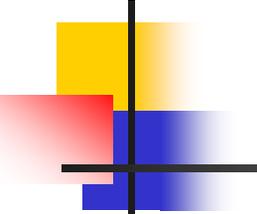




第一章

光与物质相互作用基础

- 1.1 光的波动理论与光子学说
- 1.2 热辐射的一般概念
- 1.3 黑体辐射
- 1.4 自发辐射、受激辐射和受激吸收
- 1.5 谱线形状与宽度
- 1.6 均匀加宽与非均匀加宽



1.1 光的波动理论与光子学说

一 光的波动学说

1. 麦克斯韦方程组与波动方程

电磁波的形成：

空间某区域有**变化电场**（或变化磁场），在邻近区域将产生**变化的磁场**（或变化电场），这种变化的电场和变化的磁场不断交替产生，由近及远以有限的速度在空间传播，形成电磁波。

(光波是电磁波)

一 光的波动学说

1. 麦克斯韦方程组与波动方程

麦克斯韦方程组的微分形式:

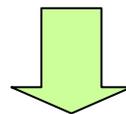
$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$

静止、线性和各向同性介质中的物质方程:

$$\left. \begin{aligned} D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ J &= \sigma E \end{aligned} \right\}$$

若电磁场传播区域远离辐射源、不存在自由电荷和传导电流:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot D &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 H - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

交变电场、
交变磁场以
速度 v 传播

一 光的波动学说

2. 电磁波的性质

- 电磁波是横波
- 偏振特性
- 在介质中不同频率电磁波具有不同传播速度（色散现象）
- 光在自由空间中以行波状态传播
- 电场和磁场同相位，并满足： $\sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H$
- 能量密度： $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$
- 时谐变电磁场

$$E(z, t) = E_m \cos(\omega t - \beta z + \varphi_0)$$

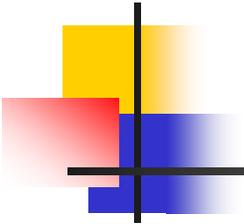
$$E(z, t) = \text{Re} \left[E_m e^{j(\omega t - \beta z + \varphi_0)} \right] = \text{Re} \left[E_m e^{-j(\beta z - \varphi_0)} e^{j\omega t} \right]$$

一 光的波动学说

2. 电磁波的性质

电磁波段的详细划分及用途

波段/nm	名称	用途
$10^{-5}\sim 30$	γ 射线	金属探伤、研究核结构
$10^{-4}\sim 100$	X射线	医用、探伤、分析晶体结构
1~390	紫外线	医用、照相制版
390~770	可见光	
770~10^6	红外线	雷达、光纤通信、导航
$10^6\sim 10^9$	微波	电视、雷达、无线电导航
$10^9\sim 10^{10}$	米波	调频广播、电视、导航
$10^{10}\sim 5\times 10^{10}$	短波	无线电广播、电报通信
$5\times 10^{10}\sim 2\times 10^{11}$	中短波	电报通信
$2\times 10^{11}\sim 3\times 10^{12}$	中波	无线电广播
$3\times 10^{12}\sim 3\times 10^{13}$	长波	越洋长距离通信和导航



二 光子学说

1. 光子的基本性质

$$(1) E = h\nu \quad (2) m = \frac{E}{c^2} \quad (3) P = \hbar k$$

- (4) 光子具有两种可能的独立偏振态，对应于光波场的两个独立偏振方向。
- (5) 光子具有自旋，并且自旋量子数为整数。

二 光子学说

2. 光子的状态描述

$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \leq h^3$ 范围内，光子的状态不能完全确定

h^3 ：相体积或相格

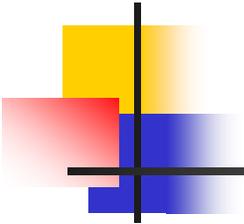
对应坐标空间体积：

$$\Delta x \Delta y \Delta z = \frac{h^3}{\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z}$$

空间体积V内的光子的状态数：

$$G(p)dp = \frac{4\pi p^2 dp V}{h^3}$$

注：一个相格代表一种量子态，多个光子可处于同一量子态，该现象称为**简并**。处于同一量子态的平均光子数称为光子**简并度**。



1.2 热辐射的一般概念

一 热辐射现象

任何温度高于绝对零度的物体都能产生辐射，该辐射称为热辐射（或温度辐射）。**热辐射**是物体以**电磁波形式**向外发射能量的过程。

辐射度单位体系：

只与**辐射客体有关**的物理量，只用于整个电磁波段。

基本物理量：辐射通量；**基本单位**：瓦特(W)或焦/秒(J/s)。

光度学单位体系：

反映**视觉亮暗特性**的光辐射计量单位，适用于可见光波段。

基本物理量：发光强度；**基本单位**：坎德拉(cd)

二 描述辐射场的物理量

1. 辐射能 Q_e : 以辐射形式发射或传输的电磁波能量。

单位: 焦耳 (J) 。

2. 辐射通量 Φ_e : 单位时间内流过的辐射能量, 又称辐射功率。

单位: 瓦特 (W) 或焦/秒 (J/s) 。

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

3. 辐射照度: 照射在面元上的辐射通量与该面元的面积之比。

单位: W/m^2

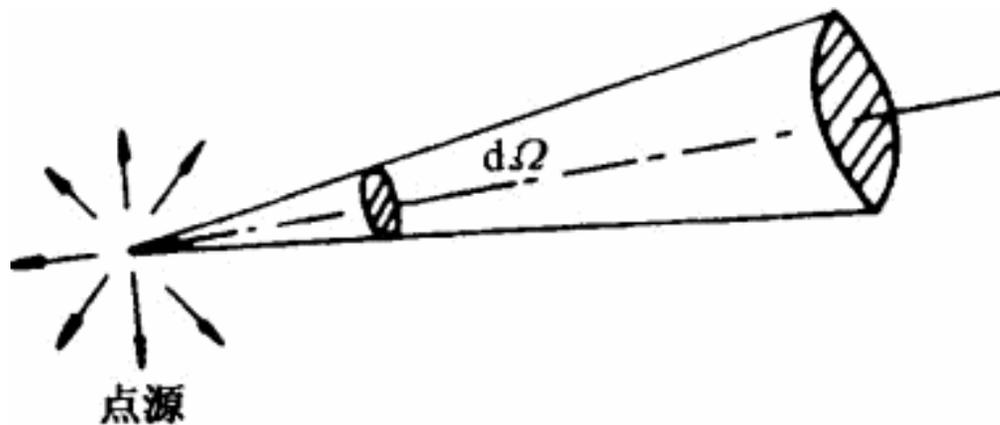
$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

