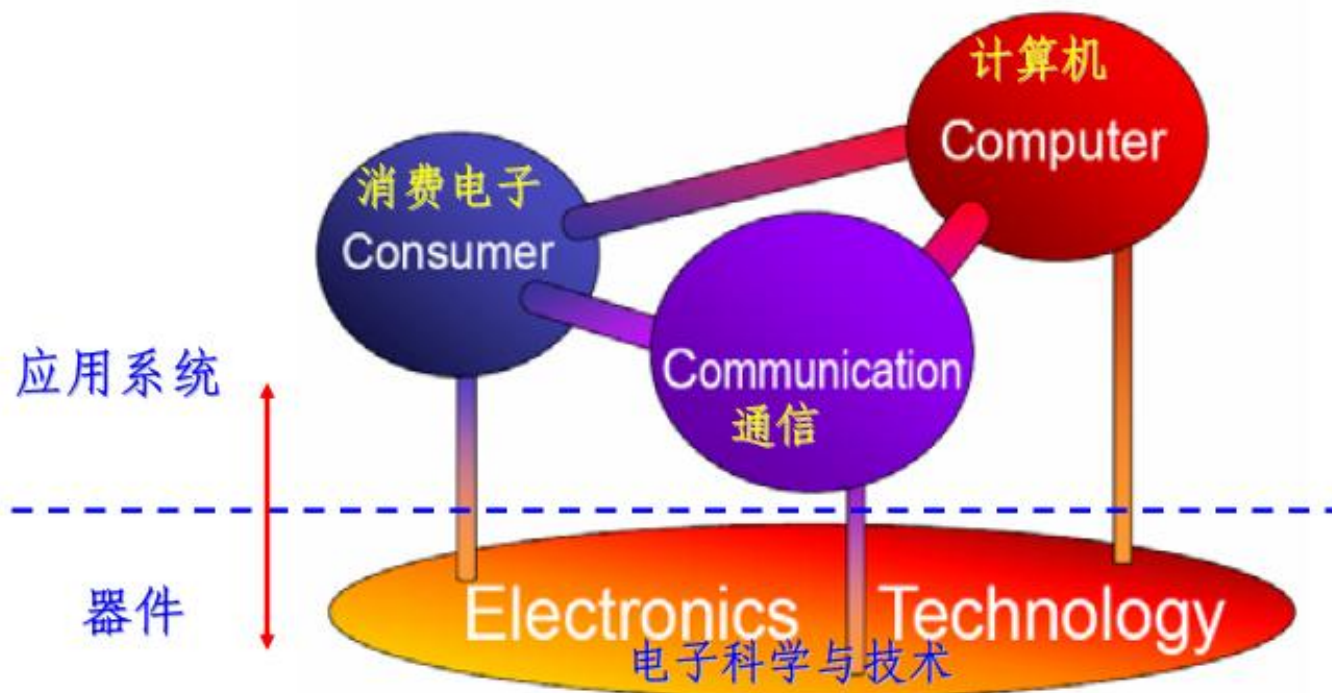


上节内容回顾

电子科学与技术是3C的基础





上节内容回顾

信息时代的三大基石 (Infrastructure of Information Age)

➤ 微电子学 (Microelectronics)

信息和计算技术的基础



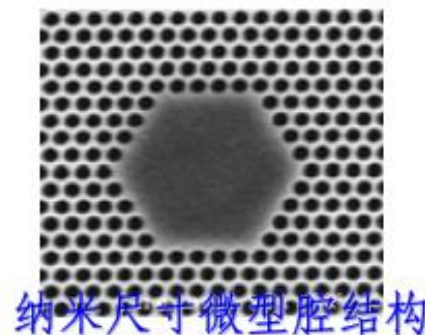
➤ 光子学 (Photonics)

通信网络的基础



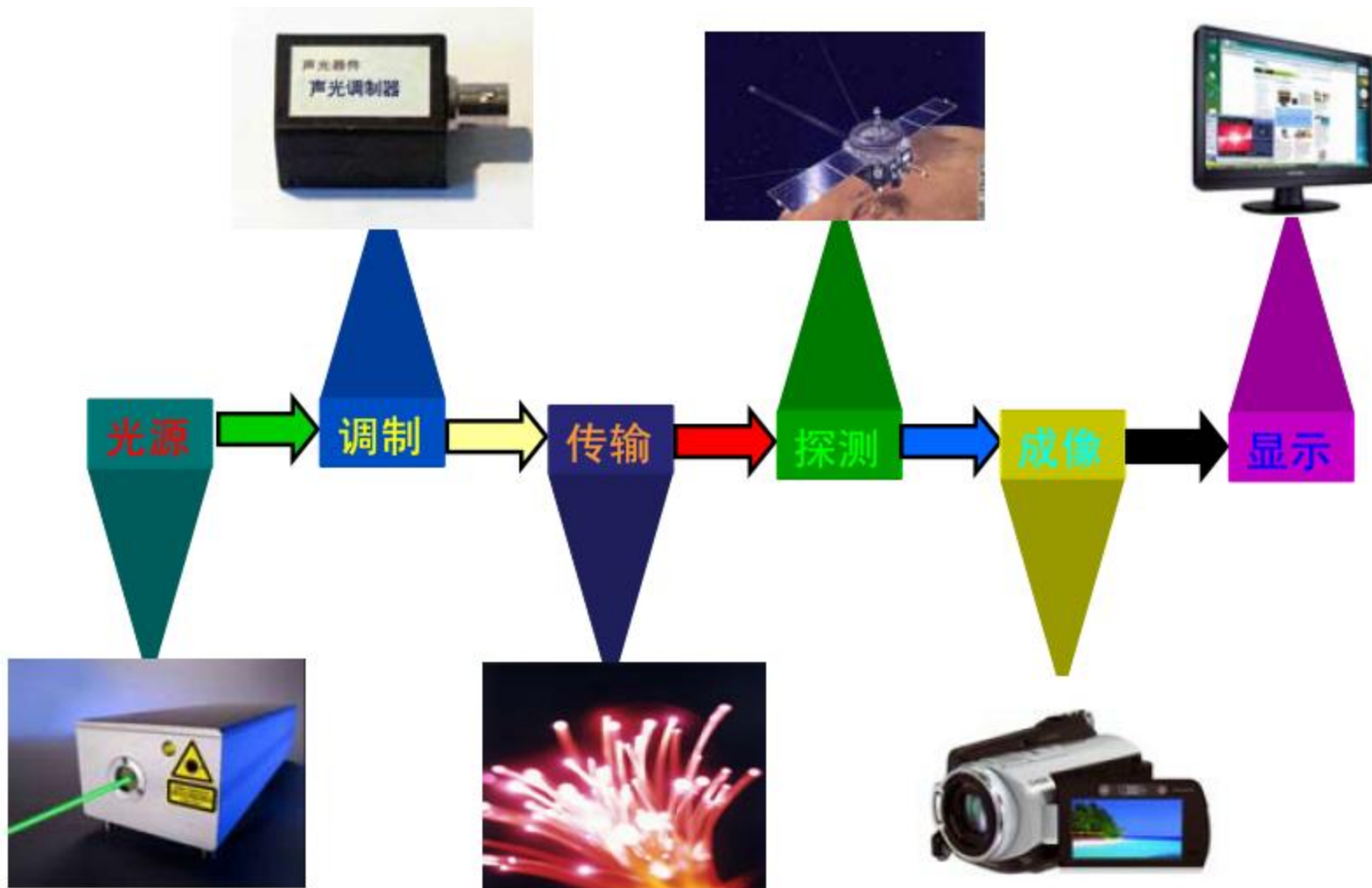
➤ 纳米技术 (Nanotechnology)

