

[北京大学科技史与科技哲学丛书]

实在的张力

EPR论争中的爱因斯坦、玻尔和泡利

THE TENSION OF REALITY
EINSTEIN, BOHR, AND PAULI IN THE EPR DEBATE

白彤东 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

[北京大学科技史与科技哲学丛书]

丛书主编 吴国盛

实在的张力

EPR论争中的爱因斯坦、玻尔和泡利

THE TENSION OF REALITY
EINSTEIN, BOHR AND PAULI ON THE EPR PARADOX

白彤东 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

实在的张力: EPR 论争中的爱因斯坦、玻尔和泡利/白彤东著. —北京: 北京大学出版社, 2009. 4

(北京大学科技史与科技哲学丛书)

ISBN 978-7-301-15140-2

I. 实… II. 白… III. 实在论—研究 IV. B089

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 053313 号

书 名: 实在的张力——EPR 论争中的爱因斯坦、玻尔和泡利

著作责任者: 白彤东 著

责任编辑: 王立刚

封面设计: 奇文云海

标准书号: ISBN 978-7-301-15140-2/B · 0797

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> 电子邮箱: [pkuphilo@163.com.cn](mailto:pkuphilo@163.com)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 出版部 62754962

编辑部 62752025

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

650mm × 980mm 16 开本 14 印张 250 千字

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 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

《北京大学科技史与科技哲学丛书》总序

作为哲学二级学科的“科学技术哲学”(简称科技哲学)过去叫“自然辩证法”,但从目前实际涵盖的研究领域来看,它既不能等同于“科学哲学”(Philosophy of Science),也无法等同于“科学哲学和技术哲学”(Philosophy of Science and of Technology)。事实上,它包罗了各种以“科学技术”为研究对象的学科,比如科学史、科学哲学、科学社会学、科技政策与科研管理、科学传播等等。过去二十多年来,以这个学科的名义所从事的工作是高度“发散”的;以“科学、技术与社会”(STS)为名,侵入了几乎所有的社会科学领域;以“科学与人文”为名,侵入了几乎所有的人文学科;以“自然科学哲学问题”为名,侵入了几乎所有的理工农医领域。这个奇特的局面也不全是中国特殊国情造成的,首先是世界性的。科技本身的飞速发展带来了许多前所未有但又是紧迫的社会问题、文化问题、哲学问题,因此也催生了这许多边缘学科、交叉学科。承载着多样化的问题领域和研究兴趣的各种新兴学科,一下子找不到合适的地方落户,最终都归到“科技哲学”的门下。虽说它的“庙门”小一些,但它的“户口”最稳定,而在我们中国,“户口”一向都是很重要的,学界也不例外。

研究领域的漫无边际,研究视角的多种多样,使得这个学术群体缺乏一种总体上的学术认同感,同行之间没有同行的感觉。尽管以“科技哲学”的名义有了一个外在的学科建制,但是内在的学术规范迟迟未能建立起来。不少业内业外的人士甚至认为它根本不是一个学科,而只是一个跨学科的、边缘的研究领域。然而,没有学科范式,就不会有严格意义上的学术积累和进步。中国的“科技哲学”界必须意识到:

热点问题和现实问题的研究,不能代替学科建设。惟有通过学科建设,我们的学科才能后继有人;惟有加强学科建设,我们的热点问题和现实问题研究才能走向深入。

如何着手“科技哲学”的内在学科建设?从目前的现状看,科技哲学界事实上已经分解成两个群体,一个是哲学群体,一个是社会学群体。前者大体关注自然哲学、科学哲学、技术哲学、科学思想史、自然科学哲学问题等,后者大体关注科学社会学、科技政策与科研管理、科学的社会研究、科学技术与社会、科学学等。学科建设首先要顺应这一分化的大局,在哲学方向和社会学方向分头进行。

本丛书的设计体现了我们把“科技哲学”作为哲学学科来建设的构想。我们深知,一个学科特别是人文学科的范式,通常体现在它的经典著作和教科书中。目前,科技哲学专业的研究生们还没有公认的必读书目和必修课程体系。我们希望通过本丛书,为有哲学兴趣的科技哲学教师和学生提供一种可供选择的方案。