二 描述辐射场的物理量

4. 辐射强度：点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量。

单位：瓦特/球面度（W/sr）

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$



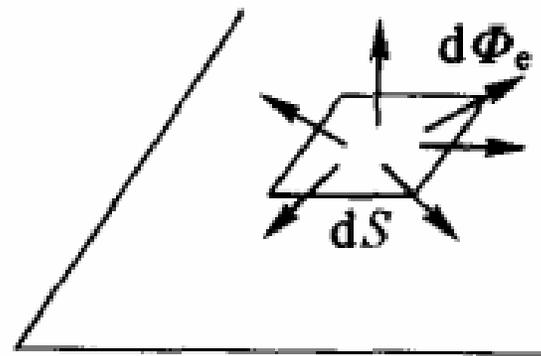
辐射强度示意图

二 描述辐射场的物理量

5. 辐射出射度 M_e : 辐射体表面单位面积向空间发射的辐射通量。

单位: W/m^2

$$M_e = d\Phi_e / dS$$



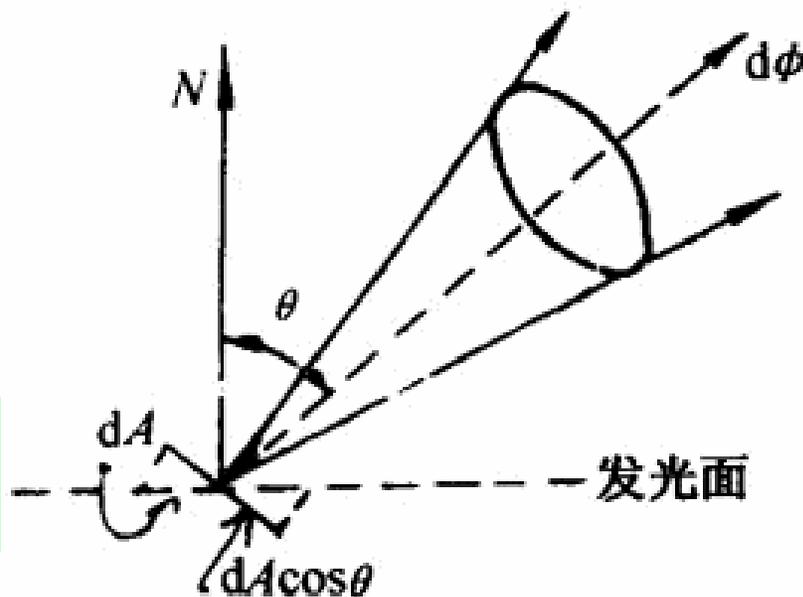
辐射出射度示意图

二 描述辐射场的物理量

6. 辐射亮度：面辐射源在某一方向上的单位投影表面在单位立体角内的辐射通量。

单位：瓦特/球面度·米²
(W/sr · m²)

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta} = \frac{dI_e}{dA \cos\theta}$$



辐射亮度示意图

三 光度量

相等的辐射通量，波长不同，人眼主观亮暗感觉不同！

在引起强度相等的视觉情况下，若所需的某一单色光的辐射通量越小，则说明人眼对该单色光的视觉灵敏度越高。

1. 光谱光视效能 $K(\lambda)$

同一波长下所测出的光通量与辐射通量之比。

单位：lm/W

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}$$

三 光度量

2. 光谱光视效率（视见函数） $V(\lambda)$

某一波长的光谱光视效能与最大光谱光视效能 K_m 之比。

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683_{(\lambda=555nm)}}$$

视见函数的另一描述方法：

设任一波长为 λ 的光和波长为555nm的光，产生相同亮暗视觉所需的辐射通量分别为 $\Delta\Phi_{e\lambda}$ 和 $\Delta\Phi_{e555}$ ，则其比值称为视见函数。即

