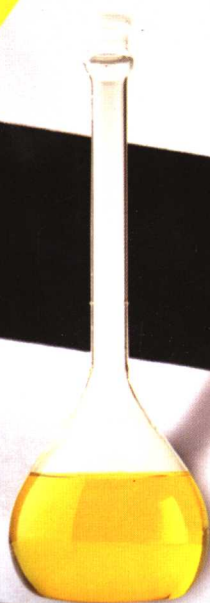


量子实在与 “薛定谔猫佯谬”

李宏芳 著



清华大学出版社

清华科技与社会丛书

量子实在与 “薛定谔猫佯谬”

李宏芳 著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是量子力学的哲学研究著作。通过分析“薛定谔猫佯谬”的缘起和实质,近年来量子测量关于“薛定谔猫佯谬”在实验上和理论上取得的研究新进展,对作为哲学讨论基石的量子测量中“量子如何向经典过渡”的问题,量子力学为何会引发主观论与客观论、实在论与反实在论之争的问题,进行了深入细致的探讨,阐明了物质世界的量子本性,以及量子力学是表征物理实在的客观理论。本书对于弘扬辩证唯物主义,具有重要的理论和现实意义。

本书对于科学哲学专业的研究生和教学科研人员,具有学术参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

量子实在与“薛定谔猫佯谬”/李宏芳著. —北京:清华大学出版社,2006.12
(清华科技与社会丛书)

ISBN 7-302-13871-0

I. 量… II. 李… III. 量子力学—物理学哲学—研究 IV. 0413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 114503 号

组稿编辑:方 洁

文稿编辑:王巧珍

责任校对:宋玉莲

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印装者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:148×210 印 张:7.625 字 数:210 千字

版 次:2006 年 12 月第 1 版 印 次:2006 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-13871-0/B·52

印 数:1~3000

定 价:20.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:021739-01

水木清华，科玄日新，STS学术领域得天时地利人和而成长。

学长中群星璀璨，新时期催人奋进。1985年成立STS研究机构，1993年发展为人文社会科学学院STS研究所，2000年组建了清华大学STS研究中心，2004年申报清华大学科学技术与社会发展创新基地获得批准。

目前，清华大学STS学科有科技哲学和科技史硕士点、科技哲学博士点、哲学博士后流动站，合办核心期刊《科学学研究》。

清华大学的985一期建设中，《清华科技与社会丛书》共出版了8本，其中7本专著全部通过北京市社会科学理论著作出版基金评审并资助。

作为清华大学的985二期建设的组成部分，《清华科技与社会丛书》将继续致力于推出高水平STS研究成果，繁荣STS学术研究，推动STS学科发展。

清华科技与社会丛书

轿车交通批判

王蒲生 著

深层生态学思想研究

雷毅 著

自组织方法论研究

吴彤 著

赛博空间的哲学探索

曾国屏 李正风 段伟文

黄铭坚 孙喜杰 著

相对主义：从典范、
语言和理性的观点看

王巍 著

科学技术的哲学反思

吴彤 等 主编

科学哲学问题研究

王巍 著

现代技术问题研究

——技术、现代性与人类未来

张成岗 著

科学知识生产方式及其演变

李正风 著

量子实在与“薛定谔猫佯谬”

李宏芳 著

序

李宏芳的量子力学哲学研究专著《量子实在与“薛定谔猫佯谬”》获北京市社会科学理论出版基金资助，即将由清华大学出版社出版发行。我衷心地祝贺她。这是她到北京大学攻读博士学位，后到清华大学做博士后，经过6年持续研究完成的一项学术工作。作为她的博士论文导师，当她请我为她的著作作序时，我欣然同意。

近年来，由于时髦思潮的影响，马克思主义的阵地有所削弱，唯物主义哲学受到一些人的质疑。但李宏芳却坚定地站在唯物主义的立场上，用唯物主义的理论和方法，研究了一些令人困惑的哲学问题。她的《量子实在与“薛定谔猫佯谬”》一书就是运用辩证唯物主义哲学及其方法论于量子力学哲学问题研究的一篇力作。

