

解读2022年诺贝尔物理奖

范 桁^{1,2} 龙桂鲁^{2,3}

(1. 中国科学院物理研究所 100190; 2. 北京量子信息科学研究院 100193;

3. 清华大学物理系 100084)

2022年度的诺贝尔物理奖授予法国阿斯佩(A. Aspect), 美国克劳泽(J.F. Clauser)以及奥地利蔡林格(A. Zeilinger)三人, 以表彰他们“用纠缠光子的实验, 建立贝尔不等式违背和开创量子信息科学”实验的贡献。正如诺贝尔物理奖委员会主席伊尔巴克(A. Irback)所指出的: “越来越明显, 新的量子技术已经出现, 我们可以看到, 获奖人关于纠缠态的工作非常重要, 甚至超越了量子力学诠释这样的基本问题”。2022年度的诺奖物理奖的获奖工作的意义, 主要体现在其对量子信息科学的开创性和奠基性的实验的贡献。事实上, 量子计算和量子信息处理的基本机制和运行原理, 直接依赖于今年诺奖工作所打下的基础。

那么今年诺贝尔物理学奖具体解决的又是什么问题呢? 首先是量子纠缠实验。在数学上, 纠缠状态就是两个粒子组成的体系的波函数不能进行因式分解的波函数。这种状态是我们平常生活中看不到的, 具有非常奇特的性质。1935年, 爱因斯坦不喜欢量子力学, 为了和玻尔辩论, 他和两个助手, Podolsky, Rosen 一起构造了一种动量和位置的量子纠缠态, 在对两个空间分离的纠缠粒子分别进行测量时, 测量的结果是关联的, 不管是同时测量还是延迟测量, 一个的测量结果定了, 另外一个粒子的测量结果也就知道了, 而这种关联并不依赖于距离, 好像这两个粒子之间存在一种超距作用似的。在经典物理学和我们的日常生活中, 相距遥远的两个粒子之间是不存在相互作用的, 对其中一个的操作, 也不会影响到远处的另一个粒子。而根据量子力学的推断, 对其中一个粒子的测量, 其结果

不同, 就会导致远处粒子的状态的变化。爱因斯坦认为, 远处的粒子的状态是确定的, 只有一个物理实在, 而量子力学的推断却是多个, 一个完备的理论对于一个物理实在应该只有一个描述, 因此量子力学是非完备的。这一量子纠缠推论后来就被称为EPR佯谬。

同年稍后时间, 薛定谔意识到空间分离的两个粒子会形成量子纠缠的特殊状态。如果这两个纠缠的粒子一个是微观的, 比如是一个原子, 而另一个是宏观的, 如是一只猫, 量子纠缠将会导致奇异性。原子状态是用来控制致命毒药开关的, 如果原子处在激发态, 毒药开关没有打开, 猫是活的, 这是一种状态。如果原子处在基态, 毒药开关打开, 放出毒药, 猫是死的, 这是另外一种状态。而量子纠缠态就是把这两种状态叠加在一起, 从而形成死猫和活猫以及伴随原子状态的叠加态, 既非死也非活, 这就是著名的薛定谔的猫。当然, 这种状态只是一种想象的状态, 在实际上很难制备这样的状态, 一则是猫是一个包含许多粒子的宏观体系, 很难把猫的状态和原子的状态耦合纠缠, 另外一个根本性的原因, 活猫和死猫是两个不同时间的状态, 需要打破因果律, 才能把这两种状态叠加起来, 因此薛定谔所描述的这种猫态至今也没有制备出来。而后来在实验上报道的薛定谔猫态都是以空间换时间, 把同一时间在不同地点的状态叠加起来, 宏观的猫也换成了粒子数目大大减少的多粒子体系, 如用多个电子(十几个)来代表猫, 而用在两个不同的量子点来作为“原子”, 这样电子团在左边量子点和电子团在右边的量子点状态的叠加, 就是后来实

