

# 大学物理

张磊 (13072919527)

B824, Cyrus Tang Building

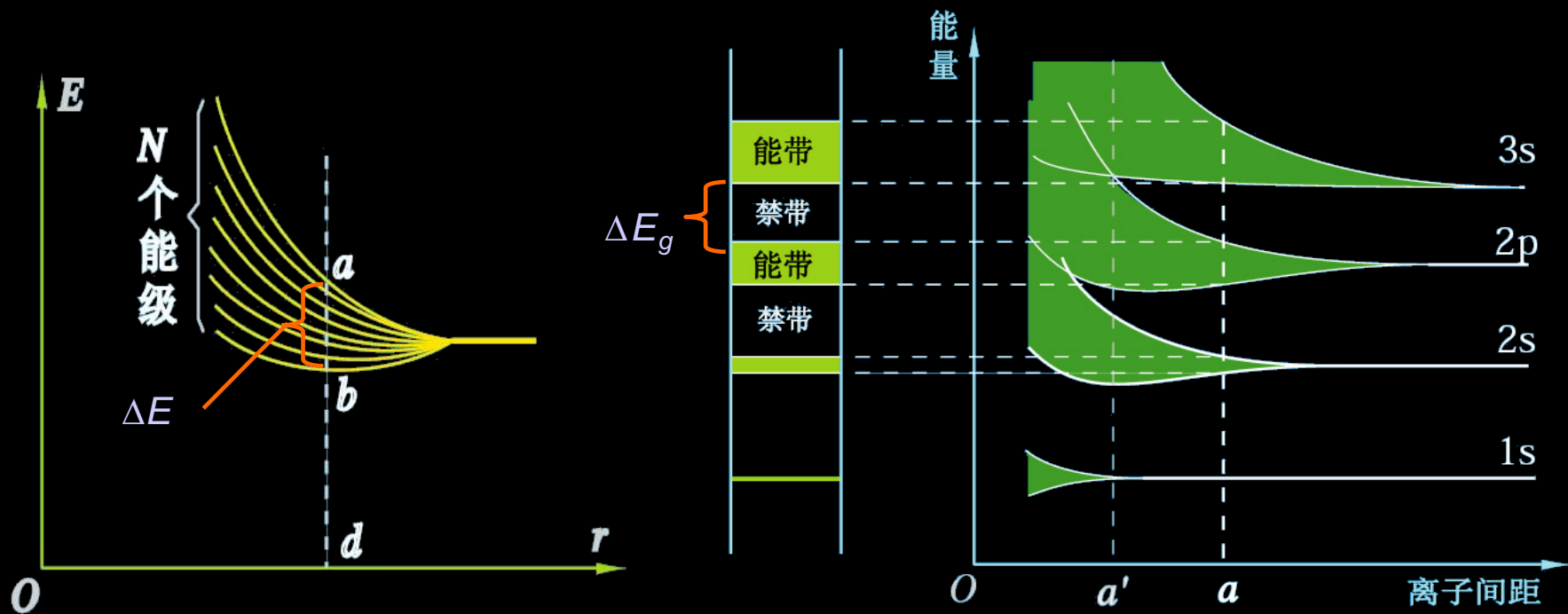


# 固体物理(凝聚态物理)

**本章重点：**固体能带及应用能带观点区分什么是导体、绝缘体和半导体，最后介绍激光。

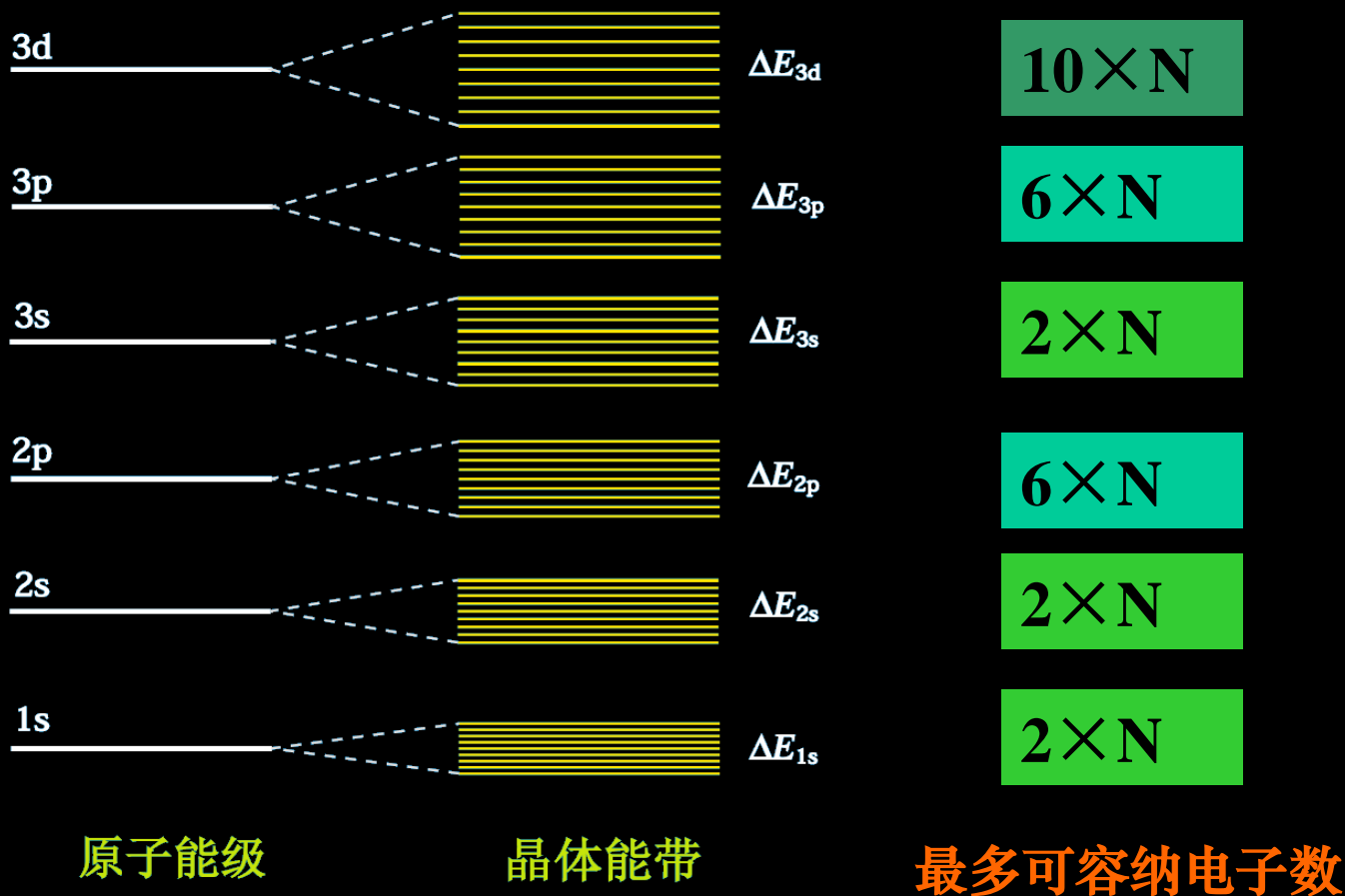
## 固体能带理论

——在量子力学的基础上处理固体中  
电子运动的理论



- **原子的不同能级分裂成不同的能带**，能带中的能级个数决定于组成晶体的原子数  $N$
- **能带宽度  $\Delta E$**  决定于晶体的点阵间距  $r$ ，且能量越低的能带越窄，能量越高的能带越宽；
