$$\varepsilon_o \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = q$$
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_o \varepsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_o i$$
$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Maxwell's Equations

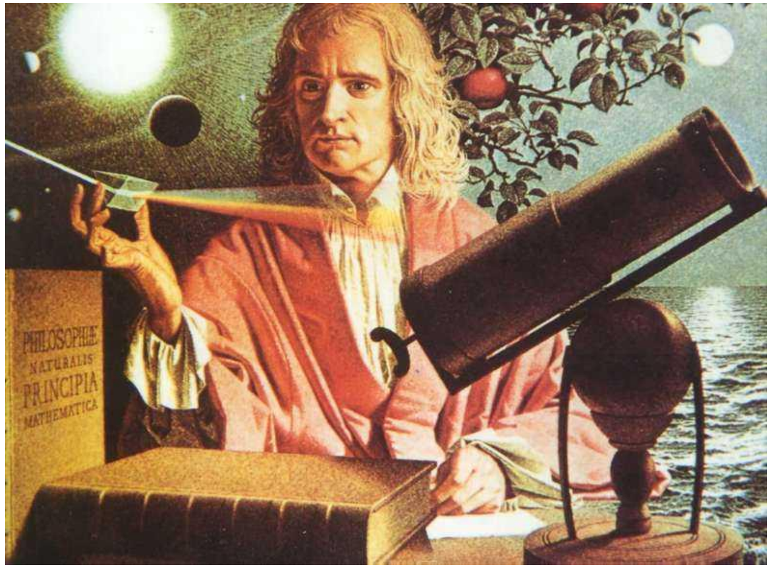
光是电磁波

基本性质

光矢量和光强

光的叠加

光的微粒说Corpuscular theories



Isaac Newton
1643.12.25～1727.3.20
微积分，力学，光学，天文学

Nature and Nature's laws lay hid in night

God said,

"Let Newton be!"

And all was light.