在我国20世纪80、90年代，量子力学的哲学问题研究曾经在国内科学哲学界引起轩然大波。一些量子力学哲学问题的研究者大肆宣扬，量子力学证明了“主客体不可分的统一”。在量子力学的测量过程中必须有“主观介入”。甚而言之，“月亮在没人看它时确实不存在！”“唯物主义今天已经被证伪！”

然而，近年来，量子力学实验的和理论的研究新进展，使得长期以来停留在哲学思辨层面的量子力学的哲学问题之争，有了更为明确的科学实验的评判标准和科学理论的分析澄清，这些科学研究的实验的和理论的新进展都表明，科学包括量子力学是沿着唯物主义的方向发展的。

在《量子实在与“薛定谔猫佯谬”》一书中，研究对象不是过去所研究的一些简单的微观粒子，而是一个复杂的宏观态，即死活叠加的宏观猫态。这是一个纠缠态，而且不是两个微观粒子之间简单的纠缠态，而是微观与宏观的纠缠态，因而问题更为复杂。

根据量子力学的“哥本哈根解释”，由这个纠缠态所得出的结论是：若一只宏观的猫处在死态和活态的相干叠加态上，猫的死活将不再是一种独立于观察者主体的客观实在，而是依赖于观察者的测量！这是有悖常理的。因此，除非存在某种机制来破坏猫的死活叠加态，否则量子力学的合理性和普适性均要受到责难和挑战。

对于这样一个长期以来颇为令人困惑的复杂的量子力学哲学问题，李宏芳博士深刻分析了“薛定谔猫佯谬”的缘起和实质，指出这实为长期以来科学上对于纠缠态，特别是对微观与宏观的纠缠态的理解不足，而导致的一个“哲学上”的“佯谬”。她根据近年来量子测量关于“薛定谔猫”研究的实验的和理论的新进展，对量子测量中“薛定谔猫”纠缠态的退相干过程，给予了内容详实、思路清晰的科学阐述和哲学分析，从而更为明确地回答了量子测量中的“波包塌缩”是否必须有“主观介入”，量子力学是否是一个客观的、描述物理实在的理论的哲学纷争。这对于唯物主义哲学及其方法论的发展无疑具有重要的理论意义和现实意义。

希望李宏芳继续在量子力学的哲学问题上进行更为深入和透彻的研究，在此基础上，也可以把触角伸向更为广阔的物理学哲学问题和科学哲学问题。

何祚庠

2006年7月21日

目 录

序	I
导 论	1
第一章 “薛定谔猫佯谬”的缘起和实质	20
一、神奇的量子世界	20
二、“哥本哈根解释”	25
三、薛定谔的哲学观	37
四、“薛定谔猫佯谬”的提出	41
五、“薛定谔猫佯谬”的实质	45
六、“薛定谔猫”与纠缠态	46
本章小结	48
第二章 “薛定谔猫佯谬”为何与哲学发生了联系	50
一、冯·诺依曼的“波包塌缩”假说和物理—心理平行主义	50
二、伦敦和鲍厄对物理—心理平行主义的发展	53
三、维格纳的朋友	55
四、量子测量的主观论解释的困境	56
本章小结	59
第三章 从量子测量的实验新进展看“薛定谔猫佯谬”	61
一、 C_{60} 大分子的量子干涉实验	61
二、单原子“薛定谔猫”的成功制备	65
三、“薛定谔猫”渐近退相干的微腔 QED 实验	66

四、“薛定谔猫”变胖了——SQUID 宏观量子叠加实验	69
本章小结	72
第四章 从量子测量的理论新进展看“薛定谔猫佯谬”	74
一、退相干观念的产生和发展	74
二、退相干理论的基本思想	77
三、从退相干理论看“薛定谔猫佯谬”	82
本章小结	88
第五章 问题讨论和前景展望	90
一、物理学家对退相干理论的评价	90
二、我们对退相干理论的一点看法	96
三、一种可能的解决方案吗	99
四、“猫态”与量子信息	105
本章小结	110
第六章 结语和开放性问题	111
一、量子力学是否是一个客观的理论	113
二、量子力学是否是一个实在论的理论	116
附录一 第五届索尔威会议	119
附录二 爱因斯坦—玻尔之争	122
附录三 冯·诺依曼的测量定理	126
附录四 D—L—P 测量理论的简介	130
附录五 隐参量理论和量子力学的“模态解释”	132
附录六 爱因斯坦的哲学观述评	138
附录七 月亮在没人看它时是否不存在	142
附录八 “多世界解释”及其对“薛定谔猫佯谬”的解决	151
附录九 单个光子是否会产生干涉	159

