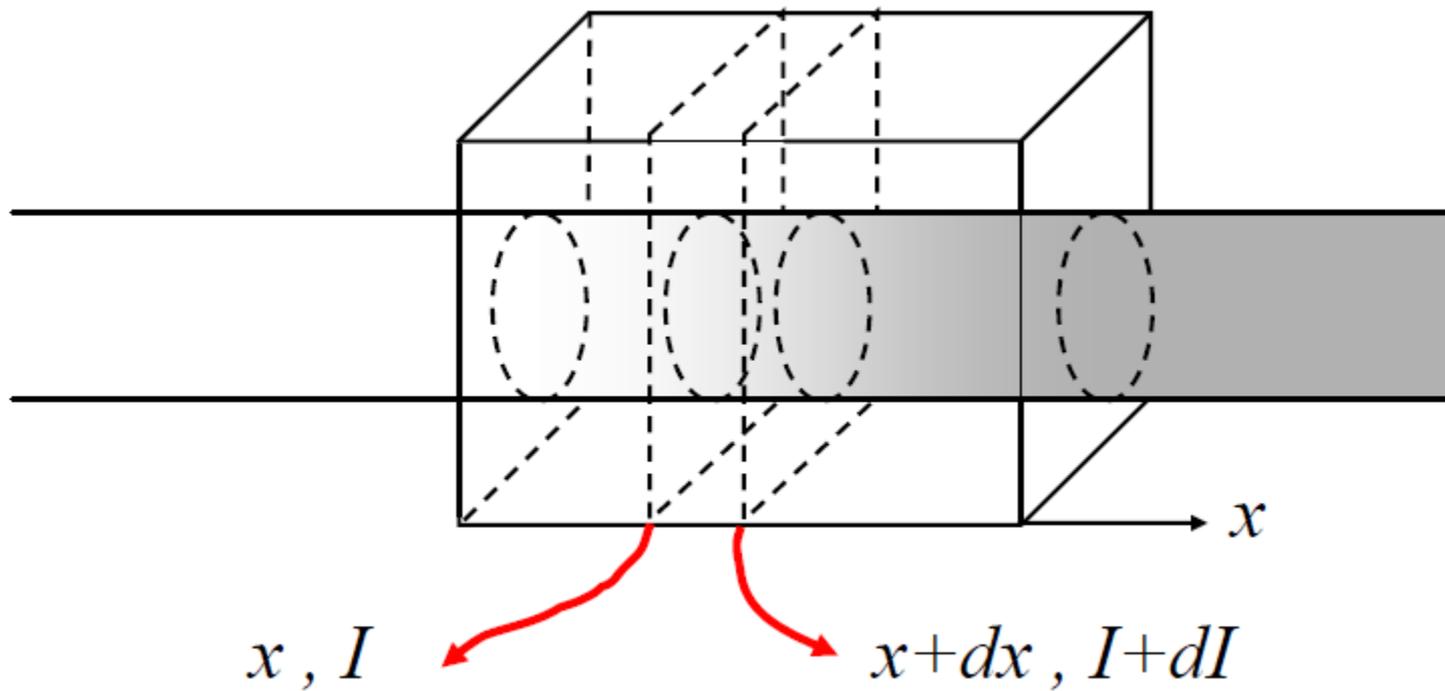


第七章：光的吸收和色散

7-01 光的吸收

1. 吸收的线性规律
2. 复数折射率的意义
3. 光的吸收与波长的关系
4. 吸收光谱

1.吸收的线性规律



$$-dI = \alpha I dx$$

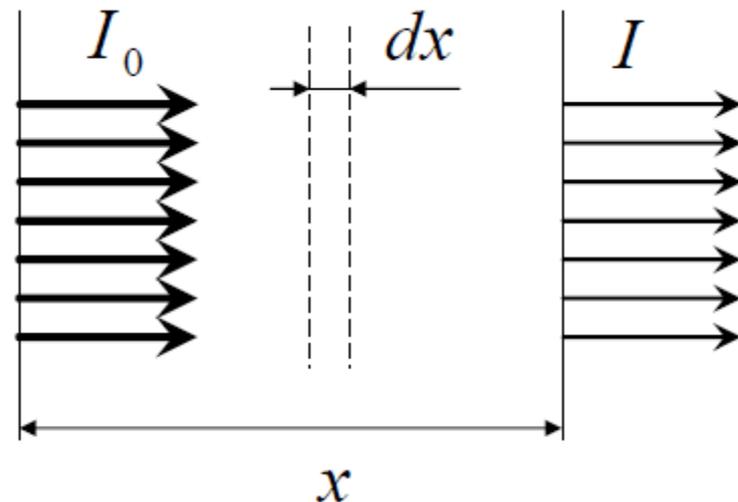
布格尔 (**P.Bouguer** , **1729**) 定律

朗伯 (**J.H.Lambert** , **1760**) 定律

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

溶液中：比尔 (**A.Beer** , **1852**) 定律

$$\alpha = AC$$



α : 吸收系数

A : 吸光度

C : 浓度

2.复数折射率的意义

折射率：真空光速与媒质光速之比 $n = \frac{c}{v}$

$$\tilde{E} = \tilde{E}_0 e^{-i\omega(t-x/v)} = \tilde{E}_0 e^{-i\omega(t-nx/c)}$$

可以用复折射率同时表示折射和吸收

实部→折射（位相推进），虚部→吸收（强度衰减）

$$\tilde{n} = n(1 + i\kappa)$$

$$\tilde{E} = \tilde{E}_0 e^{-i\omega(t-\tilde{n}x/c)} = \tilde{E}_0 e^{-n\kappa\omega x/c} e^{-i\omega(t-nx/c)}$$

$$I = |E_0|^2 e^{-2n\kappa\omega x/c}$$

$$\alpha = 2n\kappa\omega/c = 4\pi n\kappa/\lambda$$

3. 光的吸收与波长的关系

分区：普遍吸收，与波长几乎无关
选择吸收，依赖于波长

普遍吸收，强度下降，不改变颜色（空气、玻璃、水）
选择吸收，强度下降，颜色改变（彩色玻璃）

所有电磁波段考虑，选择吸收是普遍的。任何介质都有吸收限，吸收限的长波一侧表现普遍吸收，短波一侧表现为选择吸收。

4. 吸收光谱

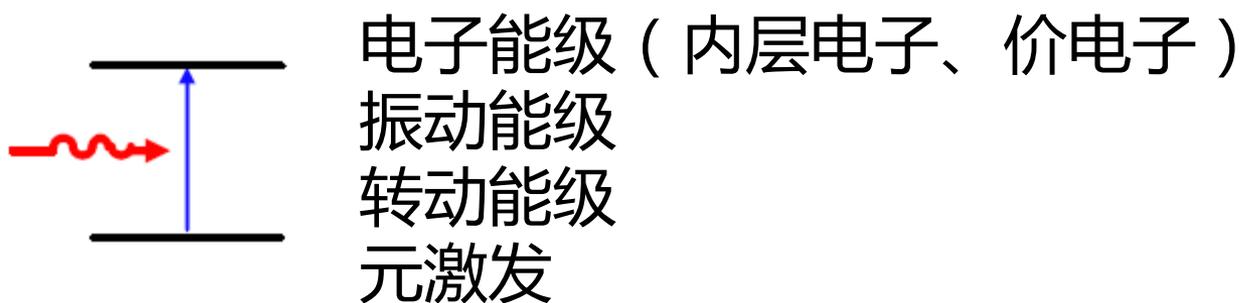
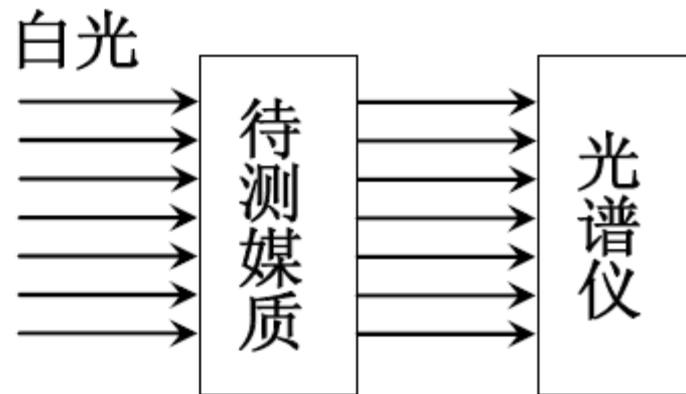
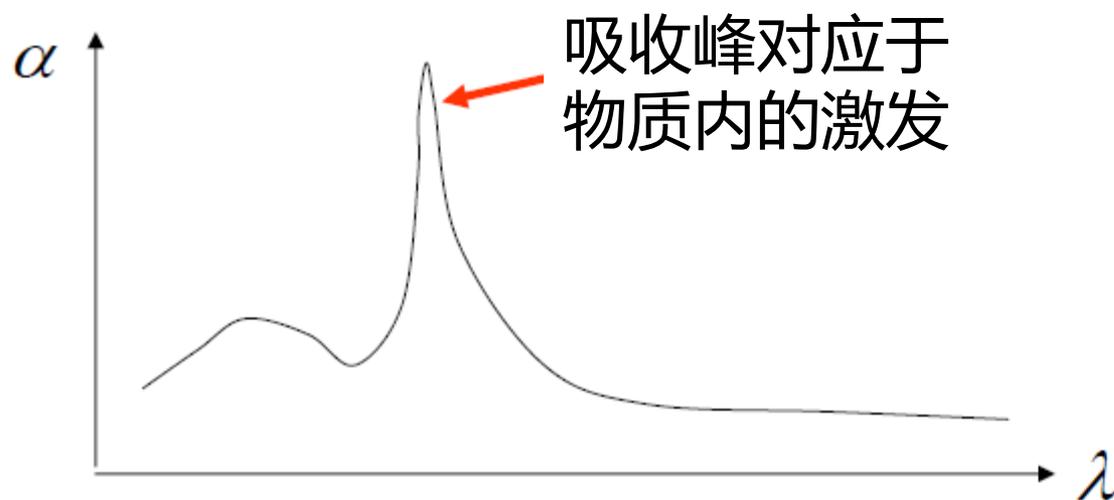
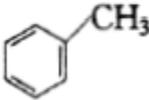


表 11-5 常见生色团的吸收峰

生色团	化合物	溶剂	λ_{\max}/nm	ϵ_{\max}
$\text{>C=C}<^*$	乙 烯	气 态	171	15 530
	1-己烯	庚 烷	180	12 500
$\text{—C}\equiv\text{C—}^*$	乙 炔	气 态	173	6 000
>C=O	乙 醛	蒸 气	{ 289 182	{ 12.5 10000
	丙 酮	环己烷	{ 190 279	{ 1000 22
—COOH	乙 酸	水	204	40
—COCl	乙酰氯	庚 烷	240	34
—COOR	乙酸乙酯	水	204	60
—CONH_2	乙酰胺	甲 醇	295	160
—NO_2	硝基甲烷	水	270	14
>C=N—	丙酮肟	气 态	{ 190 300	5 000 —
$\text{=N}^+\text{—N}^-$	重氮甲烷	乙 醚	417	7
	苯	水	{ 254 203.5	{ 205 7 400
	甲 苯	水	{ 261 206.5	{ 225 7 000
$\text{>C=C—C=C}<$	1,3-丁二烯	正己烷	217	21 000

* 孤立的 >C=C ， $\text{—C}\equiv\text{C—}$ 的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁的吸收峰都在远紫外区，但当分子中再引入一个与之共轭的不饱和键时，吸收就进入到紫外区，所以该表将 $\text{>C=C}<$ ， $\text{—C}\equiv\text{C—}$ 也算作生色团。

表 11-7 烷基对共轭体系吸收波长的影响

化 合 物	λ_{\max}/nm
$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	217
$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	222
$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$	227
$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_2-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_2 \end{array}$	227
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}-\text{CH}_3 \end{array}$	219
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}-\text{C}-\text{CH}_3 \end{array}$	224
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}-\text{CH}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	235
	255
	261

