

玻姆力学将是终极理论？

诞生于几十年前的德布罗意-玻姆理论悄然复苏，研究者正试图让它与广义相对论和量子场论相统一。

■作者 沃德·斯特鲁伊 (Ward Struyve)
■翻译 戚译引

量子力学是现代物理学最大的成就之一，它能够解释和精确预测多种现象。但是，量子力学的诠释始终充满争议：目前仍不明确的是，量子理论如何解释物理世界的本质。有人可能会认为这不是理论需要解答的问题——理论只是用来解释实验结果的，而期待它揭露世界本质的尝试毫无意义。但这是一种目光极其短浅的看法，科学家真正追寻的是宇宙运行的方式，因此实验应当被视为理论发展的向导和对理论的检验，而不是理论的唯一目的。

然而，在试图理解用量子力学描述的世界时，我们遇到了巨大的困难。科学家为了克服这些困难做出了种种尝试，其中最有可能也最简单的一种就是德布罗意-玻姆理论 (de Broglie-Bohm theory, 简称 dBB)，也被称为玻姆力学。该理论得名于法国物理学家路易·德布罗意 (Louis de Broglie) 和美国物理学家戴维·玻姆 (David Bohm)。德布罗意在 1924-1927 年间进行了这方面的开创性工作，随后，在 20 世纪 50 年代，玻姆进一步发展了这一理论。近年来，得益于对量子力学诠释的新的思考，它重新得到了重视和深入研究。

量子力学的困境

在探讨德布罗意-玻姆理论前，我们先来看看量子力学遇到了哪些问题。我们从一个简单而具有代表性的实验开始——杨氏双缝干涉实验。这个实验将电子束等粒子束投向一块不透明的屏幕，屏幕上有一道相距很近的平行狭缝。粒子束穿过狭缝，并投射到第二块屏幕上，就会被探测到。我们可以逐个发射粒子，依次进行探测，那么随着实验次数的积累，就能观察到屏幕上粒子撞击点的分布。

如果在双缝实验中使用比电子更大的粒子，比如小弹珠，那么这些物体会以接近直线的轨迹前进，它们在屏幕上的分布结果会呈现为两个点。然而，用电子等微观粒子进行的实验会呈现出截然不同的结果：屏幕上会出现条纹状的图案，粒子分布密集的区域（亮条纹）与分布稀疏的区域（暗条纹）间隔排列。

这就是干涉条纹，是波特有的现象。例如，如果水面上放置了一个障碍物，障碍物上有两个距离很近的开口，当水面泛起的涟漪穿过这两个开口时，也会出现相似的干涉条纹，具体表现为波浪振幅高的区域和振幅低的区域间隔排列。

量子力学是如何解释双缝干涉实验的？它将电子描述为一种波，在数学上用波函数表达。就像经典物理学中的波一样，电子波到达狭缝时，每个狭缝就成了一个产生次级波的源。这时，两道次级波相互干涉，就形成了干涉条纹。

但是，电子波与机械波的类比到此为止。尽管电子波像涟漪一样，到达屏幕时会扩散到一片较为广阔的区域，但电子仍然只在屏幕上留下一个点，此时电子本身并不会扩散。为了解释探测结果为为何会局限于一个点，量子力学假设波函数发生了瞬间坍缩。也就是说，当电子波到达探测屏的时候，它瞬间坍缩成了某种位置高度确定的东西。量子力学认为，这种坍缩是在测量时发生的，并且我们观察到的屏幕上落点的概率分布是确定的——由波在这个点的振幅决定。对于屏幕上某个点来说，波在该点的振幅越大，波坍缩到这一点的概率也就越大。

因此，量子力学认为干涉图样的形

成是一个时间过程，是随着电子落点的累积产生的。但这个解释存在一个问题：我们在上文中假设，坍缩是在电子抵达探测屏的瞬间发生的，但真的是这样吗？坍缩也可能发生在电子抵达探测屏之后，某个外部事件发生的时刻，例如当有人观察屏幕的时候。量子力学的正统诠释认为，坍缩是在测量时发生的。但是，究竟哪一个物理过程可以被称为“测量”？需要使用特定的测量仪器吗？人类观察者的存在是必要的吗？这个观察者是否需要具备足够的资历，例如拥有物理学博士学位？既然我们无法准确定义什么是测量，那么我们就无法得知坍缩具体发生在何时，对坍缩结果的预测也就变得模糊起来。

