

量子迷雾：都是波函数惹的祸！

作者：张天蓉

从1900年普朗克（Planck，1858年—1947年）为解决黑体辐射问题开始而提出的量子力学，如今已有一百多年的历史。尽管对其理论基础之诠释至今仍然莫衷一是，但我们还是可以说量子力学是一门非常成功的物理理论。它曾经直接奠定了原子弹、核技术、半导体工业等的物理基础，如今又在量子计算、信息加密等现代高科技领域大显身手。一个多世纪以来颁发的诺贝尔物理奖中，研究课题之绝大部分都与量子理论有关。

量子现象之所以令人迷惑，是因为它们与我们日常生活中能用经典牛顿理论能解释的现象大不相同。实际上，科学最初是来源于人类感官对世界上发生的现象的认识，这些现象以及人类本身，都是宏观的，物理学家也正是在此基础上，建立了牛顿经典力学以及经典电磁理论。然而，量子力学所描述的微观世界，可以说完全丧失了人类感官的直接观测性，比如说，你能感觉到电流，但无法“直接”感知一个电子、质子，你能看到各种颜色的光，但看不到一个一个的光子。至于夸克等更深层次的概念，与我们感官的关系就更远了。也就是说，微观世界之小，使得人类已经不可能直观体验，只能用某些实验方法间接地测量，用抽象的数学手段想象似地加以描绘。因此，我们并没有理由要求微观现象遵循我们常见的规律，也没有理由试图用理解经典现象的方式来理解量子理论对世界的诠释。

不过，经典的科学研究方法教给了我们很多基本的科学法则，诸如实在性、客观性、确定性、决定论、因果律、局域性等等。物理学家们也许能容忍微观世界量子现象的千奇百怪，却难以接受它们违反这些人们原来认同的哲学基本原则，也就是说，量子力学似乎颠覆了科学家们长期认可、并引以为自豪的世界观。当然，在研究微观现象中对这些原则中每一项的坚持或摒弃，是因人而异的，这就造就了物理学家们对量子力学的各种不同诠释，量子理论也成为著名学者们互相争论不休的根源。

对量子力学的困惑，专家们尚且如此，公众就更不用说了。量子力学使用的数学工具本来就不是大众所熟悉的，想要不使用数学而理解量子论又非常困难，原因之一便是上面所述，量子现象与经典现象迥异，很难用我们日常司空见惯的现象来比喻而达到帮助理解的效果。因此，量子论对公众而言更是曲径幽幽，迷雾重重，且往往容易被一些不着边际、天马行空的说法和联想误导。

本文的目的是梳理归纳一下量子理论造成的重重迷雾。据费曼所言，没有人真懂量子力学，但“懂”的程度总是有所差别。实际上，主要的迷雾来源有3层：一是物理层次的，来源于微观与宏观物理现象本质的不同；二是诠释方面的，来自于不同的物理学派，在本文中我们将主要介绍哥本哈根诠释；三是公众层次的，来自于各种量子科普文以及“名人”演

讲之误导，以及公众对量子现象自发的想象和误解。以下便从这三个基本层次之迷雾加以叙述，但有时候三者的界限模糊，难以理清，笔者只能尽力而为了。

A. 物理迷雾

量子论与经典物理到底有哪些主要的不同之处？这些关键概念的简要发展过程，来龙去脉如何？有否实验支持？解释这些现象的主流理论是什么？让我们拨动拨动迷雾，以窥视到隐藏其后的物理本质。

1. 量子化

顾名思义，量子的意思指的是物理量的不连续性，表征微观粒子运动状态的物理量只能采取某些分离的数值，叫做被“量子”化。在经典物理学中，物理量变化的最小值没有限制，它们可以任意连续地变化，理论上要多小就能有多小。但在量子力学中，物理量只能以确定的大小一份一份地进行变化。量子化的概念由普朗克在1900年第一次提出^[1]。这并非出于他莫名其妙的臆想，而是为了解决一个实验与经典理论不符合的“黑体辐射”难题。

黑体辐射的名字，听起来有点玄乎，它是一个理想化了的热力学物理术语。这儿的“黑体”并不一定要是“黑”色的，指的是只吸收不反射的理想物体，不反射不折射但仍然有辐射。比如说一根黑黝黝的拨火棍，其实并不是“黑色”，当它被放进炼铁炉中后，它的颜色便会随着温度的变化而变化：首先，温度逐渐升高后，它会变成暗红色，然后是更明亮的红色，然后，是亮眼的金黄色，再后来，还可能呈现出蓝白色。为什么会出现不同的颜色呢？这说明在不同的温度下，拨火棍辐射出了不同波长的光，这就是黑体辐射。

但在普朗克的时代，描述黑体辐射的经典理论碰到了困难，与实验结果相差甚远。普朗克解决了这个问题，得到与实验符合得很好的结果，他采取了一个巧妙而新颖的思想方法，就是假设黑体辐射时，能量不是连续的，而是一份一份地发射出来，也就是说，引入了“粒子能量量子化”的概念。普朗克为了限制辐射能量的最小值，假设了一个普朗克常数 h ，100多年来，这个常数的出现成为量子理论适用范围的标志。五年之后，爱因斯坦（Einstein, 1879年—1955年）也是使用量子化的概念，成功地解释了另一个经典理论解释不了的物理现象：光电效应^[2]。

1912年，尼尔斯·玻尔（Bohr, 1885年—1962年）用量子的概念建立了新的原子模型^[3]，认为原子只能够稳定地存在于一系列离散的能量状态之中，称为分离定态，原子中任何能量的改变，只能在两个定态之间以跃迁的方式进行。所以，原子中的电子只能处在一系列分立的定态上。

