

# 关于量子测量问题的一点思考

汪克林<sup>1</sup> 曹则贤<sup>2,†</sup>

(1 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100190)

2014-05-05收到

† email: zxcao@aphy.iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140604

## Some reflections on quantum measurement

WANG Ke-Lin<sup>1</sup> CAO Ze-Xian<sup>2,†</sup>

(1 Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**摘要** 量子测量原理是量子力学的重要组成部分。具体的测量实验是否构成量子测量,是有商榷的余地的。并不是所有可观测量的本征值都具有实在的意义。量子测量原理中论及的经典—量子世界分界处之扰动的作用,可改述为量子测量需要加入统计原理的考量,这其实正印证了“统计原则高于量子原则”的现实。类似双缝干涉和Stern—Gerlach实验这样的宏观实验同量子测量原理是相融洽的,可能反映的恰是量子测量原理建立的历史背景和心理基础。本文的目的在于引起对量子测量问题的关注,并深信对该问题严肃、深入的讨论是有意义的。

**关键词** 量子测量, 波函数坍缩, 统计原则, 双缝干涉, Stern—Gerlach实验

**Abstract** Quantum measurement is a thorny problem without which the quantum theory cannot be taken as complete. Whether a measurement in laboratory is quantum measurement is a matter that needs be justified. Notably, not the eigenvalues of all the mechanical operators have realistic meaning. The role of intervention at the ‘cut’ between classical and quantum worlds in the quantum measurement postulates can be rephrased as a requirement that statistical principles should be incorporated therein, which are more fundamental in comparison with the quantum principles. That macroscopic measurements, such as the Stern—Gerlach experiment, the double-slit interference and alike, are well reconciled with quantum measurement postulates may just reveal the historic route and psychological basis of the development of those postulates. With this essay we want to call attention to the quantum measurement problem, and we’re sure that serious discussions over this problem may be helpful for further development of quantum mechanics.

**Keywords** quantum measurement, wavefunction collapse, principles of statistics, double-slit interference, Stern—Gerlach experiment

## 1 引言

量子理论从二十世纪初发展至今已逾百年,它对物理学的成功影响在带来惊奇的同时也一直令人困惑。关于量子力学自身的概念框架体系及其对

一些现象的诠释还一直存在争议。一个值得关注的问题是量子测量问题,可以说这是一个无论对量子力学的应用还是发展都至关重要的问题<sup>[1, 2]</sup>。就目的而言,不同于经典测量,量子测量不只是为了获得一个体系的什么信息,它本身还承担着

检验量子力学原理以使我们能获得自洽的量子理论的义务。在发展出量子信息等更接近宏观层面上的实用技术的今天,注意到不是任何所谓的“量子测量”都先验地是量子测量这一事实可能是有意义的。相关的问题包括如何准确理解对量子测量具有关键意义的波函数坍缩概念<sup>[3]</sup>,如何理解路径积分数学表达式的物理含意,在量子理论中使用波粒二象性的表述是否恰当,如何理解量子理论与决定论的关系,等等。这一类问题因为最近国际上的一些实验工作和讨论而变得更有意义<sup>[4-6]</sup>。本文将对一些关于量子测量的关键概念和思想进行梳理,并表明我们自己的观点。文章最后将指出,尽管至今还没有微观系统的量子测量直接验证量子理论和它的测量原理的正确性,但结合了量子理论与统计原理的宏观物理实验却显得颇为自洽。换句话说,结合了量子力学和统计原理的宏观物理实验同量子力学的测量原理之间还是相协调的。这可能反映了量子测量原理的历史根源和心理基础,或许对设计和诠释微观系统的量子测量有可资借鉴之处。

## 2 Dirac的测量原理

物理学语境下的决定论又称为因果决定论。在给定的范式内,事件之间存在因果联系,任何物理对象此前的状态完全决定了其后的状态。在严格的意义上说,物理学的决定论认为自然界中物理系统的状态及其演化过程可以用数学公式严格地表达出来。