附录十 “哥本哈根解释”是否等同于玻尔的观点	163
附录十一 “维格纳朋友”对于“薛定谔猫佯谬”的解决	166
附录十二 C_{60} 大分子干涉实验简介	169
附录十三 单原子级“薛定谔猫”的实验简介	173
附录十四 腔场“薛定谔猫”退相干的实验简介	181
附录十五 宏观“薛定谔猫”的实验简介	190
附录十六 退相干如何消解冯·诺依曼测量佯谬	196
附录十七 宏观物体为何空间局域化	200
附录十八 退相干的物理机制及其量化说明	204
附录十九 量子退相干的“因子化模型”简介	208
附录二十 从“因子化模型”看冯·诺依曼测量佯谬	211
附录二十一 量子测量可逆与不可逆的一种讨论	213
附录二十二 关于量子远程传态的简介	217
参考文献	222
外国人名译名对照表	231
后 记	234

导 论

在量子力学的哲学研究中,主观论与客观论、实在论与反实在论,一直是争论不休的热点话题。原因何在?根据量子力学,微观粒子具有量子相干叠加性,即微观粒子可以同时以一定的几率存在于不同的量子态,这些量子态是相干的,有干涉现象;而在宏观尺度的世界中,人们借助于测量仪器所观察到的宏观的观测值,不再具有量子相干叠加性,测量后的量子态变成了不相干的本征态的混合态。如何理解微观粒子与测量仪器相互作用之后所呈现出的这种结果?

在量子力学的测量过程中,测量仪器对被测微观粒子的“原有状态”或“自在状态”所产生的不可避免的“干扰”,是否真的妨碍我们对微观量子进行客观的研究?能否笼统地说在量子世界中根本就不存在“独立于观测仪器,独立于观察者的物理实在”?或说,在量子测量中测量后我们观察到的物理状态或性质,在测量前根本就不存在?等等。对于这些问题的肯定或否定的回答,一方面反映了人们对于量子力学的测量和量子力学所遵循的统计规律的认识水平;另一方面自然也就成为马克思主义哲学的基本原理,在现代自然科学面前,能否继续得以坚持和发展的新说明。

围绕量子力学的测量问题,从量子力学诞生之初,不同哲学流派的物理学家和科学哲学家,就进行了积极的思考和深入的探讨。其言辞之激烈甚至到了大伤感情的地步。例如,信奉唯物主义哲学的物理学家和科学哲学家,不满意对量子力学做主观论、主客体不可分割统一论和反实在论或实证论的解释和说明,激烈抨击其为量子力学的唯心主义解释。与此针锋相对,被批评者对批评者的传统观念报以相当轻蔑的态度,戏之为机械的、僵化的唯物主义,企图一厢情愿地从量子力学的“崭新”的认识论返回到唯物主义本体论。对阵双方

较量气势之宏伟,持续时间之久长,在现代科学哲学史上书写下了壮丽恢宏的篇章。

然而,单纯地依靠理论分析和哲学思辨,并不能解决认识论上的纷争。纯粹的哲学思辨素来无定论。辩证唯物主义的坚持和发展,不仅需要哲学理论的提升,还需要有自然科学的新成果的支持,特别是需要科学实验上取得的研究新进展的检验和促进。在 20 世纪即将结束之际,量子力学围绕测量问题在实验上和理论上取得了一系列的研究新进展。这些研究新进展为解决量子力学的哲学论争谁是谁非,在一定程度上提供了科学实验上的评判标准和科学理论上的分析澄清。通过分析这些实验和理论研究的新进展,人们可以更为理性地判断,量子力学的发展究竟支持和发展了何种哲学观。