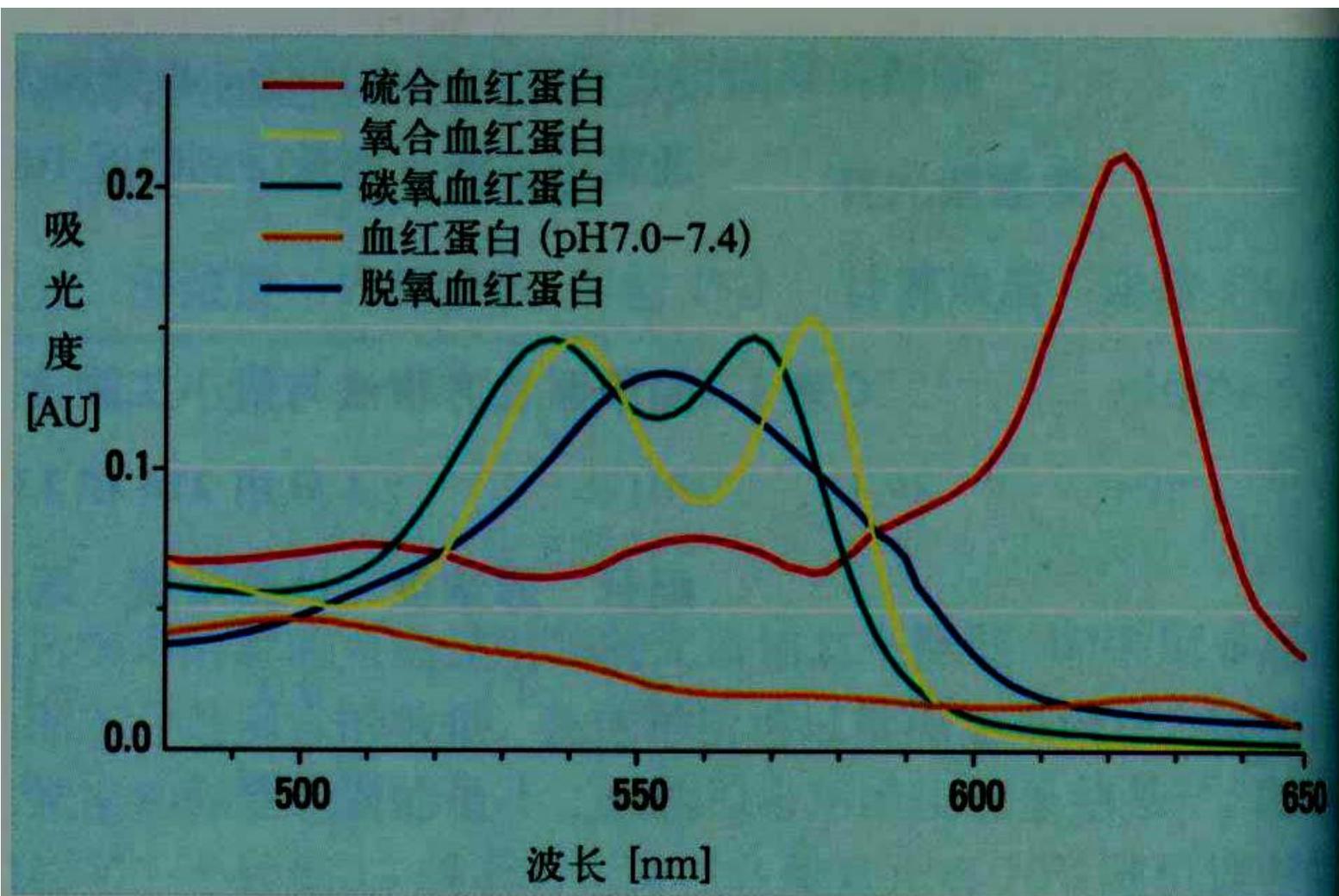
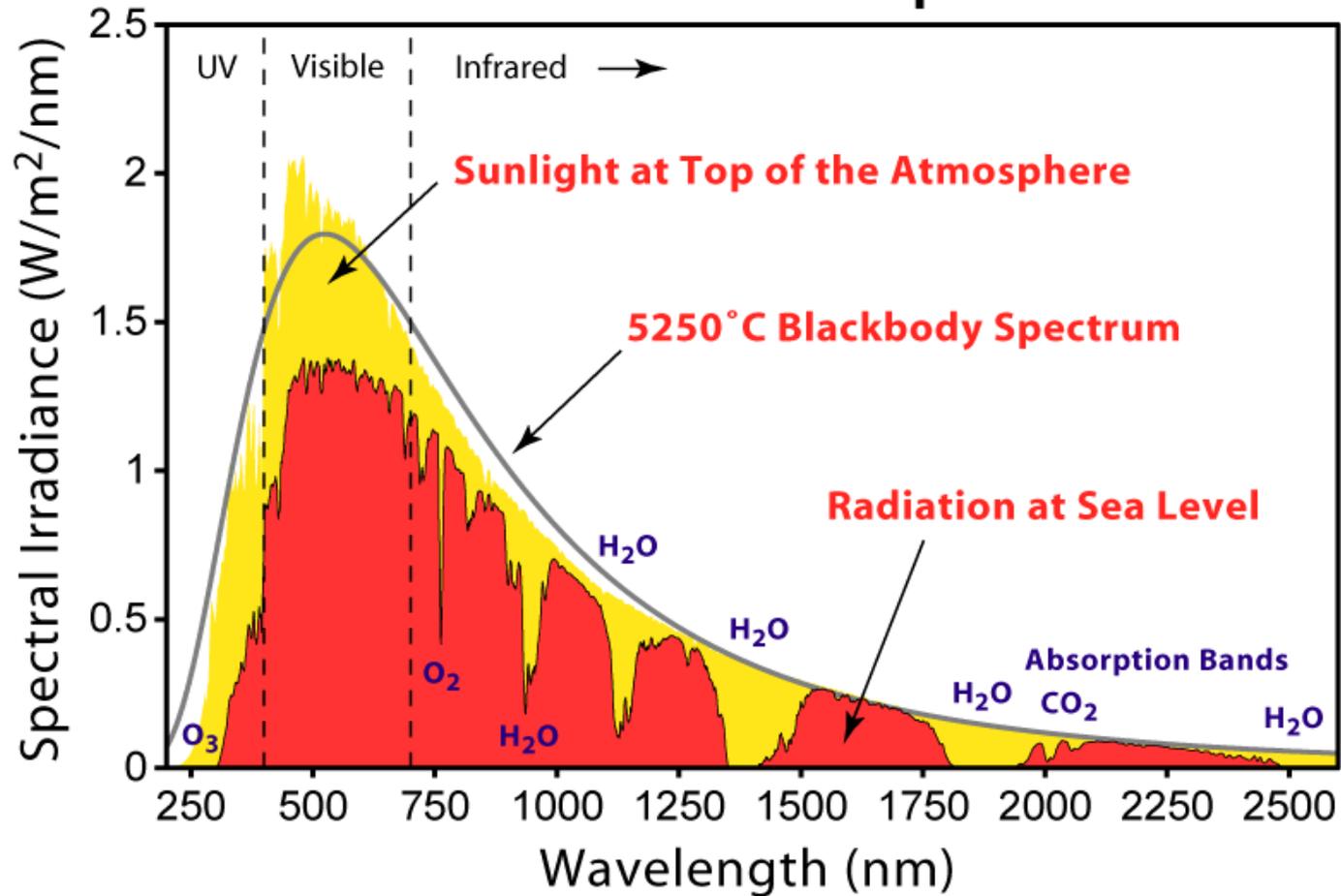