我们的注意力将集中在自然哲学、科学哲学、技术哲学和科学思想史四个分支学科上,因为这四个子学科是对科学技术进行哲学反思的核心和基础学科。我们将在这四个学科方向上,系统积累基本文献,分层次编写教材和参考书。我们希望本丛书的出版能够有助于推进科技哲学的学科建设,也希望学界同行和读者不吝赐教,帮助我们出好这套丛书。

本丛书的编辑出版受到“北京大学创建世界一流大学计划”经费资助。

吴国盛

2002年12月于燕园四院

致 谢

本书是由笔者在波士顿大学哲学系的博士论文以及博士毕业后所做的进一步研究工作综合、修改、编辑而成。在波士顿大学就读的七年里,有三个对我影响最大的老师。一个是已过世的 **Burton Dreben** 教授。他向我展示了分析哲学中有意思的一个侧面,与维特根斯坦、奥斯汀、蒯因等对包括分析哲学在内的形而上学的批判。本书很多主要的哲学思想来自于跟他的学习。在最初的计划中,我是想基于这些思想来展示,在与阿尔伯特·爱因斯坦的争论中,物理学家尼尔斯·玻尔在他的沉闷与模糊的文章中所表达的浅薄的实证主义思想无法回答爱因斯坦及其同盟的挑战,并由此展示哲学(实证主义)面对物理学问题的苍白。

每当想起我原本的计划,我就暗自庆幸当时几经曲折找到了 **John Stachel** 教授做我的论文的第一导师。他向我展示了我在最初理解玻尔上有多么的浅陋与轻薄。通过与他很多次的激烈却又很愉快的争论,在他的指导下,我终于看到了玻尔是多么深刻和微妙的一个思想家。这个经历给我带来的谦卑也成了我理解物理学家沃尔夫冈·泡利的起点。在我对这两个物理学家的思想及相关问题的理解上,有很多地方都是直接或间接地来自 **Stachel**。并且,经常地,他“逼迫”我回到一手文献里去,让我搞清楚看似细小的技术细节。但是我很快发现这些“琐屑”之处在哲学和物理学上的丰富。如果说是 **Dreben** 教授和另外一个对我影响很大的 **Stanley Rosen** 教授向我展示了如何细读哲学文本、如何在伟大的哲学家面前心怀正确的谦卑的话,那么是 **Stachel** 让我看到了这种方法在理解物理学思想上的应用,以及理解伟大的哲学家和物理学家上的近似。这种近似与对伟大的物理学家之思想的理解

也加深了我对物理学与哲学之间关系的体会。

在撰写论文与答辩期间,我也经历了学界政治的极其黑暗的一面(对于因为痛恨中国学界的黑暗而对美国学界充满幻想的人,我只想说,有人的地方就有乌鸦,而天下乌鸦是一般黑的,只是黑的方式可能会因地制宜而已)。这里,我想感谢 David Roochnik 教授。作为一个老师和朋友,他对我的种种支持帮助我走过黑暗。

我还想感谢我的朋友钱江。在我写论文期间和后来的工作里,与他的讨论对我之于很多物理学和哲学问题的理解都很有帮助,而与他思想的呼应也是对我的鼓舞。

孙冠臣博士和张卜天博士对本书中文初稿的某些章节帮作者做了些校对工作,我这里也表示感谢。

最后,我想感谢北大出版社的王立刚编辑。没有他的支持与信任,这样一本学术著作是不可能得以出版的。

目 录

《北京大学科技史与科技哲学丛书》总序/1

致 谢/3

导 论/1

1. 实在论与反实在论/1
2. 量子力学对传统实在观的挑战/6
3. 本书的科学史与科学哲学宗旨/14
4. 章节内容介绍/19

第一章 EPR 问题/26

1. 原版之 EPR/26
2. EPR 的一个修正:分隔实验/30
3. EPR 原始实验的另外两个延展:波普尔实验和贝尔实验/35
4. EPR 问题的核心及量子力学的正统解释对其的回答/39

