

光是粒子还是波动，亦或两者都不是？ 图片来源：harunyahya.com

（文 / Anil Ananthaswamy）据说约翰·阿奇博尔德·惠勒（John Archibald Wheeler）有句名言：“要是一天中你未发现任何奇异之事，就算不上是过了一天。”不过这话也只有惠勒说得，因为奇异在他那里司空见惯。作为20世纪顶尖的理论物理学家之一，他老人家每天打交道的，都是爱因斯坦相对论中时空弯曲的翘曲，或者量子物理中模模糊糊的不确定性和不可能发生之事，总之都是一些足以烧坏我等凡人大脑的奇异事物。

饶是如此，在1978年的某一天，连惠勒也被惊到了，他的脑海中第一次闪现出一个非常奇异的念头，去检验我们对光子行为的预期。从那时再往前推半个世纪，量子物理得出了一个令人震惊的洞见——原来光具有双重性格，有时它表现出粒子性，就像由一团离散且有确定轨迹的东西构成，有时它又示人以波动一面，形态不定，延展于空间之中。（实际上，量子世界中的任何东西都具有这样的双重性格。）那

个让惠勒绞尽脑汁的问题也由此而来：光展现出哪一面，到底由什么决定，又在何时做出选择。

惠勒提出的检验没能很快在实验室中实现，不过当实验最终完成时，得到的结果非常奇怪。现在，这个实验又被重复了一次，却只是让量子迷雾更加令人纠结。或许，是时候放弃对这些结果似是而非的理解了。忘了什么波动，扔掉什么粒子，抛弃非此即彼的信条吧！“实在”要比这更加扑朔迷离。

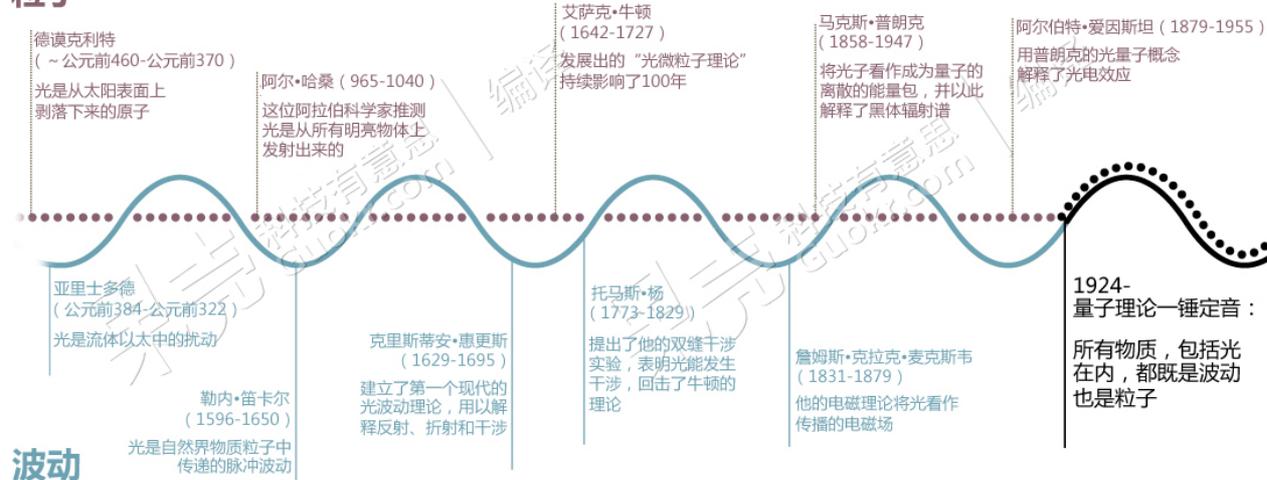
多少世纪以来，光一直照耀着我们对物质世界的认知。光的本质究竟如何，是粒子还是波动？这场争论一直可以追溯到古希腊的先哲那里，往下又以不同方式点亮了牛顿、笛卡尔和爱因斯坦的思想火花。待到20世纪的大幕拉开，这场争论可以说是势均力敌，双方都为自己的观点积累了大量论据。