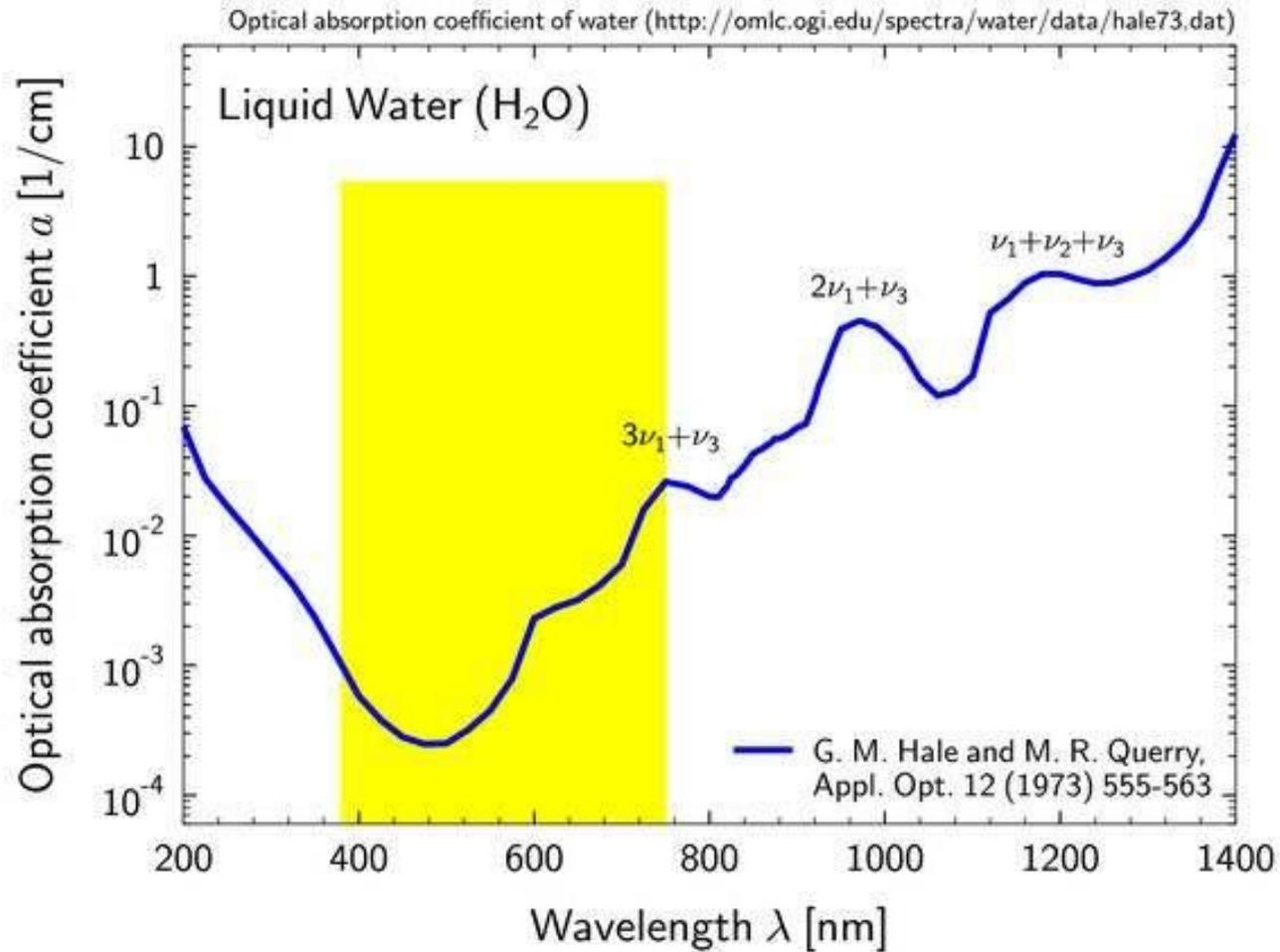
图 15
血红蛋白衍生物吸收光谱图

空气的吸收

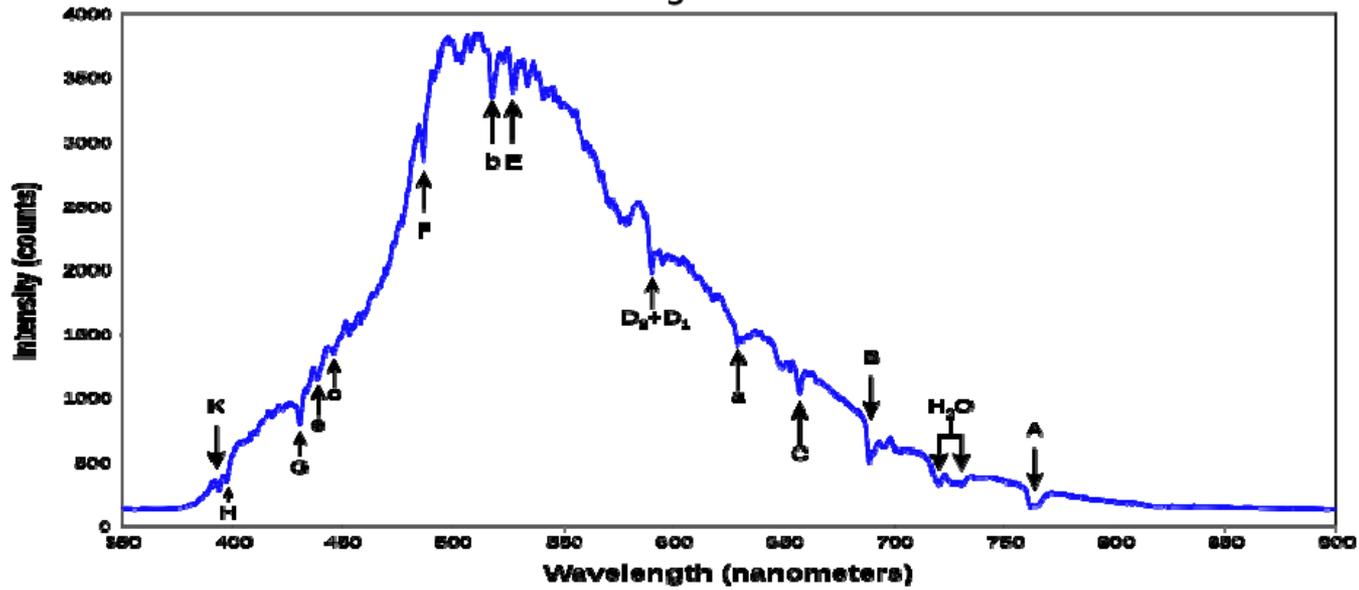
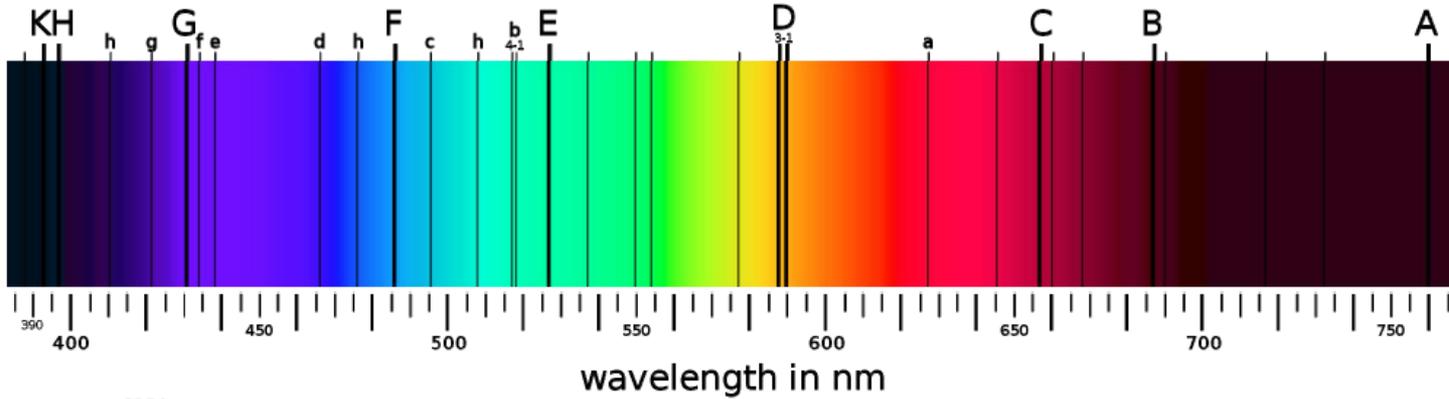
Solar Radiation Spectrum



水的吸收



太阳光谱的夫琅和费线 (574条)



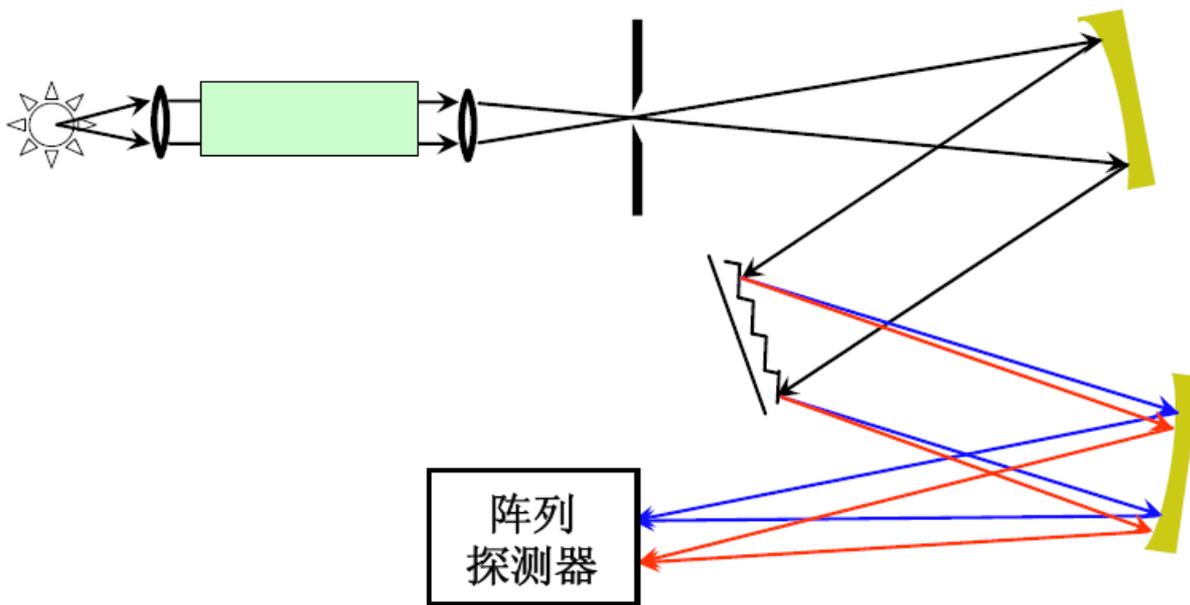
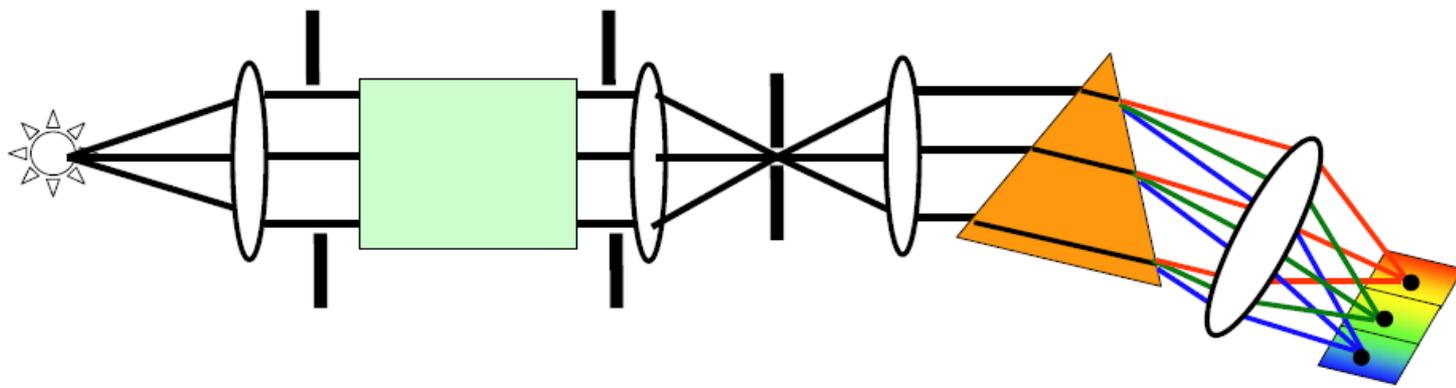
Designation	Element	Wavelength(nm)	Designation	Element	Wavelength(nm)
y	O ₂	898.765	c	Fe	495.761
Z	O ₂	822.696	F	H β	486.134
A	O ₂	759.370	d	Fe	466.814
B	O ₂	686.719	e	Fe	438.355
C	H α	656.281	G'	H γ	434.047
a	O ₂	627.661	G	Fe	430.790
D ₁	Na	589.592	G	Ca	430.774
D ₂	Na	588.995	h	H δ	410.175
D ₃ or d	He	587.5618	H	Ca ⁺	396.847
e	Hg	546.073	K	Ca ⁺	393.368
E ₂	Fe	527.039	L	Fe	382.044
b ₁	Mg	518.362	N	Fe	358.121
b ₂	Mg	517.270	P	Ti ⁺	336.112
b ₃	Fe	516.891	T	Fe	302.108
b ₄	Fe	516.891	t	Ni	299.444
b ₄	Mg	516.733			

Kirchhoff 和**Bunsen** 指出每个化学元素都具有一套特有的谱线，并推断出太阳光谱的黑线来自太阳大气层的一些元素的吸收。

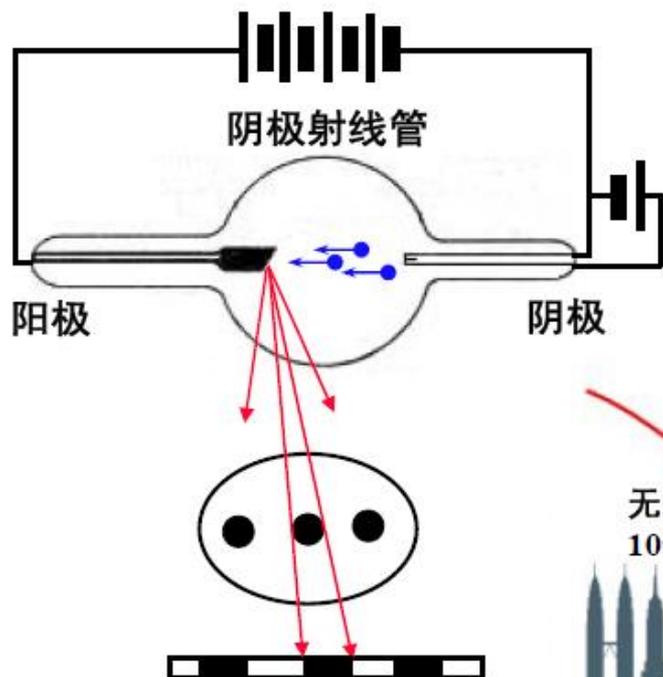
He元素的发现：法国人严森（**J.P.Jensen**，**1868**）观察太阳光谱，发现一些不知来源的暗线，英国天文学家洛克厄（**J.N.Lockyer**）将其归因于一种未知元素，取名为**Helium**，词源于希腊文**helios**太阳。**1894**年英国化学家莱姆赛（**W.Ramsay**）从铀铀矿物蜕变出的气体中发现，说明地球上也存在**He**。

原子吸收光谱的灵敏度是相当高的，混合物或化合物中极少含量的原子及其变化，将导致光谱吸收线的出现及其光密度的很大变化。历史上就曾依据这吸收光谱分析方法发现了铯、铷、铊、铟、镓等多种新元素，这一方法已广泛应用于化学的定量分析，并成为研究宇宙空间物质分布的重要手段。

