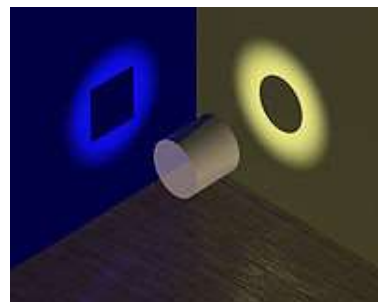


# 维基百科

# 波粒二象性

维基百科，自由的百科全书

波粒二象性（英语：wave-particle duality）指的是以经典力学的观点来看待非相对论量子力学所描述的微观粒子的话，微观粒子会同时显示出经典上的波动性与粒子性。比如说，经典力学把波函数的位置观测结果必为明确位置视为“粒子性”；一方面又把概率幅具有的线性叠加性视为“波动性”。



波粒二象性示意图说明，从不同角度观察同样一件物体，可以看到两种迥然不同的图样。

## 目录

### 理论概述

#### “波”和“粒子”的数学关系

### 历史

### 发展里程碑

17世纪：惠更斯、牛顿

19世纪：杨、费涅尔、麦克斯韦、赫兹

普朗克黑体辐射定律

爱因斯坦与光子

德布罗意与物质波

海森堡不确定性原理

### 大尺寸物体的波动性

### 应用

### 学术进展

光同时显现波动性和粒子性

### 参阅

### 注释

### 参考文献

## 理论概述

经典力学的研究对象总是被明确区分为“纯”粒子和“纯”波动。前者组成了我们常说的“物质”，后者的典型例子则是光波。但（不含狭义相对论的）量子力学认为自然界的基本粒子，如光子、电子或是质子，都能用薛定谔方程<sup>[注 1]</sup>来描述。这个方程的解即为波函数，其绝对值平方表示粒子在某一处被发现的概率密度。更一般的来说，波函数是可以直观视为观测到粒子为特定位置的概率幅<sup>[註 2]</sup>，概率幅具有叠加性，它们就像波，描述不同途径的概率幅可以用叠加的方式互相干涉。<sup>[1]</sup>:7

日常生活中观察不到物体的“波动性”，是因为他们皆质量太大，导致德布罗意波长比可观察的极限尺寸要小很多，因此可能发生波动性质的尺寸在日常生活经验范围之外。这也是为什么经典力学能够令人满意地解释“自然现象”。反之，对于基本粒子来说，它们的质量和尺寸局限于量子力学所描述的范围之内，因而与我们所习惯的图景相差甚远。<sup>[2]</sup>:85-87

## “波”和“粒子”的数学关系

不考虑狭义相对论的状况下，物质的粒子性可由能量 ***E*** 和动量 ***p*** 刻画。如果若此粒子的波函数又为周期波，则波的特征则由频率 ***ν*** 和波长 ***λ*** 表达，这两组物理量由普朗克常数 ***h*** 联系在一起：

$$\nu = \frac{E}{h}、$$

$$\lambda = \frac{h}{p}。$$

## 历史

在十九世纪后期，日臻成熟的原子论逐渐盛行，根据原子理论的看法，物质都是由微小的粒子——原子构成，例如，约瑟夫·汤姆孙的阴极射线实验证实，电流是由被称为电子的粒子所组成。在那时，物理学者认为大多数的物质是由粒子所组成。与此同时，波动论已经被相当深入地研究，包括干涉和衍射等现象。由于光波在杨氏双缝实验、夫琅禾费衍射实验中所展现出的特性，明显地说明它是一种波动。

不过在二十世纪来临之时，这些观点面临了一些挑战。1905年，阿尔伯特·爱因斯坦对于光电效应用光子的概念来解释，物理学者开始意识到光波具有波动和粒子的双重性质。1924年，路易·德布罗意提出“物质波”假说，他主张，“一切物质”都具有波粒二象性，即具有波动和粒子的双重性质。根据德布罗意假说，电子是应该会具有干涉和衍射等波动现象。1927年，克林顿·戴维森与雷斯特·革末设计与完成的戴维森-革末实验成功证实了德布罗意假说。<sup>[2]:17–21, 61–62, 64–68</sup>

