

经典概率与量子概率*

[关键词] 经典概率 量子概率 可 视 度 [中图分类号] O4 O3

赵国求

(武 钢 基 础 物 理 研 究 所 , 研 究 员 武 汉 430080)

一、概率的几种解释^{[1][2]}

1. 置信度解释 概率的置信度解释又叫信念度解释或主观解释。代表人物是拉姆赛、德·芬内蒂和萨维奇(萨维奇称其为私人主义解释)。所谓置信度,是指特定个体对待特定命题真实性相信的程度。也就是说概率是对个人信念合理性的量度。概率的置信度解释表明,事件本身并没有什么概率,事件之所以被指派有概率只是指派概率的人头脑中所具有的信念证据。一方面,不同的人对同一事件的置信度不相同,因此,置信度是相对的;另一方面置信度又随个人的认识程度和所具有的知识状态的改变而改变,因此,置信度又具有可变性。置信度的可变性和相对性是概率主观解释的核心。

为加深对概率主观解释的理解,可以举例说明。赌博即是常见的事例。某人参赌,赌注到底下哪一边、下多少,是成功还是失败,只是下赌注者信念上的事。这种成功与失败,其概率是出于主观上的估计,是个人对可几事件的置信度。这也是人们把这种概率叫主观概率的重要原因。主观概率要求每一个有合理信念的人不能自相矛盾,信念自始至终首尾一贯。这种作为信念合理性量度的主观概率尽管是观念性的,但仍然遵守概率演算公理,并符合经典统计力学的因果关系。

2. 逻辑解释(确认度解释) 对概率的解释,除主观解释之外,还有以鲁道夫·卡尔纳普为代表的逻辑解释。逻辑解释通过对可几事件确认度(确证度)的量度得到定义。确认度则是对可几事件的一种逻辑推理,也就是将归纳逻辑看作任意命题 H (假说)与证据 E 之间所具有的逻辑关系,即 E 对 H 的归纳支持程度。这样概率 P(H/E) (读作 H 对 E 的概率)的值,至少在原则上可以单值地定义。

以气象预报为例。气象预报之前要收集气象资料(气象数据),然后,对气象资料进行分析。通过逻辑推理,推断明天“晴”或者“雨”这一随机事件出现的概率。这里,所收集的资料(气象数据),并不一定与预测的随机事件“晴或雨”发生直接的联系,但逻辑上有关系,因此,可在一定程度上作为可几事件出现的支持证据。例如通过对气象数据的逻辑分析,得出明天下雨的概率是 80%。但这时必须注意,这个 80% 要下雨只是逻辑推理的结果。因为:(1)还没有到明天,不是事实,(2)也不能理解为实际发生事件的一个相对频率,(3)更不意味着是可确认的,

80% 的几率还不一定与事实相符,无论是否下雨,它只是一个确认度而已。

看来,概率的逻辑解释中,概率既不是事实的,也不是可证实的;概率陈述和经验结果之间并不存在任何直接的必然联系^[2]。它是通过资料之间的逻辑关系,对可几事件的一种预测。可几事件的概率本身是观念性的,但可几事件的出现则受因果关系制约。

3. 频率解释 概率的频率解释又称频度解释或客观解释(真实度解释),是指一类特定事件 E 中,某一事件 H 出现的相对频率。精确定义是:被指派概率的数值 P,是一重复事件 H 的一个无穷系列 E 在长趋势中所表现的相对频率的极限值。其数学表达式是:

$$P(H/E)=\lim_{n\rightarrow\infty}\frac{m}{n} \tag{1}$$

其中: $0\leq m\leq n, 0\leq P\leq 1$, m 是 H 产生的次数, n 是 E 的总次数, m、n 都是整数,在频率解释中,概率是整数与整数比的极限。

必须注意,这里事件的“类”是形成概率的条件。“类”的选择不同,概率的值也就不同^[3]。概率的频率解释无须假定“随机事件的无差异原理”,而是根据事件出现的客观状态,通过相对频率的极限,计算随机事件出现的概率。所以,又称频率概率为客观概率。概率的频率解释也有其不足之处,就是当相对频率的极限不存在时,概率就无法定义。同时频率解释也不适用于单个事件或假说。

概率的频率解释中相对频率与概率的关系可从下例得到说明。投硬币,当 $n\rightarrow\infty$ 时,正面朝上的概率为 50%,但当 n 不是无穷大时,正面朝上的相对频率却是可变的。表 1 中是 A、B、C 3 人投硬币的实验数据。根据相对频率的计算公式(2)可计算相对频率。(见表 1)

$$f=\frac{m}{n} \tag{2}$$

表 1 相对频率实验数据

实验者	实验总次数(n)	正面朝上次数(m)	相对频率(f _i)
A	4 040	2 048	0.5469
B	12 000	6 019	0.5016
C	24 000	12 012	0.5005