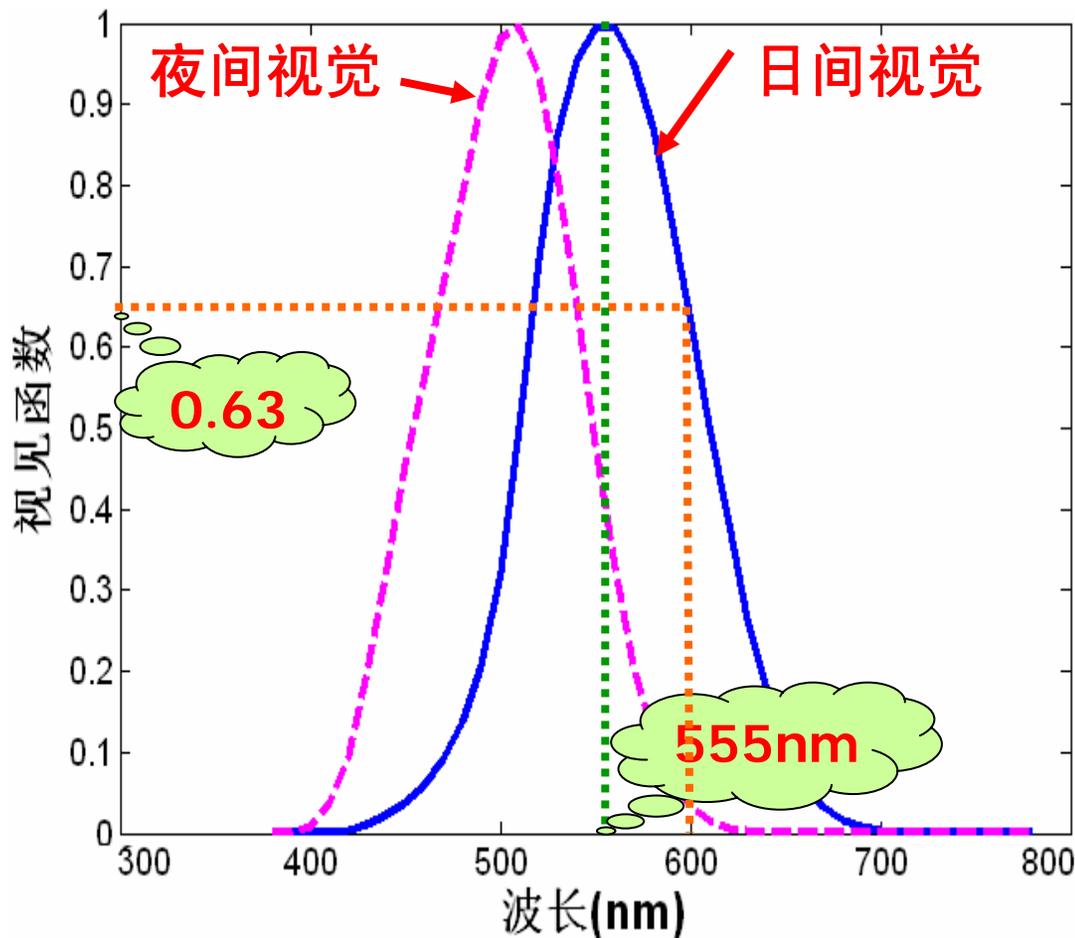
$$V(\lambda) = \frac{\Delta\Phi_{e555}}{\Delta\Phi_{e\lambda}}$$

三 光度量

视见函数:

$$V(\lambda) = \frac{\Delta\Phi_{e555}}{\Delta\Phi_{e\lambda}}$$

例: 对于600nm的光波, 为使它引起和555nm光波相等的视觉亮暗程度, 所需的辐射通量为555nm 光波的1.6倍。



光谱视见函数实验曲线

三 光度量

1. **光通量** Φ_v : 表示光源表面客观辐射通量对人眼所引起的视觉强度。**计算方法**: 等于**辐射通量与光谱光视效能的乘积**。
单位: 流明 (lm)

2. **发光强度** I_v : 光源在一定方向范围内发出的**光通量的空间分布**, 可用点光源在单位立体角中发出的光通量数值度量。
单位: 坎德拉 (cd)

$$I_v = d\Phi_v / d\Omega$$

3. **照度** E_v : 表征**受照面被照明程度**, 可用落在受照物体单位面积上的光通量数值表度量。**单位**: 勒克斯 (lx)

$$E_v = d\Phi_v / dA$$

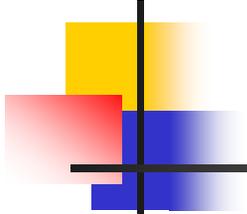
三 光度量

辐射度物理量

物理量名称	符号	定义或定义式	单位
辐射能	Q_e		J
辐射通量	Φ_e	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e/dA$	W/m ²
辐射强度	I_e	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr
辐射亮度	L_e	$L_e = dI_e/(dA \cos \theta)$	W/(m ² •s)
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e/dA$	W/m ²

对应的光度量

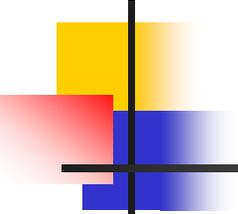
物理量名称	符号	定义或定义式	单位
光量	Q_v	$Q_v = \int \Phi_v dt$	lm•s
光通量	Φ_v	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v/dA$	lm/m ²
发光强度	I_v	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	cd
(光)亮度	L_v	$L_v = dI_v/(dA \cos \theta)$	cd/m ²
(光)照度	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx



四 基尔霍夫辐射定律

$$\frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = M_e(\lambda, T) = \text{恒量}$$

在同样温度下，各种不同物体对相同波长的单色辐射出射度和单色吸收比的比值都相等。



1.3 黑体辐射

一 空腔热辐射

绝对黑体：在任何温度下都能把照到其上的任何频率的辐射完全吸收的物体。

二 黑体辐射的实验规律

1. 斯忒藩—波耳兹曼定律

$$M_{e,B}(T) = \sigma T^4 (\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