在量子理论刚提出的那段时间里,包括爱因斯坦在内的一批物理学家对量子力学的合理性以及完备性提出了质疑。一个重大关切是,若按照量子理论的说法物理量在一定状态下不是取确定的值而是以一定的几率取若干不同的值,这样的理论岂不是违背了决定论?针对这样的质疑,Dirac在其《量子力学原理》一书中作了这样的回答:问题的关键在于量子理论修正了我们对物理系统状态的表述。一个物理系统的状态不是由物理量的数值来表征而是由状态的态矢来表征的。

量子理论明确给出了态矢演化的动力学方程,态矢随时间的演化规律是确定的:在两次测量之间,系统的演化是遵从因果律的。当一个物理系统的初始状态给定后,其以后任意时刻的状态都由动力学方程严格地给出。在这个意义上,量子理论仍然是决定论的<sup>[3]</sup>。

许是认识到测量之于量子力学的特殊意义,Dirac在《量子力学原理》一开始就给出了关于可观测量、态矢、本征态、本征值等概念同测量之间的关系的一个完整阐释。Dirac版的测量理论包括如下假设:

(1)如果量子系统是处于某实力学变量 $\xi$ 的本征态,相应的本征值为 $\xi'$ ,那么对 $\xi$ 的测量就一定给出测量值 $\xi'$ 。反过来,如果系统处于这样的状态,在其中对实力学变量 $\xi$ 的测量总给出一定的测量值,那么这个态就是 $\xi$ 的本征态,而测量结果就是相应的本征值 $\xi'$ 。

(2)当我们测量一个实的力学变量 $\xi$ 时,测量过程中的干扰会引起力学系统的突然变化。根据连续性的要求,如果在第一次测量 $\xi$ 之后,立即进行同一力学变量的测量,测量结果必然不变。因此在第一次测量过后,在第二次测量的结果里就没有不确定性了。这即是说,在第一次测量过后,系统处于力学变量 $\xi$ 的某特定本征态,相应的本征值为第一次测量的结果。即使第二次测量实际并未进行,这个结论也仍然有效。既然测量只是使系统变化到所测量之力学量的某一本征态上,则可以把测量理解为把体系准备到一个特定的本征态上去。测量一个力学量的所有本征值不能指望在一个体系上完成。

(3)是不是每个“力学量”都能测量?理论上讲,回答是肯定的。但实际上要设计出测量某一特定力学量的仪器可能是很困难的,甚至不具有任何现实的可能性。但理论总是允许我们去设想这种测量能够进行。

Dirac的几点推论后来被归结为量子力学的测量原理,成为量子理论的一个有机组成部分。测量过程中物理系统突变到一个待测力学量的本征态这一现象被称为坍缩。

### 3 关于Dirac测量原理的讨论

按照Dirac的说法, 对一个物理系统作测量时该系统的状态会从原来的状态坍缩到待测力学量的一个本征态上去, 但至于坍缩到哪一个本征态上是不确定的。也就是说测量时量子系统的“演化”, 或者更确切一点说是该系统和测量仪器所构成之复合系统的演化, 是不确定的。如果是这样, 包含测量过程的量子理论还是决定论的吗?

显然, Dirac的测量原理超出了量子理论的框架。为了摆脱这一困境, Bohr作了这样的阐释: 测量仪器不是纯量子性质的, 至少是仪器的读出部分只能用经典的而不能用量子理论的语言来描述。但实际情况是, 任何关于量子系统的测量在具有可为人所观察确认的结果前都要经过经典物理的领域, 无从逃避。所有小尺度和大尺度的测量都要在人的尺度上给出可表示的、可确认的结果。从Stern—Gerlach实验来看——那里只有两条肉眼可分辨的条纹——这也不一定妨碍对量子问题的讨论。