从表 1 不难看出,相对频率的数值并不正好等于 0.5,而是随着实验次数的增加,相对频率逐渐逼近极限值 0.5。这个 0.5,就是当 $n\rightarrow\infty$ 时,投硬币正面朝上的概率。

概率的频率解释有缺点,也有优点。优点在于强调概率的客观性,将概率与科学实验相联系,断

* 2000 年国家社会科学基金资助项目,编号:00BZX015

定客观世界有统计规律存在。但是我们仍然必须注意, 客观概率也只是一种大数统计的规律性, 它是一种知识, 对单个事件不能定义。对单个事件, 只能定义相对频率, 而不能定义概率。而概率的“可观测解释”, 却可以综合包容上述两方面的内涵, 扬长而避短。对此, 我们将在本文第四部分详细论述。

二、经典概率的特征

1. 概率的知识性和单次随机事件的因果性

我们把概率的主观解释、概率的逻辑解释、概率的频率解释统称为语义解释。3种语义解释共享同一种句法, 即经典的帕斯卡概率公理。因此, 满足帕斯卡公理的概率被称为经典概率。经典概率的重要特征之一, 是概率的知识性和单次随机事件的因果性。概率表示一种数学知识, 代表一类事物出现的统计规律, 并且单次事件的出现受经典力学控制。概率的主观解释中, 如赌徒下赌注, 完全凭的是主观判断。当然, 他可能有他的依据, 比如, 他依据“无差异原理”和“庄家手的摇动姿势”等等。这是置信度形成的过程。但他的信念程度与骰子出现的点数没有必然的内在联系。因此, 赌徒估计的概率, 是他的一种信念程度, 是主观的而不是客观的。只有当庄家揭盖子的时候, 主观的概率才向客观的现实转化, 要么“真”, 要么“假”。这里的真假转化是不受主观制约的, 只受客观条件制约。这种随机事件的发生符合经典力学的因果关系。当然主观可能与客观相符, 也可能不符。相符, 概率是1; 不符, 概率是0。一般地说, 主观概率是(0-1)之间的一个百分比, 而现实只有“真(1)”或“假(0)”这两种情况。我们把这叫主观概率向客观现实的(0-1)突变。

概率的逻辑解释也有类似的情形。天气预报中, 气象数据与预报的结果之间是一种逻辑推理关系。说明天60%要下雨, 那也是一种预计, 是对各种气象资料综合分析得出的结论。这是概率的形成过程。它与明天是否下雨没有必然的内在联系。然而, 真的到了明天, 天气不管是“晴”还是“雨”, “天晴”则下雨的概率变为0, “下雨”, 则下雨的概率变为1。真实的明天, 下雨的概率还是在(0-1)之间突变的。天气预报“明天60%要下雨”, 仍然是一种对天气了解的相应知识, 它也存在一个主观向客观转化的过程; 而且这种转化只受气候因素制约, 而与人的主观判断无关。

概率的频率解释也不例外。虽然由频率解释得到的概率叫客观概率, 但这只是针对概率的形成而言的。客观概率是对大数统计规律性的量度, 概率本身仍然是一种数学知识。定义式(1)中的 $n \rightarrow \infty$, 表明随机事件出现的概率是伴随一个大数统计过程的, 即从具体到抽象的过程。因此, 概率的形成求取过程, 实际就是从单个物理实在向观念或知识上升的过程。掷硬币, 正反面出现的概率各为50%, 也正是表明了这种大数统计的规律是一种知识。

通常我们比较注意概率形成求取的过程, 而不大注意其反过程。所谓反过程, 是指通过大数统计, 我们知道了某类随机事件出现的概率后, 再观察随机事件出现的过程。比如掷币, 虽然我们已经知道

了正反面出现的概率各为50%, 但此后的每次掷币, 仍然只有两种确定的状态: 要么正面, 要么反面。用概率来表征, 就是正面(或反面)出现的概率要么是1, 要么是0。而且, 单次事件的出现受经典力学的条件控制。由此我们得出结论: 如果把大数统计的分析归纳过程看作是由单一物理实在(0-1)向观念知识上升的过程; 那么反过来, 知道概率之后, 再次观察单次随机事件发生的过程, 也可以看作是由观念(知识)向物理实在(0-1)转化的反过程。不管概率的哪种解释, 无论初始条件怎么复杂、如何不可预料, 单次随机事件的出现, 其物理机制总是受经典力学因果关系制约的。这是经典概率普遍遵守的规律。

