

量子理论创建的科学启示

及其基本问题研究的哲学思考

—纪念量子理论诞生 100 周年

孙昌璞（中国科学院理论物理研究所，北京 100080）

量子理论的诞生

二十世纪是物理学革命性发展的世纪，量子理论和相对论的创立，不仅是物理学革命的标志，而且后者更广泛地影响了整个科学发展，如对化学键和各种物性的理解，对发现 DNA 双螺旋结构的作用。

以量子力学为核心的量子理论，代表了人类对微观世界基本认识的革命性进步，与相对论共同成为二十世纪人类科技文明的基石。它不仅从哲学上根本改变了人们关于时间、空间、物质和运动的观念，而且带来了许多划时代的技术创新（如原子能、半导体和激光器的发明），直接推动了社会生产力的发展，从根本上改变了人类的物质生活。目前关于量子信息的前沿研究也表明，量子力学有可能大大加速信息科学的发展，在二十一世纪，再一次引起信息科学的革命。

一百年前，德国科学家普朗克发表的论文《论正常光谱能量分布定律》，是量子论的诞生标志。创立量子理论的动因主要来自两个方面：一方面，19 世纪末已发展完善的经典物理（经典力学、经典电动力学、经典热力学和统计力学）不能解释一些典型的、当时被认为属于经典物理范畴的现象，如黑体辐射、固体比热和光电效应，人们不得不去考虑经典物理的局限性；另一方面，当人们把经典电动力学等应用到原子等微观系统时，遇到了原子稳定性方面的根本性困难，要求人们去探求新理论。

于是，普朗克的能量量子化的思想、爱因斯坦的光量子假说以及玻尔的原子轨道量子化理论便应运而生了。虽然这些现在称为旧量子论的理论成功地解释了上述现象，但却很难应用到更复杂的情况，其基本观念看上去也与经典理论截然不同、甚至是不可调和的。然而，以此发展起来的德布罗意物质波理论，却成功地预言了实物粒子具有衍射波动行为的实验，使人们可更加相信，描述微观粒子的运动需要比经典物理更深入的理论。

1924 年开始，为了摆脱旧量子理论的局限性，海森堡、薛定谔、狄拉克和波恩等，建立了全新的、描述微观世界运动的理论—量子力学 [1]。新的量子理论不仅能胜任旧量子理论的全部任务，而且能够准确地描述更复杂的现象，并方便地应用到更广泛的领域。在以后的几年，丹麦的玻尔研究所和德国的哥廷根大

学等成为了全世界量子物理的研究中心，形成了举世闻名哥本哈根学派。哥本哈根学派的诞生 标志着现代量子理论-量子力学基本框架的确立。1927 年的 Solvay 会议（见图 1）总结量子力学革命的成就，并开始了量子力学基本问题的深入讨论。



1927 年 10 月在布鲁塞尔举行的第五次索尔未会议的合影
 后排(从左到右): A. 皮卡德 E. 亨里尼特 P. 埃伦菲斯德 Ed. 赫尔岑 Th. 德·唐格 E. 薛定谔 E. 菲尔沙费耳特 W. 泡利 W. 海森伯
 R.H. 根特 L. 布里渊
 中排: P. 施拜 M. 努森 W.L. 布洛格 H.A. 克拉布兹 P.A.M. 狄拉克 A.H. 康普顿 I. 施塔罗塞 M. 赖恩 N. 玻尔
 前排: I. 兰缪尔 M. 普朗克 居里夫人 H.A. 洛伦兹 A. 爱因斯坦 P. 朗之万 Ch.E. 古伊 C.T.R. 威耳孙 O.W. 理查森

在以后的岁月里，虽然对于量子物理的思想基础（特别是对于量子力学哥本哈根学诠释）的争论从来就没有停止过，人们对于量子力学本身的完备性及其一些基本观念的理解，甚至也持有截然不同的观点，但量子力学的基本预言与大量的实验的符合，已达到了令人吃惊的程度。从应用的意义讲，作为描述世界的工具，量子理论过去的成功意味着它是一个相当完善的科学理论。

