

Discussion of the Conflict and a Partial Compatibility between the Measurement Ideas of Dirac and Landau

Tianhai Zeng

School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing

Email: zengtianhai@bit.edu.cn

Received: Oct. 27th, 2016; accepted: Nov. 13th, 2016; published: Nov. 16th, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

For the conflict between the measurement ideas of Dirac and Landau, considering the argument about the physical reality between Einstein and Bohr, and Newton's measurement idea, using the concepts of direct measurement and indirect measurement in classical physical experiments for reference, we try to put forward the corresponding concepts within the framework of quantum mechanics, and discuss the compatibility between Dirac's measurement idea and a part of Landau's in quantum mechanics.

Keywords

Interaction, Changes of States of Measured System and Instrument, Indirect Measurement, Direct Measurement, Difference of Different Eigenvalues

狄拉克与朗道关于量子测量观念的冲突与部分兼容的探讨

曾天海

北京理工大学物理学院, 北京

Email: zengtianhai@bit.edu.cn

文章引用: 曾天海. 狄拉克与朗道关于量子测量观念的冲突与部分兼容的探讨[J]. 现代物理, 2016, 6(6): 177-182.

<http://dx.doi.org/10.12677/mp.2016.66017>

摘要

对于狄拉克与朗道关于量子测量观念的冲突，考虑爱因斯坦与波尔关于物理实在论的争论和牛顿的关于测量的观点，借鉴经典物理实验的直接测量和间接测量的概念，本文尝试在量子力学框架内提出相应的概念，探讨将狄拉克的量子测量观念与朗道的部分观念，在量子力学中进行兼容。

关键词

相互作用，被测系统与仪器状态变化，间接测量，直接测量，不同本征值的差值

1. 引言

狄拉克的量子力学论著中[1]有这样的叙述：“From physical continuity, if we make a second measurement of the same dynamical variable ξ immediately after the first, the result of the **second measurement must be the same as that of the first**. Hence after the first measurement has been made, the system is in an eigenstate of the dynamical variable, the eigenvalue it belongs to being equal to the result of the first measurement.”这里译为：“由物理的连续性，如果第一次测量后，立即对相同的动力学变量 ξ 进行第二次测量，其结果必定与第一次的相同。因此，第一次测量完成之后，系统处于这个动力学变量的一个本征态，其本征值等于第一次测量结果。”这仍然是主流的量子测量的观念[2]，但也有论著没有涉及这种量子测量观念[3]。

朗道和栗弗席茨有独到的量子测量观念。他们的量子力学论著的中译本[4]中，对于测量有大致这样的叙述，被测电子(书中的电子表示微观系统)和测量仪器初态为 $\Psi(q)\Phi_0(\xi)$ ，测量就是这两部分进入相互作用，其结果是仪器由初态转为另一个状态。当测量电子的某种物理量 f (对应于狄拉克书中的动力学变量)时，仪器对应的本征函数组为 $\Phi_n(\xi)$ ，总波函数按它展开为

$$\sum_n A_n(q)\Phi_n(\xi), \quad (1)$$

(这是纠缠态，书中没有提到这一概念)，能够以不同概率测到不同值 f_n 。测量后的 $A_n(q)$ ，除去一个概率幅的因子，就是电子的波函数。这一组函数并不正交，也不构成任一算符的本征函数组。这样量子力学中的测量结果是无法重现的。测量后，该电子就处于不同于初态的状态，量 f 一般不再取任何定值。对该电子紧接着作第二次测量时，会得到不同于第一次测得值。这最后两句的英文版书中的叙述为[5]“After the measurement, however, the electron is in a state different from its initial one, and in this state the quantity f does not in general take any definite value. Hence, on carrying out a **second measurement** on the electron immediately after the first, we should obtain for f a value which **did not agree with that obtained from the first measurement**.”