2. 概率的迭加性 再来看看经典概率对子弹(这里以子弹取代电子)穿过双缝实验的描述。^[4]图1中A是子弹发射源。第一步关闭缝 S_2 , 只开 S_1 , 得到子弹在屏B上的概率分布曲线 P_1 ; 第二步关闭 S_1 , 只开 S_2 , 得到子弹在屏B上的概率分布曲线 P_2 ; 第三步将 S_1 、 S_2 同时打开, 得到的分布曲线是P, 而且

$$P = P_1 + P_2 \quad (3)$$

这表明受因果关系制约的经典概率符合迭加原理。

3. 概率的条件性 一般人们认为经典概率是无条件概率。其实那只是表述上的一种省略, 经典概率的条件是很明显的。在概率的主观解释中, 形成主观概率的个人, 他的最基本的依据是相信随机事件出现的“无差异原理”。赌博中, 在赌徒心目中的这个“无差异原理”就是硬币和骰子的“材质均匀”。这实际上是主观概率出现的条件。如果硬币和骰子的“材质不均匀”, 而且有人知道了这种“不均匀”, 那么他所形成的主观概率肯定会与其他不知道的人不同。在概率的逻辑解释中, 某一命题(事件)出现的概率, 是通过其他命题(事件)与其之间的逻辑关系推断出来的。比如前面提到的天气预报, 预报者掌握的气象数据不同, 预报的准确度也就不同, 掌握的气象资料越多、越全面, 预报的准确度就会越高。对气象资料的掌握, 当然就成了逻辑概率形成的条件。在概率的频率解释中, 随机事件选取比较的“类”不同, 概率也会不同。在统计学中通常把事件出现的相对频率理解为概率, 因此, 选取比较的统计样品数越大, 所得的概率越准确。比如, 抽烟得癌症的病人占全市人口的概率, 就与抽烟得癌症的病人占全市抽烟人口的概率不同; 工业产品中次品出现的概率亦与取样的数量有关, 取样越大越准确。同一个随机事件, 选取比较的“类”(全市人口与全市抽烟人口)不同, 取样的数量不同, 其概率就不同。这里“类”和“量”的选取实际上就是概率形成的条件。

一般地说, 若R是比 S_i 更强的条件, 即满足R的事件都满足 S_i , 在 S_i 条件下进行的N次随机实验中, 有 N_R 次出现R事件, 则在 S_i 条件下R事件出现的概率(几率)为^[3]:

$$P(R/S_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_R}{N} \quad (4)$$

我们把既满足条件A, 又满足条件R的事件, 称作“ $R \cdot A$ ”事件。若在 S_i 条件下进行的N次随机实验中, 有 $N_{R \cdot A}$ 次是 $R \cdot A$ 事件, 则在 S_i 条件下,

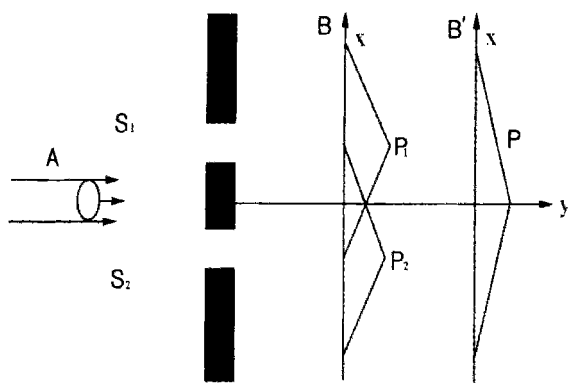


图1 经典概率对子弹穿过双缝实验的描述

$R \cdot A$ 事件出现的概率(几率)为:

$$P(R \cdot A / S_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{R \cdot A}}{N} \quad (5)$$

又, 在 N_R 次出现 R 事件的实验中, 有 $N_{R \cdot A}$ 次出现事件 A , 因此在 R 条件下, 事件 A 出现的概率(几率)是:

$$P(A / R) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{R \cdot A}}{N_R} \quad (6)$$

将(5)除以(4)得:

$$\frac{P(R \cdot A / S_i)}{P(R / S_i)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{R \cdot A}}{N_R} \quad (7)$$

比较(7)、(6)式得:

$$P(A / R) = \frac{P(R \cdot A / S_i)}{P(R / S_i)} \quad (8)$$

(8) 式中只有条件 $R = S_i$ 时才有

$$P(A / R) = P(R \cdot A / S_i) \quad (9)$$

否则

$$P(A / R) \neq P(R \cdot A / S_i) \quad (10)$$

(10) 式表明随着经典统计条件的变化, 同一事件出现的概率(几率)将发生变化。这种变化不是前面提到的从观念到物理实在(0-1)的变化。从观念到物理实在的转变, 在单个事件背后有着更深层的力学边界条件的限制, 受因果关系制约。(10) 式表达的的概率变化则是由“类”(条件)的选取造成的。了解这一点, 对理解量子概率有十分重要的意义。