Von Neumann在《量子力学的数学原理》<sup>[7]</sup>一书中对测量原理作了一个更为细致的阐释。在测量过程中, 测量仪器的加入等价于要考虑的是待测系统和仪器构成的复合系统, 测量的成功依赖于待测系统S的某个性质会表现为测量仪器M的某个指示。待测系统和测量系统一起经历确定的状态演化过程, 测量系统不确定的“干扰(intervention)”使待测的物理系统坍缩到其不同的本征态上, 这两种不同变化分别被名为arbitrary change(指瞬间的坍缩)和automatic change(指状态的演化)。基于这种考虑, 仍然可以用量子理论的语言把测量原理表达清楚的。

Dirac, Bohr, von Neumann等人的量子测量原理之中心思想是测量中存在干扰。此干扰把待测系统坍缩到某一力学量的本征态上去, 且相应的几率为待测系统的态矢按这一本征态完备集展开时该本征态的系数的模平方, 对处于本征态的待测系统则没有任何影响。但是, 根据上述讨论, 对一个认为做了量子测量实验的实验者, 还

是可以提出如下一些疑问的。

首先, 测量原理里提及的测量仪器的“干扰”是普遍性的原理还是作为对测量仪器的要求? 如果是前者, 难以想象其是合理的; 如果是后者, 那就有深入讨论的必要了。当我们谈论某实验测量的是某量子系统之某一特定力学量时, 依据何在? 这样的问题看似平庸, 实际上却是必须正视的一个问题。在宏观实验中, 我们不认为测量A物理量的实验必然排斥测量B物理量, 但在量子理论中存在力学量算符不对易的问题(没有共同本征态), 其诠释之一就是这样的力学量不能同时被精确测量, 虽然我们不知道“同时”和“精确测量”到底是什么意思, 手上也没有这样的仪器。因此, 在谈论量子测量时, 声称某个实验是关于某量子系统之某个力学量的测量, 是需要令人信服的论证的, 表明在该实验中发生的“干扰”会使物理系统向拟测量之物理量的本征态坍缩而不是其它。这些显然不是自明的。以测量粒子的位置为例, 粒子的位置本征态都是一个几何点, 但这在实际的实验中是做不到的。真实的实验中, 固体探测器的斑点总是比探测粒子的可能物理尺寸大很多。比较一下光子、电子的理论尺寸(如果有的话)与使用照相底版、显像管进行所谓单粒子探测得到的斑点<sup>[8]</sup>, 其间差别达十个数量级以上。这样的测量实际得到的既不是位置的本征态, 也不是动量的本征态。依据这样的测量, 便断言测量的结果是关于位置的测量, 并把所得结果同理论的比较当成是对量子理论的挑战或证实, 是值得商榷的。一个典型的例子, 让C<sub>60</sub>分子(直径0.91 nm)束通过两个狭缝后, 经过繁复的光离化过程(注意: 这可不是von Neumann意义上的扰动。做过类似实验的人知道其间要动多少手脚)被送入计数器, 然后把计数器之计数随位置的函数所表现的粗糙起伏当作双缝干涉花样, 并进一步演绎为薛定谔的猫可以长到C<sub>60</sub>那么大, 故事的成分就太多<sup>[9]</sup>!

### 4 测量原理与波粒二象性

在量子理论发展的初期, 为了调和微观粒子



的粒子性和波动性,引入了波粒二象性的概念。尽管波粒二象性无益于对问题的认识,甚至为此引入 wavicle 一词作为修正,但实际上人们仍常常交替地用粒子和波的概念来构造量子过程的图像<sup>[10]</sup>。双缝干涉实验是此一尴尬的范例(图1)。光的经典波动理论对宏观双缝干涉给出了很好的解释。如果逐步降低光束的通量使得光是以单光子方式通过狭缝,则双缝干涉装置就成了一个微观的量子系统。坚持波粒二象性的物理学家会这样表述这一假想实验:一个光子通过双缝所在的壁时受到了扰动将以相同的几率通过上缝或下缝然后(以波的形式)在屏上的某一点被(当作粒子)纪录。由于它在屏上某一点出现的几率是一定的,所以多次重复实验就在屏上由点的累积而得到强度的分布,一般文献认为是图1中那样的分布。1989年,日立公司用电子束做过这样的实验<sup>[8]</sup>。