验上实现的薛定谔“猫态”，这种猫态不是死猫和活猫的纠缠态，而是猫在左边和猫在右边的纠缠态。

人们猜想粒子受到某种未被揭示的机制、或看不见的隐变量的约束，将其称为隐变量理论，因而才会呈现出这种奇怪的现象。1952年波姆提出了隐变量理论，该理论中量子力学仍是定域且实在的，定域就是指粒子只受本地的因素影响，在事件发生时间内，光速传播不到的区域的事件不会对此地有影响，而EPR佯谬的出现是我们对隐变量的无知所造成的。所谓实在性是说一个物理量，不管我们测量还是不测量，其大小是确定的，并不因为我们是否测量而改变，就如我们看不看月亮，月亮依然存在这个事实是确定的。但量子力学并不满足这个性质，因为对量子态的测量，每次测量结果是随机的，多次测量的统计平均才能反映其振幅信息，同时量子纠缠也不满足定域性要求。

为了理解隐变量理论，人们经常用生活中例子来说明，比如有黑白球各一，随机拿出一个装箱发送给分别处于北京和上海的两人，当他们任何一个打开箱子，如果他知道是黑白各一的事实，他可以通过自己拿到球的颜色，知道另一个人所拿到球的颜色，正是这个隐含条件造成了结果的关联性。波姆理论中量子力学就像这样，世界仍然是定域实在的，只不过黑白各一球这样的条件我们不知道，EPR中两个粒子在分开时，它们的状态已经确定相反了，而不是量子力学理论预言的在测量时由于超距作用才决定的。

到这里问题就变成了：如何判断EPR佯谬现象是由隐变量引起，而我们无知造成的，还是按照量子力学的那种由纠缠的波函数和测量假设所推断出来的，就像有幽灵般超距作用一样？这就是贝尔不等式所解决的重要问题。

贝尔在20世纪60年代提出了一个不等式，被广为称为贝尔不等式(Bell inequality)。他经过深入思考，发现隐变量理论将满足一种不等式，这个隐变量可以有复杂的分布，所以涵盖了广泛的各种情况，而按照量子力学的测量理论将会发现这个不等式在

一些情况下会被违背，这样就可以用实验来检验这个不等式到底是否成立，如果实验结果违背这个不等式，那就说明隐变量理论不对，量子力学正确。今年诺贝尔物理学奖获得者正是因为用实验，从粗糙到精致，严格检验了贝尔不等式违背，从而获奖。

具体来讲贝尔不等式及其等价形式，Bell-CHSH不等式(统称为贝尔不等式)，如果要被违反需要满足一些基本条件：首先必须有高质量的量子纠缠态，其纠缠保真度要尽量高，同时纠缠的粒子之间的距离要足够远，单次实验时间内要超过光速能够达到的距离。贝尔不等式要求对两个纠缠粒子分别用两组基进行测量，而两组基的选取是随机的，互不干扰，另外必须采取复合测量的形式，即必须使得两地测量的结果是来自同一纠缠对的，非定域性要求贝尔不等式的测量结果应排除两个粒子间信息传递或者相互作用的影响，也就是说得到两个测量结果所花费的时间，要小于光速传递的时间。这些条件不容易满足，包括如何选取随机数都需要仔细考虑。

三位获奖者在贝尔不等式的违背系列实验中做出了奠基性工作，获奖者阿斯佩(Aspect)和克劳泽(Clauser)的贡献，主要体现在量子力学基本原理方面，而获奖者蔡林格(Zeilinger)的贡献是量子力学基本原理和量子信息基础两个方面。

