

量子测量问题与量子力学诠释

请补英文题目

量子力学的建立是 20 世纪科学发展的一个伟大的里程碑。它的应用导致了原子能、激光和半导体等重大技术发明，大大促进了人类的物质文明的进步。在人类思想发展方面，量子理论使得人们对微观世界运动规律有了基本正确的、革命性的理解。量子力学的主要预言在实验的层面得到精确的检验，但对于它的思想基础和观念诠释，包括量子力学创立者在内的许多物理学家并没有统一的认识。以量子测量问题为核心，关于量子力学的思想基础和基本问题诠释的争论，从来就没有停止过。

近年来，伴随着技术的进步，过去仅限哲学思辨式探讨的量子论基本问题的讨论，已经能够在实验室里加以精确的检验。最近由于量子信息的发展，量子测量等基本问题的研究进一步得到了广泛的重视。这些新的发展赋予量子物理基本问题研究新的含义，例如，为了实现实用化的量子信息处理方案，要有效地避免和控制量子退相干，从而深入理解人类控制微观系统的量子态的基本极限。

从量子测量问题的角度看，量子力学所展示的微观世界图景，完全不同与经典物理“精确描述”的物质世界。通过测量从微观世界提取经典观察者可以感知的信息，具有令人捉摸不定的随机性。正是在经典与量子的交汇处，围绕量子力学测量问题，提出了一些量子力学诠释相关的基本问题，如

- 1.量子测量是否真的引起被测量子系统不可逆的改变——波包坍缩(wave function collapse)? 进而，量子测量的结果是否依赖人们对微观世界的“主观介入”？
- 2.量子退相干(decoherence)能否给出更普适的量子力学诠释、从根本上解决量子力学测量问题？它与波包坍缩是否等价？
- 3.量子力学的哥本哈根诠释(Copenhagen interpretation)以外的其他诠释，如多世界理论(many world theory)和自洽历史方案(consistent history)能否客观地描述量子测量过程？

哥本哈根诠释：实验基础及其哲学困境

量子力学认为，微观世界不同于经典世界的根源在于它具有量子相干性，波粒二象性是其直接体现。在经典力学中，坐标和速度能够给出了粒子运动状态的完备刻画，但在量子力学中，由于波粒二象性，动量和坐标不能被同时测准，微观粒子

的经典描述不再适用。就为什么有这种不确定性关系、波粒二象性含义如何等，爱因斯坦等人和玻尔为代表的哥本哈根学派在1927年的Solvay会议上开始学术论战，引发了后来一系列关于量子力学基本问题的争论。通常，哥本哈根学派此后形成对量子力学的观点被笼统地称为哥本哈根诠释。当然，即使在哥本哈根学派内部对于量子力学基本问题的理解也存在一些本质的分歧。

为了阐述量子力学的哥本哈根诠释和量子力学测量问题的基本含义，首先要了解什么是量子相干性或波粒二象性。力学量 A 本征态 $|n\rangle$ 的量子相干叠加，如 $|\phi\rangle = C_1|1\rangle + C_2|2\rangle$ 刻画了力学量 A 测量的不确定性。但是，一旦在一次测量中得到 A 的一个本征值，则系统便确定地坍缩到相应的本征态 $|1\rangle$ 或 $|2\rangle$ 上，发生波包坍缩。图1形象地说明了这一点。

对于量子测量引起的这种不可逆改变，至今最恰当的解释是考虑量子世界的互补性(complementarity)的哥本哈根诠释：物质运动具有粒子和波的双重属性，但在同一个实验中二者是相互排斥的。例如，在双缝干涉实验中，测量粒子通过了哪一个缝，等于强调了波粒二象性的粒子方面，与粒子性互补的波动性便被排斥了，干涉条纹就不再存在了。这种由于测量或其他影响导致相干性消失的现象称为量子退相干。海森堡认为，测不准关系(不确定性关系)可以解释量子互补性：通过具有“粒子特征”的测量(如测量坐标)，去描述具有“波粒二象性”的物质运动，会带来动量的不确定性，从而导致干涉条纹消逝。而玻尔认为，动量-坐标测不准关系不是退相干的根本起因，互补性才是本质的。德国 Rampe 小组的冷原子布拉格散射实验(图2)通过相互作用证实了玻尔的观点。在这个实验中，测量仪器(内部状态)和被测系统(空间分束)形成的量子纠缠态(entangled state)才是问题的关键。