—Alexander Pope
（英国诗人蒲伯）

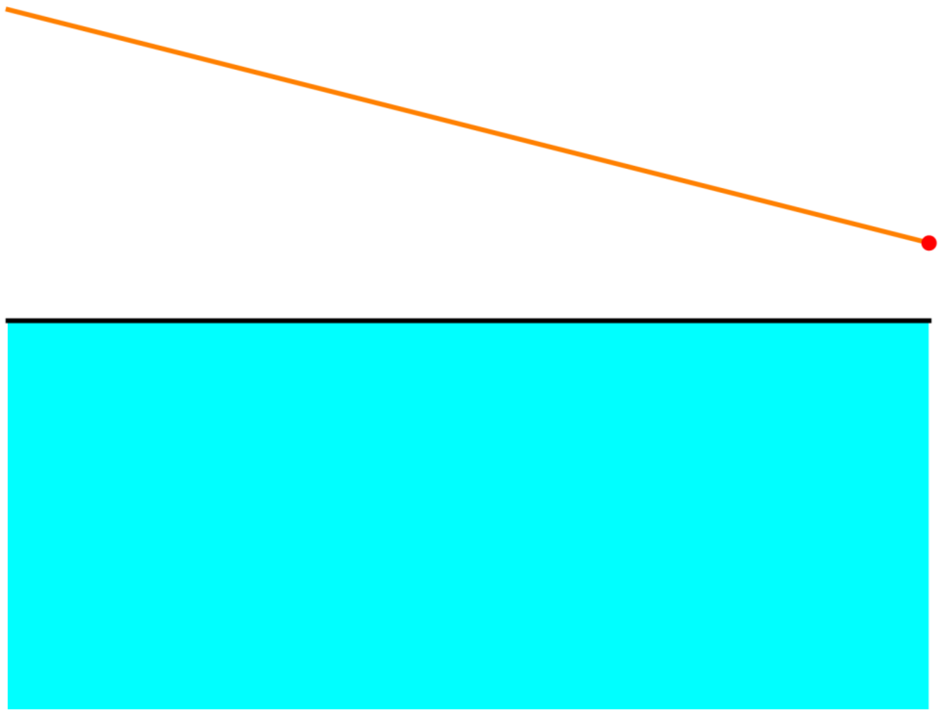
René Descartes
1596.3.31-1650.2.11

牛顿和笛卡尔认为，光是由高速运动的微粒组成

• 20:37:57

直线传播：

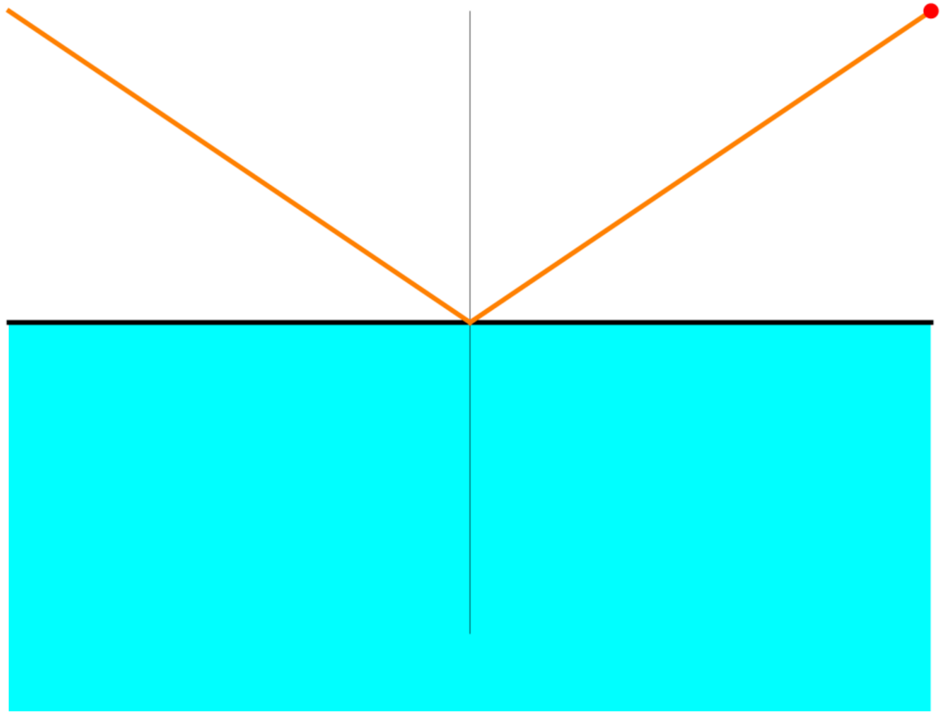
微粒速度很快，外力引起的轨迹弯曲很小



• 20:37:58

反射定律：

在介质的分界面发生弹性散射，
入射角=反射角



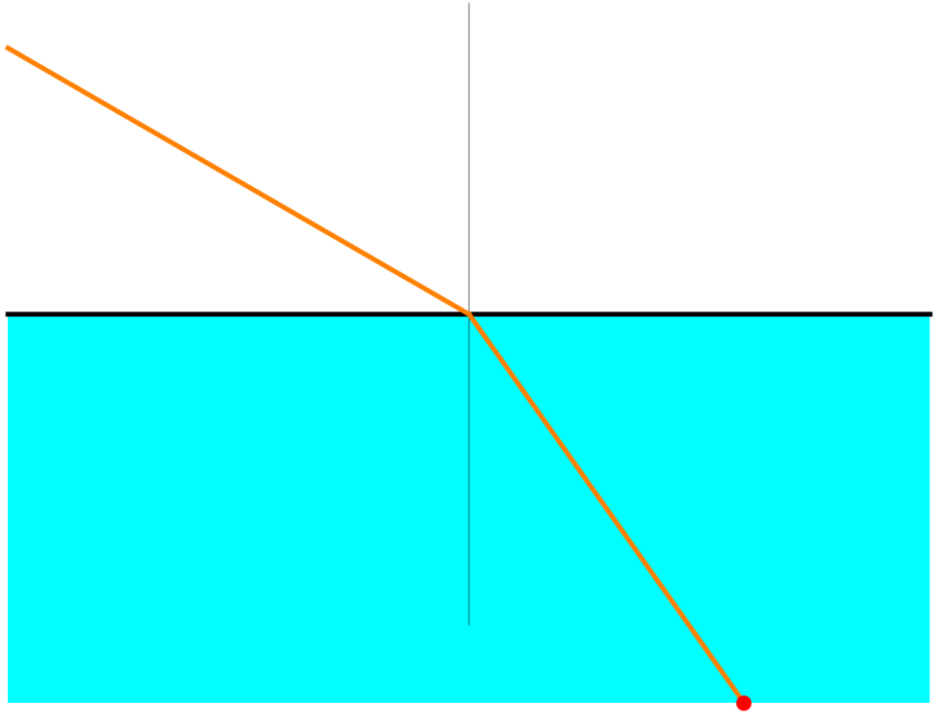
• 20:37:58

折射定律：

介质的分界面两侧势能不同，微粒受到沿法向的作用力，速度方向发生变化。

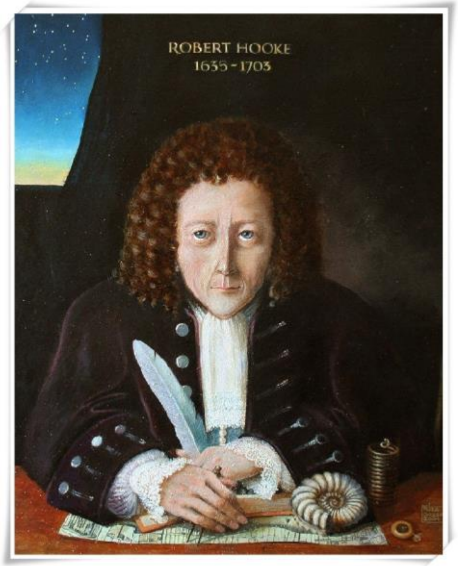
速度的水平分量不变，

$$v_1 \sin\theta_1 = v_2 \sin\theta_2$$



光的波动说

Christiaan Huygens
1629-1695



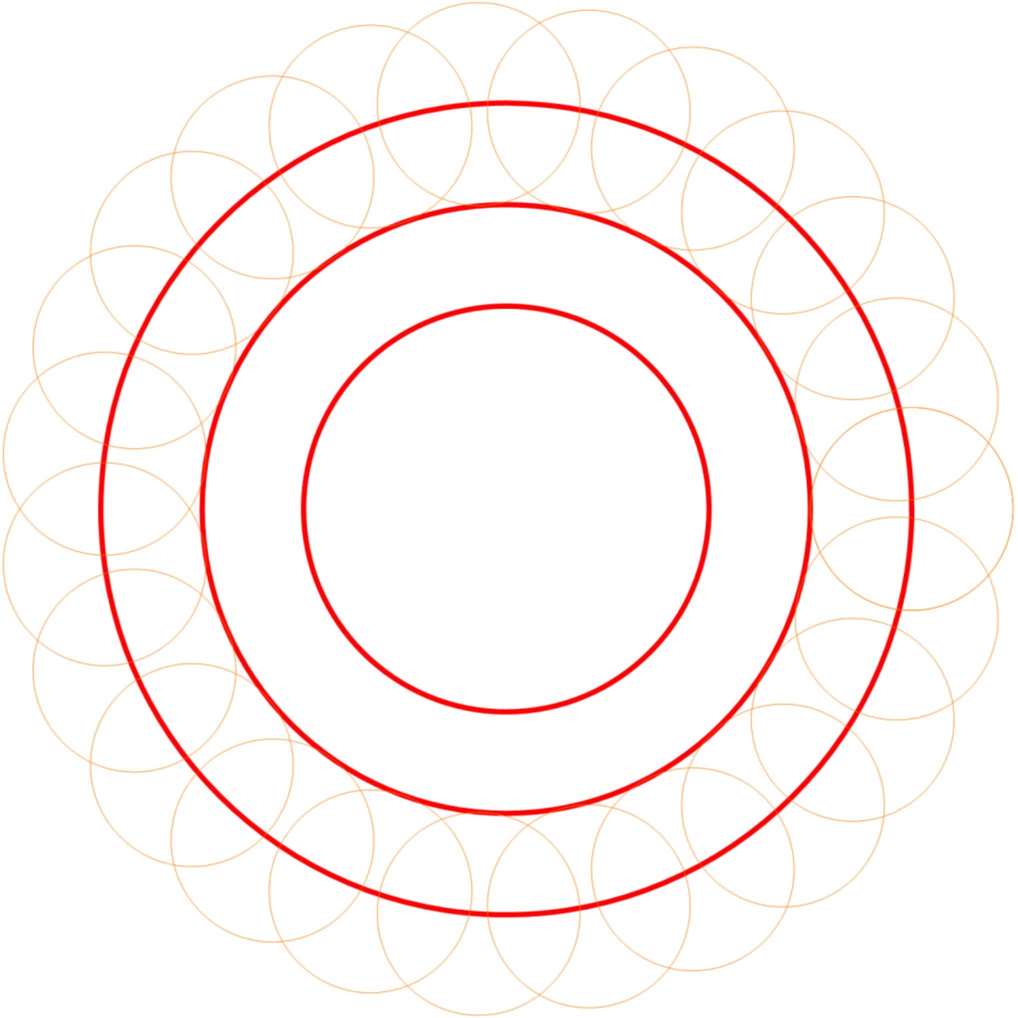
Robert Hooke
1635.18 – 1703.3.3

光是波动

光波面在介质中传播的惠更斯原理

• 20:37:58

惠更斯原理