测量，一个棘手的问题

为了强调“测量”这个概念所带来的问题有多严重，1935 年，奥地利物理学家埃尔温·薛定谔 (Erwin Schrödinger) 提出了著名的思想实验——“薛定谔的猫”。在这个实验中，一只猫被放进了箱子里，身边有一个放射性原子和一台装置。如果原子衰变，装置就会启动，释放一瓶致命的毒药。按照量子力学的正统诠释，此时在箱子中，猫的状态与原子的状态发生了耦合，猫-原子这个系统的波函数并不对应猫生或是死的某个确定状态，而是对应“活猫”与“死猫”的组合状态（即叠加态）。但是，在波函数坍缩到生或死的确定状态之前，这只猫会感知到什么？坍缩是什么时候发生的？是在人类观察者打开箱子往里看的时候，系统才发生坍缩吗？

测量的定义并非是我们理解量子世界性质的过程中遇到的唯一障碍。另一个问题就是，量子力学中的波和物理学中其他的波（如电磁波）截然不同。这也是量子力学的一个奇异之处，物理学家也未必能意识到这点。经典体系的波在物理空间中传播，这是一个三维空间，其中会发生各种物理现象。但是，我们无法将量子力学中的波函数视为某个发生在三维物理空间中的波，尽管双缝实验可能会让人产生这样的错觉。

事实上，两个粒子并不能被视为在三维空间中分别传播的两道波，它们其实是六维 (3x2-6) 空间中的一道波。更普遍地说，N 个微观粒子组成的系统并不能用 N 道波进行描述，这个系统对应的只有一道波，在维度为 3N 的空间中传播。这个世界与我们所熟悉的三维世界截然不同，物理现象发生的场所其实是这个多维度的位形空间，而观察者只能从自己所在的三维空间中观察。

导航波与点粒子

现在，我们来聊聊玻姆力学。这一理论认为，波函数并不是量子世界中唯一发挥作用的要素，还要考虑在三维物理空间中运动的点粒子。玻姆力学假设点粒子与经典力学中描述的一样，其位置在任何时刻都是确定的。同时，与量子力学的正统诠释一样，它的运动受导航波的引导，速度由导航波决定。而导航波的演变遵循薛定谔方程。

根据玻姆力学，无论是我们所看到的桌子、椅子，还是活着或死掉的猫，都是由粒子构成的实体，而不是波呈现的形态。事实上，导航波对我们来说是“隐形”的，它只作用于粒子的运动——就像在经典力学中，我们无法感知对物体施加的力，而只能观察到物体的运动一样。

在每一次双缝实验中，粒子源产生的粒子的波函数都是相同的，但它们的初始位置可能会有所不同。而我们所探测的是粒子的最终位置。德布罗意-玻姆理论认为，粒子的波函数不会在瞬间

坍缩，而是会持续按照薛定谔方程演化。没有了波函数的坍缩，也就不存在测量的问题了。这是一种决定论的理论：某种结果出现的概率，取决于波函数初始位置的差异。

当实物粒子服从平衡分布 (equilibrium distribution) 的时候，就可以用计算解释干涉图样的形成。实物粒子会“典型地”符合平衡分布。（这有点像某个不与外界发生相互作用的密闭容器中，气体粒子会“典型地”均匀分布在容器中。）此时，玻姆力学与量子理论正统诠释得出了相同的预测结果。既然如此，我们在讨论玻姆力学时一般就不需要费心计算粒子的真实轨迹，因为粒子的分布是可以通过量子理论的正统诠释计算得出的。

玻姆力学的优势

玻姆力学的发展现状如何？作为一个非相对论理论，玻姆力学已经得到了充分发展。许多科学家为此作出了贡献，尤其是玻姆的合作者们，例如克里斯·杜德尼 (Chris Dewdney)、巴兹尔·希利 (Basil Hiley) 和彼得·霍兰 (Peter Holland)。从 20 世纪 90 年代起，德国慕尼黑大学的德特勒夫·迪尔 (Detlef Dürr)、美国罗格斯大学的谢尔登·戈尔茨坦 (Sheldon Goldstein) 和意大利热那亚大学的尼诺·赞吉 (Nino Zanghì) 也都带领团队进行了相关研究，他们同样发挥了重要的作用。这些重要的研究集中于探讨玻姆力学如何解释观察结果和正统量子力学中的公式、玻姆力学中经典的边界（量子系统和经典物理空间的边界），以及相同粒子的集合的性质等。

