

如何解释电子的“波粒二象性”

程 芬

(华中师范大学物理学院 2006 级基地班, 武汉 430079)

摘要:“波粒二象性”是所有物质所具有的性质,但是为什么物质具有这种性质并不被人了解,特别是在微观领域。本文简单回顾了“波粒二象性”提出的背景,阐述了量子力学建立以来,物理学家提出的“波粒二象性”的几种解释

关键词:波粒二象性、薛定谔猫、EPR 佯谬、隐变量

一、光是波还是粒子

近300年来,关于光是波还是粒子,争论一直存在。可以说光是粒子还是波的争论几乎贯穿于整个现代物理的发展过程中。

在量子力学建立的之前,物理学家们对光的本质有自己的见解。荷兰物理学家惠更斯主张波动说,认为光是一种在以太里传播的纵波,并引入了“波前”的概念,成功地证明和推导了光的反射和折射定律,而牛顿主张粒子说。在这之后,托马斯·杨的双缝干涉实验验证光是一种波。赫兹的实验证实了电磁波的存在,也证实了光其实是电磁波的一种,两者具有共同的波的特性。爱因斯坦提出光的量子假说解释光电效应。1924年德布罗意提出正如光具有波粒二象性一样,实物粒子也具有波粒二象性。他将这个波长 λ 和动量 p 联系为: $\lambda = h / p$ 。1925年戴维逊和革末在做一个有关电子的实验电子是发现电子表现出如X射线般的纯粹波动性质来,电子,无疑地是一种波。

二、电子不能同时表现出波动性和粒子性

但是物质并不能同时表现波动性和粒子性,以电子为例,电子是有选择性表现。我们让电子一个一个通过双缝,电子开始表现出粒子性,打在屏幕上呈现一个点,但是打在哪一点是不确定的。当有很多个电子通过双缝后,电子的分布呈现出波动的性质,满足波函数 Ψ 所要求的概率,产生了干涉图样。这里有几个问题未解决,一个是我们并不能观测到电子穿过是哪一个缝,为什么当电子碰到感应屏的瞬间,表现出的是粒子性。这就归结为一个问题,为什么电子有是表现出的是波动性,有时表现的是粒子性。当我们描述粒子时,只能说在空间某一点发现粒子的几率是多大,而不能说在空间某一点发现了粒子。用波函数 $\Psi(r, t)$ 来表示几率密度. 在数学上状态用希尔伯特空间的矢量描写, 而几率密度就是这个矢量与其共轭空间的对应矢量的内积。

3.哥本哈根派的解释

哥本哈根派里包括玻尔,海森堡,泡利等量子力学的奠基人,他们认为:任何时候观察电子,电子只表现出一种属性,要么是粒子要么是波,不能同时观测到波和粒子的混合态。而且电子本来是波还是粒子并不重要,重要的是我们每次观测它所表现出来的性质。如果采用光电效应的观察方式,那么它是个粒子,要是用双缝来观察,那么它是个波。量子理论的含义是和观测相联系的。观测能够即时地根本改变被观测的体系。只有联系整个实验环境,粒子的属性才有意义,因为这个环境对确定粒子的 Ψ 场起作用。玻尔曾说:“这一关键问题就在于,不能明确地区分原子客体的行动及其和测量仪器之间的相互作用,该仪器是用来确定现象发生时的条件的。事实上,典型量子效应的个体性,确切地表现在这样一种情况中:任何将现象加以细分的企图都将要求一种实验装置的改变,这种改变将引入在客体和测量仪器之间发生原则上不可控制的相互作用的新可能性,其结果是,在不同实验条件下得到的证据,并不能在单独一个绘景中加以概括。”在我们观测电子以前,它实际上处在一种叠加态,所有关于位置的可能性叠合在一起,弥漫到整个空间中去。

