

# 量子力学若干基本问题研究的新进展\*

孙 昌 璞

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘 要** 首先回顾了量子力学诠释的各种研究的思想起源.以量子测量问题为核心,通过介绍和分析最近 5 年完成的相关实验(如用腔 QED 展示的量子退相干过程实验和超冷原子 which-way 实验等),系统地评述了量子力学若干基本问题研究(包括宏观物体相干性,量子测量的冯·诺伊曼链问题)的新进展,并阐明了其作用与意义.指出了量子力学基本问题的探讨已经走出纯哲学思辨的范畴,开始了大规模的实验检验,而且其研究结果对信息科学有重要的潜在应用.通过基本观念的正确阐释,对量子测量理解方面的某些误解(如超光速现象)给予一定程度的澄清.最后,通过介绍霍夫特(G. 't Hooft)最近在量子力学方面的工作,展望了量子力学今后的可能发展.

**关键词** 量子力学诠释,量子测量问题,量子相干性

## NEW PROGRESS OF FUNDAMENTAL ASPECTS IN QUANTUM MECHANICS

SUN Chang-Pu

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** This review recalls the conceptual origins of various interpretations of quantum mechanics. With the focus on quantum measurement problems, new developments of fundamental quantum theory are described in association with recent experiments such as the decoherence process in cavity quantum electrodynamics “which-way” detection using the Bragg scattering of cold atoms, and quantum interference using the small quantum system of molecular  $C_{60}$ . The fundamental problems include the quantum coherence of a macroscopic object, the von Neumann chain in quantum measurement, the Schrödinger cat paradox, *et al.* Many landmark experiments have been accomplished with possible important applications in quantum information. The most recent research on the new quantum theory by G. 't Hooft is reviewed, as well as future prospects of quantum mechanics.

**Key words** interpretations of quantum mechanics, quantum measurement problem, quantum coherence

### 1 量子力学基本问题的缘起

自 1900 年普朗克(Max Planck)提出光量子假说起<sup>[1]</sup>,量子力学的创立已过百年.作为现代量子理论的核心,量子力学的发展不仅导致了原子能、激光和半导体等重大技术发明,创造了 20 世纪人类的物质文明,而且使得人们对微观世界运动的规律有了基本正确的、革命性的理解,成为人类认识世界过程的一个伟大里程碑.

然而,量子力学所展示的微观世界图景,看起来远离了经典物理所“精确描述”的物质世界图像,由此一系列基本问题就很自然地提了出来.在经典物理中,坐标和速度无疑能够给出粒子运动状态的正确刻画.但在量子力学的描述中,由于物质具有波动和粒子的二重属性——波粒二象性,动量和坐标不能被同时测准,从而使得微观粒子的经典描述失

效.对于这一问题,爱因斯坦和玻尔在 1927 年的 Solvay 会议上开始了旷日持久的学术论战<sup>[2]</sup>,并引发了后来一系列关于量子力学基本问题和量子力学诠释的深入讨论.

本文将结合最新实验进展,通过典型例子,介绍和评述量子力学基本问题研究的进展,以此来纪念量子理论诞生 100 周年.

### 2 量子力学诠释研究的概述

早期争论集中在量子力学的描述是否存在内部的不一致性或前后矛盾.为此,爱因斯坦和玻尔讨论了微观世界的不确定性特征是固有的,还是由于我

\* 国家杰出青年基金、国家“九五”攀登计划、中国科学院重大交叉科学问题研究基金资助项目

2001-01-18 收到

们关于微观世界的知识和观察手段的不完备。哥本哈根学派内部对这个问题也存在着一定程度的意见分歧。玻尔认为,其根源在于所谓的量子力学互补性(并协)原理<sup>[3]</sup>。物质存在着波粒二象性,但在同一个实验中波动性和粒子性是互相排斥的。这可以很好地解释为什么在双缝干涉实验中探测粒子通过哪一条缝时,干涉条纹会部分或完全消失:知道粒子走哪一条缝,等于强调粒子性(只有“粒子”才具有确定位置,而波则弥散于整个空间)。而量子力学的创立者海森伯提出了玻尔本人不甚认同的直观解释:知道粒子通过哪一条缝,等于说要准确地测量粒子的位置,从而不可控制地干扰了粒子的动量,进而抹平了最后形成的干涉条纹。