- 两个相邻能带之间，可能有一个能量间隔，其中不存在电子的稳定能态，称为**禁带**；两个相邻的能带也可能互相重叠，这时禁带消失。

# 能带中的电子分布

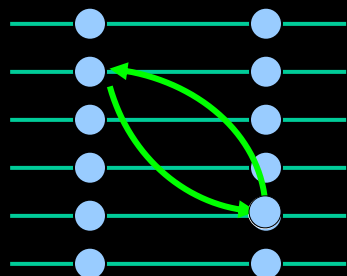


遵守 泡利不相容原理 能量最小原理

★ 说明

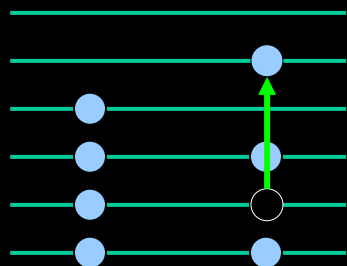
一般情况下，价带是被电子所填充的能量最高的能带。

不参与  
导电



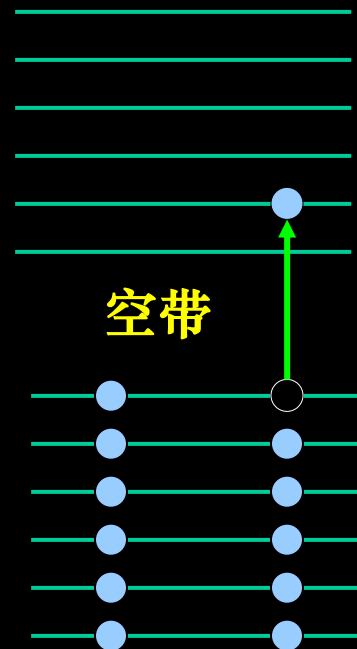
满带

参与  
导电



部分填充能带  
(一般为价带)