## 发展里程碑

### 17世纪：惠更斯、牛顿

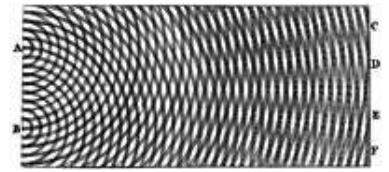
较为完全的光理论最早是由克里斯蒂安·惠更斯发展成型的，他提出了一种光波动说。使用这理论，他能够解释光波如何因相互干涉而形成波前，在波前的每一点可以认为是产生球面次波的点波源，而以后任何时刻的波前则可看作是这些次波的包络。<sup>[3]:141</sup>从他的原理，可以给出波的直线传播与球面传播的定性解释，并且推导出反射定律与折射定律，但是他并不能解释，为什么当光波遇到边缘、孔径或狭缝时，会偏离直线传播，即衍射效应。惠更斯假定次波只会朝前方传播，而不会朝后方传播。他并没有解释为什么会发生这种物理行为。<sup>[4]:104–105</sup>稍后，艾萨克·牛顿提出了光微粒说。他认为光是由非常奥妙的微粒组成，遵守运动定律。这可以合理解释光的直线移动和反射性质。但是，对于光的折射与衍射性质，牛顿的解释并不很令人满意，他遭遇到较大的困难。<sup>[5]:15–21</sup>

由于牛顿无与伦比的学术地位，他的粒子理论在一个多世纪内无人敢于挑战，而惠更斯的理论则渐渐为人淡忘。直到19世纪初衍射现象被发现，光的波动理论才重新得到承认。而光的波动性与粒子性的争论从未平息。<sup>[6]:87, 129–130</sup>

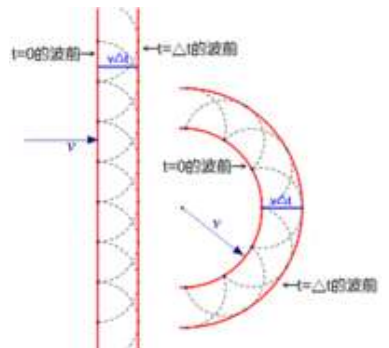
在后来的18世纪，认可波动学说的知名科学家里有莱昂哈德·欧拉。但他们只是认可波动说的理论自洽性，并不偏袒微粒学说和波动学说的任何一方。欧拉以振动持续时间的不同来解释不同的颜色机理。欧拉也有自己的色散理论，但是经过英国光学仪器商焦恩·多朗德的反复试验，表明欧拉和牛顿的理论都有瑕疵。<sup>[7][8]:102–103</sup>

### 19世纪：杨、费涅尔、麦克斯韦、赫兹

十九世纪早期，托马斯·杨和奥古斯丁·菲涅耳分别做出重大贡献。托马斯·杨完成的双缝实验显示出，衍射光波遵守叠加原理，这是牛顿的光微粒说无法预测的一种波动行为。这实验确切地证实了光的波动性质。奥古斯丁·菲涅耳提出惠更斯-菲涅耳原理，在惠更斯原理的基础上假定次波与次波之间会彼此发生



托马斯·杨做双缝实验得到的干涉图样。



按照惠更斯原理，波的直线传播与球面传播。

干涉，又假定次波的波幅与方向有关。惠更斯-菲涅耳原理能够解释光波的朝前方传播与衍射现象。<sup>[4]:444-446</sup>光波动说并没有立刻取代光微粒说。但是，到了十九世纪中期，光波动说开始主导科学思潮，因为它能够说明偏振现象的机制，这是光微粒说所不能够的。

同世纪后期，詹姆斯·麦克斯韦将电磁学的理论加以整合，提出麦克斯韦方程组。这方程组能够分析电磁学的种种现象。从这方程组，他推导出电磁波方程。应用电磁波方程计算获得的电磁波波速等于做实验测量到的光波速度。麦克斯韦于是猜测光波就是电磁波。电磁学和光学因此联结成统一理论。1888年，海因里希·赫兹做实验发射并接收到麦克斯韦预言的电磁波，证实麦克斯韦的猜测正确无误。从这时，光波动说开始被广泛认可。<sup>[5]:359-360</sup>