**量子力学创建的
科学精神：**

由于量子力学是把经典力学作为宏观极限包括进来，从根本上协调了旧量子论和经典物理学的矛盾。这一点是很富有启发性：一个新的革命性的正确理论的建立，并不是彻底推翻旧的理论，而是界定了旧理论的适用范围。这是科学发展的历史给予我们判断新理论正确与否的准则。对待那些声称推翻了标准理论、又不能包含之的任何理论都要慎之又慎。这是量子力学发展给予我们的第一点启示。

量子力学在没有导致有实际应用价值的结果之前，谁也不会知道它到底有什么用。比如量子力学直接导致的激光、半导体、原子能等重大的发现，最早的研究动机都和最终结果没有直接联系。著名物理学家杨振宁先生在庆祝中国科学院建院 50 周年的报告中明确地指出了这一点。他说：“二十世纪在人类的历史上是非常特别的一个世纪，有很多非常重要的事情在二十世纪发生了（核能、半导体，计算机，……）。不过如果我们仔细问，二十世纪的物理学发展的动力是什么呢？我们就会得到一个结论，这个动力的来源并不真正是这许许多多的可以引以为傲的发展。真正驱使物理学家在二十世纪里头致力于一些革命性的发展的，是一些

基本原理性的深入的了解。...。我想历史上会讲，这个是二十世纪物理学真正的最重要的精神。” [2]这也正是量子力学发展给予我们的第二点启示。

从量子理论发展的历史看，像量子力学这样革命性理论的建立，绝不是以功利为目的，以实用目标为出发点的。这一事实上正体现了科学和技术基本价值观的不同。技术是以改造世界为目标的，短期或长期的市场需求是判断技术好坏的客观标准。而科学则是以认识世界为已任，其本身并无任何功利可言，它只是通过促进技术的革命来影响世界，这种影响往往是意想不到，但其意义却十分深远。因此，科学研究不能只是将关注点投向了更容易产生轰动效应的方面，科学家应该将目光放得长远一些，深入、踏实地进行一些貌似无用的基础性研究。没有基础研究作后盾，一切应用性研究不可能取得突破性进展和长久的持续进步。凡是诸如量子力学这样的重大发现，并不是人们事先就规划好的，也不是先哲们所能完全预示到的。

奇妙的量子世界：波包塌缩

量子力学所描述微观世界是非常奇妙的。通过测量从微观世界提取经典观察者可以感知的信息，看上去更是令人捉摸不定。量子世界这种不同于经典世界的根源在于它具有十分特别的量子相干性。由于量子相干性，对量子世界于微观粒子运动状态的有效观察—量子测量，必将在可观测的意义上使粒子原来的运动产生不可逆的改变 [3]。

考虑力学量的本征态 $|n\rangle$ 的量子相干叠加 $|\mathbf{f}\rangle = C_1|1\rangle + C_2|2\rangle + \dots + C_n|n\rangle$ 。它刻画了对力学量 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 a_n ，则系统便塌缩到一确定的本征态 $|n\rangle$ 上，图 1 形象地说明了这一点。粒子波函数 $\mathbf{f}(y) = \langle y|\mathbf{f}\rangle$ 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，则根据波包塌缩的描述，便可断言测量后波包变窄， $\mathbf{f}(y)$ 成为如图 1 描述的狭窄波包 $\mathbf{f}_n(y) = \langle y|n\rangle$ 。