仅仅为了解释以上的实验，理论描述只须通过相互作用、产生量子纠缠描述量子测量过程，并不需要引入直接引入波包坍缩的观念。但测量要读出结果，人们需要进一步知道测量仪器的状态。对此，关于一般的量子测量理论的研究可以追溯到1935年冯·诺依曼的开拓性研究。在以波包坍缩为核心的哥本哈根量子测量方案的关键点是仪器必须是经典的，在量子力学描述之外，波包坍缩是瞬间的。然而，实际上，仪器是由服从量子力学的微观粒子组成，它的整体也应当用量子力学加以描述。为此冯·诺依曼希望，适当地引入被测系统和仪器间的相互作用，从系统+仪器的总系统的薛定谔方程，自然可以推导出波包坍缩。基于这一考虑，量子系统

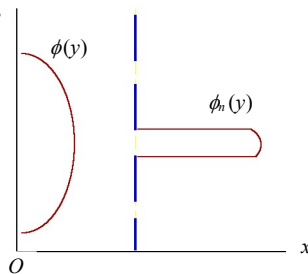


图1 波包坍缩的形相描述：粒子波函数 $\phi(y)$ 描述了沿 x 方向运动的粒子束沿 y 方向的分布。我们用一个筛形装置来探测粒子出现在 y 方向的何处。一旦单粒子实验在 P 发现粒子，则根据波包坍缩的描述，便可断言测量后波包变窄， $\phi(y)$ 成为如图1描述的狭窄波包 $\phi_n(y)$ 。

的退相干可以是一个逐渐出现的物理过程,而不一定是哥本哈根学派描述的经典仪器引起的瞬间坍缩. 法国 Haroche 小组 1996 年完成的腔 QED 退相干过程实验恰好证实这一点.

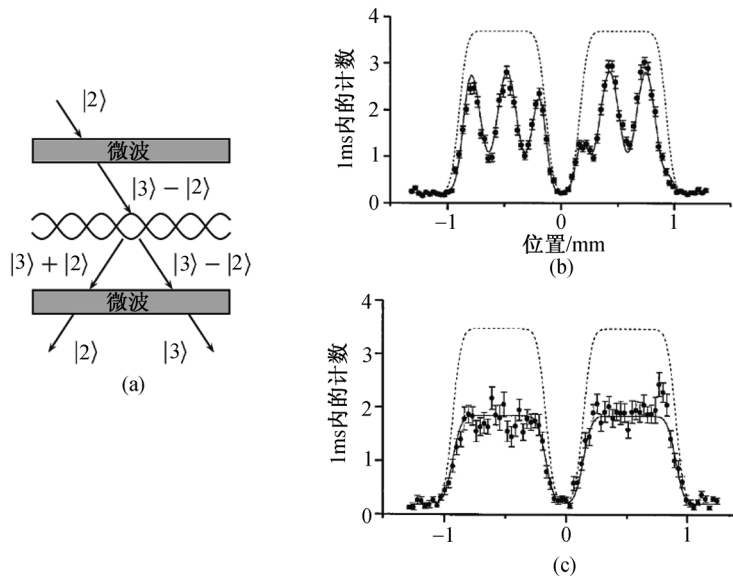


图 2 冷原子布拉格散射和拉比转动结合, 产生内部态(|2>和|3>)和空间束的量子纠缠(a), 从而内部态对空间位置进行测量, 导致物质波干涉(b)消逝, 但波包包络的宽度不变(c), 意味着没有动量扰动

然而, 冯·诺依曼的理论是不自洽的。从仪器-系统相互作用观点出发, 冯·诺依曼对量子测量进行了更深入的理论探索, 但得到的推论却是令人费解: 必须有观察者的“最后一瞥”, 才可能导致系统的波包坍缩. 冯·诺依曼论证的大意是, 仪器 I 和系统 S 之间的相互作用会导致了总系统从因子化初态到纠缠态的转变, 使得被测系统没有量子相干性. 但是, 对于量子系统 S 加仪器 I 的复合系统, 相干性仍然是存在的。为了消除这种较大复合系统的相干性, 就必须引入仪器 II, 形成更大的纠缠态. 要求 S+I 没有相干性, 是为了保证从仪器态“经典地”读出系统的态: 仪器和系统的关联, 应当由经典的概率描述, 不应具有量子相干性. 正如天气预报一样, 预报明天降雨概率为百分之三十是一个客观的概率性事件, 并不依赖人们去观察什么。为了消除 S+I 的干涉项, 就需要引进仪器 II, 而进一步就要引进仪器 III, 仪器 IV, ……这仿佛形成了一条无限的仪器链——冯·诺依曼链(图 3)。按照冯·诺依曼的观点可以推论, 波包的坍缩最后必须由“主体”来决定, 人的意识决定了微观测量结果的“存在”. 由此, 维格纳甚至引申出更加似是而非的结论: 量子力学理论必须有“主观介入”, 微观概念不再具有“客观性”, 量子微观世界