一、量子测量理论的历史发展

量子力学的测量问题作为科学问题,它为何会引发旷日持久的认识论纷争,以至于历史上曾经在量子力学领域内工作的人们,各个不同哲学派别的哲学家,都曾在量子力学哲学问题上发表了大量的不尽相同的,甚至是十分对立的见解,甚至连玻尔(N. Bohr)和爱因斯坦(A. Einstein)两位科学上的巨匠,也曾卷入这一世纪性的争论?究其原因,是因为量子测量本来就是在科学上有争议的问题,反映在哲学上,自然就更是众说纷纭,观点纷呈。

量子力学创建于 1923 年,到 1927 年它基本的数学形式已经完成。然而,随着量子力学的形式体系的完成,关于量子力学的概念基础的解释的论争展开。这以 1927 年 10 月在布鲁塞尔召开的第五届国际物理学会议亦即索尔威会议为标志。在这次会议上,爱因斯坦和玻尔由于在实在观方面的冲突,使得他们对于量子力学形式的意义的生动讨论,最终并没有就解释达成普遍一致的共识,相反却留下了许多值得回味的问题。其中,“量子如何向经典过渡”的问题,即量子力学的哲学研究中通常提到的“波包塌缩”现象——今天的量子理论认为,没有“波包塌

缩”，只有量子向经典的过渡——就是量子理论所有概念讨论中的一个主要问题。（关于第五届索尔威会议和玻尔—爱因斯坦之争的介绍参见附录一和附录二）

何为量子测量中的“波包塌缩”现象？根据量子力学的几率解释，在量子测量中，任何一个确定状态的呈现都遵循着几率统计的规律，是由微观粒子的量子叠加态以一定的几率向与所测量的物理量的本征值相对应的本征态跃迁的结果，即在这个量子测量过程中微观粒子在测量前和测量后在性质上有一个原则性的区别，在测量前，波函数可以展开为本征波函数的叠加态，其中不同的本征态之间是“相干”的，而在测量后，波函数进入相应的本征态之后，不同的本征态之间将是“不相干”的，即在进行具体计算时，将不能再计算它们的相干项。相干的物理状态称为纯粹状态，不相干的物理状态称为混合状态。量子力学的体系在经历测量以后，这种由相干的量子态向不相干的本征态的跃迁，或者说由纯粹状态向混合状态的转化，就称为量子测量的“波包塌缩”现象。

量子测量的“波包塌缩”现象，准确地说，是“量子如何向经典过渡”的问题，为何会成为量子理论所有概念讨论中的一个主要问题呢？其根本原因就是在于量子测量所造成的这种由相干的量子态到不相干的混合态的转变，涉及一个“干涉项消失”的问题。作为量子力学的创建者的玻尔等人，自然要进一步探求这个干涉项消失的原因。由于在量子力学的测量过程中，仪器和粒子间的相互作用变得不可忽略，再加上量子规律所特有的统计性质，从而曾导致玻尔产生了量子规律所特有的统计性质，是来自测量仪器和微观粒子之间存在着不可控制的相互作用的猜想。根据这一猜想，在测量仪器和粒子相互作用时会“不可控制”地在相应的本征态上产生某个任意的相角。正是这种任意的相角导致干涉项的消失。可以说，玻尔的随机相角为“干涉项”的消失提供了一种可能的解释，但并不是唯一的解释。尤其是，为什么测量仪器和粒子发生相互作用后就出现了这种“随机”的相角，这是一个有待回答的问题。

为了回答这个“干涉项消失”的原因,即“量子如何向经典过渡”的问题,1932年计算机的创始人、大数学家冯·诺依曼(John von Neumann)依据薛定谔方程,给出了一个著名的量子测量的“证明”和“波包塌缩”假说。^① 根据冯·诺依曼,测量仪器可以被设想为一个微观体系,也服从量子力学的运动规律,量子测量可以看作是被测量子系统和测量仪器之间的相互作用。这样,历史上第一次冯·诺依曼对量子测量的动力学机制进行了理论尝试,从而开辟了后来的量子测量理论沿着动力学方向发展的先河。然而,冯·诺依曼的量子测量理论经过严密的数学“证明”所得出的结论是荒谬的:要实现量子测量中的“波包塌缩”即“干涉项”的消失,必须有“抽象的自我”或说人眼参与整个测量过程作“最后的一瞥”。(关于冯·诺依曼测量定理的证明参见附录三)