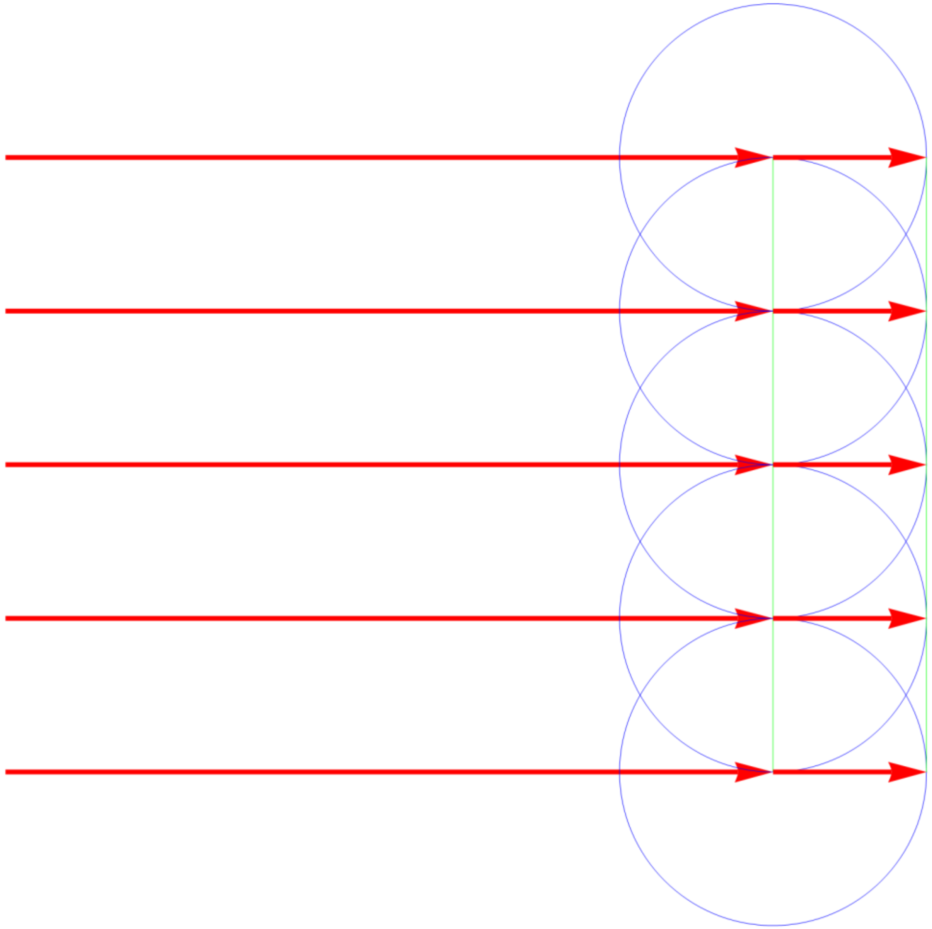


惠更斯原理：

在传播过程中的任一时刻，波面上的每个点都是次波源，分别发出球面子波；

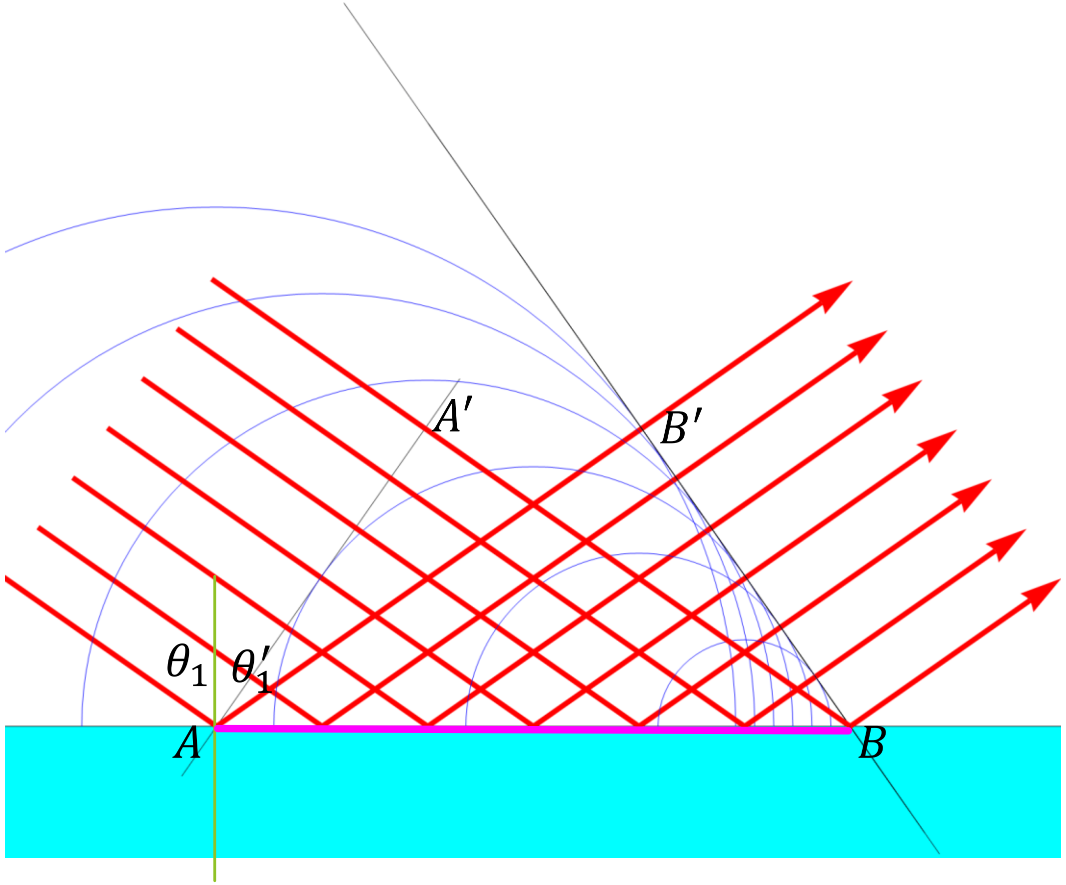
所有子波的包络面，是下一时刻的的波面。

波动说解释直线传播



• 20:37:58

波动说解释反射定律

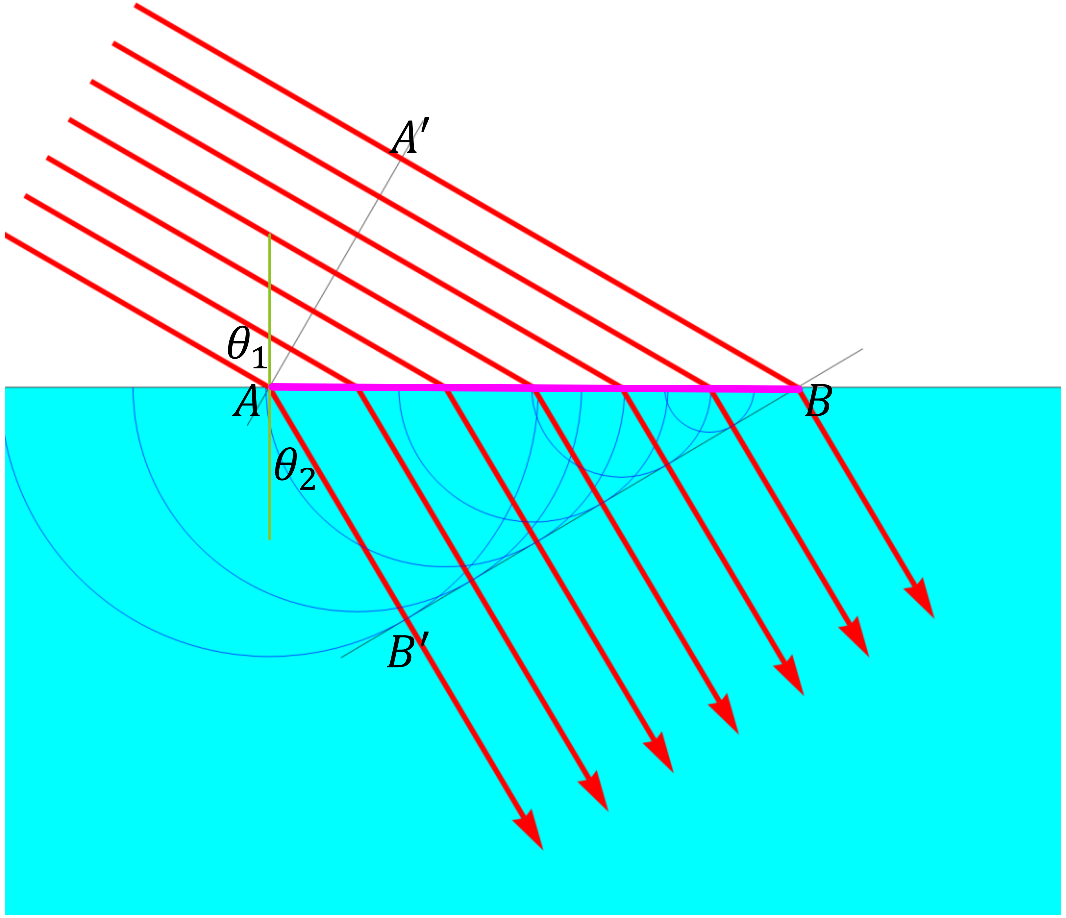


$$|AB'| = vt = |A'B|$$
$$|AB|\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1'\right) = |AB|\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)$$
$$\theta_1' = \theta_1$$

反射角等于入射角

- 20:37:58

波动说解释折射定律



$$\frac{v_1 \cdot t}{\sin\theta_1} = |AB| = \frac{v_2 \cdot t}{\sin\theta_2}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{v_1}\sin\theta_1 = \frac{1}{v_2}\sin\theta_2$$

