# 第十七章 4 概率波

## 经典的粒子和经典的波

在分析物理现象、建立科学理论时，对于研究对象，物理学家建立了粒子模型和波动模型。利用这些模型，他们解释了众多科学问题，例如用波动模型解释了声音的干涉和衍射，用粒子模型的分子动理论解释了气体的压强，等等。这一切使人们形成了一种观念，物质要么具有粒子性，要么具有波动性，非此即彼！

在经典物理学的观念中，粒子有一定的空间大小，有一定的质量，有的还具有电荷。由于它们的运动遵从牛顿第二定律，所以只要已知它们的初始位置和初始速度，就可以准确地确定以后任意时刻的位置和速度，进而在空间描绘出确定的轨迹。虽然可能因为问题太复杂，当今的数学工具还解决不了，或者因为涉及的对象太多、计算量太大，现代的计算机也不能胜任，但从理论上说，这都是技术问题，总有一天能解决的。因此，任意时刻的确定的**位置**和**速度**以及时空中的确定的**轨道**，是经典物理学中粒子运动的基本特征。

与经典的粗子不同，经典的波在空间是弥散开来的，其特征是具有**频率**和**波长**，也就是具有时空的周期性。

显而易见，在经典物理学中，波和粒子是两种不同的研究对象，具有非常不同的表现。

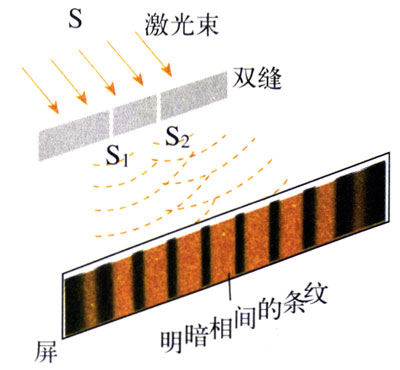
那么，为什么对于光和电子、质子等粒子，这两种互不相容的属性又能“集于一身”呢？

## 概率波

为了了解光波和物质波是什么样的波，我们还是从光的波粒二象性入手。

光的双缝干涉实验如图17.4-1所示。从光源S发出的光通过双缝S1和S2后在屏上形成明暗条纹。按照光的波动理论，条纹的明暗表示到达屏上的光的强度不同。按照光子的模型，每个同频光子都带有相同的一份能量，所以条纹明暗的分布应该是到达屏上的光子数目多少的分布。因此，光的强弱对应于光子的数目，即明纹处到达的光子数多，暗纹处到达的光子数少。

**图17.4-1 光的双缝干涉**



这是否可以认为，在一束光中，是光子之间的相互作用使它表现出了波动性，而不是光子本身就具有波动性呢？

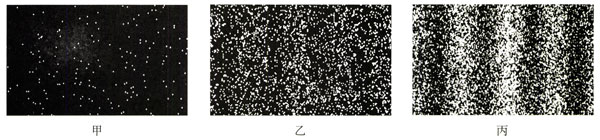
为此，我们可以使光源S非常弱，以至它在前一个光子到达屏幕之后才发射第二个光子，这样就排除了光子之间相互作用的可能性。实验结果表明，尽管单个光子的落点不可预知，但是长时间曝光之后仍然得到图17.4-1所示的条纹分布。可见，光的波动性不是光子之间的相互作用引起的，而是光子自身固有的性质。

现在的问题是，一个光子通过狭缝后到底落在屏上的哪一点呢？对此，1926年德国物理学家玻恩（M．Born，1882-1970）指出：虽然不能肯定某个光子落在哪一点，但由屏上各处明暗不同这个事实可以推知，光子落在各点的概率是不一样的，即光子落在明纹处的概率大，落在暗纹处的概率小。这就是说，光子在空间出现的概率可以通过波动的规律确定。所以，从光子的概念上看，光波是一种**概率波（ probability wave）**。

对于电子和其他微观粒子，由于同样具有波粒二象性，所以与它们相联系的物质波也是概率波。也就是说，单个粒子的位置是不确定的，但在某点附近出现的概率的大小可以由波动的规律确定。对于大量粒子，这种概率分布导致确定的宏观结果，例如衍射条纹的分布等。图17.4-2是电子通过双缝的结果。图甲表示100多个电子通过双缝后的干涉图样，可以看到每一个电子都是一个点，体现了电子的粒子性。图乙、丙分别表示3 000多个、70 000多个电子通过双缝后的干涉图样。随着电子数的增加，规则的条纹越来越明显。

我们早已了解概率的概念。例如，抛出的硬币回落时某面向上的概率等。但是，在抛掷硬币这类宏观实验中观察到的概率，与量子理论中的概率有重要区别。

原则上，只要我们对抛硬币时手指用力的大小、方向、抛出的时机，以及硬币的高度、桌面和硬币的弹性等有足够多的信息，就有可能用牛顿物理学预言出具体的一次抛掷的结果。但是，对于量子事件，甚至原则上就是不可预言的：“大自然自己也不知道她下一步要做什么。”



**图17.4-2 电子干涉条纹对概率波的验证**

## 问题与练习

1．有人说光的波动性是因为光子之间的相互作用的结果，你认为对吗？可以通过一个怎样的实验来说明你的观点？

2．在光的双缝干涉实验中，某光子打在光屏上的落点能预测吗？大量的光子打在光屏上的落点是否有规律？请用概率波的观点解释双缝干涉图样的形成。

3．我们能感知光现象，是因为我们接收到了一定能量的光。一个频率是106 Hz的无线电波的光子的能量是多大？一个频率为6×1014 Hz的绿色光子和1018 Hz的γ光子的能量各是多大？请结合以上光子能量的大小，从概率波的角度说明：为什么低频电磁波的波动性显著而高频电磁波的粒子性显著。