2. 维恩位移定律

$$T\lambda_m = b (b = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K})$$

二 黑体辐射的实验规律

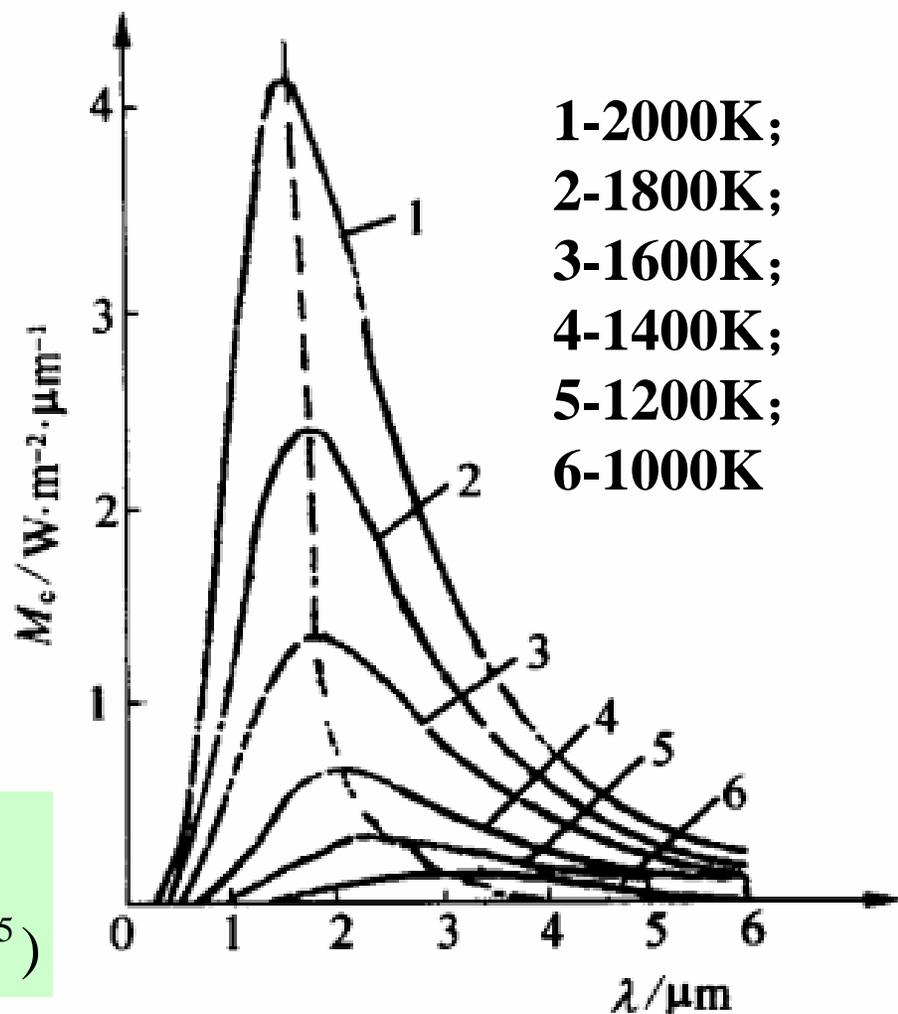
2. 维恩位移定律

$$T\lambda_m = b (b = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K})$$

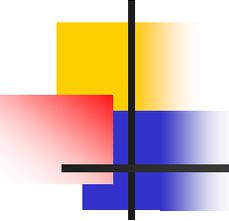
3. 绝对黑体辐射出射度分布曲线的峰值定律

$$M_{e,B}(\lambda_m, T) = C'T^5$$

$(C' = 1.301 \times 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5})$



黑体辐射功率谱



三 维恩公式和瑞利—金斯公式

1. 维恩公式

$$M_{e,B}(\lambda, T) = \frac{\alpha c^2}{\lambda^5} e^{-\frac{\beta c}{\lambda T}}$$

2. 瑞利—金斯公式

$$M_{e,B}(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

四 普朗克公式

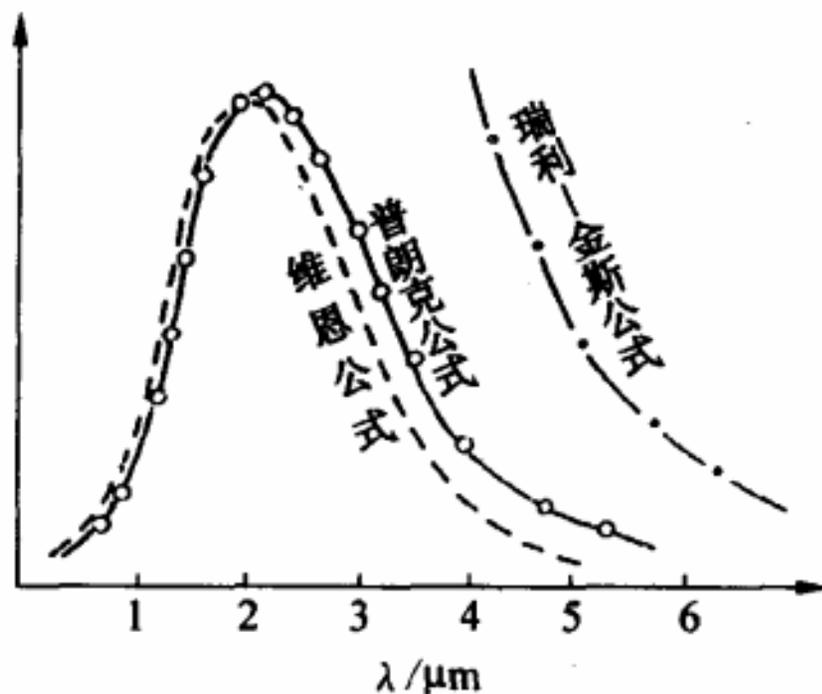
黑体辐射的能量密度公式:

$$w(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

单色辐射出射度:

$$M_{e,B}(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

$M_{e,B}(\lambda, T)$



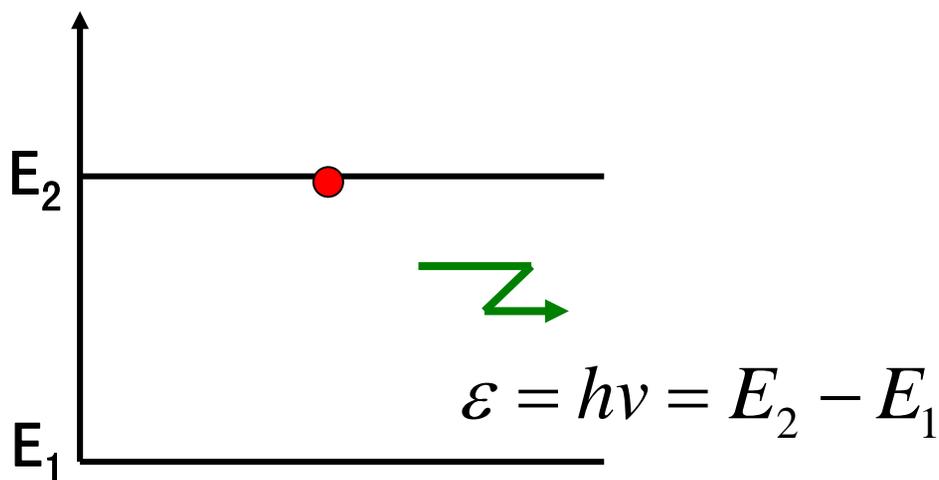
有关黑体辐射的三个公式的比较

1.4 自发辐射、受激辐射和受激吸收

无辐射跃迁：跃迁过程中没有吸收和发射光子。

辐射跃迁：原子能级的变化通过吸收和发射光而实现。

一 自发辐射



光的自发辐射

一 自发辐射

自发辐射跃迁几率 A_{21} : 数量级 $10^7 \sim 10^8/s$

$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} \frac{1}{n_2}$$

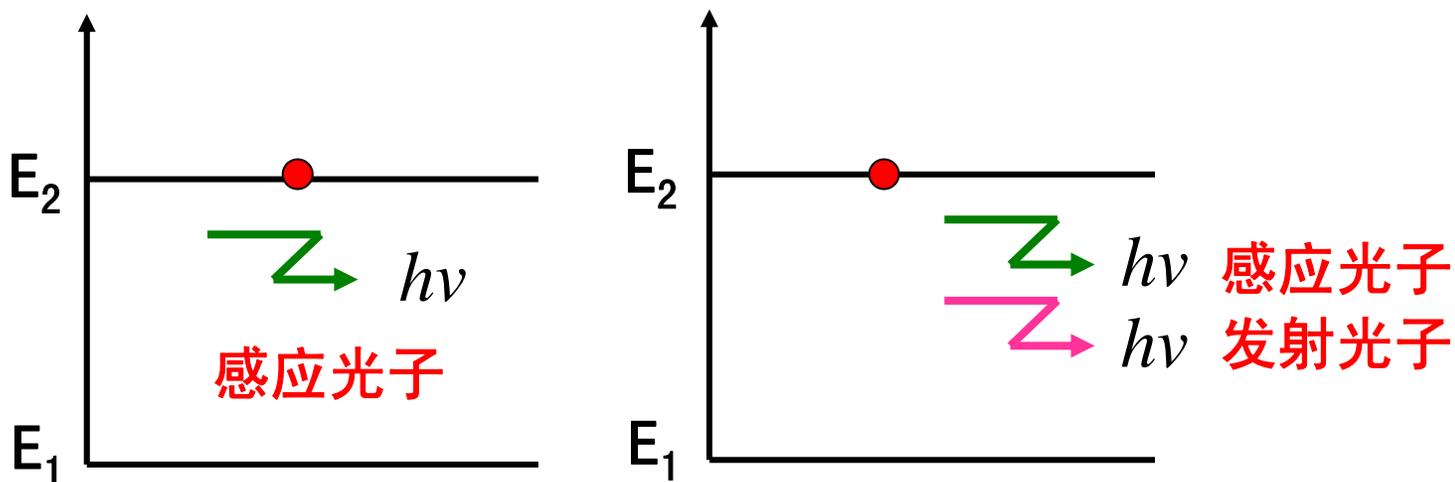
高能级原子数衰减规律: 以**指数规律**衰减。

$$n_2(t) = n_{20} \exp(-A_{21}t) = n_{20} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

自发辐射功率: 以**指数规律**衰减, 发射**荧光**。

$$I(t) = h\nu \frac{dn_{21}(t)}{dt} = h\nu A_{21} n_2(t) = h\nu A_{21} n_{20} \exp(-A_{21}t) = I_0 \exp(-A_{21}t)$$

二 受激辐射



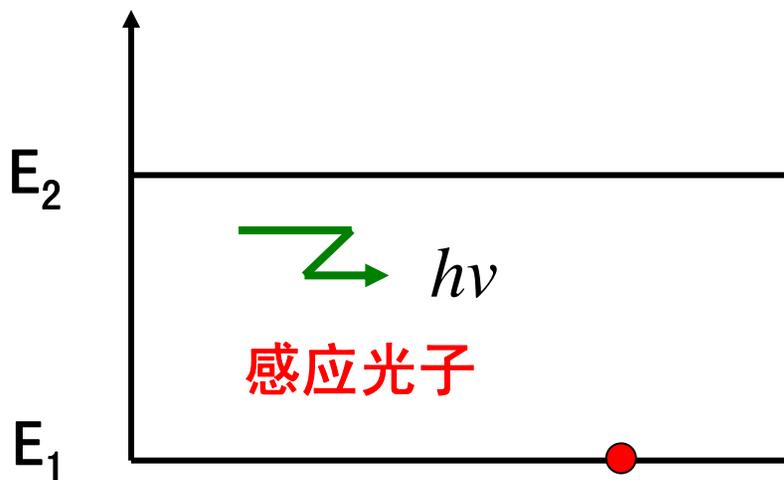
光的受激辐射

感应光子能量: $\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$

发射光子和感应光子不仅频率相同，而且相位、偏振方向和传播方向都相同，即“相干”。

三 受激吸收

四 A_{21} , B_{12} , B_{21} 的关系



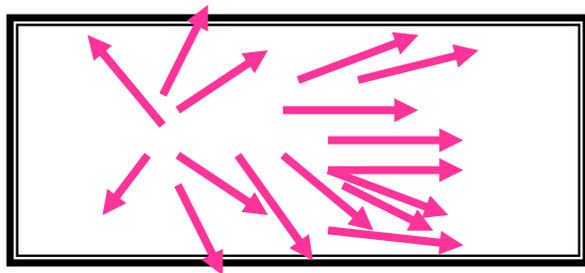
光的受激吸收

$$\left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{\text{自发辐射}} + \left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{\text{受激辐射}} = \left(\frac{dn_{12}}{dt}\right)_{\text{受激吸收}}$$

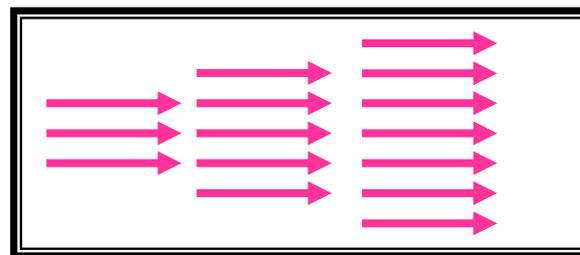
结论：热平衡状态下虽然能级 E_1 和 E_2 上的粒子不断变化，但 n_1 或 n_2 总保持不变值。

