

量子物理是什么？

——回答长期未决的问题

阿特·霍布森¹ 著 龙桂鲁² 译

(1. 阿肯色大学 AR 72701; 2. 清华大学 100084)

一、引言

1900年,许多物理学家认为艾萨克·牛顿和詹姆斯·麦克斯韦已经回答了所有重要的物理问题,剩下的几乎没有什么可以发现的了。剩下的少数几个基本问题之一是理解物体被加热到某个温度时辐射的能量。

在苦苦思索这个问题的答案时,马克斯·普朗克提出了一个新观点:辐射能量并非连续释放,而是以瞬时分离的能量包形式释放。每个能量包的大小很小—— 2.85×10^{-19} 焦耳——相当于你家灶台上普通电热灶辐射出的能量单位,也就是每个“量子”的能量。普朗克认为这纯属数学假设,与实际物理现象关系不大。

今天,我们认识到,普朗克的想法是理解微观世界的关键。它适用于整个宇宙:每一种能量都以高度统一的包或“单元”的形式存在。我们称这些包为“量子”。

普朗克的理论被忽视了五年,直到1905年,一位名叫阿尔伯特·爱因斯坦的默默无闻年轻专利审查员才证明,普朗克提出的量子理论能够解释“光电效应”——即当光束照射金属表面时,金属会释放电子。1913年,尼尔斯·玻尔基于普朗克的理论发表了著名的氢原子模型,这使得量子物理学真正引起学界的广泛关注。

1925至1927年间,维尔纳·海森堡、埃尔温·薛定谔等科学家提出了量子理论的普适性框架。然而他们的研究成果过于抽象,数学推导复杂,难以用直观的物理图像来阐释。尽管该理论能以惊人

的精度预测原子光谱等物理现象,但学界却就其在现实世界中的具体含义展开了激烈争论,形成了相互矛盾的解读观点。

量子物理学已经存在了125年。它是有史以来最精确和最全面的科学理论。然而,它的基本思想仍然令人困惑。

专家们对一些简单问题给出了截然不同的答案。这些问题包括:量子物理研究什么?电子或光子究竟是什么?电子、光子或原子的“量子态”究竟意味着什么?如果能直接观测,电子会呈现怎样的形态?原子是真实存在的实体,还是人类思维的产物?空间延展的“波函数”会瞬间坍缩吗?如果是这样,这是否违背了爱因斯坦关于“没有任何东西能比光速更快”的结论?

每门科学都有正常的学术分歧,但很难理解为什么物理学家甚至在他们最基本的理论的一般性质上也不能达成一致。

这并不健康。它让那些想知道这个理论告诉了我们关于现实世界的何种图景的普通人感到困惑。这种困惑导致物理学家们发明了大量令人尴尬的量子物理学“解释”,其中许多接近伪科学(神秘或宗教思想被当作科学来呈现)。

是时候让物理学家们就量子物理学的意义达成一致了。

这些问题自1935年就存在。有争议的话题包括波粒二象性、叠加、纠缠、波函数的坍缩、非局域性、薛定谔的猫、测量,以及“波函数”是否在物理上是真实的,或者仅仅是一种心理构造。

如今这些“老问题”能够得到解答,背后有几个

关键原因。首先,大部分困惑源于围绕“非定域性”(爱因斯坦称之为“远距离幽灵作用”)的长期争论^[1]。但这一难题在2015年通过三篇论文得以解决^[2-4],该成果还被授予该领域三位物理学家的2022年诺贝尔奖所认可。如今科学界已达成共识:非定域作用确实真实存在。

其次,其中一些问题可以通过采用更精确、更包容的理论——“量子场论”——作为对整体现实的描述而得到解决。量子场论支撑着高能物理领域的诸多成就。标准量子物理仅仅是该理论在低能极限下的表现形式。

第三,由于物理学家对当前量子物理解释的不满,以及关于非局域性的突破,今天科学界的氛围更欢迎大家提出新的解决方案。

二、没有粒子,只有量子化的场

物理“场”(例如电磁场)是一种在空间区域内每个点都具有特定数值的实体。理解量子物理学的关键在于认识到:宇宙本质上是由一系列量子化的物理场构成^[1,5-8]。

在日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)的大型质子对撞机等实验室工作的物理学家们,已经发现了25种不同的量子场。这些场都具有“量子化”特性,意味着它们的能量以统称为“量子”的能量包形式存在。举个例子,电磁场就是其中一种,其对应的量子就是光子。

电磁场和另外24个基本场遍布整个宇宙。这25个量子场的理论被称为“量子物理的标准模型”,对于人类最基础的宇宙理论来说,这个标题太乏味了。

简而言之,这25个基本场包括6种“夸克”场、6种“轻子”场、8种“胶子”场、4种“电弱场”以及希格斯场。我们熟悉的宏观世界仅由其中4种场构成:两种被称为“上夸克”和“下夸克”的夸克场、一种称为“电子场”的轻子场,以及一种名为“电磁场(EM场)”的电弱场。希格斯场对理解宏观世界同样至关重要——若没有希格斯场,上夸克、下夸克和电子场将失去质量,生命便无法存在!所有这些场都处

于“量子化”状态,即它们都以被称为“量子”的能量包形式存在。例如,电磁场的量子被称为“光子”。我们熟悉的原子、分子、苹果和桌子的世界,仅由这四种场构成:电磁场、电子场以及上夸克和下夸克场。其余21种场则活跃于大爆炸、活动星系核和恒星超新星爆发等高能现象中。

众所周知,标准模型并不完整。首先,它无法解释在许多星系中观测到的“暗物质”。其次,它也无法解释导致宇宙加速膨胀的“暗能量”。最重要的是,标准模型没有解释引力的作用。

包括我在内的大多数物理学家都认为,只有当我们建立起量子引力理论时,所谓的“万物理论”才能真正完善。我们这些研究者普遍认为,未来任何完整的理论体系,最终都将基于一个统一的量子场论——这个理论需要囊括整个标准模型、暗物质、暗能量、引力,以及未来可能发现的所有新现象。

三、双缝实验

电子、光子和原子这些量子现象,究竟是某种宇宙“介质”中的波动,还是漂浮在虚无空间的微小粒子?要理解这个困惑,不妨看看著名的“双缝实验”(图1)。托马斯·杨于1801年首次开展这项实验,它让科学界确信光是由波构成的,而非像艾萨

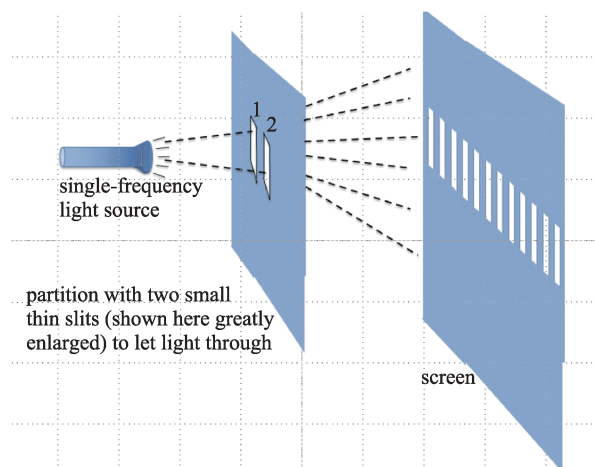


图1 光的双缝实验概念图。单频光通过两个狭缝时,并不会在屏幕上产生预期的两条宽光带,而是形成了明暗相间的条纹干涉图案(图源:Springer Nature)