吸收光谱的测量

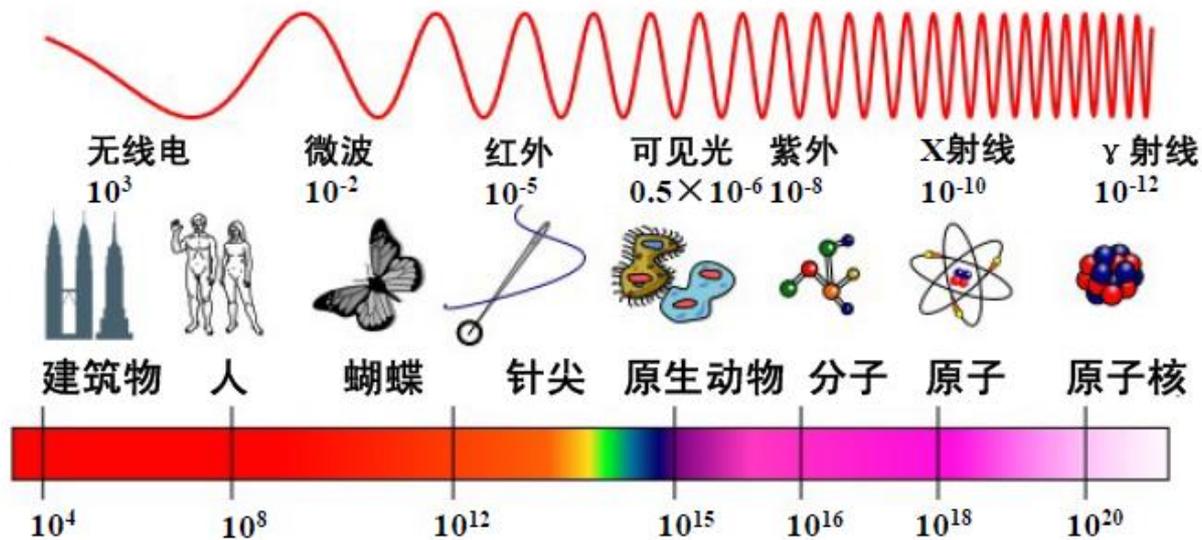


X射线影像术



W.C. Röntgen

1895年德国物理学家伦琴发现，故又称伦琴射线。1901年伦琴因此荣获世界上第一个诺贝尔物理奖。



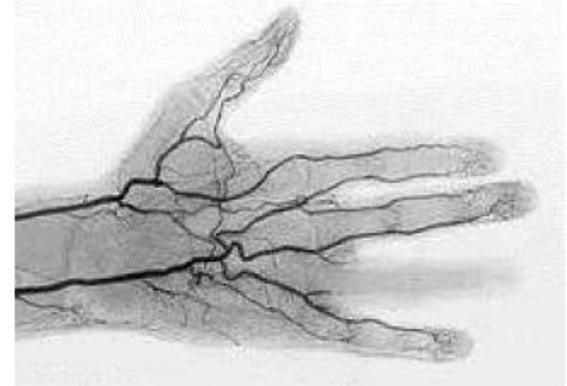
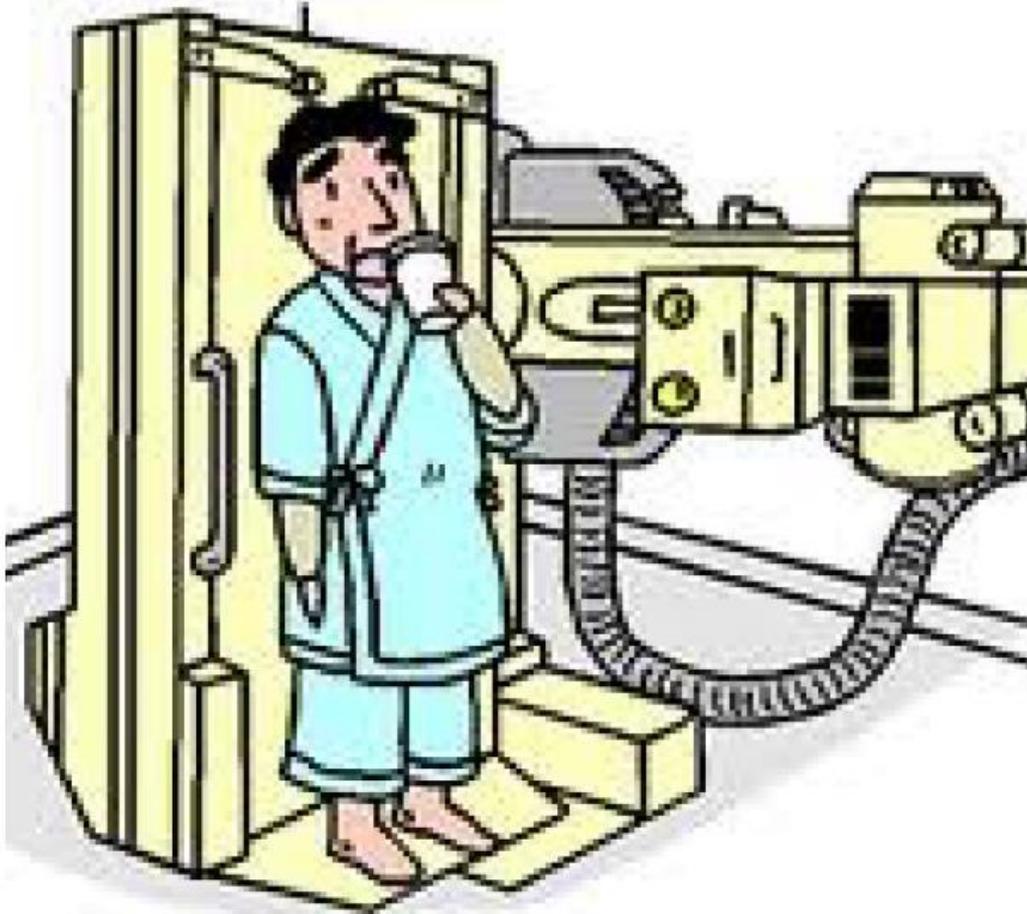
穿透性



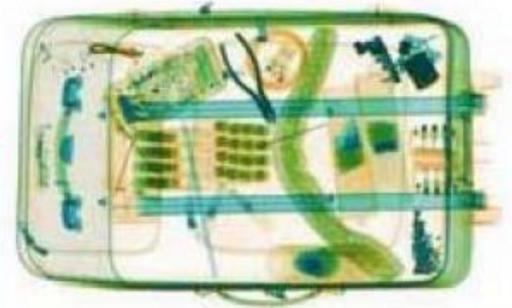
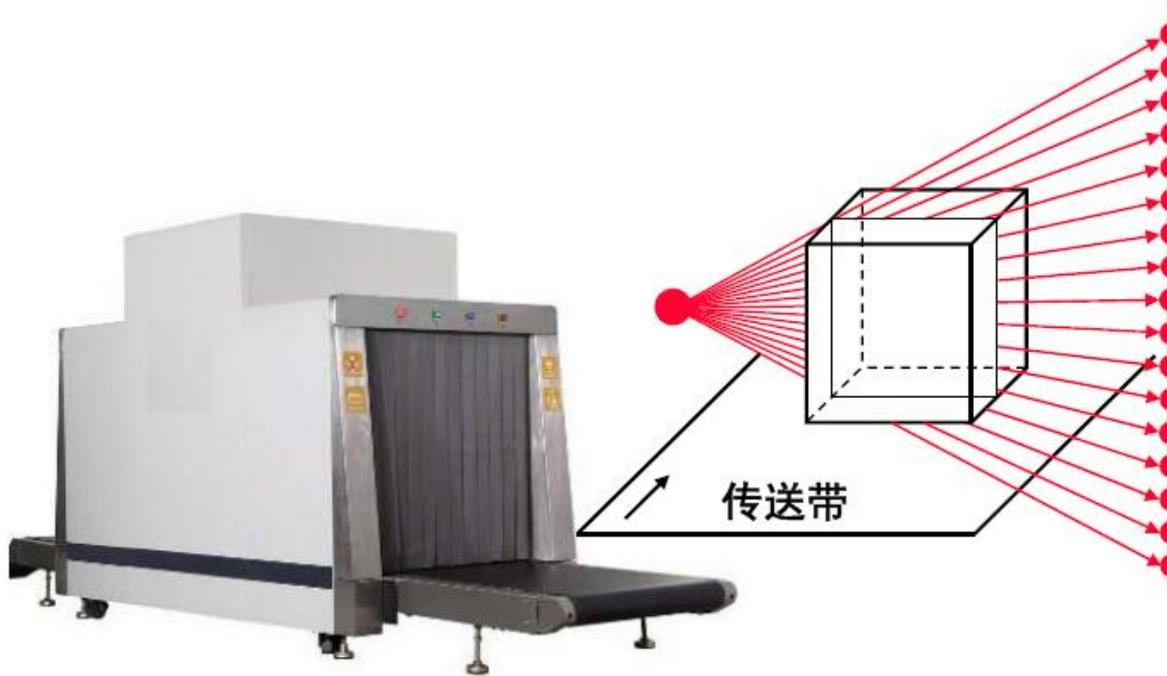
衬度 (反差) : 吸收