不会独立于主体之外。

目前人们希望建立没有“主观介入”量子测量理论。可以作为冯·诺依曼相互作用模型的适当推广，无须“主观介入”，冯·诺依曼链就能够以某种方式终结，从而自然地描述了真实的量子测量。这些理论尝试强调仪器和微观系统的本质区别：仪器必定是宏观的，否则人们无法直接读数。要求仪器必须有无穷多个自由度组成，仪器的量子态本身必定包括集体态(仪器读数)和内部态。由于测量只关心集体态，可以忽视仪器内部的信息，得到仪器和系统的经典关联。这时，由仪器完全以经典概率的方式定出被测系统状态，得到完全有用的信息。这些量子测量理论正在经历实验的进一步检验，相信其最终目标是正确的。

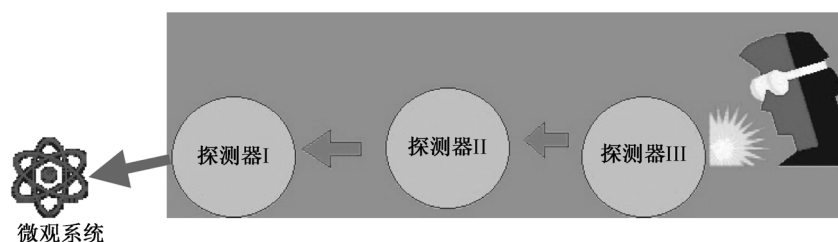


图3 冯·诺依曼链与“主观参与”

多世界——相对态诠释和量子测量的客观性

针对量子测量哥本哈根诠释，爱因斯坦等人坚持认为，存在独立于人类意识之外的客观物质世界，这种客观性是人类通过科学阐释自然规律的必要基础。因此，寻求一个没有主观介入的客观的量子力学诠释，无论对物理学、还是认识论都有根本性的意义。

哥本哈根学派量子测量理论是典型的二元论。它把宇宙割裂为两部分，一部分是量子的，波函数行为服从薛定谔方程(U过程)，另一部分是经典的，波函数变化描述为波包坍缩的R过程。后者不仅取决于外部经典仪器，而且最终取决于冯·诺依曼链末端的人类观察者。然而，对于量子引力或量子宇宙学的研究，二元论的量子测量处理是不可接受的。因为我们相信量子引力是基本的，而现实中观察到的宇宙却服从经典的广义相对论。既然在宇宙是包罗万象的，之外不可能存在一个无所不能的观察者(现代科学摒弃的“上帝”)和环境导致系统的退相干，从量子引力到经典引力的约化不可能的。

1954年，埃弗里特(H. Everett III)提出了一元论的量子测量思想——今天称之为多世界诠释(many world interpretation)。虽然“多世界”一词的用法，以类科幻的方式引起了公众的注意，但并不十分准确，容易产生误导。科学的名称应当为相

对态(relative state)或宇宙波函数(universe wave function)描述。埃弗里特认为,世界是由服从量子力学的微观粒子和波场构成,测量仪器、被测系统和观察者构成的整体具有一个“普适”的波函数——宇宙波函数。测量前它是系统、仪器和观察者的乘积态,测量后它变成若干乘积态的相干叠加。用薛定谔猫态可以形象地描述埃弗里特的理论(如图 3)。