光速小的介质折射率大

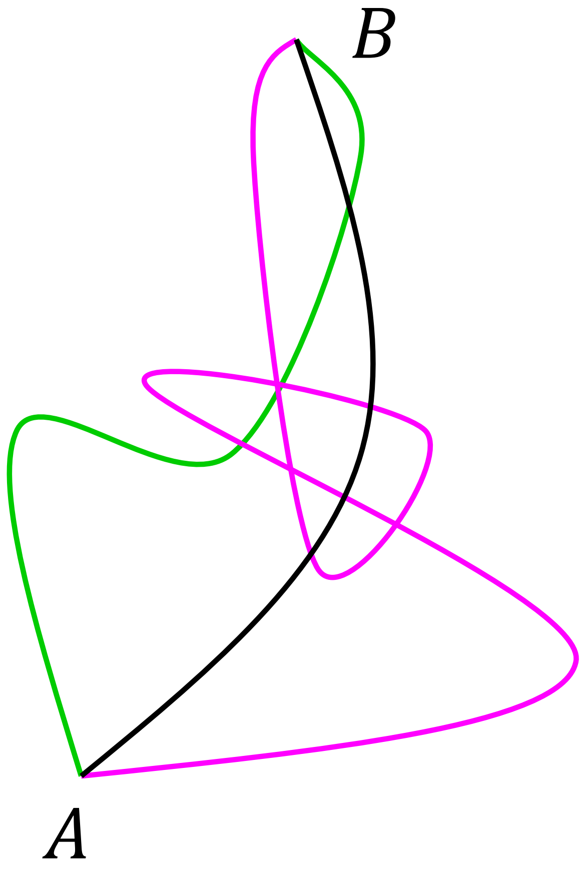
与微粒说对比：

$$v_1 \sin\theta_1 = v_2 \sin\theta_2$$

光速小的介质折射率小

两者刚好相反

几何光学与波动光学



几何光学：
光沿光程最短路径传播

波动光学：
光沿所有路径传播然后叠加

在三百年后，惠更斯原理启发R. P. Feynman提出量子力学的路径积分理论（path integral）

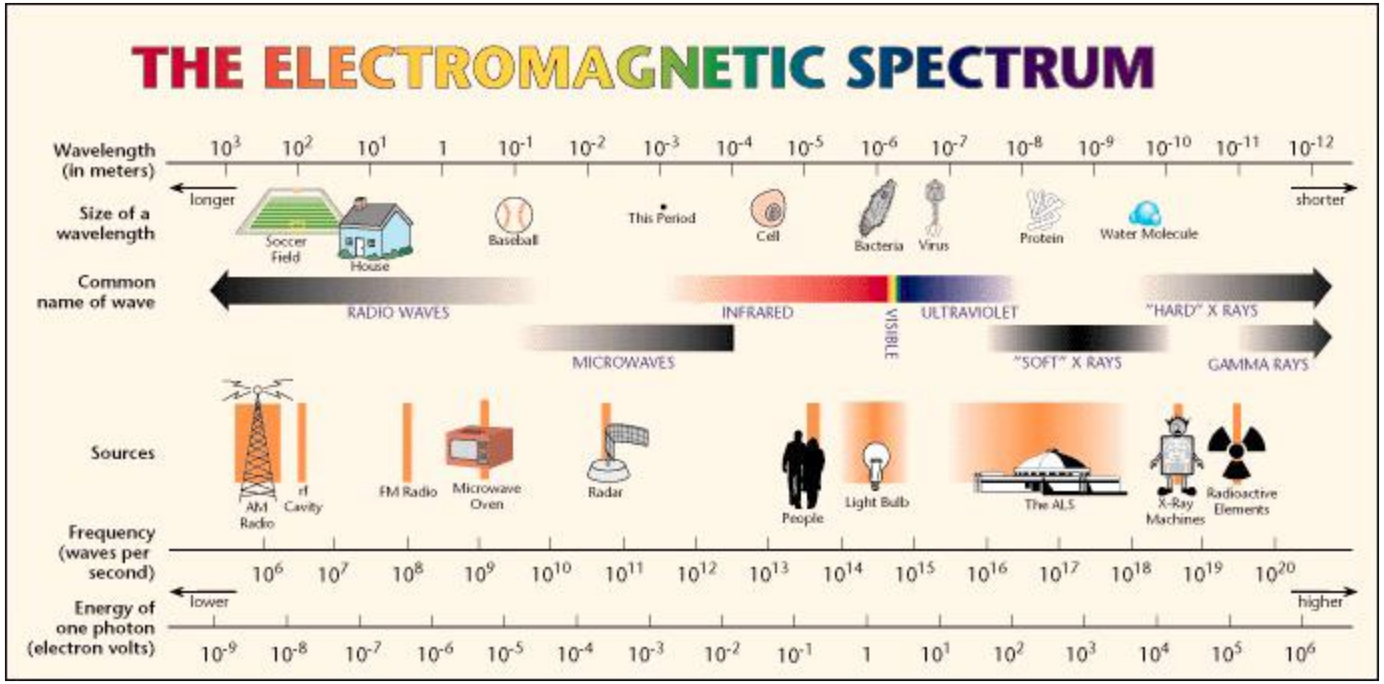
波动说的确立

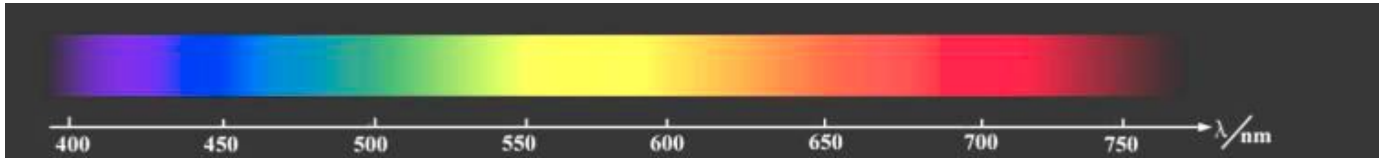
关于光的本性的争论历时200年

- 1801年，Thomas Young，双缝干涉实验
- 1808年，Etienne Louis Malus，偏振现象
- 1811年，David Brewster，偏振现象的经验定律
- 1817年，Thomas Young，光是一种横波的假说
- Augustin-Jean Fresnel，菲涅耳公式
- Dominique Francois Jean Arago，圆盘衍射实验
- 1850年，L. Foucault，H.L. Fizeau，L. Breguet，关于光速的仲裁实验