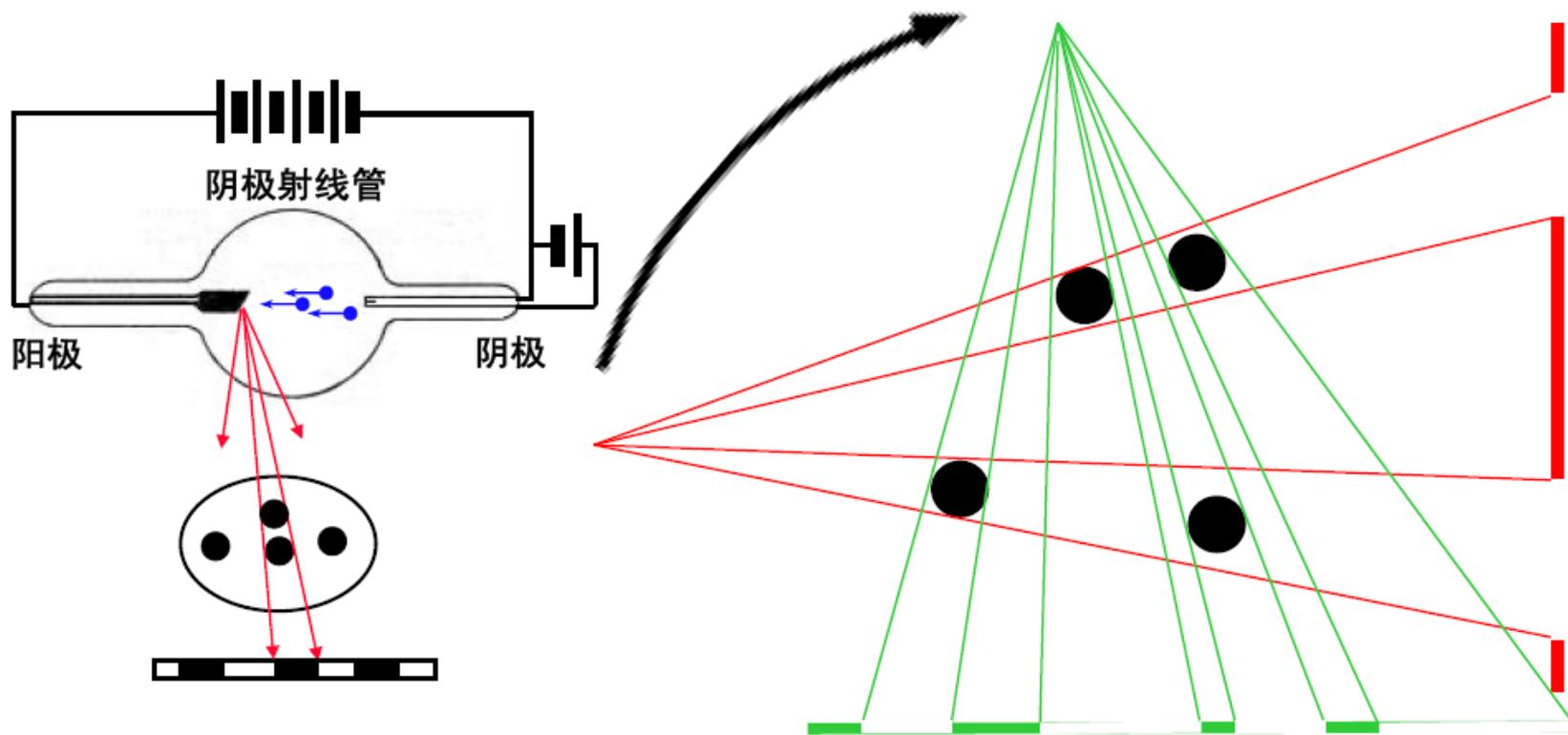
造影术



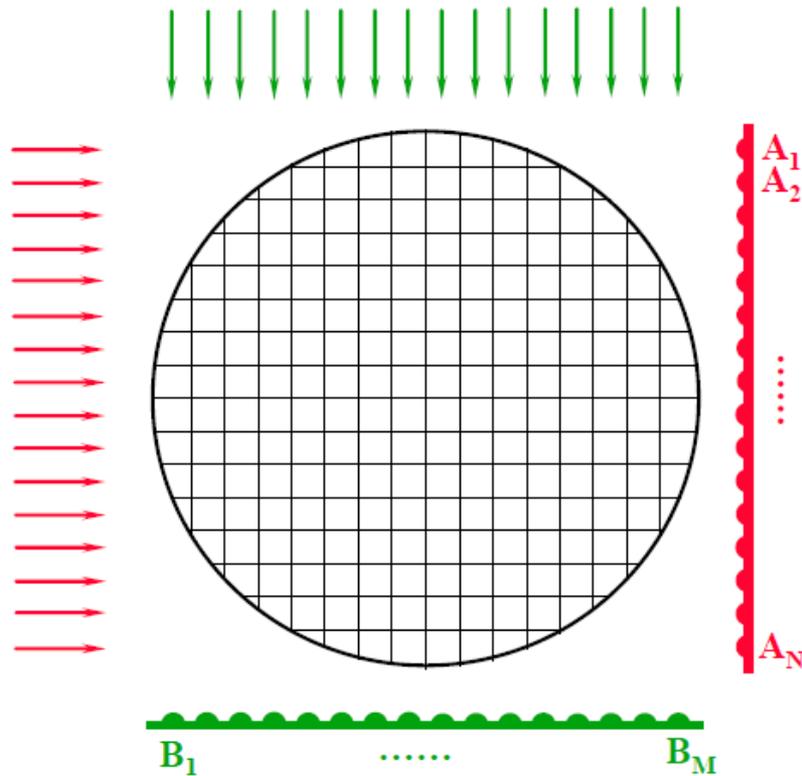
安检



计算机X射线断层扫描术 (Computed Tomography, CT)



CT解算方法

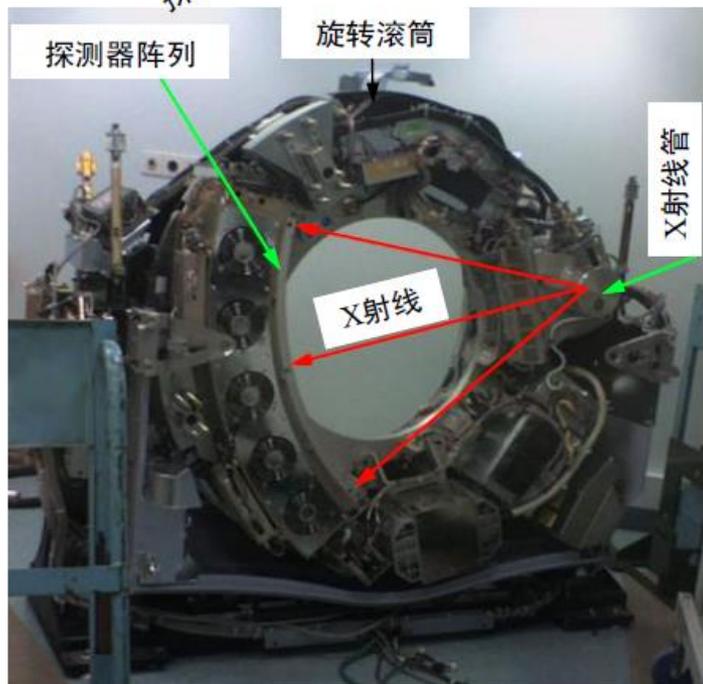
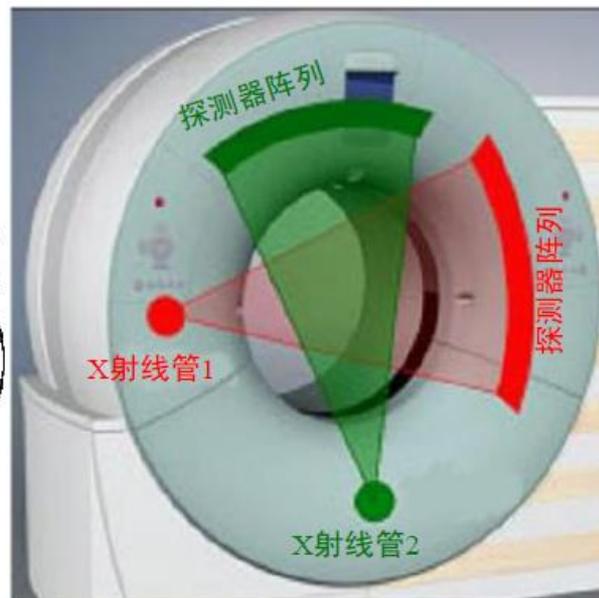
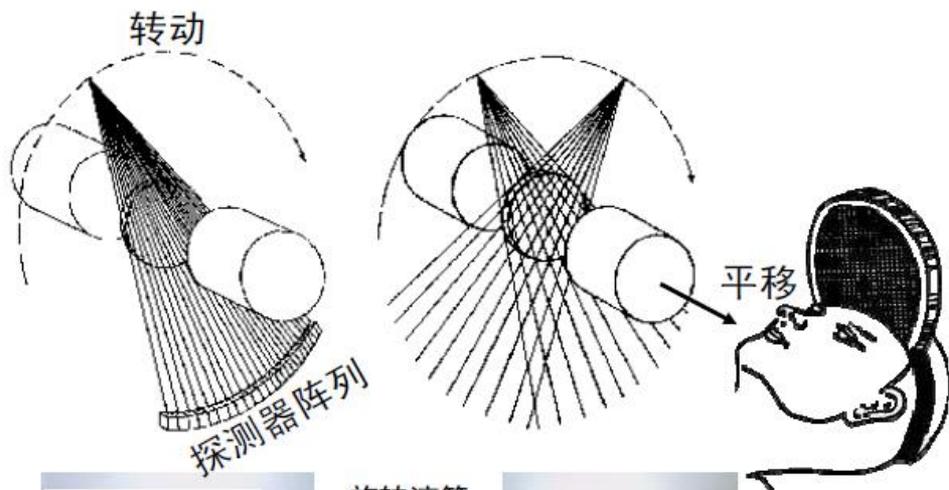


$$\begin{cases} A_1 = \alpha_{1,1} + \alpha_{1,2} + \cdots + \alpha_{1,M} \\ A_2 = \alpha_{2,1} + \alpha_{2,2} + \cdots + \alpha_{2,M} \\ \vdots \\ A_N = \alpha_{N,1} + \alpha_{N,2} + \cdots + \alpha_{N,M} \end{cases}$$
$$\begin{cases} B_1 = \alpha_{1,1} + \alpha_{2,1} + \cdots + \alpha_{N,1} \\ B_2 = \alpha_{1,2} + \alpha_{2,2} + \cdots + \alpha_{N,2} \\ \vdots \\ B_M = \alpha_{1,M} + \alpha_{2,M} + \cdots + \alpha_{N,M} \end{cases}$$

A.M. Cormack, G.N. Hounsfield

1979 Nobel Laureate

医学或生理学奖



作业：
P234: 1, 2

7-02 色散

1. 正常色散
2. 反常色散
3. 一种物质的全部色散曲线
4. 经典色散理论

1.正常色散

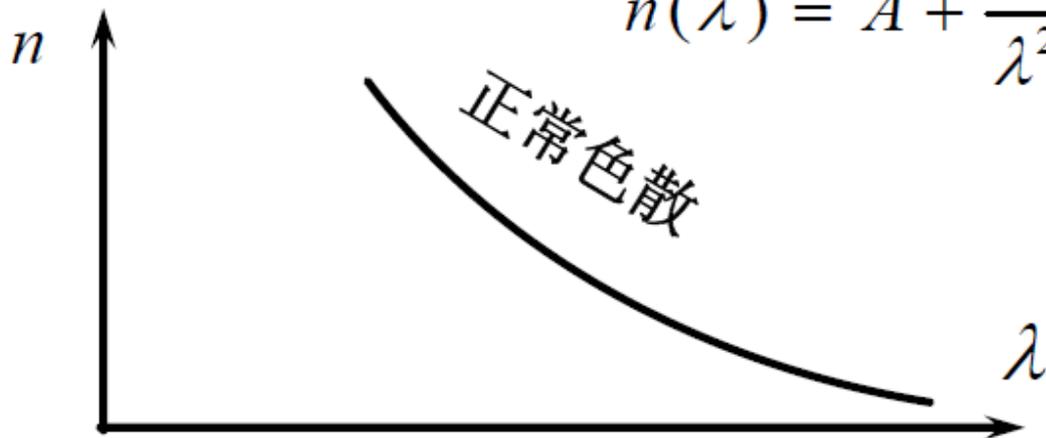
折射率对波长的依赖关系 $n(\lambda)$ 。通过交叉棱镜观察，也可由椭圆偏仪、吸收测量（**K-K公式**）得到

