

# 量子力学佯谬及第二次量子革命\*

薛鹏<sup>†</sup>

(北京计算科学研究中心 北京 100193)

2022-11-14收到

<sup>†</sup> email: gnep.eux@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20221201

## Quantum mechanical paradoxes and the second quantum revolution

XUE Peng<sup>†</sup>

(Beijing Computational Science Research Center, Beijing 100193, China)

**摘要** 文章介绍了三个著名的量子力学佯谬，分别是有关量子力学与定域实在性、语境实在性，以及宏观实在性三者之间的关系。这三个佯谬对应三个思想实验，后来又发展出由隐变量理论和实在性推导出的不等式，这些不等式可以定量地判断量子力学和这些实在性之间的关系，使得纠缠等量子力学特性成为可以被真实探测和利用的资源，被广泛应用于量子保密通信、量子隐形传态、量子计算等任务中。量子信息理论的出现，进一步带动了量子通信、量子计算和量子传感等高新技术领域的产生和发展，开启了“第二次量子革命”。

**关键词** 贝尔不等式, EPR佯谬, 薛定谔的猫, 量子革命

**Abstract** This paper introduces three famous paradoxes of quantum mechanics concerning the relationships between quantum mechanics and local reality, contextual reality, and macroscopic reality. The three paradoxes correspond to three thought experiments, from which the inequalities derived from the hidden variable theory and reality were developed. These inequalities can thus quantitatively evaluate the relationship between quantum mechanics and the three realities, making entanglement and other quantum properties become real resources that can be detected and utilized, and so widely used in quantum cryptography, quantum teleportation, and quantum computation. The emergence of quantum information theory has further driven the generation and development of quantum communication, simulation and sensing, as well as other high-tech fields, thus opening the “second quantum revolution”.

**Keywords** Bell inequality, EPR paradox, Schrödinger’s cat, quantum revolution

## 1 引言

2022年诺贝尔物理学奖授予法国物理学家阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)、美国物理学家约翰·弗朗西斯·克劳泽(John F. Clauser)和奥地利物理学家安东·塞林格(Anton Zeilinger)，如图1所示。早在

2010年，这三位物理学家“因其在量子物理学基础上的基本概念和实验贡献，特别是一系列日益复杂的贝尔不等式验证”，而获得沃尔夫奖(Wolf Prize)。沃尔夫奖也被认为是诺贝尔奖的风向标。他们利用纠缠光子，实验验证了贝尔不等式在微观世界中不成立，证明了量子力学的完备性，引领并推动了量子信息这一学科的发展。因此他们获得诺贝尔物理学奖也是众望所归。

\* 国家自然科学基金(批准号: 12025401, 92265209)资助项目

在介绍他们的工作之前，我们先来看看他们工作的动机——量子力学的“佯谬”。理查德·费曼曾经说过，量子力学的精妙之处在于采用了几率幅——波函数。引入几率幅之后，量子测量引起态的坍缩、量子叠加、量子干涉等这些很难理解的概念变得可以被量化，可以通过薛定谔方程等求解了。所以量子力学的奇异特性源于几率幅，但是百年来争论不休的焦点也在于几率幅的使用。

所谓佯谬指的是基于一个理论的命题，推出了一个和事实不符合的结果。它在科学中是普遍存在的。并且研究佯谬，可以增强科学认识能力，活跃思维，引导人们不断深入探讨自然界的奥秘。然而，如果人们能在实验上证实这个结果确实是对的，此时佯谬就变成合理的量子力学特性。而如果实验能否定这个结果的真实性，此佯谬将导致对量子力学的某种修正。

本文将介绍三个著名的量子力学的佯谬。其中一个就是跟今年的诺贝尔物理学奖密切相关的EPR佯谬<sup>[1]</sup>，是有关量子力学和定域实在论之间的关系。第二个是互文性<sup>[2]</sup>，也被称为上下文关系，是有关量子力学和语境实在性之间的关系。最后一个是著名的薛定谔的猫的思想实验<sup>[3]</sup>，是有关量子力学与宏观实在性之间的关系。这三个佯谬对应三个思想实验，后来又发展出由隐变量理论和实在性推导出的三个不等式，这些不等式可以定量地判断量子力学和实在性之间的关系。



图1 2022年诺贝尔物理学奖获得者：阿兰·阿斯佩、约翰·弗朗西斯·克劳泽和安东·塞林格

## 2 量子力学佯谬

### 2.1 EPR佯谬与贝尔不等式

在20世纪30年代，爱因斯坦和哥本哈根学派的代表玻尔的争论，主要还是有关量子力学的理论基础及哲学思想方面。实际上，也正因为这两位大师的不断论战，量子力学才在辩论中发展成熟起来。爱因斯坦一直对量子力学及玻尔代表的哥本哈根学派对于量子力学的诠释持怀疑态度。1935年3月，爱因斯坦和他在普林斯顿高等研究院的年轻同事们——Boris Podolsky 和 Nathan Rosen 共同署名在 *Physics Review* 期刊上发表了著名的EPR论文<sup>[1]</sup>。论文中，他们由量子力学对多体系统的描述，推出一个思想实验(图2)，这个实验允许“幽灵般的超距作用”存在，而这与一个完备的物理理论应满足的“定域实在性”相矛盾，以此证明量子力学是不完备的。这就是所谓的EPR佯谬<sup>[1]</sup>。当然，当时三位作者并不认为这是佯谬。