狄拉克的观点与朗道和栗弗席茨的对比，有三条发生冲突：

1) 前者认为立即做的第二次测量，其结果必定与第一次的相同，即 $M_1 = M_2$ ；后者认为不同，即 $m_1 \neq m_2$ ，或量子力学中的测量结果无法重现。

2) 前者认为第一次测量后，系统处于这个动力学变量的一个本征态，经过推理，立即进行第二次测量后，系统仍然处于这个动力学变量的这个本征态，即 $\psi_1 = \psi_2$ ；后者认为测量 f 量后，该电子一般处于

不同于初态的非本征态，经过推理，第二次测量后，该电子也是处于不同于第一次测量后的非本征态 $\Phi_1 \neq \Phi_2$ 。

3) 两次测量后，由前者推理，动力学变量有相同本征值，即 $M_1 = M_2$ ；由后者推理， f 量一般都不再取任何定值。

本文试图在量子力学中兼容狄拉克观念的以上三条与朗道和栗弗席茨的前一条半(即第一条，第二次测量结果与第一次的不同，和第二条中的一半，第二次测量前后的电子状态不同)；不认同第二条的另一半，即处于非本征态，和第三条。

一般的量子测量[6]还包括对宏观物体在 standard quantum limit 的测量。这里说的量子测量是对微观粒子或系统的动力学变量[1]或标志运动的那些量[5]的测量。

2. 爱因斯坦与波尔关于实在论的争论和牛顿的关于测量的观点

爱因斯坦等人有一个观念[7]，如果没有扰动一个(被测)系统，可以确定的(概率为 1)预言系统的一个物理量的值，那么就存在一个物理实在性元素与这个物理量对应。这被称为实在论。

波尔[8]对实在论反驳道，被测粒子(系统)总要与测量仪器相互作用，有动量转移，不能没有扰动。朗道和栗弗席茨也认为测量就是被测电子和测量仪器进入相互作用，其结果是仪器由初态转为另一个状态，电子状态也有变化。这些是本文赞同的。

对于爱因斯坦等人的实在论，本文认为宏观系统(月亮)可在多角度被多个仪器同时测量到，虽然可以不受测量者的扰动，但总会受到外来的扰动(光)；当外来的扰动足够小，实在论观点是对的。而微观系统没有与仪器相互作用或受到仪器的扰动，就不能得到可靠的信息，对测量仪器而言与没有测量这个系统的情形相同，对此实在论观点就是错的。

牛顿对于测量有这样的观点[9]：“Relative quantities are not the actual quantities whose names they bear but those sensible measures of them (whether true or erroneous) that are commonly used instead of the quantities being measured.” 参考中译本[10]，这里译为，相对的量并不是负有其名的那些量本身，而是这些量的可感知的度量(精确地或不精确地)，它们通常用以代替被测的量。牛顿的观点，对于宏观系统的测量，相对(可感知)的量与量的本身常常不做区别；而用于微观系统的测量，在本文后面说明，直接测量的量显出了相对(可感知)的量与量的本身的区别。

3. 直接测量和间接测量

经典物理实验[11] [12] [13]中，测物理量 A 得到 A 的信息，为直接测量；测其它物理量得到 A 的信息，为间接测量。例如，物体的质量和线度可直接测量得到；由线度的测量间接得到形状规则物体的体积，由阿基米德原理进行测量，间接得到任意形状的物体的体积，由回旋半径的测量，得到粒子的荷质比，都是间接测量。这些都不是对物体的动力学变量的测量，而在量子力学中，一般是指对动力学变量的测量。

关于量子测量的文献[6]中也给出了 direct measurement (直接测量)和 indirect measurement (间接测量)的定义。直接测量是：The measured object interacts directly with the classical measuring device are called “direct measurement”；间接测量是：An indirect measurement is a two-step process. In the first step the object interacts with a quantum system that has been prepared in advance in some special initial quantum state. This quantum system is called the “quantum probe.” The second step is a direct measurement of some chosen observable of the quantum probe. 在量子力学的许多著作[1] [2] [3] [4] [5] [14]-[22]中都没有出现直接测量和间接测量的概念。