对于这些观点的差别,过去只能局限于哲学思辨式的论证,但目前已经能通过冷原子的干涉实验加以检验。Rempe 小组实验表明<sup>[4]</sup>,动量和坐标的测不准关系不是导致干涉条纹消失的惟一原因,更本质的原因是因为形成了原子束空间状态和内部状态的纠缠态,干涉条纹消失是内部态作为“仪器”与空间态相互作用的结果。Rampe 小组巧妙地利用了大失谐原子在驻波场中的布拉格散射,通过拉比(Rabi)转动,用粒子内部态  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  标记空间态  $|S_1\rangle$  和  $|S_2\rangle$ ,形成量子纠缠态  $|S\rangle = |1\rangle|S_1\rangle + |2\rangle|S_2\rangle$ 。不管内部态如何,波函数空间表示的模平方所包含的干涉项正比于内部态的重叠积分  $\langle 1|2\rangle$  和  $\langle 2|1\rangle$ 。由于内部态正交,量子干涉就不存在了。在实验中,原子束的宽度没有因为内部态标记而展宽,从而说明没有干扰原子质心动量。从基本物理学角度看,这一点并不十分稀奇:人们从来没有看到过处于互为正交的同位旋态上的中子和质子的空间干涉。

由于实物粒子也具有波动性,有必要引入波函数来描述微观粒子的运动。波函数服从的薛定谔方程具有两个基本特征:(1)时间可逆性:具有时间反演对称性,原则上不区分过去和未来;(2)量子相干性:任何两个解的线性叠加仍然是薛定谔方程的解。既然宏观物体是由大量满足薛定谔方程的微观粒子组成,那么,在经典世界中,宏观物体为什么不具备这两种特征?也就是说,为什么宏观物体通常不存在有效的相干叠加态,且许多宏观经典过程是不可逆的(如人的生老病死,星系宇宙的创生与演化)?正是基于这点,量子力学的创始人之一薛定谔对量子力学的哥本哈根诠释提出了称为“薛定谔猫佯谬”的责难<sup>[5]</sup>。50年代,玻恩和爱因斯坦在通信中也深

入地讨论了量子力学能否正确描述宏观物体自由运动的基本问题<sup>[6]</sup>。80年代以后,一些理论物理学家深入研究了这些问题,进一步逼近了“经典与量子世界的边界”。最近,人们已经开始通过实验(如维也纳大学的  $C_{60}$  实验),全面地检验这方面的观点与结论<sup>[7]</sup>。

另一类问题是所谓的量子力学的“非定域性”,它是至今争论最多、应用也最广的观念之一。这方面的争论起源于爱因斯坦、玻多斯基和罗森 1935 年的一篇论文<sup>[8]</sup>。那是在爱因斯坦不能找出量子力学内部不自洽性以后,他把对量子力学哥本哈根解释的质疑,转移到讨论量子力学是否是一个完备的理论。按着完备性的观念,如果能够用不同方法在互不干扰的情况下,准确地预言两个不同力学量的值,则可以对它们赋予精确值。爱因斯坦及合作者们发现,对于处于纠缠态的双粒子系统,对其中一个粒子的动量和坐标能够做到这一点,这与测不准关系有矛盾,从而断言量子力学可能是不完备的。这个讨论的副产品是指出了量子力学具有非定域特征:如果一对粒子处于纠缠态上,对其中一个粒子的观测会影响类时空点上的另一粒子。为了克服这种矛盾,D.玻姆提出了所谓的定域隐变量理论<sup>[9]</sup>。他把这种远程关联乃至测量结果的不确定性归结为人们所隐含的未知变量的无知。不同于其他量子力学以外的理论(如德布罗意的导波理论<sup>[10]</sup>和多世界解释<sup>[11]</sup>),定域隐变量理论会给出不同于量子力学的预言。1964年,贝尔(J. Bell)提出了所谓的贝尔不等式<sup>[12]</sup>,使得人们能够通过实验来检验量子力学和定域隐变量理论的孰是孰非。过去的实验倾向于否定隐变量理论,断定量子力学预言的关联确实存在<sup>[13]</sup>。目前,这种关联性或量子纠缠已被应用到信息领域,导致了一些令人神往的潜在应用——如量子通信、量子计算和量子密码<sup>[14]</sup>。虽然到达真正的实际应用仍有相当的距离,严肃的研究工作甚至举步维艰,但已取得的关键性进展,向人们展示了充分开发利用量子力学奇妙特性的光辉前景。

与以上基本问题密切联系的核心问题是关于量子测量的理论讨论。这个问题经常导致哲学上的误解和争论,目前的主要实验进展都是围绕着它进行的。量子测量问题起因于冯·诺伊曼量子测量引起波包塌缩的假说<sup>[15]</sup>。根据量子力学的哥本哈根诠释,经典仪器的引入使得单次测量导致波包的瞬间坍塌。为了把仪器也纳入量子力学的框架,通过仪器和被测系统的相互作用实现波包坍塌,就必须承认波

包坍缩不再是瞬间完成,而应当是一个渐进的过程. 1996年,法国 Haroch 小组已经完成了精巧的腔 QED (腔量子电动力学)实验<sup>[16]</sup>去展示这一过程.