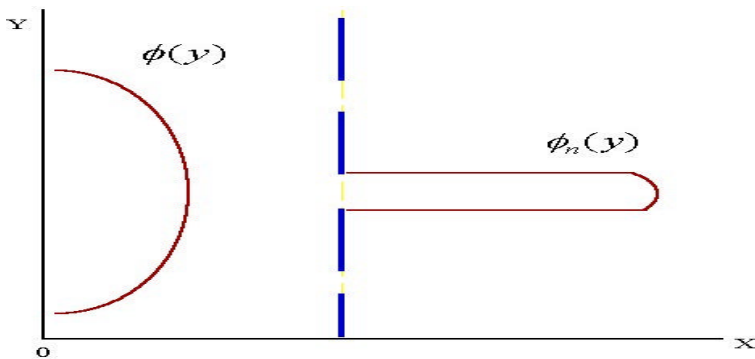


图 1：波包塌缩的形相描述

量子力学测量的特别之处还在于它描述的波包塌缩是整体的。表面看上去，

这种波包的整体（全空间）塌缩与狭义相对论的基本原理似乎有矛盾。例如，如图 2，一个粒子在 $t=0$ 时刻处在一个局域的空间点 A 上，在 $t=T$ ，测量其动量得到确定的动量 p ，则波包塌缩为动量本征态-平面波，其空间分布在 T 以后时刻便是均匀的，似乎不再定域。测量引起的整体的波包塌缩也似乎破坏了定域性：虽然 B 点在过 A 点的光锥之外，（即 A 和 B 两点是类空的，通常不存在因果关系）在 $t > T$ 的时刻，我们有可能在 B 点发现粒子。按照狭义相对论，信号最多以光速的速度来传播，而在瞬时的间隔发生的波包塌缩现象意味着存在“概率意义”的超光速- T 时刻测量粒子动量会导致体系以一定几率（通常很小很小）“超光速”地塌缩到不同的动量本征态上。这个例子表明，引入波粒二象性的观念或几率解释是各种佯谬出现的本质。事实上，对于单一测量，我们并不能确定地在 B 点发现粒子。因此，“事件” A 和 B 的联系只是概率性的。而对于微观粒子而言，讨论经典意义下的因果关系和相关非定域性问题，可能不是一个恰当的论题。

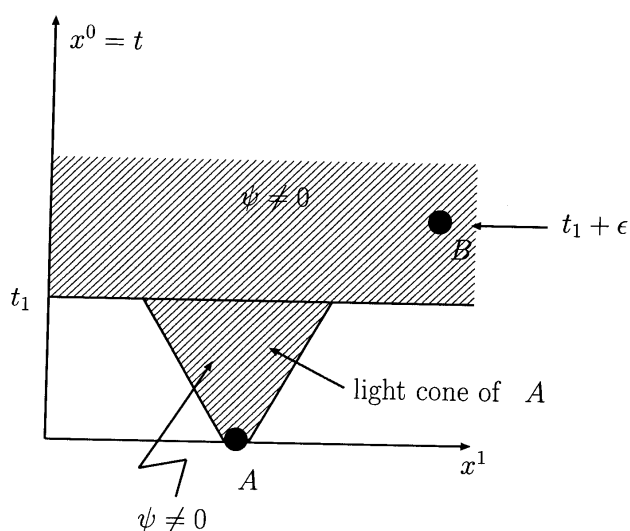


图 2：时空中的整体波包塌缩

近期，有不少概率意义下的超光速的报道，虽然这些实验的完成者大多了解“概率意义”的超光速不会破坏因果律，但也在非专业的范围内引起一些误解，其根源在于对量子测量本身的误解。例如，在最近报导的“超光速”实验中，看到了保形的光脉冲群速度超过了光速的 300 倍。但这并不意味着荷载的经典信息和能量能以 300 倍光速的速度传播，更不存在与狭义相对论的矛盾。事实上，由于进入原子因的波包前端早已触发了原子的跃迁，形成反常散介质，群速度超光就不足以为奇了。由于不是单光子探测，这种以概率方式发现的“超光速”已远离了它的经典含义。

量子测量中的不可逆改变，起因于量子力学的互补性原理 (Complementarity)：依据标准的“哥本哈根解释”，物质运动具有粒子和波的双重属性-波粒二象性，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特性，与粒子性互补的波动性便被排斥了，干涉条纹便不再存在了。这种由于测量或其它影响导致相干性消失的现象也称为量子退相干 (Quantum decoherence)。仅就量子测

量而言，人们称之为波包塌缩(Wave packet collapse)。海森堡对于这种退相干现象的进一步解释是应用测不准关系：准确知道粒子通过路径 A 意味着在垂直于 A 的方向上完全确定粒子的位置到一定精度，从而由测不准原理得知，这个测量将对垂直于路径 A 方向上的动量产生的一定程度的扰动，从而干扰到达屏上粒子的位置，造成干涉条纹的模糊。测不准关系的解释表明，通过具有“粒子特征”的测量（如同时测量动量和坐标），去描述具有“波粒二象性”的物质运动，会带来测量的不确定性。