量子测量的“波包塌缩”必须有人眼的“最后的一瞥”的说法,自然难以使信奉唯物主义哲学的物理学家们感到满意。1942年,日本物理学家武谷三男(Mituo Taketani)首先对冯·诺依曼的测量理论提出批评。武谷三男指出,这一荒谬的结论的得出是由于冯·诺依曼的“证明”没有恰当地考虑仪器的宏观特性,“干涉项”应该在仪器的微观特性向宏观特性转变的过程中消失。^② 即量子 and 经典的界线是在测量过程中由微观现象转变到宏观现象的地方。但是,究竟微观现象和宏观现象相区别的特征何在?武谷三男没有作进一步的分析。

1958年,澳大利亚物理学家格林(H. S. Green)进一步提出了一个探测器模型,首次对这一问题给予了较为深入的回答。格林认为,在量子测量过程中,仪器通常具有两方面的作用。^① 具有将某一微观系统转化为由某些本征值所标志的、物理上可以分离的微观系统

① Von Neumann, John. Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin: Springer, 1932

② 武谷三男. 量子力学的观测问题. 科学, 1964 (3)

的作用。②必须能在宏观规模上探测到这一讯号,也就是探测仪器将处在某种宏观的亚稳状态。这样,微观粒子对宏观仪器激发起的小扰动就能得到放大,并且在宏观上可以被观察或记录。所以,在量子测量过程中的宏观探测器,一方面它们服从量子力学,另一方面还需要反映出这种宏观上亚稳状态的特点。这样,就可以解决量子测量中的熵增问题。①可以说,格林的探测器模型较为具体可行地解释了量子力学的测量过程,但是这个模型也存在着不足之处。它不是厄米的。这就促使人们进一步探求一种更普遍、更可行的量子测量理论。

1962年,意大利的三位物理学家丹尼耳(A. Daneri)、朗格(A. Loinger)和珀罗斯拜里(G. M. Prosperi)给出了量子测量问题的一个较完整的回答。②在D—L—P测量理论中,丹尼耳等人吸收了格林所提出的量子探测体系是宏观的、热力学的、亚稳系统的思想,认为任何仪器既是一个量子系统又必须具有相应的宏观变量,如果仪器不具有这双重特性,就无法用某种宏观变量来反映微观粒子系统的本征值。并且根据格林理论中“探测器将对应于不同的本征态而划分不同‘成分’”的思想,进一步用希尔伯特空间的语言表述出来,从而相当普遍地证明了量子力学的测量过程,可以在他们引用量子统计力学所定义的宏观仪器基础上来实现。这样,量子测量过程中熵增加的问题就迎刃而解,而且也不需要“主观的介入”。(关于D—L—P测量理论的介绍参见附录四)

格林探测器和D—L—P测量理论出现以后,由于这些理论所具有的唯物主义性质,立即受到一些理论工作者的支持,其中包括日本物理学家坂田昌一(Shoichi Sakata)和武谷三男。苏联的布洛欣采夫(D. I. Blokhintsev)在1963年9期《哲学问题》杂志上也写了一篇支持类似观点的文章,布洛欣采夫还给出了一个具体的例子来说明类似的机制。

① Green, H. S. Nuovo. Cim., 1958 (9) : 880

② Daneri, A. Loinger, A. & Prosperi, G. M. Nuclear Physics, 1962 (33) : 297~319

但强有力的支持是来自哥本哈根学派的重要成员罗森菲尔德(L. Rosenfeld)。在1963—1968年间,罗森菲尔德先后在日本出版的《理论物理进展》、《今日物理》和《核物理》上写了好几篇文章^①,讨论量子力学的测量问题并且支持格林以及D—L—P等人的观点。罗森菲尔德声言:由于D—L—P“对测量过程所作的非常彻底而优美的讨论,(这些)意大利物理学家已决定性地建立起(量子力学)算法规则的完全的逻辑一致性,不留下任何漏洞使人陷入过头的玄想”。^②