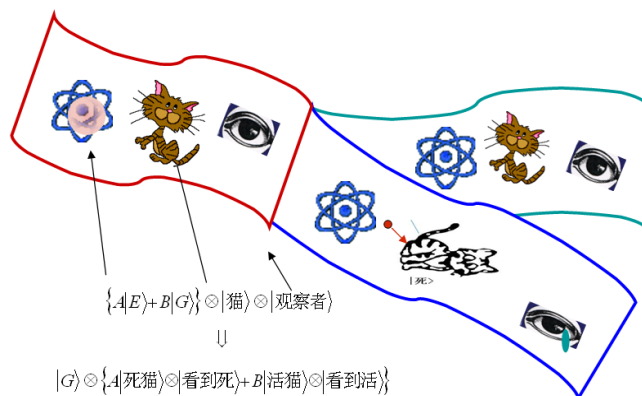


图 3 量子力学的多世界诠释和宇宙波函数的分裂

在上图描述的量子态演化中,测量前原子处在激发态 $|E\rangle$ 和基态 $|G\rangle$ 的相干叠加加上,而猫开始在活态上。如果开始原子只处在 $|E\rangle$ 上,从激发态跃迁到基态辐射一个 γ 光子,触动特定的装置杀死猫,使得猫最后处在死态上。反之,处在基态的原子不辐射,猫仍然活着。在埃弗里特的多世界理论中,宏观的猫本身可以视为某种测量仪器,测量原子会发生自发辐射,人作为观察者也是宇宙的一部分。因此,测量的相互作用导致整个“宇宙”(仪器+猫+观察者)分裂成两个分支或两个世界:在一个分支里面,人观察到了死猫与原子辐射,而活猫与基态的原子不辐射相联系。观察者本人也“分身”到宇宙的两个分支中,并且每个分支中的观察者都认为自己是独一无二的。这里没有波包坍缩,测量结果使得宇宙的“分裂”。事实上,理论无需具体的区分观察者还是猫,只要存在相互作用宇宙就要“分裂”,宇宙分裂了许多分支,而且每个分支都是一个真实的存在。当然,这种“分裂”的正确理解,是宇宙“多种可能的历史选择”。为了使这个理论能够自洽,符合我们的日常经验(从来没有感受到这样一种“分裂”的世界),每个分支之间是不能相互交流和通信的,否则同一个观察者的“分身”之间就会互相认知。多世界理论要保持这种逻辑上的一致性,就必须具有观察的客观性:不同的观察者观察系统同一个量子态,得到的结果必须是一致的,而且相互之间能够相互印证,确认他们各自得到了同样的结果。在 1970 年, E. S. De Witt 通过一个具体的量子测量模型证明了这样关键的

一点。

虽然埃弗里特的理论是一种逻辑上更加完美、严格的量子测量理论或量子力学诠释，但没有预言与哥本哈根诠释不一样的实验结果。能否有更精致理论分析、检验这两种诠释之间的差别，或在实验上对此进行甄别，是一个意义重大但目前没有任何结论的物理问题。其实，当年多世界理论遭致了前所未有的冷遇，而今天在量子宇宙学和统一理论的研究中，人们很难回避埃弗里特的多世界思想。量子计算机的发展，也使得多世界理论不再是一种单纯逻辑上的思辨。总之，埃弗里特坚信量子力学的普适性，宇宙不可一分为二，开创了一种彻底应用量子力学的新方法——从整体上把量子测量变成一种客观的、没有主管介入的物理过程。多世界理论启发了量子力学测量客观性的深入思考，启发了今天所谓的量子达尔文主义(Quantum Darwinism)的理论探索。

大家知道，埃弗里特的宇宙比函数或相对态本质上一种纠缠态(entanglement)。对此，给定被测系统的一组基矢(如力学量 M 的本征态)，相当于要对相应的力学量 M 进行测量。这时，宇宙波函数会精确的对应一组仪器的本征态。其中的每一个分支代表“一个世界”。现在的问题是，世界为什么会如此“分裂”，而不是对应于别的力学量本征态的“分裂”？这个问题只是在最近几年才得到初步解决。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 H. Zurek 认为，如果存在很多仪器对系统进行测量，对于特定基矢(对于力学量 M)必须要求存在信息的冗余(redundancy)：全部仪器组的一个小部分级可以获取系统力学量 M 的大部分信息，其他的各个部分也能胜任类似的任务，获得系统的信息。这时，被测系统的基矢对应的力学量就以进化的形式存活下来，作为量子系统的可观测经典行为的稳定表征。量子系统中，这种经典性质适者生存的观点与生物学中达尔文进化论相似，被称为量子达尔文主义。需要指出的是，量子达尔文主义或多或少暗含了对哥本哈根诠释的回归。能够很好被测量的力学量，才是量子系统的经典行为的客观表征，而量子系统其他自由度在经典的意义下是无关紧要的，甚至根本上就会被淘汰而不存在。这很像哥本哈根诠释的招牌式的表述：“现象之所以存在，是因为它被测到”，或“量子性质在测量中产生”。但本质不同的是，量子达尔文主义里面没有主观的介入者，观察者是宇宙的一部分，观察者和仪器与被测系统的相对属性是客观的。