作为爱因斯坦思想的支持者，玻姆在1952年<sup>[4, 5]</sup>引入了“隐变量”，在定域实在论的基础上形成了一个完全决定性的理论——定域隐变量理论。思想实验中，玻姆对于量子纠缠的描述是：A、B为自旋1/2的粒子，初始总自旋为零。假设粒子有两种可能的自旋，分别是 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$ 。那么，如果粒子A的自旋为 $|\uparrow\rangle$ ，粒子B的自旋便一定是 $|\downarrow\rangle$ ，才能保持总体守恒，反之亦然。这两个粒子构成了量子纠缠态。无论两个粒子相距多远，它们应该永远是 $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ 关联的。如果A被测量为 $|\uparrow\rangle$ ，按照量子力学的解释，B粒子依然应该是上下各有几率，为什么B能够做到一定坍缩为 $|\downarrow\rangle$ 呢？除非存在一种超距瞬时的信号，使得A粒子和B粒子之间能及时地“互通消息”。这种超距作用与狭义相对论中光速不可超越相违背。

处在纠缠态的两个粒子之间的关联性，与粒子之间的距离无关；可以同时测量，也可延迟测

量，即超光速的；与空间环境无关，电磁屏蔽、引力屏蔽等都无法阻挡它们的关联，爱因斯坦称之为“幽灵般的超距作用”。爱因斯坦这一方认为这种超距作用是绝不会出现的，问题源于“量子力学是不完备的”。而哥本哈根学派的代表玻尔，在EPR论文发表的同年，发表了同名的论文，认为EPR论文中的讨论不能表明量子力学是不完备的<sup>[6]</sup>。

爱因斯坦与玻尔代表的哥本哈根学派关于量子力学与定域实在性的关系一直存在分歧，直到他们逝世之后，这场论战仍在物理学界继续进行。

1964年，约翰·贝尔(John Bell)是欧洲核子研究中心的理论物理专家，专职于加速器设计和粒子物理理论研究，关于量子力学基本问题的研究只是他的业余爱好。他自称是爱因斯坦的追随者。贝尔在玻姆的“定域隐变量理论”的基础上，推导出有关EPR实验的一个不等式，违背这个不等式“定域隐变量理论”就不成立。这就是著名的贝尔不等式<sup>[7]</sup>，也被称为贝尔定理。贝尔定理是指任何与量子力学具有相同预测的理论都具有非定域特性。贝尔不等式的诞生，宣告了量子力学的定域性争议从带哲学色彩的纯粹思辨变为实验可证伪的科学理论。虽然贝尔作为爱因斯坦的追随者，其研究隐变量理论的初衷是要证明量子力学的非定域性有误，但后来所有的实验结果都与量子理论的预言一致。

1969年，当时还是哥伦比亚大学研究生的John Clauser和Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt一起，提出了CHSH不等式<sup>[8]</sup>，将贝尔不等式转化为一个非常具体的，且对实验观测友好的变式：

$$-2 \leq E(a_1, b_1) + E(a_1, b_2) + E(a_2, b_1) - E(a_2, b_2) \leq 2 \quad (1)$$

上式中， $E(a_i, b_j)$ 表示联合测量结果得到的 $a_i$ 和 $b_j$ 的期望值。

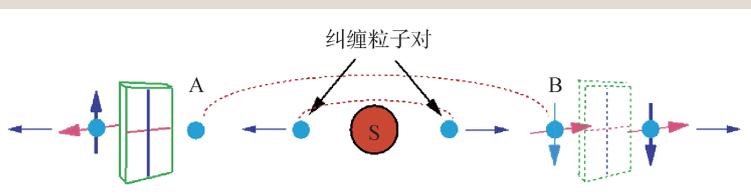


图2 EPR思想实验示意图

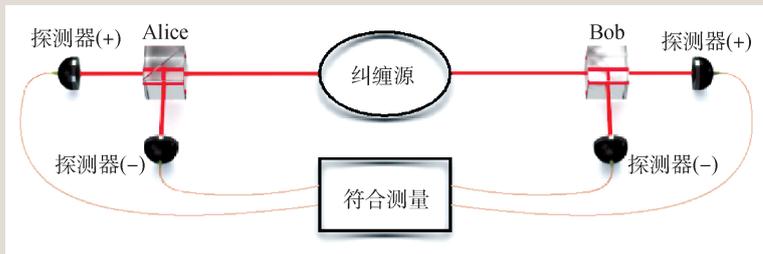


图3 CHSH实验示意图

验证CHSH不等式的实验场景如图3所示。从粒子源发出的两个粒子，一个发送给Alice，另一个发送给Bob。Alice随机地选取两个可观测量中的一个对A粒子进行测量，同样地，Bob也随机地选取两个可观测量中的一个对B粒子进行测量。测量均为双值测量，即存在两种不同的测量结果 $a_i$ 和 $b_i$ ，记作 $\pm 1$ 。然后多次重复实验。

对于每次单独实验，由于双值测量的结果 $a_i, b_j = \pm 1$ ，那么总是有 $b_1 + b_2 = 0, b_1 - b_2 = \pm 2$ ；或 $b_1 + b_2 = \pm 2, b_1 - b_2 = 0$ 。因此：

$$\beta \equiv a_1(b_1 + b_2) + a_2(b_1 - b_2) = \pm 2$$

那么对于多次重复实验的平均值 $\langle \beta \rangle$ ，显然满足：

$$|\langle \beta \rangle| \leq \langle |\beta| \rangle = 2$$

这就得到了CHSH不等式：

$$|\langle a_1 b_1 \rangle + \langle a_1 b_2 \rangle + \langle a_2 b_1 \rangle - \langle a_2 b_2 \rangle| \leq 2$$

(如果换为以下的标记方式： $E(\cdot) \equiv \langle \cdot \rangle$ ，就得到了和(1)式一样的形式。)