黑体辐射、光电效应、及波尔原子模型，这些与实验密切相关的工作，使得“量子”这个名词，横空出世，闪亮登场。

2. 波粒二象性

经典物理中，粒子和波是两种完全不同的物理现象，但在量子论中，波粒二象性是所有微观粒子的基本属性，无论是原子、电子、还是光，都既是粒子又是波。

从解决黑体辐射、光电效应等问题而提出的光量子概念，已经隐含着光的二象性，因为在经典物理中，光和电磁现象只是波，而量子物理认为这些波动包含的能量是量子化的，有一个与普朗克常数相关的最小值。一份一份的能量，也就隐含地意味着一个一个的“粒子”！因此，光和电磁波，均应被看成粒子。其后，波尔的原子模型，又将光量子的发射与原子模型中的电子运动联系在一起。

1924年，原来主修历史的法国贵族后裔德布罗意（de Broglie, 1892年-1987年）发现物理学才是自己的兴趣所在，从而转向研究量子力学，他不鸣则已，一鸣则惊人，德布罗意写出了一篇令人惊叹的博士论文^[4]，让量子力学迈出了戏剧性的一步。他将爱因斯坦对于光波“二象性”的研究扩展到电子等实物粒子，提出了物质波的概念，将任何非零质量的粒子（以后本文中均将此类粒子以电子作代表）都赋予一个与粒子动量成反比的“德布罗意波长”。这个认为任何物质都具备波粒二象性的新观念，让当时他的老师朗之万也难以接受，因而将其论文寄给爱因斯坦征求意见。爱因斯坦立刻意识到这篇论文的份量，他认为德布罗意“已经掀起了面纱的一角”。大师的支持奠定了波粒二象性在物理中的地位，也启发了另一位物理学家薛定谔（Schrödinger, 1887年-1961年）。薛定谔想，既然电子具有波动性，那么，就给它建立一个波动方程吧，两年后，薛定谔方程^[5]问世，开启了量子力学的新纪元。

著名的双缝电子干涉实验是电子波粒二象性极好的实验验证。必须将电子当成一种波动，用满足薛定谔方程的波函数来描述，才能解释双缝实验，因为只有波才会产生干涉现象。

牛顿力学中一个粒子在某个时刻之状态，用它在3维空间的位置和动量便足以描述。而在量子力学中引进了波函数的概念之后，即使是单个电子的状态，也涉及到弥漫于整个空间的波函数。如果再扩展到更多的粒子及电磁波，复杂性的增加显而易见。因此，一般而言，量子系统的状态被称为“量子态”，对某个物理量而言，包括“本征态”和“叠加态”。波粒二象性的意义深远，实质上意味着微观粒子总是处于“既是此、又是彼”的叠加态，这也就是通常人们用“薛定谔的猫”来描述的奇特量子现象，是理解量子理论的关键。

电子的波动性导致了一系列经典物理中没有的、独特的量子现象。

3. 隧穿效应

量子论中，即使势垒的高度大于粒子的能量，微观粒子也能够以一定的概率穿入或穿越势垒，发生“量子隧道效应”。在经典力学里，这是不可能发生的。但用量子理论中电子波函数满足的波动力学则可以解释，因为在波动力学理论中，不存在不能穿透的势垒。

隧道效应是被美籍俄裔物理学家伽莫夫（George Gamow，1904年-1968年）最早发现的，他用隧道效应成功地解释了 α 衰变，是量子力学研究原子核的最早成就之一。

在经典力学中，不可能有“穿墙术”这种怪事，粒子不可能越过比它的能量更高的势垒。势垒就像挡在愚公家门口的大山，功力不够就无法逾越。好比我们骑自行车到达了一个斜坡，如果坡度小，自行车具有的动能大于坡度的势能，不用再踩踏板就能“呼哧”一下过去了。但是，如果斜坡很高的话，自行车的动能小于坡度的势能时，车行驶到半途就会停住，不可能越过去。

又比如，我们在一个门窗紧闭的教室里听讲座，没有人能够穿过墙壁到外面去吧。但是，让我们设想，我们和教室都变得越来越小，越来越小……我们变成了 α 粒子，教室变成了阻挡 α 粒子脱离的原子核。这时，情形就不太一样了。根据量子理论，微小世界里的 α 粒子，没有固定的位置，是模糊的一团“波包”。因此，我们每个人本来就像云彩和雾一样弥漫于整个教室，甚至于包括教室外面，也有我们的淡淡身影。正像英国物理学家R. H. 否勒在那年冬天听了伽莫夫在伦敦皇家学会作“隧道效应”演讲之后，笑说道：“这间房间的任何人都有一定的机会不用开门便离开房间啊！”

这就是隧道效应，它可以用量子力学中微观粒子的波动性来解释。因为根据波动理论，电子波函数将弥漫于整个空间，粒子以一定的概率（波函数平方）出现在空间每个点，包括势垒障壁以外的点。换言之，粒子穿过势垒的概率可以从薛定谔方程解出来。也就是说，即使粒子能量小于势垒阈值的能量，一部分粒子可能被势垒反弹回去，但仍然将有一部分粒子能穿过去，就好像在势垒底部存在一条隧道一样，见图 1-1。