克·牛顿所认为的那样由粒子组成。

如图1所示,当单频光通过隔板上的两个窄缝时,会在隔板后方一定距离处的观察屏上形成一系列明暗相间的条纹。标准解释认为,光是电磁场中的波动,当两束光线穿过狭缝后,在观察屏上会发生“干涉”现象。具体来说,当一个狭缝的波峰与另一个狭缝的波谷相遇时,两者的波形会相互抵消,屏幕上不会出现任何光斑。而当波峰相遇(或波谷相遇)时,两者的波形会产生叠加效应,屏幕上就会显现明亮的条纹。如果通过狭缝的是粒子而非波,则不会发生这种干涉现象,所有粒子都会在屏幕后方的两个狭缝处形成宽幅光带。图2展示了干涉效

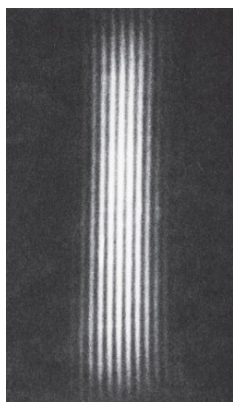


图2 光的双缝实验的实验结果
(图源: Springer Nature)

应的实验验证。

但图1和图2似乎与我们之前学到的光由被称为“光子”的小能量包构成的观点相矛盾。光子理论似乎支持牛顿关于光由粒子构成的理论。为什么我们在图1和图2中看不到这种粒子的证据?图3将帮助我们解答这个问题。

图3是用极其微弱的光想象中的双缝实验的示意图,这种光非常微弱,每秒只有几个光子通过缝隙。这个实验非常微妙,从来没有被做过,但它是我们期望看到的,如果实验能够进行的话。

图3展示了当仅有少量光子通过狭缝时,干涉条纹随时间累积形成的渐变过程。在图3(a)中,由于曝光时间过短,仅有少量光子撞击屏幕;图3(b)则通过延长曝光时间,使更多光子击中屏幕;而图3(c)、(d)、(e)则采用更长时间的曝光。图1和图2中呈现的条纹状干涉图案,正是大量光子分分秒秒撞击屏幕所形成的结果。

图3也揭示了量子领域的“随机性”或“不确定性”——正如你可能听说过的那样。任何特定光子的精确撞击点都无法预测,只有其在不同位置发生碰撞的概率是可预见的。这种“不确定性原理”本质上是自然界的客观规律,量子理论必须充分考虑这一特性。图3(a)和(b)图直观展现了这种量子随

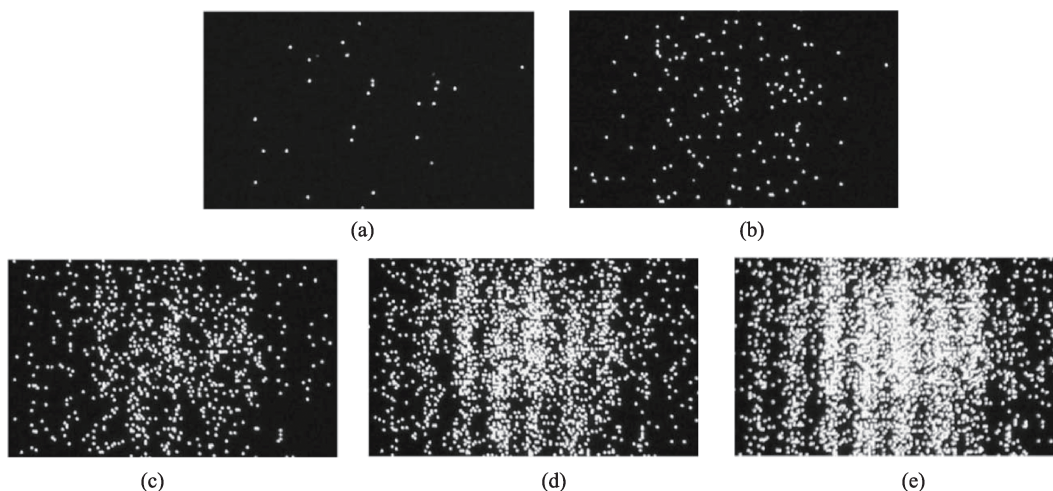


图3 展示了使用极微弱单色光进行双缝实验的预测结果,这将直接证明量子化现象的存在。每个光点对应一个光子,曝光时间从(a)到(e)逐步延长。通过增加曝光时长可以观察到干涉图案的形成过程
注:由于该实验难度极高,至今无人成功完成(图源: Springer Nature)

机性:撞击点看似随机分布在区域各处。而图3(c)、(d)、(e)图中呈现的干涉图案则表明,某些区域发生的概率明显高于其他区域。

但若干涉图样确实是由大量微小光子撞击屏幕形成的,那么我们又面临新的难题:既然光由无数微小的点状光子构成,每个光子只能通过其中一条狭缝。这种情况下,干涉图样如何形成?每个微小光子又是如何“知道”自己必须参与条纹状的干涉图案呢?

四、理解双缝实验

为解答这个关键问题,我们将采用一个略有不同的实验方案。参照图1设计的双缝实验,但这次改用电子流替代光子流进行观测。该实验由克劳斯·琼森于1961年完成,其在显示屏上呈现的干涉图样虽然尺寸更小,但与图2完全一致^[9]!这一发现印证了量子物理学最根本的原理之一:正如光子具有波动性,电子同样展现出波动性特征。

这印证了路易·德布罗意在1924年提出的经典理论。当时还是物理学博士生的他大胆提出:电子本质上是某种场中具有空间延展性的波动,其动量 p 对应的波长等于 h/p 。在那个年代,人们难以想象这个被视作物质微粒的单个电子,如何能同时具备场中波动的特性。但如今,单个电子的“波函数”概念已成为物理学界的常规认知。

正如杨氏在1801年的实验结果未能检测到单个光子的踪迹,琼森1961年的研究同样未发现单个电子的存在。但1989年,丰村明与四位同事通过实验首次实现了波与单个电子之间关联的验证^[10]。他们采用低强度电子束,平均每个毫秒仅传输一个电子,确保电子在装置中逐个移动。实验结果与图3所示光子现象的预期完全吻合:短暂曝光显示双缝图案如何随时间逐渐形成(图4)。

图4(a)和4(b)所示的实验结果看似表明电子是微小的点状物体。但这个结论大错特错。正如我们将要看到的,当电子(或光子)与屏幕相互作用时,就像一个大气球落在密密麻麻钉成的钉床上——