## 普朗克黑体辐射定律

1901年，马克斯·普朗克发表了一份研究报告，他对于黑体在平衡状况的发射光波频谱的预测，完全符合实验数据。在这份报告里，他做出特别数学假说，将谐振子（组成黑体墙壁表面的原子）所发射或吸收的电磁辐射能量加以量子化，他称呼这种离散能量为量子，与辐射频率  $\nu$  的关系式为

$$E = h\nu ;$$

其中，***E*** 是离散能量，***h*** 是普朗克常数。

这就是著名的普朗克关系式。从普朗克的假说，普朗克推导出一条黑体能量分布定律，称为普朗克黑体辐射定律。<sup>[6]:212</sup>

## 爱因斯坦与光子

光电效应指的是，照射光束于金属表面会使其发射出电子的效应，发射出的电子称为光电子。为了产生光电效应，光频率必须超过金属物质的特征频率，称为其“底限频率”。<sup>[9]:1060-1063</sup><sup>[10]:1240-1246</sup>举例而言，照射辐照度很微弱的蓝光束于钾金属表面，只要频率大于其底限频率，就能使其发射出光电子，但是无论辐照度多么强烈的红光束，一旦频率小于钾金属的极限频率，就无法促使其发射出光电子。根据光的波动说，光波的辐照度或波幅对应于所携带的能量，因而辐照度很强烈的光束一定能提供更多能量将电子逐出。然而事实与经典理论预期恰巧相反。

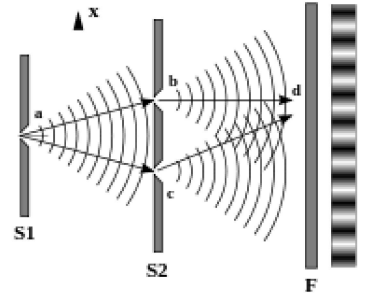
1905年，爱因斯坦对于光电效应给出解释。他将光束描述为一群离散的量子，现称为光子，而不是连续性波动。从普朗克黑体辐射定律，爱因斯坦推论，组成光束的每一个光子所拥有的能量 ***E*** 等于频率  $\nu$  乘以一个常数，即普朗克常数，他提出了“爱因斯坦光电方程”：

$$h\nu = K_{max} + W$$

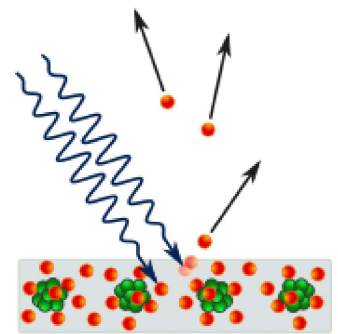
其中，***K*<sub>max</sub>** 是逃逸电子的最大动能，***W*** 是逸出功。

假若光子的频率大于物质的极限频率，则这光子拥有足够能量来克服逸出功，使得一个电子逃逸，造成光电效应。爱因斯坦的论述解释了为什么光电子的能量只与频率有关，而与辐照度无关。虽然蓝光的辐照度很微弱，只要频率足够高，则会产生一些高能量光子来促使束缚电子逃逸。尽管红光的辐照度很强烈，由于频率太低，无法给出任何高能量光子来促使束缚电子逃逸。

1916年，美国物理学者罗伯特·密立根做实验证实了爱因斯坦关于光电效应的理论。从麦克斯韦方程组，无法推导出普朗克与爱因斯坦分别提出的这两个非经典论述。物理学者被迫承认，除了波动性质以外，光也具有粒子性质。<sup>[11]:2</sup>