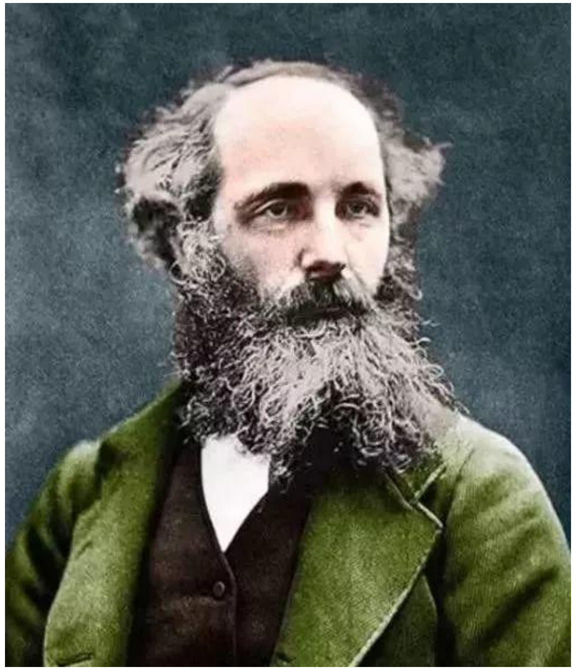
- 20:37:59

光是电磁波





麦克斯韦提出，光是一种电磁波



James Clerk Maxwell
1831.6.13-1879.11.5

光学的广泛应用

- 成像

  望远镜，照相机，显微镜

  计算机视觉：分类、识别、跟踪，立体视觉、三维重建

- 精密测量

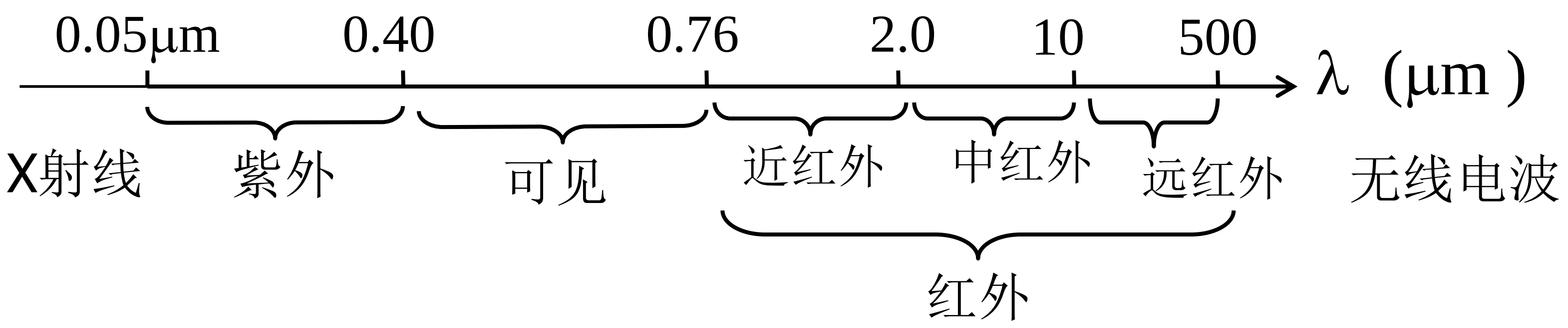
  测距，测速，光纤陀螺仪，声学相机，相控阵雷达

- 光谱分析

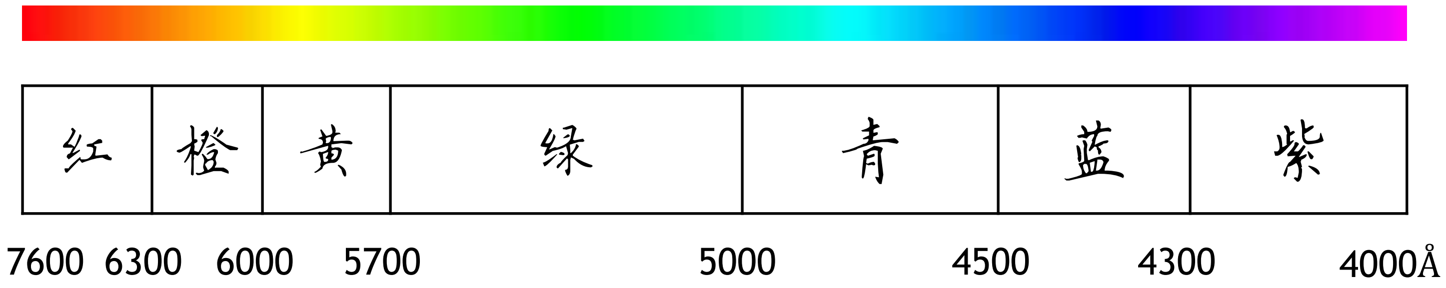
  分子结构、化学成分、温度、磁场、速度分布

- 信息处理（傅立叶光学）
- 光学计算 量子计算
- 通信 量子通信

电磁波谱



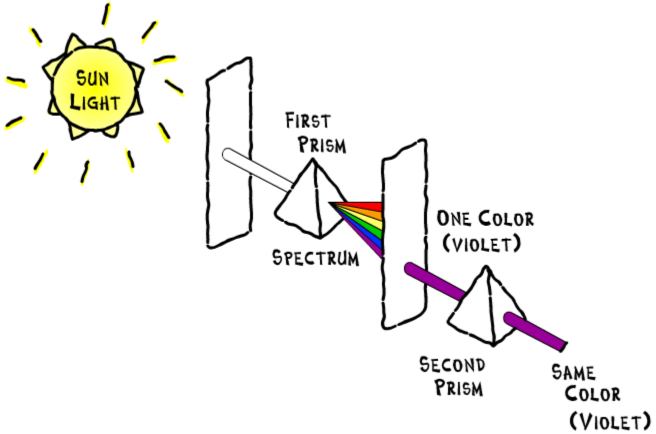
人眼视觉细胞能够感受的光波称为**可见光**



• 20:38:00

光的频率和真空中的波长

名称	波长范围	频率范围/Hz
远红外	100 μm ～ 10 μm	3×10^{12} ～ 3×10^{13}
中红外	10 μm ～ 2 μm	3×10^{13} ～ 1.5×10^{14}
近红外	2 μm ～760 nm	1.5×10^{14} ～ 3.9×10^{14}
红	760 nm ～622 nm	3.9×10^{14} ～ 4.7×10^{14}
橙	622 nm ～597 nm	4.7×10^{14} ～ 5.0×10^{14}
黄	597 nm ～577 nm	5.0×10^{14} ～ 5.5×10^{14}
绿	577 nm ～492 nm	5.5×10^{14} ～ 6.3×10^{14}
青	492 nm ～450 nm	6.3×10^{14} ～ 6.7×10^{14}
蓝	450 nm ～435 nm	6.7×10^{14} ～ 6.9×10^{14}
紫	435 nm ～390 nm	6.9×10^{14} ～ 7.7×10^{14}
紫外	390 nm ～ 5 nm	7.7×10^{14} ～ 6.0×10^{16}



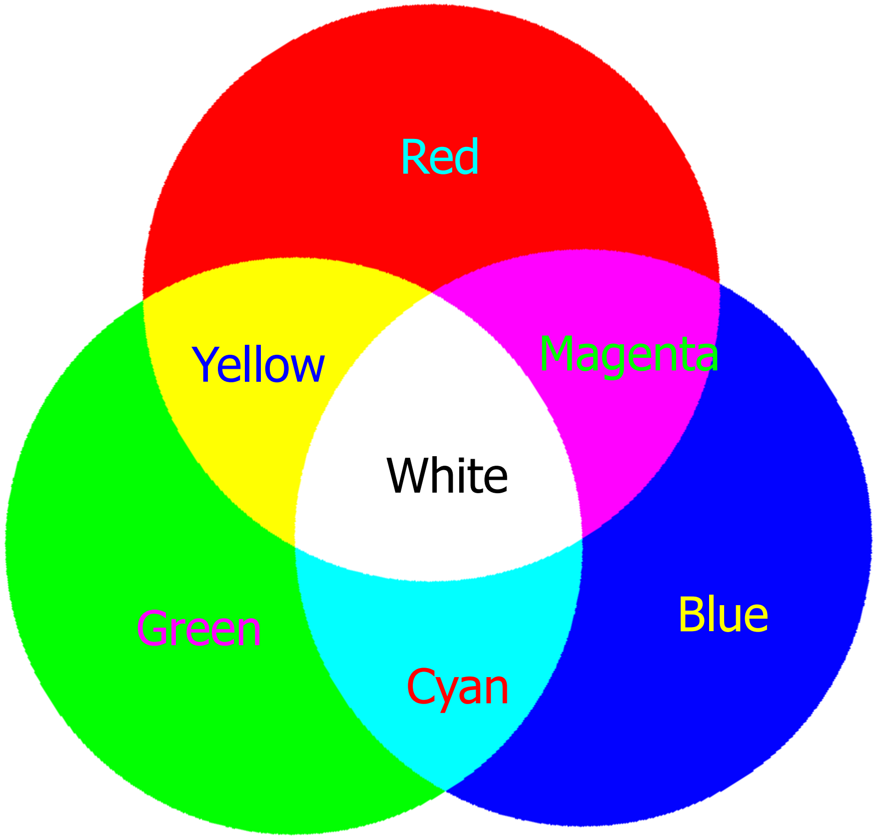
牛顿：光的分解实验

- 单色光：具有单一波长的光
- 复色光：不同波长的单色光混合而成的光

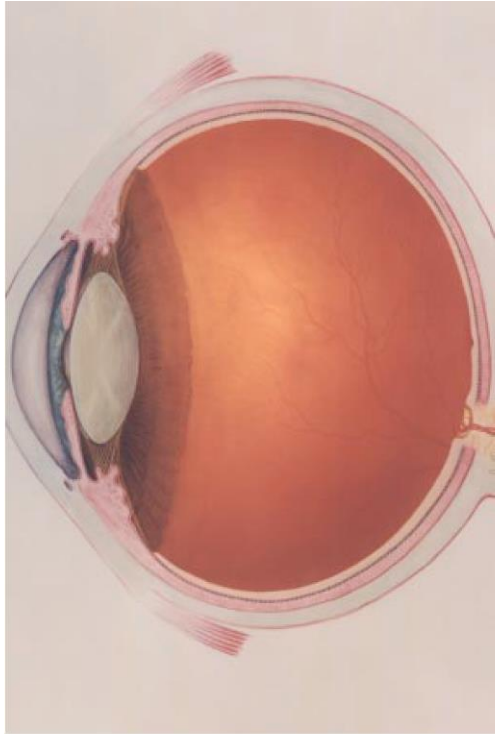
眼睛分辨的颜色依赖于频率（光子能量$h\nu$），而不是波长。波长在不同介质中会改变。