三、量子概率

在海森伯提出量子力学矩阵形式后不久, 薛定谔提出量子力学的波动形式。在薛定谔的波动方程中波函数 ψ 描述了电子的运动状态。

对波函数 ψ 最先给出明确意义的是玻恩。1926年玻恩在一篇题为“论碰撞过程的量子力学”的论文中指出: $|\psi|^2 d\tau$ 量度了在空间体积元 $d\tau$ 中找到粒子的几率。这就是玻恩的波函数 ψ 的几率解释。按玻恩原先的理解, 电子等微观粒子被设想为古典意义下的质点, 它在每一时刻既具有确定的位置, 又具有确定的动量^[5]。波动力学并不对“粒子碰撞之后的精确状态是什么”做出回答, 而只是回答了“碰撞之后处于某一确定状态的几率是多少”这

一问题。在量子力学中, 对一切事件所能说的只能是某事件以什么概率出现, 这个概率就取决于几率波的波函数 ψ 的平方。电子波是按概率变化的波。

玻恩的几率波克服了薛定谔等人提出的物理实在波的一些困难, 如波包扩散等。玻恩获得了成功。但是, 把玻恩原始经典意义下的几率解释用来说明诸如电子单缝衍射及双缝干涉之类的现象时, 却遭到了令人沮丧的失败。电子波的概率不是经典意义下的概率, 量子概率不遵从前面的经典概率迭加原理, 也就是不遵从经典因果律。量子概率具有波的干涉效应。图2是对这种干涉效应的说明。

在图2中电子通过双缝 S_1 、 S_2 之后, 不是形成图1中的叠加曲线 P , 而是形成了干涉图样 P' 。实验可以在电子流极弱的情况下进行, 使得1次只有1个粒子通过仪器。从数学分析可知, 每个粒子所带有的波同它自己发生干涉。“数学波”的干涉可以通过粒子在屏幕上的物理分布显示出来。这意味着电子波含有一种真实的物理作用。因此, 波函数必定有某种物理实在性, 量子概率不应是经典概率意义下的知识性的东西, 也就是说不是经典意义下的知识波——数学波。这是量子概率与经典概率的一个重大区别。

按照玻恩原先对量子概率的经典方式的理解, $|\psi|^2 d\tau$ 应是体积元 $d\tau$ 中粒子出现的概率。根据概率频率解释含义, $|\psi|^2 d\tau$ 应体现为某个整数与另一个整数之比。即电子出现在体积元 $d\tau$ 中的次数(整数), 与出现在体积 τ 中的次数(整数)之比。然而, 任何一个具体的波函数, 都无法体现概率的整数比形式。这也是将波函数理解为概率的另一个巨大障碍。美国当代科学哲学家范·弗拉森对此做了详细研究。^[6]

电子双缝实验表明量子概率不具有经典概率的迭加性, 量子概率不同于经典概率, 不遵从经典力学作用规律。数学分析还表明电子波是自身和自身的干涉, 一个电子能同时通过双缝, 这是经典力学无法理解的。量子概率应有不同的力学基础。然而, 电子在屏上的落点却又具有经典概率的品质。一个电子落在屏上的 A 处, 它就不能落在屏上的 B 处(由亮点显示)。形成量子概率的每一个元素——电子, 其落点仍然具有与经典概率相同的(0-1)、(1-0)的特征。

如何解决量子概率既有与经典概率不同的本质, 而在从概率向物理实在的转化中又具有经典概率的(0-1)特征呢? 这真是对人类智慧的检验。物理学家和哲学家们有两条思路。第一条思路是电子波不是数学波(几率波), 而是物理波。德布罗意、薛定谔、马德隆等人是其代表人物, 爱因斯坦是这一思路方式的积极支持者。第二条思路是电子波是几率波, 因为电子在屏上的落点是统计性的。然而, 波函数却又不能完全理解成一种数学的虚构, 而应赋予一种潜在的物理实在性。因为纯数学波的干涉不能产生真实的物理作用。人们相信只有真实的物理相互作用, 才能产生真实的物理效应——干涉图样。哥本哈根学派是这一认识路线的代表。海森伯认为是一种“潜能”和“趋势”在控制量子概率的发生。它是一种处于可能性与现实性之间的中间层次的实在^[5]。量子力学中的几率波被理解成由“潜能”