但是，当我们真的去观测它的时候，电子便无法保持它这样的状态了，它从无限种可能中选择了一种，以确定的位置出现。波函数的这种变化，被称为“坍缩”。

“哥本哈根派”的观点主要是基于三大原理：即互补原理，测不准原理以及不相容原理。互补原理是玻尔提出把粒子图象和波动图象看作是同一个是在的两个互补的描述，这两个描述中的任何一个都只是部分正确的，使用粒子概念以及波动概念都必须有所限制，法则就不能避免矛盾。测不准原理是海森堡提出的，粒子的位置和动量不能同时被测量，满足公式 $\Delta p \times \Delta q > h/2$ 以及后来推导的公式 $\Delta E \times \Delta t > h/2\pi$ 。泡利的不相容原理是指在一个原子中不可能有电子层、电子亚层、电子云伸展方向和自旋方向完全相同的两个电子。如氢原子的两个电子，都在地一层（K 层），电子云形状是球形对称、只有一种完全相同伸展的方向，自旋方向必然相反。每一轨道中只能容纳自旋相反的两个电子，每个电子层中可能容纳轨道数是 n^2 ，每层最多容纳电子数是 $2n^2$ 。

当我们以“哥本哈根派”的学说为依据去解释一些事情的时候却发现很多奇怪的推论。

按照哥本哈根解释，不观测的时候，根本没有实在性！自然也就没有实在的电子。这是不能理解的。1935 年薛定谔把量子理论应用到宏观世界，具体而言，是把在描述微观世界方面已经取得了极大成功的量子力学的叠加原则，扩展到传统上用经典物理学描述的宏观系统，提出了著名的“薛定谔猫佯谬”，薛定谔猫佯谬”思想实验是这样的：一只猫被关在一个密闭的钢盒中，盒中的装置可以致猫于死地，原因是这个装置中的辐射原子会发生衰变，通过一组仪器会让一个装有毒气的小瓶破碎，从而毒死这只猫。当然，这样的事情也可能不会发生，因为辐射原子也可能不发生衰变。这完全是因为微观量子受量子统计规律的支配。如果整个过程持续一小时，那么在这段时间，由于辐射原子既可能发生衰变也可能不发生衰变，因而这只猫既是死的又是活的，即猫处于了一种死活叠加的奇怪状态。只有当人打开盒子往里看时，猫的死活才变得真实。这是根据“哥本哈根派”的解释推导出的结果。显然，这里已经把“主观者的参与”带入了猫的生死决断过程中，从而使得猫的死活不再是一种独立于观察者主体的客观实在，而是依赖于观察者的测量。这是难以被接受和解释的。我们再加以推广就可以知道，按照哥本哈根派的解释，人的意识将决定这个世界上的状态。可以用“薛定谔猫”来解释，当人没有打开箱子时，即人没有一定的意识时，猫是处在叠加态，但是人打开箱子后，猫的状态就只有一种。这显然是与现实生活不符的。

“哥本哈根派”的学说在历史上饱受争议，“哥本哈根派”学说的反对者包括爱因斯坦，德布罗意。爱因斯坦由此提出了EPR佯谬。

四、其他的解释

1.多宇宙论

休·埃弗莱特认为波函数从未坍缩，而只是世界和观测者本身进入了叠加状态。当电子穿过双缝后，整个世界，包括我们本身成为了两个独立的叠加，在每一个世界里，电子以一种可能出现。即当电子穿过双缝后，处于叠加态的不仅仅是电子，还包括整个世界！也就是出现了两个叠加的世界，其中一个世界里电子穿过了左缝，而另一个世界里电子则通过了右边！但是人们将他的理论理解成世界的裂变。后来他的理论被称为多宇宙论。这个理论关键在于：虽然宇宙只有一个波函数，但这个极为复杂的波函数却包含了许许多多互不干涉的“子世界”。宇宙的整体态矢量实际上是许许多多子矢量的叠加和，每一个子矢量都是在某个“子世界”中的投影，代表了薛定谔方程一个可能的解，但这些“子世界”却都是互相垂直正交，彼此不能干涉的！。根据休·埃弗莱特的多宇宙理论，薛定谔猫存在两个宇宙中，一个有活猫，一个有死猫。对于那个活猫的宇宙，猫是一直活着的，不存在死活叠加的问题。对于死猫的宇宙，猫在分裂的那一刻就实实在在地死了，不要等人们打开箱子才“坍缩”。所以一个人

吃牛排还是鱼的行为，影响的不仅仅是我自己的波函数，它还导致整个宇宙的“分裂”。可以推论从宇宙诞生以来，已经进行过无数次这样的分裂，它的数量以几何级数增长，很快趋于无穷。我们现在处于的这个宇宙只不过是其中的一个，这无疑是不能被很多人理解。