量子退相干的自洽历史和各种诠释的统一

根据罗杰·彭罗斯的观点，量子力学的全部奥秘在于对量子力学中的 U 过程和 R 过程的理解。人们现在也意识到，波包坍缩代表的 R 过程是否存在以及存在的必要性都是一个问题。现在，量子力学测量理论的研究是从两个角度来处理这个问题：一种是外部的观点，仅称之为量子退相干(quantum decoherence)处理；另一种是所谓的自洽历史处理(consistent history approach)，这是一种内部的观点，其核

心是宇宙体系粗粒化会抹除可观察对象的量子相干性。

在 Zurek 等人发展的量子退相干理论中,与外部环境的相互作用,系统和仪器的复合体系的约化密度矩阵非对角元会逐渐消失,仪器和系统的联系从量子纠缠变为经典关联。量子退相干理论有两个要点。一个是指针态(pointer state)的存在和衍生(emergence)。这个概念,与多世界理论中相对态的观念是一致的。如上所述,环境的作用时要选择仪器+系统的特定基矢进行退相干,而密度矩阵的对角元和非对角元在不同的坐标变换下是相对的。在整个宇宙(系统+仪器+外部环境)的时间演化过程中,因子化的宇宙初态会变成一个针对被测基矢的相对态,相对态的系数(如图 3 中的 A 和 B)恰好是初态中系统相干叠加态中的系数,则我们说仪器态相对系统而言是一个指针态,环境所充当的角色是诱导了一个超选择定则,称之为 eniselection。这个理论的第二个要点是初态因子化的假设。它隐含的意思是,没发生相互作用之前,系统的相干叠加态是独立于测量仪器和环境而存在的。以后,相互作用使得宇宙波函数保持一种准因子化的形式,即形成一个具有同施密特系数相对态。这个假设可以有一个逻辑上的改进,应该事先不假定因子化的形式,让环境诱导出来的时间演化产生相对态的系数,得到完全客观的量子测量过程。但是,这种处理的关键问题是怎样把这个理论结果与依赖于初态的实验相比较。

量子测量自洽历史处理也是基于宇宙波函数的考虑,为了描述整个宇宙中的物理过程,我们的确需要一个定更加普遍的量子力学诠释,这里没有外部测量、也没有外部环境,一切都在宇宙内部衍生。宇宙中的过程中可以看到一个从量子化宇宙约化出来的经典世界,经典引力支配各种各样的现象。基于这样考虑,Robert Griffiths, Roland Omnes, James B. Hartle 和 Murray Gell-Mann 等人发展自洽历史或称退相干历史的量子力学诠释。这种处理可以视为多世界理论的变种。只是把多世界看成是我们宇宙“多种选择的历史”。

我们可以用一个测量结果的序列来描述量子宇宙的历史,它们相当于多世界理论中世界分裂的不同分支。自洽历史处理就是赋予每个历史一个经典概率,如果这些概率是不相关的,我们就得到了一个自洽的历史描述。对任何瞬间宇宙中发生的事件作精确化的描述,我们就得到了一个完全精粒化历史(completely fine-grained history)。不同精粒化的历史之间是相互干涉的,不能用独立的经典概率加以描述。但是,由于宇宙内部的观测者能力的局限性或不同的需求,只能用简化的图像描述宇宙(如只用粒子的质心动量和坐标刻画粒子的运动),本质上对大量精粒化历史进行分类粗粒化(coarse-grained)描述。类内运动无规运动抹除各类粗粒化历史之间的相干性,从而使得粗粒化的历史成为一种退相干的历史(decoherence history)。这种退相干历史的描述,原理上对量子引力到经典引力的约化给出了自洽的描述。