参与  
导电

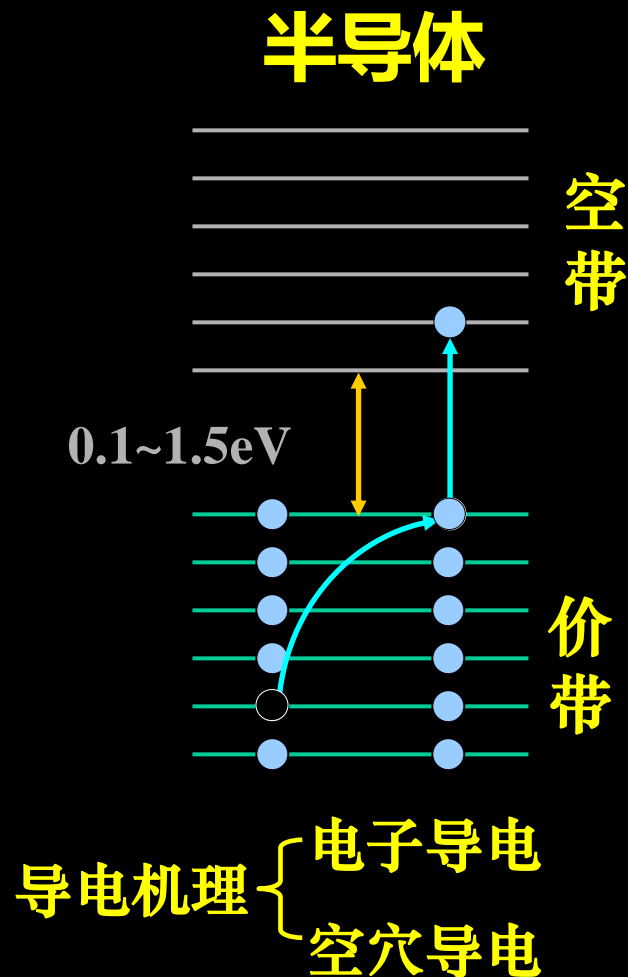
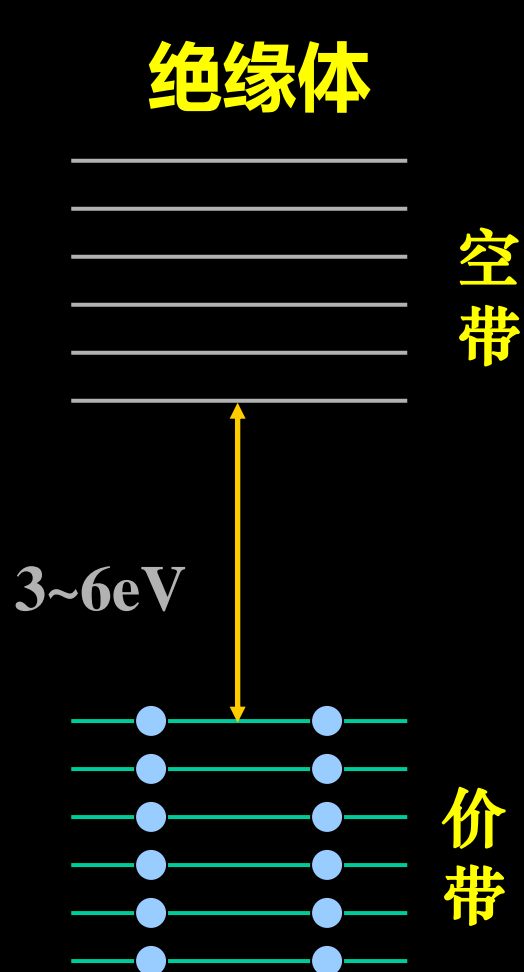


空带

填满的价带

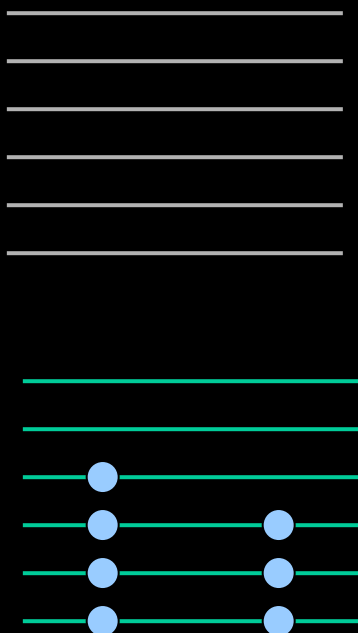
**导带** —— 未填满的能带及空带（一般与价带相邻）。

# 绝缘体 半导体 导体

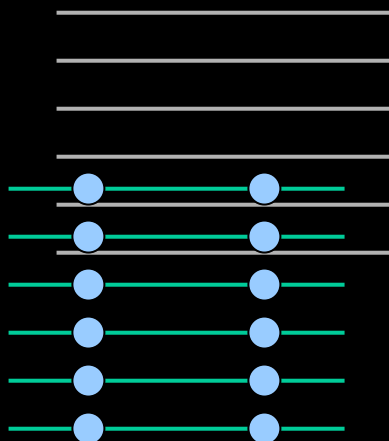


电子、空穴  $\longrightarrow$  “载流子”