测量都会使被测量的系统或物体的动力学变量有所变化，仪器才能作相应的变化，来感知被测物体的某些或某个量的信息。不同于以上文献[6]关于直接测量和间接测量的概念，本文借鉴经典物理实验中的这些概念，尝试在量子力学框架内提出相应的概念：间接测量是使系统的其它量发生变化，得到待测量的本征值，系统状态塌缩为相应的本征态；而直接测量是使系统的待测量发生变化，测到的是它的不同本征值的差值，而不是本征值，测完系统状态处于本征态，后面的(3)式将做解释。

对于微观系统，牛顿的观点可能是针对直接测量量而言的。直接测量量有所变化，仪器才有所感知，所以得到的是变化量，而不是这个量的本身。对间接测量量，是通过被测物体的其它量的改变，使仪器的状态做相应的变化得到的，与牛顿观念中的“通常用以代替被测的量”不同。

4. 狄拉克的测量观念与朗道和栗弗席茨的部分观念的兼容

他们的不同测量观念，其实是测量的两个不同方面。本文认为狄拉克的测量观念其实是指间接测量；而朗道和栗弗席茨的则部分接近直接测量。

间接测量是使系统的其它量发生变化，得到待测量的本征值，系统状态塌缩为相应的本征态。设一个量子系统或单个粒子的初态为叠加态[23]

$$\Psi = \sum_i a_i \psi_i, \quad (2)$$

ψ_i 为动力学变量 M 的本征态，做间接测量，以其中某一概率 $|a_n|^2$ 得到本征值 M_n ，本征态为 ψ_n 。立即进行第二次相同的测量，其结果必定与第一次的本征值 M_n 相同，本征态仍为 ψ_n 。例如，斯特恩-盖拉赫实验[24]中是观测电子运动的偏转，得到自旋在特定方向上的投影的本征态及其本征值；若电子通过斯特恩-盖拉赫实验装置中的非均匀磁场后，取了向上(正的 z 方向)偏转的电子，通过第二个相同的实验装置，则两次测量后的自旋 z 方向的投影都为向上的本征态，其相应的本征值也相同。

直接测量是使系统的待测量发生变化，测到的是它的不同本征值的差值，而不是本征值，测完系统状态处于本征态，不同于初态。同样，设一个量子系统的初态为 $\Psi = \sum_i a_i \psi_i$ ， ψ_i 为动力学变量 M 的本征态，做直接测量得到差值

$$\Delta_{jk} = M_j - M_k, \quad (3)$$

为测完后的本征态 ψ_j 的本征值 M_j 与 $\Psi = \sum_i a_i \psi_i$ 中的某一个 ψ_k 的本征值 M_k 的差值；本征态 ψ_j 可以是 ψ_i 之外的态，也可以是 $\Psi = \sum_i a_i \psi_i$ 中不同于 ψ_k 的态；紧接着作第二次直接测量时，一般会得到不同于第一次 Δ_{jk} 的测得值

$$\Delta_{lj} = M_l - M_j, \quad (4)$$

即不同初、末本征态 ψ_j 和 ψ_l 的本征值 M_j 与 M_l 的差值。至于测量值(即差值)的概率较为复杂，这里不做讨论，相信可以如下例在一定条件下得到。例如，原子或分子的吸收或发射光谱[25] [26]的光子，对应的是原子的能级差；虽然这是对原子能量的直接测量，但不是测到能级对应的能量本征值。

5. 结论

对微观量子系统的测量，需要与测量仪器相互作用，两者的状态都会发生变化，仪器的状态变化反映量子系统的变化，由此得到系统的部分信息。

直接测量系统的动力学变量，使之发生变化，测量仪器就反映这种变化，系统末态为本征态，得到该变量的末态本征值与初态(若为叠加态)的某个本征值的差值；立即对相同变量进行第二次测量，末态变为不同于初态的另一个本征态，得到这两个本征值的差值，不同于第一次的差值(即测量值)。这包含了朗道和栗弗席茨的部分测量观念。间接测量使系统的其它量发生变化，得到待测量的本征值，系统状态塌