对于量子的情况，待测粒子对处于贝尔单态，Alice的最优测量对应的可观测量是 $\sigma_z$ 和 $\sigma_x$ ，Bob的可观测量是泡利矩阵的叠加 $\frac{-\sigma_z - \sigma_x}{\sqrt{2}}$ 和 $\frac{\sigma_z - \sigma_x}{\sqrt{2}}$ ，

CHSH不等式的值可以达到 $2\sqrt{2}$ ，违背了定域隐变量理论允许的最大值2。通过验证CHSH不等式或者贝尔不等式，我们就可以验证在量子世界，

究竟是定域隐变量理论是正确的，还是量子力学的预言是正确的。

1972年，John F. Clauser和Stuart Freedman一起完成了第一次贝尔实验<sup>[9]</sup>，实验装置示意图如图4所示。他们使用钙原子级联跃迁产生纠缠光子对进行实验。但由于两个光子之间的距离较短，且光子对产生效率极低，测量时间长达200小时，因此存在“定域性漏洞”和“测量漏洞”。

这里所谓“定域性”是指不能确定纠缠粒子关联的响应时间超过信号以光速传播的时间，即对一个粒子探测得到结果，另外一个粒子的结果也就瞬间得到，但是如果两个粒子之间距离不够长，不足以证明信号以光速传播的时间是远远长于实验上得到另一个粒子结果的时间，就存在“定域性漏洞”。而“测量漏洞”则是因为探测器效率不是100%，所以可以理解为探测到的粒子都违背贝尔不等式，而没有探测到的粒子是不违背的。

另外，实验中两个光子的测量基是固定的，而不是在两组基中随机选择的，这在当时也是被人诟病的一点。验证不等式，我们通常会计算违背量除以其标准差，以多少个标准差来衡量对于不等式的违背程度。这个实验对于贝尔不等式的

违背达到了6个标准差。

1981年和1982年，Alain Aspect及其合作者进行了一系列实验<sup>[10]</sup>，实验装置如图5所示。在第一个实验中<sup>[10]</sup>，他们使用双激光系统激发钙原子，产生纠缠光子对，改善了纠缠光子源，对广义贝尔不等式的违背，达到了6个标准差。在第二个实验中<sup>[11]</sup>，他们使用双通道方法，提高了光子利用率，测量精度得以大大提高，对不等式的违背达到了46个标准差。在第三个实验中<sup>[12]</sup>，他们进一步改进了实验装置，两个纠缠光子相隔约12 m远，信号以光速在它们之间传播，要花40 ns的时间，光子到每个偏振片的距离为6 m，偏振片旋转的时间不超过20 ns。而利用声光器件甚至可以在更短的时间尺度上，将光子切换到两组测量基上。测量时间远小于信号以光速在两光子之间传递的时间，从而关闭了“定域性漏洞”。但是由于装置复杂，只达到了5个标准差的违背。

1998年，Anton Zeilinger团队在严格的定域性条件下测试了贝尔不等式<sup>[13]</sup>，实验装置示意图如图6所示。利用我们现在最常用到的非线性晶体中参量下转换产生的纠缠光子对，纠缠光子对

之间的距离可以被分开达到400 m，进一步关闭了“定域性漏洞”。对不等式的违背，达到了30个标准差。实验结果具有决定意义。

多年来，大家还是通过各种各样的纠缠粒子对验证贝尔不等式，是因为之前的实验存在一些不完美之处和漏洞。

2015年，荷兰代尔夫特理工大学的Ronald Hanson研究组报道了他们在金刚石色心系统中完成的验证贝尔不等式的实验<sup>[14]</sup>。Hanson等把两个金刚石色心放置在相距1.3 km的两个实验室。利用纠缠光子对和纠缠交换技术，实现了金刚石色心电子之间的纠缠。两个电子直接用光通讯所需时间为4.27  $\mu\text{s}$ ，而完成一次实验的时间为4.18  $\mu\text{s}$ ，

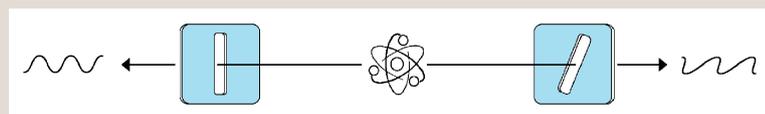


图4 John F. Clauser的贝尔实验示意图

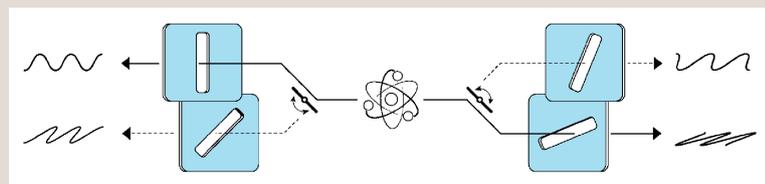


图5 Alain Aspect的贝尔实验示意图

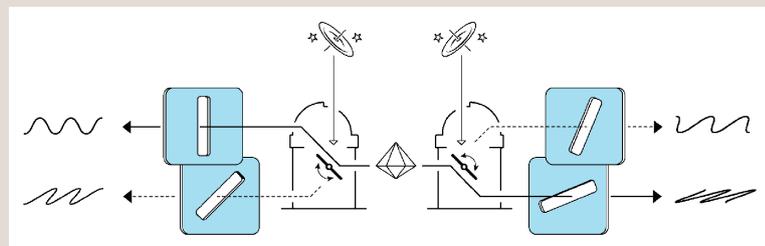


图6 Anton Zeilinger的贝尔实验示意图

因此解决了“定域性漏洞”。此外实验的测量效率高达96%，“测量漏洞”也被堵上了。实现了真正的无漏洞的验证贝尔不等式的实验，违背量达到2个标准差。从而证伪了定域的隐变量理论。

