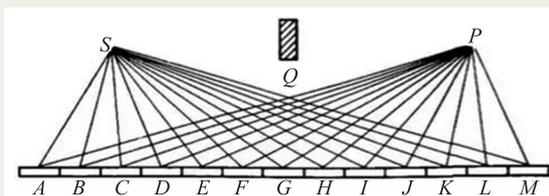


# 问答

**Q:** 镜面反射时光走的路程是最短的，光怎么知道它走这条路的路程是最短的？

**A:** 光没有自由意识，自然不知道它走的这条路是最短的。实际上，在镜面反射过程中，量子理论认为光其实走了所有可能的路径，每条路径都是平等的。而在几何光学中，光走的路径最短是它在经典极限下的描述。



引自费曼的《QED，光和物质的奇妙理论》

如图，一个光子经过镜面反射从S到P的过程中，实际上走了各种可能的路径，每种路径贡献一个概率幅(相当于一个复数)，从S到P的概率是所有这些不同路径给出的概率幅叠加的结果。但不同的路径因为路程不同，所以光子走的时间并不相同，于是相邻的路径贡献的概率幅实际上会有不同的相位。如果路程不是最小的，较小的路径移动就会带来比较大的路程的差别，那么相邻的路径之间的时间相差就会比较明显(如图中的SAP, SBP两条路径)，这样，它们之间就会发生比较明显的相消干涉从而其贡献相互抵消。而对于SGP这种路程最短的线，关于它的微小移动不会带来比较明显的相位差别，因此这部分的概率幅就会被保留并成为主要的贡献者。所以从实际的效果来看，就等于光走了最短路程的线。

这个问题其实问的很好，著名的物理学家理查德费恩曼就是通过对这个问题的深入思考，提出了著名的路径积分理论。路径积分理论现在已成为理论物理的一块基石。



\* Q&A 选自中国科学院物理研究所微信公众号每周五发布的《问答》专栏。受篇幅所限，这些答案难以尽善尽美，欲深度了解其中缘由的读者请同时参阅相关专业书籍。

**Q:** 为什么宇宙膨胀速度会大于光速？光速不是不可超越的吗？

**A:** 宇宙的膨胀并不是指宇宙中不同星系以不同速度运动，导致星系间距离变大，而是空间本身的膨胀。换种说法，宇宙膨胀是指空间自己就在膨胀，指的是空间中任意一点的空间都在膨胀，以至使某些星系远离我们的“速度”超光速。物体的运动速度上限是光速，可是这个上限对空间膨胀是没有约束作用的，这并不违反相对论。实际上，星系本身的移动速度只有几百到几千千米每秒，要远远小于光速。

**Q:** 温度是分子的运动产生的，如果把一个瓶子里的空气抽干(假设现在技术水平可以制造真空)，那么里面的温度是怎么样？

**A:** 事实上，“温度是分子运动产生的”这种说法是不准确的。温度是一个统计意义上的物理量，表征一个系综的能量大小。其不止适用于原子分子系统，也适用于光子系统，也就是说一个由各种频率电磁波组成的统计系综，也可以定义温度。因此，即使一个瓶子里的空气被完全抽干了，其内部也会有各种频率的电磁波。瓶子内壁通过辐射和吸收这些电磁波，与内部电磁波系综相互交换能量，最后达到热平衡态，温度与瓶子内壁温度一致。

**Q:** 引力波是电磁波还是机械波？

**A:** 巧了，都不是。这才是爱因斯坦伟大的地方。之前人们就只知道电磁波机械波两种波，结果爱因斯坦先是说引力可以扭曲空间，又说这种扭曲可以以波的形式传播，当时有种“痴人说梦”的感觉，结果直到100年后我们真的探测到了。机械波波动的是物质，电磁波波动的是电磁场，引力波波动的是空间。打个比喻，棋盘就像空间，棋子就像空间中的物质。机械波相当于棋子在棋盘上抖动，以棋盘的格子为参考，谁在抖一眼就看出来了。而引力波则是棋盘在抖动，这次棋子是钉在棋盘上的，棋子跟着棋盘抖动，我们作为处在棋盘上的棋子，两个棋子之间的间隔始终是一个格子，根本看不出有什么变化；也就是说引力波来了以后空间在变大变小，我们自己也一样在变大变