第二章 EPR 论争中的爱因斯坦/49

1. 爱因斯坦的“实在论”和实证主义/49
2. 爱因斯坦对量子力学的批判:月亮论辩、唯我论、系综解释/56

第三章 玻尔是个实证主义者吗? /66

1. “实在论者”玻尔/66
2. 玻尔的“实证主义”倾向/74

第四章 玻尔的光栅/89

1. 对玻尔光栅的正确解读/89
2. 不可控制的打扰、作用量子的角色以及玻尔的关于“分割”的概念/93

目 录

3. 一些关于玻尔光栅的进一步问题/98
4. 对玻尔思想实验的实证主义解读:经典干扰观和量子干扰观/100
5. 两个相关观点:量子力学的不可图像化和玻尔的“现象”概念/104

第五章 玻尔对 EPR 问题的回应/108

1. 玻尔对互补原则的讨论/108
2. 条件影响论辩/111
3. 条件影响论辩的问题/116
4. 经典语言的实在性/121
5. 调和问题/123

第六章 泡利的世界观:神秘与理性的互补/126

1. 理性与神秘的耦合/126
2. 耦合的体现:不同领域中的互补性/131
3. 泡利的实在论/134
4. 由量子力学看泡利的实在论/137
5. 原型、宇宙秩序、共时性/140
6. 科学家的良心/143
7. 最后几点评论/147

第七章 泡利与科学哲学/150

1. 泡利对量子力学的实证主义解读的批评/150
2. 泡利:经验的,但不是经验主义的/155
3. 泡利对实证主义方法论的批评/158
4. 泡利的局域的反实在论/160
5. 在各种主义、经验与理念、保守与革命的张力下游走/163
6. 哲学能否作为一种分析与批判的活动:泡利式的批评/165
7. 自然主义与富裕的困境/171

目
录第八章 泡利对 EPR 问题的处理和他对量子力学
完备性的观念/176

1. 泡利对 EPR 一文的回应/176
2. 隐变量之不存在/179
3. 一个对领域敏感的和局域的完备性概念/183
4. 对 EPR 问题的一个误解:量子力学与超距
作用/185
5. 一个大学低年级学生的问题和泡利的答案/187

跋/194

附录 EPR 论辩/199

参考文献/202

导 论

1. 实在论与反实在论

量子力学是 20 世纪物理学的一个重大发展,而围绕着它有着激烈和有趣的争论。这些争论不但被当作是物理学内部的争论,还与哲学史上的一些根本问题联系在一起。其中,爱因斯坦及其同情者与所谓“哥本哈根学派”^①或对量子力学持正统解释者之间关于量子力学问题的一些争论常与哲学中关于外在世界的实在性问题联系起来。前者被刻画成哲学意义上的实在论者 (realist),而后者被刻画成哲学意义上的反实在论者 (anti-realist)。因此,这些争论就被当作关于一些久远的哲学问题——比如独立于人的外在世界是否存在、我们人类知识是否与这个世界相关——的一个新战场。但是,在这本书里,通过对这场争论的三个重要参与者,爱因斯坦 (Albert Einstein)、玻尔 (Niels Bohr)、泡利 (Wolfgang Pauli) 的考察,我会展示对他们之间争论的哲学解读所造成的重大偏差。他们之间的分歧,或者,更一般地讲,对于物理学重要的东西,不是有关外在世界或理论实体 (theoretical entities) 的实在性这类一般哲学问题,而是关于这个或那个特定理论实体的实在性,是关于这个或那个物理学观念的可行性问题。对他们之间思想争论的详细

^① “哥本哈根学派”、“量子物理学家”,以及类似的术语用来泛指玻尔和曾与他共事并受他影响的人,比如泡利、海森堡 (Werner Heisenberg)、约尔旦 (Pascual Jordan),等等。他们是量子力学,尤其是它的矩阵表示 (the matrix mechanics formulation) 的奠基人。

考察会让我们切近地看到伟大的科学家对科学的理解。我们会看到，他们的理解要比任何简单的哲学理解要丰富、微妙、有趣得多。这也会加深我们对科学以及科学哲学的理解。并且，本书所展现的这些科学家的形象也会打破哲学家或时下渐渐流行的反科学主义者对科学家的描画。我们会看到，尤其是在泡利身上，科学家复杂的人文与宗教情怀。并且，在他们的讨论中，很多我们习以为常的观念都会受到挑战，比如实在是什么、个体是如何界定的（identity）、什么是因果性、时空概念呢，等等。