随后 Lynden Shalm 领导的美国国家标准技术研究院(NIST)的研究团队<sup>[15]</sup>和 Anton Zeilinger 的维也纳团队<sup>[16]</sup>，也分别利用纠缠的光子对完成了无漏洞的贝尔不等式的验证。维也纳实验中两个光子的距离是30 m，而NIST实验中距离超过100 m。两个小组都使用了高效光子探测器来排除“探测漏洞”。他们利用一个非线性晶体将泵浦光子转换为两个纠缠光子来制备光子对。两个光子被送往不同的探测装置，每个探测装置由一个高效单光子探测器和其前面的可通过新型随机数产生器来调节偏振方向的偏振片构成。他们分别得到了11个和7个标准偏差的违背量。

如果这两个漏洞都被堵上，还有一个漏洞就是“自由选择漏洞”，在实验过程中需要选择测量基，也有人认为测量基的选择受到意识的影响，而产生漏洞。于是就诞生了所谓的大贝尔实验<sup>[17]</sup>。

2016年，大贝尔实验(the Big Bell Test)展开<sup>[17]</sup>，并召集到世界各地超过十万名志愿者。在实验中，所有志愿者都需要基于个人的自由意志不断地进行选择形成二进制随机数，在过关游戏中快速随机地按下0或者1，12小时内共持续产生每秒逾1000比特的数据流，全部记录在互联网云端，并被实时和随机地发放给分布在世界各地的相关研究团队，用以控制这些研究团队的贝尔不等式检验实验。大贝尔实验相信人类拥有真正的自由意志，通过大量参与者的自由意志，大贝尔实验在更广泛的范围内关闭了“自由选择漏洞”，强烈否定了爱因斯坦的定域性原理。

如果讲到这里，读者对量子纠缠的鬼魅般的超距作用还是觉得不能理解的话，有可能还是因为局限于从因果律的角度去思考这一问题。我们可以试着换一个角度。

如果 Alice 对 A 进行测量，A 的叠加态便在一瞬间坍缩了，比如，坍缩成了 $|\uparrow\rangle$ 。既然 Alice 已经测量到 A 为 $|\uparrow\rangle$ ，因为总自旋为零的缘故，B 就一定要为 $|\downarrow\rangle$ 。好像 A 粒子的测量结果是因，而 B

粒子的态坍缩是果。由“因”引起“果”的过程不需要时间，“瞬时”感应，这就是所谓爱因斯坦都不能理解的“幽灵一般的关联”！但是如果我们任意选择100对粒子，给每一对都做上记号，其中一个为A另一个为B，那么我们会发现，100个标有A的粒子中一半是 $|\uparrow\rangle$ ，一半是 $|\downarrow\rangle$ ，同样，100个标有B的粒子中一半是 $|\uparrow\rangle$ ，一半是 $|\downarrow\rangle$ ，而一对一对的看时，因为总自旋为零，所以同一对的A和B总是一个 $|\uparrow\rangle$ 一个 $|\downarrow\rangle$ 。于是我们得到结论：不能用因果论去理解A和B的两个随机系列是否存在关联。

Alain Aspect, John F. Clauser 和 Anton Zeilinger 三位科学家获得诺贝尔物理学奖，可谓实至名归。就像诺贝尔物理学委员会主席说的那样，获奖者对纠缠态的研究已经超越了解释量子力学的基本问题。因为以三位物理学家的研究为基础，量子纠缠已经在很多物理体系中被实验证实并且加以利用。

实际上，这些关于贝尔不等式的工作定义了最强的一类量子非定域性，现在称为贝尔非定域性(Bell nonlocality)。2002年，Reinhard Werner 发现<sup>[18]</sup>，纠缠和贝尔非定域性实际上是非定域关联的两种独立形式。2007年，Howard Wiseman 等人指出，EPR 思想实验实际上体现的是另一种形式的非定域关联——量子导引(quantum steering)，并给出了其严格定义<sup>[19]</sup>。量子导引是介于贝尔非定域性和纠缠之间的一种非定域关联，它们之间满足<sup>[20]</sup>：贝尔非定域性 $\subset$ 量子导引 $\subset$ 量子纠缠。类似于纠缠和贝尔非定域性的定义(分别是对可分态模型和定域隐变量模型的排除)，量子导引的定义也是基于对某种定域模型(定域隐态模型<sup>[19]</sup>)的排除。EPR 思想实验是量子导引的一个典型的例子(图2)，借助该模型，我们来介绍其定义<sup>[19]</sup>，即量子导引描述的是，Alice 通过对两体系统自己那一半进行定域测量，远程地为 Bob 准备态系综的能力。假如这个系综无法由定域模型(定域隐态模型)描述，我们就说 Alice 可以“导引”Bob。从其定义可以看出——与纠缠和非定域性不同，量子导引是有方向性的<sup>[21]</sup>，比如 Alice 可以导引 Bob，反之则不一定。