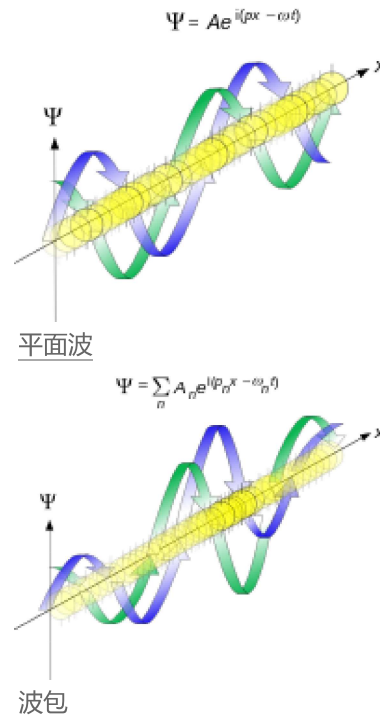
在双缝实验里，从光源 **a** 传播出来的相干光束，照射在一块刻有两条狭缝 **b** 和 **c** 的不透明挡板 **S2**。在挡板的后面，摆设了摄影胶卷或某种侦测屏 **F**，用来纪录到达 **F** 的任何位置 **d** 的光束。最右边黑白相间的条纹，显示出光束在侦测屏 **F** 的干涉图样。



光电效应示意图：来自左上方的光子冲撞到金属表面，将电子逐出金属表面，并且向右上方移去。

由于光具有波粒二象性，因此可用波动概念来分析光电效应而完全不需用到光子的概念。1969年，威利斯·兰姆与马兰·斯考立（Marlan Scully）应用在原子内部束缚电子的能级跃迁机制证明了这论述。<sup>[12]</sup>

## 德布罗意与物质波



德布罗意波的1维传播，复值波幅的实部以蓝色表示、虚部以绿色表示。在某位置找到粒子的概率（以颜色的不透明度表示）呈波形状延展。

基于普朗克关系式和爱因斯坦的光电效应理论的成功，1924年，路易·德布罗意在他的博士论文中提出电子除了具有粒子的性质也可以有波动性质，也就是德布罗意假说。他认为，所有物质都拥有类波动属性。他将物质的波长  $\lambda$  和动量  $p$  联系为<sup>[6]:234</sup>

$$\lambda = h/p。$$

这可以说是对先前爱因斯坦等式的拓展，因为光子的动量为  $p = E/c$ ，而  $\lambda = c/\nu$ ；其中， $c$  是光速。

将上述式子结合波数 $k \stackrel{def}{=} 2\pi/\lambda$ 的定义，可以得出德布罗意关系式，即

$$p = \hbar k。$$

三年后，通过两个独立的电子衍射实验，德布罗意的方程被证实可以用来描述电子的量子行为。在阿伯丁大学，乔治·汤姆孙将电子束照射穿过薄金属片，并且观察到预测的干涉样式。在贝尔实验室，克林顿·戴维森和雷斯特·革末做实验将低速电子入射于镍晶体，取得电子的衍射图样，这些实验结果符合理论预测，表明了电子的确具有波的性质。

## 海森堡不确定性原理

1927年，维尔纳·海森堡提出海森堡不确定性原理，他表明<sup>[6]:232-233</sup>

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}；$$

其中， $\Delta$  表示标准差，一种不确定性的量度， $x$ 、 $p$  分别是粒子的位置与动量。

海森堡原本解释他的不确定性原理为测量动作的后果：准确地测量粒子的位置会搅扰其动量，反之亦然。他并且给出一个思想实验为范例，即著名的海森堡显微镜实验，来说明电子位置和动量的不确定性。这思想实验关键地倚靠德布罗意假说为其论述。但是现今，物理学者认为，测量造成的搅扰只是其中一部分解释，不确定性存在于粒子本身，是粒子内秉的性质，在测量动作之前就已存在。

实际而言，对于不确定原理的现代解释，将尼尔斯·玻尔与海森堡主导提出的哥本哈根诠释加以延伸，更甚倚赖于粒子的波动说：就如同研讨传播于细绳的波动在某时刻所处的准确位置是毫无意义的，粒子没有完美准确的位置；同样地，就如同研讨传播于细绳地脉波的波长是毫无意义地，粒子没有完美准确的动量。此外，假设粒子的位置不确定性越小，则动量不确定性越大，反之亦然。<sup>[11]:7–12, 19–21</sup>

