

# 1 光学总论

## 【教学要求】

- (1) 了解光的电磁本性、可见光的波长范围和频率范围，理解光强的概念。
- (2) 了解光通量、发光强度、光照度和光亮度的概念及其单位，理解照度平方反比定律。

## 1.1 光的本性

人类离不开光，人们之所以能够看到人世间的千姿百态、万紫千红，是因为人眼能够接收物体发射、反射或散射的光，光是人们通常遇到的一种最普遍的自然现象，人类对光的认识和研究已有 3 千多年的历史；同时，光学也是一门发展最早的学科，整个光学的发展史，紧紧围绕着“光究竟是什么？”这个古老而又年轻的主线来展开。

早在 2000 多年的漫长历史岁月中，人类的光学知识仅限于对一些现象和规律的描述。如公元前 400 多年，春秋战国时期，在墨子所著《墨经》里，记录了影的形成、针孔成像、光在镜面（凹面和凸面）上的反射等现象。在《墨经》问世后 100 多年，希腊的欧几里得在《光学》一书中，研究了平面镜成像，指出反射角与入射角的关系，提出“触须学说”。宋代的沈括在《梦溪笔谈》中记载了丰富的几何知识。对凸凹面镜的成像规律、测定凹面镜焦点和虹的成因等方面进行了富有创造性的阐述。阿拉伯的阿尔哈金（11 世纪）认为，光线来自所观察的物体，并发明了凸透镜。1299 年，阿玛蒂发明了眼镜；玻特（1535—1615 年）发明了成像暗箱。后来又相继发明望远镜，显微镜。直到 17 世纪，斯涅尔和笛卡儿给出折射定律，费马提出费马原理，几何光学才初步形成，人类对光的认识仅处于萌芽阶段。

对光本性的认真探讨，应该说是从 17 世纪开始的，当时有两个学说并立。以牛顿为代表的一些人提出了**微粒理论**，认为**光是一群做匀速直线运动的微粒流**。这种学说直接说明了光的直线传播定律，并能对光的反射和折射作一些解释。但是用微粒说研究光的折射定律时，得出了光在水中的传播速度比空气中大的错误结论。不过这一点在当时的科学技术条件下，还不能通过实验测定来鉴别，光的微粒理论差不多统治了两百多年。另一个学说，是和牛顿同时代的惠更斯提出的**波动理论**，认为**光是在一种特殊弹性媒质中传播的机械波**。这种理论也解释了光的反射和折射等现象，然而惠更斯认为光是纵波，他的理论是很不完善的。19 世纪初，托马斯·杨和菲涅尔等人的实验和理论工作，把光的波动理论大大推向前进，解释了光的干涉、衍射现象，初步测定了光的波长，并根据光的偏振现象确认光是横波。根据光的波

动理论研究光的折射，得出光在水中的速度应小于光在空气中的速度，这一点在 1862 年为傅科的实验所证实。因此，到 19 世纪中叶，光的波动说战胜了微粒说。

惠更斯-菲涅耳旧波动理论的弱点，和牛顿的微粒理论一样，都带有机械论的色彩：把光现象看成某种机械运动过程，认为光是一种在特殊的弹性媒质（历史上称为“以太”）中传播的机械波。

重要的突破发生在 19 世纪 60 年代，麦克斯韦建立起电磁理论，预言了电磁波的存在，并指出**光是波长较短的电磁波**。1888 年，赫兹实验发现了波长较长的电磁波——无线电波。

光的电磁理论以无可辩驳的事实赢得了公认。**光的电磁理论**能很好地解释光在传播过程中的各种现象，但是却不能解释光和物质相互作用时发生的现象：光电效应和康普顿效应。

1900 年普朗克提出了量子假说，认为各种频率的电磁波（包括光），只能像微粒似地以一定最小份额的能量发射（称为量子，其能量正比于频率），说明了光的发射问题。1905 年，爱因斯坦发展了**光的量子理论**。应用光量子理论可以成功地解释光电效应和康普顿效应，说