在这一节里，我会解释一下本书涉及的“实在论”与“反实在论”这两个关键概念。在下一节里，我会尽量直白、形象地介绍一下量子力学的一些有趣结果。这些结果对我们很多固有的世界观都会形成挑战。通过这些解释，我希望不太熟悉现当代物理学发展的读者能对它有所了解。并且，我会解释为什么它会引起人们给量子力学以反实在论的解读。

下面，先让我来理清一下“实在论”、“反实在论”、“形而上学”等术语的含义。我需要指出，下面给出的，亦即本书里所常用的“实在论”和“反实在论”的定义，是它们的“教科书版本”。也就是说，它们是对实在这个问题简单化的理解，并很可能是任何深刻的实在论者和反实在论者思想的漫画式的表述。比如，归在反实在论底下的有实证主义（positivism）、逻辑实证主义（logical positivism）或逻辑经验主义（logical empiricism）、工具主义（instrumentalism）、操作主义（operationalism）、经验主义（empiricism）、唯名论（nominalism），等等。尽管它们之间可能有“家族相似性”（family resemblance），但是这些不同的“主义”之间有着显著分歧。并且，一些著名的逻辑实证主义者也并不完全符合我下面给出的反实在论的一般描述，而一些实在论者也没通常理解下的实在论所描述的那么实在。但是，我在本书中之所以会用对这两个关键术语的简单化定义有如下几个原因。第一，虽然它们是简化的“教科书”版本，但它们捕捉住了很多参与这场争论的人对这些术语的理解。第二，虽然每个人理解这些术语时可能会有微妙的分歧，但是我们可以想象本书的基于这两个术语的简单化理解的很多论述可以容易

地依照这些分歧来调整。

本书中,“反实在论”(或“实证主义”——在本书中此二术语是同义的、可互换使用的)的基本观点如下。它认为只有感觉经验(sense experiences)、感觉材料(sense data)、实验数据(experimental data)或观察(observations)是真实和可靠的,是人类知识的唯一基础。理论实体(比如月亮[而不是在无云之夜我们对一个大的、白色的、明亮的个体感知]、电子等)只是次要的、附属的(secondary)。它们只是工具或理论假设(theoretical posits),帮助我们组织感觉材料,但并没有独立于这种工具性的实在。它们存在的正当性之来源不是它们是否真实、是否反映外在实在,而是来自于它们在组织感觉材料和作出观察预言上的功用。逻辑上来讲,它们可以被还原成感觉材料。根据常常与反实在论联系起来的方法论,我们应做的科学工作只不过是通过归纳法来收集感觉材料,而对这些材料加以逻辑分析。经过这一工作,我们只是去努力回答“怎么样”(how)或“如何”的问题,只是去客观地描述一组感觉材料如何与另一组感觉材料前后相继,并依此作出经验预言。我们不应该去问“为什么”(why)的问题,即为什么感觉材料可以被如此描述、这些感觉材料会如此相连。也就是说,我们不应该在描述(description)和预言(prediction)之上再求任何解释(explanation)。

与此相对,实在论者的观点正好相反。感觉材料不是人类知识的唯一的和最终的基础,外在实在才是。我们引入理论实体的正当性来自于它们代表(represent)、指称(refer to)或对应着外在世界的实体。引入它们不一定非要是因为它们有任何工具性的、预言式的作用,而是因为它们是实在的并因此帮助我们理解外在实在的事实。在这个意义上,理论实体可以是首要的(primary),它们不必然是可还原成(reducible)感觉材料的。只是理论作为一个整体才需要有任何经验上的后果。这一思想常被称作“整体论”(holism)。并且,感觉材料或实验数据并不是像反实在论者想象得那样纯粹,而是被理论渗透的(theory-laden)。也就是说,经验数据的产生要预设一些特定理论,而没有独立于理论的纯粹经验。根据与实在论相连的科学方法论,归纳经验并对之加以逻辑分析不是科学的全部。理论实体必须被创造出来,而它们

的真实性无法被个体感觉材料或实验所证实。并且,我们绝不应该停步于“如何”的问题或满足于描述,而应该努力回答“为什么”的问题并给出经验背后的解释,从而不断接近外在实在。