然而,仅考虑一个仪器和被测系统的相互作用是不够的,因为它只能产生仪器和系统状态的量子纠缠,由此不可能从仪器态读出系统态的经典信息,只有通过经典关联才能做到这一点.为此,必须引入第二个仪器,第三个仪器,……,乃至形成无穷长的仪器链<sup>[15]</sup>.按照一种极端的观点,只有“主观的观测者”介入,才能终止这个仪器链.这就导致哲学上的悖论:人们观察到的现象必然包含了主观的介入,即在微观领域主体和客体是不能完全分离的.然而,与爱因斯坦和薛定谔一样,许多物理学家认为,即使从物理学的角度也不能接受这个观点.正如爱因斯坦指出:“相信有独立于主体之外客体的存在是一切科学理论赖以成立的基础”.现在的问题是,如果坚信爱因斯坦等人的观点,我们能否解释冯·诺伊曼链提出的“哲学悖论”呢?解决问题的关键是考虑仪器与被测系统的差别:仪器具有宏观和经典属性,在极限情况下,它可以用量子力学加以描述.60年代,H. Green 和 A. Daneri 开始了这方面的尝试<sup>[17,18]</sup>.70年代 J. Hepp 和 Coleman 取得了实质性进展<sup>[19]</sup>.作者有幸在这方面开展了一系列工作<sup>[20]</sup>,发现了仪器的大 N 极限和多粒子演化过程因子化的位相不匹配,是仪器导致系统退相干乃至形成仪器和系统经典关联的本质.

### 3 奇妙的量子相干性

量子力学所描述微观世界是十分奇妙的.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.考虑力学量的本征态  $|n\rangle$  的量子相干叠加  $|\phi\rangle = C_1|1\rangle + C_2|2\rangle + \dots + C_n|n\rangle$ .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  $a_n$ ,则系统便坍缩到一确定的本征态  $|n\rangle$  上.

量子力学测量的特别之处在于它描述的波包坍缩是整体的.表面看上去,这种波包的整体(全空间)坍缩,与狭义相对论的基本原理似乎有矛盾.例如,如图 1,一个粒子在  $t=0$  时刻处在一个局域的空间点 A 上, $t=T$  时测量其动量得到确定的动量  $p$ ,则波包坍缩为动量本征态  $\sim \exp(ipx)$ ,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坍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),但在  $t > T$  的时刻,我们仍有可能在 B 点发现粒子.按照狭义相对论,信号最多是以光的速度传播,而在瞬时的间隔发生的波包坍缩现象,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”坍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.

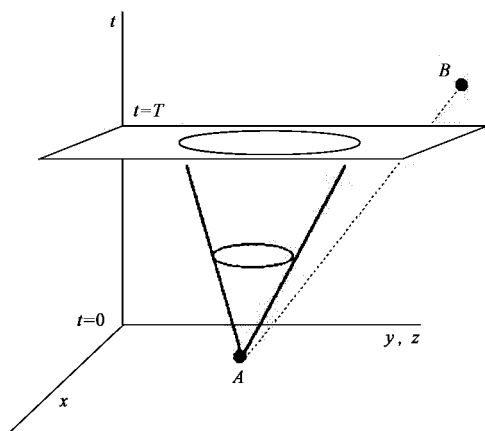


图 1 四维时空中的整体波包坍缩

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的非定域性问题,可能不是一个恰当的论题.近期,我们看到过不少“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,在最近报道的“超光速”实验中<sup>[22]</sup>,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,由于进入原子团的波包前端早已触发了原子的跃迁,形成反常色散介质,群速度超光速就不足以为奇了.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.