波粒二象性图像对双缝实验的描述似乎也得到了路径积分方法的支持。按照路径积分的数学

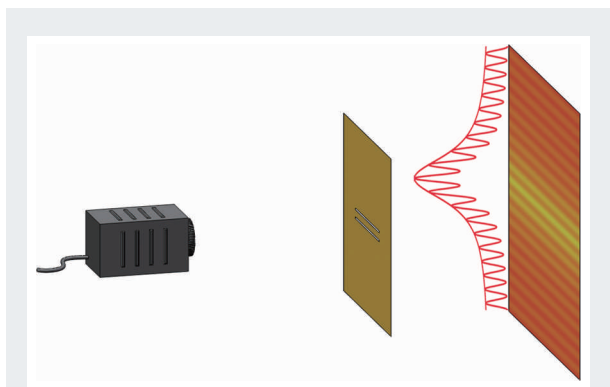


图1 双缝干涉实验的经典示意图

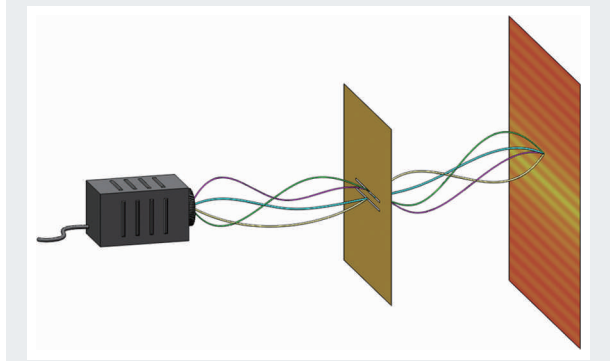


图2 双缝干涉的路径积分诠释图解。屏上任意一点的强度都是从光源到该点所有可能路径量子叠加的结果

表述形式,可以将双缝实验中从光源到屏上的光的传播看作是如下的一个过程(图2):光从光源出发可以沿各种可能的路径到达屏上一点,路径积分给出每一种路径对应的几率幅,由此可以计算得到干涉图形。不过,路径积分的描绘仅只是数学的表示,并非物理的实际<sup>[11]</sup>。把光看作以一定的几率分布沿各种不同路径的传播,正如前面所关切的,这种看法违背了决定论。

让我们重新审视图2描绘的图像。其实,之所以得到图2这样的只具数学意义的图像是因为在路径积分的表述中我们用位置表象的基去展开态矢。如果用动量表象的基去展开,则因一个动量确定的本征态在空间的分布是弥散的,它在两个狭缝处都有一定的几率幅,这时问光是从上缝还是下缝透过的就不是恰当的问题。

为了更清楚阐述后一种看法,同时借助讨论这个实验对测量原理作更具体的表述,参照 Peres 的精神,可以将双缝实验的描述用公式形式地表达出来。我们用  $|\Psi_0\rangle$  表示光量子系统在双缝实验中的状态矢量。为了进行测量引进相应的仪器系统,仪器在测量开始时刻的态矢记为  $|\Phi_0\rangle$ 。于是待测系统和测量仪器组成的复合系统之初始态矢为  $|\Psi_0\rangle|\Phi_0\rangle$ 。其次,记量子系统待测的物理量的本征态矢集为  $|\Psi_i\rangle$ , 仪器的一组正交归一基为  $|\varphi_j\rangle$ , 按量子理论的叠加原理,  $|\Psi_0\rangle$  和  $|\Phi_0\rangle$  可展开如下

$$|\Psi_0\rangle = \sum_i f_i^0 |\psi_i\rangle, \quad |\Phi_0\rangle = \sum_j g_j^0 |\varphi_j\rangle. \quad (1)$$