未来信息技术和生物技术的基础



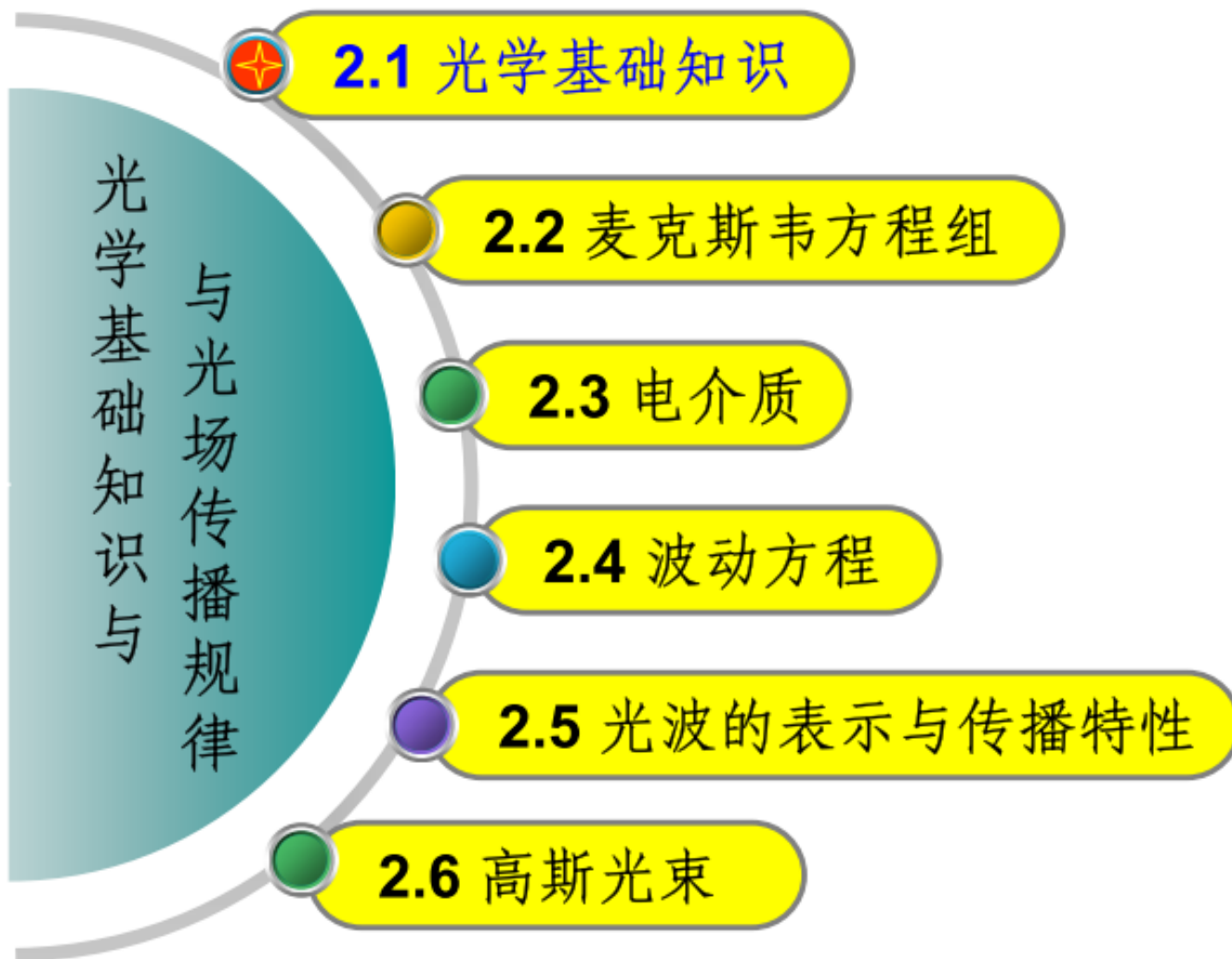


典型信息光电子系统





第二章 光学基础知识与光场传播规律





2.1 光学基础知识

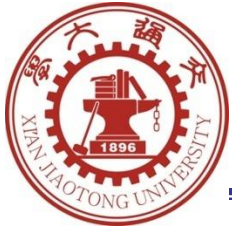
2.1.1 光的基本属性

2.1.2 折射、反射、全反射

2.1.3 光的干涉

2.1.4 光的衍射

2.1.5 光的偏振



2.1.1 光的基本属性

微粒说

根据光的直线传播性质，牛顿于1704年在《光学》一书中提出
光是微粒流的理论：

这些微粒从光源飞出来，在真空或均匀物质内由于惯性
而做匀速直线运动；

并以此解释了光的反射定律和折射定律。

但是，从十七世纪开始，就发现有与光的直线传播不完全符合的事实
如： 胡克等人观察到衍射现象



2.1.1 光的基本属性

波动说

1678年，惠更斯在《论光》一书中提出了光波动的次波原理，成功地解释了折射、反射定律，还解释了方解石的双折射定律。但是没有提到波长、相位这些概念

1815年，菲涅耳用杨氏干涉原理补充了惠更斯原理，称为惠更斯-菲涅耳原理

1808年，马吕斯发现光在两种介质表面上反射时的偏振现象

1817年，杨氏提出了光是一种横波的假设

1864年，麦克斯韦建立了普遍的电磁波方程，并通过方程式证明了横向电磁波的存在，还推导出了光波在真空中的传播速度。

1884年，赫兹用实验证明了麦克斯韦的预言，并发明了测量电磁波波长的方法。波动说理论既解释了光的直线传播，也解释了光的干涉、衍射现象，同时又解释了光的偏振现象。总之，光是一种横向电磁波。



2.1.1 光的基本属性

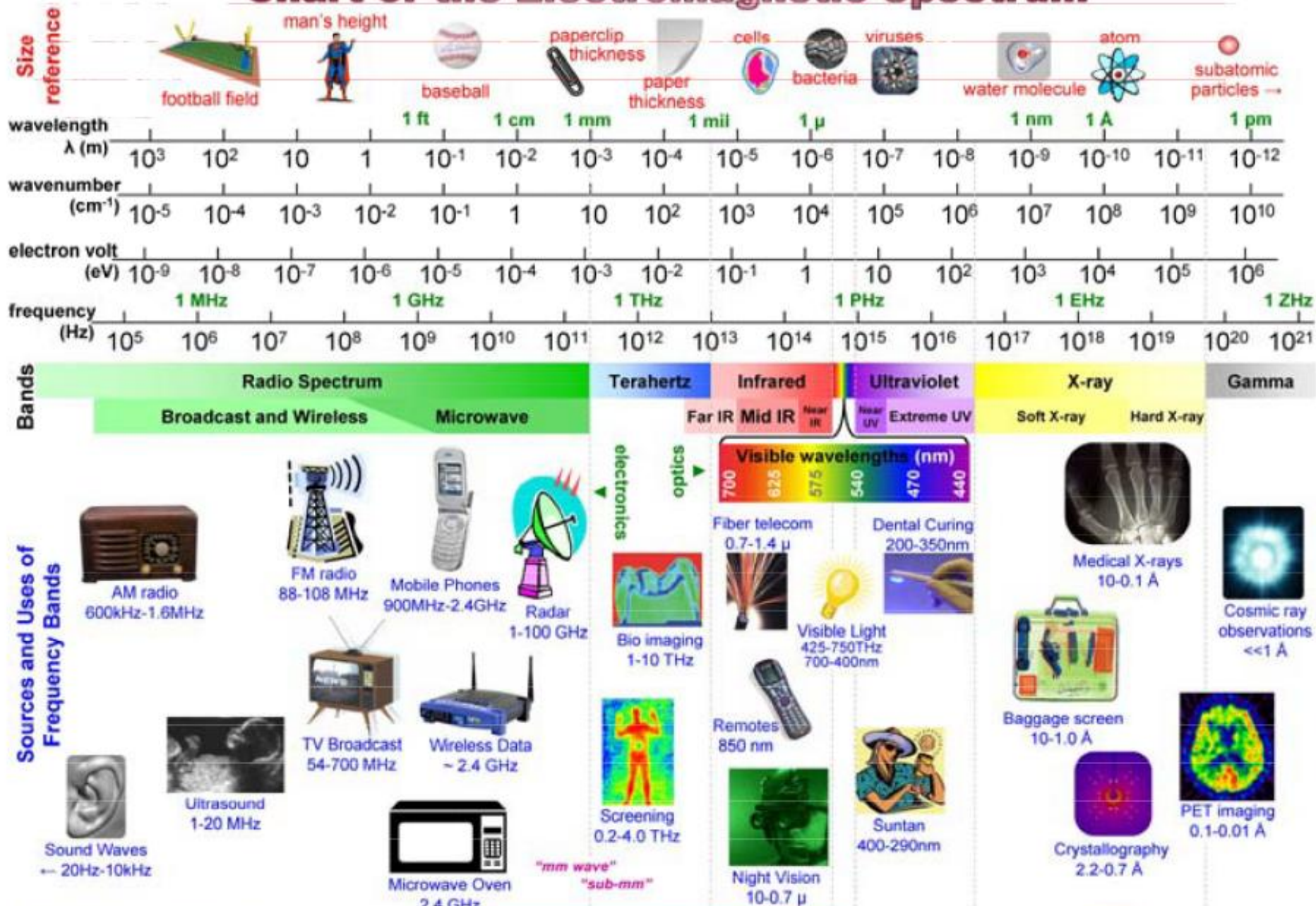
按照电磁波在真空中传播的波长或频率的顺序，将所有的电磁波排列成谱，在物理学上称为电磁波谱（或电磁频谱）。电磁波谱区段的界限是渐变的。

电磁波谱及其主要产生方式

电磁波谱	真空中的波长	频率/Hz	主要产生方式	本质	
无线电波	长波	3~30km	$10^4 \sim 10^5$	由振荡电路所产生的电磁辐射	
	中波	200m~3km	$10^5 \sim 1.5\text{M}$		
	短波	10~200m	1.5M~30M		
	超短波	1~10m	30M~300M		
	微波	1mm~3m	100M~300G		
	亚毫米波	0.1~1mm	300M~3T		
红外线	$0.76\mu\text{m} \sim 0.6\text{mm}$	500G~400T	由炽热物体、气体放电或其他光源激发分子或原子等微观客体所产生的电磁辐射	外层电子跃迁	
可见光	$0.40 \sim 0.76\mu\text{m}$	400T~750T			
紫外线	$0.03 \sim 0.40\mu\text{m}$	750T~ 10^4T			
X射线	$0.1\text{nm} \sim 0.03\mu\text{m}$	$10^4\text{T} \sim 3 \times 10^6\text{T}$	用高速电子流轰击原子中的内层电子而产生的电磁辐射	内层电子跃迁	
γ 射线	$1.0\text{pm} \sim 0.1\text{nm}$	$3 \times 10^6\text{T} \sim 3 \times 10^8\text{T}$	放射性原子衰变或用高能粒子与原子核碰撞时所发出的电磁辐射	原子核衰变或裂变	