五 受激辐射和自发辐射的区别

奠定了产生激光的**物理基础**



光的自发辐射



光的受激辐射

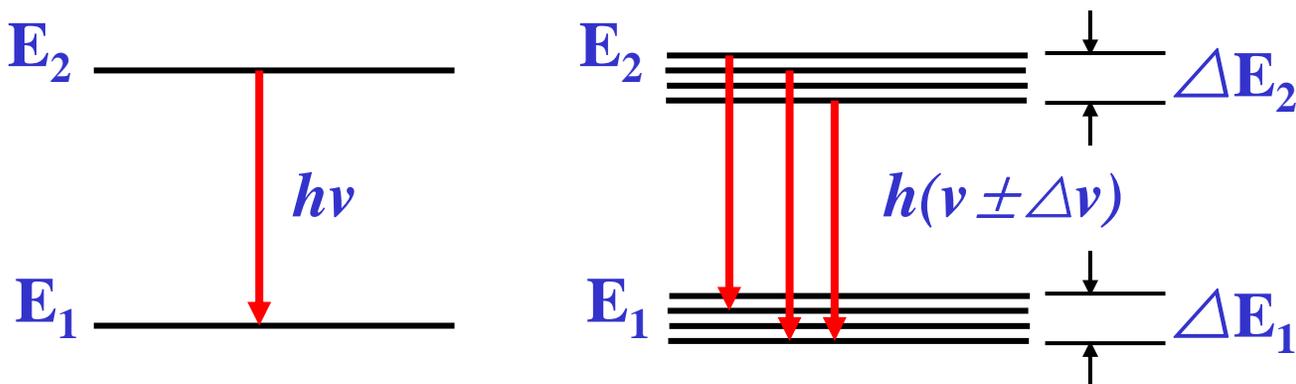
1.6 谱线形状与宽度

一 谱线加宽与线型函数

谱线加宽：跃迁所发出的电磁波不是单色波，而是分布在中心频率附近一个小的频率范围的单色波的组合，在光谱仪上表现为一定的谱线宽度。

谱线加宽的原因：量子力学角度的能量—时间测不准关系 $\Delta E \Delta t \geq h$

辐射的基本线宽： $(E_2 \pm \Delta E_2) - (E_1 \pm \Delta E_1) = (E_2 - E_1) \pm \Delta E' = h(\nu \pm \Delta \nu)$