## 大尺寸物体的波动性

自从物理学者演示出光子与电子具有波动性质之后，对于中子、质子也完成了很多类似实验。在这些实验里，比较著名的是于1929年奥托·施特恩团队完成的氢、氦粒子束衍射实验，这实验精彩地演示出原子和分子的波动性质。<sup>[13][14]</sup>近期，关于原子、分子的类似实验显示出，更大尺寸、更复杂的粒子也具有波动性质，这在本段落会有详细说明。

1970年代，物理学者使用中子干涉仪完成了一系列实验，这些实验强调引力与波粒二象性彼此之间的关系。<sup>[15]</sup>中子是组成原子核的粒子之一，它贡献出原子核的部分质量，由此，也贡献出普通物质的部分质量。在中子干涉仪里，中子就好像量子波一样，直接感受到引力的作用。因为万物都会感受到引力的作用，包括光子在内（请参阅条目广义相对论的实验验证），这是已知的事实，这实验所获得的结果并不令人惊讶。但是，带质量费米子的量子波，处于引力场内，自我干涉的现象，尚未被实验证实。

1999年，维也纳大学研究团队观察到C<sub>60</sub> 富勒烯的衍射<sup>[16]</sup>富勒烯是相当大型与沉重的物体，原子量为720 u，德布罗意波长为2.5 μm，而分子的直径为1 nm，大约400倍大。2012年，这远场衍射实验被延伸实现于酞菁分子和比它更重的衍生物，这两种分子分别是由58和114个原子组成。在这些实验里，干涉图样的形成被实时计录，敏感度达到单独分子程度。<sup>[17]</sup>

2003年，同样维也纳研究团队演示出四苯基卟啉的波动性。这是一种延伸达2 nm、质量为614 u的生物染料。<sup>[18]</sup>在这实验里，他们使用的是一种近场塔尔博特-劳厄干涉仪。<sup>[19][20]</sup>使用这种干涉仪，他们又观察到C<sub>60</sub>F<sub>48</sub>的干涉条纹，C<sub>60</sub>F<sub>48</sub>是一种氟化巴基球，质量为1600 u，是由108个原子组成。<sup>[18]</sup>像C<sub>70</sub>富勒烯一类的大型分子具有恰当的复杂性来显示量子干涉与量子退相干，因此，物理学者能够做实验检试物体在量子-经典界限附近的物理行为。<sup>[21][22][注 3]</sup>2011年，对于质量为6910 u的分子做实验成功展示出干涉现象。<sup>[23]</sup>2013年，实验证实，质量超过10,000 u的分子也能发生干涉现象。<sup>[24]</sup>

在物理学里，长度与质量之间存在有两种基本关系。一种是广义相对论关系：粒子的史瓦西半径*r*<sub>s</sub>与质量*m*成正比：

$$r_s = 2Gm/c^2。$$

另一种是量子力学关系：粒子的康普顿波长*λ*<sub>c</sub>与质量成反比：

$$\lambda_c = h/mc。$$

普朗克质量可以定义为，当康普顿波长等于史瓦西半径乘以π时，粒子的质量：

$$m_p = \sqrt{\hbar c/G}。$$

大致而言，康普顿波长是量子效应开始变得重要时的系统长度尺寸，粒子质量越大，则康普顿波长越短。史瓦西半径是粒子变为黑洞时的其所有质量被拘束在内的圆球半径，粒子越重，史瓦西半径越大。当粒子的康普顿波长大约等于史瓦西半径时，粒子的质量大约为普朗克质量，粒子的运动行为会强烈地受到量子引力影响。