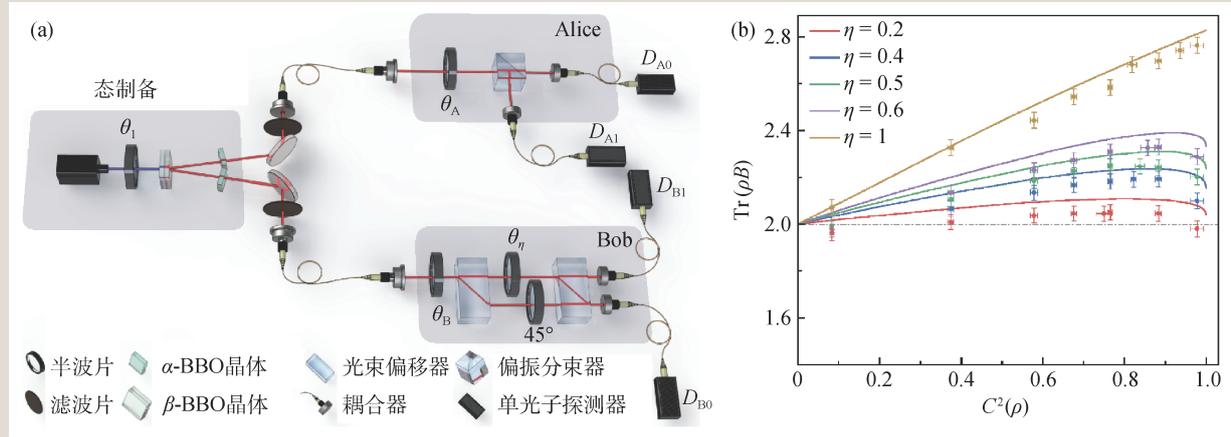


图7 不对称贝尔实验 (a) 实验装置; (b) 纠缠与非定域性之间的反常关系, 横轴表示纠缠强度, 纵轴表示非定域性大小

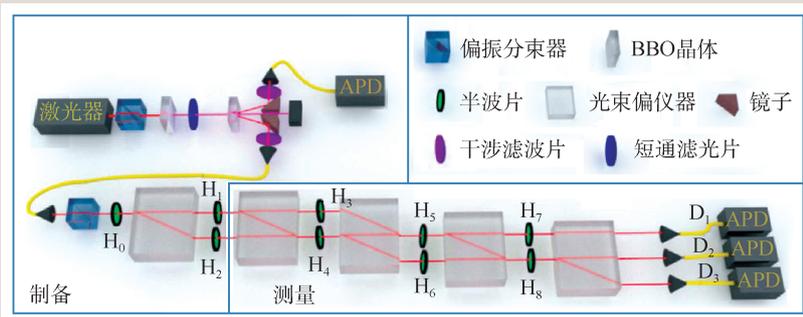


图8 互文性的实验测量装置示意图。其中APD是单光子探测器

至此, 在EPR佯谬发表(以及薛定谔首次提出“纠缠”和“导引”) 70多年之后, 非定域关联的所有形式, 才被正式严格地定义下来。

从刚才的不等式的推导及验证过程中, 我们看出, 违背贝尔不等式的最大程度, 不但依赖于态, 还依赖于测量基的选择。直到现在很多学者还是对量子力学、隐变量与非定域问题孜孜以求。在这一方面我们团队也做了一系列的工作, 简单介绍一下2021年我们做的一个实验工作<sup>[22]</sup>: 直觉上, 人们预期随着纠缠的增强非定域性也会变得更强。然而两者之间的关系似乎更为复杂。我们发现, 在一种被称为“非对称”的贝尔实验中, 较弱的纠缠却可以表现出更强的非定域性, 如图7所示。

## 2.2 语境实在性与量子力学

如果有两个或多个共享量子关联的粒子, 我们可以用非定域性验证量子力学的完备性。如果

只有一个粒子的情况下, 如何验证量子力学是否完备? 与经典的实在性之间是否存在对立? 这几个问题可以用语境实在性和量子力学之间的关系来回答。所谓的互文性<sup>[2]</sup>, 就是文本, 相容的可观测量的最大集合可定义一个文本。经典力学中, 所有的测量都可以同时

进行, 即相容, 所以只有一个文本。量子力学中, 不对易的可观测量构成两个不相容的文本, 因此存在很多文本。

量子力学与经典力学不同的是, 一个量子变量的测量值依赖于另一个与它对易的变量的测量。从经典力学客观实在性的角度看, 或者从隐变量的观点来看, 观测量的测量结果是被隐变量完全决定的, 不依赖于其他观测量的测量结果, 这种孤立的与它者无关的行为称为非互文的(noncontextual)。

在经典力学中, 没有对易或不对易的力学量, 也没有相容的或不相容的测量方式之类的问题。在量子力学中, 不对易的力学量或不相容的测量方式涉及量子理论的基本问题。

1967年, Simon B. Kochen和Ernst Specker分析了自旋为1的量子系统的隐变量问题, 提出了KS定理<sup>[2]</sup>, 即经典力学满足以下不等式:

$$\langle A_1 A_2 \rangle + \langle A_2 A_3 \rangle + \langle A_3 A_4 \rangle + \langle A_4 A_5 \rangle + \langle A_5 A_1 \rangle \geq -3,$$

其中  $A_1, A_2, \dots, A_5$  是 5 个双值测量。测量结果为  $\pm 1$ ，通过简单排列组合算出，不等式的左边只有三种取值： $-3, 1$  和  $5$ 。也就是语境实在性成立的情况下，KS 不等式是成立的。

量子力学的框架下，以一个自旋为 1 的系统为例。根据待测的态选取 5 个可观测量，满足一定的对易关系。我们发现选取合适的可观测量之后，KS 不等式的量可以达到  $5 - \frac{20}{\sqrt{5}}$  (约  $-3.94427$ )，小于经典语境实在论的预言值  $-3$ 。也就再次印证了量子力学对于微观世界诠释的正确性和完备性，也就是说微观世界中语境实在性是不成立的。我们在互文性方面也做了一些工作<sup>[23-27]</sup>，在光量子实验体系下(图 8)，观测到了对互文性不等式的违背。例如，在第一个工作中<sup>[23]</sup>，我们得到 KCBS (Klyachko—Can—Binicioğlu—Shumovsky) 不等式的测量值为  $-3.695 \pm 0.102$ ，违背达到了 6 个标准差；在第二个工作中<sup>[24]</sup>，我们得到 KCBS 不等式的测量值为  $-3.1892 \pm 0.0045$ ，违背达到了 42 个标准差；在第三个工作中<sup>[25]</sup>，我们得到 35 个标准差的违背量。