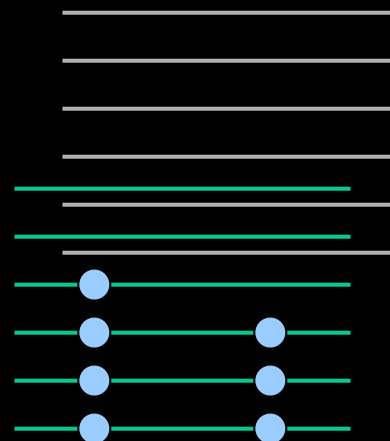
# 导体（三种情况）



锂



镁



铜 铝 银

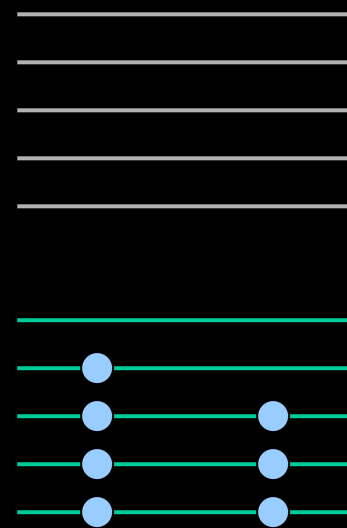
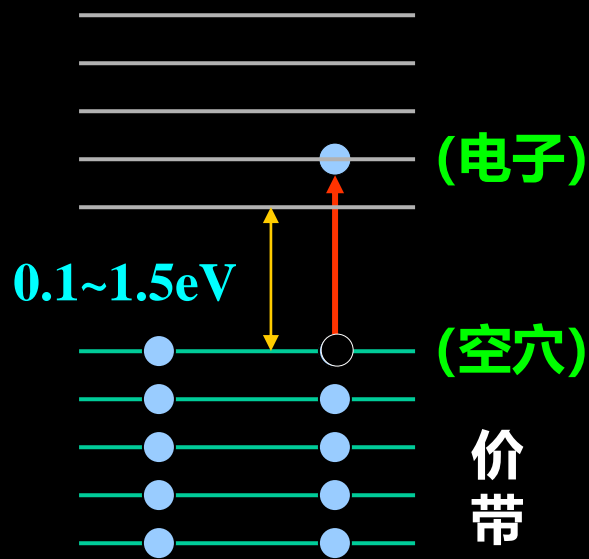
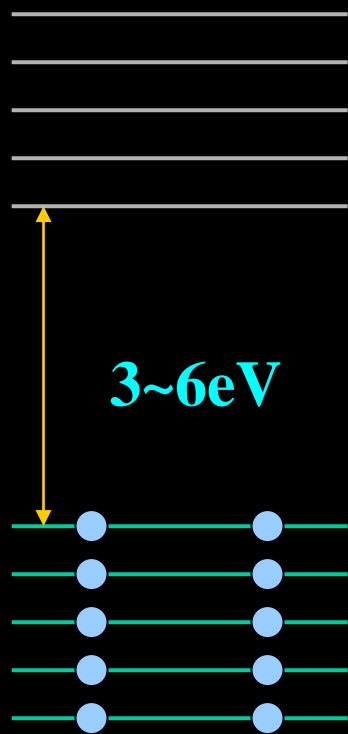
# 电子共有化运动 固体能带

原子  
电子能级

电子共有化

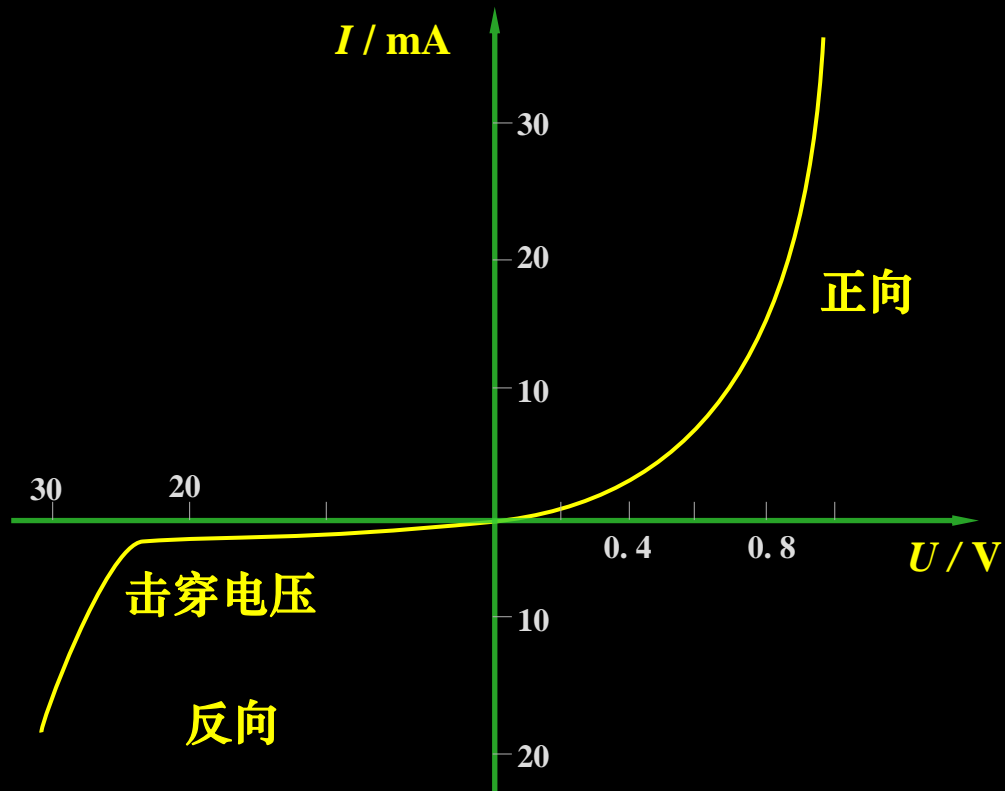
固体  
能带结构

掌握：能带结构区分绝缘体、半导体和导体？



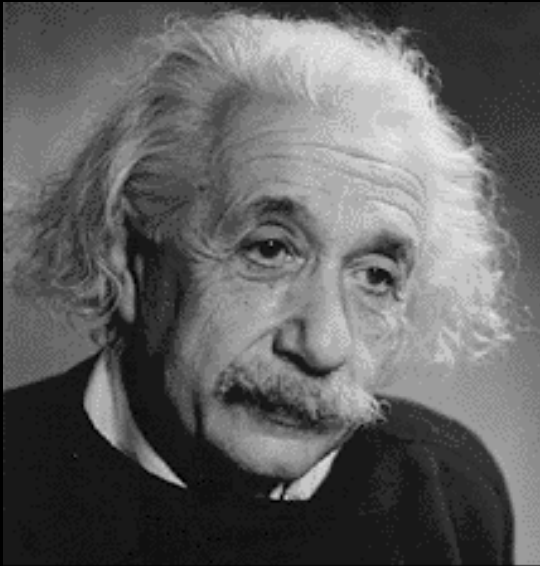


# PN结的伏安特性



★ 半导体PN结具有**单向导电性**

# 激光 Laser



阿尔伯特·爱因斯坦  
(Albert Einstein, 1917)