以上是表明量子相干性的奇妙特性的单粒子图像.对于多粒子或多分量情况,一类特殊的相干叠加是量子纠缠态,它不能够分解为相干叠加态的直积.这种量子态描述的量子纠缠性,本质上不同于经典关联.我们考虑玻姆关于 EPR 态的直观描述<sup>[23]</sup>.他考虑了处在自旋单态上  $|+z\rangle$  和  $|-z\rangle$  的双电子体系,其量子纠缠态波函数是

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

其中  $z$  代表自旋的轴,  $\pm$  代表  $z$  轴的方向. 如果测量第一个电子的  $z$  自旋方向, 我们有 50% 的几率得到沿  $+z$  方向和 50% 沿  $-z$  方向. 当第一个电子被发现沿  $+z$  方向, 整个波函数被坍缩到态  $| +z \rangle, -z \rangle$  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. 即使两个粒子分开得很远, 这种关联仍然是存在的. 可见, 量子关联或量子纠缠是波包坍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. 你伸手到盒子里随便摸一个球, 得到黑或白球的几率各为 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

$$\begin{aligned} | \text{EPR} \rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} ( | +x \rangle | -x \rangle + | -x \rangle | +x \rangle ) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} ( | +n \rangle | -n \rangle + | -n \rangle | +n \rangle ), \end{aligned}$$

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  $x$  方向自旋的关联, 或沿任意方向  $n$  自旋的关联. 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.

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相同的量子态<sup>[24]</sup>. 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<sup>[25]</sup>. 从这个例子看, 制备和应用量子纠缠态是量子信息研究的核心. 本节的讨论还告诉我们, 微观信息与经典信息, 有着本质的不同, 任何一种经典方式都不能恰如其分地描述微观信息的全部特性. 许多佯谬均源于此, 这也许是量子力学互补原理更深刻的体现.

#### 4 量子测量的动力学

许多物理学家相信, 如果量子力学是一个完备的理论, 量子测量就必须能在量子力学的框架中加以描述, 而不应当作为一个额外的、带有浓厚经典特征的假设——波包坍缩; 用手放到“量子力学的定律体系中去. 为此, 从冯·诺伊曼开始, 人们努力把测

量仪器也作为一个量子系统来描述, 并让它与被测系统相互作用, 形成一个更大的闭系统.

的确, 适当的相互作用选择, 可以使仪器和系统形成的“宇宙”, 从一个因子化纯态  $| T(0) \rangle = (\sum C_n | n \rangle) | d \rangle$  ( $| d \rangle$  为仪器的初态) 演化成纠缠态  $| T(t) \rangle = \sum C_n | n \rangle | d_n \rangle$ . 这时系统约化密度矩阵的非对角元会伴随着一个退相干因子  $F_{mn} = \langle d_m | d_n \rangle$ . 根据我们的因子化理论<sup>[25]</sup>, 这个因子在宏观极限下变为零. 其原因是对于一个宏观仪器, 必然是由多粒子组成的, 其初态也必是一个多粒子因子化态  $| d \rangle = | d(1) \rangle | d(2) \rangle \dots | d(n) \rangle$ , 从而, 退相干因子  $F_{mn}$  是许多模小于 1 的因子的乘积,  $F_{mn} = F_{mn}(1) F_{mn}(2) \dots F_{mn}(N)$ . 显然, 在宏观极限  $N \rightarrow \infty$  时, 极有可能  $F \rightarrow 0$ . 1972 年, K. Hepp 通过与 Coleman 的通信讨论<sup>[19]</sup>, 写出满足上述因子化要求的第一个精确可解模型——Hepp-Coleman 模型. 贝尔的批评帮助人们进一步理解 Hepp-Coleman 模型的意义, 从而导致了 Cini, Namik, Nakazoto, Passkazio<sup>[26]</sup> 和作者本人的一系列工作<sup>[20]</sup>.

这些理论工作表明, 如果把量子测量当成一个由于相互作用而产生量子纠缠的动力学过程, 对实际中有限的粒子数  $N$ , 量子退相干不再是一个瞬间, 而是一个渐进演化的过程. 法国 Haroch 小组腔 QED 实验恰好表明了这一点. 他们通过测量的方法, 量子微腔预先制备在相干态  $|\alpha\rangle$  上; 而经典微波场产生拉比转动, 把原子制备在一个叠加态  $|\phi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} ( |e\rangle + |g\rangle )$  上, 其中  $|g\rangle$  和  $|e\rangle$  是二能级原子的能级. 如果微腔的本征频率对于原子跃迁频率来说是大失谐的 (与腔场-原子耦合强度相比是很大的), 在原子穿过腔场的过程中, 原子不发生内部态的跃迁, 但腔场会经受不同的演化, 最后形成纠缠态

$$|\phi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} ( |e\rangle |ae^{iQ}\rangle + |g\rangle |ae^{-iQ}\rangle ).$$