谱线加宽示意图

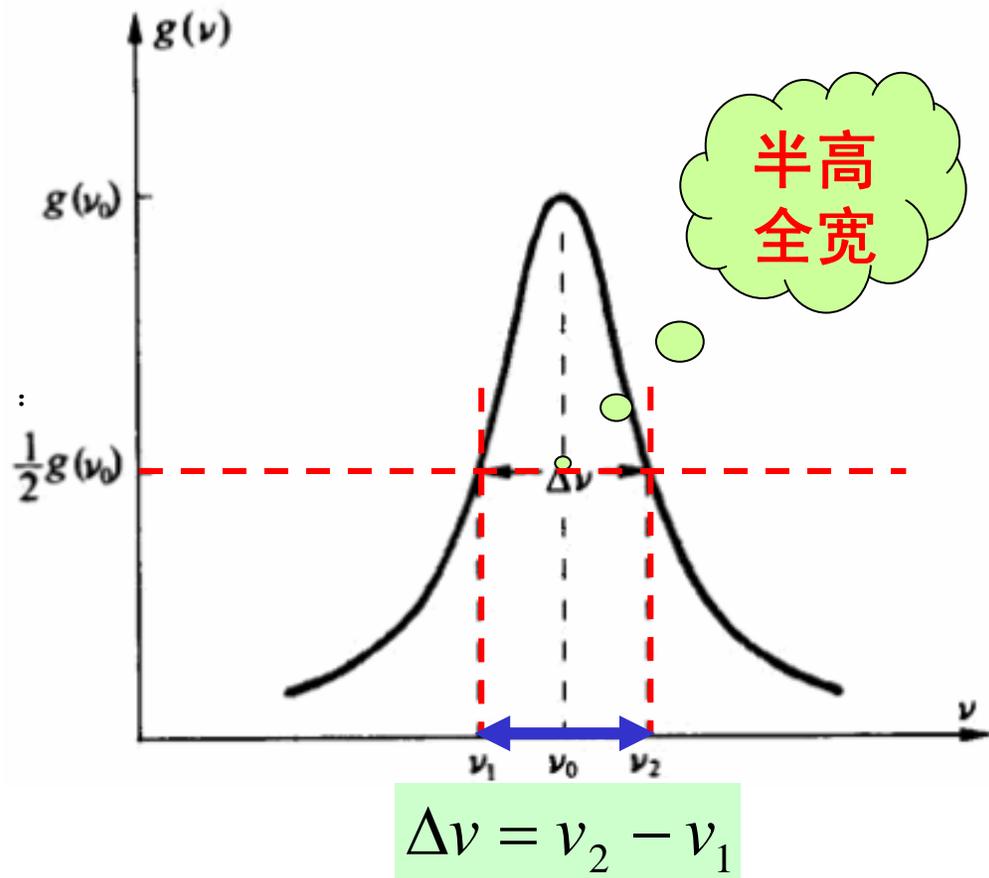
一 谱线加宽与线型函数

线型函数 $g(\nu)$

定义： 频率为横坐标、光强为纵坐标的**曲线函数**。

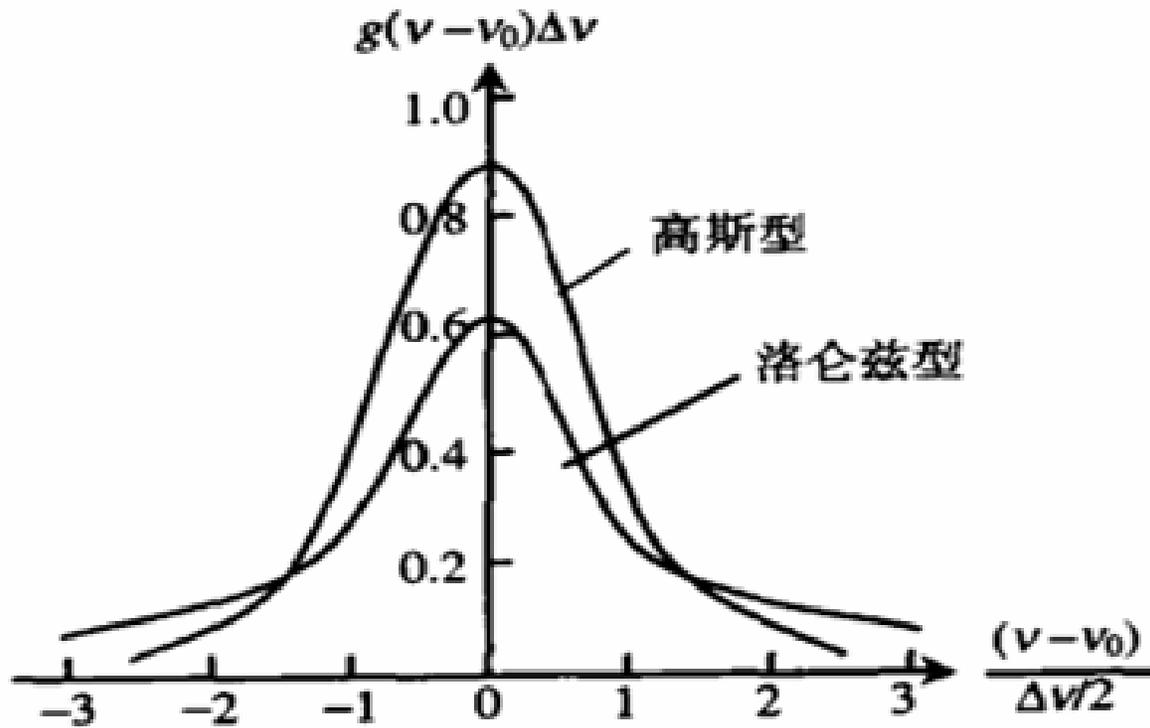
物理含义： 表示辐射总功率为 I_0 的光谱中，其中落在频率 $\nu \sim \nu + d\nu$ 的辐射功率与总功率之比随**频率**的分布情况，可表示为

$$g(\nu) = I(\nu)/I_0$$



线型函数

一 谱线加宽与线型函数



两种线型函数的比较

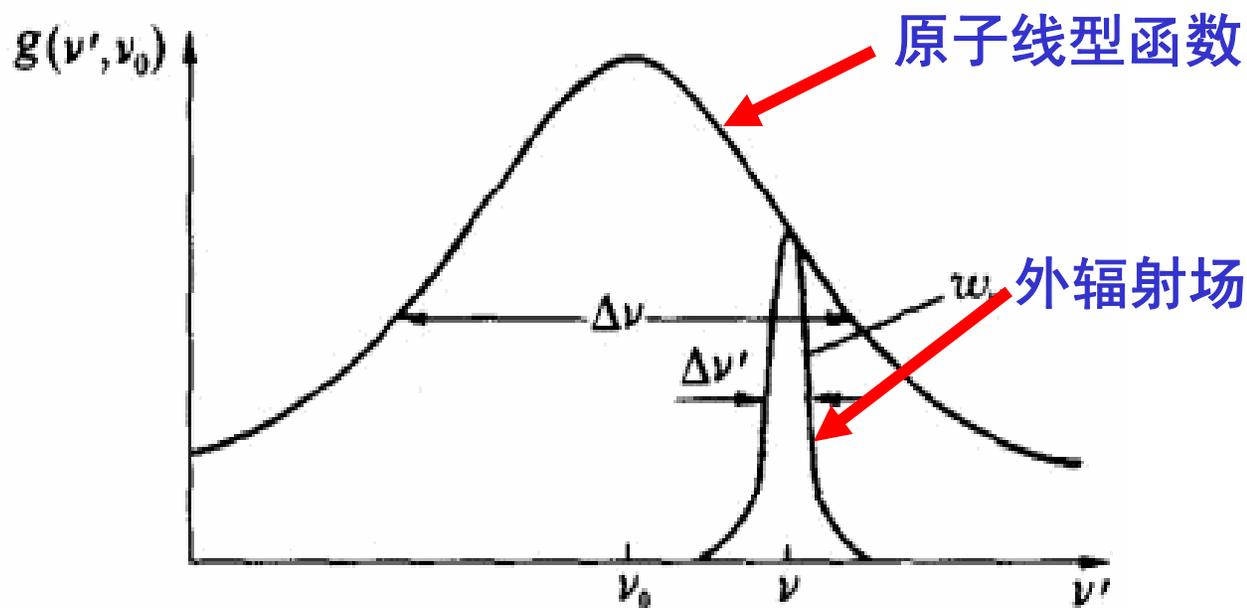
二 谱线加宽对原子与辐射场相互作用的影响

1. 自发辐射

高能级粒子数随时间的变化规律与没有考虑谱线加宽时结果一样。

2. 受激跃迁

(1) 外辐射光场为线宽极小的准单色光 ($\Delta\nu' \ll \Delta\nu$)