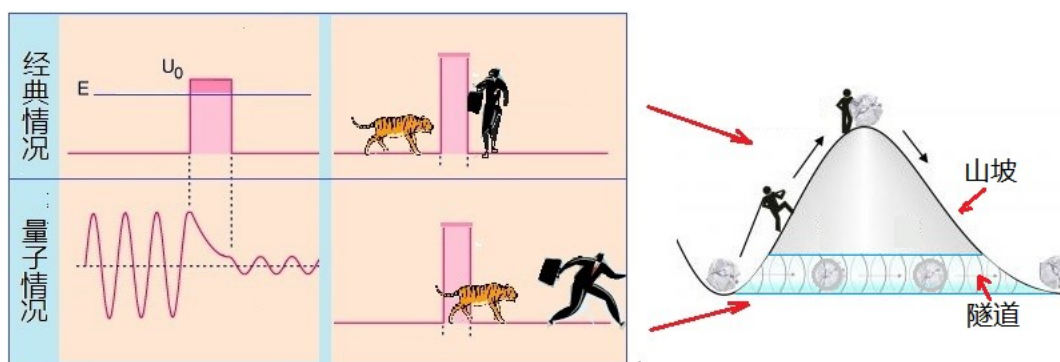


图 1-1：经典势垒和量子隧道

隧穿效应不仅解释了许多物理现象，也有多项实际应用，包括电子技术中常见的隧道二极管、实验室中用于基础科学研究的扫描隧道显微镜等^[6]。

4. 自旋

微观粒子的自旋，纯粹是一个量子理论中才有的特有概念，没有经典对应物。尽管人们经常将自旋类比于经典物理中的自转（比如地球），但这种比喻只在一定程度上可用。或者说，自旋是微观粒子的内禀属性，不能用经典转动的图景来解释。除此之外，电子自旋还有好些不符合经典规律的量子特征。

比如说，经典物理中的角动量（比如自转角动量）是三维空间的一个矢量。我们可以在不同的方向观察这个矢量而得到不同的投影值。如图 1-2b 左图中朝上的红色经典矢量，当从右边观察它时，它的大小是 1；从下面观察时，投影值为 0；而从某一个角度 a 来观察的话，则得到从 0 到 1 之间随角度连续变化的 $\cos(a)$ 的数值。

电子的自旋就不一样了。自旋角动量是量子化的，无论你从哪个角度来观察自旋，你都可能得到、也只能得到两个数值中的一个： $1/2$ ，或 $-1/2$ ，也就是所谓的‘上’，或‘下’。

我们将自旋的“上、下”两种状态叫做自旋的本征态。而大多数时候，电子是处于两种状态并存的叠加态中。

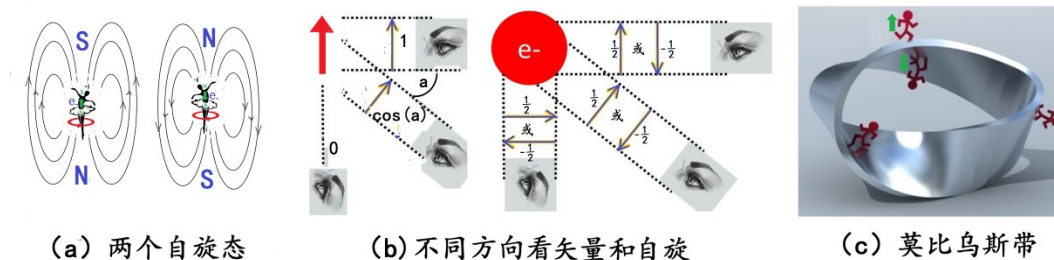


图 1-2：自旋的性质

电子自旋角动量可看作是二维复数空间的矢量。或者说，它的运算规律可以被归类为“旋量”。旋量在某种意义上可以看成是“矢量的平方根”。不过，这句话听起来照样不好理解，矢量哪来的平方根呢？

比如，一个二维空间的矢量可以与一个复数相对应，那么，我们或许可以从复数的平方根来理解“矢量的平方根”。一个复数可以用它的绝对值大小（模）及幅角来表示，如果要求这个复数的平方根，可将其模值求平方根、幅角减半而得到。因此，一个复数的平方根的幅角是原来复数幅角的一半。所以，当一个复数 $(1, 0)$ 在复平面上绕着原点转一圈，即 360 度之后回到它原来的数值时，它的平方根却只转了半圈（180 度），停留在与原来

矢量方向相反的位置上，只有当原复数绕着原点转两圈之后，其平方根复数才转回到原来的位置。

电子的自旋也具有类似的性质。当自旋在空间中转一圈之后，不是回到原来的状态，而是上变下，下变上，就像图 1-2c 中的小人在莫比乌斯带上移动一圈之后变成了头朝下的状态一样。从图 1-2c 中也可以看出，如果那个头朝下的小人继续它的莫比乌斯带旅行，再走一圈之后，就会变成头朝上而回到原来的状态了。由此可见，电子自旋的这个性质正好与上面所描述的“矢量平方根”性质相类似。

5. 全同粒子

因为电子的波动性，使得它不可能像经典粒子一样被准确“跟踪”，因而便不可能因不同的“轨道”而被互相区分。所以，量子力学认为同一种类的微观粒子是“全同”的、不可区分的。而全同粒子又可分类为玻色子和费米子。这两类粒子分别遵循不同的统计规律：玻色子服从玻色-爱因斯坦统计，费米子服从费米-狄拉克统计。在基本粒子的标准模型中，组成物质结构的质子、中子、电子等，均为费米子，四种相互作用的传播粒子，包括光子、胶子等等，都是玻色子。

不同微观粒子的不同统计性质，是来源于它们不同的自旋波函数，以及不同自旋波函数导致的不同对称性。玻色子是自旋为整数的粒子，比如光子的自旋为 1。两个玻色子的波函数是交换对称的。也就是说，当两个玻色子的角色互相交换后，总的波函数不变。另一类称为费米子的粒子，自旋为半整数。例如，电子的自旋是二分之一。由两个费米子构成的系统的波函数，是交换反对称的。也就是说，当两个费米子的角色互相交换后，系统总的波函数只改变符号，见图 1-3。无论波函数是对称或反对称，不会影响平方后得到的概率，但却影响到两类粒子的统计性质。