故测量实验开始时复合系统的初始状态的展开为

$$|C_0\rangle = |\Psi_0\rangle|\Phi_0\rangle = \sum_{ij} f_i^0 g_j^0 |\psi_i\rangle|\varphi_j\rangle. \quad (2)$$

记复合系统的哈密顿量为  $H$ ,  $H$  包含两个系统的自由哈密顿量以及它们之间的相互作用。在经过时间  $t$  后复合系统演化到状态

$$|C(t)\rangle = \sum_{ij} e^{-iHt} f_i^0 g_j^0 |\psi_i\rangle|\varphi_j\rangle = \sum_{ij} c_{ij}(t) |\psi_i\rangle|\varphi_j\rangle. \quad (3)$$

如果复合系统的态矢始终以这样确定的方式演化,则待测系统也不会坍缩到某一本征态上去。坍缩的过程必然要求干扰的存在,这可能出现在测量仪器的“读出”阶段,那里就是

von Neumann 所谓的经典世界和量子世界的边界 (boundary, cut)<sup>[7]</sup>(熟悉 Stern—Gerlach 实验的人们都知道, 那里的坍缩发生在读出部分之前)。复合系统受到了干扰, 以  $|f_i^{(0)}|^2$  的几率使  $H$  变换到  $H_i$ 。假定此时刻为  $T_1$ , 则再经过一个足够长的时间  $T_2$ , 有

$$\begin{aligned} |C(T_2)\rangle &= e^{-iH_i(T_2-T_1)}|C(T_1)\rangle \\ &= e^{-iH_i(T_2-T_1)}\sum_j c_{ij}(t)|\psi_i\rangle|\varphi_j\rangle \\ &= \sum_j \zeta_j|\varphi_j\rangle|\psi_i\rangle \end{aligned} \quad (4)$$

测量实验的最后结果是待测系统以  $|f_i^{(0)}|^2$  的几率塌缩到态矢  $|\psi_i\rangle$ 。

从上述的讨论可以归纳以下几点:

(1) Dirac, Bohr 和 von Neumann 的观点, 可包含在上述公式化表达中。在测量仪器的读出部分没有起作用之前复合系统的演化是确定的, 只有在最后的读出部分起作用时, 复合系统受到了干扰才以  $|f_i^{(0)}|^2$  的几率从原来的  $H$  改变成  $H_i$ ,  $H_i$  使复合系统中的待测量子系统演化到待测系统的本征态  $|\psi_i\rangle$  上。

(2) 在双缝实验中, 光子系统的状态在未达到最后的显示屏以前, 是根据确定的  $H$  演化的, 不会塌缩到待测量的一个本征态上去。因此谈论光以一定几率经上缝或下缝传播或者说光经过双缝时已受到扰动, 可能是不恰当的。

(3) 这里点出了一个关键问题, 即测量原理到底是量子理论内禀的内容还是一个独立的部分。如果是独立的部分, 则如果我们要测量一个量子系统的某一物理量时, 则只要认定它是量子测量实验它就会先验地符合测量原理。换句话说它的读出部分就一定会以  $|f_i^{(0)}|^2$  的几率将复合系统的  $H$  干扰到  $H_i$ 。显然, 我们没有任何理由相信会是这样。这也是为什么 Dirac 认为测量实验很难设计, 甚至超出物理学家的能力, 的原因。他只不过觉得这样的实验(量子测量)应当存在而已。