看上去，动量和坐标测不准关系是引起被系统量子退相干的一个重要原因，但最近德国 Rampe 小组的冷却原子布拉格散射实验表明，测不准关系不是量子退相干的唯一起因，而测量仪器和被测系统通过相互作用，形成的量子纠缠态(Entangled state)是问题的核心。在他们的实验中，原子质心的动量扰动，可以被降低到忽略不计的程度，只须用原子的内态标记原子的空间路径，原子的干涉条纹便消失了。Rampe 小组的冷却原子布拉格散射实验从一个侧面表明，测不准关系只是物质的固有属性-波粒二象性的一个方面的体现，而不是由“主观介入”引起的。量子纠缠态的观念起源于薛定谔关于“活猫—死猫”佯谬的讨论 [4]，其进一步的发展与描述量子定域性的 EPR 问题相联系。

奇妙的量子世界：量子纠缠性

量子纠缠态是多粒子或多分量系统的非平凡的相干叠加（不能够分解为单个相干叠加态的直积）。这种量子态描述的量子纠缠性，本质上不同于经典关联。玻姆考虑了 EPR 态的直观描述：处在自旋单态上 $|+z\rangle$ 和

$|-z\rangle$ 的双电子体系，其量子纠缠态波函数是

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+z\rangle |-z\rangle + |-z\rangle |+z\rangle)$$

其中 z 代表自旋的轴， \pm 代表沿 z 轴的方向。如果测量第一个电子的 z 方向自旋，我们可以 50% 几率得到沿 $+z$ 方向的电子和 50% 沿 $-z$ 方向的电子。当第一个电子被发现沿 $+z$ 方向，整个波函数被塌缩到态 $|+z, -z\rangle$ 上。这时再测量第二个电子，必得到确定的结果，自旋沿 z 轴向下。即使是两个粒子分开得很远，这种关联仍然是存在的。可见，量子纠缠是波包塌缩的一个直接的结果。

与经典情况类比，这种情况看上去并不很特殊。假设一个黑盒子里放了一个白球和一个黑球。你伸手到到盒子里随便摸一个球，得到黑和白球的几率各为 50%。但是一旦你拿到了一只黑球，然后把盒子拿开，不管多远，你仍然可以断定盒子里一定是白球。这种经典关联是人们事先制备好的，不足为奇。然而，量子情况并非如此简单，由于

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+x\rangle |-x\rangle + |-x\rangle |+x\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+n\rangle |-n\rangle + |-n\rangle |+n\rangle)$$

上述 EPR 态除了描述二电子系统沿 z 方向自旋的关联，它同样可以描述沿方向自旋的关联，或沿任意方向 n 自旋的关联(如图 3 所示)。这种可以用一个态，描述不同方向自旋关联的奇妙特性，是量子纠缠的典型特征。