电磁波谱

Chart of the Electromagnetic Spectrum



$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \cdot 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$



2.1.1 光的基本属性

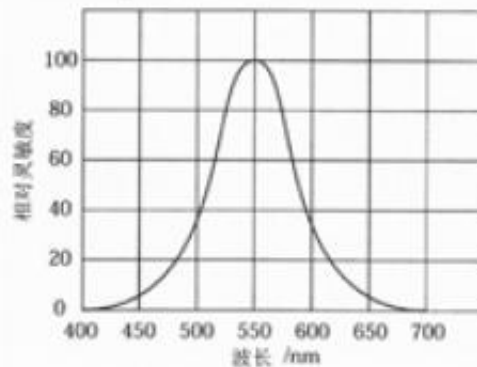
可见光

可见光是一种波长很短的电磁波，在电磁波谱中占很窄的频段

可见光七彩虹色的波长和频率范围

光色	波长/nm	频率/Hz	中心波长/nm	中心频率/Hz
红	760~622	$3.9 \times 10^{14} \sim 4.8 \times 10^{14}$	660	4.5×10^{14}
橙	622~597	$4.8 \times 10^{14} \sim 5.0 \times 10^{14}$	610	4.9×10^{14}
黄	597~577	$5.0 \times 10^{14} \sim 5.4 \times 10^{14}$	570	5.3×10^{14}
绿	577~492	$5.4 \times 10^{14} \sim 6.1 \times 10^{14}$	540	5.5×10^{14}
青	492~470	$6.1 \times 10^{14} \sim 6.4 \times 10^{14}$	480	6.3×10^{14}
蓝	470~455	$6.4 \times 10^{14} \sim 6.6 \times 10^{14}$	460	6.5×10^{14}
紫	455~400	$6.6 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	430	7.0×10^{14}

人眼对于不同波长的光的相对灵敏度不同，可见光区中心波长约为**555nm**的黄绿光，人眼感觉最敏感





2.1.1 光的基本属性

紫外线 ultraviolet ray, UVR 紫外线是位于日光高能区的不可见光线

名称	缩写	波长范围 (nm)	光子能量 (eV)
长波紫外	UVA	400 ~ 315	3.10 ~ 3.94
近紫外	NUV	400 ~ 300	3.10 ~ 4.13
中波紫外	UVB	315 ~ 280	3.94 ~ 4.43
中紫外	MUV	300 ~ 200	4.13 ~ 6.20
短波紫外	UVC	280 ~ 100	4.43 ~ 12.4
远紫外	FUV	200 ~ 122	6.20 ~ 10.2
真空紫外	VUV	200 ~ 100	6.20 ~ 12.4
浅紫外	LUV	100 ~ 88	12.4 ~ 14.1
超紫外	SUV	150 ~ 10	8.28 ~ 12.4
极紫外	EUV	121 ~ 10	10.2 ~ 12.4

紫外线还可以防伪；

紫外线的粒子性较强，能使各种金属产生光电效应；

紫外线还有生理作用，能杀菌、消毒、治疗皮肤病和软骨病等。



2.1.1 光的基本属性

红外线 (Infrared ,IR)

波长**0.76 ~ 1000 mm**，可以分为：

近红外 (NIR) **0.76 ~ 3 mm**

中红外 (MIR) **3 ~ 6 mm**

远红外 (FIR) **6 ~ 15 mm**

超远红外 (UFIR) **15 ~ 1000 mm**



其中近红外中，**0.76 ~ 0.9 mm** 又称摄影红外

其中中、远红外等是物体发射的一种热辐射，所以也叫热红外。

通常所说的光学区域(或光学频谱)包括红外线、可见光和紫外线。

由于光的频率极高(**$10^{12} \sim 10^{16}$ Hz**)，数值很大，使用起来很不方便，所以采用波长表征，光谱区域的波长范围约从 **1000mm~10 nm**。



2.1.1 光的基本属性

光的电磁理论的**主要困难**是不能解释光和物质相互作用的某些现象：

例如：**炽热黑体辐射中能量按波长分布的问题**

1887年赫兹发现的光电效应

注1：黑体辐射：任何物体都具有不断辐射、吸收、发射电磁波的本领。辐射出去的电磁波在各个波段是不同的，也就是具有一定的频谱分布。这种频谱分布与物体本身的特性及其温度有关，因而被称之为热辐射。为了研究不依赖于物质具体物性的热辐射规律，物理学家们定义了一种理想物体——黑体(**black body**)，以此作为热辐射研究的标准物体。

注2：光电效应：光照射到某些物质上，引起物质的电性质发生变化，也就是光能量转换成电能。这类光致电变的现象被人们统称为光电效应 (**Photoelectric effect**)



2.1.1 光的基本属性

1900年普朗克提出了辐射的量子理论:

- (1)能量是不连续的
- (2)能量的大小等于 $h\nu$ 的整数倍

1905年爱因斯坦提出了光量子理论(光子理论), 圆满解释了光电效应

并以此获得1921年诺贝尔物理学奖

光的波动性: 光的干涉、衍射和偏振

光的粒子性: 黑体辐射、光电效应等

光同时具有波粒二象性

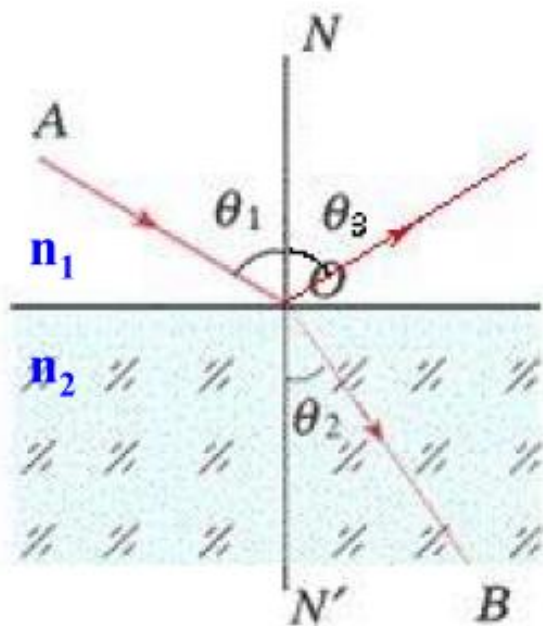


2.1.2 折射 反射 全反射

1 折射、反射定律包括两方面的内容

(1) 折射、反射光位于入射光与界面法线所决定的平面内

(2) 折射角满足 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ，反射角等于入射角 $\theta_1 = \theta_3$



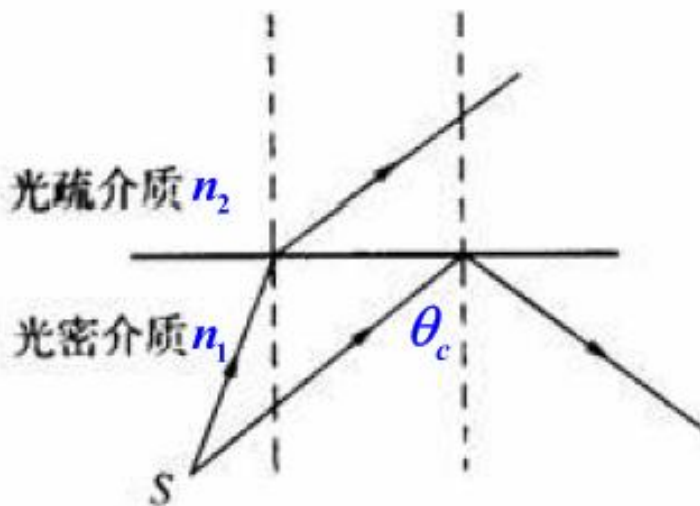


2.1.2 折射 反射 全反射

2 全反射

(1) 光从光密介质向光疏介质入射—— $n_1 > n_2$

(2) 入射角大于临界角—— $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$



入射光的能量全部被界面反射回光密介质



2.1.3 光的干涉

当两束光波在空间某点相遇后，仍然保持各自的特性（频率、波长、振幅、偏振）不变，按照各自原来的方向继续传播，相遇点的电场为各波在该点独立作用的电场矢量和，这就是波的**独立传播原理**

在波的独立传播定律成立的前提下，当两束或多束光波同时存在时，在它们的交叠区域内每点的振动是各列波单独在该点产生的振动的合成，这就是**波的叠加原理**



2.1.3 光的干涉

两束光产生干涉的条件（相干条件）

- (1) 频率相同
- (2) 光矢量振动方向平行
- (3) 相位差恒定

两束相干光波

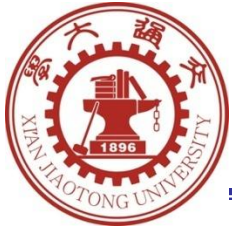
$$\vec{E}_1 = \vec{A}_1 \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{A}_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

叠加的结果 $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{A} \cos(\omega t + \phi)$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

$$\tan \phi = \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_2 + A_2 \cos \phi_1}$$



2.1.3 光的干涉

平均强度

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \overline{A^2} = \frac{1}{t} \int_0^t A^2 dt \\ &= \frac{1}{t} \int_0^t [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)] dt \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \frac{1}{t} \int_0^t \cos(\phi_2 - \phi_1) dt\end{aligned}$$

