

# 做功公式

小圆滚滚

## 1 $E = mc^2$ 那么光子没有质量，0乘以任何数都等于0，为什么还有能量？

光子虽然没有静止质量，但它具有能量和动量，这并不与  $E = mc^2$  矛盾，原因如下：

- **\*\*完整的相对论能量公式\*\***：爱因斯坦的质能方程应为  $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$ ，其中  $E$  是总能量， $m$  是物体的静止质量， $p$  是动量， $c$  是光速。对于有质量的物体，其静止质量  $m$  不为零，当物体的速度远小于光速时，动量  $p$  相对较小，此时  $E \approx mc^2$ ，即我们熟悉的质能方程形式。但对于光子这种没有静止质量的粒子，其能量主要由动量决定，其公式可简化为  $E = pc$ ，即光子的能量与它的动量成正比。
- **\*\*光子的波动性\*\***：光子是电磁波的量子化表现，具有波动性。根据量子力学中的关系式  $E = h\nu$ ，其中  $E$  是光子的能量， $h$  是普朗克常数， $\nu$  是光子的频率。这表明光子的能量与其频率成正比，频率越高，能量越大。即使光子没有静止质量，只要它具有一定的频率，就会对应一定的能量。例如，伽马射线光子的频率极高，其能量可达几百千电子伏特甚至更高，尽管其静止质量为零，但依然具有很强的能量。
- **\*\*光子的粒子性\*\***：光子也表现出粒子性，它在与物质相互作用时，如光电效应、康普顿散射等过程中，会表现出粒子的特性，即具有一定的能量和动量。在光电效应中，光子将能量传递给电子，使电子从金属表面逸出；在康普顿散射中，光子与电子碰撞后，会将部分动量转移给电子，自身的动量和能量发生改变。这些现象都表明光子虽然没有静止质量，但确实具有能量和动量，能够参与物质的相互作用。
- **\*\*相对论的解释\*\***：从相对论的角度来看，光子始终以光速运动，其能量和动量是相互联系的。对于静止质量为零的粒子，相对论认为其能量和动量之间存在  $E = pc$  的关系，这与光子的性质相符合。光子的能量虽然不是由静止质量直接决定，但它是相对论性粒子的一种重要特性，反映了光子在时空中的运动状态和与物质相互作用的能力。

## 2 动量不是等于mv吗？那么质量为0，动量p不也是0吗？

在经典力学中，动量确实等于物体的质量乘以速度，即  $p = mv$ ，但光子属于相对论性粒子，对其动量的计算需用相对论理论。以下是基于相对论的解释：

相对论中的动量公式

相对论中的动量公式为  $\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0 \vec{v}$ ，其中  $m_0$  是物体的静止质量， $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  是洛伦兹因子。当物体速度远小于光速时，相对论动量趋近于经典动量。但光子以光速运动，其静止质量  $m_0 = 0$ ，若直接代入相对论动量公式，会出现 0 乘以无穷大的不定式，需进一步分析。

## 2.1 光子的动量公式推导

根据相对论能量公式  $E^2 = (m_0c^2)^2 + (pc)^2$ ，对于光子，其静止质量  $m_0 = 0$ ，故能量公式为  $E = pc$ ，即  $p = \frac{E}{c}$ 。此外，从光子的波粒二象性来看，其动量还可表示为  $p = \frac{h}{\lambda}$ ，其中  $h$  是普朗克常数， $\lambda$  是光子的波长。因  $hc = \lambda\nu$ ，其中  $\nu$  是光子的频率，将  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  代入  $p = \frac{h}{\lambda}$ ，可得  $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}$ ，与相对论能量动量关系式结果一致。

## 2.2 光子有动量的原因

虽然光子的静止质量为零，但它具有能量和动量，这源于其运动的特性以及相对论效应。在相对论中，能量和动量是相互关联的，光子的能量和动量通过  $E = pc$  联系在一起。当光子与物质相互作用时，如在康普顿散射中，光子将部分动量转移给电子，使电子获得动能，自身动量和能量发生改变，这证明了光子具有动量。