近年来,关于宏观物体内部自由度诱导集体自由度退相干的研究,给出了量子测量上述两种描述的统一。在这个研究中,作为客观物体象征的薛定谔猫或仪器的

运动,可分为集体运动模式和内部相对运动模式,他们之间存在某种形式的信息交换,但不交换能量,由于这种形式的耦合,形成集体运动模式和内部相对运动模式的量子纠缠,内部运动模式提供了一种宏观环境。如果观察着只关心集体运动而不关心内部细节,集体运动就会发生量子退相干,薛定谔猫佯谬也就不存在了:“月亮”在没有人看它的时候,仍然是客观存在的。这是因为“月亮”是一个宏观物体,人类的“看”必定忽略了“月亮”的内部细节。用退相干历史的语言,薛定谔猫所有自由度的精粒化历史是相干涉的,但用集体自由度刻画其粗粒化历史是退相干的。从而被描述的对象——猫的死活就变成了不相干的经典现象。

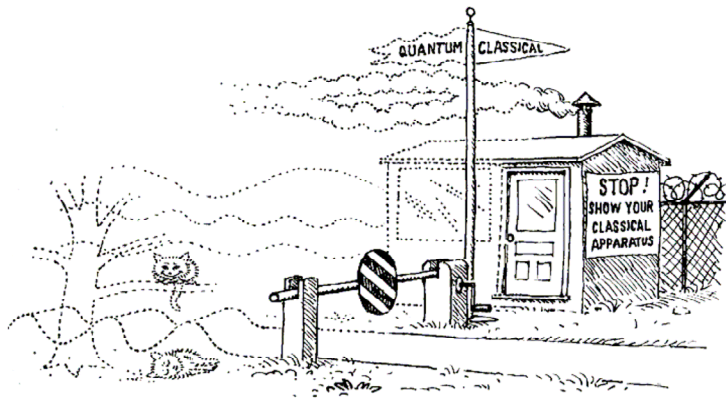


图4 量子力学的秘密位于经典和量子世界的边界上(*Physics Today*, 44)

从数学描述的角度看,对复合系统的部分自由度取迹的运算过程,本质上是超空间(密度矩阵全体矩阵元构成的线性空间)的投影,这里暗含了广义的波包坍缩的假设。而对宇宙的密度矩阵取迹得到约化密度矩阵的理论处理,代表了对实际发生事件的细节的忽略。因此,我们需要仔细考虑量子力学各种诠释是否隐含了对大系统密度矩阵取迹的操作。粗粒化本质上也是一种广义的投影运算,这个理论数学形式上也有可能回归哥本哈根波包坍缩诠释。现在看来,只有量子力学的多世界诠释暂时还难以统一在波包坍缩的框架下。

总而言之,量子测量问题是量子力学诠释和量子信息应用的关键所在。它的寓意是十分深刻:一方面,量子测量沟通了经典与量子世界,提供了从量子力学过渡到经典力学的各种描述;另一方面,这种沟通会干扰了微观世界,它带来的量子信息损失,甚至使得“观察”到的世界有时面目全非。因此,从量子测量的角度看,微观世界的秘密可能就是位于量子与经典的边界上,但到目前为止,人们尚不能确切地知道这个边界究竟在哪里。只有通过逐渐“剥离”观察者和客观世界的“纠缠”,精巧的量子测量会逐步逼近客观世界的“真实”。

参 考 文 献

- [1] Omnes R, Understanding Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1999.; Joos E et al. Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory. 2nd edition. Berlin: Springer, 2003.
- [2] Zurek W H. Rev Mod Phys. 2003, 75: 715, arXiv:0707.2832: Relative states and the environment: einselection, enviance, quantum darwinism and existential interpretation, 2007.
- [3] Griffiths R B. Consistent Quantum Theory. Cambridge University Press, 2003; Murray Gell-Mann, James B. Hartle. Phys Rev D 1993, 47: 3345-3382.
- [4] Everett H. Reviews of Modern Physics 1957, vol 29: 454. DeWitt B S, Graham R. N, eds. The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics//Princeton Series in Physics. Princeton: Princeton University Press 1973: 5.
- [5] P Zhang, X F Liu, C P Sun. Phys Rev A 2002, 66: 042104; C P Sun. Phys Rev A, 1993, 48: 878.

撰稿人：孙昌璞

中国科学院理论物理研究所