# 波粒二象性的对决

©NewScientist

从古希腊开始，哲学家和物理学家就在光究竟是波动还是粒子这个问题上纠缠不休

## 粒子



光的本质是粒子还是波动？这场争论一直可以追溯到古希腊的先哲那里。来源：新科学家

## 核心之秘

量子物理以宣称双方都对的方式，解开了这个死结。表明上的证据，来自一个经典实验的量子版本。颇具戏剧色彩的是，英国物理学家托马斯·杨 (Thomas Young) 于1803年最初提出这个实验，是为了支持光的波动理论。在这个现在名为“杨氏双缝干涉”的实验中，杨在一块屏幕上刻上两条非常细的平行狭缝，然后将一束光投射其上。在距离更远的另一块屏幕上，他观察到了明暗相间的竖直条纹。这似乎毫无疑问地表明光的波动本质，因为水波也会以同样的方式衍射过堤岸上的两个狭窄隘口，然后发生干涉，在有些地方水波相互增强，发生相长干涉，有些地方水波相互抵消，发生相消干涉。

不过当你降低光的强度，直到每次只有一个光子进入整个实验装置时，奇异之旅就开始了。1905年，爱因斯坦已经明确提出，单个光子是一个粒子。（爱因斯坦提出的光量子理论，解释了光电效应，并因此获得了诺贝尔奖。）确实，如果你在两条狭缝中任何一条后面放上一台探测器，你都能听到单个光子击中探测器发出的哔哔声。可一旦你把探测器拿走，代之以一定距离之外的一块集光屏幕，你会发现当年托马斯·杨所观察到的明暗相间的图案，在屏幕上慢慢重现。这个结果似乎又表明，每个光子都是同时穿过两条狭缝的波动。同样的情况还发生在其他量子粒子身上，比如电子、中微子、原子，就连包含60个碳原子的巴基球（buckyball）也不例外。

对尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）这位丹麦伟大的量子物理先驱而言，这种“核心之秘”不过是量子理论的一条原理罢了，他称之为互补性原理（complementarity principle）。像光子这样的量子物体，就是具有互补的性质——既是波动，也是粒子，而且每次只能观测其一，不可能同时出现。那么，是什么决定着一个量子物体该如何表现呢？在1927年9月于意大利科莫湖边卡第奇研究所召开的物理学家大会上，玻尔提出了一个答案的雏形：决定者是我们自己——欲寻粒子则得粒子，往觅波动则见波动。

物理“实在”取决于观察者的意志，这个想法极大地冒犯了爱因斯坦钟爱的那些信念。在1935年与鲍里斯·波多尔斯基( Boris Podolsky )和内森·罗森( Nathan Rosen )合作的一篇文章( 即著名的EPR论文[1] )中，爱因斯坦愤然写道：“任何对‘实在’的合理定义都无法允许这样的情况存在”。他偏爱另一种观点，即“实在”中蕴含着更深入但还未被认知的层次，其中隐藏着潜在的机制“告诉”光子它将经受何种类型的实验，从而相应地改变光子的行为。

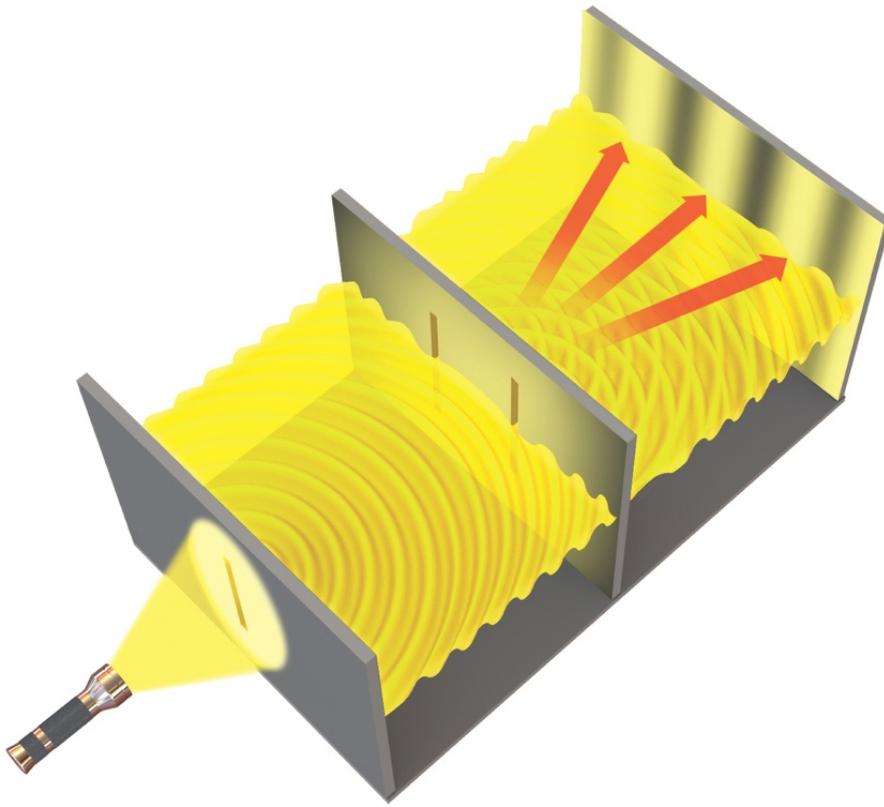
这并非无端的阴谋论调。想象一场爆炸，两块碎片朝相反的两个方向飞出。爆炸遵从动量守恒，两块碎片的质量和速度因此被关联在一起。但如果你对动量守恒一无所知，你或许会轻易得出结论，认为测量一块碎片的性质决定了另一块碎片的性质，而不知道所有结果在爆炸发生时就已经确定。量子世界是否也由类似的隐藏“实在”所控制？