小，连尺子都在一起变大变小，这个过程中你尽管拿尺子量，永远感受不到距离变化，这个距离叫共动距离。但是光能感到变化！光走的是固有距离，就像我们现在站在上帝视角看这个棋盘，棋盘格子伸缩你是看得出来的。所以LIGO天文台用的就是比较两束光走过距离的长短来替代普通的尺子，最终把引力波给量出来了。

**Q：**为什么熵值会随时间推移一直增加？

**A：**严格来说，熵会一直增加的说法是不正确的。热力学第二定律指出，孤立系统的熵永不减少，即 $dS \geq 0$ 。在这里需要玩一个数学上的咬文嚼字游戏，不减少并不意味着一定要增加。整个系统平衡时，其熵达到最大，而达到平衡的系统不会再发生任何自发的变化。因此熵并不会一直增加下去。

**Q：**为什么光子自旋不为零？

**A：**我们知道光子是自旋为1的粒子，然而自然界仅存在两种极化方式的光子，即左旋光和右旋光，这两种偏振光分别代表 $z$ 方向自旋为 $\pm 1$ 的光子。问题来了，既然光子的自旋为1，那么其 $z$ 方向上的本征值应该有3个，即0和 $\pm 1$ ，但是为什么我们至今为止却没有发现自旋为0的光子呢，即为什么电磁波不能是纵波？事实上，我们要想深刻地理解光子的自旋，必须从量子场论出发。在3+1维的时空坐标系中，将电磁场量子化时，我们原则上确实可以形式上去定义四个极化方向：其中 $x$ 、 $y$ 方向的为横向极化，分别代表 $x$ 和 $y$ 方向的线偏光； $z$ 方向的为纵向极化，代表自旋取值为0的纵波； $t$ 方向的为标量极化。然而，由于我们需要让电磁场满足洛伦兹和规范对称性，且光子质量为零，这样的后果就是纵向极化和标量极化都会成为非物理的态，即负模态(态矢量模平方为负)，从而违反了量子力学的几率解释。因此，我们可以认为光子只有两个横向极化，这也与我们的实验观测结果符合。总结来说，作为矢量场，虽然光子原则上具有四个极化自由度，但是由于规范对称性和光子质量为零的限制，这四个极化自由度并不是独立的，从而使得最终只有两个横向极化。

**Q：**微观的自旋是怎么提出的，该如何理解？

**A：**1925年G.E.乌伦贝克和S.A.古兹密特受到泡利不相容原理的启发，分析原子光谱的一些实验结果，提出电子具有内禀运动——自旋，并且有与电子自旋相联系的自旋磁矩。事实上早在他们两个之前一位叫做Kronig的年轻人就提出了电子自旋的假定，但由于泡利的反对，所以没有发表自己的成果。

电子的自旋并不是绕自身轴转动引起的，它与空间的运动没有任何关系，因此也不能用坐标变量来描述。电子自旋及相应的磁矩是电子本身的内禀属性，这是电子一个新的自由度。因此描述电子需要4个量子数，即 $n$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $s$ 。证明电子具有自旋的实验很多，比如著名的Stern-Gerlach实验。

电子自旋是一种相对论效应，系统的理论需要用到相对论量子理论，在这里我们不深入讨论。微观粒子都有自旋，自旋为 $h/2\pi$ 整数倍的粒子为波色子，半奇数倍的则为费米子，如果是费米子则波函数对于两个粒子是交换反对称的，因此不可能有两个全同费米子处于同一个单粒子态，这便是泡利不相容原理。

**Q：**理论力学中，虚位移是什么意思，与实位移有什么区别？

**A：**实位移，顾名思义就是质点在运动中实际所发生的位移。显然在某一时刻 $t$ 物体只能处于一个确定的位置，因此实位移是唯一的，即实位移是时间 $t$ 的单值函数。如果时间没有发生变化，则实位移就不会变化。虚位移是在某一时刻 $t$ 想象出来的，物体在约束的许可下可能发生的一个无限小的位移。它只取决于物体此刻的位置以及施加给它的约束，这一位移并不是由于时间变化引起的。

任一时刻 $t$ ，在约束许可的情况下虚位移可以不止一个，比如质点被约束在一个平面上，只要不离开这个平面，质点可以在任何方向上发生虚位移，但质点的实位移不仅受到约束的限制，还要符合运动定律。因此对于稳定约束来说，实位移是许多虚位移当中的一个，对于不稳定约束来说，实位移和虚位移并不一致。