在实际实验中 (如图 2),  $|e\rangle$  和  $|g\rangle$  是铷原子的两个里德伯 (Rydberg) 能级, 主量子数为 51 和 50, 相应的跃迁频率为 51.099 GHz. 它们的寿命较长, 约 30ms. C 是高  $Q$  超导法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔,  $Q$  值为  $5.1 \times 10^7$ , 这相当于光子的寿命为  $160\mu\text{s}$ . 铷原子的这两个能级与光场有很强作用, 拉比耦合强度为 24kHz. 源 S 用来给腔 C 注入光子, C 中平均有 0 到 10 个光子不等. 而  $R_1$  和  $R_2$  是两个被 S' 连续驱动的低  $Q$  腔, 以用来产生  $e$  和  $g$  间的拉比转

动  $S'$  的频率是可调的. 实验最后用场电离探测器  $D_e$  和  $D_g$  来观察原子处在激发态和基态的数目, 它们可在 10 分钟内记录 5000 个事件, 效率为 40% 左右. 由此可以很准确测得原子在基态上的率  $P_g$ . 通过  $R_1$  和  $R_2$  的频率扫描(中心值与原子跃迁共振)可以给出作为扫描频率的函数的几率  $P_g$ , 即测得系统的 Ramsey 干涉条纹.

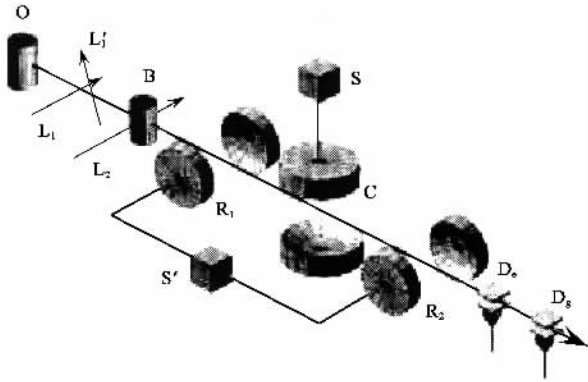


图 2 腔 QED 实验装置示意图

需要指出,  $e-g$  的跃迁在腔  $R_1$  和  $R_2$  中均可能发生, 但由于实验不能区分跃迁是在何处发生的, 这种作用没有记录“which-way”信息, 从而保持很好的相干性.

对完全相干的情况, 微腔 C 最初被制备在真空态上, 我们得到一个理想的 Ramsey 干涉条纹. 这显然就是 Haroche 小组实验中所显示的完全相干的 Ramsey 振荡. 这种干涉强度必为腔场的量子纠缠所破坏. 对于不同的退相干因子, 当微腔中累计的光子数越来越多, 腔场变得越来越宏观, 则作为重叠积分的退相干因子会变得越来越接近于零. 当原子完全退相干时, Ramsey 干涉条纹就会完全消失.

以上描述的 Haroche 小组的实验也以十分确凿的证据提示我们, 量子力学中的互补性原则主要体现在量子纠缠上. 对于这类问题的讨论, Rampe 小组的“which-way”实验主要强调空间相干被破坏, 而 Haroche 小组的实验主要强调时间的相干性(Ramsey 条纹)被破坏. 然而, 以上的理论和实验并未彻底解决量子测量中的冯·诺伊曼链困难.

## 5 冯·诺伊曼链问题

与适当的宏观仪器相互作用, 仅能导致仪器和系统理想的量子纠缠, 而不是经典关联. 虽然适当的相互作用导致的纠缠态会使得第一个系统没有量

子相干性, 但对于量子系统 S 加仪器 I 的复合系统, 相干性仍然是存在的, 这时为了消除  $S+I$  的相干性, 就必须引入第二个仪器 II, 形成更大的纠缠态.

$$|\mathcal{T}(t)\rangle = \sum C_n |n\rangle |d_n(I)\rangle |d_n(II)\rangle,$$
 由此给出  $S+I$  具有经典关联的约化密度矩阵 
$$\rho_S(t) = \sum |C_n|^2 |n\rangle \langle n| |d_n(I)\rangle \langle d_n(I)|.$$
 这种没有量子相干性的经典纠缠态, 描述了客观的、经典的概率性事件.

为什么必须要求  $S+I$  也没有相干性呢? 事实上, 仅要求产生纠缠态是不够的, 因为我们可以新的基矢下, 重新表达纠缠态  $|\mathcal{T}(t)\rangle$ , 它具有与 EPR 态类似的量子纠缠特征, 也同时描述了对不同力学量的量子测量. 有效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, 仪器和系统的关联就不可以具有量子属性——相干性. 只有由经典的几率描述, 我们才能实际地读出量子信息. 和天气预报一样, 预报明天降雨概率为 30%, 是一个客观的概率性事件, 并不依赖人们去观察什么, 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.