应该指出，量子力学的正确性已被普遍接受，并在科学研究和第一代量子革命中普遍应用，所以今年诺奖的工作不能简单地理解为验证了量子力学，而是对量子纠缠性质在更严格意义下进行了检验，并为量子信息科学奠定了基础。量子计算和量子信息研究正是基于这些性质，通过量子态调控和测量来进行计算、通信和精密测量，以获得超越现有经典技术的优势。量子计算在解决某些问题时，其能力超越了现有的计算机，包括超级计算机，而量子计算的优势来自两个方面，其天然的并行计算特征和多量子比特所带来的指数加速能力，依赖于叠加性和纠缠特性，也就是超越定域实在性特点。而如果没有量子纠缠，量子计算将没有优势，今年诺奖的

工作就是夯实了这些基础认知,是量子计算的基础。

在介绍诺奖的背景科学材料中,有相当篇幅论述量子纠缠应用,如量子中继和量子网络,以及基于纠缠态量子密钥分发等最新进展,中国团队墨子号的纠缠分发等几个工作也是重要的近期进展。

诺奖背景材料中指出,欧盟的“量子技术旗舰”

计划开展四个方向的研究:量子计算,量子模拟,量子通信,量子计量和传感,体现了对量子科技的重视,2022年物理诺奖犹如吹响了量子科技竞争的号角,后续更深入的基础科学探索和更大的技术进步及应用也期待大家的共同努力,特别是中国科学家的努力。

科苑快讯

关于脊髓和脑干重要作用的新发现

根据最新的研究,脑干和脊髓在触摸信号被传输到大脑的过程中,起着至关重要的作用。

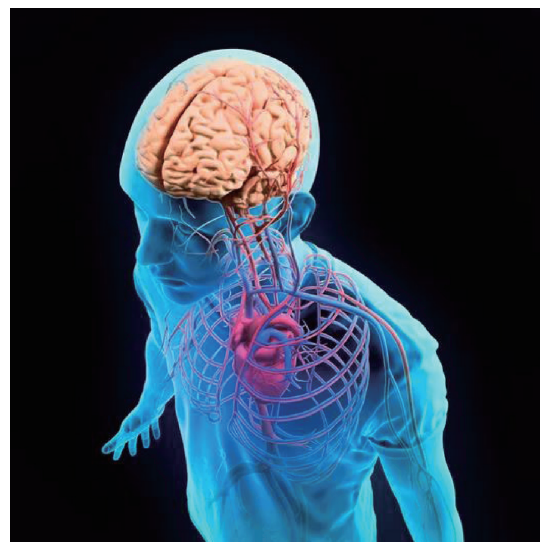
我们做任何事情,都离不开触觉。然而,脑干和脊髓是如何参与接收、处理和传输信号的,仍然是未知的。现在哈佛医学院的研究,让我们更好地了解脊髓和脑干是如何影响触觉的。

最近发表在《细胞》(*Cell*)期刊上的研究表明,脊髓中的特殊神经元形成了一个复杂的网络,它处理轻触信息(比如手掠过或轻拍脸颊),并将这些信息发送到脑干。

研究人员在另一项发表在《自然》(*Nature*)期刊上的研究证实,直接和间接触摸通路共同工作,在脑干中会合,去处理触摸的信息。

脊髓和脑干是触觉信息整合和处理的地方,研究重点就在这里。关于触摸信息处理的基础知识,可能对科学家研究人类疾病有作用,比如以触摸功能障碍为特征的神经性头疼。这种对触觉的详细了解,即通过与皮肤接触来感受世界,可能对理解疾病、紊乱和损伤如何影响我们与周围环境互动的能力,具有深远的意义。

研究人员还对来自大脑的信息(例如动物的压力、



饥饿或疲惫程度)如何影响接触信息在脊髓和脑干的处理,抱有浓厚兴趣。鉴于接触机制在物种间是一致的,这些信息可能与人类疾病特别相关,如自闭症谱系障碍或神经性疼痛,这些疾病中的神经功能障碍会导致对轻触的超敏感。这些基础研究将有助于了解正常的运作机制,以及出现问题时发生了什么变化。

(高凌云编译自2022年12月22日 SciTechDaily 网站)