

1、量子的本质

量子不是某种粒子，也不是只针对某一种粒子，而是一个**量化离散**的概念，包含**物质组成的量的离散**，譬如光子的数量，电子的数量；另一个是**物理量的离散变化**，如电子伏特（一种能量单位）只能为它的 $1/4$ 、 $1/9$ 、 $1/16$ ……

发现离散变化是微观世界的本质后，科学家们创立了一门准确描述微观世界的物理学理论，就是“量子力学”，它的由来只是**强调离散变化在微观世界中的普遍性**。而之前的牛顿力学称为“经典力学”。

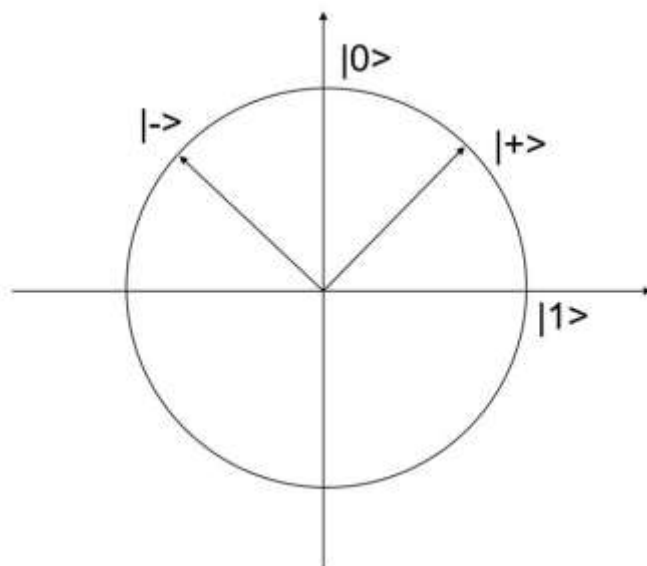
与量子力学紧密相关的学科——量子信息，主要分为量子通信和量子计算。量子力学中三大违背宏观世界经验常识的要点是：叠加、测量和纠缠，

2、叠加

如果一个体系能够处于 $|0\rangle$ 和处于 $|1\rangle$ ，那么它也能处于任何一个 $a|0\rangle + b|1\rangle$ ，这样的状态称为“叠加态”，但 a 、 b 须满足： $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 。这意味着电子可以同时位于两个地方，这个需要后面的测量才能解释得清楚。

在叠加原理的框架下，经典的比特变成了“量子比特”。也就是说，这个体系的状态不是只能取“0”或取“1”了，而是可以取任意的 $a|0\rangle + b|1\rangle$ 状态。从两个选择到无穷多个选择，这是个巨大的扩展，它包含了比一个经典比特大得多的信息量。

实际上，狄拉克在发明这个 $|\rangle$ 这个符号时，是为了联想到矢量，以后就将量子力学状态的矢量成为“态矢量”。有了它矢量这个概念，再来看 0、1 信息线性叠加的结果，如下图所示：



任意一点信息互相“平等”

从上图可见，量子信息包含了无数的信息，且互相平等。

3、测量

在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的基组中测量 $|0\rangle$ ，必然得到 $|0\rangle$ 。然而在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的基组中测量 $a|0\rangle + b|1\rangle$ ，其中 a 和 b 都不等于 0，也就是说这个态既不是 $|0\rangle$ 也不是 $|1\rangle$ ，会怎么样？答案

是“坍塌”最终结果是会以 $|a|^2$ 的概率变成 $|0\rangle$ ，以 $|b|^2$ 的概率变成 $|1\rangle$ ，由于只能有一种情况出现，这也就解释了 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 的原因。而之前说一个电子可以同时位于两个地方，其实是指发现它以一定的概率发现它位于这里，以一定的概率发现它位于那里。不过在第一次测量之后，得到了一种结果，以后的测量就不会改变这个结果了，即**该结果出现的概率变为 1!**

说到概率，经典力学中的一切演化都是决定性的，即同样的原因必然导致同样的结果（可能有人会问，那抛掷硬币为何有概率因素呢，其实，经典力学中一切有概率的问题都反映为信息的缺乏）但是**量子力学却是真正的随机**，即同样的测量过程会得到不同的结果。给你一个处于 $|+\rangle$ 的粒子，问你有什么办法保证这次在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的基组中测量它何时得到 $|0\rangle$ ，回答只能是：没有任何办法。这种**随机性是内在的，是量子力学的一种本质特征!**

4、纠缠

若 $F(x, y)$ 可以分解成 $f(x)$ 和 $g(y)$ 的乘积，则称 $F(x, y)$ 是可以“分离变量”的，否则不能分离变量，也可以推广到多元。类似的，**粒子体系下的态函数（态矢量）也可以根据能否分离变量分为直积态和纠缠态**。用类似 $|00\rangle$ 的狄拉克符号来表示两粒子体系的状态，其中第一个符号表示粒子 1 所处的状态，第二个符号表示粒子 2 所处的状态，还有 $|01\rangle$ 、 $|10\rangle$ 、 $|11\rangle$ 三种状态，这些状态都处于直积态，换句话说，你在测量粒子 1 的时候，不会影响粒子 2 的状态，这就是分离变量的结果。而纠缠态，譬如 $|\beta 00\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ 就属于纠缠态（因为 $|\beta 00\rangle$ 无法分离成粒子 1 和粒子 2 的乘积），这就导致了在测量 $|\beta 00\rangle$ 时，**会以一半的概率使整个体系变成 $|00\rangle$ ，此时两个粒子都处于自己的 $|0\rangle$ ；以一半的概率使整个体系变成 $|11\rangle$ ，此时两个粒子都处于自己的 $|1\rangle$** 。如果以 $(|01\rangle + |10\rangle)/\sqrt{2}$ 作为例子，那么测量粒子 1 的状态，会以一半的概率发现粒子 1 处于 0，粒子 2 处于 1，一半概率发现粒子 1 处于 1，粒子 2 处于 0。

历史上关于纠缠理论的研究其中一个最为著名，爱因斯坦和波尔的世纪之争，EPR 粒子（EPR 粒子对是处于纠缠态的两个粒子，很难制造出这样的条件）对都处于 $|\beta 00\rangle$ 态，将它们在空间上分开任意远，然后测量粒子 1，如果为 0，那么可以立即知道粒子 2 目前也处于 0 位，这是纠缠理论的正确现象，而爱因斯坦认为粒子 1 在测量出结果以后，必然像粒子 2 发射了超过光速的信号，使得粒子 2 状态得到改变，他认为这是不可能的，接着，波尔反驳，认为，粒子对是一个整体，不能认为将其空间上分开，就将整体分裂，它们之间根本无需信息传递，也没有任何作用，就是一个整体！最后的结果是，**量子纠缠是一个被理论预言后确实观察到了的现象。**