西奥多·梅曼  
(Theodore Maiman, 1960)

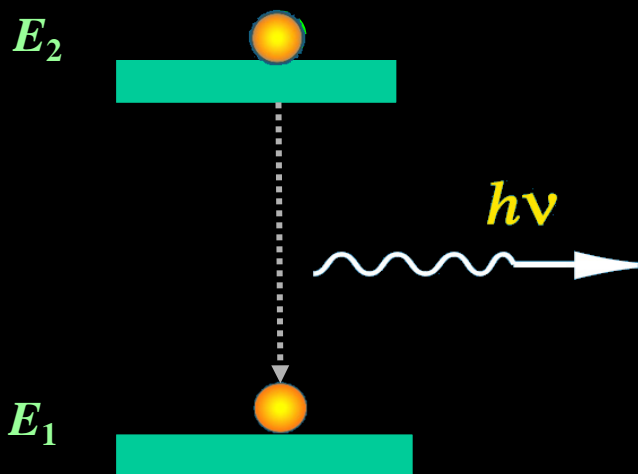
## 一. 光的吸收与辐射

频率条件

$$\nu = \frac{|E_2 - E_1|}{h}$$

# 1. 自发辐射(spontaneous radiation)

处于激发态的原子是不稳定的，原子会自发地由高能态跃迁到低能态，并辐射一个光子，这种过程叫自发辐射。



$$\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{自发}} = N_2 A_{21}$$

自发辐射系数

特点：

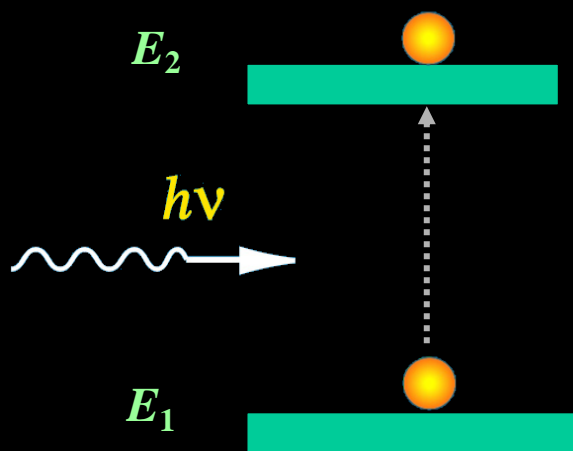
**随机辐射**过程，各粒子彼此独立，发光的频率、相位、偏振态、传播方向之间都不一定相同——**非相干光**



平均寿命 ( $\tau = 1/A_{21}$ ), 亚稳态 ( $\tau > 10^{-3}\text{s}$ )

## 2. 受激吸收(stimulated absorption)

处于低能级 $E_1$ 的粒子，在满足频率条件入射光的照射下，吸收一个光子而跃迁到高能级 $E_2$ ，这种过程叫受激吸收。



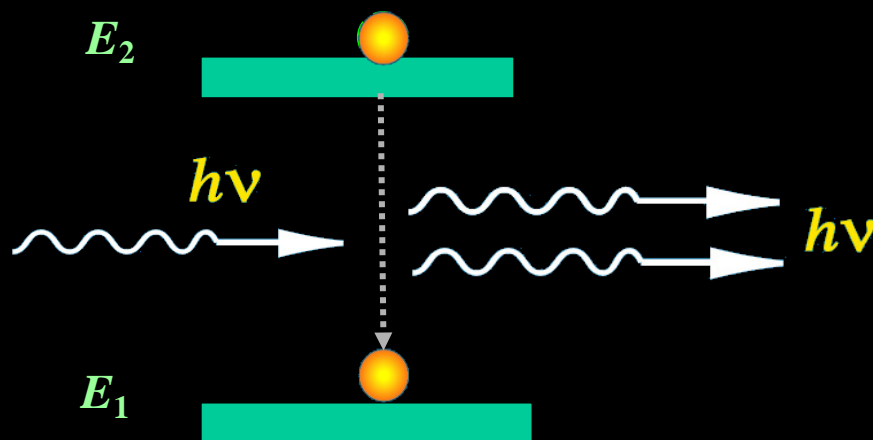
$$\left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = kN_1IB'$$

受激吸收系数

✦ 存在多光子吸收过程，频率条件  $nh\nu = E_2 - E_1$

### 3. 受激辐射(stimulated radiation)

原子受到一个满足频率条件的入射光子的激励，由高能态跃迁到低能态，同时辐射出一个与入射光子完全相同的光子，这种过程称为受激辐射。



$$\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}} = kN_2IB$$

受激辐射系数

特点：

发出的光波与入射光波具有相同的特征，即频率、相位、振动方向和传播方向都完全相同——**相干光**



$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow \dots \rightarrow N \rightarrow 2N \rightarrow \dots$  连锁反应  $\rightarrow$  光放大