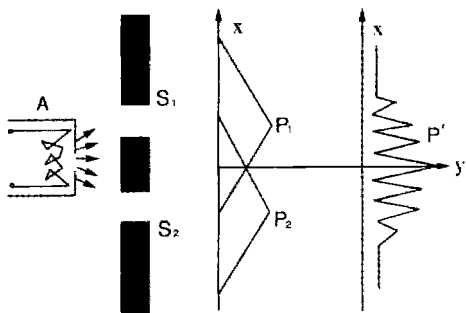


图2 电子双缝干涉实验

或“趋势”控制着的几率波。这就是说,决定量子概率的深层基础不是经典牛顿力学和相对论力学,而是处在“现实性”与“可能性”之间的中间层次的“潜能”或“趋势”。“潜能”和“趋势”的力学基础是什么?不明确。但是,海森伯在试图对电子通过威尔逊云室的路径做出几率解释时,赋予了微观粒子动量和位置的不可确定性属性,而正是这个不可确定性属性在电子双缝实验中,将“潜能”和“趋势”具体化了。所以海森伯说:“这种不确定性正是量子力学中出现统计关系的根本原因。”^[5]这样,量子概率的出现,就不需要经典概率那样的不可知的力学边界条件。其统计性的出现,由微观粒子自身的不确定性就得以完成。

经典概率形成的原因是事件发生的力学初始条件的不可控制性,但事件的发生仍然遵循牛顿力学和相对论力学的基本规律。量子概率形成的原因是微观粒子自身本质上具有动量和位置的不可确定性。微观世界的这种“不可确定性”,是粒子自身的属性,它不需要额外的力学基础。相反,又正是这种“不可确定性”,奠定了微观世界物质运动的“新”的力学基础。这就是正统诠释的所谓“量子力学”的本质。

“不可确定性”真的是微观粒子自身的属性?在微观世界中,微观粒子真的都患有米尼米氏多动症?近100年来围绕量子力学正统诠释出现的一系列悖论,使量子力学中波函数是物理波还是数学波的争论仍然没有完结。就笔者的研究所知,至少还有如下一些问题值得讨论。

第一,薛定谔方程是建立在经典电磁学基础上的,因此,薛定谔方程是决定论的。彭罗斯把这称作U过程。因此,问题就产生了:一个位置和动量不能同时确定的电子,其运动方程的演化为何是确定的?描述电子运动状态的方程难道不需要电子同时具有确定的动量和位置?电子没有确定的位置和动量,能有确定的状态吗?

第二,海森伯的“不确定性”,只能为电子在屏上落点的统计性或者波函数的几率性,提供一个人为约定的理论基础,它是公理性的。不确定性并没有解决电子波的干涉问题。电子通过双缝表现出波的干涉的物理机制尚未得以明确。于是又引出了一个电子落点的统计性是否在测量的一瞬间完成的问题。彭罗斯把这叫R过程。玻尔认为电子究竟表现出波动性还是粒子性是由实验安排所决定的。我们设计出电子是波的仪器系统,它就表现出波动

性;我们设计出电子是粒子的仪器系统,它就表现出粒子性。这就是量子概率形成的条件,它与经典概率的条件性有本质的区别。电子的波粒二象性属于现象形态,是可以通过人类经验来把握的。有人把这作为量子概率是条件概率的依据。这里又给人们预留了一个想象的空间:测量中形成的电子的波动性和粒子性,或者电子落点的统计性与经典力学,二者是相融的。

第三,解释薛定谔方程需要电子遵从经典力学。解释电子通过双缝的干涉效应和屏上落点的波动性,表明电子不遵从经典力学,需要赋予电子自身的不确定性属性。由于不确定性并不能解决波的干涉的物理机制,玻尔又将电子推向经典力学一边,引出了量子测量问题。为了解释微观物理现象,一个电子就这样被人们在决定论和非决定论中推来推去,无所适从。人的认识也因此变得越来越糊涂,甚至痛苦不堪。人类的智慧真的已经穷尽,对微小的电子一愁莫展吗?不是的。本文提出的量子力学曲率解释或许会成为解决这一问题的金钥匙。

四、新的思路

1. 点电子的物理意义 在宏观世界,如果物体的大小在我们所讨论的问题中可忽略不计,物体就可以简化为质点。物体的运动就可以看成是质点的运动。在微观世界,对微观粒子自身还能如此对待吗?许多科学家一直表示怀疑,而且认为量子力学中的许多问题很可能就是由质点抽象造成的。日本物理学家坂田昌一就指出:“本来,把基本粒子看作数学上的点,只限于在比较大的时空领域作为研究对象,以至于在可以忽略基本粒子内部结构的情况下才是成立的。然而,以点模型为基础的理论形式……往往就忘记了当初采取的近似意义,从而产生了好象所研究的对象本身就是数学上的点这样一种错觉……基本粒子是数学的点,对于我们这样的外行人来说,是怎么也不能相信的。”法国数学家托姆也曾明确指出:量子论以不确定性原理为基础,依靠点粒子这一粗糙而不适当的模型,把微观客体硬塞入一种不适当的概念框架所造成的混乱和悖谬之中。

