳兹曼最后在他对气体的相应计算中令  $\varepsilon_\nu \rightarrow 0$ , 普朗克发现若他假定关系式  $\varepsilon_\nu = h\nu$ , 则会诞生他经验性的黑体定律。

但是, 该假设并不意味着普朗克量子化了振子的能量。事实上, 在他对给定分布的定义中, 他计算了能量在  $(k-1)\varepsilon_\nu$  和  $k\varepsilon_\nu$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) 间的振子的数量, 就像玻耳兹曼对于气体采取的类似方式, 而不是具有能量  $k\varepsilon_\nu$  的振子的数目, 就像绝大多数的物理学家对此过程的解释那样。更一般地, 有大量的书面证据表明, 普朗克本人绝不相信或表达他有了量子化的能量, 在 1920 年诺贝尔奖演讲中, 他把对能量子  $\varepsilon_\nu$  的正确解释归于爱因斯坦。确实, 对量子理论最早期阶段的最新理解是这样的, 即是爱因斯坦而非普朗克, 在 1900—1905 年期间, 清楚地认识到了普朗克的辐射定律标志着与经典物理学的分裂[ Buttner *et al.* (布特纳等), 2003]。这一洞察让爱因斯坦进行了能量量子化。他是以两重方式进行的, 都与普朗克的振子相关——被爱因斯坦解释为是现代方式下的谐振子——且借助于他的光子概念以一种紧密关联的举措进行。尽管普朗克理所当然引入了以他名字命名的常数, 并且因此成为了用  $h$  标志的理论的创立之父, 但是光子的引入使得爱因斯坦至少成为量子理论之母。爱因斯坦本人也把光子

424

① 虽然事实是, 普朗克只是在 1914 年左右才转变到不可逆性的玻耳兹曼方法。

② 问题中的数目则由  $(N+A-1)! / (N-1)! A!$  给出, 在记号中略去了对  $\nu$  的依赖性。