普朗克质量为2.18×10<sup>-5</sup>g，超大于所有已知基本粒子的质量；普朗克长度为1.6×10<sup>-33</sup>cm，超小于核子尺寸。从理论而言，质量大于普朗克质量的物体是否拥有德布罗意波长这个问题不很清楚；从实验而言，是无法达到的。这物体的康普顿波长会小于普朗克长度和史瓦兹半径，在这尺寸，当今物理理论可能会失效，可能需要更广义理论替代。<sup>[25]:x</sup>



2009年，[伊夫·库德](#)发布论文表示，宏观油滴弹跳于振动表面可以用来模拟波粒二象性，毫米尺寸的油滴会生成周期性波动，对于这些油滴的相互作用会引起类量子现象，例如，[双缝干涉](#)、<sup>[26]</sup>[不可预料的隧穿](#)、<sup>[27]</sup>[轨道量子化](#)、<sup>[28]</sup>[塞曼效应](#)等等。<sup>[29]</sup>

## 应用

尽管划一条界线将波粒二象性与量子力学的其它部分区分开来是一件相当困难的事，以下列出一些实际应用波粒二象性的科技：

- [电子显微镜](#)利用波粒二象性来显示样品的结构。电子的波长很短，比可见光的波长还短100000倍，可以用来观察更小的样品。电子显微镜的[分辨率](#)（约0.05纳米）远优于[光学显微镜](#)的分辨率（约200纳米）。<sup>[30]</sup>
- 类似地，[中子衍射技术](#)使用波长大约为0.1 纳米（物体内部原子之间通常的距离）的中子束来观察固体结构。

## 学术进展

### 光同时显现波动性和粒子性

一直以来，人们从未直接观测到粒子在同一时刻表现出波和粒子的形态。

2015年3月2日，来自洛桑联邦理工学院（EPFL）的研究者们发表了他们的新发现。<sup>[31]</sup>他们用射入纳米线的光脉冲的两个反向分量形成驻波，然后在附近注入一束电子，电子束因遭遇光驻波而被加速或减速，通过记录这些速度改变的区域，研究者们得以显现驻波的外观，而驻波体现了光的波动性。实验在显现光的波动性的同时，也显示了其粒子性。当电子进入驻波，它们撞击光子并改变了速度。速度上的变化表明光子和电子之间能量包（量子）的交换。这种速度上的变化以及它所暗示的能量交换表明驻波中存在的粒子行为。

主持实验的[法布利兹欧卡崩](#)认为，这表明量子力学的佯谬式的特质是可以被直接记录的，还认为像这样在纳米尺度描绘并且控制量子现象开辟了通向量子计算的新途径。他们的突破性研究发表在[自然通讯](#)。<sup>[32]</sup>

## 参阅

- [阿弗沙尔实验](#)
- [惠勒延迟选择实验](#)

## 注释

1. 严格来说，薛定谔方程只是一个[哈密顿量](#)的特征值方程，只不过是假设哈密顿量只由经典的[动能](#)和(只跟位置有关的)[势能](#)所组成而已。
2. 严格来说，[位置算子](#)并没有特征值，所以这个解释在数学上是有问题的。应该反过来说不含狭义相对论的量子力学，其[状态向量](#)都可以用一个波函数来代表。

3. 物理学者可以很容易地观察到微观物体的量子性质，但物理学者无法观察到宏观物体的量子性质。从做实验研究越来越具复杂性的物体，物理学者希望能够了解，在这两类不相容描述的界面附近，到底会出现什么样的物理行为。