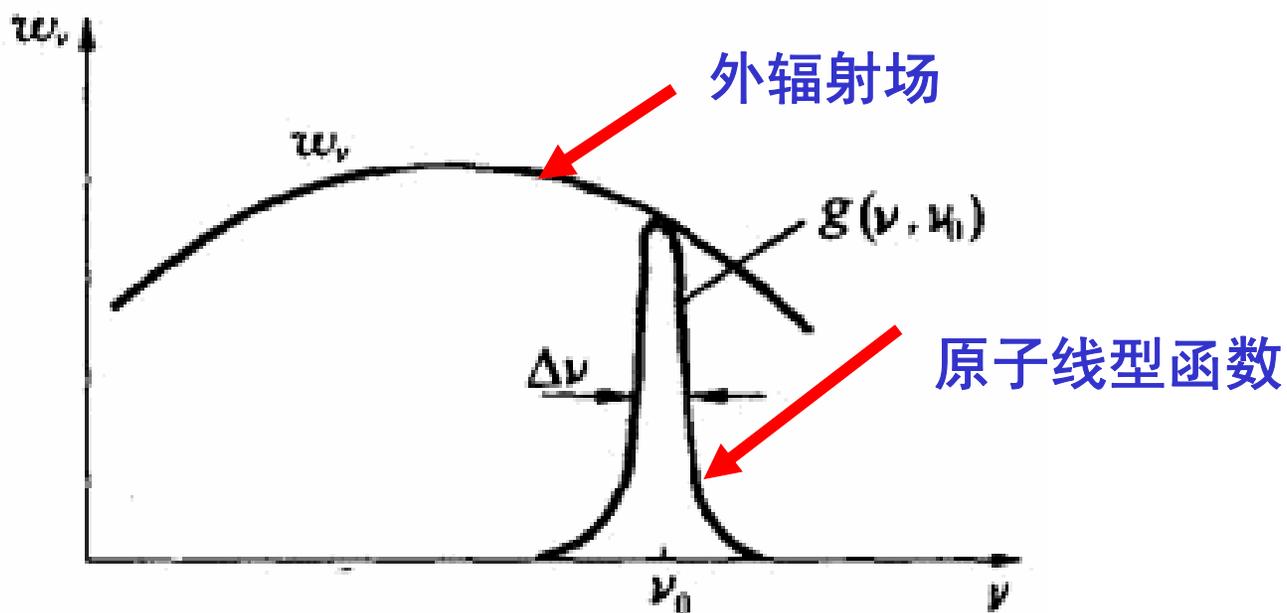


原子与准单色光场作用

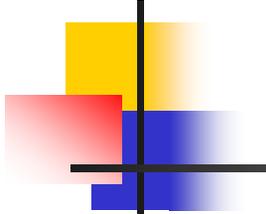
二 谱线加宽对原子与辐射场相互作用的影响

2. 受激跃迁

(2) 外辐射光场为连续谱



原子与连续光场作用



1.6 均匀加宽与非均匀加宽

一 均匀加宽

均匀加宽：每个发光粒子所发光对谱线内的任一频率都有贡献。大量发光粒子中的每一个粒子所处的地位相同，每个发光原子都以整个线型发射，不能把某一特定频率和某些特定粒子相联系。

➤ 自然加宽

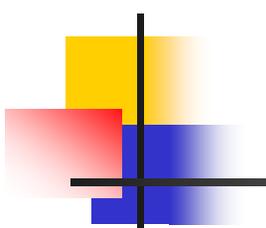
原子存在固有的自发跃迁，导致能级寿命变短，或介质原子的热运动使能级的不确定度增大而引起的谱线加宽。

线型：洛仑兹型函数。

➤ 碰撞加宽

直接或间接的碰撞改变原子的能态，造成介质中上、下能级的原子密度发生随机起伏而造成的谱线加宽。

线型：洛仑兹型函数。



1.6 均匀加宽与非均匀加宽

二 非均匀加宽

非均匀加宽：每个发光粒子所发的光只对谱线内某些特定的频率有贡献，宏观上可以判断谱线的某一部分是介质哪部分原子的贡献。

主要因素：

- 晶体存在结构缺陷
- 气体分子存在热运动
- 辐射介质各处的激励条件不均匀

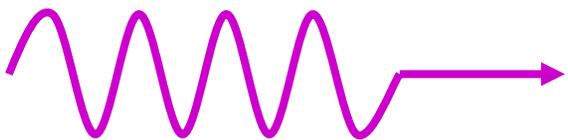
1.6 均匀加宽与非均匀加宽

二 非均匀加宽 ---多普勒频移引起的非均匀加宽

感受电磁波的运动原子



光源



频率为 ν 的电磁波

运动原子与光波相互作用时的多普勒频移

原子所表现出来的中心频率:

$$\nu'_0 = \nu_0 \left(1 \pm \frac{v_z}{c}\right)$$

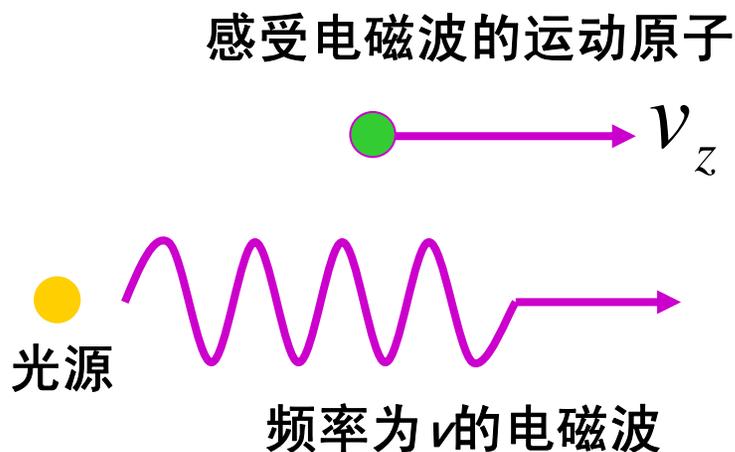
$$\nu = \nu'_0$$

运动原子与光波相互作用最强

线型: 高斯型函数

1.6 均匀加宽与非均匀加宽

二 非均匀加宽 --- 多普勒频移引起的非均匀加宽



运动原子与光波相互作用时的多普勒频移

注： 在多普勒加宽中，不同速度的粒子光谱频率不同，引起非均匀加宽。但对任一速度的粒子，同时具有自然加宽和碰撞加宽因素，因而这一速度粒子的发光频率要做均匀加宽。多普勒加宽总体而言是非均匀加宽，但其中包含了许多均匀加宽。非均匀加宽里的每个频率都可辐射一条均匀加宽谱线。