惠勒的思维实验就在此时横空出世了。为了解决“什么告诉光子如何行止”这个难题，他用到了双缝干涉实验的一个升级版。在这个思维实验中，光子要从一台干涉仪( interferometer )的两条路径中任选其一。在干涉仪的另一端，这两条路径要么重新交汇，要么不再交汇。如果两条路径不交汇，即干涉仪处于“打开”状态，对光子进行测量就相当于在双缝实验的两条狭缝的一条后面放置一个探测器。你

会看到单个光子沿着这条或那条路径到达终点，两条路径完全对等，走哪条的概率都是50%。

或者，光子也可以在路径交汇后再进行测量，这种状态称为“闭合”。在这种情况下，你观察到的结果将取决于干涉仪中这两条路径的长度。如果两条路径等长，光波的波峰同时到达某个探测器，发生相长干涉，那么光子就会100%打在这个探测器上，而其他探测器中完全没有信号。但是，通过改变一条路径的长度，你可以打破波前（wave front，即光波传播最前方的波形）的同步，让该探测器处的干涉从完全相长变成完全相消，让它接收不到任何光子。这就相当于双缝干涉实验中，你从一个亮条纹移到了邻近的一个暗条纹。

惠勒所作的改动在于，他把作出“如何测量光子”这个选择的时间推迟了，我们可以等光子已经进入干涉仪之后，再来选择干涉仪是“打开”还是“闭合”。这样一来，光子就不可能“知道”究竟是该选一条路径通过还是同时通过两条路径——如果它真如设想的那样，不是粒子就是波动的话。



托马斯·杨提出的双缝干涉实验，本来是为了支持光的波动说。来源 : [howitworksdaily.com](http://howitworksdaily.com)

## 非此即彼？

惠勒的实验等了差不多30年才最终实现。为了保证实验不受任何爱因斯坦偏爱的隐藏变量的影响，你需要有一台非常大的干涉仪，大到即便以光速传播，关于选择作何测量的只言片语都无法及时传递给光子（爱因斯坦自己提出的相对论明令禁止超越光速传递信息）。2007年，阿兰·阿斯派克特（Alain Aspect）在法国帕莱索光学研究所带领他的小组，建造了一台臂长（即上文提到的干涉仪中路径的长度）达到48米的干涉仪。结果如何？**在光子即将到达探测器的最后一刻，如果他**

们选择“闭合”干涉仪，看到的就是波动干涉，如果选择“打开”干涉仪，看到的就是粒子[2]。

波动行为和粒子行为似乎的确是表征物质“实在”的一体两面，这个结论是绕不过去的。至于究竟表现出哪一面，这个由你决定。“这难道不够美妙吗？”阿斯派克特2012年在荷兰费尔德霍芬 Physics@FOM会议的一场公众演讲中惊叹道，“我认为从这个实验中，我们不可能得出其他结论。”

除非，你把事情弄得更奇怪一些。2011年12月，加拿大滑铁卢量子计算研究所的拉杜·约尼乔尤（ Radu Ionicioiu ）和澳大利亚悉尼麦考瑞大学的丹尼尔·泰尔诺（ Daniel Terno ），把惠勒的思维实验又扩展了一步[3]。他们加入的新花样是，对光子进行何种测量，是像粒子那样去测量它，还是像波动那样去测量它，这个决定本身也可以是一个量子力学过程——不是明确的非此即彼，而是此与彼的某种尚未确定的叠加态。