(4) 因此对一个量子测量的实践者, 我们更希

望他能首先阐明其实验是符合量子测量原理的。这一点似乎还没有成为讨论量子测量的规范。

## 5 量子现象的宏观测量

量子理论没有确立如何实现量子测量。Dirac 认为设计量子测量实验是困难的, 但相信它是可能的。那么, 在没有确切的量子测量实验之前是否就认为量子理论的正确性无法得到肯定呢? 有没有间接的实验事实可以证明量子理论, 包括它的测量原理是成立的呢? 幸运的是, 统计物理的原理告诉我们, 由近独立子系统组成的系综, 处于某一物理状态的子系统的数目同单一子系统取此一状态的几率成正比。相应地, 按照量子测量原理, 处于某叠加状态的量子系统经实验观测到特定的本征值, 其几率由对应的本征态在叠加状态中的分量的模平方而定。那么, 对大量处于某状态的单个量子体系的测量, 或者对由大量处于某状态的量子体系构成之大体系的宏观实验, 可用作对量子理论及测量原理的检验。对大量处于某状态的单个量子体系的测量, 那里保持每次量子实验条件相同可不是一件容易的事, 而大系统的宏观实验有助于克服此一困难。Bohr 和 von Neumann 等人为解释量子测量原理引入的经典扰动的角色, 在这里可归结为一个用物理语言的明确论述, 即除了量子理论外, 量子测量实验还需要引入统计物理的原则。实际上, 这正应和了 Uhlenbeck 的“统计原则高于量子原则”的思想<sup>[12]</sup>。

我们注意到, 一些宏观实验的结果, 同量子力学的测量原理, 即测量把量子系统坍缩到本征态且其几率就是该态按本征态展开的系数的模平方, 不矛盾, 这包括 Stern—Gerlach 实验和双缝干涉实验。这种不矛盾可能恰是量子测量原理之历史轨迹的必然反映, 正是基于这些对量子力学的建立具有重大影响的实验量子测量原理才会有如此的内涵。这是物理学思想史的一个有趣课题。测量原理与统计物理思想的内在关联, 在诠释量子测量结果时须谨记。

让我们首先考察一下 Stern—Gerlach 实验。

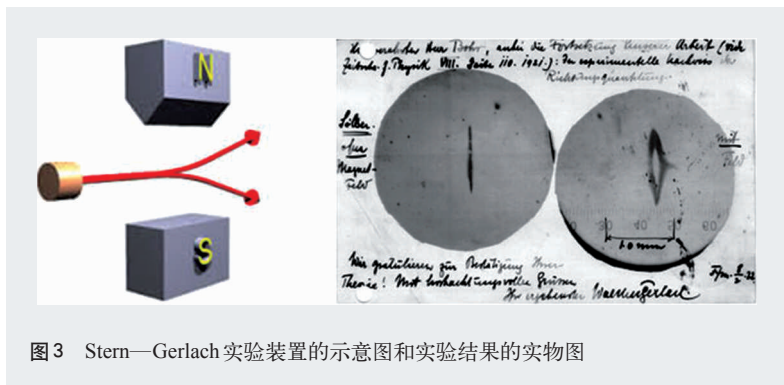


图3 Stern—Gerlach 实验装置的示意图和实验结果的实物图

一束电中性的 Ag 原子通过一段垂直于运动方向的非均匀磁场后，分成对称的两束，在屏上留下向上、向下偏移相等距离的两个斑块(图3)。这是因为 Ag 原子处于自旋一半向上和一半向下的状态，横向磁场的存在，即测量仪器的加入，使它们按等几率坍缩到自旋向上和自旋向下的本征态，在屏上留下与中心位置等间距的相同强度的痕迹(证明状态坍缩的正确实验应该是把经第一个非均匀磁场分裂得到的一束引入到另一个、方向与前者垂直的非均匀磁场中，观察到原子束又分成了两条)。因此，Stern—Gerlach 实验的意义不仅是否定了原子磁矩的 Larmor 经典理论、“证实”了 Sommerfeld—Debye 的空间量子化概念，进而被诠释为 Uhlenbeck—Goudsmit 的(电子)自旋概念的坚定基础。这是该实验被称为“韧性的、超理论的结果(robust, transtheoretic result)”的原因——这样的实验太罕见了<sup>[13]</sup>。这个实验被当成是量子测量原理的最简洁、明晰的一个例证。当然了，因为非均匀磁场的缘故，Stern—Gerlach 实验只是近似地满足 von Neumann 的投影假说<sup>[14]</sup>。