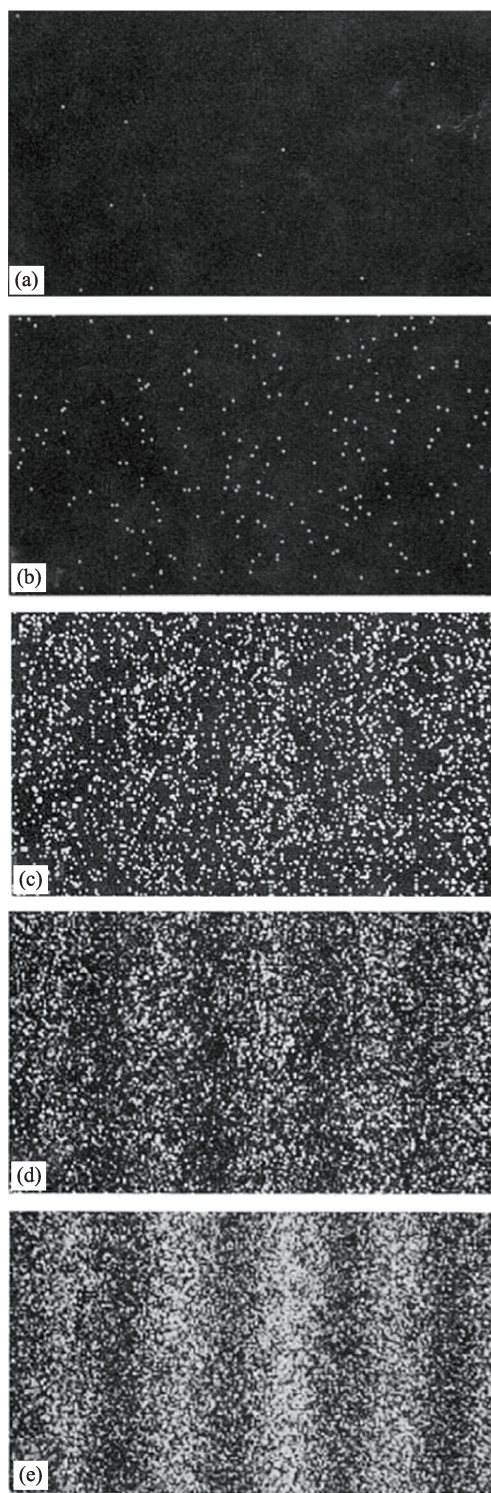


图4 丰村明实验:利用电子构建双缝干涉图案。在极短曝光时间下(图4(a)和4(b)),我们未观察到任何波形特征。延长曝光时间后(图4(c)、4(d)和4(e)),大量单次电子撞击的统计效应显现出波干涉图案。由于实验条件限制,干涉图中的节点(深色线条)并非完全暗淡

(图源:参考文献[1]72-75页, Springer Nature)

气球会在单个钉子处发生剧烈碰撞(甚至爆炸)。而每个电子(或光子)都会像气球一样,瞬间“坍缩”到更小的尺度。

量子理论对图4给出了一个清晰透彻的解释。根据该理论,每个电子都以宏观物体的形式向两个狭缝运动,对称穿过两道狭缝后,在狭缝与屏幕之间的区域产生自干涉,随后与整个屏幕发生“纠缠”(我们稍后将定义这个概念)!这种纠缠态具有“非局域性”特性(下文将详细讨论),使得电子能够将全部能量集中在单个原子或分子这样的微小区域,并在某一瞬间从屏幕的其他部分同时消失。

标准量子理论完美预测了这个实验的结果(如图4所示)^[1]。只要接受两个前提条件——单个电子具有足够大的尺寸可以同时穿过两个狭缝,且具备非定域性使得其能瞬间坍缩——这种现象在直觉上就“合乎逻辑”。在丰村明的实验中,每个电子在通过两个狭缝时,其宽度必须至少达到5毫米——这正是该实验中狭缝之间的间距。

五、量子物体是场中的波

19世纪,历史上最具洞察力的物理学家之一迈克尔·法拉第,预见了一个核心量子概念:场的物理实在性。场及其可能的构型或“状态”不仅是量子物理学的特征,也是经典(前量子)电磁学的特征。法拉第等人用场的概念来阐释电磁现象。在法拉第看来,场就像岩石或桌子一样真实存在。如今,物理学家普遍认为电磁场是真实存在的物理实体。

量子场论将法拉第的场概念扩展到宇宙中的一切。万物皆由场构成;而且,所有这些场都是“量子化”的,这是法拉第所不知道的。这意味着这些场遵循的是量子物理而非经典物理的原理。

与经典电磁波类似,电子或光子这类基本量子粒子本质上只是场中的波动,正如法拉第所言,它们本身就是“纯粹空间”的属性。对于任何物理场景(例如单个电子通过双缝实验,或是绕氢原子核运动的电子),量子物理方程都能预测这些波动。而像原子这类非基础量子实体,则是由量子标准模

型中的基本场构成的复合体。

量子态及其状态之所以具有物理实在性,是因为它们蕴含的能量能够通过做功来重构宇宙。能量——即做功的能力,也就是改变事物的能力——是“真实事物最普遍的属性,甚至比其在时空中的位置更为普遍”^[1]。法拉第曾将经典场构型称为“空间状态”。这种对经典电磁场的理解,完美适用于量子化电磁场中每个光子的状态,并延伸至标准模型中的每个量子。

量子系统的“状态”或“波函数” Ψ 是其量子场能量的一种特定物理配置。由于能量是真实的,量子态也是真实的。

例如,在电子的双缝实验(第三节)中,一个已经通过了双缝但还没有撞击屏幕的电子可以用波函数 Ψ 来表示,这个波函数基于玻恩规则预测了在屏幕上看到的双缝干涉图案中的撞击统计数据。

1926年,奥地利物理学家埃尔温·薛定谔提出了一个著名方程,该方程使物理学家能够预测波函数在任何“非相对论性”情境下的时间演变规律——即在物体运动速度远低于光速的情况下。当时已知氢原子核外单个电子的运动属于非相对论范畴,因此薛定谔运用该方程预测了氢原子内电子可能存在的“状态”。这一预测在1926年具有重大意义,使众多物理学家确信海森堡与薛定谔于1925至1926年间提出的奇异量子理论确实存在某种“正确性”。本文仅阐述薛定谔的主要研究成果(图5)。

薛定谔发现,电子可以围绕原子核在无限多的“束缚态”中的任何一个轨道上运行。这些美丽的模式是电子可以在没有外部干扰的情况下继续运行的无限多的“束缚态”中的一个。

图5中展示了九条这样的轨道。每个示意图都对应着其中一条轨道的波函数 Ψ 分布。如果实验室设备通过实验手段探测到轨道中的电子,较深色区域表示检测概率较高的位置,而白色区域则代表几乎不可能被探测到的位置。第一行对应能量最低的单态,第二行对应能量略高的四个 E_2 态(这四个态具有相同能量),第三、四行则对应能量更高的