现在进一步讨论更大的复合系统: 虽然由于仪器 II 对  $S+I$  实施的测量, 使得系统  $S+I$  的干涉项消除, 但系统  $S+I+II$  的干涉却又产生了. 为了消除  $S+I+II$  的干涉项, 需要引进仪器 III. 推而广之, 要引进仪器 III, IV, V, VI, ... 这仿佛形成了一条无限的仪器的链——冯·诺伊曼链. 要想使理论自洽, 必须中断冯·诺伊曼链, 最后的波包坍塌必须由“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”. 从数学上讲, 要靠冯·诺伊曼链末端观察者经典的“一瞥”, 产生一个多分量的混合态. 由此, 有人还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. 由此, 有人甚至得出“月亮在无人看它时确实不存在”的荒谬结论.

然而, 根据本文介绍的量子测量理论, 无须“主观介入”, 冯·诺伊曼链就能够以某种方式终结. 事实上, 仪器必定是宏观的, 否则人们无法直接读数. 要求仪器必须由无穷多个自由度组成, 仪器的状态就可以写成集体态(仪器读数)与仪器(无穷分量)内部态形成的量子纠缠态. 在宏观极限下, 不管仪器内部状态如何, 我们就有可能得到具有经典关联的混合态. 这个理论的物理含意与对“薛定谔猫”问题的

分析十分相似,与 Zurek 引入的优化基 ( preferred basis ) 的概念密切相关<sup>[27]</sup>: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,从而形成三重纠缠态.目前讨论的关键是把环境理解为仪器内部的自由度,这就是 Omnes “ 内部环境 ” 的观念<sup>[28]</sup>.

冯·诺伊曼“ 必须有主观介入 ” 的“ 证明 ” 的问题症结在于,简单地把仪器说成是观察者,并推断说观察者对微观粒子的影响大到不可控制.但从目前的最新研究的进展来看,冯·诺伊曼的结论并不完全正确.何祚庥曾经指出<sup>[29]</sup>,这是一种“ 佯谬 ”,一种“ 哲学 ” 上的“ 佯谬 ”.产生这一“ 佯谬 ” 的另一原因,在于诺伊曼希望单纯从量子力学“ 推导 ” 出这一“ 测量假说 ”,而不引进任何其他的要求(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 ”,从原则上讲,不可能由此“ 推导 ” 出纯态向混合态转变,而这种转变是时间反演不可逆的结果.

## 6 量子力学的未来与新物理

从以上讨论可以看出,通过退相干机制,量子力学可以把经典力学作为一种极限包含进来.从这个意义上讲,量子力学的建立并不是推翻了经典物理,而是从全新的角度和更深的层次把经典力学描述成一种特殊的极限.对此,著名物理学家盖尔曼指出,“ 当新的范式(如库恩所称的 paradigm) 被采纳后,旧的范式并不会被抛掉,在适当的极限情形下仍然具有近似有效性.但是,经典物理学只是一种近似,而量子力学现在看起来才是精确正确的 ”<sup>[30]</sup>.基于这个考虑,现在可以问两个问题: (1) 退相干和量子耗散导致量子系统趋向经典的论证,依赖于系统与外部的相互作用.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? (2) 既然经典力学是量子力学的极限,那么量子力学本身会不会也是某种更精确理论的极限?

以前几节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,不能只关注宇宙的“ 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. R. Griffiths, R. Omnes, J. 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 )<sup>[40, 28]</sup>.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.

以上关于经典力学是量子力学在某种“ 等价类 ” 上有效理论的想法相当直观,但又十分深刻.由此,我们可以重写第二个问题的提法:量子态是否是一种更深层次物质状态的等价类,而量子力学恰是某种更深层次理论在这些等价类上的有效理论?最近,著名物理学家霍夫特( G. 't Hooft )从量子引力出发提出了这样一种理论,其正确与否有待于未来工作的考验<sup>[41]</sup>.