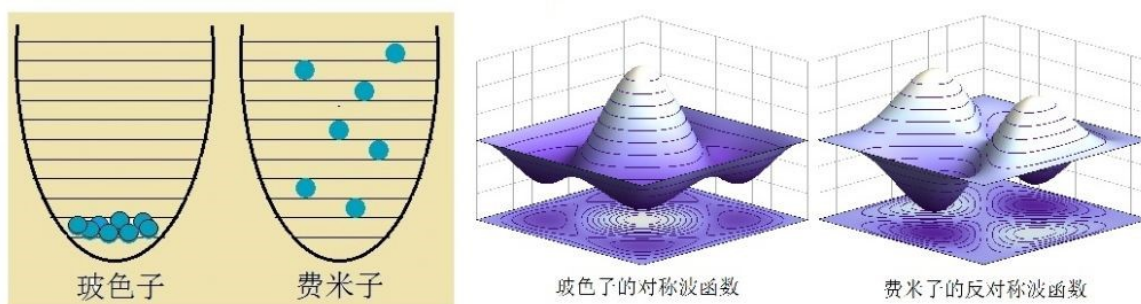


图 1-3：玻色子和费米子

两种统计规律不仅仅应用于基本粒子，也应用于复合粒子，比如夸克结合而成的质子、中子、及各类型的介子、以及由质子中子结合而成的原子核等，都属于复合粒子，对复合粒子来说，如果由奇数个费米子构成，则为费米子；由偶数个费米子构成，则为玻色子。

根据统计规律来定义的玻色子费米子概念，也可以推广到固体和凝聚态中的“准粒子”。

例如，在半导体中运动的电子，受到来自原子核以及其它电子的作用，然而，电子的行为可以视作带有不同质量的自由电子，或称为“准电子”，还有半导体中的“空穴”，也并非真实粒子，这些准粒子都是费米子。然而，准粒子也可能是玻色子，比如库珀对、等离子体子、声子等。

多个玻色子可以同时占有同样的量子态，两个费米子不能同时占有同样的量子态，这是两者很重要的区别。或者说，玻色子是一群友好的朋友；费米子是互相排斥的一个个独立大侠。如果有一伙玻色子去住汽车旅馆，它们愿意大家共处一室，住一间大房间就够了；而如果一伙费米子去住汽车旅馆，便需要供给它们每人一间独立的小房间。

所有费米子都遵循“泡利不相容原理”，电子遵循这一原理，在原子中分层排列，由此而解释了元素周期律，这个规律描述了物质化学性质与其原子结构的关系。

因为玻色子喜欢大家同居一室，大家都拼命挤到能量最低的状态。比如，光子就是一种玻色子，因此，许多光子可以处于相同的能级，所以，我们才能得到像激光这种“所有的光子都有相同频率、相位、前进方向”这种超强度的光束。

如上所述的玻色子和费米子的不同统计行为，也是量子力学中最神秘的侧面之一！

6. 量子态和量子纠缠

对单个粒子的波函数而言，量子叠加态是产生奇妙量子现象的根源。如果把叠加态的概念用于两个以上粒子的量子系统，就更产生出来一些怪之又怪的现象，其中之一，便是人们经常耳熟能详的“量子纠缠”。

量子纠缠的最初概念，是爱因斯坦因为反对量子力学的哥本哈根诠释而假想的思想实验，即 1935 年，爱因斯坦等三人提出的 EPR 佯谬^[7]。之后，被薛定谔正名为量子纠缠。1964 年，英国物理学家约翰·贝尔（John Bell，1928 年—1990 年）提出了贝尔实验及贝尔定理，使得 EPR 悖论有了明确的实验检测方法，实验验证量子纠缠的深层物理意义成为可能。爱因斯坦 EPR 三人、薛定谔、以及贝尔等人研究量子纠缠的初衷，都是为了证明量子力学中可能存在的不自洽或不完备性，企图用具体实验来验证量子论背后隐藏的定域隐变量理论，从而证明非定域量子理论的错误。

然而，爱因斯坦等人的文章已经发表了 80 余年，令人遗憾的是，许多次实验的结果并没有支持爱因斯坦等人的“隐变量”观点。反之，实验的结论一次又一次地证实了量子力学的正确性。尽管分歧如故，量子纠缠的机制仍然有待深究和探索，但大多数物理学家均认为这种反直觉的“鬼魅般的超距作用”确实存在。

量子纠缠所描述的，是两个电子量子态之间的高度关联。这种关联是经典粒子对没有的，是仅发生于量子系统的独特现象。其原因归根结底仍然是因为电子的“波动性”。就直观图像而言，读者不妨想象一下：两个弥漫于空间的“波包”纠缠在一起，显然比两个“小球”纠缠在一起，更为“难分难解”多了。

我们考虑一个两电子的量子系统，并使用电子自旋，来理解“纠缠”。因为电子自旋只有“上下”两种简单的本征态，类似于抛硬币时的正反两面，不像位置或动量等有无数个本征态，因此，用电子自旋量子态之“纠缠”来说明问题简单明了。

比如说，如果对两个相互纠缠的粒子分别测量其自旋，其中一个得到结果为“上”，则另外一个粒子的自旋必定为“下”，假若其中一个得到结果为下，则另外一个粒子的自旋必定为上。以上的规律说起来并不是什么奇怪之事，有人用一个简单的经典例子来比喻说：那不就像是将一双手套分装到两个盒子中吗？一只留在 A，另一只拿到 B 处，如果看到 A 处手套是右手的，就能够知道 B 处的手套一定是左手的，反之亦然。无论 A、B 两地相隔多远，即使分离到两个星球，这个规律都不会改变的。