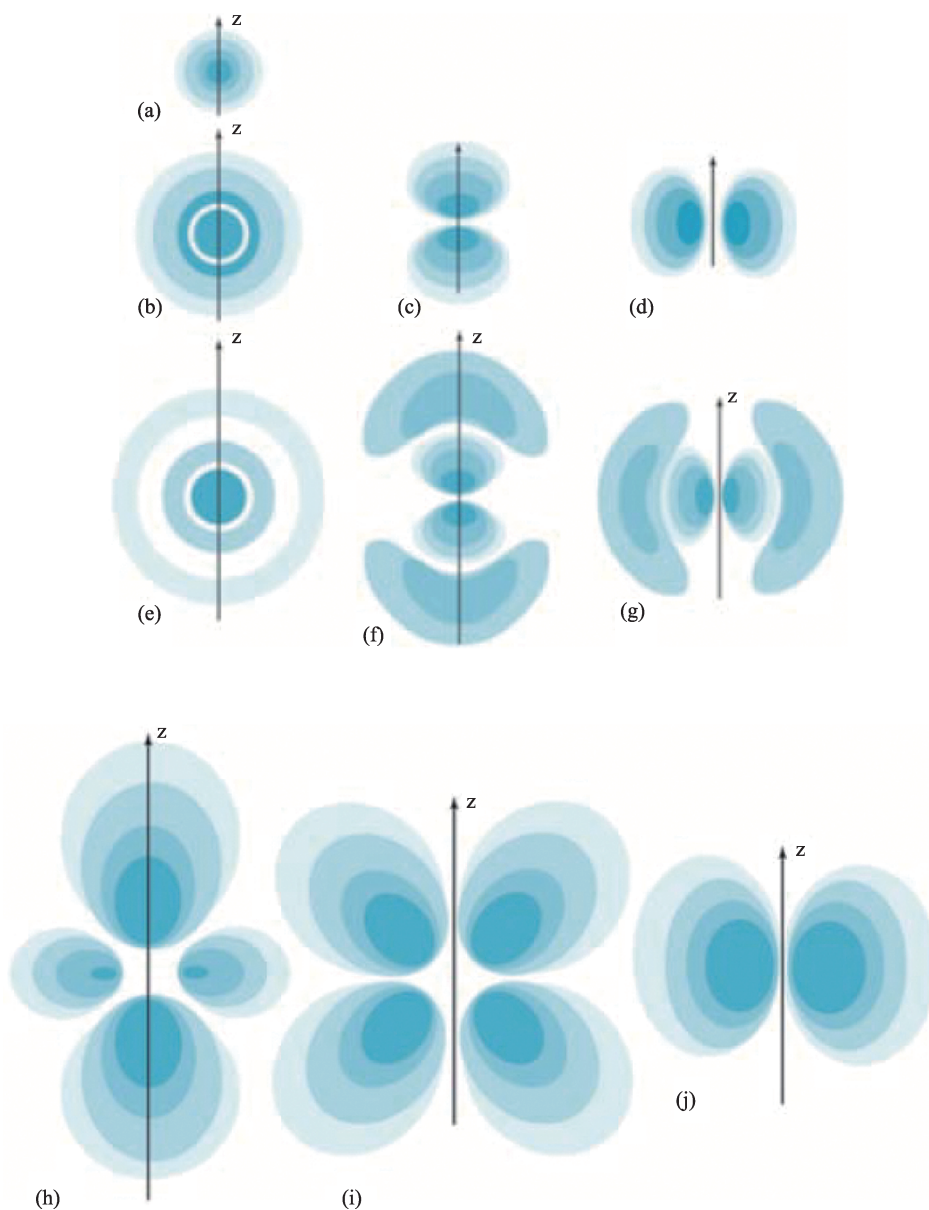


图5 电子的肖像(请参阅文本说明)(图源: Springer Nature)

九个 E_n 态。

具有负能量的轨道是“束缚态”，它们保持在离原子核有限的距离内。具有正能的轨道则会逃逸出原子核。

薛定谔方程允许所有这些从第一原理计算出来。

你可以通过想象图5中9个状态围绕向上箭头所示轴线旋转，来直观理解这些轨道的三维形态。图5(b)是一个实心球体被薄空心球层包裹，电子在此空心球层区域几乎不可能存在；而更外围的空心

球层中，电子存在的概率则较低。图5(c)呈现的是“哑铃”结构，电子几乎不可能出现在这个结构之外。作为练习，请试着想象图5(d)的三维形态？

这些能量图描绘了整个电子的轮廓。它们显示了能量在整个空间扩展的电子中的分布方式。单个电子填满了整个图。电子并不是一个小点——就像物体一样。事实上，量子先驱路易·德布罗意曾说过：“每个电子都填满了整个空间。”

最低能量状态，图5(a)，被称为氢的“基态”。它

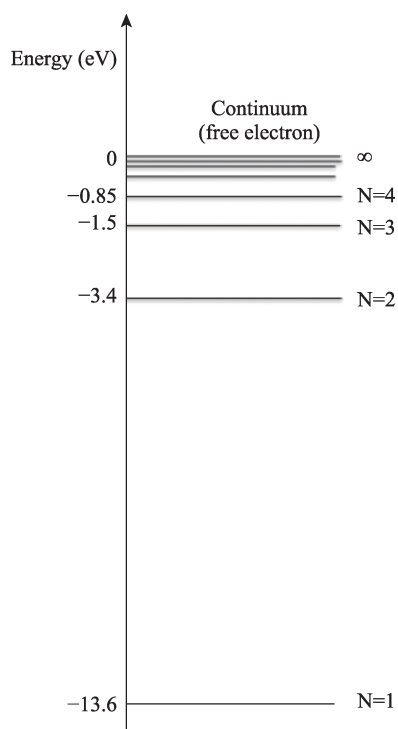


图6 原子氢的能量谱。能量以被称为“电子伏特”(eV)的微观单位测量(图源: Springer Nature)

的平均半径约为0.5埃(0.5×10^{-10} 米)。换句话说,重复检测会“发现”基态电子与中心质子的平均距离为0.5埃。

你不能把宇宙简单地想象成“大部分是空无一物的空间”。宇宙中每个电子和其他物体的量子场,都会延伸(尽管概率极低)到整个宇宙。即使在星系之间的“空旷”区域,这些“束缚态的尾巴”依然存在,并且偶尔(概率很小)可以被探测到。

六、干涉仪实验

2018年,北京清华大学的龙桂鲁团队开展了一项惊人的实验,该实验不仅证明了极大扩展波函数的真实性——这正是量子基础理论争论的核心议题,还揭示了其他重要发现^[12]。要理解龙的实验,我们首先需要了解“光子干涉仪”的工作原理(图7)。

这个装置演示了光的干涉效应。一束光(一束光子流)沿着图7中所示的两条路径穿过装置,并在两个探测器D1和D2处被检测到。每个光子具有相同的波长。图7描绘了一个单光子,它正向右移