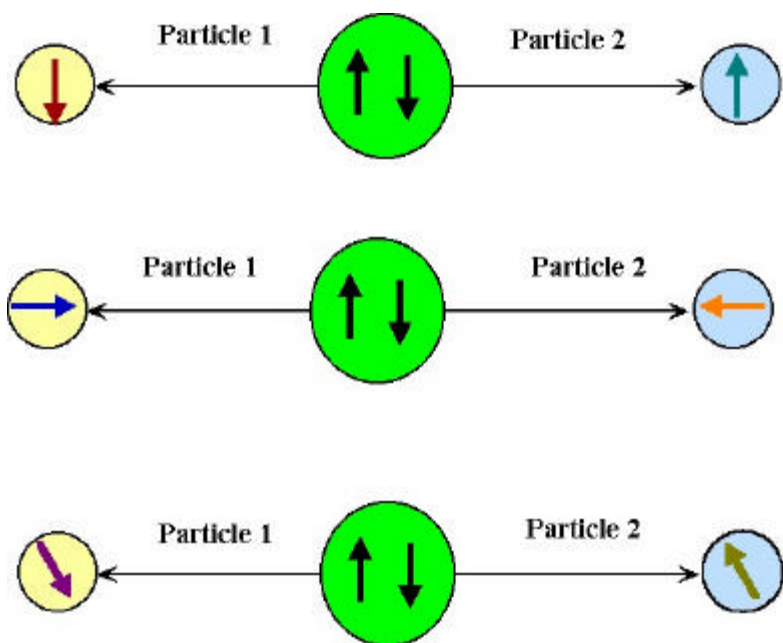


图 3：量子纠缠描述的自旋关联的奇妙特性

需要指出的是，直接利用这种量子纠缠是不能传递经典信息的。因为它代表的关联是依赖于你的测量，测 S_z ， S_x 还是 S_n 。然而，Bennet 等利用这种纠缠态，通过在经典信道中送 2 个比特的信息破坏空间某点的量子态，可以在空间不同点制备出一相同的量子态。目前世界上已有几个实验组完成了这种量子离物传态（Quantum Teleportation）实验。制备和应用量子纠缠态是量子信息研究的核心。以上的讨论告诉我们，微观信息与经典信息，有着本质的不同，任何一种经典方式不会恰如其分地描述微观信息全部特性。许多悖论均源于此，这也许是量子力学互补原理更深刻的体现[3]。

冯·诺意曼链与量子力学的哲学思考

在量子力学基本问题的实验中，通过相互作用描述量子力学测量过程的思想，最早可以追溯到 1935 冯·诺意曼的开拓性研究。由于微观粒子的运动服从量子力学的基本定律，而仪器是由这样多个微观粒子组成的，仪器也应当用量子力学加以描述。因此，只要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塌缩。基于相互作用描述量子测量，量子系统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瞬间塌缩。法国 Haroche 小组 1996 年完成的腔 QED 退相干过程观测实验恰好证实这一点。

然而，从仪器-系统相互作用观点出发，冯·诺意曼对量子测量的动力学进行了更深入的理论尝试。他的数学是“严格”的，但得到推论却是令人费解：必须有观察者眼睛的“最后一瞥”，才有可能导致系统的波包塌缩。

冯·诺意曼论证的大意是，假设仪器 I 和系统 S 之间的相互作用仅在一个小的时间间隔中发生。虽然仪器对系统没有反作用，但系统作用在仪器上，能够使仪器的读数发生了改变。这种合理的假设导致了总系统从因子化初态到纠缠态的转变。如果存在某种机制使得纠缠是理想的，仅考察被测系统的动力学，只能给出没有相干性的物理结果。因此，与仪器适当的相互作用会使得被测系统没有量子相干性。然而，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。为什么我们必须要求 S+I 也要没有相干性呢？这是为了保证纠缠态对应着“真实的量子测量”。事实上，仅要求产生纠缠仪器 I 和系统 S 态是不够的，因为仅有仪器 I 和系统 S 的量子纠缠，复合系统具有与 EPR 态类似的关联特征，它也同时描述对不同力学量的量子测量。“真实的量子测量”必须排除这种任意性。要从仪器态“经典地”读出系统的态，仪器和系统的关联不可以具有量子属性—相干性。它只有由经典的几率描述，我们才能实际地读出量子信息。正如天气预报一样，预报明天降雨概率为百分之三十，意味着明天有百分之三十的可能下雨，有百分之七十的可能不下雨。这是一个客观的概率性事件，并不依赖人们去观察什么。这与量子纠缠态描述的概率性事件有本质的不同，因为后者依赖于人们去观察什么。

为了实现这样的“真实量子测量”，只能要求引入第二仪器 II，产生更大系统 S+I+II 的三重纠缠，由此给出 S+I 这种没有量子相干性的经典关联，保证了仪器的“经典和宏观属性”，使得测量复合系统的力学量有确定的意义。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,IV,...这仿佛形成了一条无限的仪器的链 - 冯·诺意曼链。按照冯·诺意曼的观点可以推论，波包的塌缩最后必须由“抽象的主体”来决定，人的意识决定了微观系统测量结果的“存在”。由此，可以引申出一个更加似是而非的结论：量子力学理论必须引入“主观介入”，微观的概念不再具有“客观性”，从而量子微观世界不会独立于主体之外。有人甚至由此得出“月亮在无人看它时确实不存在”的荒谬结论。