休·埃弗莱特建立理论时采用的方法，催生出量子退相干的概念——对于量子力学奇异随机性如何融入日常感受到‘真实’世界，量子退相干给出了一个现代理论解释。

2.玻姆的隐变量理论

玻姆坚信：就物理学应该对实在作出客观且完备的描述而言，在量子理论中缺少了某种基本的东西。玻姆对量子理论的决定论扩展能否被发现变得极有兴趣了。不久，玻姆想到了经典的哈密顿-雅可比理论，这种理论在基本的方面把波与粒子联系起来。实际上，长期以来人们都知道，当人们取某种近似值即用WKB方法时，薛定谔方程就等于经典的哈密顿-雅可比方程。如果不取这种近似值，这一等式的论证过程存在另一种表示新的力的势，它对粒子产生作用。这种势叫做量子势，这直接产生了“量子理论因果解释”。这种“量子势因果解释”在当时被玻姆称为“隐变量解释”或“隐变量理论”。在他的描述中，电子或者光子始终是一个实实在在的粒子，不论我们是否观察它，它都具有确定的位置和动量。但是，一个电子除了具有通常的一些性质，比如电磁势之外，还具有所谓的“量子势”。这其实就是一种类似波动的东西，它按照薛定谔方程发展，在电子的周围扩散开去。但是，量子势所产生的效应和它的强度无关，而只和它的形状有关，这使它可以一直延伸到宇宙的尽头，而不发生衰减。在玻姆理论里，我们必须把电子想象成这样一种东西：它本质上是一个经典的粒子，但以它为中心发散出一种势场，这种势弥漫在整个宇宙中，使它每时每刻都了解周围的环境。当一个电子向一个双缝进发时，它的量子势会在它到达之前便感应到双缝的存在，从而指导它按照标准的干涉模式行动。如果我们试图关闭一条狭缝，无处不在的量子势便会感应到这一变化，从而引导电子改变它的行为模式。特别地，如果你试图去测量一个电子的具体位置的话，你的测量仪器将首先与它的量子势发生作用，这将使电子本身发生微妙的变化，这种变化是不可预测的，因为主宰它们的是一些“隐变量”，你无法直接探测到它们。他假设一个电子具有确定的轨迹，却又规定因为隐变量的扰动关系，我们绝对观察不到这样的轨迹！这无疑违反了奥卡姆剃刀原则：存在却绝对观测不到，这和不存在又有何分别呢。这种理论违反了定域性。定域性指的是，在某段时间里，所有的因果关系都必须维持在一个特定的区域内，而不能超越时空来瞬间地作用和传播。简单来说，就是指不能有超距作用的因果关系，任何信息都必须以光速这个上限而发送，这也就是相对论的精神！但是在玻姆那里，他的量子势可以瞬间把它的触角伸到宇宙的尽头，一旦在某地发生什么，其信息立刻便传达到每一个电子。

3.贝尔不等式

爱因斯坦等认为，如果一个物理理论对物理实在的描述是完备的，那么物理实在的每个要素都必须在其中有它的对应量，即完备性判据。当我们不对体系进行任何干扰，却能确定地预言某个物理量的值时，必定存在着一个物理实在的要素对应于这个物理量，即实在性判据。爱因斯坦认为，量子力学不满足于这些判据，所以是不完备的。在爱因斯坦与玻尔争论中，爱因斯坦提出了EPR佯谬。用假象实验来表示：一个母粒子分裂成向相反方向飞开去的两个小粒子A和B，它们理论上具有相反的自旋方向，根据“哥本哈根派”的解释，在没有观察之前，它们的自旋是处在不确定的叠加态中的，而爱因斯坦则坚持，从分离的那一刻起，A和B的状态就都是确定了的。当两人同时对A和B的自旋在同一个方向上作出测量，因为要保持总体上的守恒，这两个自旋必定相反，不论在哪个方向上都是如此。所以不管之前的状态确不确定，A和B的相关性为1。在此基础上，贝尔提出不等式 $|P_{xz}-P_{zy}|\leq 1+P_{xy}$ ， P_{xy} 代表了A粒子在x方向上为+，而同时B粒子在y方向上亦为+这两个事件的相关性。在隐变量理论中，无论观察与否，两个粒子始终存在于客观现实之内，它

