

## 194 波粒二象性

### 主题

我们来回顾一下维基百科中的定义：

波粒二象性（wave-particle duality）是量子力学中的概念。它的意思是，每一个粒子或量子实体既可以描述为粒子，也可以描述为波。它表明，经典的“粒子”或“波”的概念都无法完备地描述量子尺度的物体的行为。

波粒二象性是量子力学的观念。根据这一观念，经典的波的性质和经典的粒子的性质必定也表现在量子物理学中所研究的物体上。经典的波在空间传播。它们通过叠加会相互削弱或加强，可以同时出现在不同的地方，因而有不同的效果。经典粒子在某一时刻只能出现在某一地方。这两个性质看上去是相互排斥的。

### 负担

在学生时代，当我听到波粒二象性时，我就感到对它难以理解。它到底是什么意思？有些问题是否需要作一解释？

1. 电子、质子或其他“量子实体”所表现的行为初次看来是矛盾的。然而，后来人们发现，这并没有实际的矛盾，因为这是二象性的表现。你能理解这一解释吗？也许你会认为不大理解，但在考试中你会知道怎么说。

问题很显然，人们假定，我们只能考虑两个相互排斥的模型中的其中一个。

●电子（或质子）是“粒子”。然而，什么是粒子？它是一个小物体，一个其位置可以用坐标中的一个点来表示的小物体。它不是质心的位置，而是整个粒子的“位置”。因此，我们只能把它想象为一个点状的粒子。

●或者说，电子是波。通常，波的概念是这样的：波对应着波的载体，例如，水或空气。波在波的载体上或波的载体中传播，一种状态变化的传播。根据其名称，它被想象为象波一样的东西，上下起伏，有大有小，具有周期性（但不具有严格的周期性）。波具有广延性，有长度，也有宽度（在绳子上的波或表面波是例外）。波具有空间广延性，这是显然的。然而，对于持质点力学观点的特殊的物理学家们来说，必须强调波不是点状物。请看上面所引用的那句话：波“……可以同时出现在不同的地方。”我们对此作何解释？

由于这两个模型看上去确实不吻合，因此有必要作一些说明。因此，人们会说，这是波粒二象性。

对于学生来说，他们会感到很失望，因为“波粒二象性”并不能用来解释什么。它只不过是逻辑上不自洽的一种委婉说法。

然而，如果我们一开始不将电子或质子当作小的粒子，问题不会发生。

人们也许会认为，这没有别的办法，粒子和波仅仅是对人类思想的分类，只不过在这里这种分类出了点问题。我的意思是，它们实际上是对物理学家们的思维分类的结果。

对于那些没有经过物理学训练的人来说，他们会有其他模型。这些模型也能被应用于对物理学中叫做量子实体的研究中。

把物体想象为不能用一个空间坐标来表示而需要用一种分布来表示，这难道就真的有这么难吗？人们都知道物体处于某处，但这并不需要现在的物体与后来的物体是相同的“个体”。想象一下云或火焰，或在水面上的一列波。这些物体在某处，但并不在某一点，而是扩散的，其中一个还会呈现干涉现象。我们会说这是波粒二象性吗？

2. 人们通常会说，电子（或质子）**有时**表现为粒子，**有时**表现为波。这样的表述也许基于这样的事实，只有当人们在测量时电子才表现出这样的性质：人们看到了干涉图样，同时也观察到了检测器中的象素。在这里，人们是否真的清楚地看到了这个双重性质？情况并不是这样。这是因为，人们必定会问：这是哪个电子在哪个时刻的性质？干涉图样源自电子被“检测”前的波函数。然后才会出现黑色的象素。因此，这两种性质对应于电子的不同状态：一种是动量确定而位置不确定的状态，另一种是位置确定而动量不确定的状态。由此，人们就得出这样的结论：电子有时表现为这样，有时表现为那样。更清楚地说是这样的：电子可以处于不同的状态，实际上可以处于无数个不同的状态。在这无数个不同的状态中有两个极端的状态：其中一个是位置确定的状态，另一个是动量确定的状态。

3. 我忍不住要对维基百科中的定义作一翻文字上的分析（维基百科中的文字表达是人们共同合作的结果。因此，其结论必须具有一致性。）在我看来，这样的表述在这样的语境下对我们的理解是一点帮助也没有的。让我们先来分析“duality”这个词的一般含义。在德文中，duality 表示一种观念（Erkenntnis）。我不想用德文来解释这个词的含义，而想用其他文字来看看它是否表示一种观念。然而，结果并不是这样。在英文中，它表示一种概念（concept）；在法文和荷兰文中，它表示一种原理（principe, beginsel）；在西班牙文中，它表示一种现

象 (fenómeno); 在中文中, 它表示一种行为。在这些解释当中, 我喜欢中文的那种。它根本没有“性质”的意思。

看看哲学家和神学家是怎样理解这个词的, 也很有意思。这也会引发我们对它的质疑。

让我们再来阅读这样一段文字: 量子物体具有粒子和波所具有的“相同”性质。相同并不意味着同时相同。换成其他文字来表达也是很有意思的。我们来看用法文所表达的这段文字: 因此, 这些粒子有时表现为粒子的性质, 有时表现为波的性质, 即不同时表现这两种性质。

最后, 在物理课中人们经常会用“赋予”(attribute)这个词来掩饰一下: 将粒子性和波动性赋予量子物体。它们**没有**这些性质, 但这些性质赋予给了它们。什么地方我们也可以运用赋予这个词? 我建议, 对于其他情况我们还是咨询一下林格伊 (Linguee) 网站。

## 历史

在 19 世纪末, 人们给物质分了两类: 一类是作为以太波的光, 另一类是作为微粒的电子。

当人们明白电子也显示出干涉现象和光也可以量子化时, 光和电子具有奇怪的二象性这一观念就产生了。

不久, 发现了两个规律: 1926 年发现了薛定谔方程, 1927 年发现了不确定原理, 这个问题便解决了。

也许这一历史发展的先后顺序决定了物理教学的模式。如果波函数一开始先出现, 波粒二象性这一观念也许不会出现。

## 建议

避免说一些会妨碍你以后理解的词。因此,

- 不要使用二象性这样的词, 也不要使用相应的概念;
- 不要去强调“粒子是点状物”这句话的重要性;
- 不要把干涉与正弦波作必然的联系。

我们想象, 电子是这样一个人物, 它的电荷为  $e$ , 质量为  $m_e$ 。有时它有点大, 有时又变小了; 有时是“单色的”, 有时不是这样, 但总是会发生干涉。

$\Psi$  这个量是位置和时刻的函数 (薛定谔方程的解)。这个函数包含了我们想

说的所有信息（只要不涉及粒子物理学和标准模型）。在解释波函数时，我们没有必要运用一些神秘的术语。

*Friedrich Herrmann*

（陈敏华，2020年11月12日译毕于浙江省绍兴市柯桥区鉴湖中学）