奇怪的是什么呢？如果是真正的手套，打开 A 盒子看，是右手，阖上再打开，仍然是右手，任何时候打开 A 盒都见右手，不会改变。但如果盒子里装的不是手套而是电子的话，你将不会总看（观察）到一个固定的自旋值，而是有可能“上”，也有可能“下”，没有一个确定数值，上下皆有可能，只是以一定的概率被看（测量）到。因为测量之前的电子，是处于“上、下”叠加的状态，即类似“薛定谔猫”的那种“死活”叠加态。测量之前，状态不确定，测量之后，方知“上”或“下”。诡异之处是：测量之前，我们“人类”观测者不能预料测量结果，但远在天边的 B 电子却似乎总能预先“感知”A 电子被测量的结果，并且鬼魅般地、相应地将自己的自旋态调整到与 A 电子相反的状态。换言之，两个电子相距再远，都似乎能“心灵感应”，做到状态同步，这是怎么一回事呢？况且，如果将 A、B 电子的同步解释成它们之间能互通消息的话，这消息传递的速度也太快了，已经大大超过光速，这样不就违反了相对论吗？

如何来解释量子纠缠？涉及到对波函数的理解，对量子力学的诠释等问题。似乎没有一种说法能解释所有的实验，能满足所有的人，这也是爱因斯坦不满意量子力学之处。下面便谈谈通常所谓的主流观点：哥本哈根诠释^[8]。

B. 诠释迷雾（哥本哈根）

上一篇“物理迷雾”中描述的现象及实验事实，基本上是所有承认量子力学的物理学家们认可的。然而，如何解释这些事实呢？这就有了种类繁多的不同诠释。本文中我们仅介绍比较主流派的哥本哈根诠释，除此之外，常见的还有多世界诠释、系综诠释、交易诠释等。

1. 波函数是什么

薛定谔为电子之运动建立了数学方程，精确地计算出氢原子的能级，加之追随其后接踵而至的无数成功实验的支持，犹如牛顿定律于经典力学，当年的薛定谔方程似乎已经成为牛顿第二定律在量子力学中的类似理论。然而，不同的是，牛顿经典力学曾经带给物理界一片晴空，薛定谔方程之后的量子力学却远远不是万事大吉。反之，如今从历史倒回头看，薛定谔方程的建立正是量子物理学家们噩梦的开始。可以说，一切都是波函数惹的祸！

牛顿方程的解是粒子在空间中随时间变化的轨迹，这轨迹似乎看得见摸得着，容易被人理解。即使轨迹看不见，大多数时候也能够脑海中画出来吧。而从薛定谔方程解出的电子运动规律，却是一个弥漫于整个空间的“波函数”！这个波函数很好用，解释了实验发展了理论，但它到底是个什么东西？如何将它与人们脑海中的小球状电子运动联系起来？

薛定谔首先想：波函数是否代表了电荷的密度？这个念头在直觉上就行不通，计算中也惨遭失败。1926年，波恩（Born，1882年—1970年）给出了一个概率的解释，假设这个波函数的平方代表电子在空间某点出现的概率，这个想法在当时貌似成功地解释了波函数的物理意义。可是，薛定谔本人并不赞同这种统计或概率的解释。之后，随着波函数开始的一系列量子诡异现象及诠释的诞生，其中包括海森伯的不确定性原理、波尔的互补学说、哥本哈根派的波函数塌缩、量子测量的主观性、量子纠缠等等，让爱因斯坦也坐不住了。物理学界的大佬们基本分成了两大派：波尔为代表的哥本哈根派，以及爱因斯坦、薛定谔等人为首的反对派。这导致了爱因斯坦与波尔间所谓的“量子世纪大战”。

当然，爱因斯坦并不是反对量子力学本身，也并不反对概率论，而是不能接受哥本哈根派对波函数的概率诠释。但他只有反对的立场却拿不出很多反对的资本，只能以反例来提出几个思想实验，自己却没有创建一个建设性的、新的量子理论的框架和诠释。

反之，当时玻尔领导的哥本哈根理论物理研究所成为世界的量子研究中心，其中玻恩、海森伯（Heisenberg，1901年—1976年）、泡利（Pauli，1900年—1958年）以及狄拉克（Dirac，1902年—1984年）等一伙与量子力学同龄的年轻人是这个学派的主要成员，他们对量子力学的创立和发展作出了杰出贡献。哥本哈根诠释长期主宰物理界，是被广为接受的主流观点。即使今后或许将被别的诠释或理论所代替，哥本哈根派及诠释在量子力学发展道路上也是功不可没的。

总之，围绕电子的这团波函数“迷雾”，以及迷雾导致的学术纷争，一直延续至今。下面列举哥本哈根诠释中的几个要点。

2. 不确定性原理

实际上，在薛定谔导出薛定谔方程之前，海森伯和波尔已经为量子力学建立了第一个数学基础：矩阵力学。之后，薛定谔证明了，矩阵力学与薛定谔方程的波动力学两种描述在数学上是等效的。但是，物理学家们习惯于微分方程，因为那是牛顿力学中驾轻就熟的东西，

人们也喜欢直观的波函数图像，不喜欢矩阵力学枯燥乏味的数学运算。即使波函数的物理意义不甚明了，但有了图像，概念才显得直观明晰且能有所理解发挥想象。于是，学者们兴高采烈地研究和应用薛定谔方程，而将矩阵力学冷落一旁。这点使得海森伯一直耿耿于怀，颇为失落。因此，他也决心给他自己的理论配上一幅更直观的图象。

海森伯试图用图像来描述电子的运动轨迹，却发现电子实际上无轨迹可言。因为电子的位置与动量不可能同时被确定。位置的不确定性越小，动量的不确定性就越大，反之亦然。比如，要确定电子位置必须进行测量，测量电子位置最好方法就是使用波长小于电子运动范围的激光。而原子中的电子，运动范围数量级只有（ 10^{-10} 米），可能的运动速度却很大（ 10^6 米/秒），在这种快速运动情形下的电子，被激光光子顶头一撞，速度和位置都不断改变，光子与电子相互作用时对电子的扰动，使得电子的位置和速度都无法确定，谈不上具有准确的数值。