我在前文中提到，玻姆力学能够重复量子力学的预测。目前，量子力学的预测已经得到了实验的完美证明，当然，玻姆力学也能够很好地预测同样的结果。而它最常受到的批评之一就是只能重复，而无法提出新的预测。但是与量子力学不同的是，玻姆力学清晰地展现了一幅世界的图景，并且其中不存在测量定义的问题。

此外，对于实际计算而言，在玻姆力学中粒子轨迹的细节通常不太重要。例如在双缝干涉实验中，我们不必计算粒子的真实轨迹，也能预测出干涉图样——参考正统量子力学的计算结果就可以了。

但是对于其他的问题，例如从量子力学行为转变为经典力学行为的边界，我们需要建立明确的概念。在玻姆力学中，这个问题得到了很好的解答：当粒子（或能够代表系统整体自由度的那个点，比如质心）的轨迹非常接近于经典力学的预测时，就是经典力学适用的范围。

另一个量子力学的正统诠释难以解决的问题，就是如何测量跳出一个区域，或者说越过一道障碍所需的时间，因为这套理论中缺少时间对应的算符，只有位置算符。但是，在玻姆力学中，我们就可以直接讨论并解决这类问题。

在面对具体问题，同一个理论的不同诠释能够提供不同的解决手段，这种情况很常见。量子力学中的玻姆力学和正统诠释正是如此。在过去 20 年中，我们也见证了玻姆力学的具体应用。

物理问题中的应用

玻姆力学一个突出的应用案例，就是玻姆力学在量子化学中的应用，这个学科常常研究粒子数量较多的系统（例如一个原子或分子中的电子）。这样的系统过于复杂，很难用数学方法精确描述。而玻姆力学提供了新的描述方法，甚至比正统量子力学的方法更高效。

玻姆力学的另一个应用就是构建量子体系与经典体系的相互作用模型，例如（量子体系的）粒子分布在固体表面上时。从原则上来说，这个表面应该用量子力学描述，但这在实际操作中难以实现，因此我们只能用经典物理学描述它。在 21 世纪初期，多位研究者证明在描述粒子与经典体系共同组成的系统时，联合使用经典物理学和玻姆力学计算出的模拟结果，会比只用量子力学得出的结果更加准确。其中最重要的几位研究者包括美国华盛顿大学的奥列格·普列兹多 (Oleg Prezhdo) 和克雷格·布鲁克斯比 (Craig Brooksby)，以及法国图卢兹第三大学的艾蒂安·然当斯佩热 (Étienne Gindensperger)、克里斯托夫·梅耶尔 (Christoph Meier) 和阿尔贝托·贝斯威克 (Alberto Beswick)。

我在前面说过，玻姆力学是一个非相对论理论，因此很有必要将它进一步扩展，以将爱因斯坦的狭义相对论纳入其中。正统量子力学已经花了很长时间来完成这个困难的任务，其成果就是量子场论，如今它为描述亚原子粒子及其相互作用提供了有效的框架。

量子场论与量子力学的一个本质区别，就在于量子场论所描述的粒子数量是不固定的，粒子可能会产生或湮灭。为了解释这两个过程，玻姆力学必须作出调整。其中，对于费米子（自旋为半整数的粒子，包括电子、质子、夸克等）的产生和湮灭，目前学界主要提出了两种不同的过程，一个由德特勒夫·迪尔、谢尔登·戈尔茨坦、罗德德里奇·图姆卡 (Roderich Tumulka) 和尼诺·赞吉在 2004 年提出，另一个由塞缪尔·科林 (Samuel Colin) 和我在 2007 年提出。

而对于玻色子（自旋为整数的粒子，例如光子和希格斯玻色子），我们还没有找到一种自然引入这些粒子的方式。玻姆本人已经证明，玻色子很可能本质上无法被描述为粒子，而只能被描述为场，这些场与费米子的相互作用体现为玻色子的产生和湮灭。

量子场论的另一个重要之处就是，它整合了狭义相对论中的对称性假设（对称性解释了光速不变假设和相对性原理）。狭义相对论的另一个结果，就是证明不存在绝对的“同时”：两个事件对于一个观察者而言是同时发生的，对于另一个和前者发生相对运动的观察者来说就不是同时发生的。