当然,上述科学家的观点是理论上的认识。美国物理学家霍夫斯塔特还从实验上证明了微观客体不是质点,而是有一定的分布半径的(如中子、质子等),并由此获得了诺贝尔物理学奖。

看来,真实的微观粒子不是质点,这是可以达成共识的。那么,当把微观粒子抽象成质点时会带来什么样的问题呢?为了回答这一问题,我们先来看前苏联物理学家朗道对测不准关系的推广。朗道在他的《量子电动力学》一书中,指出测不准关系可以推广到相对论力学中的单个物理量。他认为,在相对粒子静止的坐标系中,坐标的不确定量是:

$$\Delta X_0 = \frac{h}{m_0 C}; \text{动量的不确定量是: } \Delta P_0 = m_0 C.$$

m_0 是粒子的静止质量, $m_0 C$ 我们称作为静止康普顿动量, h 是普朗克(Planck)常数。在笔者所著的《物理学的新神曲——量子力学曲率解释》一书

(或《论量子学曲率解释实在论哲学基础》^[7]一文)中,我们已经证明了,朗道上述“静电子”位置不确定量,是实验测得的非点粒子半径 r_0 (ΔX_0) 的理论值,而且,理论值在数量级上与实验符合得非常好。

只要稍作推敲就会发现,朗道对 ΔX_0 所作的解释,只能来源于微观粒子的点粒子假设,而量子力学中电子等微观粒子刚好是质点。电子本来不是质点,具有真实的半径 $\Delta X_0(r_0)$ 。如果把电子当成质点,显然,这个质点就必须弥散在 ΔX_0 的范围之内,电子的大小 $\Delta X_0(r_0)$ 就成了电子(质点)可能存在的范围。于是,电子等微观客体就有了不确定性。可见,电子等微观客体的不确定性,是在对微观客体作质点抽象时,自觉或不自觉地赋予电子等微观粒子的。在原子中,由于电子在不同能级上位置不确定量 ΔX 不相同,因而具有的不确定性也不同,也就是在不同能级上出现的概率不同。

对海森伯证明测不准关系式的光—电子对撞实验作深入分析后,同样也可以得出:海森伯的位置不确定量 ΔX 是点粒子活动范围的结论。不过, ΔX 不是微观客体的真实大小,而是“自在实体”——电子的“真身”,即在四维时空中的影像活动区域。联系到我们提出的相互作用原理, ΔX 、 ΔP 的不能同时确定,其真实意义则是动量的改变量与时空形象的出现是同时产生的。

看来,在对微观客体作质点抽象时,我们在理论上自觉不自觉地赋予了微观客体的不可确定性属性,并与微观客体自身的几何形象相对应。这就与经典力学对宏观物体作质点抽象时完全不同。对微观客体作质点抽象,粒子自身的大小不可忽略不计。理论上将粒子的几何形象,变成了点粒子所具有的新属性——不可确定性。难怪海森伯深信是理论决定我们能观察到什么。

由此,我们明显地看到,哥本哈根学派坚持的几率解释确有理论依据,因为,在以质点为描述对象的量子力学中,“点电子”在其形的分布范围内确实有飘忽不定的性质。说电子是“原子幽灵”,其比喻一语中的。人们对几率解释的种种不理解甚至误解,既根源于对微观世界“形点转换”带来的新性质的无知,也根源于对“宏观质点”与“微观质点”不同性质的混淆。

2. 概率的可视度解释 为了解决量子力学解释中的矛盾,我们有必要对概率解释的内涵作适当扩充。

在微观世界,我们的研究对象不是点粒子,而是有定域的几何形象,但是我们可以通过点粒子抽象将粒子的几何属性转化成点粒子的不可确定性;或者反过来说,我们也可以把点粒子的不可确定性,还原成粒子的几何属性。如果粒子的几何属性用曲率来表征,那么量子力学几率解释就自动转变成了量子力学曲率解释^[8]。粒子的几何形象是可视的,当把粒子表面的弯曲程度作可视度的一种量度时,概率的频率解释又可与概率的可视解释互相通约。这样,微观粒子本质上具有不可确定性的属性就被抽掉了,并且理论上也恢复了经典力学的地位。这是质点抽象建立理论的一头。