由于位相差恒定, $\phi_2 - \phi_1$ 与时间无关, 则

$$\bar{I} = A_1^2 + A_2^2 + \underline{2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)} \quad \text{干涉项}$$



2.1.3 光的干涉

$$\bar{I} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

(1)若两振动相位相同

$$\phi_2 - \phi_1 = 2m\pi, m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\bar{I} = (A_1 + A_2)^2$$

合振动平均强度达最大值(干涉相长)

(2)若两振动相位相反

$$\phi_2 - \phi_1 = (2m + 1)\pi, m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\bar{I} = (A_1 - A_2)^2$$

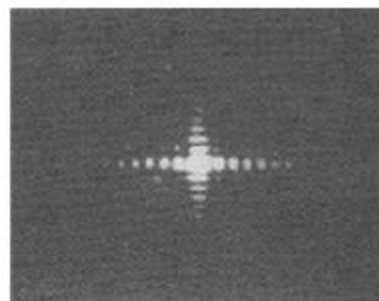
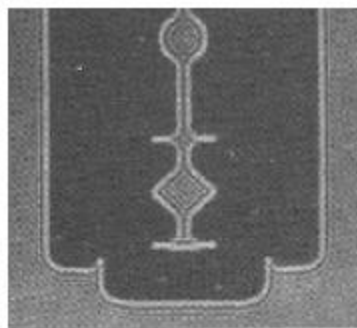
合振动平均强度最小(干涉相消)



2.1.4 光的衍射

1 光的衍射现象

- (1) 窗外说话,窗内听见(声波)
- (2) 无线电波绕过山的障碍物,山区能接收到电台的广播(电磁波)
- (3) 光波照射不透明的障碍物,形成的影子



吴百诗,《大学物理(新版)》(下册),科学出版社,2007年,P223



2.1.4 光的衍射

2 惠更斯原理

行进中的波阵面上任一点都可看作是新的次波源，而从波阵面上各点发出的许多次波所形成的包络面，就是原波面在一定时间内所传播到的新波面。



惠更斯原理可以解释光的直线传播、反射、折射现象，也可以解释晶体的双折射现象。但是，原始的惠更斯原理是比较粗糙的（惠更斯原理的次波假设不涉及波的时空周期特性——波长，振幅和位相），可以解释光偏离直线传播现象，但是无法解释为什么屏上会出现“明暗条纹”（表明各点的振幅大小不等）因此必须能够定量计算光所到达的空间范围内任何一点的振幅，才能更精确地解释衍射现象。

而且由惠更斯原理还会导致有倒退波的存在，而这显然是不存在的。



2.1.4 光的衍射

惠更斯-菲涅耳原理 同一波面上各点发出的次波是相干波，经过传播在空间某点相遇时的叠加是相干叠加。

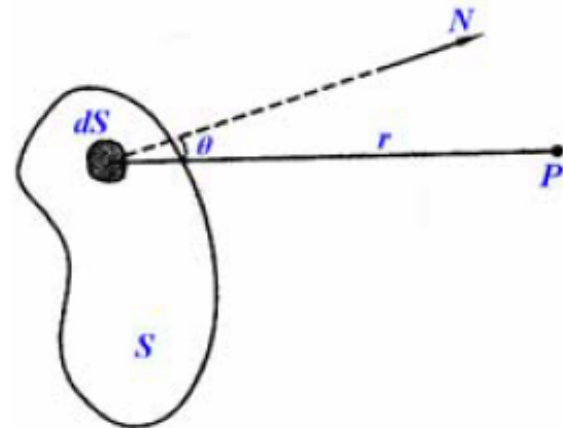
波面 S 上的每个面元 dS 所发出的各次波的振幅和位相满足下面四个假设：

(1) 波面 S 是一个等位相面，面元 dS 面上各点所发出的所有次波都有相同的初位相。

(2) 次波在任意点 P 处所引起振动的振幅与 r 成反比（相当于表明次波是球面波）。

(3) 从面元 dS 所发次波在 P 处的振幅正比于 dS 的面积,且与倾角 θ 有关，其中 θ 为 dS 的法线 N 与 dS 到 P 点的连线 r 之间的夹角，即从 dS 发出的次波到达 P 点时的振幅随 θ 的增大而减小(倾斜因数)。

(4) 次波在 P 点处的位相，由光程 nr 决定(n 是媒质折射率)。





2.1.4 光的衍射

惠更斯-菲涅耳原理的数学表达式

时刻 t ，面元 dS 在 P 点处引起的振动可以表示为：

$$dE = Fk(\theta) \frac{dS}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

$k(\theta)$ 是倾斜因子，随着 θ 增大而减小

$\theta = 0$ 时， $k(\theta) = 1$ （最大）

$\theta \geq \pi/2$ 时， $k(\theta) = 0$ （最小），次波振幅为零，说明次波不能向后传播

时刻 t ，整个波面 S 在 P 点处引起的合振动可以表示为：

$$E = \int_S Fk(\varphi) \frac{\cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)}{r} dS$$

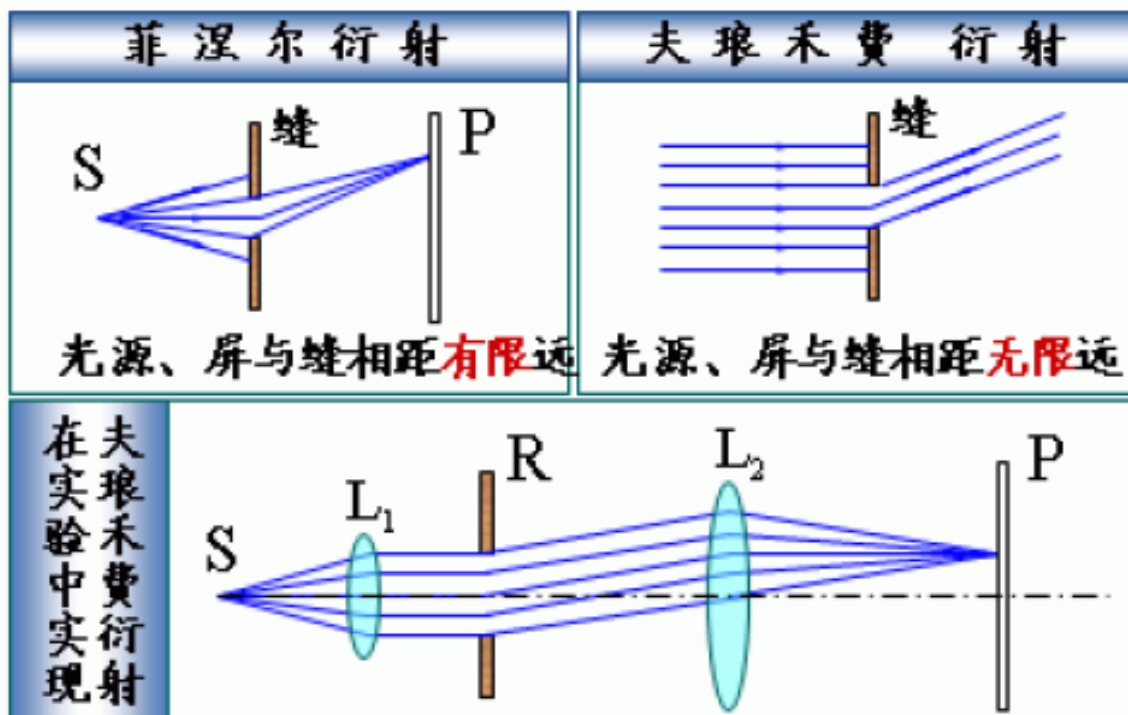
可以定量地描述光通过各种障碍物所产生的各种衍射现象



2.1.4 光的衍射

衍射现象通常分为两类:

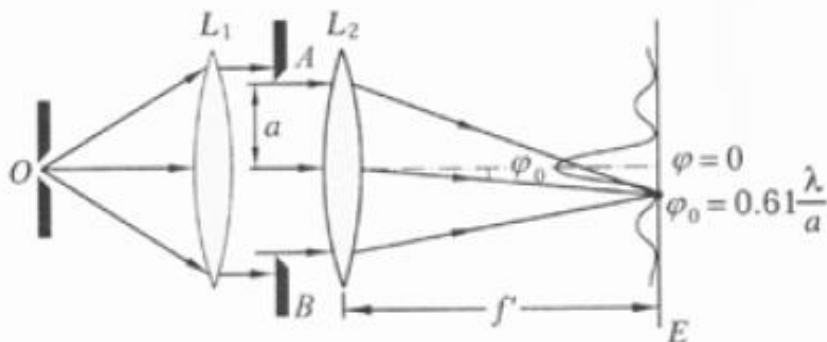
菲涅耳衍射（近场衍射）和夫琅禾费衍射（远场衍射）





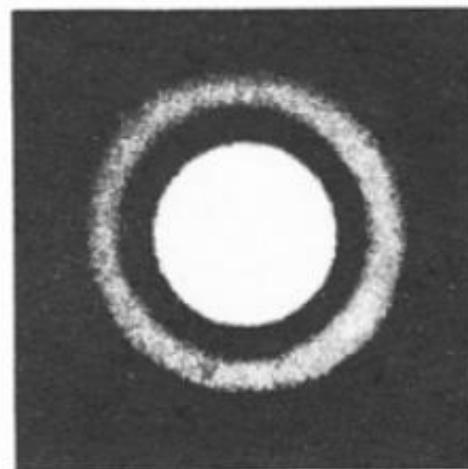
2.1.4 光的衍射

单缝圆孔夫琅禾费衍射



$D=2a$, 为圆孔直径

(a)