同时是相对的，如何将这一特性与非定域性结合起来呢？非定域性的含义是一个地点发生的事件可以瞬间影响另一个地点，这点非常棘手，但它是量子力学的基本原理之一。不过，在哪一个参考系里这种影响才算是瞬间发生的？是否存在一个特殊的参考系，不遵循相对论中的对称性？许多研究都试图解决这些困难的问题，但直到现在，也还没有令人满意的答案出现。从目前的证据看来，非定域性与相对论不是十分相容。值得注意的是，量子场论的各种诠释都没能很好地回答这个问题，无论是正统诠释还是玻姆理论。

量子引力理论的玻姆诠释

玻姆力学的另一个应用领域就是量子引力以及它在宇宙学中的影响，这也是我研究的重点。对量子引力的追寻是理论物理中最基本的问题之一。根据爱因斯坦的广义相对论，引力对应的是时空的弯曲，但是这一理论描述时空相互作用的方式来源于经典力学，而非量子力学。什么能使物质不服从量子定律？时空自身（即引力）是否必须服从量子定律？如果是的话，它服从其中哪些定律？

物理学家提出了多种不同的量子引力理论，例如正则量子引力、圈量子引力以及弦论。正则量子引力的建构过程，就是把通常用于将经典场（如电磁场）转换成量子场的方法应用于广义相对论。这一理论中的波方程称为惠勒-德威特方程（又叫 W-D 方程），但它存在数学上的缺陷，并且看起来是无法克服的。因此，除了整合广义相对论中的对称性，我们还需要简化模型，从而获得一个更加完善的理论。

圈量子引力理论也是将相对论量子化后得到的，但过程中涉及了不同的变量。这一理论也产生了一种 W-D 方程。圈量子引力理论和正则量子引力理论的重要区别在于，圈量子引力理论中的时空是离散的，而非连续的。而弦论则认为物质的基本单位不是点粒子，而是一维的弦。这一理论没有将相对论量子化，它其实是一种统一所有已知相互作用的尝试。

目前还没有实验或观测证据能判断这 3 种理论孰优孰劣。并且，很难判断正则量子引力或圈量子引力预测了什么。首先，它们都继承了非相对论量子力学中的测量问题，当我们尝试将量子引力应用于宇宙学时，这个问题就会变得格外棘手。事实上，在这种情况下，研究的系统是整个宇宙，因此不存在从外部进行测量的观察者。并且，宇宙只有一个，而不存在多个宇宙的集合，那么此时不同结果的出现概率就变得毫无意义了。

宇宙的演化

在测量问题之外还存在一个时间问题。根据 W-D 方程，宇宙的波函数不随时间改变。那么，宇宙的演化过程要如何用这个方程描述？如果宇宙在膨胀或收缩，这个过程又该如何用这个方程描述呢？

从 20 世纪 90 年代起，荷兰物理学家杰伦·芬克 (Jeroen Vink)、巴西物理学家纳尔逊·平托-内托 (Nelson Pinto-Neto) 等多位研究者提出了正则量子引力理论的玻姆诠释。我自己也在 2017 年提出了一个圈量子引力理论的玻姆诠释。这些理论都描述了时空的结构，但是时空的变形和演化都由波函数决定。并且在这些理论中，即使波函数是固定的，但时空仍然在随时间变形。

通常情况下，玻姆力学描述的时空与广义相对论存在差异。例如，玻姆诠释有可能避免时空中无法解释的奇点的出现，例如大爆炸的起点或大收缩 (Big Crunch, 与大爆炸相反的过程) 的终点。此外，多位研究者还认为，我们有可能借助玻姆诠释论证暗能量不存在。暗能量是一种性质未知的能量，它或许能解释宇宙为何加速膨胀。如果暗能量不存在的论证成立，则宇宙加速膨胀可能只能由宇宙量子力学解释。我和鲁汶大学的同事蒂博·德玛尔雷尔 (Thibaut Demaerel)、克里斯蒂安·梅斯 (Christian Maes) 已经证明，一个简化的结合了玻姆力学的正则量子引力模型，可以在不引入暗能量的前提下得到宇宙加速膨胀的结果。

无论是在宇宙学还是量子理论中，玻姆力学都为我们指出了一些有趣而充满希望的研究方向。量子理论通常无法为宇宙学家提供明确的预测，但量子引力的玻姆诠释或许能提供新的预测，例如预测宇宙微波背景辐射的温度涨落。整个宇宙都沐浴在这种微弱的辐射之下，但它的来源仍然未知。■

环球科学 SCIENTIFIC AMERICAN

(本文由《环球科学》杂志授权转载)