**明光与物质发生作用时，光子将会与物质微粒传递能量和动量**。那么，光究竟是微粒还是波动？

人类对光的本性的研究，已经进行了几千年，时至今日，仍不能作出肯定的答复。近代科学实践证明，光是一个十分复杂的客体，对于它的本性问题，目前只能用它所表现的性质和规律来回答：光的某些行为像“波动”，某些行为像“粒子”，即所谓“**光的波粒二象性**”。由于“粒子”和“波动”都是经典物理的概念，而任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

## 1.2 光学的研究对象、分支和应用

光学是研究光的本性，研究光的发射、传播以及和物质相互作用规律的学科。

光学除了是物理学中一门重要的基础学科外，也是一门应用性很强的学科，它的研究对象早已不限于可见光。在长期的发展过程中，光学里形成一套行之有效的特殊方法和仪器设备，可用之于日益宽广的电磁波段。

光学在传统上分为两大类：几何光学和物理光学。当光的波动效应不明显时，在传播过程中，对光遵从直射、反射和折射等定律的研究，称为几何光学；研究光的波动性学科，称为物理光学（或波动光学）。光和物质相互作用的问题，通常是在分子或原子的尺度上来研究问题的，这类不完全属传统光学的内容，也仍可归于物理光学之内。

从 20 世纪 60 年代起，特别是激光问世以来，一向沉寂的光学又焕发了青春，发展迅猛，成为现代物理学和现代科学的前沿阵地，产生了崭新的分支学科：如全息光学、信息光学和非线性光学等形成现代光学的主体。

信息光学（变换光学或傅里叶光学）是由信息论和光学相结合形成的学科。可应用到信息处理、像质评价、光计算机等技术中。信息光学从“空域”走向“频域”，采用新的数学方法，使用空间频率、频谱及傅氏变换等一系列新观念讨论问题，使得人们对早已熟悉的光学

现象得到更深刻的理解和认识。信息光学认为，物光所携带的信息除了强度、颜色和偏振态等外，还有反映空间频率的信息。光学仪器的成像质量决定于物光在空间频率的传递情况。

激光的发明，是光学发展史上的一个里程碑。其产物如全息摄影术等应用也十分广泛。激光的出现，为研究强光作用下的非线性光学创造了条件。

光学的应用十分广泛。几何光学是各种光学仪器设计的基础；光的干涉可用于精密测量；光栅是重要的分光仪器，光谱分析是物质成分分析中的先进方法。现代光学应用的范围非常广泛，具有光辉的前景。

### 1.3 光的电磁本性

在各种波长的电磁波中，能为人眼所感受的，只是波长  $\lambda$  在 390~760 nm 的狭小范围，叫作可见光。在可见光范围内不同波长的光引起不同的颜色感觉。一般来说，波长与颜色的对应关系见表 1-1。

表 1-1 波长与颜色对应关系

红	橙	黄	绿	青	蓝	紫
760	630	600	570	500	450	430
390( nm )						

光在真空中的传播速度是

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

电磁理论证明

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

从波长  $\lambda$  可换算出频率  $\nu$ ，

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

例如，波长范围为 390~760 nm 的可见光，对应的频率范围是  $7.7 \sim 3.9 \times 10^{14}$  Hz。

通常说的光的强度（简称光强），是指单位时间内，通过与传播方向垂直的单位截面内的平均光能。也即光的平均能流密度。

如图 1.1 所示，一个沿  $x$  轴正向传播的单色平面电磁波可表示为

$$E = E_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{\nu} \right) - \varphi \right] \quad (1.1)$$

$$H = H_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{\nu} \right) - \varphi \right]$$

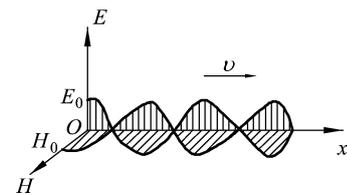


图 1.1 单色平面电磁波

其中， $E_0$ 、 $H_0$  分别为  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$  的振幅； $\nu$  为波速； $\omega$  为圆频率。 $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  的初相位  $\varphi$  相同，在传播过程中相位恒相等。