**Laser** — **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

一般情况下的多粒子系统，在光与原子相互作用时，总是同时存在着自发辐射、受激辐射和受激吸收。

达到平衡时，单位体积单位时间内通过吸收从基态跃迁到激发态去的原子数，等于从激发态通过自发辐射和受激辐射跃迁回基态的原子数。

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = \left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}} + \left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{自发}}$$

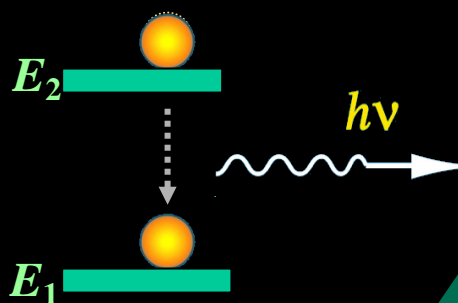
$$\text{爱因斯坦系数} \left\{ \begin{array}{l} \text{自发辐射系数 } A_{21} \\ \text{受激辐射系数 } B \\ \text{受激吸收系数 } B' \end{array} \right.$$

$$B = B' \quad A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B'$$

# 光的吸收与辐射

1916年，爱因斯坦提出三种跃迁

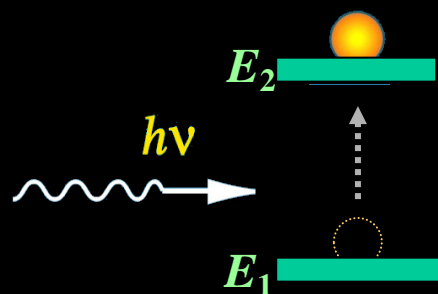
自发辐射



$$\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{自发}} = N_2 A_{21}$$

自发辐射系数

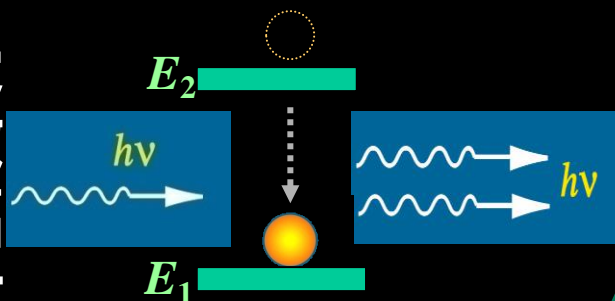
受激吸收



$$\left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = k N_1 I B'$$

受激吸收系数

受激辐射



$$\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}} = k N_2 I B$$

受激辐射系数

	自发辐射	受激辐射
光波的频率 相位偏振态	无关	全同

一般情况下  $B = B'$

## 二. 粒子数反转和光放大

	受激吸收	受激辐射	自发辐射
介质中的光强 $I$	$-kN_1IB$	$+kN_2IB$	忽略

光强变化  $\Delta I \sim (N_2 - N_1)IB$

### 1. 玻耳兹曼分布定律

实验：在通常温度下，原子在能级上的分布是遵守玻耳兹曼分布定律

$$N_n \propto \exp(-E_n / kT) \quad \frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

例：氢原子体系

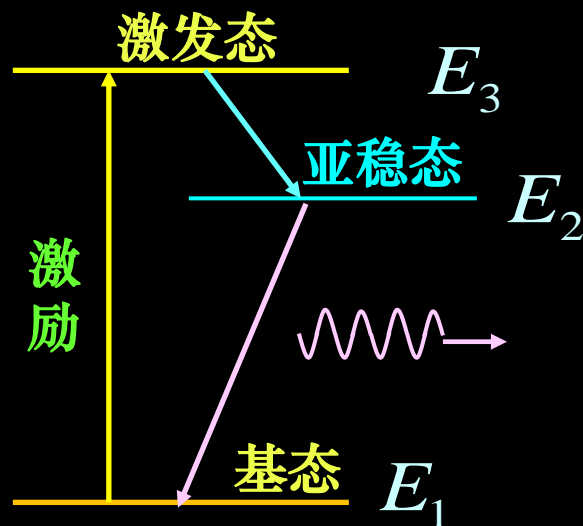
$$T = 300K \Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = e^{-395} \approx 10^{-171}$$

$$T = 6000K \Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = e^{-19.8} \approx 10^{-9} \quad \text{粒子数正常分布}$$

★ **说明** 一般体系中原子几乎都处于基态，受激吸收大于受激辐射  
若介质处于粒子数反转态， $N_2 > N_1$  光在其中传播时有可能得以放大

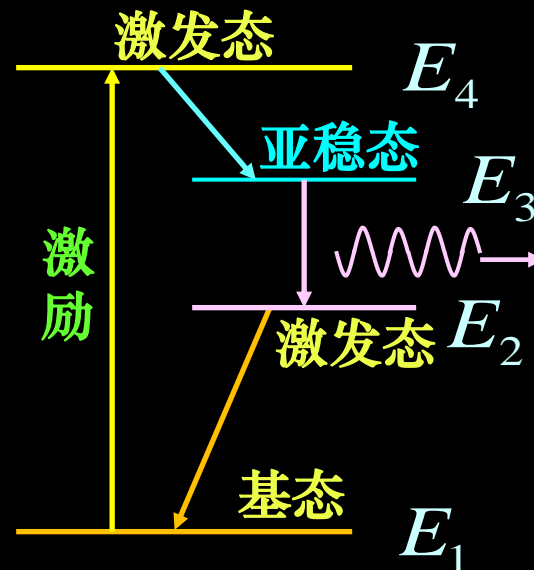


★ 产生粒子数反转的物质 —— 激活物质(存在亚稳态)