### 2.3 薛定谔的猫与宏观实在性

尽管薛定谔为量子力学作出了奠基性的贡献，他本人的初衷却是恢复微观现象的经典解释。薛定谔最为普罗大众所熟知的是他所提出的思想实验<sup>[3]</sup>，薛定谔的猫，也是为了试图用经典理论解释微观现象。想象一个放射性镭原子，薛定谔说，它有 50% 的几率衰变，也有 50% 的几率不会衰变。按照哥本哈根派的说法，在对它进行观测前，这个原子同时处于一种“衰变”和“不衰变”的叠加状态。只有当我们对这个原子进行观测时，它才会随机地坍缩成为一种确定的状态。我们可以设计一个精密的毒气释放装置，并把它与这个原子连接起来。当原子衰变时，会触发装置上的一个开关并释放出毒气。当原子没有衰变时，则什么都不会发生。现在，如果我们将这台装置和一只猫一起放进一个封闭的箱子里(图 9)，有趣的事情就发生了。根据哥本哈根派的解释，只要我

们不打开箱子进行观察，这个原子就是同时处于“衰变”和“不衰变”的叠加状态。那么箱子里面的仪器自然也是同时处于“释放毒气”和“不释放毒气”的叠加状态。再往下推理，箱子中的猫也是同时处于“死”和“活”的叠加状态。这只既死又活的猫就是所谓的“薛定谔的猫”。薛定谔的猫究竟是死是活，必须在打开箱子后才知道结果。该实验试图从宏观尺度阐述微观尺度的量子叠加原理的问题，巧妙地把微观粒子在观测后是粒子还是波的存在形式，和宏观的猫是死是活的状态联系起来，以此求证观测对于被观测体系的影响。

按照量子力学，薛定谔的猫应是活猫与死猫的叠加态，但为什么经典世界总是看到要么活，要么死的猫，排斥存在这种薛定谔的量子猫？

玻尔的哥本哈根学派的传统解释：世界分为微观与宏观，前者处于叠加态，宏观世界处于确定状态。当我们观测微观世界时，测量过程会发生波包坍缩，将叠加态的“虚幻”变成确定性的真实。

1985 年，Anthony J. Leggett 和 Anupam Garg，给出宏观实在性(macrorealism)的严格定义，它包含两个方面<sup>[28]</sup>：

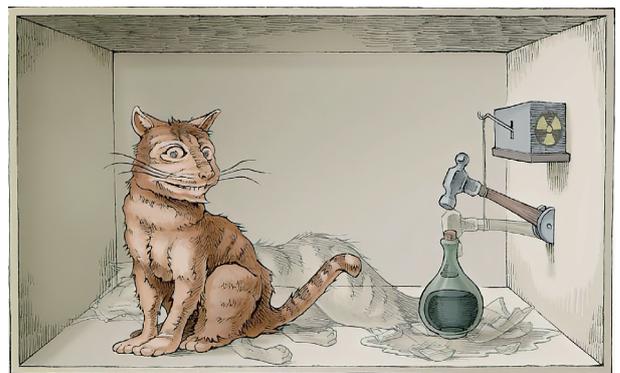


图9 薛定谔的猫

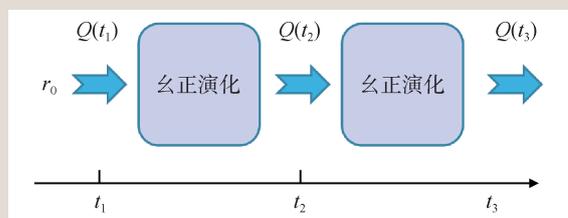


图10 LG不等式是一种描述时间关联性的不等式

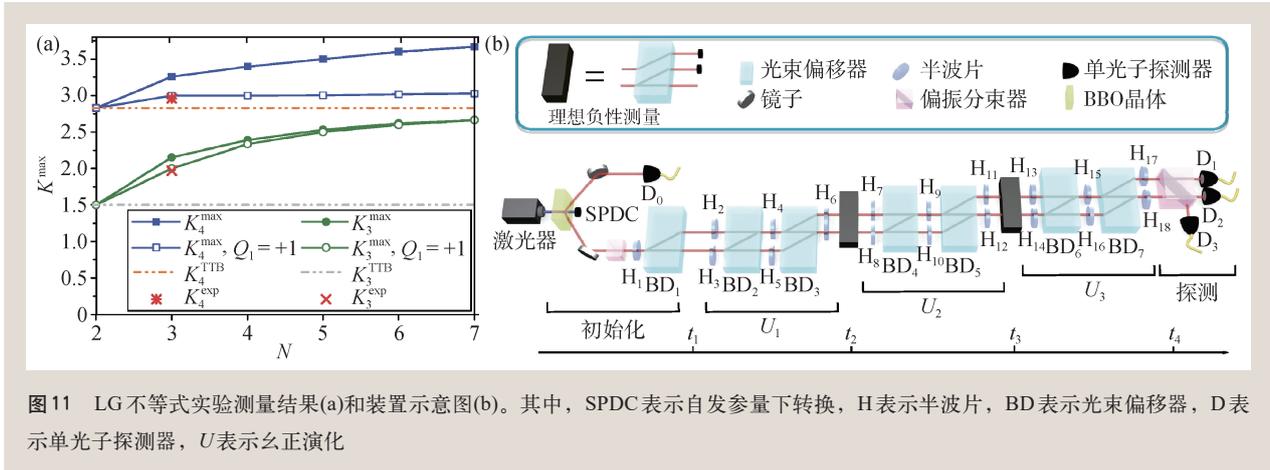


图11 LG不等式实验测量结果(a)和装置示意图(b)。其中，SPDC表示自发参量下转换，H表示半波片，BD表示光束偏移器，D表示单光子探测器， $U$ 表示么正演化