由电磁理论知道，电磁波的能量密度矢量（即坡印亭矢量） $\mathbf{P}$  在国际单位制中为

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.2)$$

对于平面波，能流密度大小为

$$P = EH$$

求其平均值，可得平均能流密度为

$$\bar{P} \propto E_0^2 \text{ (或 } H_0^2 \text{)}$$

光的平均能流密度（即光强）为

$$I = \bar{P} \propto E_0^2$$

在同一种介质中，我们只关心光的相对强度分布，上式的比例系数可以取为 1，于是有

$$I = E_0^2 \quad (1.3)$$

即光强等于电矢量振幅的平方。

上面之所以将光强定义为电矢量振幅的平方，是因为光的**很多效应**（使眼睛产生视觉、使底片感光、光电子发射等）**都是由其中的电矢量  $E$  所引起的**。所以，在讨论光现象时，只考虑电矢量的变化情况，把**电矢量称为光矢量**，而（1.1）式即代表光波的表达式。

波场中物理状态的扰动可用标量场描述的，称为标量波；需要矢量场描述的，称为矢量波。光波属矢量波，但在光学中，一般都把它作为标量波看待，不再考虑光振动的方向。并且今后我们一律以定态光波为讨论对象，即我们所讨论的光波在空间各点的扰动是同频率的简谐振动，且振幅分布不随时间而变化。

普遍的定态标量波的表达式为：

$$E(p, t) = E_0(p) \cos[\omega t - \varphi(p)] \quad (1.4)$$

其中， $p$  代表场点； $E_0(p)$  表示振幅的空间分布； $\varphi(p)$  反映相位的空间分布。二者都与时间无关。波函数中唯一与时间有关的是相位因子中  $\omega t$  一项， $\omega$  为圆频率，而这项是与场点位置无关的。

为了使物理问题的分析变得简便，我们可将上述余弦函数的表达式转换为复数表示式，即

$$E(p, t) = E_0(p) e^{-i[\omega t - \varphi(p)]} \quad (1.5)$$

当然，我们应用公式（1.5）时，必须记住真正实际的波动是由它的实部表示的。在公式（1.5）中，对于确定频率的单色光，时间因子  $e^{-i\omega t}$  对于光场中任何一点总是相同的，它对描述光场的空间分布意义不大，故可略去不写。光场的空间分布完全由

$$E(p) = E_0(p) e^{i\varphi(p)}$$

描述，称其为复振幅。复振幅由两部分组成，其模量  $E_0(p)$  代表振幅在空间的分布，其幅角  $\varphi(p)$  代表相位在空间的分布。

例如，沿  $x$  轴正向传播的平面波的表达式为（见图 1.2）

$$\begin{aligned}
 E(p,t) &= E_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} - \varphi_0 \right) \right] \\
 &= E_0 \cos \left[ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x - \varphi_0 \right] = E_0 \cos[\omega t - Kx - \varphi_0] \\
 &\quad \left( K = \frac{2\pi}{\lambda} \right)
 \end{aligned}$$

在一般情形下有

$$E(p,t) = E_0 \cos[\omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \varphi_0]$$

式中

$$\mathbf{K} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}$$

其中， $\mathbf{K}$  代表波的传播方向，称为波矢； $\mathbf{k}$  代表沿传播方向的单位矢。在直角坐标下，式中

$$\mathbf{K} = K_x \mathbf{i} + K_y \mathbf{j} + K_z \mathbf{j}, \quad \mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{K}$$

故有

$$E(p,t) = E_0 \cos[\omega t - K_x x - K_y y - K_z z - \varphi_0]$$

其振幅为

$$E(p) = E_0 e^{i\varphi(p)}, \quad \varphi(p) = K_x x + K_y y + K_z z - \varphi_0 \quad (1.6)$$

球面波的波动方程

$$E(p) = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})$$

对于发散球面波， $\mathbf{K}$  与  $\mathbf{r}$  方向一致；对于会聚波， $\mathbf{K}$  与  $\mathbf{r}$  方向相反。于是球面波的复振幅可写作

$$E(p) = \frac{E_0}{r} e^{\pm ikr} \quad (1.7)$$

取“+”号表示发散球面波；取“-”号表示会聚球面波。

现代光学的思想就是要在复杂的波场中分离出简单的成分——球面波或平面波。

## 1.4 光度学基本概念

在实际生活中，在学习和工作中，在光学仪器的研究中，我们都会碰到光能的测量和计算问题，如确定房间的照明程度，比较各光源的发光强弱等，这就需要了解有关光能传输方面的一些基本知识。