在实验检验的另一头,光点(电子)在屏上随机

地出现。光点(电子)散落得越多的地方,可视的程度,即可看见的清晰程度越高;光点(电子)散落越少的地方,可视的程度越低;没有光点(电子)的地方,看不见光点(电子),可视度为零,即不可视。这里所说的可视度是大数统计规律,光点的多少不受限制,因此,它不需要像频率解释那样需要 $n \rightarrow \infty$ 的极限约束条件。然而,它却又与频率解释有内在的通约性。可视度高的地方光点多,光点出现的概率也高,放出的光的强度也高;可视度低的地方,光点少,光点出现的概率也小,放出的光的强度也低;可视度为0,光点不出现,光点出现的概率为0,光强为0。深入研究,还可以把原子中电子在能级上跃迁与发射光子的物理事实联系起来。在原子中电子的跃迁几率、光强与可视度也是成正比的。而可视度,即可看见的清晰程度,可以是一个连续的概念,可以与波联系在一起。因此,我们通过概率的可视度定义,又把一个非连续的可几事件的次数,转化成了可连续变化的空间视觉的量度。这无疑是扩大了定义概率的内涵,也把海森伯的矩阵力学与薛定谔的波动力学在物理本质上贯通了。

用可视度定义概率,既适用于大数统计,又能适用于单个事件。一个电子出现在屏上的某处,某处出现一个光点,电子在这里出现的概率为100%,那么可视度就是100%,也就是概率为1。电子没有出现的地方,电子出现的概率为0,而可视度也是0。大数统计的可视度可看作是单个事件的综合效应;单个事件出现的概率,可看作是大数统计在单个事件上的特例,二者相辅相成,没有矛盾。

可视度概率可以借助曲面的性质进行公理化运算。一个曲面,由平直向弯曲转化,人的可视度也在变化。平面到处无区别,可视度为零;平面上凸出来一块,看得见,则有可视度;曲面越弯曲,则可视度越高。曲面的弯曲程度由曲率来量度。可视度与曲率 R 的关系是:曲率 R 为 $0 \rightarrow$ 平面 $\rightarrow$ 可视度为0%;曲率 R 为无穷大 $\rightarrow$ 点 $\rightarrow$ 可视度为100%。这正好对应单个事件的0概率和1概率。曲率 R 由 $0 \rightarrow$ 无穷大过渡,刚好对应大数统计(光点统计)某一概率的出现,它是0%到100%之间的某一个百分比。归一化又将粒子自身的几何形象转化为背景空间的特性,时空具有了实体属性,而粒子变成了质点,并且理论上具有了不确定性^[7],是飘忽不定的“幽灵”。粒子在屏上落点的概率受空间特性——曲率 R 控制。应该说,这才真正是海森伯的“潜能”和“趋势”。

将理论一头的不可确定性与粒子的形象沟通,引出概率的可视度解释;将实验一头的光点的大数统计——频率概率与可视度概率沟通并与曲面的几何形象相联系,则用曲率波解释双缝实验的逻辑基础就建立起来了。双缝实验中电子波的干涉,本质就是曲率波的干涉,一个粒子通过双缝,实际上是粒子所具有的时空特征通过双缝。粒子与粒子的时空是统一的,正像粒子的质量和能量是统一的一样,是一个问题的两个方面。人类认识的时空是变化多端的。平直时空($R=0$)与点时空($R=\infty$),只是时空的两种宏观极限状态;弯曲时空比平直时空更具有普遍性;波动时空(包括时空盲区)是微观世界时空的重要特征,它与微观世界相互作用的非连

续性直接相关, 双缝实验中光点在屏上出现的(0 1) 特征, 是在相互作用原理支配下, 粒子从微观时空向宏观时空的转换。

在新的量子力学解释中, 由于“不可确定性”缘于微观客体的“形点转换”, 量子力学数学形式体现的是电子自身几何特征的变化, 因此, 量子力学“测不准原理”具有“实在论”属性。在微观世界, 时空的实体性质、点粒子“幽灵”的出现和时空盲区的存在将为势垒穿透(隧道效应)和超光速现象(穿越时空盲区)提供新的合理解释。量子力学的新解释, 不但给“反实在论”哲学流派提供物理学依据, 而且, 还既能帮助了解“几率解释”的实质, 又能克服由“几率解释”带来的诸多悖论和误解。

五、不同学派思路的比较

现在我们有条件把不同学派主要人物的思路作一比较, 从而更加明了各学派的成败得失。

1. 德布罗意的思路

波函数 → 物理波 → {
→ 导波 → 粒子骑在波上 → 无法解释波是怎样产生又怎样收进粒子之中。
→ 双重解 → 非线性解 + 线性解 → 非线性解代表粒子, 在中心; 线性解代表波, 在外围 → 类似于铁饼模型 → 数学困难严重。

2. 薛定谔的思路

波函数 → 物理波 → {
→ $|\psi|^2$, $m|\psi|^2$ → 电荷、质量密度 → 波动。
→ 波包代表粒子 → 波包扩散 → 无实验证据。

3. 哥本哈根学派的思路

(1) 玻恩的思路

波函数 → 几率波(数学波) → {
→ 质点代表粒子
→ $|\psi|^2$ → 几率密度 → 建立在经典概念之上 → 电子双缝干涉实验(干涉图样) → 不符合经典力学规律 → 否定了几率波的经典理解。