三能级结构

$E_2$  和  $E_1$  间粒子数反转

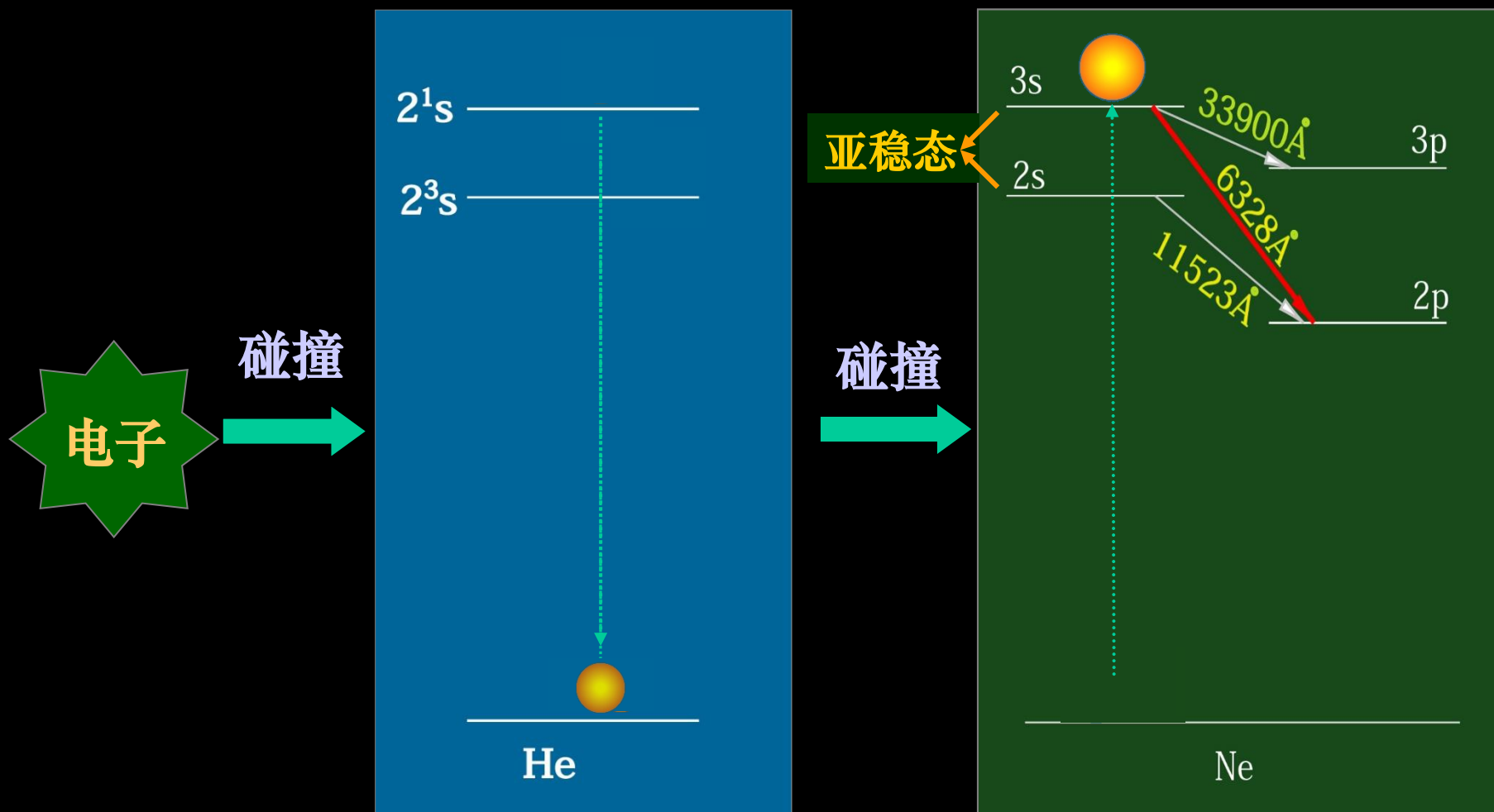


四能级结构

$E_3$  和  $E_2$  间粒子数反转

抽运系统 —— 光激励, 电子碰撞, 共振转移.....