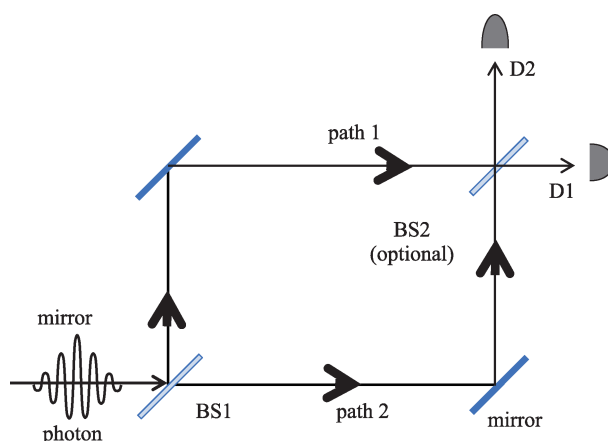


图7 光子干涉仪(详见正文说明)
(图源: Springer Nature)

动并即将进入干涉仪。

假设一束光子穿过实验装置。在图7左下角,这束光子会遇到一个“分束器”BS1——这个薄玻璃板(图中以侧视图呈现)。此时光子面临“选择”:要么从玻璃表面反射(路径1),要么穿透玻璃板(路径2)。当宏观光束通过该装置时,50%的光线(即半数光子)会沿路径1传播,另一半则沿路径2传播。

当你在人行道上经过商店橱窗时,若曾看到镜面上的身影,就亲身体会过光子的反射与传播。由于你看到映照出的身影,部分光子必然从玻璃表面反射回来。同时,店内的顾客也能看见你透过橱窗的身影,因此从你身上反射的光子还需穿过玻璃窗。正如我们将要揭示的,这种双重影像源自“量子叠加”原理。

分束器BS1被设计成这样,如果携带数百万个光子的光束撞击BS1的表面,则在BS1处大约有50%的光子反射,50%的光子透射。

假设实验中没有BS2装置,光子通过干涉仪时是逐个传输的。实验数据显示,每个探测器接收的光子数量大约只有50%。这验证了“量子整体性”原理:光子是一个高度统一的单一实体,无法被分割。在探测器中你永远找不到半光子,要么检测到一个光子,要么完全检测不到。

此外,这些结果是“随机”的。我们不可能预测任何一个特定的光子会出现在D1还是D2。我们

必须为每个结果分配50%的概率。

因此,这个实验展示了量子随机性。而且,实验结果是完全随机的,比抛硬币或轮盘赌等任何其他机会游戏都要随机。这些游戏总是显示出与纯粹随机性存在一些轻微的系统偏差,但这个实验表明,与机会游戏不同,量子随机性是完美的。

现在假设我们运行实验时安装了BS2。在这种情况下,您可能会猜测这会导致一半的光子被发现于D1,而另一半在D2。

这个猜测将是不正确的。

实验数据显示,D1和D2处的测量结果现在对从BS1到BS2的两条路径长度变化极其敏感。实验人员可以通过调整其中一个或两个反射镜的位置(例如上下左右移动)来改变路径长度。即使单条路径的长度变化仅为一个波长的极小部分,到达任一探测器的光子比例仍可能在零到100%之间波动。我们发现这种路径长度依赖性甚至在单光子传输时依然存在!

图8展示了两个探测器的检测结果如何随路径1和路径2之间的长度差异而变化。该距离以光子波长为单位进行测量,而一个波长对应于360度的相位差。例如,如果两条路径长度相同,则在D1探测到光子的概率为100%,而在D2探测到的概率为零。

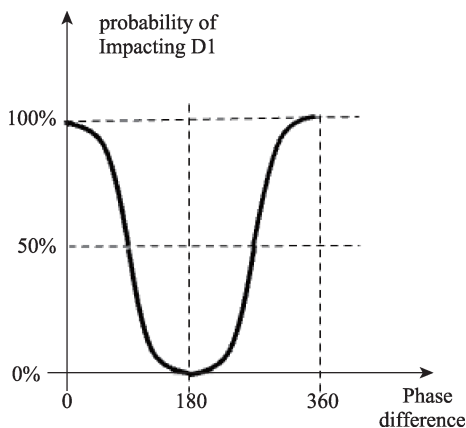


图8 对于图7所示的干涉仪,D1处的检测概率会随着两条路径长度的差异呈现“正弦波”(即波浪形)变化。该路径长度差异以角度为单位进行测量,其中360度代表一个完整波长。因此90度对应四分之一波长,而180度则对应半波长

(图源: Springer Nature)

图8所示行为的解释是,每个光子在通过BS2后即与自身发生干涉。即使光子是一次一个地通过干涉仪,也会发生这种干涉。因此,每个光子必然是同时沿路径1和路径2移动。

光子被认为“处于两条路径的叠加状态”。这就是一个单一的量子物体如何同时存在于两个地方。

七、“延迟选择”干涉实验

部分物理学家提出,若在光子通过BS1后才决定插入BS2,实验结果可能会有所不同。这种情况下,光子在进入BS1前无法“预知”(即无法整合信息)会遇到BS2。此时它可能像粒子(无干涉)而非波(有干涉)那样行为。这种“延迟选择实验”已被实际验证。不出所料,延迟选择并不会产生影响:若在光子到达交叉点前插入BS2,其叠加态的两个部分会混合,从而导致光子自相干涉;若未插入BS2,两部分无法混合,自然不会产生干涉^[13]。

物理学家们仍在就量子物理学的“诠释”这一根本性问题展开争论。令人惊讶的是,许多物理学家质疑波函数是否在真实场中客观存在真实的波动。许多人认为,波函数只存在于物理学家的思维之中。

2018年,北京清华大学的龙桂鲁团队开展了一项延迟选择实验的新版本研究。该实验中,当光子在干涉仪两臂交叉点发生自干涉(即“遭遇自身”)时,BS2信号被插入其中。这一突破性成果展现了实验设计的精妙程度,更关键的是,它证实了空间延展波函数的物理实在性——这正是量子基础理论争论的核心焦点^[12]。

在龙的实验中,每个单光子实验试验都包含五个选项的延迟随机选择:

- (1) 在光子到达交叉点前插入BS2,
- (2) 当光子通过交叉点30%时插入,
- (3) 当光子通过交叉点50%时插入,
- (4) 当光子通过交叉点80%时插入,
- (5) 不插入BS2。

龙的目的是通过证明“微观物体的波函数就是

其真实存在,而非单纯的数学描述”,来阐释量子物理学的“现实解释”。正如波函数分布、以有限速度传播并在被探测时瞬间坍缩那样,量子对象也存在于空间的不连续区域中。

实验中的每个光子都是一个管状脉冲,包含100米长和1微米(百万分之一米)直径的电磁能量(这与实验中使用的光纤厚度相同)。需要注意的是,像光子这样的单个量子物体未必很小。这种物体的长度可达100米。

当光子穿过交叉点时,BS2的插入会将其分割为前部(长度分别为30米、50米或80米)和后部,两者运动方向不同。尽管被“叠加”为两个部分,光子仍保持单一整体的统一性。坍缩现象仅在被探测时才会发生。该实验除了证明光子的非局域整体性外,还证实了量子叠加态中每个子波的真实存在。

图9展示了插入瞬间的单次试验,其中遵循了上述选项(3):

(b)部分展示了(a)所示相遇后不久的两个子波。两个子波的前半部分沿原有路径传播。BS2的插入仅影响后半部分,导致混合并产生干涉。该部分展示了路径1上的相长干涉效应以及路径2上的相消干涉效应。