(1)宏观实在性本身：一个具有两种或两种以上不同状态的宏观系统，将始终处于其中一种或另一种状态；

(2)非破坏测量：原则上可以用不破坏系统状态及其后续演化的测量来确定系统的状态。

基于这两个宏观实在性的假设，是无法看到薛定谔量子猫的<sup>[28]</sup>。

基于这两个假设，Anthony J. Leggett和Anupam Garg还提出了一种不等式(LG不等式)<sup>[28]</sup>，用于检验宏观实在性：

$$K \equiv \langle Q_2 Q_1 \rangle + \langle Q_3 Q_2 \rangle - \langle Q_3 Q_1 \rangle \leq 1 .$$

因为LG不等式在宏观现实主义下成立，但是宏观实在性的两个假设在量子力学中都不成立，因此量子系统可以违背LG不等式。量子系统下可以达到： $1 < K \leq 1.5$ 。最大值1.5被称作时间域的Tsirelson束缚。类似于描述类空关联性的贝尔不等式，LG不等式是一类描述时间关联性的不等式，如图10所示。

在我们的工作中<sup>[29-32]</sup>，通过在高维系统中的多输出测量，达到了对3项( $K_3$ )和4项( $K_4$ )LG不等式的违背且均超过Tsirelson束缚，证明了随着系统维度增大，不等式的值趋向于其代数最大值。经典情况下，

$$K_3 \equiv \langle Q_2 \rangle + \langle Q_3 Q_2 \rangle - \langle Q_3 \rangle \leq 1 ,$$

$$K_4 \equiv \langle Q_2 \rangle + \langle Q_3 Q_2 \rangle + \langle Q_3 Q_4 \rangle - \langle Q_4 \rangle \leq 2 .$$

量子情况下， $K_3$ 和 $K_4$ 的Tsirelson束缚分别为1.5和 $2\sqrt{2}$ 。而我们的实验突破了经典和量子Tsirelson

束缚，实验测量值分别为 $1.97 \pm 0.06$ 和 $2.96 \pm 0.05$ ，对LG不等式的违背，分别达到16个和19个标准偏差。实验装置如图11所示。

## 2.4 实在性之间的关系

研究各种实在性的性质和它们之间的关系，不仅具有重要的理论意义，也具有重要的应用价值。如上小节提到的，LG不等式被视为时间域的贝尔不等式。在另外一个研究实在性之间关系的工作中，我们在光量子系统中(qubit-qudit)，观察到了互文性与非定域性的此消彼长关系<sup>[25]</sup>。由ND(no-disturbance)原理，互文性与非定域性满足：

$$\beta_{AB} + \kappa_A^{\text{ND}} \geq -5 .$$

上式中，

$$\kappa_A = \langle A_1 A_2 \rangle + \langle A_2 A_3 \rangle + \langle A_3 A_4 \rangle + \langle A_4 A_5 \rangle + \langle A_5 A_1 \rangle \geq -3 ,$$

$$\beta_{AB} = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_4 B_1 \rangle - \langle A_4 B_2 \rangle \geq -2 ,$$

分别为KCBS不等式和CHSH不等式。

实验装置如图12所示，实验选取的测量方向和实验结果如图13所示。

实验结果表明一旦量子非定域性被实验验证，体系则不再满足量子互文性，反之亦然。因此量子纠缠可以被视为一种最普适的量子资源，可以用于交换所有其他量子资源，验证互文性耗费了量子资源，就没有剩余的量子纠缠可以用于验证

非局域性了。更深层次的理解是定域实在性、语境实在性及宏观实在性实际上是同一种实在性的不同表示方法。

### 3 第二次量子革命

量子力学的第一个百年中，科学家们逐步建立了一套完整的量子力学理论体系，改变了人们理解和描述微观世界的方式。量子力学的建立和在技术领域的初步应用被称为“第一次量子革命”。第一次量子革命取得的辉煌成果，直接导致了激光、晶体管、核能等技术的产生。

量子信息的诞生点燃了量子力学的“第二次革命”<sup>[33]</sup>，新的实验方法和手段出现，提供了研究量子世界奥秘的有效工具，带动了量子计算、量子模拟、量子传感和量子通信等高新技术领域的诞生和发展。

量子信息技术在信息处理、通信、保密等方面<sup>[34]</sup>展现出了传统技术所不具有的优越性，并引发了各国的高度重视。例如，2016年欧盟发布了《量子宣言》，提出了总额10亿欧元的“量子技术旗舰”计划。该计划力图汇集欧盟及其成员国的优势，推动量子通信、量子计算机等领域量子技术的发展，确立欧洲在量子技术和产业方面的领先优势。2018年，美国通过《国家量子法案》，确立了美国联邦政府组织开展量子信息科学研发的架构。2022年5月，白宫又宣布了促进量子技术研究和发展的新计划，以推进量子科学和技术的发展。此外美国一些科技企业，如IBM、谷歌、霍尼韦尔、微软等，早就纷纷布局量子信息技术研发。我国政府也高度重视量子信息技术发展，2020年中共中央政治局就量子科技研究和应用前景进行了集体学习。民间大批实力雄厚的企业如华为、阿里巴巴、百度等也已加入量子信息技术研发行列。