大家知道,黑洞并不是全黑的,由于 Hawking 辐射的存在,人们可以在一定程度上了解黑洞内部的信息(也许只是“ 量子信息 ”).由此,霍夫特推断,黑洞内部量子态密度  $W = 2^{A/a}$  只依赖于黑洞表面积  $A$  所包含的普朗克尺度单位面积  $a = 4\ln 2 L_{\text{plank}}^2$  的多少,其中普朗克长度  $L_{\text{plank}} = 1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}$ . 这个结果看上去,相当于在黑洞表面上每一个普朗克面元上有一个  $\frac{1}{2}$  自旋系统的布尔态(如图 3).他还证明,黑洞内部全部量子态的运动,可以由其表面上布尔态的行为完整地描述,这就是量子引力中的全息原理( holographic principle )<sup>[42]</sup>.这个原理预言了量子引力中有效量子态的数目将随黑洞表面积(而非体积)呈指数增长.它预示着黑洞表面的布尔态也许是黑洞全部内部态的等价类,而描述布尔态的量子引力理论只能是某种未知理论的有效理论.这个观点很好地说明了为什么量子引力理论通常是非定域的.

1999 年,霍夫特把这种等价类的思想进一步推广到整个量子力学.他认为,在原子尺度(量子力学有效工作的夸克以上物理尺度)上看到的量子态,只是普朗克尺度(一种极高能量的物理尺度)上“ 原初态( primordial states ) ” 的等价类,这些原初态服从某种确定的( deterministic )耗散的( dissipative )物理定律,量子力学可以从这种更底层的定律推导出.虽然这种定律通常是不可逆的,但通过分类的粗粒化损失了等价类内部的信息,推导出的量子力学定律却是幺正的、可逆的.这种理论虽然也可以视为某种隐变量理论,但本质上不同于原来的“ 定域 ” 隐变量理

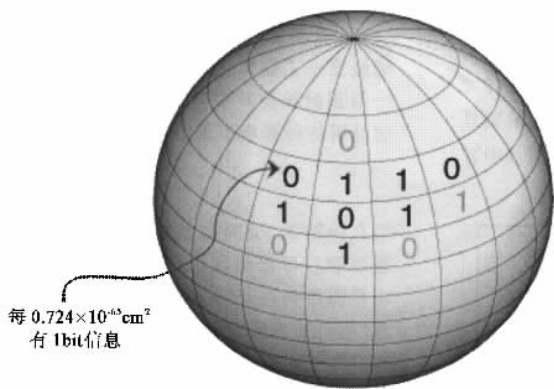


图 3 黑洞内部量子态密度<sup>[41]</sup>

论.事实上,撇开量子力学的观念诠释,量子力学已经在令人震惊的精度上正确地描述了“原子尺度”的物理.在这个物理尺度上另起炉灶,建立全新的理论既不可能,也没有意义.而霍夫特的理论是更小物理尺度上的理论,量子力学是它的极限,因而绝不存在以前各种新理论的困难和不足.

一个理论的正确与否必须通过实验加以检验.目前,霍夫特的理论预言了量子信息的极限.就量子计算而言,它限制了可进行有效因子化的最大数是 $10^{4000}$ .由于量子计算机尚未实际建造起来,在相当长的时间内,人们不可能对此进行检验.应当指出,霍夫特理论还是相当初步的,但它提出了建立 21 世纪新理论的一种启示:量子力学与引力的结合,是 20 世纪物理学悬而未决的问题,它的研究或许会导致 21 世纪物理学的重大进展.

## 7 结束语

从近年来量子力学基本问题的理论和实验研究工作可以看出,人们已经能够通过各种精巧的实验在实验室中大规模地检验历史上留下的关于基本问题的论争<sup>[44]</sup>,已经能够通过具体模型的构建去替代过去思辨式的讨论,能够把基本量子特性直接应用到信息和生命等领域,从而有可能导致交叉领域的重大进展.就量子力学本身发展而言,人们需要更加关心经典世界和量子世界交流和沟通的基本问题,这方面包括半经典物理、介观物理乃至量子引力的研究,它们可能蕴藏着 21 世纪重大的科学突破.

## 参 考 文 献

[ 1 ] Plank M. Verh. Deutsch. Phys. Ges. ,1900 2 :202 ;1900 2 :237  
 [ 2 ] Wheeler J A , Zurek W H. Quantum Theory and Measurement , Princeton Univ. Press ,1983