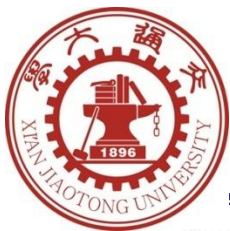


(b)

半角宽度 φ_0 $\varphi_0 \approx \sin \varphi_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$

衍射花样是中心为亮斑的明暗相间的圆环，入射光束总共光强的**84%**集中在艾里斑的中心光斑上

艾里斑规定了光学仪器的分辨率极限，称为衍射极限



2.1.4 光的衍射

瑞利判据（光学仪器最小分辨率）：

当一个像斑的中心刚好落在另外一个像斑中央亮斑边缘（即第一级暗环）上时候，认为两个像刚刚能够分辨

$$\text{最小分辨角 } \delta\varphi = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

例如：人眼

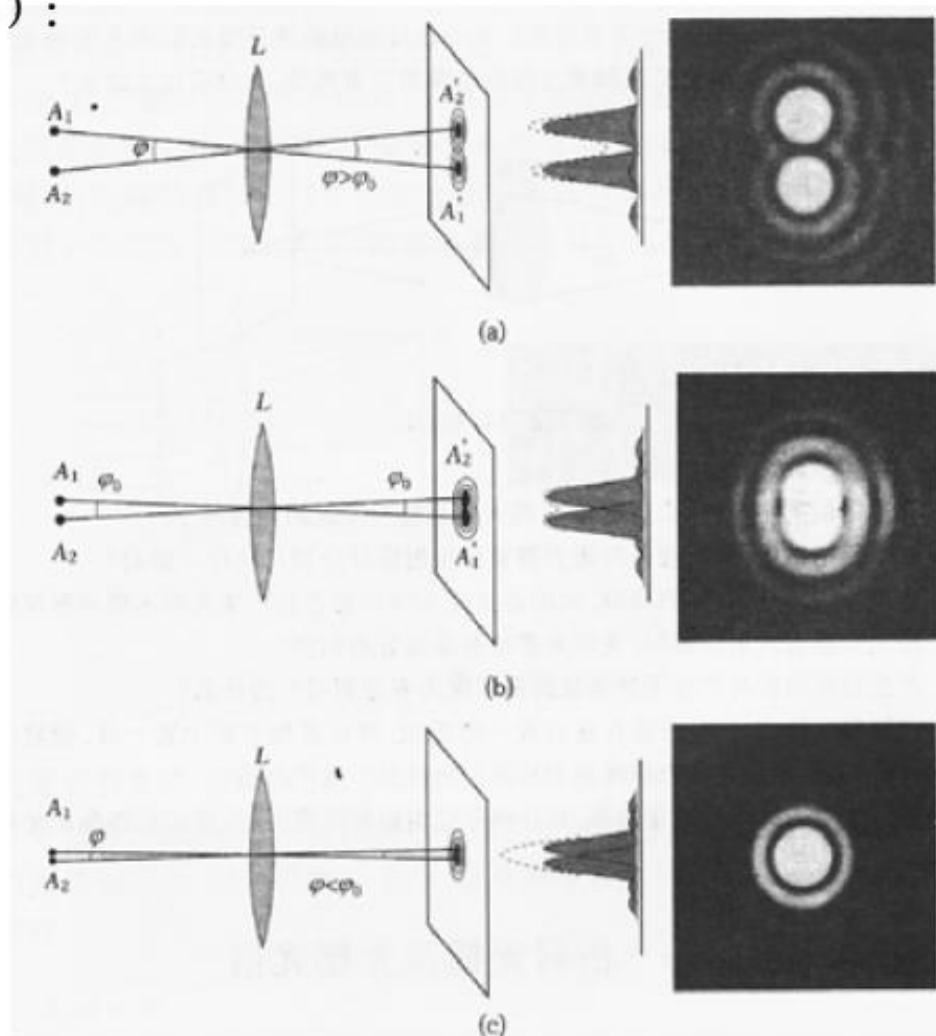
$$\lambda = 550\text{nm}, D \approx 2\text{mm}$$