三原色

Thomas Young首先提出三原色原理，他认为一切色彩都可以由红、绿、蓝三种原色的不同比例混合而成，这一原理，已成为现代颜色理论的基础。



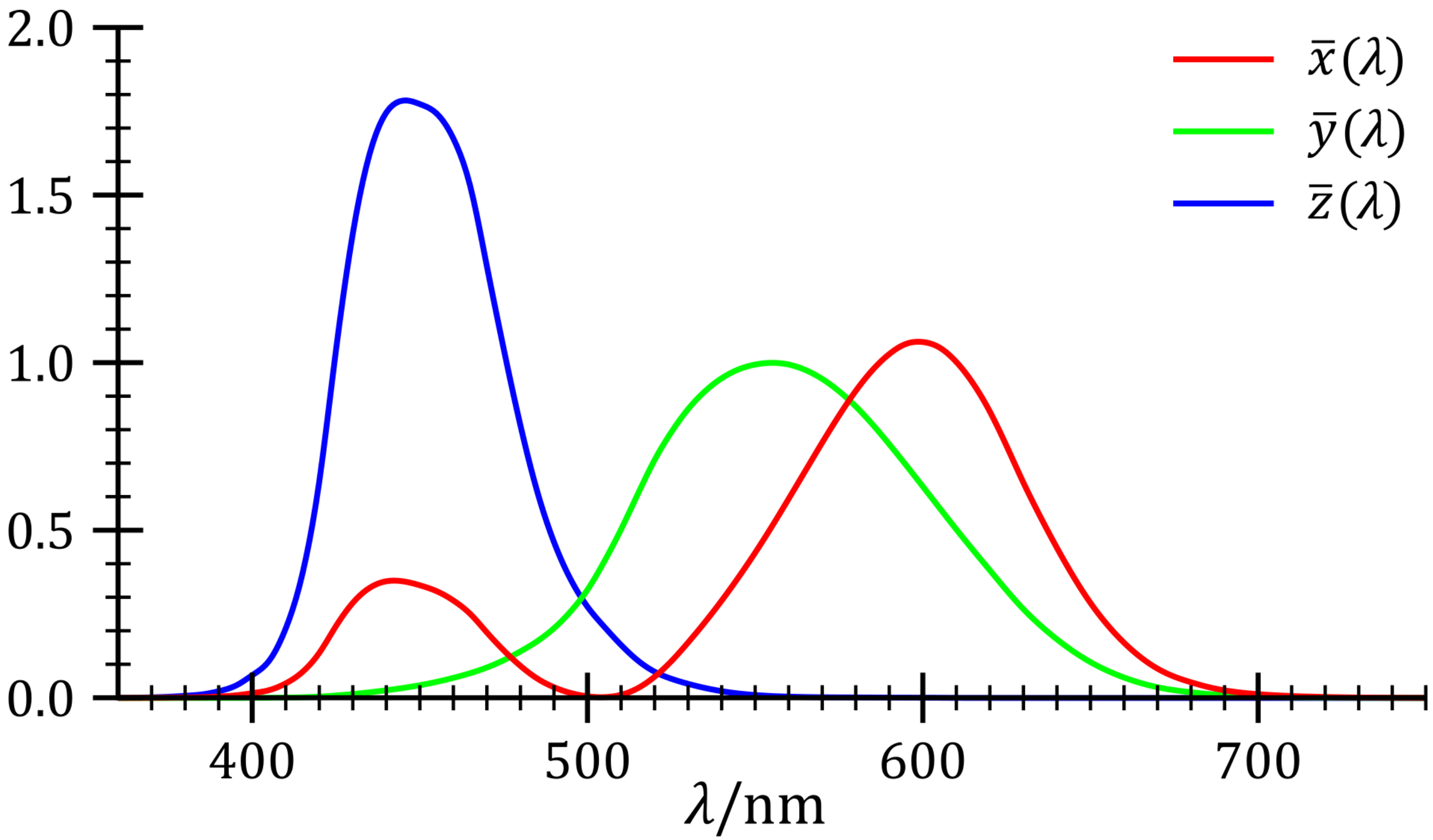
三原色的生理学基础



- 视觉：人的视网膜上约有1.1～1.3 亿个柱细胞；600～700万个锥细胞，在中心凹处最多。当光线照到视网膜上时，视紫红质(rhodopsin)发生化学变化，刺激神经细胞，最后由神经传到大脑，产生视觉。

- 柱状细胞灵敏度高，能感觉极微弱的光。
- 锥状细胞有3种，分别对红、绿、蓝敏感，但是在弱光下几乎没有反应。（➞暗光下看不到色彩）
- 对绿光的灵敏度最高，对红光的灵敏度低得多。

CIE1931 xyz color matching function



- 超级色觉四色视者
- 男女的颜色敏感度不同
- 皮皮虾有16种视锥细胞且可感知紫外光谱和光的极化

光波的波函数

- 即电磁场的波函数

$\vec{E} = \vec{E}(t,\vec{r}), \qquad \vec{B} = \vec{B}(t,\vec{r})$

- 麦克斯韦方程常用特解

单色平面波(完备)和球面波

任何形式的光波，都可以写成这些特解的线性叠加

- 单色波（定态光场）

$$\begin{cases} \vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0(\vec{r})\cos\big(\omega t + \varphi_E(\vec{r})\big) \\ \vec{B}(\vec{r},t) = \vec{B}_0(\vec{r})\cos\big(\omega t + \varphi_M(\vec{r})\big) \end{cases}$$

① 空间各点电磁场以单一频率作简谐振荡

② 光波振幅不随时间变化

③ 初相位的空间分布与时间无关

④ 光波波列在空间上无限延伸，在时间上无限长

实际光源只能发出近似的单色光波

平面单色波

- 沿z轴正方向传播的平面简谐电磁波

$$\begin{cases}\vec{E}(t,\vec{r})=\vec{E}_0\cos\left[\omega\left(t-\frac{z}{v}\right)+\phi_0\right]\\ \vec{B}(t,\vec{r})=\vec{B}_0\cos\left[\omega\left(t-\frac{z}{v}\right)+\phi_0\right]\end{cases}$$