海森伯由此认为，用位置、速度等瞬时变化的经典物理量，来描述量子论中粒子的运动状态是不合适的。海森伯的不确定性原理，实际上也是受爱因斯坦“可观察”量思想的启发下所至，因为根据爱因斯坦：一个完善的理论，必须以直接可观察量为依据。但讽刺的是，海森伯由此启发而得到的却是爱因斯坦至死都不愿接受的结果：

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

在上述不等式中，也许不等号右边的下限极值不是完全正确，但并不影响这个原理的基本精神。不确定性原理是自然界的一个基本数学原则，它确定了数学方程中成对出现的所谓正则共轭变量必然要受到的限制，鱼和熊掌不可兼得，顾此而失彼。事物都是彼此制约，互相限制的，不确定性原理反映了自然界的这个本质。如此而互相限制的共轭量（对）不是仅限于位置和动量，其它诸如能量和时间、信号传输中的时间和频率等等，都是共轭变量对的例子。

3. 量子测量和波函数塌缩

提出不确定性原理的同时，海森伯也提出了另一个哥本哈根派的中心概念：波函数塌缩，其目的是为了了解释不确定性原理与量子测量的关系。

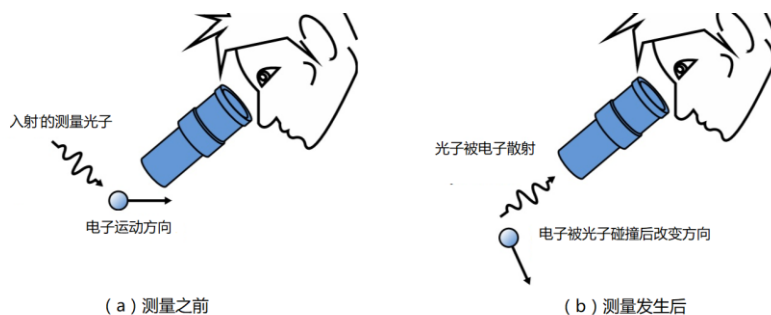


图 2-1：测量影响电子运动

物理学所关注的只是可观察的事物，然而，观察需要通过测量，对电子行为的测量则免不了让电子与某种外界影响相互作用。这样，观察电子的测量必然伴随着对电子运动的干扰，如图 2-1 所示。

对经典测量行为，干扰的尺度大大小于测量尺度，可以忽略，但量子测量时则不能忽略，因而，微观世界需要遵循不确定性原理。

一个具有一定动量的微观粒子的位置是不确定的，根本不知道它在哪里。一旦我们去看它，它瞬间就出现在某个位置，因而能得到一个位置的确定值，为了解决这个矛盾，海森伯引入了波函数塌缩。海森堡说，这是因为电子本来不确定位置的“波函数”因为人的观测瞬间塌缩成某个确定位置的“波函数”了。这个概念之后又被数学家冯·诺依曼（John von Neumann）推广，且纳入到量子力学的数学公式中。

为了描述波函数，我们引入了量子叠加态的概念，电子的运动可以表示成不同的确定位置态的叠加，也可表示成不同确定速度态的叠加。波函数就是叠加系数。当测量位置时，量子态就随机“塌缩”到一个具有明确位置的量子态；当测量速度时，量子态就随机“塌缩”到一个具有明确速度的态，塌缩到某个态的几率与叠加系数，也就是波函数大小的平方值有关。

也就是说，量子力学中用两种过程来描述电子的运动，一个是测量之前由薛定谔方程（或狄拉克方程）描述的波函数演化过程，是可逆的；另一个是测量导致的不可逆的“波函数塌缩”。前者被大多数人认同，后者属于哥本哈根诠释。甚至今天，波函数概念引发的论题仍旧尚未获得满意的解答。据说当年玻尔自己并没有完全接受波函数塌缩的观点。

4. 概率的本质

经典物理和量子论中，都使用“概率”一词来代表事件的不确定性，但其物理解释却大相径庭。概率是什么？概率可定义为对事物不确定性的描述。根据经典物理的观念，认为概率的发生是因为人们所掌握的知识不够。但从量子力学的观点看，不确定性不是来自于知识的欠缺，而是属于事物的内在本质。

在经典物理学框架中，不确定性是来自于我们知识的缺乏，是由于我们掌握的信息不够，或者是没有必要知道那么多。比如说，当人向上丢出一枚硬币，再用手接住时，硬币的朝向似乎是随机的，可能朝上，可能朝下。但按照经典力学的观点，这种随机性是因为硬币运动不易控制，从而使我们不了解（或者不想了解）硬币从手中飞出去时的详细信息。如果我们对硬币飞出时每个点的受力情况知道得一清二楚，然后求解宏观力学方程，就完全可以预知它掉下来时的方向了。换言之，经典物理认为，在不确定性的背后，隐藏着一些尚未发现的“隐变量”，一旦找出了它们，便能避免任何随机性。或者说，隐变量是经典物理中概率的来源。这也正是当年爱因斯坦说“上帝不会掷骰子！”的意思。爱因斯坦不是不懂概率，只是固执地认为，上帝的骰子是按照深层的“隐变量”规律来掷的，由此才提出了著名的 EPR 佯谬。

然而，哥本哈根派解释的量子论中的不确定性不一样，他们认为微观世界不确定性是内在的、本质的，没有什么隐藏更深的隐变量，有的只是“波函数塌缩”到某个本征态的概率。

5. 测量的主观性

电子双缝实验证实了电子“同时经过两条狭缝”，具有波动性。但其更诡异的行为是表现在对电子的行为进行“测量”之时！

为了探索电子双缝实验中的干涉是如何发生的？物理学家在双缝实验的两个狭缝口放上两个粒子探测器，企图测量每个电子到底走了那条缝？如何形成了干涉条纹？然而，诡异的事情发生了：一旦想要用任何方法观察电子到底是通过了哪条狭缝，干涉条纹便立即消失了，波粒二象性似乎不见了，实验给出与经典子弹实验一样的结果！