$$\delta\varphi = 3.4 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

天文望远镜

$$\lambda = 550\text{nm}, D \approx 6\text{m}$$

$$\delta\varphi = 1.12 \times 10^{-7} \text{ rad}$$





2.1.5 光的偏振

波是振动的传播，当振动在介质中传播时，有两种形式：

纵波（**P**波）：波的传播方向与质点振动方向一致。

横波（**S**波）：波的传播方向与质点振动方向垂直。

机械波与电磁波既有相似之处又有不同之处：

机械波与电磁波的许多物理性质，如：折射、反射等是一致的，描述它们的物理量也是相同的。

机械波由机械振动产生，电磁波由电磁振荡产生；

机械波的传播需要特定的介质，在真空中不能传播，而电磁波（例如光波）可以在真空中传播；

机械波可以是横波和纵波，但电磁波只能是横波；

常见的机械波有：声波（纵波）、水波和地震波属于复杂机械波



2.1.5 光的偏振

偏振: 振动方向对于传播方向的不对称性叫做偏振, 它是横波区别于纵波的一个最明显的标志。

光的偏振: 光波电矢量振动的空间分布对于光的传播方向失去对称性的现象只有横波才能产生偏振现象, 故光的偏振是光的波动性的又一例证。

在垂直于传播方向的平面内, 包含一切可能方向的横向振动, 且平均说来, 任一方向上具有相同振幅, 这种横向振动对称于传播方向的光称为自然光(非偏振光)。

凡其振动失去这种对称性的光统称偏振光。

由自然光得到偏振光的过程称为起偏, 所用器件为起偏器

如该器件用来检验某一束光是否为偏振光, 则称之为检偏器

最常见光偏振态包括: 线偏振光、部分偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光

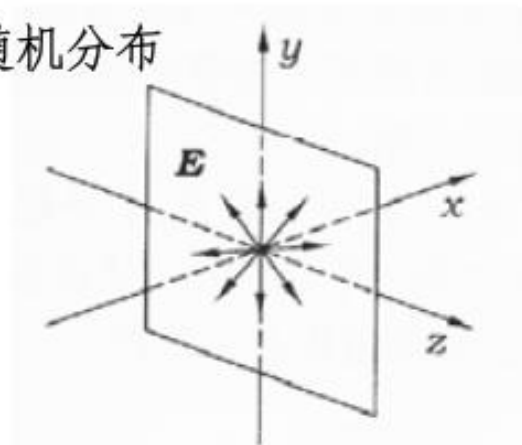


2.1.5 光的偏振

(1) 自然光

自然光属于非相干光源，其发光机理是众多原子或分子的自发辐射。这些自发辐射所产生光波的方向、频率及相位都是相互独立的(不确定、分散的)。

自然光在垂直于光传播方向的平面内沿各个方向振动的矢量都有，呈各方向概率相等的随机分布



但是，按照统计平均来说，无论哪一个方向的振动都不比其它方向占优势，这种光就是自然光。



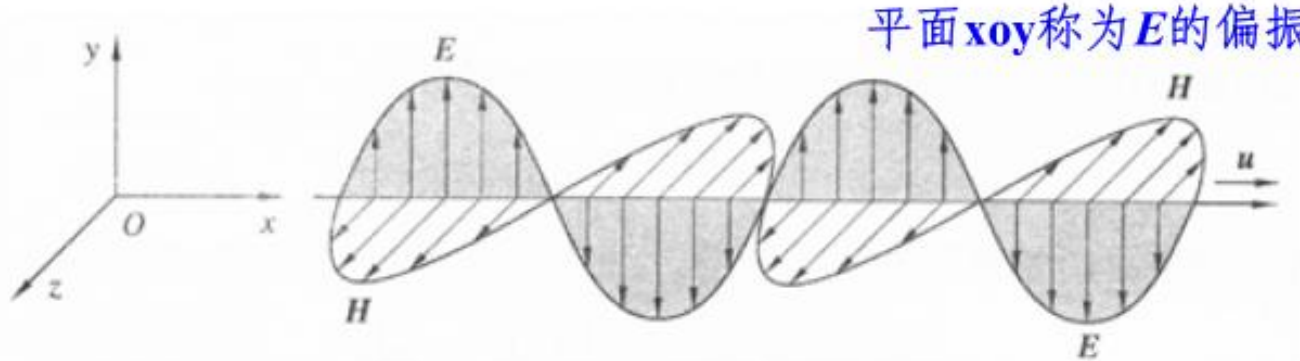
2.1.5 光的偏振

(2) 线偏振光

光矢量只沿某一固定方向振动的光为线偏振光

偏振光的振动方向与传播方向组成的平面称为振动面

线偏振光又称为平面偏振光



光矢量垂直于纸面的线偏振光



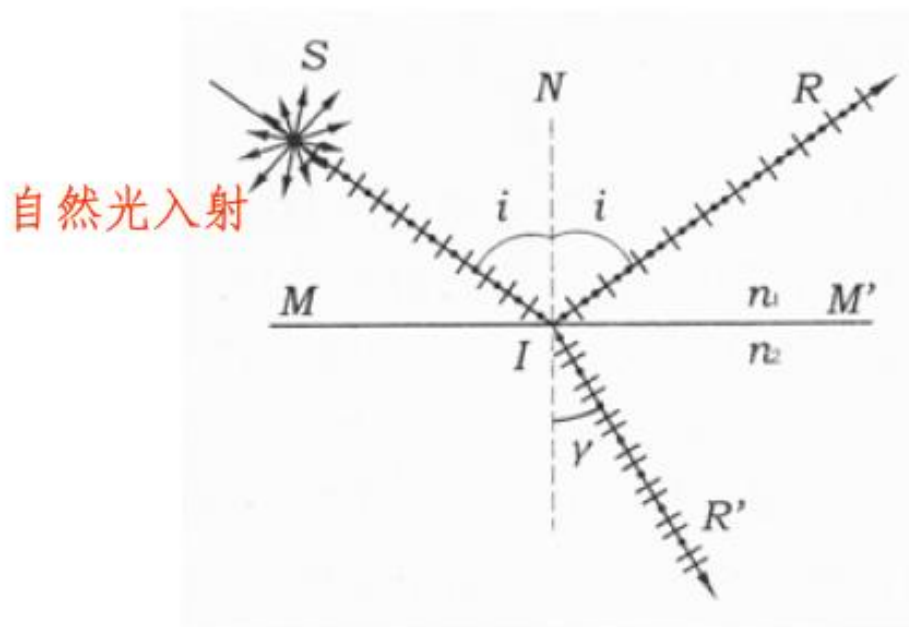
光矢量平行于纸面的线偏振光



2.1.5 光的偏振

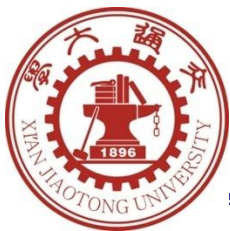
(3) 部分偏振光

部分偏振光在垂直于光传播方向的平面内沿各方向振动的光矢量都有，但振幅不对称，在某一方向振动较强，而与它垂直的方向上振动弱



反射光为偏振方向垂直于入射面成分较多的部分偏振光

折射光为偏振方向平行于入射面成分较多的部分偏振光



2.1.5 光的偏振

(4) 椭圆偏振光

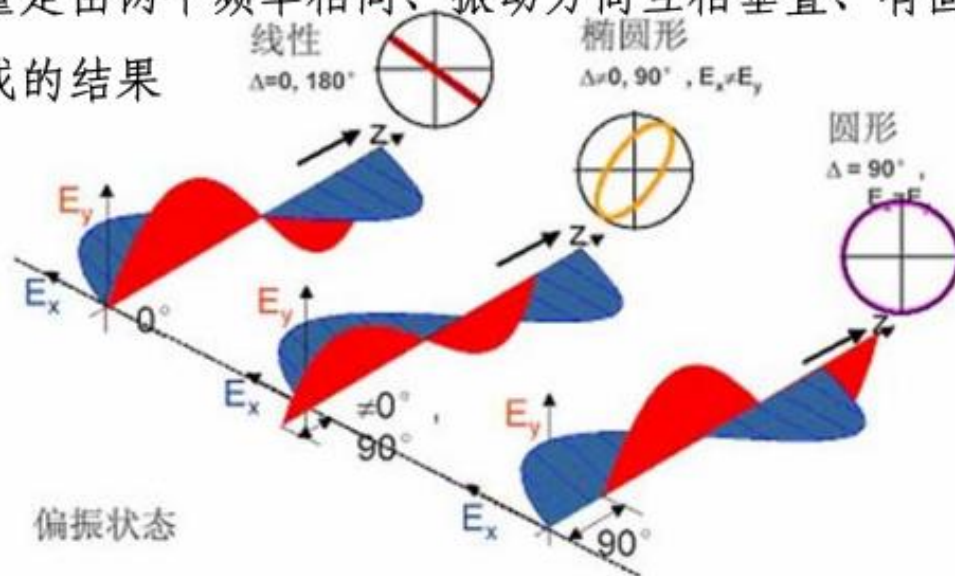
在光的传播过程中，空间每个点的电矢量均以光线为轴作旋转运动，且电矢量端点描出一个椭圆轨迹，这种光称为椭圆偏振光。

迎着光线方向看，凡电矢量顺时针旋转的称右旋椭圆偏振光，凡逆时针旋转的称左旋椭圆偏振光。

椭圆偏振光中的旋转电矢量是由两个频率相同、振动方向互相垂直、有固定相位差的电矢量振动合成的结果

(5) 圆偏振光

旋转电矢量端点描出圆轨迹的光称圆偏振光，是椭圆偏振光的特殊情形。

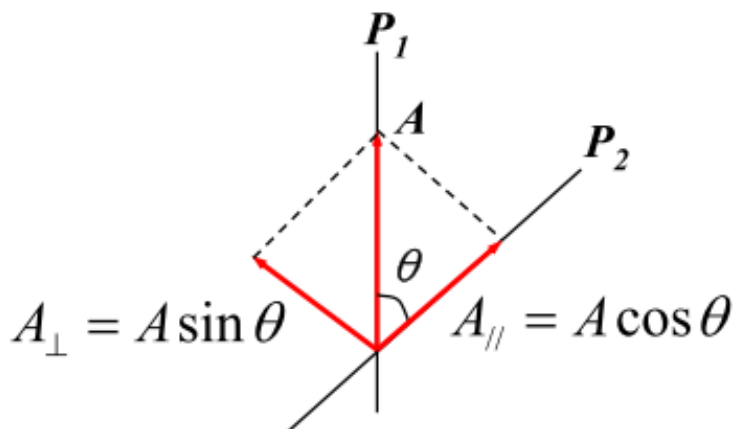
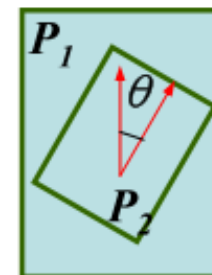
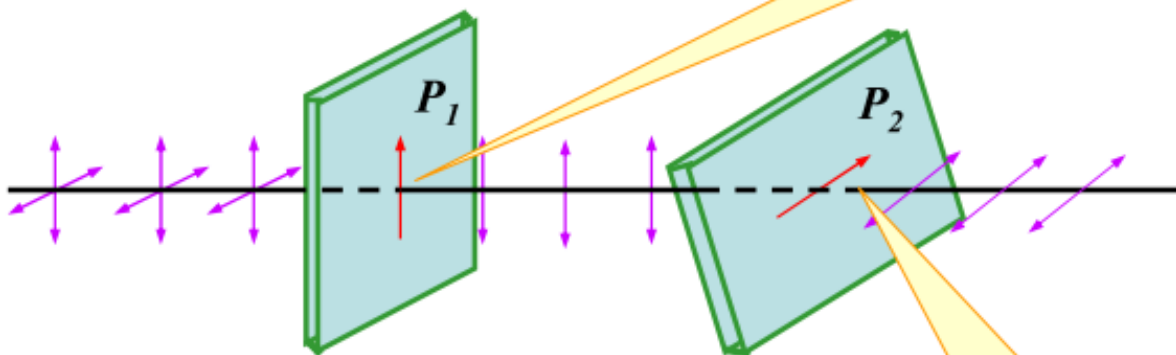