虽然以上对“实在论”和“反实在论”的定义是教科书式的、“漫画式的”(caricature),但是很多卷入这场争论的人是如此理解这两个术语的。比如,爱因斯坦就认为实证主义者声称只有可感觉的才是存在的,并且只需通过归纳法我们就可以找到物理学里的根本概念。^①在批评物理学家布里奇曼(Percy Bridgman)的操作主义时,爱因斯坦写道:

一个逻辑系统要可以被当作物理理论,我们不必要去要求它的所有断言都可以被独立地解释和被“操作性地”“检验”;实际上这个(要求)从来没有被也不会被任何理论达到。为了一个理论被当作物理学的理论,所必要的只是在一般意义上它隐含经验上可检验的断言。(Schilpp 1969, 679)

在这里我们也可以看到爱因斯坦持科学理论的整体论观点。

爱因斯坦这一理解也在玻恩(Max Born)对前者的反驳里展示出来。爱因斯坦指责玻恩和其他量子力学家是实证主义者。有趣的是,玻恩在回应时并没有反对爱因斯坦对“实证主义”的理解,这意味着这两个人采取了对“实证主义”的相同理解。玻恩所强调的只是他不是爱因斯坦所描述的那种实证主义者。他写道:

他(爱因斯坦)把我的哲学观点叫做“实证主义的”,并乐于扯碎它们。如果实证主义意味着只有我们的感官印象(sensory impressions)可以是实在的,而科学理论乃至人对日常生活里实在东西的观念(ideas)仅仅是建构出来的,是为了建立各种感觉印象间的关系的创造,那么我肯定不认为我的哲学是实证主义的一种。(Born 1971, 165)

……你斥责我的想法是实证主义,这把我烦着了;实际上它(实证主义)是我最不追求的东西。我真的无法忍受那些家伙(实

^① Born 1971, 188 和 Einstein 1954, 307。

证主义者)。(同上,166)

另一个量子力学家泡利写道:

我希望没有谁还持这样一种观点:理论是从实验记录本(laboratory-books)中依严格的逻辑导出。这个观点在我做学生的时候很流行。(Pauli 1994/1954—7, 129)

他这里所说的观点明显是他所理解的实证主义。在另外一个地方,他指出经验主义企图将所有的解释都还原成描述。^①

在当代科学哲学家 Mara Beller 和 Arthur Fine 对玻尔观点的批评里,他们指责玻尔堕入了一个特定“品牌”的实证主义,即所谓“Ruark 类型”的实证主义。^② 据他们的理解,这种实证主义认为“只有在一个给定系统物理属性在被真实地测量时才有实在性”。^③ 在本书中,我们还会看到更多与上述对“实在论”、“反实在论”之理解相呼应的例子。

这本书经常用到的另一个术语是“形而上学”一词,并常将它与“物理学”对用。但是,这两个术语很难定义。首先,本书要论述的哲学观点之一就是否认某些实证主义者所持有的这两者之间有清晰的界限的观点。的确,给一个伟大的思想家(不管是哲学家还是物理学家)贴标签总会不可避免地将他的思想简单化。所以,我希望通过使用是这些术语的意思明白起来,而我这里只给出写粗略的描画。一般地讲,形而上学是超出经验的或先验的(a priori),^④是一切知识(包括物理学在内)的最终、不可怀疑的基础。它提供固定的和普遍的原则或方法,并适用于所有特定的情境。这么理解的形而上学包括本体论和认识论。与它在一些场合的使用不同,它在这里并不被当作是与认识论相对立的,而是被当作与物理学对立的,是“超物理学”的(metaphys-

① Pauli 1994/1952, 125.