当量子物理的数学原理应用于龙的实验时,所

有五个选项的实验结果都与之吻合。这证明光子(以及电子、质子、夸克等所有量子粒子)正如其波函数所描述的那样,是真实存在于空间中的实体。没有任何理由怀疑这些物体的真实性。

八、纠缠与非定域性

我们曾论证过,所有量子(光子、电子、质子、原子等)都是由其波函数描述的延展空间场。同时指出,光子、电子、质子、夸克、原子等量子都具有“非局域性”特征——这些过程并非从一点传递到邻近点,而是在瞬间跨越距离完成。原因很简单:所有能量都具有量子特性。例如电磁能可以以一个或多个光子的形式存在,但半个光子并不存在。由于光子本身是延展空间体,因此从零光子到单个光子的跃迁必须瞬间跨越整段距离。

此外,当两个或多个量子系统发生“纠缠”时,它们的组合必然表现出非局域性行为。正如前文所述,这一现象已通过实验得到证实,2022年诺贝尔物理学奖正是授予了三位通过实验验证该现象的物理学家。关于纠缠与非局域性现象的历史渊源,可参考[14-16,1]等文献。

图10提供了对纠缠和非局域性的直观理解。

大量实验已证实非定域性现象。其中最具体

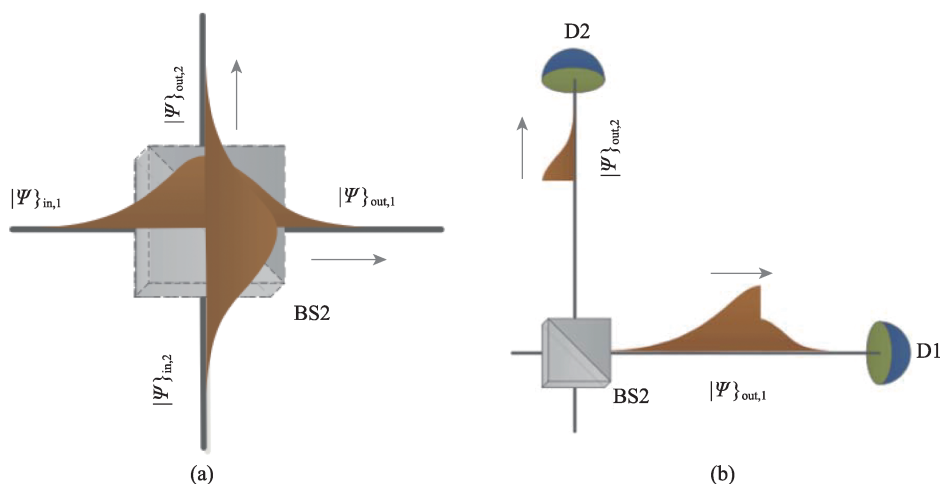


图9 (a) 在类似图7的干涉实验中,当路径1和路径2上的两个“子波”中心到达交叉点时,插入BS2;(b)稍后,两条分支的前半部分已向探测器移动。此时BS2仅影响两条分支的后半部分。上行的后半部分因相消干涉而消失,

下行的后半部分则通过相长干涉得到增强该图引自文献[12](图源: Springer Nature)

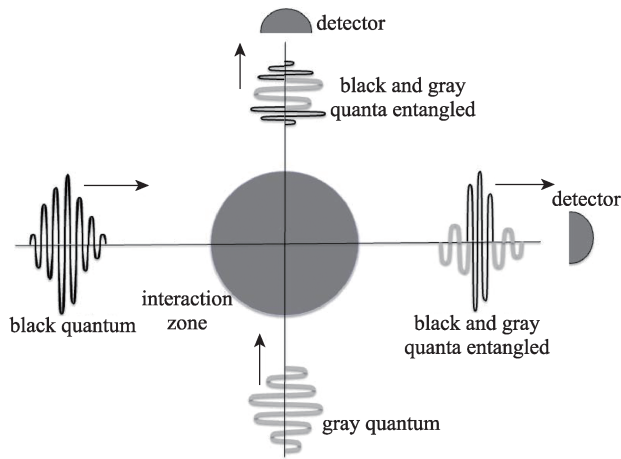


图10 当两个量子相遇、相互作用并分离时,它们可能会永久性地纠缠在一起。该示意图由Herbert 1985提出 (图源: Springer Nature)

代表性的案例是关于光子对运动方向(即动量)产生纠缠的研究^[17,18]。该实验不仅揭示了非定域性原理的运作机制,更为理解“测量问题”(下文详述)打开了新视角。这项研究由两个独立团队分别完成并发表成果,我将其统称为“Rarity-Tapster-Ou(RTO)实验”。

图11展示了系统布局。光源通过一个本文不作详述的物理过程,生成两个纠缠光子“A”和“B”。光子A从光源中射出时处于两条路径的叠加态,如图11所示分别为“A1”和“A2”。路径A1会穿过一个“相位调节器” ϕ_A ,该装置可改变其传播路径长

度。随后,路径A1和A2会通过图7中BS2对应的分束器BS进行混合。最终,这两个子波会被两个探测器分别捕捉到。

类似地,光子B同时处于B1和B2两种状态,并被两个探测器分别捕捉。正如我们将要看到的,这个“双光子”就像一个统一的整体——尽管它的两个部分可能相隔天文尺度的距离。图12展示了一种替代路径布局方案,在该方案中,两个独立光子可以相距甚远。

如果两个光子之间没有量子纠缠,每个光子只会像图7所示的单光子那样仅与自身产生干涉。而量子纠缠则彻底改变了两者的特性。实验结果表明,A1/A2和B1/B2两个探测器现在都记录到完全随机的50-50结果,且不存在相位依赖性(即结果不因光子路径长度的精确差异而改变)。物理学家用“非相干”一词描述这种相位无关的特性。量子纠缠使得单个光子变得“非相干”,这意味着它们都无法与自身产生干涉。

然而,纠缠的双光子AB确实具有自身相干(相位依赖)的状态。当改变 ϕ_A 或 ϕ_B 中的任一参数时,双光子会表现出图13所示的相关性,这表明双光子“知道”两个分离光子之间的相位差 $\phi_B - \phi_A$ 。