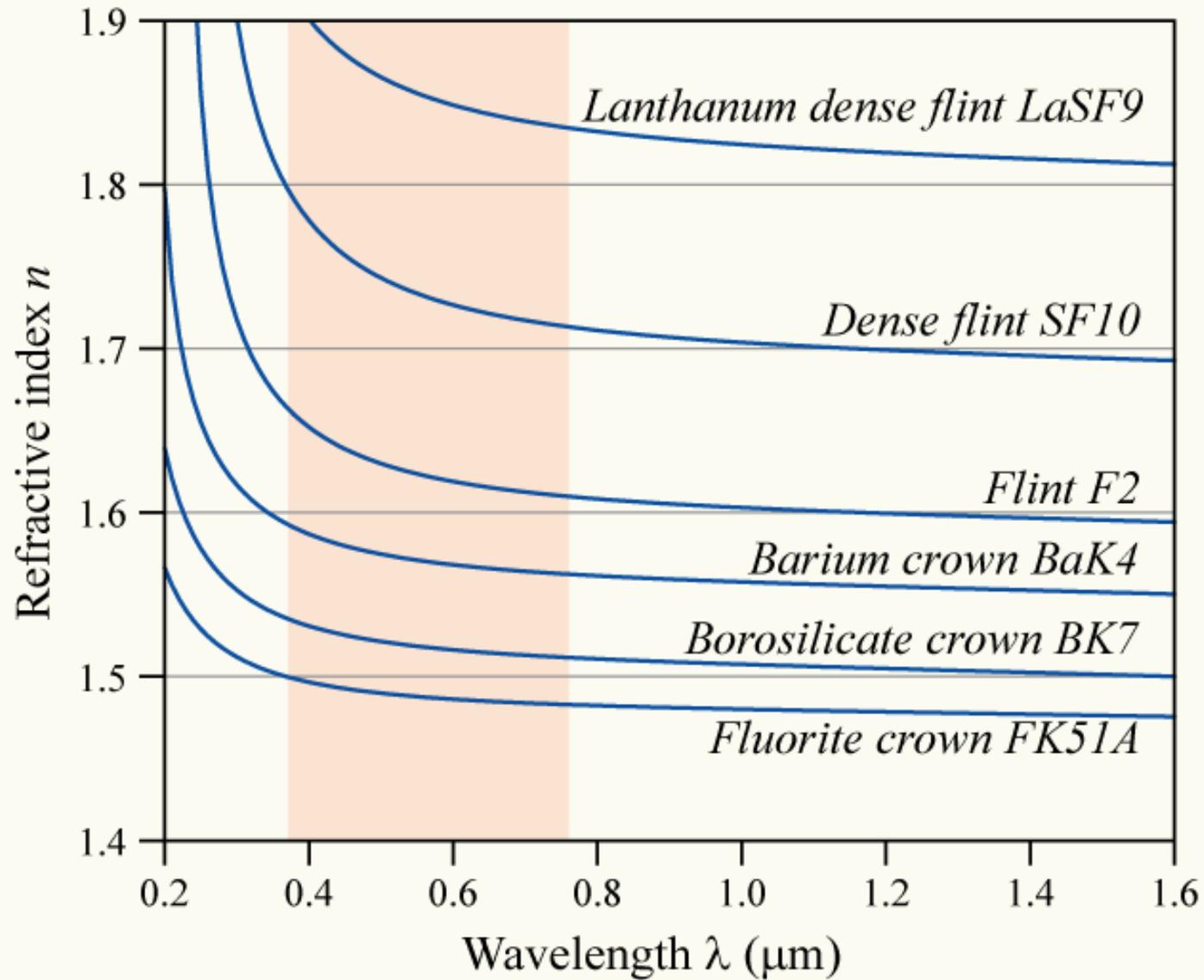
正常色散：折射率随波长单调下降，且下降率在短波侧更大。

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0$$

科希（**A.L.Cauchy**，**1836**）经验公式：

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$



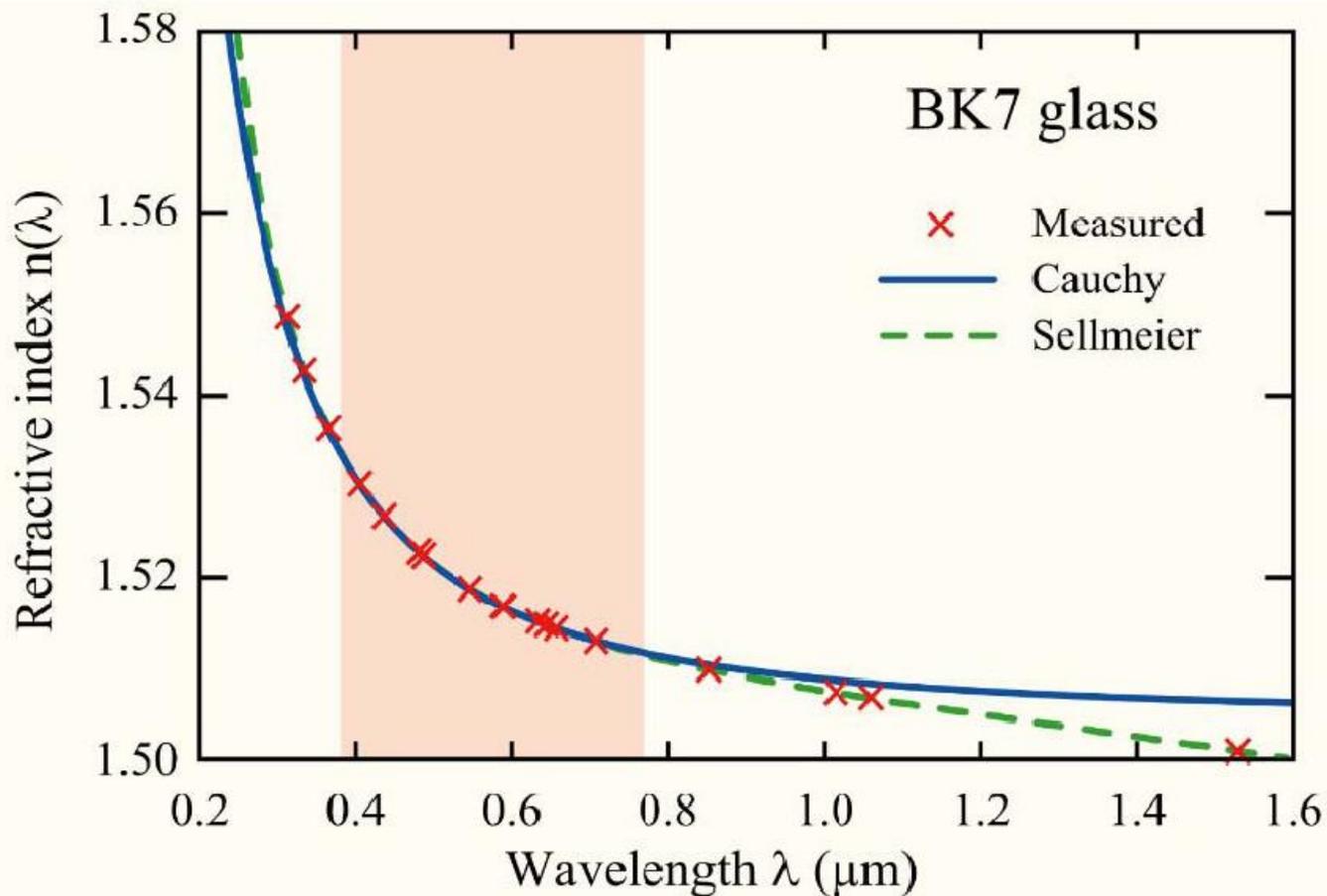


在可见光波段，考察的波长范围不太大时，前两项就够了：

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad \frac{dn}{d\lambda} = -2 \frac{B}{\lambda^3}$$

常用的一些光学玻璃的参数

Material	A	B (μ m²)
Fused silica	1.4580	0.00354
Borosilicate glass BK7	1.5046	0.00420
Hard crown glass K5	1.5220	0.00459
Barium crown glass BaK4	1.5690	0.00531
Barium flint glass BaF10	1.6700	0.00743
Dense flint glass SF10	1.7280	0.01342



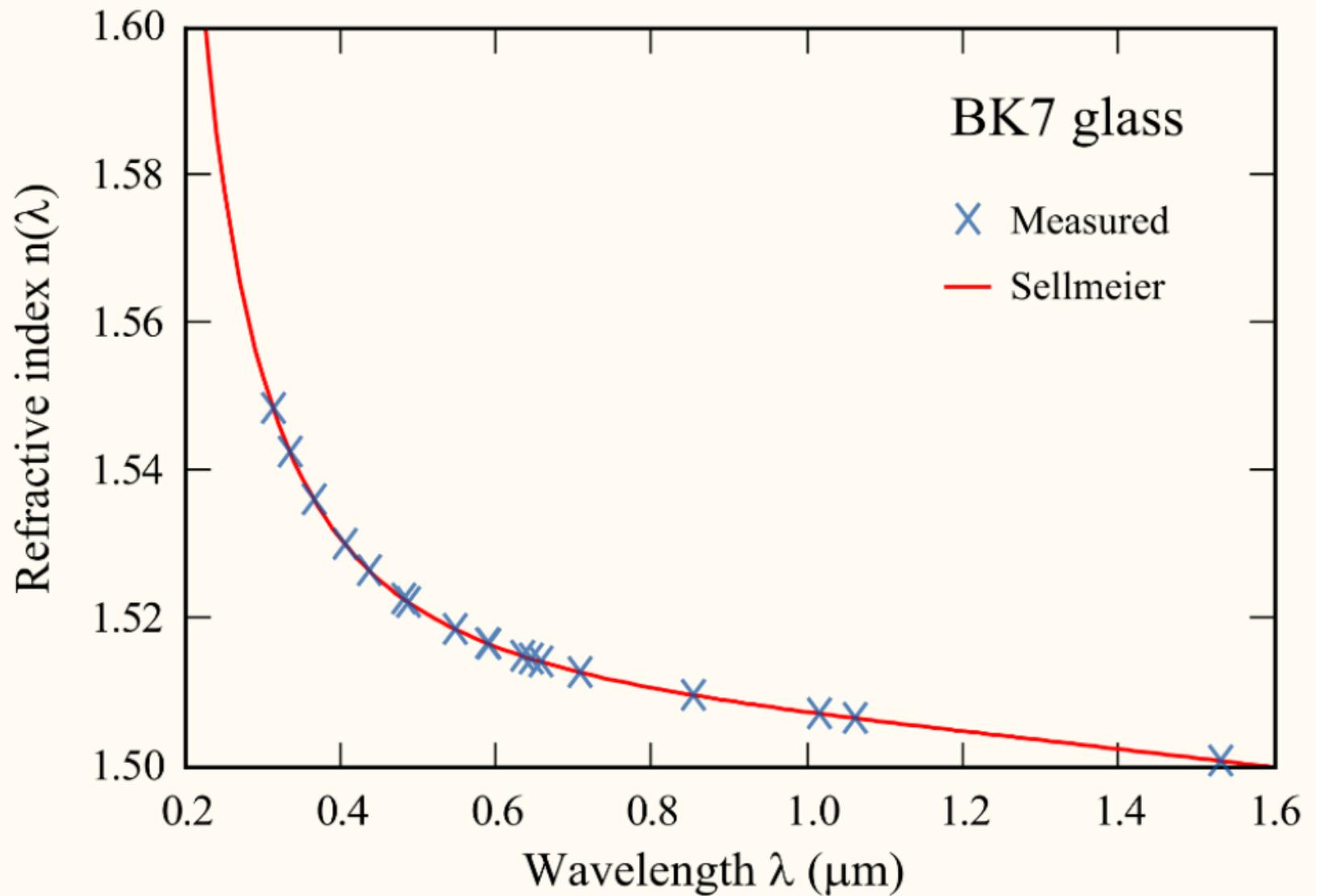
Cauchy公式形式非常简单，具有很多应用。Cauchy公式只使用于正常色散区，在可见光波段和实际情况吻合的比较好，红外波段误差较大。

Sellmeier (W. Sellmeier, 1871) 经验公式:

$$n^2 = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

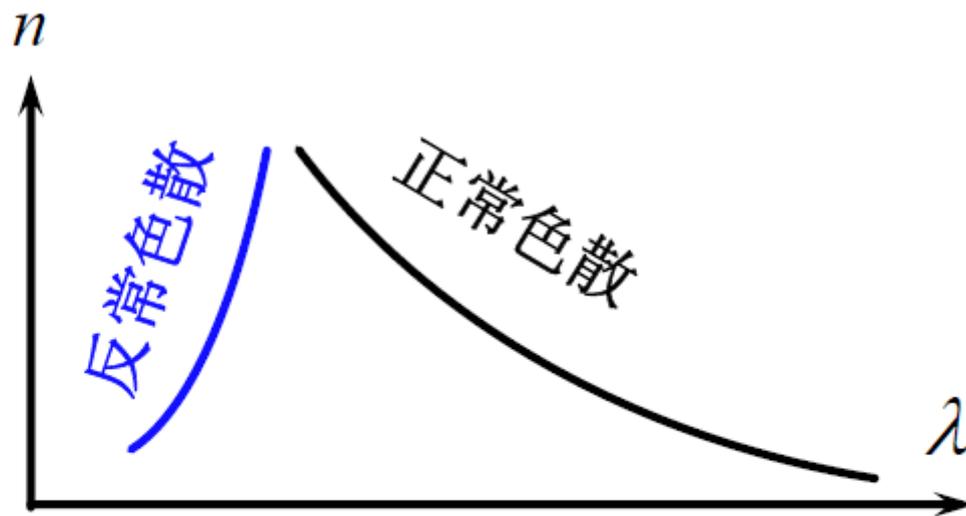
Table of coefficients of Sellmeier equation