如何从理论上来解释此类量子悖论？哥本哈根学派认为，微观世界的电子，通常处于一种不确定的、经典物理不能描述的叠加态：既是此，又是彼。比如说，被测量之前的电子到达狭缝时，处于某种（位置的）叠加态：既在狭缝位置 A，又在狭缝位置 B。之后，“每个电子同时穿过两条狭缝！”，产生了干涉现象。

但是，一旦在中途对电子进行测量，量子系统便发生“波函数坍塌”，原来表示叠加态不确定性的波函数塌缩到一个固定的本征态。就是说：波函数坍塌改变了量子系统，使其不再是原来的量子系统。量子叠加态一经测量，就按照一定的概率规则，回到了经典世界。

这种解释带来很多问题（别的诠释又有别的问题），哥本哈根解释直接使人困惑的一点是：如何理解测量的本质？谁才能测量？只有“人”才能测量吗？测量和未测量的界限在哪里？

按照约翰·惠勒（John Wheeler, 1911-2008）引用波尔的话说：“任何一种基本量子现象只在其被记录之后才是一种现象”，这个绕口令式的一段话导致人们如此质问哥本哈根派：难道月亮只有在我们回头望的时候才存在吗？这个疑问实际上是对哥本哈根诠释的误解。

经典物理学从来认为物理学的研究对象是独立于“观测手段”存在的客观世界，而哥本哈根派对量子力学测量的解释，却似乎将观测者的主观因素也掺和到了客观世界中，两者无法分割。不过，认为在测量中主观客观难以分割的观点，并不等于否定客观世界的存在。

6. 量子隐形传输

作为量子纠缠现象在量子信息领域中的应用，1993年，美国物理学家贝尼特等人提出了“量子态隐形传输”的方案：将原粒子物理特性的信息发向远处的另一个粒子，该粒子在接收到这些信息后，会成为原粒子的复制品。而在此过程中，传输的是原粒子的量子态，而不是原粒子本身。传输结束后，原粒子已经不具备原来的量子态，而有了新的量子态。

为什么提出量子隐形传输？让我们首先考察一下经典传输信息的过程。比如说，用电传机发送电传的过程，可以用如图 2-2a 所示的过程描述：爱丽丝将需要传输的文件经过扫描后得到的信息，用万维网（经典通道）传送给鲍勃，鲍勃用另一张纸将图像打印出来。

然而，爱丽丝不可能用这种方式将一个量子态（比如说，一个量子比特）传递给鲍勃。因为要传输就必须测量（经典传输例子中的“扫描”，相当于“测量”），量子态一经测量便塌缩为一个本征态，而不是原来的量子态了。那么，如何传输一个未塌缩之前的量子态呢？所谓的量子隐形传输，是利用另一对互为纠缠的光子对 A 和 B，来达到这个目的，见图 2-2b。

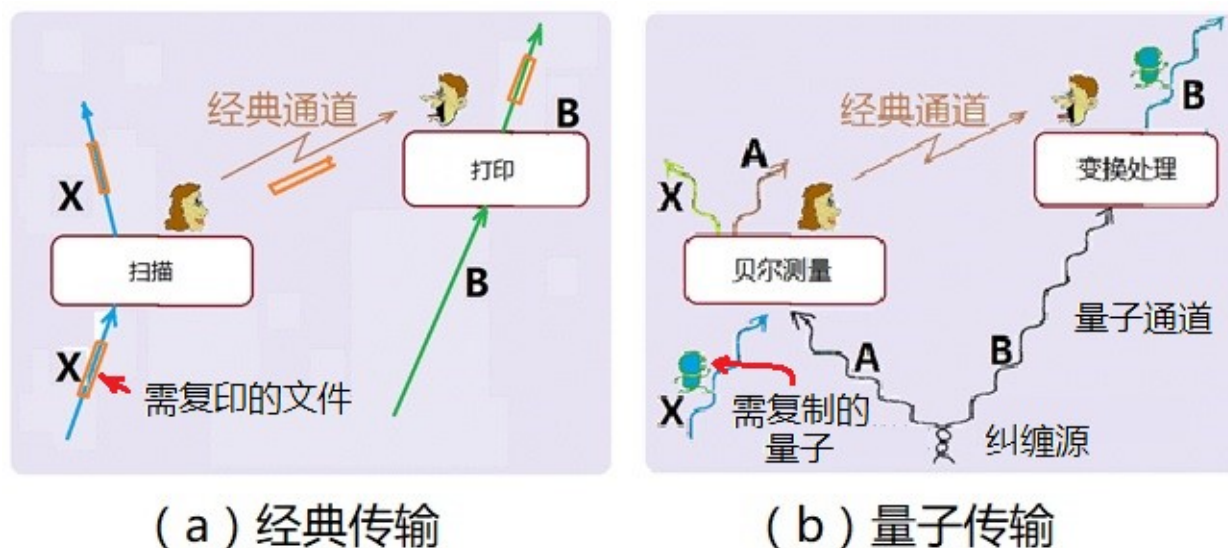


图 2-2：经典传输和量子传输

如果爱丽丝拥有纠缠光子中的 A，而 Bob 拥有 B，然后，爱丽丝对需要传送的量子态 X 和她手中的 A 作“贝尔测量”。测量后，X 的量子态塌缩了，A 也发生变化（但并非塌缩）。因为 A 和 B 互相纠缠，A 的变化立即影响 B 也发生变化。不过，Bob 无法察觉 B 的变化，