纠缠将单个光子的相干性(相位依赖性)转移到

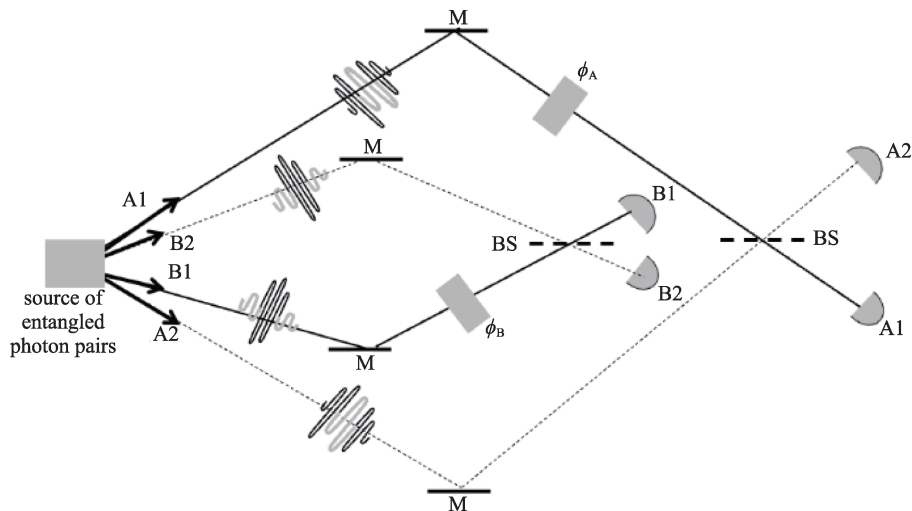


图11 RTO实验的布局。一个光子从光源沿路径A1和A2射出;另一个光子沿B1和B2射出。这两个光子形成一个纠缠的双光子(图源: Springer Nature)

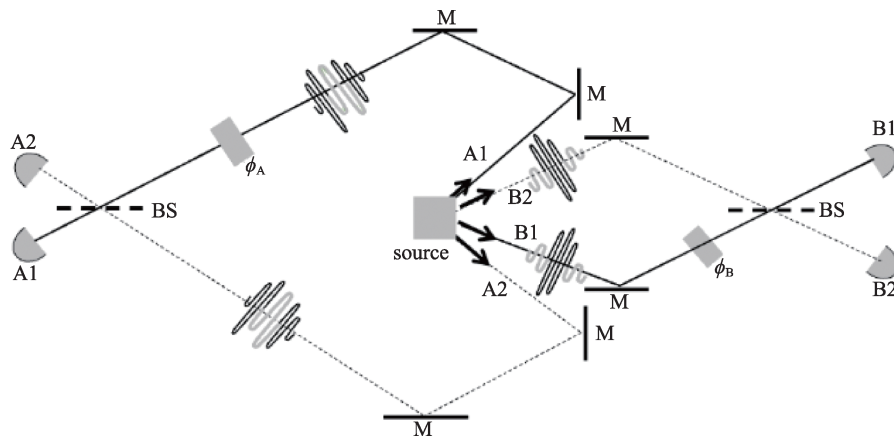


图12 RTO实验,设计用于更广泛分离的探测器(参见图10)(图源: Springer Nature)

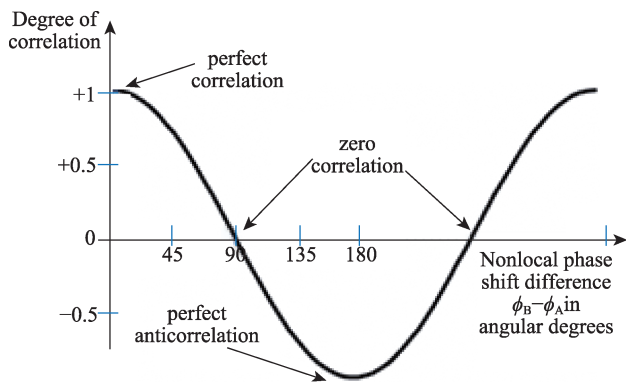


图13 非定域干涉:值得注意的是,RTO的两个纠缠光子之间的相关程度会随着非定域相位差 $\phi_B - \phi_A$ 呈正弦变化 (图源: Springer Nature)

双光子AB上。两个纠缠光子动量之间的关联程度会随着相位差 $\phi_B - \phi_A$ 的变化而变化,这两个光子相距较远。

这让我们得以深入理解量子纠缠如何导致非局域作用。图13给出了相关结果的可视化呈现。需要特别注意的是,该曲线呈现出与图8相似的“正弦波”(波动型)特征。但两者的差异主要体现在以下方面:

图8展示了图7中单光子的“路径选择”概率分布。当光子穿过第一个分束器后,会同时存在于路径1和路径2的叠加态;此时BS2将两条路径混合。图7通过比较两条路径长度的差值,绘制了D1处探测到光子的概率分布曲线。当相位差为零时概率为100%,相位差为90度(即四分之一波长)时概率为50%,而相位差为180度(半波长)时概率归零(即

在D2处被探测)。单光子的量子态会随相位变化而改变——用薛定谔的话说,光子就像被“抹平”在两种状态之间^[19]。

图13呈现出截然不同的景象。它展示了两个光子A和B的纠缠态。与图8类似,图13同样呈现正弦波形,但两条曲线代表的现象却大相径庭。图13直观呈现了A态与B态之间的统计相关性程度:当两光子处于零度角时,相关性达到“完美”状态(即A1与B1或A2与B2完全对应);当角度为90度时,相关性降至“零”水平(50%的实验结果呈现正相关,50%呈现负相关);而当角度为180度时,相关性则达到“完美负相关”状态(即A1与B2或A2与B1完全对应)。值得注意的是,无论相位如何变化,两个光子始终保持着独立的50-50相位分量。虽然两个光子本身没有模糊,但它们之间的相关性却呈现出明显的模糊化特征。

总结来说,图7所示的简单叠加态意味着光子A同时存在于两种状态之间,单个光子的状态在这两种状态间被“模糊化”。而像图11所示的纠缠态则意味着两种状态间的关联性同时存在。这些关联性是模糊化的,但无论相位如何变化,光子的状态始终保持50-50的均分比例,因此单个光子不会被模糊化。

措辞的准确性至关重要。单个叠加光子会同时处于两种量子态(例如“路径1”和“路径2”)。一对纠缠光子则会同时表现出两种关联性(例如“相

同”和“不同”)。

纠缠态的非局域性直观易懂。举个例子,如果控制光子A的爱丽丝和控制光子B的鲍勃事先约定,把两者的光子相位调到完全一致(即两者的相位差为零),那么他们的观测结果就会完美同步。这意味着当爱丽丝的光子出现在A1位置时,鲍勃的光子必定会出现在B1位置。即便两人身处不同星系,鲍勃也能瞬间读取爱丽丝的观测结果!