## 参考文献

- Hobson, Art. *There are no particles, there are only fields*. *American Journal of Physics*. 2013, **81** (211) [2014-09-25]. doi:10.1119/1.4789885. (原始内容存档于2015-02-10) .
- French, Anthony, *An Introduction to Quantum Physics*, W. W. Norton, Inc., 1978, ISBN 9780748740789
- Born, Max; Wolf, Emil. *Principles of Optics 7th(expanded)*. Cambridge University Press. 2011. ISBN 9780521642224.
- Hecht, Eugene, *Optics 4th*, United States of America: Addison Wesley, 2002, ISBN 0-8053-8566-5 (英语)
- Whittaker, E. T., *A history of the theories of aether and electricity*. Vol 1, Nelson, London, 1951
- Roger G Newton. *From Clockwork to Crapshoot: A History of Physics*. Harvard University Press. 30 June 2009. ISBN 978-0-674-04149-3.
- 弗·卡约里. 位于章节“18世纪” → “光学” → “放弃波动学说”. *A History of Physics in Its Elementary Branches, Including the Evolution of Physical Laboratories* [物理学史]. 戴念祖 (汉译者); 范岱年 (校对者). 中国内蒙古呼和浩特市新城西街82号: 内蒙古人民出版社. 1982: 107–108 (中文(中国大陆)). (统一书号：7089-202)
- Cajori, Florian, *A history of physics in its elementary branches, including the evolution of physical laboratories*, New York: The Macmillan Company; London, Macmillan & Co., Ltd.
- Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jerl, *Fundamental of Physics 7th*, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2005, ISBN 0-471-23231-9
- Serway, Raymond; Jewett, John. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9th*. Cengage Learning. 2013. ISBN 978-1133954057.
- Vladimir B. Braginsky; Farid Ya Khalili. *Quantum Measurement*. Cambridge University Press. 25 May 1995. ISBN 978-0-521-48413-8.
- Lamb, Willis E.; Scully, Marlan O. *Photoelectric effect without photons, discussing classical field falling on quantized atomic electron*. 1969 [2013-10-04]. (原始内容存档于2013-12-03) .
- Otto Stern - Biographical. Nobelprize.org. Nobel Media. [2013-11-15]. (原始内容存档于2018-06-19) .
- Estermann, I.; Stern O. *Beugung von Molekularstrahlen*. *Zeitschrift für Physik*. 1930, **61** (1-2): 95–125. Bibcode:1930ZPhy...61...95E. doi:10.1007/BF01340293.
- R. Colella, A. W. Overhauser and S. A. Werner, *Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference*, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 1472–1474 (1975).
- Arndt, Markus; O. Nairz, J. Voss-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, A. Zeilinger. *Wave-particle duality of C<sub>60</sub>*. *Nature*. 14 October 1999, **401** (6754): 680–682 [2013-11-15]. Bibcode:1999Natur.401..680A. PMID 18494170. doi:10.1038/44348. (原始内容存档于2012-09-21) .
- Juffmann, Thomas; et al. *Real-time single-molecule imaging of quantum interference*. *Nature Nanotechnology*. 25 March 2012 [27 March 2012]. (原始内容存档于2012-03-28) .
- Hackermüller, Lucia; Stefan Uttenthaler, Klaus Hornberger, Elisabeth Reiger, Björn Brezger, Anton Zeilinger and Markus Arndt. *The wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **91** (9): 090408 [2022-01-08]. Bibcode:2003PhRvL..91i0408H. PMID 14525169. arXiv:quant-ph/0309016. doi:10.1103/PhysRevLett.91.090408. (原始内容存档于2004-09-25) .