Material	B_1	B_2	B_3	$C_1 (\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	$C_2 (\times 10^{-2} \mu\text{m}^2)$	$C_3 (\times 10^2 \mu\text{m}^2)$
<i>BK7</i>	1.03961212	0.231792344	1.01046945	6.00069867	2.00179144	1.03560653
sapphire (o wave)	1.43134930	0.65054713	5.3414021	5.2799261	1.42382647	3.25017834
sapphire (e wave)	1.5039759	0.55069141	6.5927379	5.48041129	1.47994281	4.0289514



2.反常色散

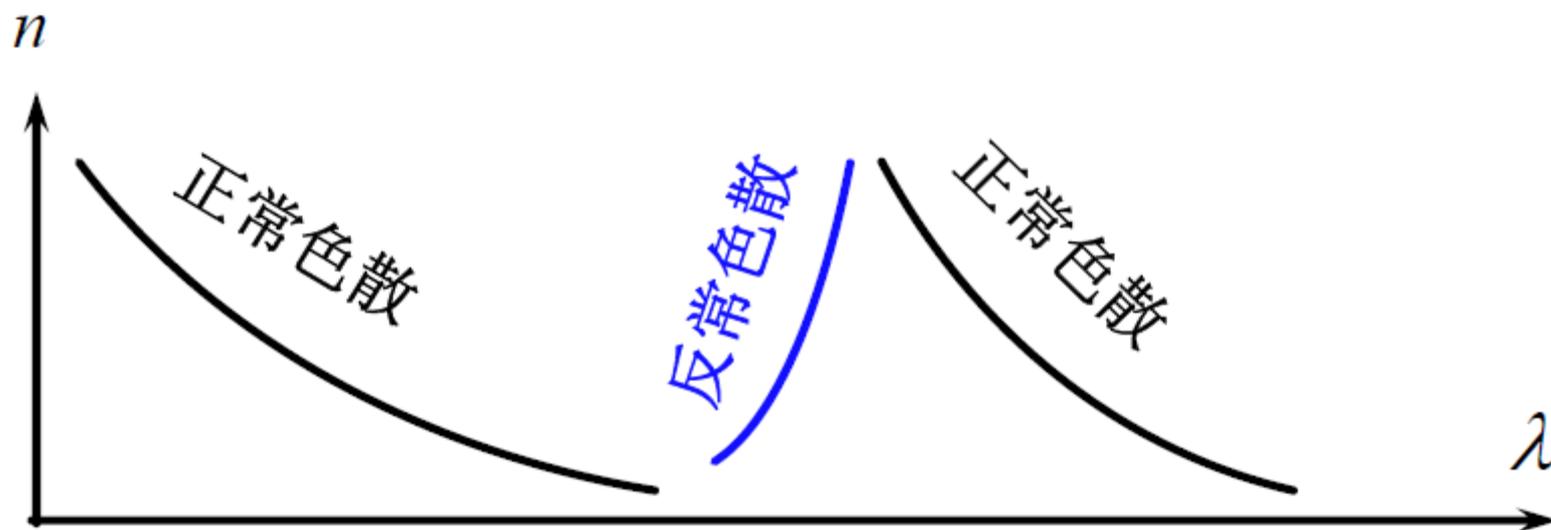
折射率随波长单调上升： $\frac{dn}{d\lambda} > 0$



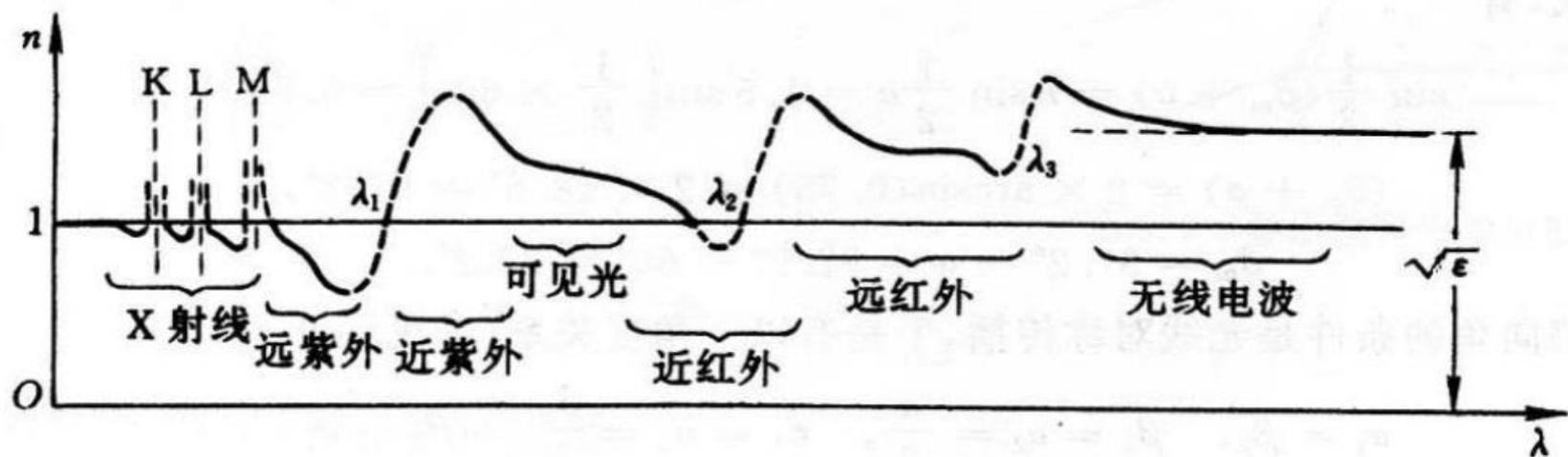
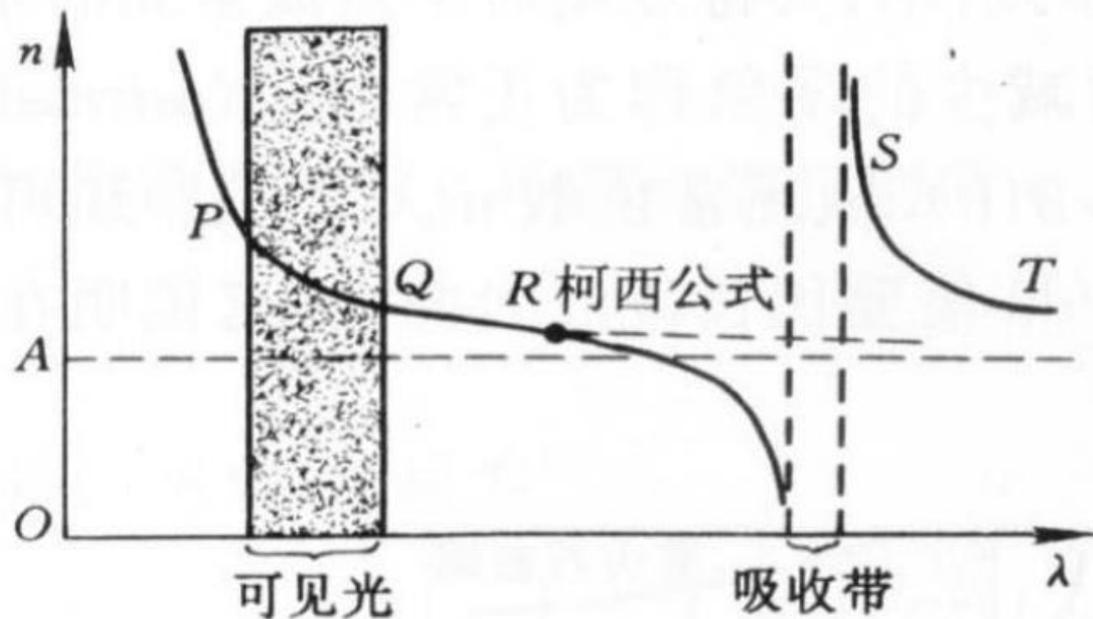
伍德 (R.W.Wood, 1904) 在钠蒸气首次观察到。

3.一种物质的全部色散曲线

特点：一系列正常色散段和反常色散段构成

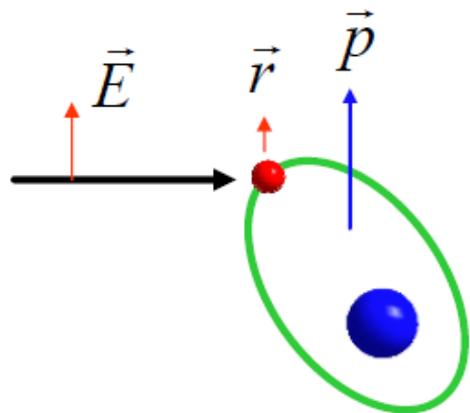


不同正常色散段的常数A, B, C不同。



4. 经典色散理论

(1) 单个振子的受迫振动



$$m\ddot{r} + g\dot{r} + kr = -eE_0 e^{-i\omega t}$$

$$r = \frac{eE_0}{m} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma} e^{-i\omega t}$$

$$\gamma = \frac{g}{m}$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

电极化: $\tilde{p} = -NZer = \tilde{\chi}\epsilon_0 E$

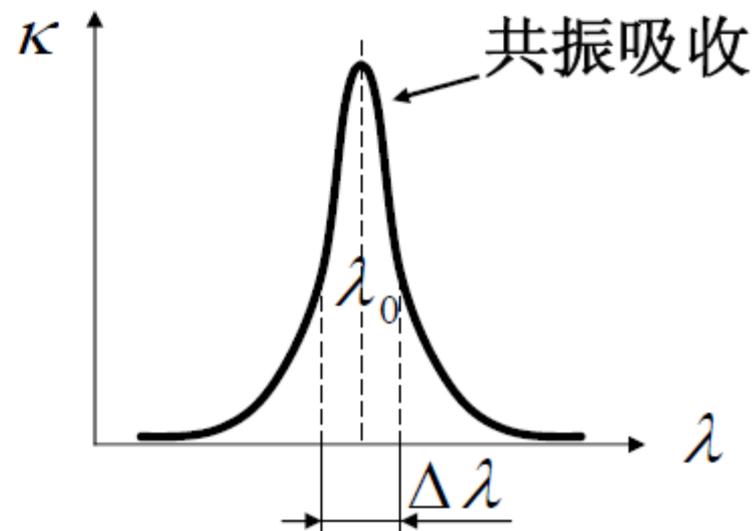
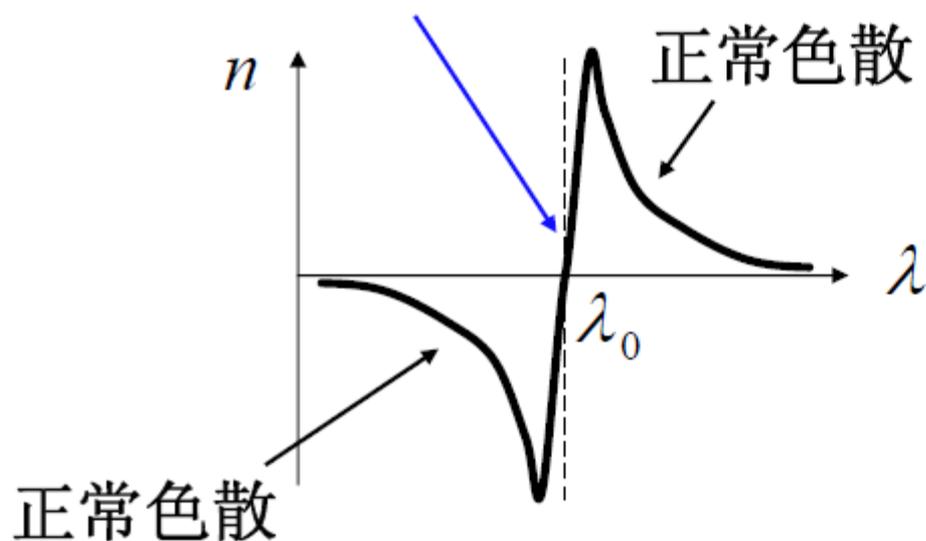
$$\tilde{\epsilon} = 1 + \tilde{\chi}$$

$$= 1 - \frac{NZe^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma}$$

弱吸收近似: $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon}$, $\kappa \ll 1$

$$\begin{cases} n^2 = 1 - \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega\gamma)^2} \\ 2n^2\kappa = \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\omega\gamma}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega\gamma)^2} \end{cases}$$