② 他们号称物理学家 Arthur Ruark 是如此使用“实证主义”的观念的。见 Beller and Fine 1994, 9—10, 27, 29。

③ Ruark 1935, 466。

④ 为了与康德哲学里的“transcendental”(常译作“先验”)相区别,“a priori”有时被译成“先天”。但本书中很少用到“transcendental”,并且“a priori”在本书中是按“绝对”、“普遍”、“不拘于特殊经验”的意思上来使用。因此本书中一律用“先验”来翻译“a priori”。

ics)。前面提到的实在论和反实在论是形而上学的两个例子。并且, 下面我们还会看到有些人会对这个实在是怎么样的也有先验的、形而上学的预设: 比如它应该是决定性的(deterministic)和因果性的(causal), 等等。另外, 反实在论者, 尤其是逻辑实证主义者常自认为是反形而上学的。但是他们对经验的首要性的强调、他们对逻辑分析的推崇、他们的方法论(支持描述、反对解释)、他们对哲学的理性重建对科学功用的理解, 等等, 与上述的形而上学都有呼应的地方。所以, 尽管他们打着反形而上学的口号, 但我这里还是会把他们归入形而上学家一类。

与这种形而上学的实在论和反实在论相对, 我会在本书中展示物理学家关心的更是一种局域的(local)实在或非实在, 而不是形而上学的、先验的、关于这个外在世界的实在问题。比如, 他们虽然用的是乍看起来像形而上学家用的字眼, 但他们实际关涉的是比如电子轨道是否是实在等这样局域的、情境中的(contextual)问题。

当然, 有时一个局域的陈述会被普遍化, 并被用于所有的或新的情境中。我将前者叫做“普遍化”(universalization)或“全球化”(globalization), 而把后者叫做“去定域化”(de-localization)。我会将与此相反的程序称为“局域化”(localization)或“情境化”(contextualization),^①一般地讲, 我会把这些程序里的任何一种都叫做一个“伸缩”、“延展”(stretch)或“偷步”(move)。

2. 量子力学对传统实在观的挑战

在澄清了这些术语以后, 下面让我来初步解释一下为什么作为物理学的(艰深的)量子力学会与形而上学的反实在论纠缠在一起。在

^① 需要澄清的一点是, 局域化与逻辑学里讲的“实例化”(instantiation)不同。据后者, 一个实例的对错依赖于“共相”(universals), 但是一个局域化的陈述的对错可以是独立的, 独立于普遍(universal)陈述的对错。换句话说, 在一个局域情境下的陈述的对错并不一定隐含着它在另一个情境下的对错。

这里,我们会看到量子力学对我们很多根深蒂固的对世界的观念所造成的挑战。

一个自然哲学中的关键问题是如何在这个大千世界中区分出一个独立个体。这是思想史上关键的个体认同(identity)问题。近代物理学(牛顿物理学或牛顿力学)发展以来,沿着伽利略、笛卡尔、牛顿等人的思路,每个个体有着三个基本元素或首要属性(primary properties):时间、空间、客体的其他本质属性(即质量)。依照这种思想,对个体区分的首要工具就是它在时空中的位置。这些个体本身和其间依这三个元素的变化被用来解释我们日常感觉的颜色、冷热、声音等世间万象。牛顿的经典力学试图描述这些个体的变化和相互作用。在这个经典图景下,如果我们能知道个体的质量、它的初始位置(空间)、时间及它的位置相对于时间的变换(即速度,一种时间与空间的关系),那么我们就可以知道它在任何时间的位置。所以,我们只要知道四个关键量:质量、位置、时间、速度,就可以决定一个客体的过去与未来。我们所说的万有引力之类客体间的相互作用无非是帮助确定客体的速度(或速度变化,即加速度)。当这些相互关系决定后,我们就可以决定世界上所有客体的那四个关键量,从而决定性地知道世界的过去和预测世界的未来。当然,世界上的客体有无数,而如何计算它们的相互作用是一个极其困难的事情。但是,很多科学家,尤其是近代的科学家,相信这只不过是技术上的困难,而不是本质上的困难。当世界可以被如此精确地描述的情况下,一个“死硬”的反实在论者仍可以坚持这些物理量(理论实体)只是描述我们对外在世界观察的工具,而不是外在世界里的真实存在。但是他的这个说法听起来就太像胡搅蛮缠了。

但是,为了解决一些经典物理里的根本困难而产生的量子力学改变了这一图景,量子力学的一些特殊思想也使人们将它与反实在论联系起来。^① 在我解释这些联系之前,让我来先简要地给出量子力学的一些基本思想。根据量子力学,一个物理系统,比如,一个电子,由它的波函数(wave function)或态函数(state function)来描述。这个态函数

① 参见 McMullin 1984, 12—3 给出的这些联系的一个简要描述和他对此的批评。