[ 3 ] Bohr N. in Albert Einstein : Philosopher – Scientist. Schilpp ed. P A Evanston : Library of Living Philosophers ,1949. 200—241  
 [ 4 ] Durt S *et al.* Nature , 1998 , 33 : 395  
 [ 5 ] Schrödinger E. Proc. Cambridge. Phil. Sol. , 1935 : 555  
 [ 6 ] Born M. Albert Einstein Hedwig und Marx Born Briefwechsel. Munchen : Nymphenburger Verlagshandlung ,1959. 1916—1955  
 [ 7 ] Arndt M *et al.* Nature , 1999 , 14 : 401.  
 [ 8 ] Einstein A , Podolsky B , Rosen , N. Phys. Rev. , 1935 : 47 : 77  
 [ 9 ] Bohm D. Phys. Rev. , 1952 , 84 : 166 ; 1952 , 85 : 180  
 [ 10 ] Holland P R. The Quantum Theory of Motion. London : Cambridge Press , 1998  
 [ 11 ] Everett III H. Rev. Mod. Phys. , 1957 , 29 : 454  
 [ 12 ] Bell J. Physics , 1964 , 1 : 195 ; Rev. Mod. Phys. , 1966 , 38 : 447  
 [ 13 ] Kasday L R , Ulman J D , Wu C S. Nuovo Cimento , 1975 , 25 B : 633 ; Aspect A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1981 , 47 : 460 ; 1982 , 49 : 191 ; Shih Y H , Alley C O. Phys. Rev. Lett. , 1988 , 61 : 2921  
 [ 14 ] Bouwmeester D , Ekert A , Zeilinger A ( Eds. ). The Physics of Quantum Information. Berlin : Springer-Verlag 2000  
 [ 15 ] von Neumann J. Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. New Jersey : Princeton University Press , 1955 ( in Germany , 1935 )  
 [ 16 ] Brune M , Hagley E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996 , 77 : 4887 ; Phys. Rev. Lett. , 1997 , 79 : 1964  
 [ 17 ] Green H. Nuovo Cim. , 1958 , 9 : 880  
 [ 18 ] Daneri A , Loinger A , Prosperi G. Nucl. Phys. , 1962 , 33 : 97 ; Nuovo Cim. , 1966 , B44 : 119  
 [ 19 ] Hepp K. Helv. Phys. Acta , 1972 , 45 : 237 ; Bell J S. Helv. Phys. Acta , 1975 , 48 : 93  
 [ 20 ] Sun C P *et al.* Fortschr. Phys. , 1995 , 43 : 585 ; Phys. Rev. A , 1993 , 48 : 878 ; Chin J. Phys. , 1994 , 32 : 7 ; Quantum Semi-class. Opt. , 1997 , 9 : 119 ; Sun C P. In Feng D H , Hu B L eds. in Quantum-Classical Correspondence. New York : International Press , 1997. 99—106 ; In Fujikawa , Ono Y A. eds. Quantum Coherence and Decoherence. 331 , Amsterdam : Elsevier Science Press , 1996. 331 ; Liu X J , Sun C P. Phys. Lett. A , 1995 , 198 : 371  
 [ 21 ] Braginsky V , Khalili F. Quantum Measurement. London : Cambridge Univ. Press , 1992  
 [ 22 ] Wang L J , Kuzmich A , Dogariu A. Nature , 2000 , 406 : 277  
 [ 23 ] Bohm D. Quantum Theory. Englewood Cliffs : Prentice-Hall , 1951. 614  
 [ 24 ] Bennett C H , Brassard G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1993 , 70 : 1895  
 [ 25 ] Bouwmeester D , Pan J W *et al.* Nature , 1997 , 390 : 575 ; Furusawa A , Sorensen J L *et al.* Science , 1998 , 282 : 706 ; Boschi D , Branca S , De Martini F *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 80 : 1121  
 [ 26 ] Cini M. Nuovo Cimento , 1983 , 73B : 27 ; Namik M , Pascazio S. Phys. Rev. A , 1991 , 39 : 44 ; Nakazato N , Pascazio S. Phys. Rev. Lett. , 1993 , 70 : 1 ; For a comprehensive review , see Namik M , Pascazio. Phys. Rep. , 1994 : 237 : 357 ; Nakazato N , Namik M , Pascazio S S. Int. J. Mod. Phys. , 1996 , B10 : 247  
 [ 27 ] Zurek H W. Phys. Today , 1991 , 44 ( 10 ) : 36 ; Phys. Rev. D. , 1981 , 24 : 1516 ; Phys. Rev. D. , 1982 , 26 : 1862  
 [ 28 ] Omnes R. The Interpretation of Quantum Mechanics. New Jersey : Princeton University Press , 1994  
 [ 29 ] 何祚庥. 物理 , 1992 , 22 : 419 [ HE Zuo-Xiu. Wuli ( Physics ) , 1992 , 22 : 419 ( in Chinese ) ]  
 [ 30 ] Wigner E P. Am. J. Phys. , 1963 , 31 : 6

( 下转第 321 页 )