2.1.5 光的偏振

检偏器 P_1 和检偏器 P_2 透振方向成 θ 角时

过 P_1 的线偏振光
光强为 I

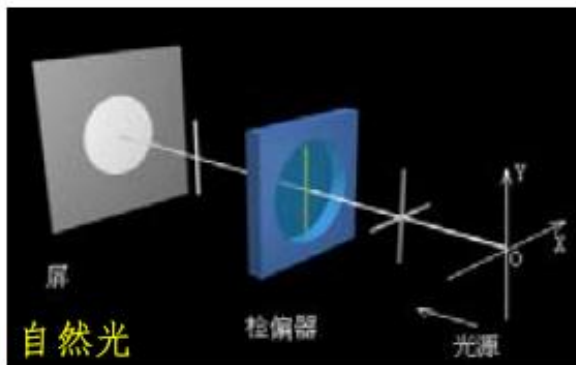


从 P_2 出射光强为 $I_{\theta} =$
 $A_{\parallel}^2 = I \cos^2 \theta$

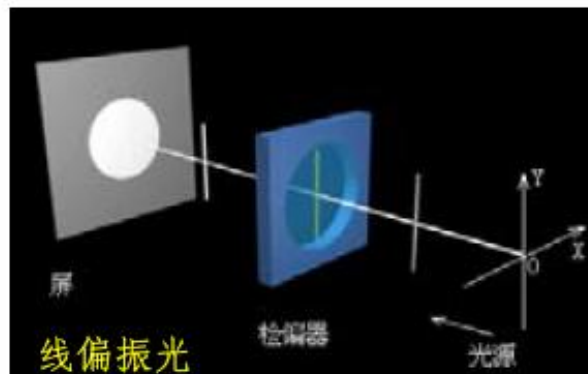
马吕斯定律



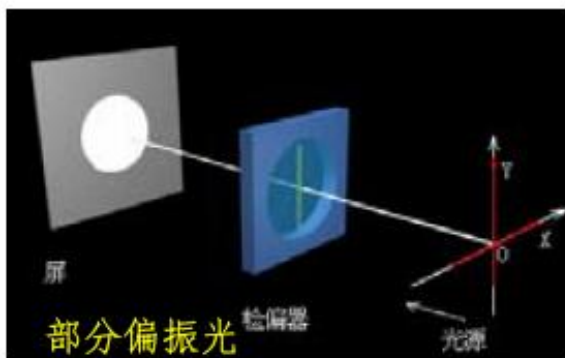
2.1.5 光的偏振



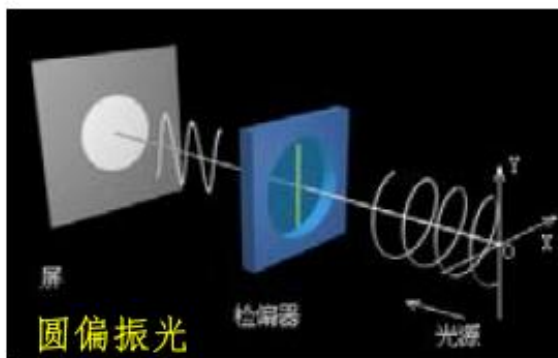
光路中插入检偏器，屏上光强减
半，检偏器旋转，屏上亮暗无变化



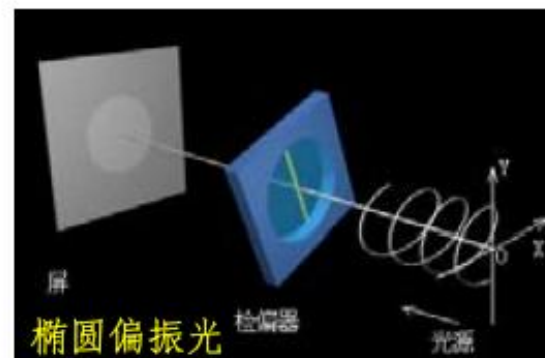
检偏器旋转一周，光强两强两弱
自然光经过起偏器后转变成线偏振光



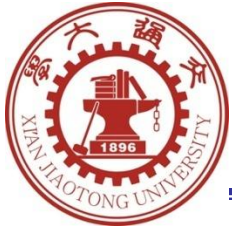
检偏器旋转一周，
屏上光强两强两弱



检偏器旋转一周，
光强无变化

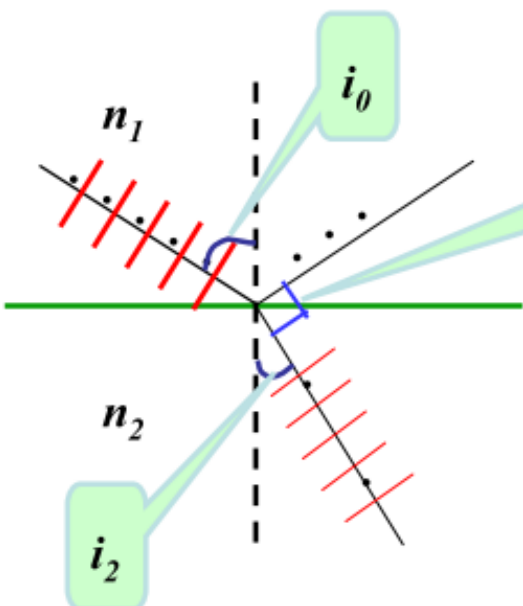


检偏器旋转一周，
光强两强两弱



2.1.5 光的偏振

布儒斯特定律 *Brewster's Law*



$$i_0 + i_2 = \frac{\pi}{2}$$

反射光为光矢量垂直于入射面的完全偏振光
透射光为部分偏振光

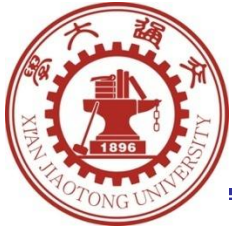
$$n_1 \sin i_0 = n_2 \sin i_2 = n_2 \sin(\frac{\pi}{2} - i_0) = n_2 \cos i_0$$

$$\therefore \text{tgi}_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

i_0 称为起偏振角—布儒斯特角

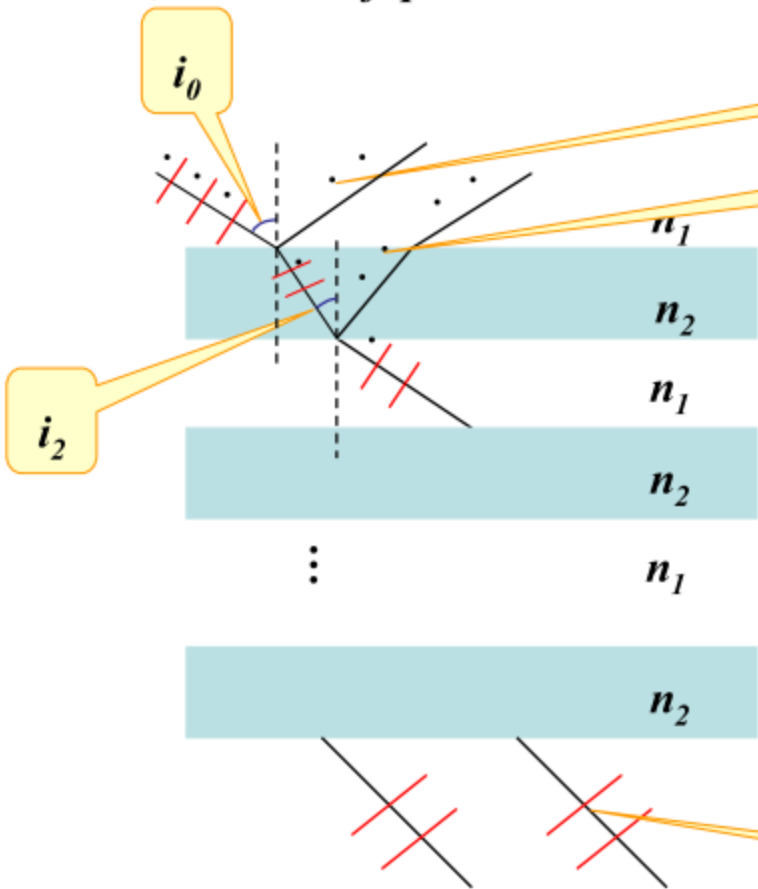
在两种介质分界面上，利用起偏角反射获得偏振光的缺点：

- (1) 完全偏振的反射光与入射光不在一条直线上，使用不便；
- (2) 经过一次反射获得完全偏振反射光的光强太小；
- (3) 折射光只是部分偏振光



2.1.5 光的偏振

用玻片堆 (Pile of plates) 获得线偏振光



反射光为完全偏振光

反射光为完全偏振光

在玻璃片上表面用布儒斯特角入射

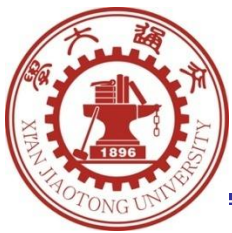
$$i_0 = \text{tg}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad i_0 + i_2 = \frac{\pi}{2}$$