第二个例子是双缝实验。一个用激光束实现的双缝实验等价于多次光子双缝实验的统计结果，光束实验的强度分布同光子系统的态矢作为位置本征态在探测屏上对应的几率分布一致。关于不同 Fresnel 数条件下双缝干涉的路径积分描述的结果，具体计算也是最近才有的<sup>[11]</sup>。

## 6 结束语

量子测量问题不是一个容易探讨的问题。西

方有谚语云：“你要是想在量子物理学家的眼里看到恐惧，就跟他提测量这个词”。但是，量子测量问题又是量子力学发展绕不过去的话题，就一个具体实验而言，毕竟其中的测量为什么是量子测量不是自明的。在结束本文之前，有必要就如下几点啰嗦几句：

(1) 我们的物理学被分为经典和量子的，但物理的世界不作这样的区分。量子事件到达人能认知的层面上去产生一个测量的结果，要穿越经典范畴。对这中间发生的事情，随意假设或对问题视而不见都不是科学的态度。但诠释量子测量要穿越经典—量子之间的边界<sup>[7]</sup>，恰恰触到我们把自然界分成量子世界和经典世界这种幼稚做法的痛处。只要我们的物理还有经典与量子之间的形式上的执着，我们的物理学就离正确还太远。

(2) 波粒二象性与量子理论符合决定论的思想不协调。把双缝实验表述为以一定几率从上缝或者下缝通过的阐释是陈旧的说法，会把初学者引入不当的思维。

(3) 量子测量总是有预设语境的，有更多的理论的内容(theory laden)。经典光学里惯用的偏振片是因为我们把它当作量子测量设备它才有了量子测量的能力；是先有了量子隧穿的概念，后来才有扫描隧道显微镜看见原子的说法。正确理解一些所谓的量子测量需要更多的测量结果和关于体系之量子理论之间的互相参详。不能指望有独立于量子理论以外的测量过程来确立或者否定某个量子理论。科学史上一个有趣的事实是，是理论而不是实验断定 $\theta$ - $\tau$ 是同一种粒子，使得人们最后放弃了弱相互作用中的宇称守恒。这是爱因斯坦所谓“理论决定我们能观测到什么”的一个例子<sup>[15]</sup>。当然，并不总是这样。

(4) 按照 Dirac, von Neumann 的测量理论，测量过程得到的都是本征值，但并不是所有的力学量之本征值都有实在的含义。自旋的两个投影表现为非均匀磁场分裂开来的两束原子束，这个实



验的结果具有很高的韧度。那两个斑痕粗一点、细一点，或者偏离多一点、少一点，都不影响最后的结论。相反，位置算符的本征态在测量层面上就不具有严格的意义，光子、电子的“位置”分辨永远不会小于固体中的原子间距。对于涉及这类不具有严格实在意义的所谓本征态，比如粒子的位置或者偏振方向等，讨论时有必要谨慎一些。

把一些力学量本征值问题同仪器(假设其存在)放到一起讨论可能更具启发性。比如，有心势场问题中的算符( $L^2$ ,  $L_z$ ,  $S_z$ )有共同的本征态，对于( $L^2$ ,  $L_z$ ,  $S_z$ )的某共同本征态，仪器对 $L^2$ ,  $L_z$ 的观测应给出结果 $\sqrt{l(l+1)}$ 和 $m$ ( $m \leq l$ ,  $m, l$ 是整数)，但对 $L$ 的测量却是一组随机值。这样的仪器太神奇了，似乎没人认真考虑建造这种仪器的可能性。化学家们最近有建造测量 posmom，即算符 $(x \cdot p + p \cdot x)/2$ ，的建议，也未见仪器建造者把这个建议当真。