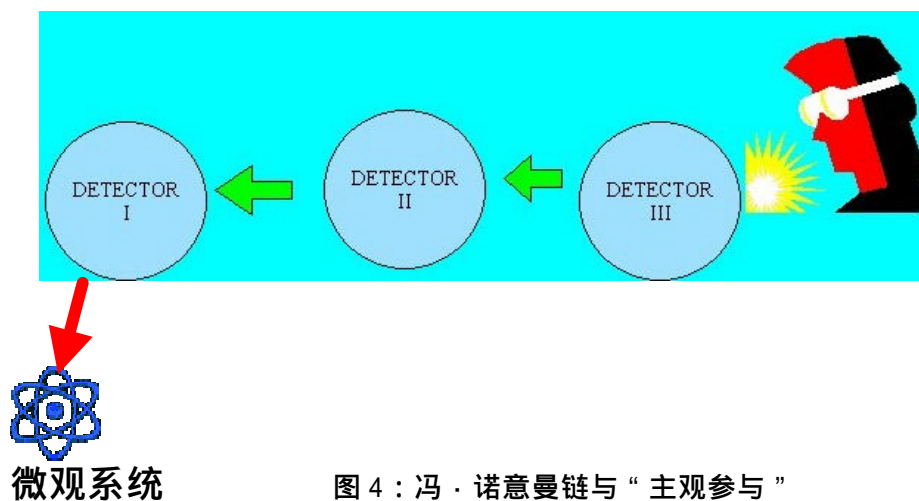


图 4：冯·诺意曼链与“主观参与”

“主观介入” 的终结

然而，作为冯·诺意曼相互作用模型的适当推广，在目前的某些量子测量理论中，无须“主观介入”，冯·诺意曼链就能够以某种方式终断，从而可以自恰地描述了真实的量子测量。客观上，目前一系列新的量子测量实验明确地支持了这一观点，而且其数学结构隐含于冯·诺意曼理论的数学形式之中。这些理论的物理含意在于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须包括集体态（仪器读数）和仪器内部态。由于测量只关心集体态，可以忽视仪器内部的信息。而不管仪器内部状态如何，我们就得到仪器和系统的经典关联。这时，由仪器完全以经典几率的方式定出被测系统状态，得到完全有用的信息。

这样的观点与 Zurek 引入的优化基(Preferred basis)的概念密切相关[5]。Zurek 认为，为了在量子测量中把量子纠缠转化为经典关联，除了仪器和系统，还必须引入第三者-环境。它与仪器之间存在特殊的相互作用，产生仪器状态的理想纠缠，从而形成三重纠缠。在上述的分析中，环境也可以理解为是仪器的内部自由度，只是怎样施加相互作用存在一定的困难：必须对系统、仪器和环境构成的大系统假定了时间相关的相互作用，使得量子测量理论不完备：一个闭系统的理论的哈密顿必须不依赖于时间。否则，在大系统以外必定存在控制大系统哈密顿改变的外在因素。为了克服 Zurek 理论所面临的困难，我们可以假设存在时间无关的相互作用：系统同时与环境 and 仪器作用，而仪器和环境间没有相互作用。如果把环境也理解为是仪器的内部自由度，这种假设是相当合理的：集体自由度是仪器的读数，它与被测系统的关联必须同时伴随着内部自由度与系统耦合的存在，而内部自由度与仪器读数的解耦，则是理想仪器设计的要求。为了实现理想的量子测量，自然要求产生三重纠缠，要求环境、仪器与系统的相互作用不影响系统的状态。