在玻璃片下表面仍为布儒斯特角入射

$$i_2 = \text{tg}^{-1} \frac{n_1}{n_2}$$

透射光为完全偏振光

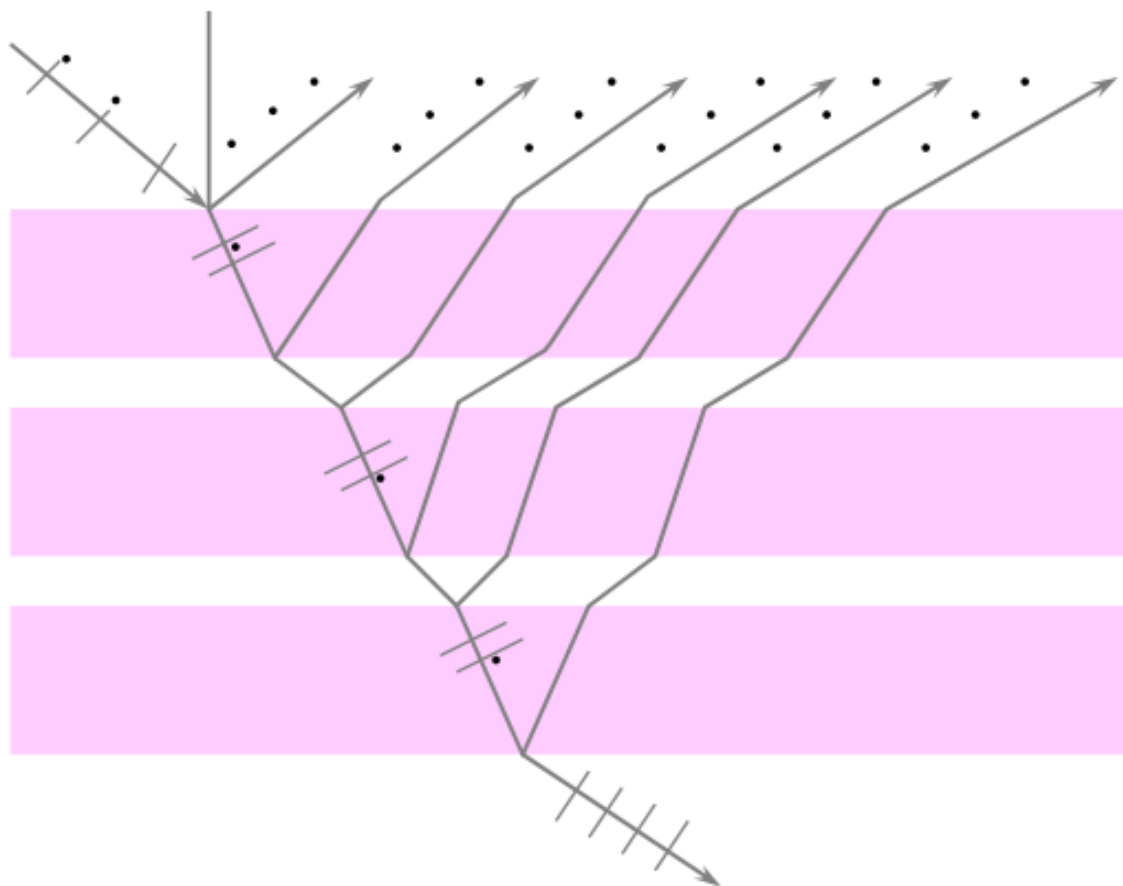
多次反射后，透射光出射



2.1.5 光的偏振

自然光入射

光矢量垂直于入射面的线偏振光反射



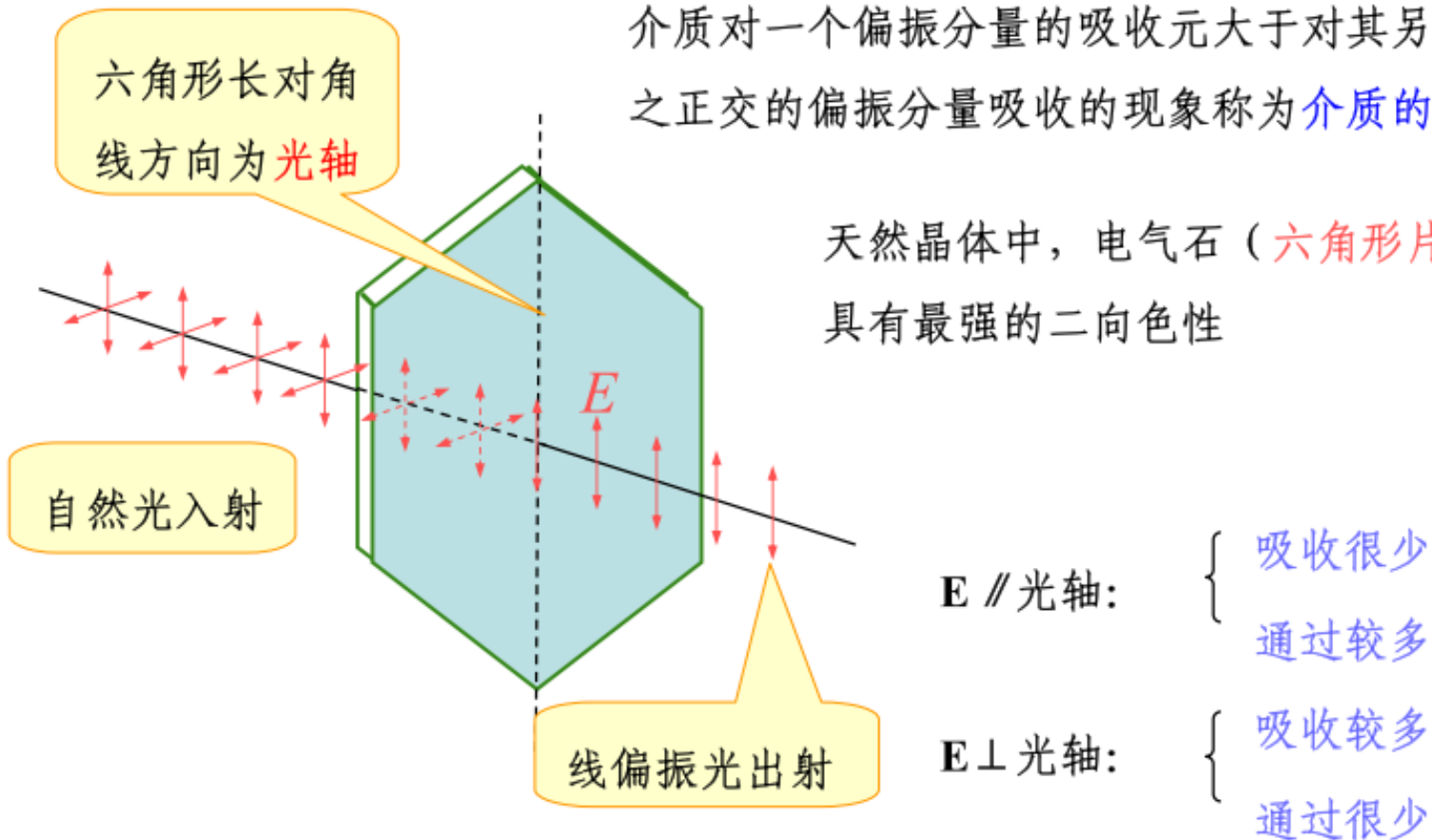
光矢量平行于入射面的线偏振光透射



2.1.5 光的偏振

介质对一个偏振分量的吸收元大于对其另外一个与之正交的偏振分量吸收的现象称为介质的二向色性

天然晶体中，电气石（六角形片状）具有最强的二向色性



1mm厚的电气石晶体可把垂直于光轴振动的光矢量全部吸收!

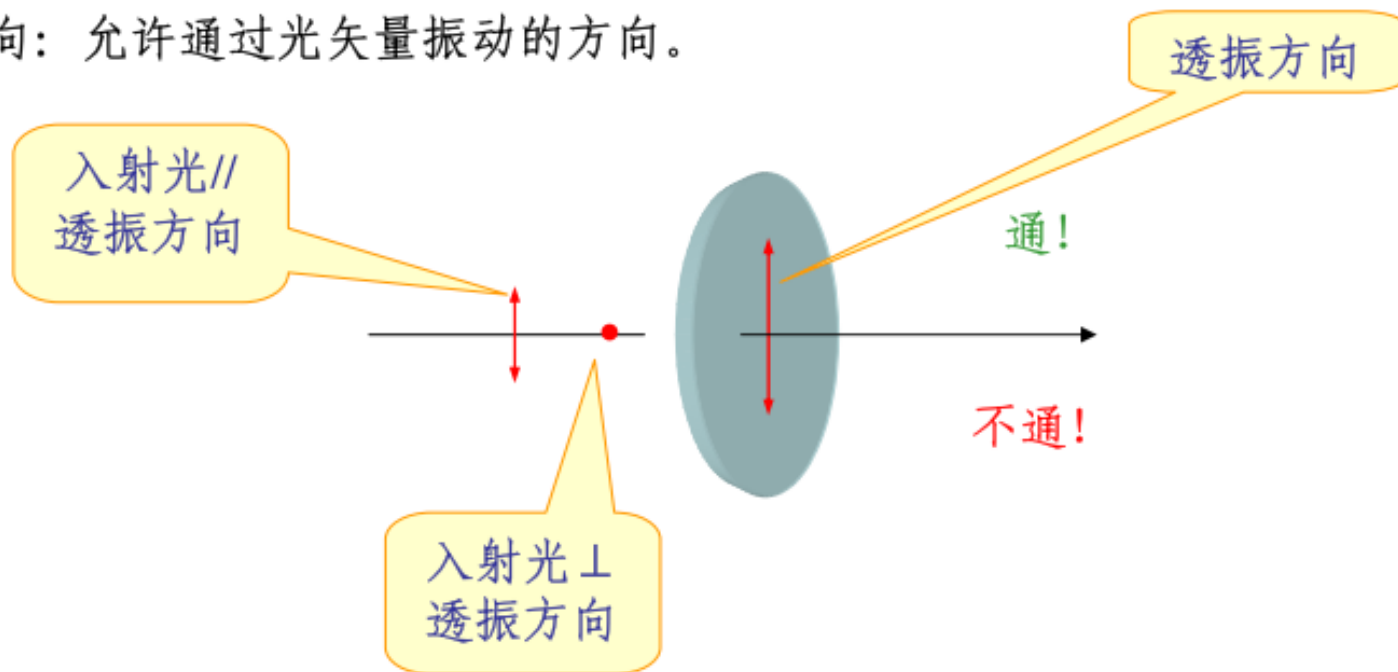


2.1.5 光的偏振

人造偏振片（基于介质的二向色性）

透明聚乙烯醇片，强烈吸收某一方向上的光振动，透射光成为线偏振光

透振方向：允许通过光矢量振动的方向。



优点：造价低廉；面积大，通光孔径大；轻便。

缺点：带有选择性吸收，使透射的偏振光带有颜色。



2.1 光学基础知识（小结）

光具有波粒二象性：

波动性：光是一种横向电磁波

波动学说可以解释干涉、衍射、偏振等现象

粒子性：光是一群能量零散、运动着的粒子

光是以 $h\nu$ 的整数倍反射与吸收（这种最小单位称为光子）

粒子性学说可以合理的光的吸收、光的发射、电光效应的现象



思考题

1. 获得偏振光的方式有哪几种？分别对其原理进行说明，并简述每一种方式的优缺点。
2. 摄影用的偏光镜如选择适当角度，可消除或减弱水和玻璃等非金属表面的反光，这是为什么？