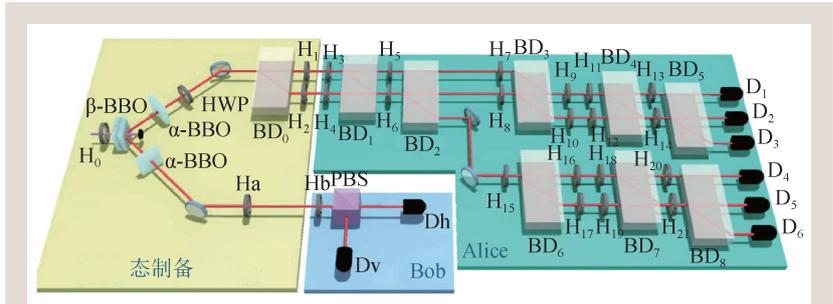


图12 互文性与非定域性单婚性关系测试装置图

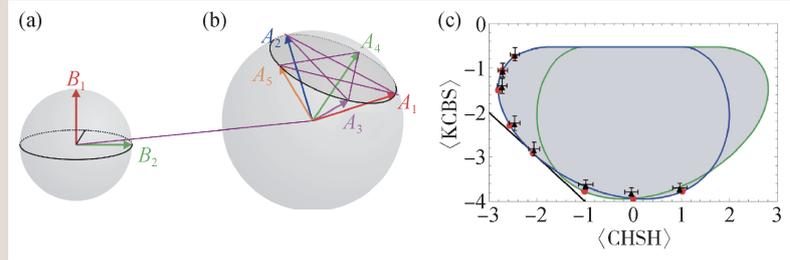


图13 (a), (b) 选取的测量方向；(c) 实验结果：互文性与非定域性表现出此消彼长的关系

《自然》杂志2014年发表的编辑部纪念贝尔定理50周年的评论指出：量子力学二次革命的战鼓已经敲响了！

第二次量子革命是直接开发量子特性本身的应用，量子信息以量子比特为单元，信息的产生、传输、处理、探测等全部要遵从量子力学规律，是真正的量子器件，这种崭新的技术将给人类社会带来翻天覆地的变化。

另外，人类还将继续追问“为什么”。如：量子世界与经典世界的界限问题，隐变量与非定域问题，量子力学与各种实在性的关系及各种实在性之间的关系，量子力学与因果律，量子力学与相对论的融合等。

#### 参考文献

- [1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Phys. Rev., 1935, 47: 777
- [2] Kochen S, Specker E P. Math J. Mech., 1967, 17: 59
- [3] Schrödinger E. Naturwissenschaften, 1935, 23(48): 807
- [4] Bohm D. Phys. Rev., 1952, 85: 166
- [5] Bohm D. Phys. Rev., 1952, 85: 180
- [6] Bohr N. Phys. Rev., 1935, 48: 696
- [7] Bell J S. Physics Physique Fizika, 1964, 1: 195
- [8] Clauser J F, Horne M A, Shimony A et al. Phys. Rev. Lett., 1969, 23: 880

- [9] Freedman S J, Clauser J F. *Phys. Rev. Lett.*, 1972, 28: 938
- [10] Aspect A, Grangier P, Roger P G. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, 47: 460
- [11] Aspect A, Grangier P, Roger P G. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 49: 91
- [12] Aspect A, Grangier P, Roger P G. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 49: 1804
- [13] Weihs G, Jennewein T, Simon C H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 5039
- [14] Hensen B, Bernien H, Dréau A E *et al.* *Nature*, 2015, 526(7575): 682
- [15] Shalm L K, Meyer-Scott E, Christensen B G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115(25): 250402
- [16] Giustina M, Versteegh M A M, Wengerowsky S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115(25): 250401
- [17] The BIG Bell Test Collaboration. *Nature*, 2018, 557(7704): 212
- [18] Vidal G, Werner R F. *Phys. Rev. A*, 2002, 65: 032314
- [19] Wiseman H M, Jones S J, Doherty A C. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98: 140402
- [20] Uola R, Costa A C S, Nguyen H C *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2020, 92: 015001
- [21] Bowles J, Vértesi T, Quintino M T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 200402
- [22] Zhu G, Dille D, Wang K *et al.* *npj Quantum Inf.*, 2021, 7(1): 1
- [23] Zhan X, Zhang X, Li J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 090401
- [24] Zhan X, Kurzyński P, Kaszlikowski D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119: 220403
- [25] Zhan X, Cavalcanti E G, Li J *et al.* *Optica*, 2017, 4: 966
- [26] Qu D, Wang K, Xiao L *et al.* *npj Quantum Information*, 2021, 7: 154
- [27] Qu D, Kurzyński P, Kaszlikowski D *et al.* *Phys. Rev. A*, 2020, 101: 060101
- [28] Leggett A J, Garg A. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(9): 857
- [29] Wang K, Emary C, Zhan X *et al.* *Opt. Exp.*, 2017, 25: 31462
- [30] Wang K, Knee G C, Zhan X *et al.* *Phys. Rev. A*, 2017, 95: 032122
- [31] Wang K, Emary C, Xu M *et al.* *Phys. Rev. A*, 2018, 97: 020101
- [32] Wang K, Xu M, Xiao L *et al.* *Phys. Rev. A*, 2020, 102: 022214
- [33] 郭光灿. 颠覆: 迎接第二次量子革命. 北京: 科学出版社, 2022
- [34] 薛鹏, 郭光灿. *物理*, 2002, 31(6): 385

## CAEN SP5630ENP 环境监测实验套件 (升级版)

人类活动环境中一直存在放射性辐射现象, 通过实验监测, 了解放射性的本质是物理专业学生的必修课程。运用伽马谱学仪器, 可以学习射线与物质间相互作用的机理、实践掌握核探测的基本方法并理解核物理学的本质原理。

感知辐射现象,  
探索物质机理,  
发现物质本质!



官方授权代理商 (中国):  
北京中检维康电子技术有限公司

www.phyclover.com  
电话: 86-10-88026700  
邮箱: info@phyclover.com

www.caen.it  
Small details... Great differences