(2) 海森伯、玻尔的思路

波函数 → 几率波(非完全数学波) → {
→ 质点代表粒子
→ 有物理实在性(潜能、趋势) → 介于可能性与现实性之间的中间层次 → 不确定性原理 → $|\psi|^2$ → 几率密度 → 量子概率

→ 波动方程的因果演化 → U 过程 → 符合经典力学。

{
→ 量子测量 → R 过程 → 出现统计特征 → 互补原理 → 仪器的作用
→ 出现负几率、波包编缩、非整数比等等困难, 对于冯·诺意曼还有思维介入的困难。

4. 量子力学曲率解释的思路

微观客体 → 非点粒子 → 几何形象 → 不确定性的实在论解释 → 波函数 → 曲率波 →

曲率的大小表示粒子性 曲率的变化表示波动性 负号表示曲面的方向	→ 概率的可视度解释 →	理论: 质点在 Δx 内的几率与几何形象的转化 实验: 光点在屏上出现的频率与几何形象的转化
--	--------------	--

→ 空间曲率的波动 → 时空的新认识(结合相互作用原理) → 合理解释双缝实验 → 消除认识困难。

(上接第 52 页)

究结果, 因为得到的电压并没有随水流速度的增加呈线性增加。Sood 推测, 这可能与整个纳米管中分层水流中的电荷分布不同有关。

至少有两个纳米管科研小组不太相信 Sood 的发现。一个说, 他们也进行了同样试验, 但没有发现利用纳米管可以发电的任何证据。但 Sood 称, 他们已经申请了专利, 并希望证明所有怀疑他们的评论是不正确的。

(刘先曙)

从上述 4 种思维方式的比较中, 不难看出量子力学曲率解释所占有的认识优势。下一步我们还可以期望用以下的实验方式检验量子力学曲率解释的正确性。第一, 以宏观时空为背景: 纳米技术已经照出了原子的球状结构, 随着科学技术的进一步发展, 人们有理由期望实验物理学家“照”出电子的形象。量子力学曲率解释中电子的形象是球状的, 而且在原子中靠近核的电子表面曲率大、照片的清晰度高, 远离原子核的电子表面曲率小、照片的清晰度差(现象实体)。第二, 以微观时空为背景: 电子变成量子“幽灵”, 可预言隧道效应; 时空有盲区, 可预言超光速现象。第三, 在双缝干涉实验中如果缝 S_1 、 S_2 的长度不一样, 或 S_1 、 S_2 缝后有阻挡物, 则双缝干涉图案就会发生复杂的变化。因为, 由测不准关系 $\Delta p \cdot \Delta x = h$ 中, Δx_1 、 Δx_2 代表相同的时空波波源。上述两种时空背景的区别, 可类比于牛顿时空与相对论时空的区别。

我们期望实验物理学家的合作研究。

(注: 本文经课题组全体成员多次讨论, 提出了很多宝贵意见, 参加讨论的成员有: 桂起权、王贵友、王自华、童鹰、万小龙、吴新忠、李继堂等。)

参考文献

- [1] 桂起权等. 机遇与冒险的逻辑 [M]. 石油大学出版社, 1996
- [2] 吴大猷. 吴大猷科学哲学文集 [M]. 社会科学出版社, 1996
- [3] 谭天荣. 揭开 EPR 关联之谜 [M]. 天津科学技术出版社, 1995
- [4] 倪光炯等. 近代物理学 [M]. 上海科学技术出版社, 1986
- [5] [美] 雅默. 量子力学的哲学 [M]. 商务印书馆, 1989
- [6] 万小龙(博士论文). 范·弗拉森量子力学哲学研究. 2001
- [7] 赵国求. 论量子力学曲率解释实在论哲学基础. 科学技术与辩证法 [J], 2001(5)
- [8] 赵国求. 运动与场 [M]. 冶金工业出版社, 1994

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 43 页)

而蜘蛛丝具有各式各样的结构, 更容易进行微调。

爱丁堡 Heriot-Watt 大学的化学家 Christopher Viney 说, 这种新型纤维也可以制造更小的光纤探测器。生物学家希望将来使用的近场显微镜能看到比光波波长更小的组织而不会像电子显微镜一样会损坏试样。现在的近场显微镜是依靠超细的玻璃管拉出的光纤制造的“透镜”, 但这些玻璃细管直径约为 100 纳米, 比较粗; 而用蜘蛛丝作工具制造出的新光纤, 将可为生物学家观察更微观的生物组织开辟全新的远景。

(刘先曙)