纠缠双光子是一种高度统一的量子实体,其行为具有非局域性,且不受两部分间距的影响。这种量子纠缠将两个光子转化为一对粒子——虽然每个光子本身呈现非相干态,但它们共同构成了一个单一的相干实体。该实体会以类似单个非纠缠光子自干扰的方式产生自干涉现象。

九、薛定谔的猫:探测问题

在本节中,我们将发现前一节关于非局域性的见解使我们能够解决一个众所周知的长期问题,即“测量问题”或“薛定谔的猫问题”。

1935年,埃尔温·薛定谔写了一篇题为《量子力学的现状》的论文。它阐述了他对波函数等理论概念与实验室检测电子和光子的真实世界之间的关系看法。

薛定谔曾用“涂抹效应”来描述这个“奇特案例”。所谓“涂抹效应”,是指当处于叠加态的量子对象(例如图7中处于路径1和路径2叠加态的光子)在D1和D2处被探测时所经历的变化。如图8所示,这种探测具有不确定性,但D1或D2处的探测概率是可预测的。这些概率由干涉仪的“相位设置”或“路径差”决定。举例来说,若路径差为45度(即完整波长的八分之一),则D1处的探测概率为71%,D2处的概率为29%。这意味着在长达数百次的实验中(例如相位差设为45度时进行100次试验),光子在D1处被探测到的概率约为71%,而在D2处被探测到的概率约为29%。这正是量子不确定性原理的典型例证。薛定谔会说,光子在这两次探测之间被“涂抹”了。

“探测问题”指的是分析此类场景中探测器工作状态的难题。假设D1探测到光子,它必须通过点击声或在纸上记录数字“1”来做出宏观标记。但问题在于,当用量子物理的数学理论分析这个过程时,结果似乎呈现出一种叠加态——宏观探测器同时显示D1和D2的状态。这种现象既未被观测到,也显得荒谬至极。

为了解决这个问题,首先要注意到以下句子描述了这种矛盾的叠加:

光子沿路径1移动,探测器D1被触发,AND
光子沿路径2移动,探测器D2被触发, (1)
其中单词AND表示叠加。

描述(1)似乎处于一种“宏观叠加态”,其中D1和D2都会触发。这显然荒谬,且与实际情况相悖——在真实实验室中,观察者只会看到D1或D2中的一个被触发,而不会同时看到两个。问题出在哪里?

薛定谔用著名的“薛定谔的猫”案例阐释了这个悖论。他设想一只被关在密闭房间里的猫,与放射性物质和辐射探测器共同存在。这种放射性物质被特意设计成在一小时内至少发生一次衰变的概率为50%的量子态。当探测器触发时,会激活锤子打破毒气瓶,导致猫死亡。他写道:“从整个系统的波函数来看,这相当于活猫与死猫的叠加态。”他指出:“放射性物质的微观不确定性已转化为可通过直接观测解决的宏观不确定性。这种观测使我们无法简单地将模糊模型视为现实世界的镜像。”^[9]这里所说的“模糊模型”,指的是像图7和图8中光子那样处于叠加态的物体。

综上所述,薛定谔声称,他想象中的猫实验表明,量子“涂抹”(即叠加态)可能导致一只猫同时处于生与死的叠加态,但这很荒谬。

我们将运用第八节的见解来证明薛定谔是错误的。这是因为,正如我们将要展示的,纠缠态并不能描述一个模糊(即叠加)的探测器。

让我们回到图7所示的干涉仪实验。当光子穿过干涉仪(但在被探测之前),光子处于以下形式的简单叠加态:

光子沿路径 1

AND 沿路径 2 传播。 (2)

这描述了单个微观物体——一个光子——的叠加态。这种微观物体的简单叠加在量子物理中很常见。(2)确实描述了一个“模糊”的光子。

检测态(1)并非属于此类情况,而是一种纠缠态。该态描述了两种关联的叠加:第一种关联是“光子被检测到水平路径”与“探测器在 D1 处记录”之间的关系;第二种关联则是“光子被检测到垂直路径”与“探测器在 D2 处记录”之间的关联。这与图 11 中两个纠缠光子的描述形成对比:

光子 A 在 A1 处记录

以及光子 B 在 B1 处被记录

AND 光子 A 在 A2 处记录

以及光子 B 在 B1 处被记录

AND 光子 A 在 A2 处注册

以及光子 B 在 B2 处被记录 (3)

其中 AND 表示叠加态。这并非像前文陈述(2)那样的简单叠加,而是类似于前文陈述(1)的纠缠态。与陈述(2)描述的单个量子系统同时呈现两种状态不同,陈述(3)所述的纠缠态则描述了两个量子系统同时表现出两种关联性。

回顾前一章,当两个光子处于纠缠态时,它们都不会携带相位。用薛定谔的话来说,这两个光子都不会被“模糊化”。这解决了量子检测的难题。薛定谔对量子检测的批评在于,那些“子系统”(可能包括一只猫)会被“模糊化”。但我们已经看到,检测态本身是纠缠态,这意味着子系统并非被“模糊化”,而是彼此独立且不受相位影响。

因此,对纠缠的正确理解导致了量子物理学中最古老和最深刻的问题之一的解决方案,即探测(或“测量”)问题。

参考文献

- [1] A. Hobson, *Fields and their quanta: Making sense of quantum Foundations*. Springer Nature Switzerland, 2024.
- [2] M. Giustina, Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons, *Phys. Rev. Letts.* 115, 250402, 2015.

- [3] B. Hensen, Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers, *Nature* 526, 682-686, 2015.
- [4] L. Shalm, Strong loophole-free test of local realism, *Phys. Rev. Letts.* 115, 250402, 2015.
- [5] A. Hobson, There are no particles, there are only fields, *Am. J. Phys.* 81, 211-224, 2013.
- [6] S. Weinberg, *Dreams of a final theory: The search for the fundamental laws of nature*. Random House, Inc., New York, 1992.
- [7] R. Mills, *Space, time, and quanta: An introduction to modern physics*. W. H. Freeman, New York, 1994.
- [8] F. Wilczek, Mass without mass, *Physics Today* 52 (November) 11-13, 1999.
- [9] C. Jonsson, Elektronen interferenzen an mehreren kunstlich hergestellten feinspalten, *Zeitschrift fur Physik* 161, 454-474, 1961; translated version: Electron diffraction at multiple slits, *American Journal of Physics* 42, 4-11 (1974)
- [10] A. Tonamura, et al. 1989. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, *Am. J. Phys.* 57, 117-120.
- [11] M. Bunge, *Dictionary of philosophy*, 2nd edition. Prometheus Books, 1999.
- [12] G. Long, W. Qin, Z. Yang, and J. Li, Realistic interpretation of quantum mechanics and encounter-delayed-choice experiment, *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy* 61, 03031, 2018.
- [13] Jacques, V., Wu, E., Grosshans, F., Treusart, F., Grangier, P., Aspect, A., and Roch, J-F, 2007. Experimental realization of Wheeler's delayed choice gedanken experiment, *Science* 315, 966-968.
- [14] L. Gilder, *The age of entanglement: When quantum physics was reborn*. Alfred A. Knopf, 2008.
- [15] M. Kumar, *Quantum: Einstein, Bohr, and the great debate about the nature of reality*. W. W. Norton, 2008.
- [16] Bacciagaluppi, G. and Valentini, A. 2009. *Quantum Theory at the Crossroad*. Cambridge University Press.
- [17] J. Rarity, P. Tapster, Experimental violation of Bell's inequality based on phase and momentum, *Physical Review Letters* 64, 2495-2498, 1990.
- [18] Z. Y. Ou, L. Mandel, Violation of Bell's Inequality and Classical Probability in a Two-Photon Correlation Experiment, *Physical Review Letters* 61, 50-53, 1990.
- [19] E. Schrodinger, Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik *Naturwissenschaften* 23, 807-812, 1935. Translated into English as *The present situation in quantum mechanics: A translation of Schrodinger's 'cat paradox' paper*, by Trimmer, J., *Proc. Am Phil. Soc.* 124, 323-338 (1937).