19. Clauser, John F.; S. Li. Talbot von Lau interferometry with cold slow potassium atoms.. *Phys. Rev. A*. 1994, **49** (4): R2213–17. Bibcode:1994PhRvA..49.2213C. PMID 9910609. doi:10.1103/PhysRevA.49.R2213.
20. Brezger, Björn; Lucia Hackermüller, Stefan Uttenthaler, Julia Petschinka, Markus Arndt and Anton Zeilinger. *Matter-wave interferometer for large molecules*. *Phys. Rev. Lett.* 2002, **88** (10): 100404 [2013-11-15]. Bibcode:2002PhRvL..88j0404B. PMID 11909334. arXiv:quant-ph/0202158. doi:10.1103/PhysRevLett.88.100404. ( 原始内容存档于2016-05-21 ) .
21. Hornberger, Klaus; Stefan Uttenthaler, Björn Brezger, Lucia Hackermüller, Markus Arndt and Anton Zeilinger. *Observation of Collisional Decoherence in Interferometry*. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **90** (16): 160401 [2013-11-15]. Bibcode:2003PhRvL..90p0401H. PMID 12731960. arXiv:quant-ph/0303093. doi:10.1103/PhysRevLett.90.160401. ( 原始内容存档于2016-05-21 ) .
22. Hackermüller, Lucia; Klaus Hornberger, Björn Brezger, Anton Zeilinger and Markus Arndt. *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*. *Nature*. 2004, **427** (6976): 711–714 [2022-01-08]. Bibcode:2004Natur.427..711H. PMID 14973478. arXiv:quant-ph/0402146. doi:10.1038/nature02276. ( 原始内容存档于2004-09-25 ) .
23. Gerlich, Stefan; et al. *Quantum interference of large organic molecules*. *Nature Communications*. 2011, **2** (263). Bibcode:2011NatCo...2E.263G. PMC 3104521. PMID 21468015. doi:10.1038/ncomms1263.
24. Sandra Eibenberger, Stefan Gerlich, Markus Arndt, Marcel Mayor, Jens Tüxen. *Matter-wave interference of particles selected from a molecular library with masses exceeding 10 000 amu*. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2013-08-14, **15** (35) [2018-04-03]. ISSN 1463-9084. doi:10.1039/c3cp51500a ( 英语 ) .
25. Peter Gabriel Bergmann, *The Riddle of Gravitation*, Courier Dover Publications, 1993 ISBN 978-0-486-27378-5]
26. Y. Couder, E. Fort, *Single-Particle Diffraction and Interference at a Macroscopic Scale*, PRL 97, 154101 (2006) online ([https://heklai.pgp.fr/IMG/pdf/Couder-Fort\\_PRL\\_2006.pdf](https://heklai.pgp.fr/IMG/pdf/Couder-Fort_PRL_2006.pdf)) ( 页面存档备份 ([https://web.archive.org/web/20110721001055/https://heklai.pgp.fr/IMG/pdf/Couder-Fort\\_PRL\\_2006.pdf](https://web.archive.org/web/20110721001055/https://heklai.pgp.fr/IMG/pdf/Couder-Fort_PRL_2006.pdf)) , 存于互联网档案馆 )
27. A. Eddi, E. Fort, F. Moisy, Y. Couder, *Unpredictable Tunneling of a Classical Wave-Particle Association*, PRL 102, 240401 (2009) (<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v102/i24/e240401>) ( 页面存档备份 (<https://web.archive.org/web/20111218064242/http://prl.aps.org/abstract/PRL/v102/i24/e240401>) , 存于互联网档案馆 )
28. E. Fort, A. Eddi, A. Boudaoud, J. Moukhtar, Y. Couder, *Path-memory induced quantization of classical orbits*, PNAS October 12, 2010 vol. 107 no. 41 17515-17520 (<http://www.pnas.org/content/107/41/17515>) ( 页面存档备份 (<https://web.archive.org/web/20201025091830/http://www.pnas.org/content/107/41/17515>) , 存于互联网档案馆 )
29. <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v108/i26/e264> - Level Splitting at Macroscopic Scale
30. Erni, Rolf; Rossell, MD; Kieselowski, C; Dahmen, U. *Atomic-Resolution Imaging with a Sub-50-pm Electron Probe*. *Physical Review Letters*. 2009, **102** (9): 096101. Bibcode:2009PhRvL.102i6101E. PMID 19392535. doi:10.1103/PhysRevLett.102.096101.
31. EPFL News(2015-02-03)The first ever photograph of light as both a particle and wave
32. nature.com: Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field (Received:25 April 2014, Accepted: 27 January 2015, Published:02 March 2015)

取自 “<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=波粒二象性&oldid=74446602>”



**本页面最后修订于2022年11月5日 (星期六) 13:35。**

本站的全部文字在知识共享 署名-相同方式共享 3.0协议之条款下提供，附加条款亦可能应用。（请参阅使用条款）  
Wikipedia®和维基百科标志是维基媒体基金会的注册商标；维基™是维基媒体基金会的商标。  
维基媒体基金会是按美国国内税收法501(c)(3)登记的非营利慈善机构。