- 相速度

$$\omega\left(t-\frac{z}{v}\right)+\phi_0=\text{constant}$$

$$\Rightarrow z=vt+z_0$$

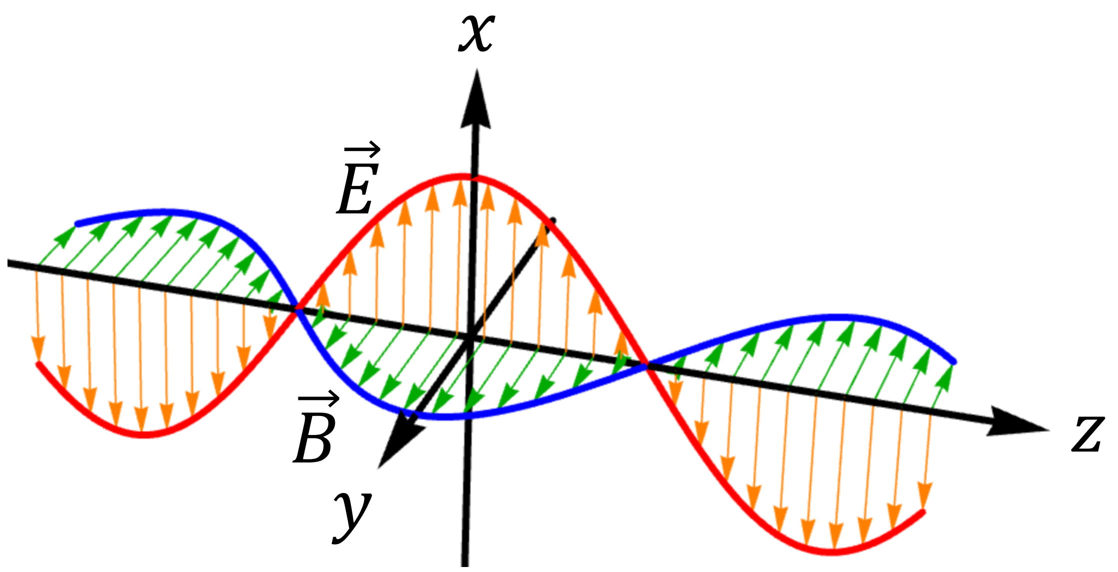
- 符合麦克斯韦电磁理论

① 振幅$\vec{E}_0$、$\vec{B}_0$和速度$\vec{v}$互相垂直，是横波

② 电场和磁场同相位

③ 电、磁振幅成正比

$$E_0=\frac{v}{c}B_0$$



光矢量

- 底片、人眼等对电场敏感。称电场矢量为光矢量

  - ✓ 平面单色光波的光矢量

  $$\vec{E}=\vec{E}_0\cos\left(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\phi_0\right)$$

  - ✓ 波矢量表示空间频率

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

  - ✓ 平面波在固定时刻的等相面是平面，

  $$\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\phi_0=\phi$$

- 标量波函数

  各束光的振动方向近似平行，或者只需考虑其中一个方向的光矢量分量

  - ✓ 单色平面波的标量波函数

  $$E=E_0\cos\left(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\phi_0\right)$$

  - ✓ 单色球面波的标量波函数

  $$E=\frac{A_0}{r}\cos(\omega t-kr+\phi_0)$$

复数形式的波函数

- 复波函数

对光矢量

$$E = E_0(\vec{r})\cos\left(\omega t + \phi(\vec{r})\right)$$

添加虚部，定义复波函数为

$$\tilde{E}(t,\vec{r}) \overset{\text{def}}{=} E_0(\vec{r})\left\{\cos\left(\omega t + \phi(\vec{r})\right) - i\sin\left(\omega t + \phi(\vec{r})\right)\right\} = E_0(\vec{r})e^{-i\phi(\vec{r})}e^{-i\omega t}$$

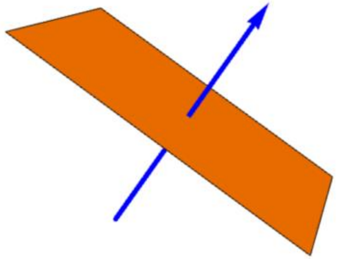
复振幅是

$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = E_0(\vec{r})e^{-i\phi(\vec{r})}$$

$$\tilde{E}(t,\vec{r}) = \tilde{E}_0(\vec{r})e^{-i\omega t}$$

- 单色平面波的复振幅

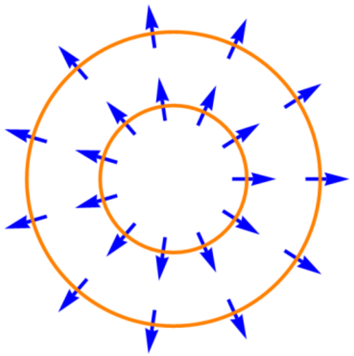
$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = E_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\phi_0)}$$



平面波的等相面和波矢量

- 单色球面波的复振幅

$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = \frac{A_0}{r}e^{i(kr-\phi_0)}$$



球面波的等相面和波矢量

光强

- 按电磁学理论，能流密度为坡印廷矢量

$$\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\vec{E}\cdot\vec{E}$$

光波的频率（10^{14}Hz）远大于人眼和探测仪器的时间分辨能力，能流无法测量

- 能流密度的长时间平均为光强

$$I\overset{\text{def}}{=}\langle S\rangle=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\langle\vec{E}^2\rangle$$

- （同一种介质中）相对光强（简称光强）

$$I\overset{\text{def}}{=}2\langle\vec{E}\cdot\vec{E}\rangle$$

- 单色波的光强

$$I=\frac{1}{T}\int_0^T 2E_0^2(\vec{r})\cos^2\big(\omega t+\phi(\vec{r})\big)\,dt$$
$$=\frac{1}{T}E_0^2(\vec{r})\int_0^T\big[1+\cos\big(2\omega t+2\phi(\vec{r})\big)\big]dt$$
$$=E_0^2(\vec{r})=\tilde{E}_0(\vec{r})\tilde{E}_0^*(\vec{r})$$

- 单色平面波的光强

$$\tilde{E}_0(\vec{r})=E_0e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\phi_0)},\qquad I=E_0^2$$

- 单色球面波的光强

$$\tilde{E}_0(\vec{r})=\frac{A_0}{r}e^{i(kr-\phi_0)},\qquad I=\frac{A_0^2}{r^2}$$

$$I\cdot 4\pi r^2=4\pi A_0^2$$

单位时间球面的总能量，与半径无关

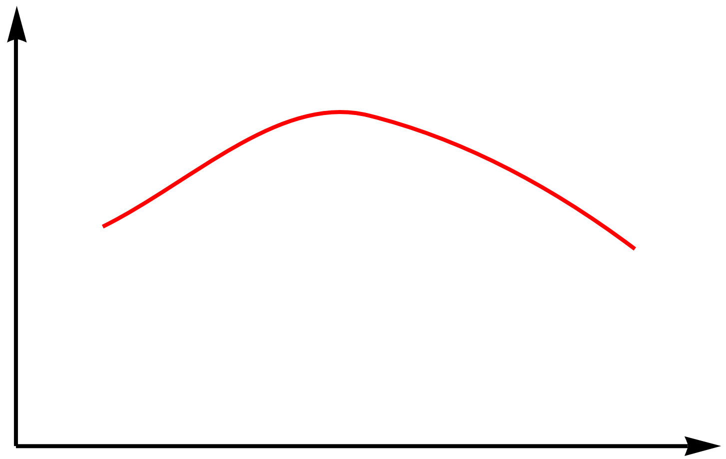
光谱

◆谱密度

$$i(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dI(\lambda)}{d\lambda}$$