电磁波也称电磁辐射。通常大多数辐射源发射波长范围很广的电磁波，在这些电磁波中，能引起视觉感应的可见光只是其中波长很窄的一段，研究各种波长辐射能量计量的学科称为辐射度学，仅限于研究可见光波段能量计量的学科，称为光度学。本节中着重介绍光度学中的几个基本概念而不涉及具体的测量方法。

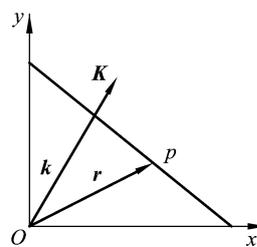


图 1.2 沿  $x$  轴正向传播的平面波

注：矢量用黑体表示。

### 1.4.1 视见函数与光通量

辐射体在单位时间内所辐射的能量，称为光源的**辐射通量**。其单位是**瓦特**，辐射通量又称为辐射功率。辐射通量与波长 $\lambda$ 有关，用 $\psi(\lambda)$ 表示。

人眼对各种波长的光敏感程度是不同的，例如对黄绿光最敏感，对红光和紫光的感觉较差，观察辐射通量相同的黄绿光、紫光或红光时，感觉到黄绿光明亮，而红光或紫光较暗。至于红外线和紫外线，即使光流很强，也不能引起视觉。人眼对各种波长光的灵敏度，称为**视见函数**，用 $V(\lambda)$ 表示。比较两种光在同样的视觉强度时所需辐射通量，可以规定视见函数的数值。人眼对 555 nm 的黄绿光最为敏感，规定其视见函数  $V(\lambda)=1$ ，对于其他波长， $V(\lambda)<1$ 。

应当指出，在比较明亮（明视觉）的条件下和比较昏暗（暗视觉）的条件下，视见函数也不同。如图 1.3 所示中的实线和虚线，分别表示明视觉和暗视觉条件下的视见函数。在昏暗条件下人眼对 505 nm 的蓝绿光最敏感。因此，在月色朦胧之夜，人们总感到周围世界笼罩了一层蓝绿色的色彩。

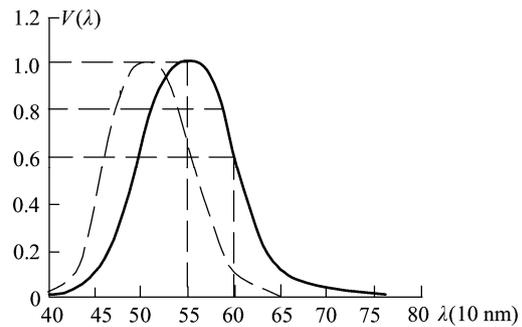


图 1.3 视见函数曲线

分别表示明视觉和暗视觉条件下的视见函数。在昏暗条件下人眼对 505 nm 的蓝绿光最敏感。因此，在月色朦胧之夜，人们总感到周围世界笼罩了一层蓝绿色的色彩。

为描述辐射通量对人眼引起的视觉强度，引入一个称为**光通量**的物理量，其定义为：**波长为 $\lambda$ ，辐射通量为 $\psi(\lambda)$ 的光，其辐射通量 $\psi(\lambda)$ 和视见函数 $V(\lambda)$ 的乘积称为光通量**。即

$$\Phi = V(\lambda)\psi(\lambda) \quad (1.8)$$

光通量既反映了辐射通量的大小，又考虑了人眼视觉的灵敏度，也就是说，光通量可以理解为对人眼有效的辐射通量，光通量的单位是“流明”，符号 l m。

### 1.4.2 发光强度

当光源的线度，比考虑问题中的照射距离小得很多的时候，这个光源可以认为是点光源；在实际中的多数情形里，我们看到的光源有一定的发光面积，这种光源叫面光源，或称扩展光源。