## 无尽的暗影

有一个办法能实现上述过程：你可以用光来控制用于探测光的接收器。你先准备好一个“控制”光子，处在两个状态的量子叠加态中——其中一种状态会将干涉仪设置成“打开”，对应于测量粒子；另一个状态则会把干涉仪设置成“闭合”，对应于测量波动。重点在于，只有

当实验中用到的、穿过干涉仪的“系统”光子被测量之后，你才去测量控制光子的状态。对你而言，系统光子穿过的是一个既“打开”又“闭合”的干涉仪；连你都不知道自己打算测量波动还是测量粒子。那么，你会测量出什么结果呢？

这一次，实验物理学家只花了几个月时间，就迎头赶上了理论物理学家飞奔的思绪。2012年，中国科学技术大学的李传峰小组、英国布里斯托大学的杰里米·奥布赖恩（Jeremy O'Brien）小组，以及法国尼斯大学的塞巴斯蒂安·坦齐利（Sébastien Tanzilli）小组，以不同的方式实现了上述实验，结果可谓惊天地泣鬼神——就连自认为已经对量子物理中的光怪陆离司空见惯的那些人，这次也着实领教了一番[4]。

答案揭晓，你看到的结果取决于控制光子。如果你只看系统光子的测量结果，而不去检验控制光子的状态——这样一来，你就永远不知道你做的是何种测量——你会看到，打在干涉仪两个探测器上的光子分布既非粒子也非波动，而是这两种结果的某种含混不清的混合。如果粒子为黑波动为白，你看到的就是某种程度的灰色。

再做一次同样的实验，只不过这次留意一下控制光子的测量结果，结果就像戴上了一副魔法眼镜。灰色清楚地分离成了黑色和白色。你能分清哪些系统光子穿过了“打开”的干涉仪，它们清楚地表现出粒子

性。而那些穿过“闭合”干涉仪的系统光子，看起来就像是波动一样。  
你选择对控制光子做哪一种测量，系统光子就会展现出相应的“颜色”。

还有更奇怪的。量子力学不仅允许你把控制光子设置成两个状态的等概率混合，还允许你把两个状态按不同比例混合在一起。这就相当于，你可以把干涉仪设置成70%的时间“打开”，30%的时间“闭合”。如果我们测量一些通过这台干涉仪的系统光子，先不戴上魔法眼镜，我们又会看到含混不清的信号——但这一次，灰色的程度会更偏向于粒子的“黑色”，偏离波动的“白色”。一旦戴上魔法眼镜，我们就会看到70%的系统光子明显表现出粒子性，剩下的30%则表现出波动性。

从某种意义上说，上述结果巩固了玻尔对量子“实在”的看法。代表测量本质的控制光子的状态，和代表物质“实在”的系统光子的状态之间，存在一种紧密的关联。进行更多的粒子测量，结果就会更偏向于粒子，反之亦如是。就像在更早的实验中得出的结论一样，爱因斯坦设想中的隐藏变量无法解释这些实验结果。

但从另一个角度来看，争论仍在继续。李传峰解释说：“我们的实验打消了互补性原理所设定的常规边界。”约尼乔尤也同意这种观点。

“从粒子性到波动性，就像一条连续光谱，互补性原理只揭示了黑白两端，”他说，“这一实验让我们看到了中间的灰色地带。”

那么,是不是说玻尔错了?德国马普量子光学研究所的约翰尼斯·科夫勒 ( Johannes Kofler ) 并不这么认为,“我真的非常非常肯定,玻尔会完全接受这些实验的结果。”互补性原理是量子力学“哥本哈根解释”( Copenhagen interpretation ) 的核心所在,得名于玻尔的故乡。该解释本质上认为,我们之所以会在这样的结果中看到矛盾,是因为我们的心智已经被以经典方式运行的宏观宇宙所驯服,缺乏直观认知量子世界的的能力。科夫勒说:“哥本哈根解释从一开始就没有要求量子系统得符合任何‘现实’的世界观。”

最新的实验结果只是印证了这种看法。我们之所以依赖“粒子”和“波动”这样的概念,是因为它们看上去符合我们所熟悉的经典世界中的物质形态。但是,想用它们或任何非黑即白的概念去描述真正的量子“实在”,结局注定会以失败而告终。