们的状态从分裂的一霎那起就都是确定无疑的。

如果世界是经典的，那么在EPR中贝尔不等式就必须得到满足，反之则可以突破。

以后的实验却表明贝尔不等式是可以被实现的，验证了量子理论的正确性。爱因斯坦是错的

4. 哈特爾和蓋爾的理論

他們認為世界只有一個，但歷史有很多個。電子“通過左縫”和“通過右縫”這兩種歷史不是獨立自主的，而是互相糾纏在一起，它們之間有干涉項。當我們計算“電子通過左縫或者通過右縫”這樣一種情況的時候，我們得到的並非一個傳統的機率，干脆地說，這樣一個“聯合歷史”是沒有機率的！這也就是為什麼在雙縫實驗中，我們不能說“電子要么通過左縫，要么通過右縫”的原因，它必定同時通過了雙縫，因為這兩種歷史是“相干”的！在量子力學中，我們具體可以採用所謂的“路徑積分”的辦法，構造出一個“退相干函數”來計算所有的這些歷史。路徑積分是一種對於整個時間和空間求和的辦法，當粒子從A地運動到B地，我們把它的軌跡表達為所有可能的空間和所有可能的時間的疊加！我們只關心它的初始狀態和最終狀態，而忽略它的中間狀態，對於這些我們不關心的狀態，我們就把它在每一種可能的路徑上遍歷求和，精妙的是，最後這些路徑往往會自相抵消掉。除了實際觀測的那一刻，每一個時刻——不管過去還是未來——所有粒子的狀態也都被加遍了。在所有這些計算都完成了之後，在每一個方向上的干涉也就幾乎相等了，它們將從結果中被抵消掉。最後，“我們觀測到電子在左”和“我們觀測到電子在右”兩個粗粒歷史退相干了，它們之間不再互相聯繫，而我們只能感覺到其中的某一種！

5. 超弦理論

超弦是指出任何粒子其實都不是傳統意義上的點，而是開放或者閉合(頭尾相接而成環)的弦。當它們以不同的方式振動時，就分別對應於自然界中的不同粒子(電子、光子……包括引力子！)。我們生活在一個10維的空間里，但是有6個維度是緊緊蜷縮起來的，所以我們平時覺察不到它。在超弦的圖像里，有6個維度出於某種原因收縮得非常緊，以致粗看上去宇宙僅僅是4維的(3維空間加1維時間)。但如果把時空放大到所謂“普朗克空間”的尺度上我們會發現，原本當作是時空中一個“點”的東西，其實竟然是一個6維的“小球”！這6個卷曲的維度不停地擾動，從而造成了全部的量子不確定性！威頓後來發展了這一理論。

五、總結

從量子力學建立至今，我們依舊不能理解微观粒子表現波動性或者粒子性的真正原因，物理學家提出了種種假設。但是，正是因為物理學家們提出的各種假設，促進了量子力學的發展。

參考文獻

- [1] castor_v_pollux量子史話.<http://book.sina.com.cn/nzt/liangzishihua/>
- [2]李梧齡. 量子力學概論. 同濟大學出版社.1990年10月
- [3]劉漢臣,唐遠河. 波粒二象性對物理概念方法論發展的影響[J]. 西北紡織工業學院學報,1999,13(3),P285-289
- [4]烏雲高娃. 量子力學發展綜述[M]. 信息技術,2006 (6) ,P154-157
- [5]黃小益,謝寧魯. 近代物理學與經典物理學[J]. 湖南學院學報,2007, 28 (2) P43-45
- [6]翁建平. 量子力學與經典力學的一致性及其之間的過渡條件[J]. 麗水師範專科學校學報,2004, 26(6) ,P27-30
- [7] 楊本洛. 量子力學中的基本矛盾及其哲學本原[J]. 世界科學,2003(10),P40-43

- [8] 李宏芳. “薛定谔猫佯谬”的哲学研究[J]. 科学技术与辩证法, 2005, 22(2), P35-39
- [9] 张桂权. 玻姆的隐变量因果解释[J]. 自然辩证法研究, 1988, 14(8), P12-17