由于罗森菲尔德等人在学术界的地位,因而D—L—P测量理论就取得了较多人的支持。1978年我国理论物理学家何祚庥和黄涛曾专门撰文《谈谈量子力学测量问题的一个进展》^③,详细介绍和分析了D—L—P的测量理论。1986年,耗散结构理论的创始人普利高津(I. Prigogine)访问中国,在所作的演讲中也表示赞成D—L—P测量理论,并认为应在这一理论基础上做进一步的科学工作。^④当然,D—L—P理论之所以得到不少人的支持,重要的还是因为这一理论确实反映了量子测量过程中的一些重要特点。

但是,D—L—P理论也获得了来自不同观点的批评。其中比较重要的批评来自阿玛蒂(E. Amaldi)。他明确指出,探测器的描述不应局限于热力学的亚稳体系。像云雾室、泡室、乳胶等,诚然是热力学亚稳的体系。但是,像切伦柯夫计数器等,就很难认为是热力学的不稳定的体系了。对此,D—L—P表示接受,但认为他们的理论并不局限于热力学的亚稳状态,只要相应于统计力学上的更为普遍的亚稳状态就行

① Rosenfeld, L. Phys. Today, 1963 (16): 45; Supplement to the Progress of Theoretical Physics, 1965: 222; Nucl. Phys. A, 1968 (108): 241

② Rosenfeld, L. Supplement to the Progress of Theoretical Physics, 1965. 222~231

③ 何祚庥,黄涛.谈谈量子力学测量问题的一个进展.北京师范大学学报·自然科学版,1978(3): 77

④ 参见:何祚庥.现代物理学研究中的哲学问题——三大论战.北京:北京师范大学出版社,2000.337

了。为此,他们又进一步引入了量子的玻尔兹曼方程来讨论这一问题。^①但在实质性的问题上,并没有什么不同。

实际上,正如何祚麻所言,在 D—L—P 测量理论中,干涉项消失的原因并不在于仪器的亚稳状态,而在宏观系统达到平衡状态以前干涉项就已经消失了。亚稳状态不过起了一种放大的作用,以使微弱的微观信号得以用宏观物理量表现出来而已。D—L—P 测量理论的实质就在于所选择的测量仪器必须能够将微观粒子的本征值相互区别开来,至于放大机制可以用由亚稳状态向稳定状态过渡,也可以用其他放大信号的方法。

以上是量子力学的基本形式完成之后,围绕量子测量中的“波包塌缩”现象,在不断论争中发展了半个多世纪的量子力学的测量理论的一个简单介绍。事实上,除了格林探测器和 D—L—P 测量理论这些具有唯物主义性质的量子测量理论外,为了回答量子测量中“量子如何向经典过渡”,物理学家还突破“哥本哈根解释”的标准框架,提出了量子力学的其他解释,如量子力学的“多世界解释”、量子力学的“退相干解释”、量子力学的“模态解释”,以及量子力学的替代理论——隐参量理论。关于这些解释或理论,本书将会在正文或附录中逐一加以阐释。其中隐参量理论是作为量子力学的替代理论出现的,它曾遭受了实验的重创,但至今仍有部分人在这一领域工作,不同的是他们已扩展了它的研究纲领,新的隐参量理论经常被归并为量子力学的“模态解释”中的一种。(关于隐参量理论和量子力学的“模态解释”的介绍参见附录五)

不难看出,关于量子力学的解释,特别是“波包塌缩”的量子测量问题,争议是强烈的。但这无疑有力地推动了人们对于量子力学的概念基础的理解和量子测量理论的发展。那么,围绕量子测量问题曾经引发了哪些哲学论争呢?

① Daneri, A. Loinger, A. & Prosperi, G. M. Nouvo Cim. B, 1966 (44) : 119