

·科技纵横捭阖·

爱因斯坦攻击量子力学所凭何据

在量子力学的发展史上,1935年由 Einstein、Podolsky 和 Rosen 合作发表的论文,具有深远影响。这种影响已经超出物理学界。后人把这篇论文称为 EPR 论文,把所提出的问题称为 EPR 佯谬,把佯谬中出现的粒子对称为 EPR 对,在完备性和定域性之间二者择一称为 EPR 定理等等。

从检验理论的角度分析 EPR 论文是一个新视角。所谓检验理论,指的是为说明一个已知的理论有缺陷甚至错误,在这个理论之外提出新的理论并建议实验进行检验。有了这个视角,就可发现 EPR 其实提出了量子力学的 1 个检验理论。不过,EPR 论文给出的是思想实验。直到 1964 年发展出 Bell 不等式,才使得 1972 年第 1 个实验检验成为可能。

本文仅仅涉及到 EPR 论文中爱因斯坦对量子力学的攻击。他对量子力学的不满还表现在他相信经典的因果律及其决定论性、认为场论在捕捉世界的实在性方面具有优势等等,这些都没有反映在 EPR 论文中。

EPR 佯谬的量子力学解

在量子力学中,同一粒子的位置 x 和动量 p 不能同时确定值,但 2 个粒子的如下位置差 $X=x_1-x_2$ 和总动量 $P=p_1+p_2$ 相互对易 $[X,P]=0$,可同时取确定值。不妨让 $X=a, P=0$ 。这个图像在经典力学中匪夷所思:2 个粒子的动量相反,如何能保持位置差不变?

爱因斯坦想象对这个 EPR 粒子对进行先后 2 次测量。第 1 次测量:测量粒子 1 的动量,设得数值 p_0 。那么不用测量粒子 2,就知道它一定具有动量 $-p_0$ 。第 2 次测量:测量粒子 1 位置,设得位置 x_0 ,则粒子 2 自然具有位置 $a+x_0$ 。即使距离 a 很大,也是如此。

从表面上看量子力学似乎有矛盾:第 2 次测量之后,量子力学“预言”了粒子 2 同时具有了确定的位置和动量,而这又违背了量子力学不确定性原理。

量子力学对这个问题的解答如下:由于 EPR 态是纠缠态,第 2 次测量(也就是对第 1 个粒子测量位置),同时“干扰”了粒子 2 的动量(尽管没有直接对粒子 2 测量),使得粒子 2 的动量变得完全不确定。所以,粒子 2 并没有违背测不准关系。

根据量子力学,在第 2 次测量完成之



后,如果另外有人去测量粒子 2 的动量,会得到一系列的数值。这一系列数值既可能由于第 2 次测量,也可能由于粒子本来就处于动量本征态的叠加态。由于无法区分到这一系列数值的原因,所以说量子力学认为,在测量过程中没有明确的信息在 EPR 粒子对中传递。也就是信号的传递并没有违背相对论。

因此,量子力学认为,EPR 佯谬其实并无任何佯谬可言。这个佯谬之所以称之为佯谬,是因为立足于量子力学之外。

爱因斯坦如何在量子力学之外 审视量子力学

当时,狭义相对论的思想已经成为物理学的圭臬。所有人的理论提出来都要先相对论性一下。例如 de Broglie 的相波理论,Schrodinger 的波动方程等。等到尘埃落定,今天读到的 de Broglie 和 Schrödinger 的理论都是非相对论性的。狭义相对论中的信息传递速度有限的思想是自然规律中不可动摇的一部分。任何超距作用都会违背定域实在性。不过,爱因斯坦的高度远不止此,他实际上站在了量子力学之前人类文明的最高点,然后俯视量子力学。

1) 爱因斯坦对实在性具有宗教或者孩童一般的信仰。所谓实在性,指的是宇宙及其定律的存在不依赖于我们认识它们的能力。实在性观念是在量子力学之前的历史中慢慢积累起来的、成功的宇宙观。不过毕竟是建立在已知的、有限的、历史的经验之上的经验,没有道理要求这个经验在新建立的理论中继续有效。对 EPR 粒子对而言,粒子 1、2 的实在性不能因为测量与否而改变。而爱因斯坦并没有说,粒子的位置和动量就是粒子实在性的恰当描述。而是说,如果存在实在性,量子力学就不是一个完备的理论。

2) 爱因斯坦认为事件存在可分离性也就是定域性。在爱因斯坦看来,第 2 次测量能对遥远的粒子 2 的动量产生干扰,说明尽管没有明确的信息传递,也可能有某种不明确的信息传递,爱因斯坦后来称之为古灵精怪的超距离作用。正是这些不明确的信息传递使得粒子 2 的实在性受到了影响。爱因斯坦认为这种不传递信息的超光速现象违背了定域性。

3) 在非相对论性量子力学中,并没有限制信息的传递速度,光速 c 不过是和 π, e 一样的自然常数。非相对论性理论不能认为是相对论性理论的低速极限或者光速趋于无限时的极限情况,部分的原因是相对论性的量子力学只有发展到了量子场论才能逻辑自洽。非相对论性理论提供了微观低速世界的一个相当精确而自洽的描述。但爱因斯坦认为,不妨在非相对论性理论中也假设信息传递的速度有限。

爱因斯坦的这个检验理论经过 Bohm、Bell 等人的努力,成为显学。后来根据爱因斯坦设想设计的实验,几乎无一支持这一检测理论,而是支持量子力学理论本身。不仅如此,后来的发展极大地丰富了量子力学的理论体系,提出了隐形传态(teleportation)的概念,发展出了量子信息学等学科等。

爱因斯坦审视量子力学,依据的是他对客观世界根本规律的理解,或者说他的世界观。爱因斯坦首先把经典定域实在论强化为量子定域实在论,然后假设量子定域实在论在非相对论性量子力学也成立,再在此基础上审视量子力学。通过对爱因斯坦思想的研究和发展,使得量子力学清晰地排除了定域实在论的观念。爱因斯坦在这一问题上的历史地位,在于发轫、在于“第一推动”。

爱因斯坦对量子力学的批评,为批评一个正统物理学理论提供了范本。而这一范本的意义,很可能还没有获得彻底的理解。

文/刘全慧

作者简介 湖南大学理论物理研究所,所长。
图片为本文作者。

栏目主持人 关增建,电子信箱:guanzzj@sjtu.edu.cn。

(编辑 祝叶华)