缩为相应的本征态，立即进行第二次相同的测量，得到相同的本征值，本征态不变，这完全对应于狄拉克的测量观念，也是除了朗道和栗弗席茨的著作以外的其他人的著作的测量观念。

致 谢

感谢北京师范大学裴寿镛教授，刘小明、王海波副教授，南京大学金国钧教授，国防科学技术大学李承祖、梁林梅教授，中科院理论物理所刘纯教授，江西师范大学嵇英华教授，我的同事邵彬、邹健、邢修三、张向东、姚裕贵、韦浩、苟秉聪、王锐、江兆潭、杨帆等教授，李军刚、王锋、缪劲松、蔡金芳、鲁长宏、苏文勇、冯艳全等副教授，宋新兵讲师，感谢他们能与我讨论、或提供帮助，或提出质疑。我还要感谢我的老师吉林大学丁培柱、潘守甫教授、兰州大学江先国教授，我的同学应立凡、李桂琴的鼓励和支持。

基金项目

国家自然科学基金(11075013, 11375025)资助。

参考文献 (References)

- [1] Dirac, P.A.M. (2008) *The Principle of Quantum Mechanics*. Science Press, Beijing, 36.
- [2] 曾谨言. 量子力学: 卷 I [M]. 第四版. 北京: 科学出版社, 2010: 53-54.
- [3] 喀兴林. 高等量子力学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 61-62.
- [4] 朗道, 栗弗席茨. 量子力学(非相对论理论), 上册[M]. 严肃, 译. 北京: 人民教育出版社, 1980: 26-30.
- [5] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. (2007) *Quantum Mechanics*. 3rd Edition, Elsevier (Singapore) Pte Ltd., 世界图书出版公司, 北京, 21-24.
- [6] Braginsky, V.B. and Khalili, F.Y. (1992) *Quantum Measurement*. Cambridge University Press, Cambridge, 12-15, 38-41.
- [7] Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N. (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, **47**, 777.
- [8] Bohr, N. (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, **48**, 696.
- [9] Newton, I. (1999) *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California, 413-414.
- [10] 牛顿. 自然哲学之数学原理[M]. 王克迪, 译. 北京: 北京大学出版社, 2006: 7.
- [11] 史庆藩, 王荣瑶, 李林. 英汉大学物理实验[M]. 第二版. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 19-21.
- [12] 朱伯申. 21 世纪大学物理实验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 12-17.
- [13] 查述传, 王学英, 李本桐. 物理实验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989: 9-12.
- [14] Feynman, R.P. (2004) *The Feynman Lecture on Physics (Vol. I, Vol. III)*. 世界图书出版公司, 北京.
- [15] Feynman, R.P. and Hibbs, A.R. 量子力学与路径积分[M]. 张邦固, 韦秀清, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [16] Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. and Laloë, F. 量子力学[M]. 刘家谟, 陈星奎, 译. 北京: 北京高等教育出版社, 1987.
- [17] Shankar, R. 量子力学原理[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2007.
- [18] Griffiths, D.J. (2005) *Introduction to Quantum Mechanics*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River.
- [19] 周世勋. 量子力学教程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [20] 钱伯初. 量子力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [21] 张永德. 量子力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] 倪光炯, 陈苏卿. 高等量子力学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2003.
- [23] 曾天海. 一类近似等式与单个粒子叠加态的概念性的讨论[J]. 大学物理, 2016 (11).

-
- [24] Nielsen, M.A. and Chuang, I.L. Quantum Computation and Quantum Information [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 43-46.
- [25] 褚圣麟. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [26] Deiglmayr, J., Herburger, H., *et al.* (2016) Precision Measurement of the Ionization Energy of Cs I. *Physical Review A*, **93**, Article ID: 013424. <http://dx.doi.org/10.1103/physreva.93.013424>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mp@hanspub.org