类似的想法在量子宇宙学中十分重要：退相干导致量子系统趋向经典论证，依赖于系统与外部系统的相互作用。但对于整个宇宙而言，通常不存在外部的观察者（仪器）和环境，为什么我们观察着的宇宙是经典的？以上的讨论已经部分地回答了第一个问题，其关键点在于描述宇宙时，只关注宇宙的“集体自由度”，而忽略了它内部的信息。而这些相当于内部自由度的细节，虽然不改变宇宙“集体运动的状态，但会与之纠缠起来，使之发生退相干。Griffiths, Omnes, Hartale 和盖尔曼等人曾深入地研究过这种“没有观察者”的量子宇宙退相干问题，他们借用了“退相干历史”的概念（Decoherence Histories）。其大意是，整个宇宙是处于一个量子纯态上，它描述了宇宙各个部分之间的彼此关联，代表了完全精粒化的历史（Completely fine-grained histories）。然而，人们所关心和能够“看到”的是一种粗粒化的历史（very coarse-grained history），它可以视为各种精粒化历史的等价类，对于这些等价类而言，量子退相干就发生了[6]。

有关量子力学理论必须引入“主观介入”的“科学”的“根据”，是来自诺依曼的上述“证明”。然而，仪器也是某种客观存在，仪器和微观粒子间的相互作用也不过是客观世界中的相互作用，简单地把仪器说成是观察者，并推断说观察对微观粒子的影响大到不可控制，会带来一些看上去不可逾越的困难。从目

前的最新研究进展看，冯·诺意曼的结论并不完全正确的。何祚庥曾经指出[7]，这是一种“佯谬”，一种“哲学”上的“佯谬”。产生这一“佯谬”的原因，在于诺意曼希望单纯从量子力学“推导”出这一“测量假说”，而不引进任何其它的要求（如仪器的宏观性和经典性）。其实，薛定谔方程具有时间反演的“可逆性”，但在测量过程中波包塌缩的“跳跃”却是时间反演不可逆的。因此，从原则上讲，就不可能“推导”出时间反演不可逆的结果。要想从薛定谔方程推导出冯·诺意曼的波包塌缩，就必须对仪器的宏观和经典性质加以强调，不可单纯由薛定谔方程得到。我们可以证明，在宏观极限下，如果仅关心较短的时间演化，恢复量子相干的量子跳跃还来不及发生，薛定谔方程加上量子力学的系综解释，的确可以说明波包塌缩这一量子退相干现象，“主观介入”是可以排除的。

结束语

量子力学的出现也绝非偶然，是科学自身发展规律使然。谈到量子理论的发展，我们切不可只看到其“革命性跳跃”的一面，而忽视它是物理科学发展长期积累的结果。物质条件，技术手段只是促进科学进步的一个方面，重要的是要有一个像玻尔研究所和哥廷根大学当年那样的宽松、自由、富于探索和勇于创新的学术氛围，形成一个新观念、新思想“温馨的孵化器”。对于科学家而言，从事科学研究，必须有一种脚踏实地，埋头苦干，不唯功利的正确态度。这是一种值得提倡的“优雅”的科学精神。李政道先生经常提到及的杜甫的两句诗：

细推物理须行乐，
何用浮名伴此生

是最能够体现这样一种学术风格的。这也是量子力学所给予我们的最大的启示之一。

（本文包含了作者在“中国科学院纪念量子理论诞生 100 周年”大会上报告的部分内容，其它部分将分别在《科学》和《物理》上发表）

参考文献

1. 孙昌璞，《世界数学家思想方法》，解恩泽，徐本顺编，山东教育出版社，1993，pp1228-1244;1347-1356
2. 杨振宁，《百年科技回顾与展望》，路甬祥主编，上海教育出版社，2000年，pp97-108
3. 孙昌璞，《物理》，2000年，第八期19，P457；《现代物理知识》，1999年，p15-20；《量子力学新进展，第一集》（曾谨言，裴寿庸编）北京大学出版社，2000年，pp59-130
4. 孙昌璞，《物理教学》，22卷10期，pp2-6
5. Gell-Mann M., The Quark and the Jaguar, New York: W.H. Freeman & Company, 1994
6. Zurek H W, Phys.Today, 44(10), 36, 1991;
7. 何祚庥，物理，1992，22:419-426