这一观点直接把我们带回到了柏拉图的洞穴之中,约尼乔尤评论道。在那位古希腊先哲的寓言中,囚徒被拘于山洞之内,只看得见洞外物体投射在洞壁上的影子,永远看不到那个物体本身。比如一个圆柱体,影子可能是一个长方形,也可能是一个圆,或者任何介于两者之间的某个形状。构筑“实在”的基本层次也存在类似情况,正如约尼乔尤所说,“有时候光子看起来像是波动,有时候又像是粒子,或者介于

两者之间。”而“实在”本身，并不是上述的任何一样事物。至于它究竟是什么，我们没有合适的词语或概念能加以描述。

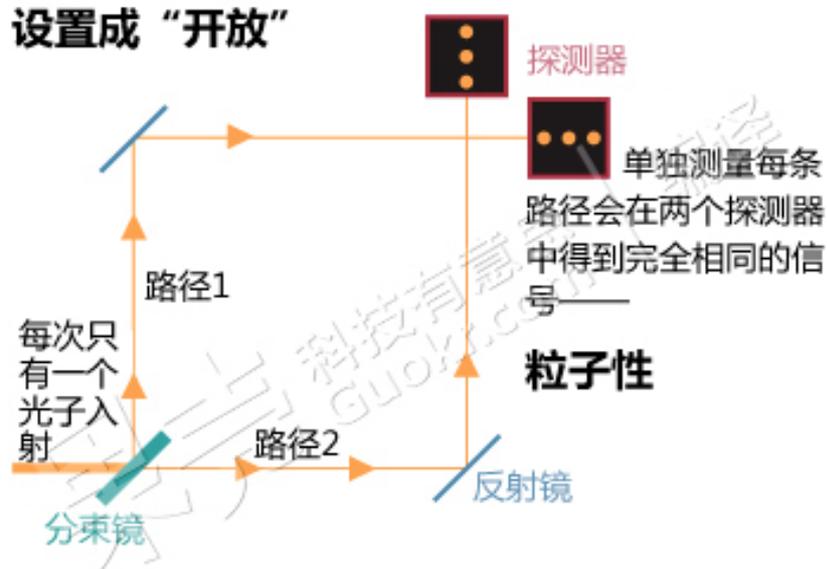
这才是真正的奇异之处。而在量子物理学家看来，这些不过是平常一天的工作而已。

# 非此亦非彼

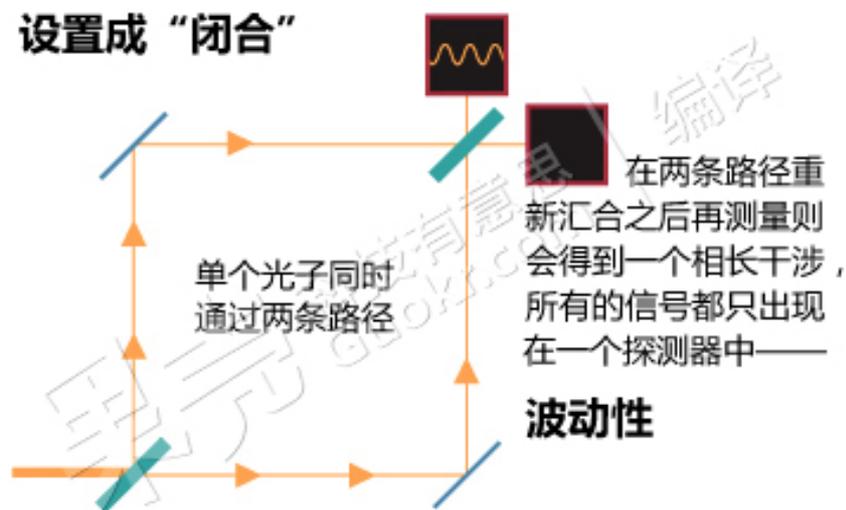
根据设置方式的不同，干涉仪能够用来“证明”光是粒子，是波动，或两者都是都不是

©NewScientist

## 设置成“开放”



## 设置成“闭合”



如果你不知道干涉仪是“开放”还是“闭合”，同样也会有测量结果，但它看上去既不像粒子，也不像波动

根据设置方式的不同，干涉仪能够用来“证明”光是粒子，是波动，或两者都是都不是。 来

源：新科学家