(5) 仅就 Stern—Gerlach 实验和双缝干涉而言，包含大量量子体系的宏观实验与量子测量理论不矛盾，这可能是量子测量理论被提出的认知基础。对更多的宏观实验体系的深入分析，有助于深入理解量子测量原理，或者说有助于建立起

量子理论同实验室测量或者自然现象之间的完美自洽性。

(6) 关于量子系统的量子测量实验，抱持一点谨慎的态度是必须的。若微观量子体系的量子测量结果构成对量子理论和量子测量原理的挑战，应该也会在相应的宏观实验中有所反映。这是本文特别要强调的一个观点。一个实际的测量实验是否构成量子测量，是有商榷的余地的；在遇到量子测量基本问题时，一些人格外大胆，而有些研究者们还是蛮谨慎的，或者视不同场合采取不同的态度。关于这一点，有一个有趣的例子。有报道宣称，有人通过弱测量可以观察到叠加态变化到本征态的缓慢过程<sup>[16]</sup>，这可是关系到量子测量原理的大事。研究者在被采访时也信誓旦旦，但是在发表的原文中却没这么说<sup>[17]</sup>。

类似的问题还可以提出很多，我们无法给出结论性的意见，甚至不能给出清晰的表述。但是，我们希望量子测量问题能够得到足够的重视，尤其是来自量子测量实践者们的重视。若是能花点篇幅阐述何以某个设备的测量构成真正的量子测量，则由此得到的关于量子力学的论断会更有说服力一些。

## 参考文献

- [1] Jacobs K. Quantum Measurement Theory and its Applications. Cambridge University Press, 2014
- [2] Aharonov Y, Rohrlich D. Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed. Wiley-VCH, 2005
- [3] Dirac P A M. The Principle of Quantum Mechanics. Oxford University Press, 1958. pp. 36; 108
- [4] Tang J S *et al.* Nature Photonics, 2012, 6: 600
- [5] Peres A, Terno D R. Rev. Mod. Phys., 2004, 76: 93
- [6] Peres A. Found. Phys., 2004, 35: 511
- [7] von Neumann J. Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Springer, 1932. p. 236; von Neumann J. Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. translated by Beyer R T. Princeton University Press, 1955. pp. 352; 418
- [8] <http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/doubleslit.html>
- [9] Arndt M, Nairz O, Vos-Andreae J *et al.* Nature, 1999, 401: 680
- [10] 我们认为这本质上首先是源于数学的局限。人们选择用点和三角函数当作物理对象的形象来研究其运动。所谓的波粒二象性源于量子力学出现之前就有的质点动力学和波动力学。物理对象被当作几何的点或者连续体，当然要比当作有限大小、特定形状的东西要简单。微观粒子到底多大、长什么样一直是个让人头疼的问题。无视这个问题，或者把粒子简化为全同的点或者连绵的波，当然会带来新的问题。但这些问题不是物理的问题，而是物理学家的问题。
- [11] Beau M. Feynman Integral and One/two Slits Electrons Diffraction: an Analytic Study. arXiv: 1110.2346v3[quant-ph], 2012
- [12] Uhlenbeck G E. Nature, 1971, 232: 449
- [13] Weinert F. Stud. Hist. Phil. Mod. Phys., 1995, 26(1): 7546
- [14] Scully M O, Lamb W E, Barut A. Foundations of Physics, 1987, 17(6): 575
- [15] Jaeger G. Entanglement, Information, and the Interpretation of Quantum Mechanics. Springer, 2009. P. 62
- [16] Reich E S. Physicists Snatch a Peep into Quantum Paradox, Nature News, 09 October, 2013
- [17] Murch K W, Weber S J, Macklin C *et al.* Nature, 2013, 502: 211