为了描述点光源在某一方向上发出光通量能力的大小，定义为：**点光源在这一方向上单位立体角内发出的光通量为光源在此方向上的发光强度**。如图 1.4 所示， $O$  为点光源或某一发光面上的发光点，以 $r$ 为轴取一立体角元 $d\Omega$ ，设 $d\Omega$ 内的光通量为 $d\Phi$ ，则沿 $r$ 方向的发光强度为

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.9)$$

发光强度的单位是“坎德拉”，符号 cd。

$$1 \text{ 坎德拉} = \frac{1 \text{ 流量}}{1 \text{ 球面度}} \quad \text{或} \quad 1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} \cdot \text{sr}^{-1}$$

显然  $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$ 。

若光源为各向同性的，其向各方向发射的光通量是均匀的，则

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

因一点在空间所张的立体角  $\Omega = 4\pi$ ，则有

$$\Phi = 4\pi I$$

即各向同性的点光源所射出的总光通量在数值上等于发光强度的  $4\pi$  倍。

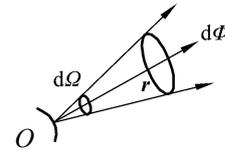


图 1.4 点光源在该方向的发光强度

### 1.4.3 亮度

对于面光源，我们除了可用发光强度来描述它在某一方向上的发光能力之外，还想进一步知道它的每一单位面积在这个方向上的发光能力。为此需要引入另一个物理量——亮度。

如图 1.5 所示，设发光面上的面元  $ds$  在与表面法线  $n$  成  $\theta$  角的  $r$  方向上的发光强度为  $dI$ ， $ds$  在  $r$  方向的投影面积  $ds' = ds \cos \theta$ ，则得  $ds$  在  $r$  方向上单位投影面积的发光强度，称为该面元在此方向上的亮度。用公式表示则有

$$B = \frac{dI}{ds'} = \frac{dI}{ds \cos \theta} \quad (1.10)$$

由  $dI = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  有

$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega ds \cos \theta} \quad (1.11)$$

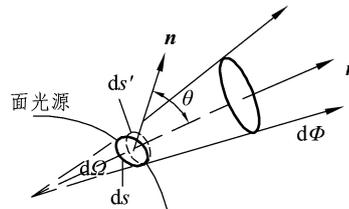


图 1.5 发光面在该方向的亮度

(1.11) 式表明，发光面在某方向上的亮度，等于该方向上单位投影面积在单位立体角内发出的光通量。在国际制单位中亮度的单位为  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ （1 坎德拉每平方米）。

一般情况下，发光体的亮度随方向而变，然而有相当多的一些发光体，其亮度与方向无关，即从各个方面看上去，亮度都一样，这类发光体称为余弦辐射体或朗伯光源。如太阳、月亮、某些粗糙的发光面等。

### 1.4.4 照度

照度是表征受照面被照明程度的物理量。

假设投射到  $ds$  面元上的光通量为  $d\Phi$ ，如图 1.6 所示，则此面元上的照度为投射到单位面积上的光通量。即

$$E = \frac{d\Phi}{ds} \quad (1.12)$$

照度的单位是勒克斯 (lx)。当 1 流明的光通量均匀地照射在 1 平方米的面积上时，这个面上的照度就等于 1lx，即  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在均匀照明的场合，处处有相同的照度。

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (1.13)$$

式中， $\Phi$  是投射到面积  $S$  上的光通量。

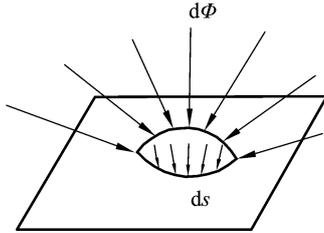


图 1.6 投射到面元的光通量

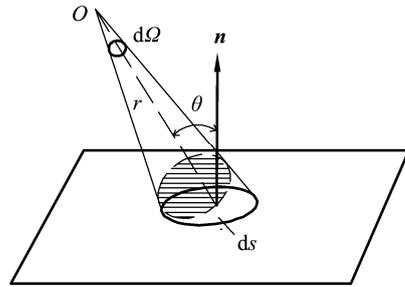


图 1.7 点光源在面元产生的照度

发光强度为  $I$  的点光源  $O$  (见图 1.7)，在与其相距  $r$  的面元  $ds$  上产生的照度

$$E = \frac{d\Phi}{ds} = \frac{I \cdot d\Omega}{ds}$$

式中， $d\Omega$  是包围面元  $ds$  的立体角；而  $d\Omega = \frac{ds \cos \theta}{r^2}$ ， $\theta$  为  $ds$  的法线和光束轴线的夹角，所以