直到从经典通道得到 Alice 传来的信息。比如说，Alice 在电话中将测量结果告诉 Bob。然后，Bob 对 B 进行相应的变换处理。最后，B 成为和原来的 X 一模一样的量子态。这个传输过程完成之后，X 塌缩隐形了，X 所有的信息都传输到了 B 上，因而称之为“隐形传输”。这儿不进一步讨论“贝尔测量”以及量子隐形传输更多的详细情形，请参考笔者在“物理”杂志上量子纠缠的系列文章、科学网博文、以及出版的科普读物等^[9]。

C. 公众迷雾

公众对量子力学的误解很多，以下是几个典型例子和疑问。有的条目不需要很多解释，因为上面对物理迷雾及哥本哈根诠释的介绍已经基本回答了这些问题。到目前为止，量子力学对下面所有问题的答案都是否定的。

1. 不确定性原理，是由于微观测量时产生的误差？

不确定性原理不是因为仪器的误差，而被认为是存在于两个共轭变量之间的、互相制约的一个极限条件，是自然界的本质特性之一。主流观点认为，这种不确定性是不会随着测量仪器精度的改变而消除的。即使公式中的下限值可能有所修正，但原则上不会等于 0。

2. 爱因斯坦反对量子力学？

爱因斯坦为量子力学的建立立下不朽的功勋。他不是反对量子力学，反对的是对量子现象的解释，其原因之一是爱因斯坦牢固的经典物理世界观，二是因为量子力学本身理论上的某些缺陷和不完备。

3. 量子隐形传输意味着将来能实现《星际迷航》里人类的瞬间移动？

见本文上面对“量子态隐形传输”的介绍，它所传输的是量子态而非粒子本身。科幻电影中那种传递“大活人”的想象，即使有人认为原理上可行，也和量子态隐形传输的概念相差甚远。况且，量子态隐形传输也不是“瞬间移动”，速度上限仍然是光速。

4. 量子理论只适用于微观，不能用于宏观？

一般而言，量子理论的确是用来描述微观的物理理论，但并不是说不能用于宏观尺度，而是由于尺度相差太大，量子效应不明显，可以忽略不计。举物质波而言，德布罗意波长等于普朗克常数除以粒子的动量。普朗克常数很小，对宏观物体计算而得到的德布罗意波长比物体本身的尺度要小几十个数量级，例如，质量为 10 g，速度为 200 m/s 的子弹的德布罗意波长为 3.3×10^{-34} m，因而你不可能在宏观物体上观察到其波动性，也就谈不上波粒二象性了。

5. 量子通信的速度超过了光速？

实现量子通信需要两个通道：量子通道和经典通道，因而，通信的速度被经典通信所限制，仍然不能超过光速。至于量子纠缠之速度大大超过光速的说法（及实验），笔者认为需等待对量子纠缠机制的进一步解释。比如说有一种观点认为，电子对的纠缠态本来就是一个弥漫于整个空间的共有量子态，互相之间的关联至始至终就存在，不需要什么“传输”。总之，迄今为止，没有任何能量或信息之传播速度超过光速的实验证据。

6. 量子力学证明了灵魂存在？

正统量子力学没有此类证明，学术文献中也没有明确的证据。但林子大了，什么鸟都有，也许极少数的物理学家有这种猜想，也只是猜想而已，胡思乱想离科学还有十万八千里呢！自己爱怎么想无所谓。每个人有思考的自由，但并不等于科学。某些科学界主流未认可的东西，却被“伪科普”加新闻媒体炒作成了“科学证据”。

7. 根据量子力学：没有意识就没有客观世界？

此类说法不是量子力学的结论，而是来自于某人的演讲，比如“客观世界很有可能并不存在！”等等。固然，科学研究无禁区，他山之石往往可以攻玉，量子力学中的方法和概念当然可以被用于其他领域的研究。不过，量子力学理论本身并没有认为客观世界要依赖于主观意识而存在，那是对量子力学主流诠释的误解。测量造成“波函数塌缩”，不能曲解为：意识造成“波函数塌缩”。

8. 灵魂就是量子信息？

也是源自于某些“科普”演讲、以及媒体对国外消息的夸张和不实报道、公众的想象等。迄今为止，量子力学并未给灵魂的存在提供任何证据，当今科技界热门研究的量子信息技术，与灵魂也完全不搭架。

9. 量子力学是唯心主义？

量子力学的哥本哈根诠释，强调测量行为对微观被测对象的影响，但并不否认客观世界之存在，不等同于唯心主义。

10. 人脑中的电子和宇宙中某处的电子量子纠缠？

目前来说，这不是量子力学的结论，而是来自于某些人的超凡想象力，或者是某些其他领域的名人们，用他们似懂非懂的所谓“量子力学”来误导大众的无稽之谈。

参考文献：

【1】M. Planck, Verhandl. Dtsch. phys. Ges., 2, 237. 1900. On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal. Spectrum.

【2】光电效应: Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light. *Annalen der Physik* 17 (1905): 132-148.

<http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/100>

【3】波尔原子模型: Niels Bohr, "On the Constitution of Atoms and Molecules" in *Philosophical Magazine* 26: 1 – 25, 476 – 502, 857 – 875 (1913).

【4】德布罗意波: *Recherches sur la théorie des quanta* (Researches on the quantum theory), Thesis, Paris, 1924.

【5】薛定谔方程: Schrödinger, E. (1926). "An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules". *Physical Review* 28 (6): 1049–1070.

【6】隧穿效应:

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E7%A9%BF%E9%9A%A7%E6%95%88%E6%87%89>

【7】EPR 佯谬: A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can Quantum Mechanics description of physical reality be considered complete?", *Phys. Rev.* 47, 777

【8】哥本哈根诠释: https://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation

【9】张天蓉. 世纪幽灵-走近量子纠缠[M].合肥: 中国科技大学出版社, 2013 年 6 月。