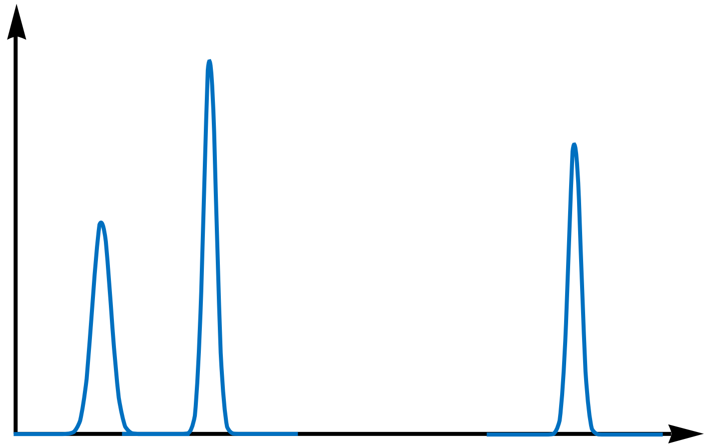
◆总光强

$$I = \int_0^{+\infty} i(\lambda)d\lambda$$

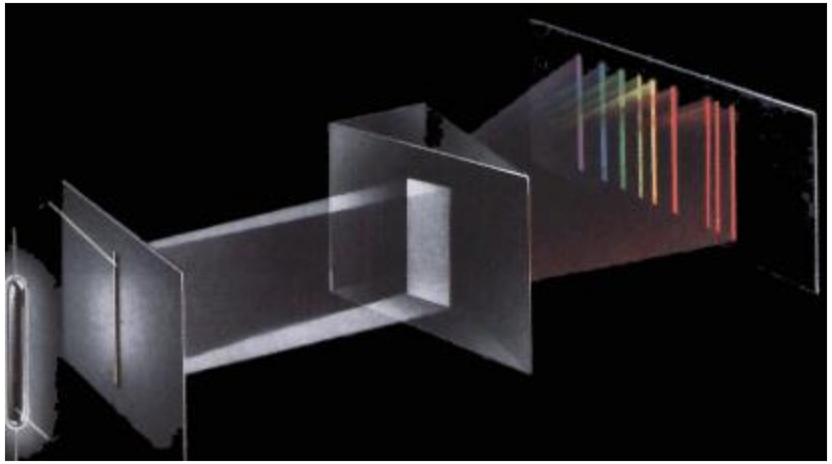


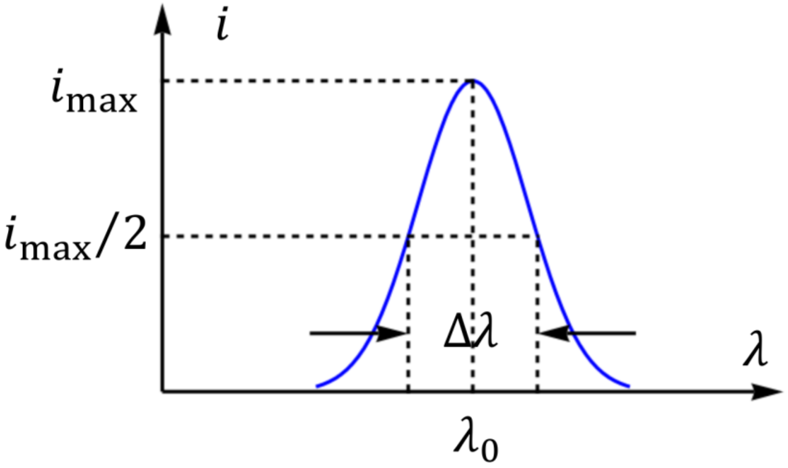
◆连续光谱和线光谱

◆白光：和太阳连续光谱相近的混合光波



谱线宽度





氦光谱

◆ 谱线宽度来源于光源的能级宽度、分子热运动和碰撞等效应

◆ 理想的单色光波列为无限长，谱线宽度为无穷小

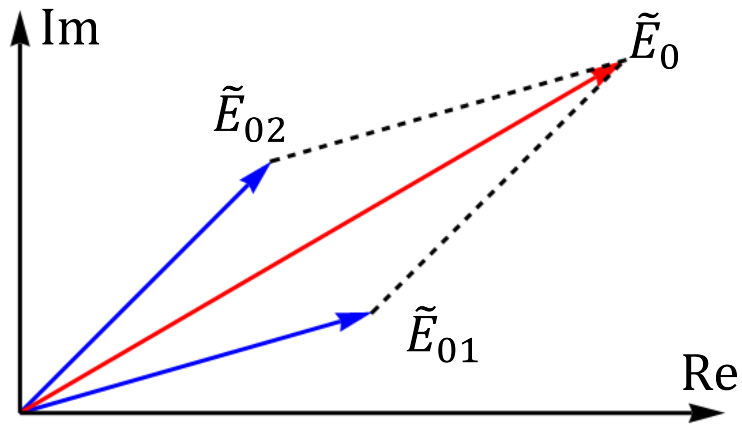
◆ 激光谱线宽度远远小于普通光源，表示激光的单色性非常好

◆ 太阳光谱除了一些暗线外，基本上是连续光谱

叠加原理

- 线性介质中的麦克斯韦方程，是线性偏微分方程组。方程组的解（光的波函数），服从叠加原理。
- 多列光波的光矢量

$$\vec{E}(t,\vec{r}) = \vec{E}_1(t,\vec{r}) + \vec{E}_2(t,\vec{r}) + \cdots$$



- 同频同振向的两列波的叠加（可用标量波函数）

$$E_1(t,\vec{r}) = E_{01}(\vec{r})\cos\big(\omega t + \phi_1(\vec{r})\big)$$
$$E_2(t,\vec{r}) = E_{02}(\vec{r})\cos\big(\omega t + \phi_2(\vec{r})\big)$$
$$E(t,\vec{r}) = E_{01}(\vec{r})\cos(\omega t + \phi_1) + E_{02}(\vec{r})\cos(\omega t + \phi_2)$$

- 总复振幅

$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = \tilde{E}_{01}(\vec{r}) + \tilde{E}_{02}(\vec{r}) = E_{01}(\vec{r})e^{i\phi_1(\vec{r})} + E_{02}(\vec{r})e^{i\phi_2(\vec{r})}$$

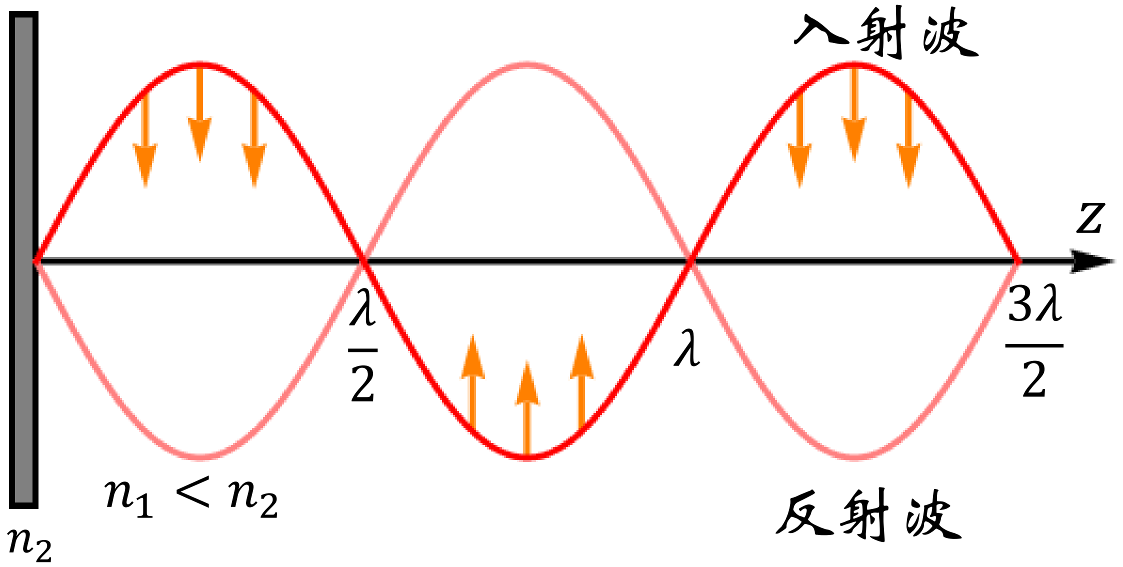
- 实振幅和相位

$$\tilde{E}_0(\vec{r}) = E_0(\vec{r})e^{i\phi(\vec{r})}$$

$$E_0^2(\vec{r}) = \left|\tilde{E}_{01}(\vec{r}) + \tilde{E}_{01}(\vec{r})\right|^2$$
$$= E_{01}^2(\vec{r}) + E_{02}^2(\vec{r}) + 2E_{01}(\vec{r})E_{02}(\vec{r})\cos\big(\phi_1(\vec{r}) - \phi_2(\vec{r})\big)$$

$$\phi(\vec{r})$$
$$= \arctan(E_{01}\cos\phi_1 + E_{02}\cos\phi_2\,, E_{01}\sin\phi_1 + E_{02}\sin\phi_2)$$

例：驻波



从右向左入射的平面波

$$E_1 = E_0\cos(\omega t + kz + \varphi_0)$$

反射波

$$E_2 = E_0\cos(\omega t - kz + \varphi_0 - \pi)$$

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$E = E_1 + E_2$$

$$= 2E_0\cos\left(kz + \frac{\pi}{2}\right) * \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

- 所有的点都在作简谐振动，振幅固定
- 各点相位同步，同时达到最大值或零