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (1.14)$$

(1.14) 式表明，点光源产生的照度，与点光源的发光强度成正比，与投射方向和面元法线的

夹角的余弦成正比，与点光源到面元的距离的平方成反比。这就是点光源照度的平方反比定律。

在各种场合，需要一定的照度才有利于工作和学习的进行。一些常见的实际情况下的照度值见表 1-2。为了帮助读者对亮度值有较具体的认识，在表 1-3 中给出了一些实际光源亮度的近似值。

表 1-2 一些受照面的照度 ( $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$  或 lx)

无月夜天光在地面上所产生的照度	$3 \times 10^{-4}$
办公室工作时必须的照度	20 ~ 100
晴朗夏日采光良好的室内照度	100 ~ 500
夏日太阳不直射的露天地面照度	$10^3 \sim 10^4$

表 1-3 常见光源的亮度 ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )

满月的表面	$2.5\times 10^3$
蜡烛火焰	$5\times 10^3$
钨丝白炽灯	$5\sim 15\times 10^6$
在地面上看到的太阳	$1.5\times 10^9$

**【小 结】**

- (1) 可见光是波长在  $390\sim 760\text{ nm}$  (频率在  $7.7\sim 3.9\times 10^{14}\text{ Hz}$ ), 可以引起视觉的电磁波。  
 (2) 通常认为光强等于光矢量振幅的平方, 即  $I = E_0^2$ 。  
 (3) 光度学基本概念: 发光强度、亮度、照度。

照度平方反比定律:  $E = \frac{I \cos \theta}{r^2}$

**【思考题】**

- 1.1 可见光是电磁波谱中哪一波段的波, 为什么把它的电振动称为光振动?  
 1.2 为什么要引入光通量这个物理量? 它与光的辐射通量有什么关系?

**【习 题】**

1.1  $100\text{ cd}$  的白炽灯从天花板吊下, 正在一个圆桌中心上方  $3\text{ m}$  处, 圆桌直径为  $1.2\text{ m}$ 。求这个电灯投射到桌上的光通量和桌面中心的照度。设电灯可视为各方向发光强度相同的点光源。

1.2 用照度计测得离  $20\ 000\text{ W}$  氙灯  $20\text{ m}$  处垂直面上的照度为  $200\text{ lx}$ , 求氙灯的发光强度。

1.3 一灯 (可认为是点光源) 悬挂在圆桌中央的上空, 桌的半径为  $R$ , 为了使桌的边缘能得到最大的照度, 灯应悬在离桌面多高处?

**【阅读材料】**

能比光速更快吗?

20 世纪初以来，物理学工作者普遍确认，没有一种粒子、信号、因果事件能比光在真空中的速率  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$  更快。然而，德国汉堡大学物理学教授沙恩伯斯特根据量子场论中的理论，提出能比光速更快的假想实验。

首先，真空并不是虚无的空间，根据量子场论，真空是由电子和其反粒子——正电子组成的波涛汹涌的粒子海洋，这种正负电子对在特定条件下既会骤然湮灭成为光子，又可因光子湮灭而成对出现，正负电子对的不断出现和湮灭，阻碍了光子在真空中的运动而使光速变小。

假如能使真空中的波动“平静”下来，使其对光子的作用不很频繁，于是光子的速率也就提高了。沙恩伯斯特想象用两块相距很近、互相平行的导电板形成板间“平静”的真空，则垂直于导电板运动的光子会比上述所定义的  $c$  更快。但是这一假想实验从来也没成为现实，因为“平静”真空中光速的增加量太小了。假如“平静”真空的空间尺度大到日地间距，光速也仅仅增加  $1\text{ mm/s}$ 。

虽然，比光速更快的假想实验未能实现，但能比光速更快的想法无疑是人类认识自然的一个进步，也是为人类完美描述自然界作出的重要贡献。