反常色散



远离共振吸收区域

$$n^2 = 1 - \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

i) 当 $\omega \ll \omega_0$, $\lambda \gg \lambda_0$ 时 (长波极限)

$$\begin{aligned} n^2 &= 1 + \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\lambda_0^2}{(2\pi c)^2} \frac{1}{1 - (\lambda_0 / \lambda)^2} \\ &= 1 + \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\lambda_0^2}{(2\pi c)^2} \left[1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2 + \dots \right] \end{aligned}$$

和柯西公式 $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$ 吻合, 其中:

$$A = \sqrt{1 + \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\lambda_0^2}{(2\pi c)^2}} \quad B = \frac{1}{2A} \frac{NZe^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\lambda_0^4}{(2\pi c)^2}$$

ii) 当 $\omega \gg \omega_0$, $\lambda \ll \lambda_0$ 时 (短波极限)

$$\begin{aligned} n^2 &= 1 - \frac{NZe^2}{\epsilon_0 m} \frac{\lambda^2}{(2\pi c)^2} \frac{1}{1 - (\lambda/\lambda_0)^2} \\ &= 1 - \frac{NZe^2}{\epsilon_0 m} \frac{\lambda^2}{(2\pi c)^2} \left[1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 + \dots \right] \end{aligned}$$

偏离了柯西公式, 但能和Sellmeier公式吻合。

(2) 多个振子的受迫振动

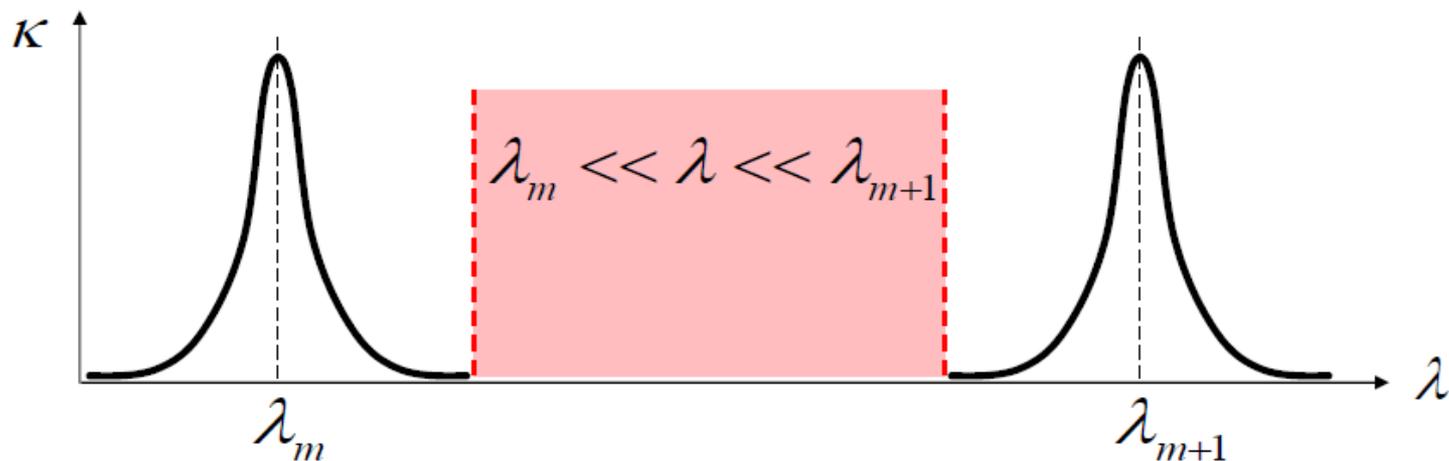
$$\begin{cases} n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \sum_j \frac{f_j (\omega^2 - \omega_j^2)}{(\omega^2 - \omega_j^2)^2 + (\omega \gamma_j)^2} \\ 2n\kappa = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \sum_j \frac{f_j \omega \gamma_j}{(\omega^2 - \omega_j^2)^2 + (\omega \gamma_j)^2} \end{cases}$$

远离吸收区域:

$$n^2 = 1 + \sum_j \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}$$

$$\text{其中: } a_j = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \frac{f_j \lambda_j^2}{(2\pi c)^2}$$

i) 当入射波长处于两个吸收峰之间



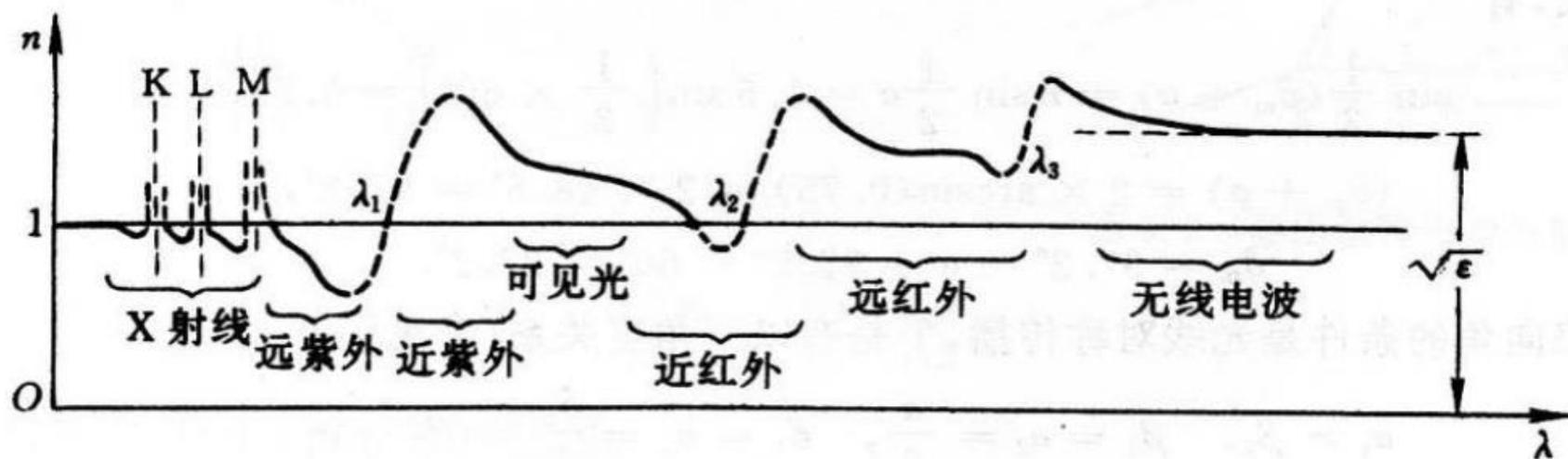
$$n^2 = 1 + \sum_j \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \approx 1 + a_1 + a_2 + \dots + a_{m-1} + \frac{a_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2}$$

和柯西公式吻合,

$$A = \sqrt{1 + a_1 + a_2 + \dots + a_m} \quad \text{常数 } A \text{ 随 } m \text{ 增大而上升。}$$

$$B = \frac{a_m \lambda_m^2}{2A}$$

ii) 当 $\lambda \rightarrow 0$ (短波极限)



$$n^2 = 1 + \sum_j \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \approx 1 - \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda_1^2} < 1$$

作业：

P244: 1, 3, 5

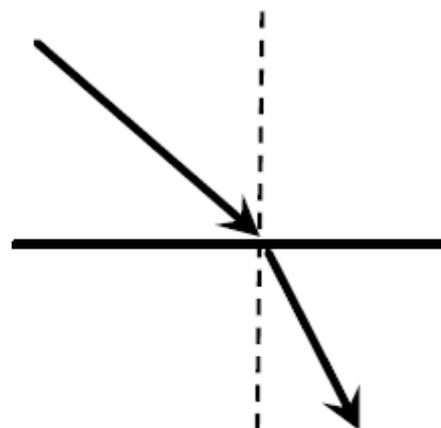
★负折射率材料（左手材料、超材料）

电磁理论：

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon\vec{E} \\ \vec{B} = \mu\vec{H} \end{cases}$$

$$\hat{k} = \hat{E} \times \hat{H}$$

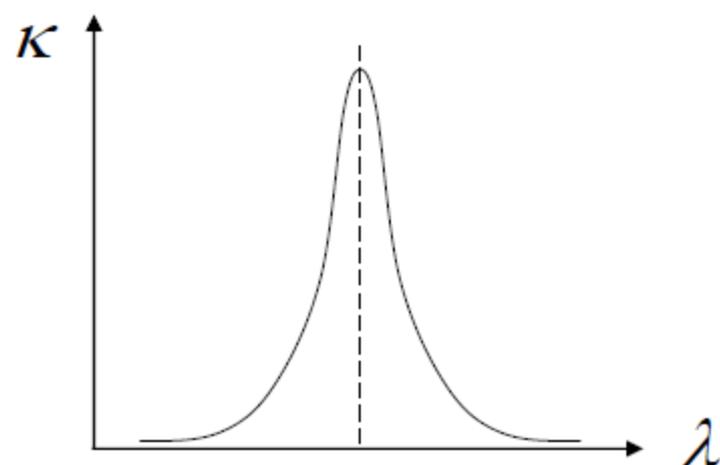
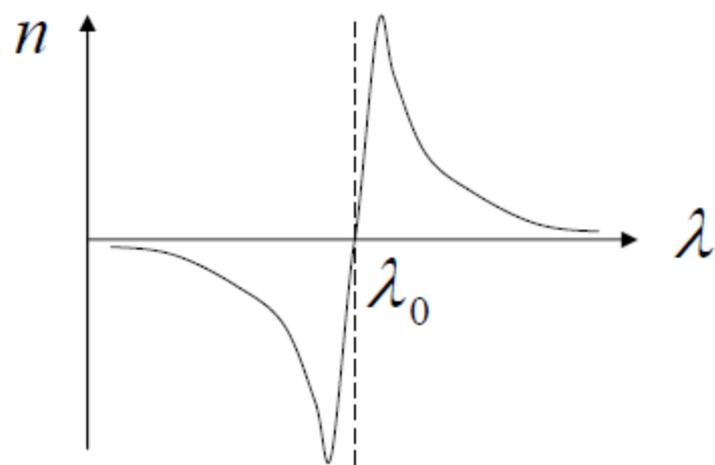
$$n^2 = \epsilon\mu, \quad n = \sqrt{\epsilon\mu}$$



\hat{E} , \hat{H} , \hat{k} 三者构成右手系, n 开根取正号, 折射光在法线的另一侧。

ϵ , μ 是否能取负号? 取负号的物理意义是什么?

$$\tilde{\epsilon} = 1 - \frac{NZe^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma}$$



$$\begin{cases} \bar{D} = \epsilon \bar{E} \\ \bar{B} = \mu \bar{H} \end{cases} \quad \text{物理意义:} \quad \begin{array}{l} \text{电极化与电场} \\ \text{磁场与磁化} \end{array} \quad \text{位相差 } 180^\circ$$

ε , μ 取负号, \hat{E} , \hat{H} , \hat{k} 三者构成左手系,
折射光在法线的同侧。