# 例 He-Ne激光器中 Ne气 粒子数反转态 的实现



### 三. 光强随传播距离的变化关系

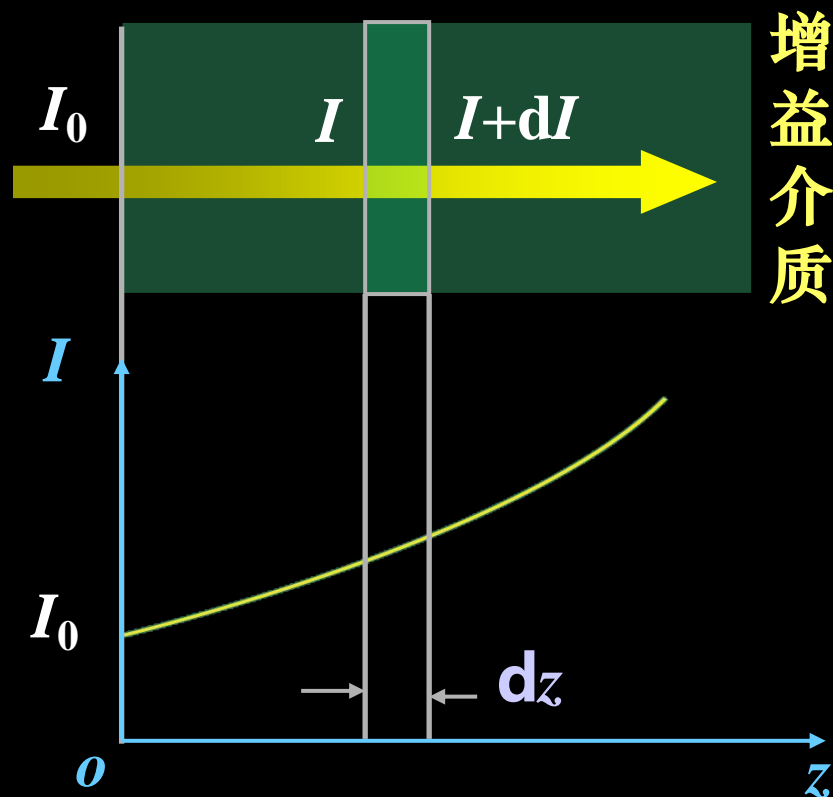
经过介质薄层, 光强增量为

$$dI = GIdz$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^z Gdz$$

$$I = I_0 e^{Gz}$$

$G$  -- 增益系数



**增益介质:** 处于粒子数反转态的介质。

★ 说明

在增益介质内, 光强  $I$  随传播距离按指数增加。

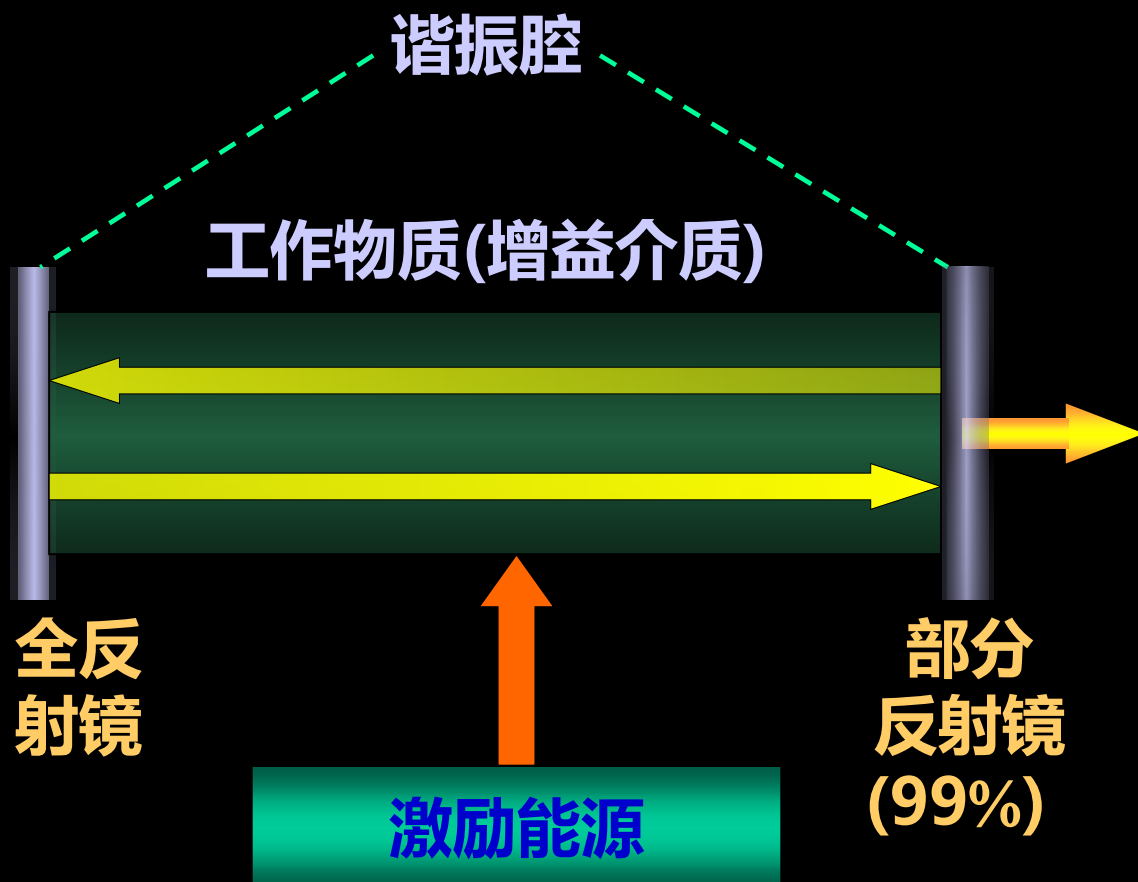
## 四. 激光器的基本构成及激光的形成

### 1. 基本构成部分

谐振腔，工作物质，  
激励能源。

### 2. 激光的形成

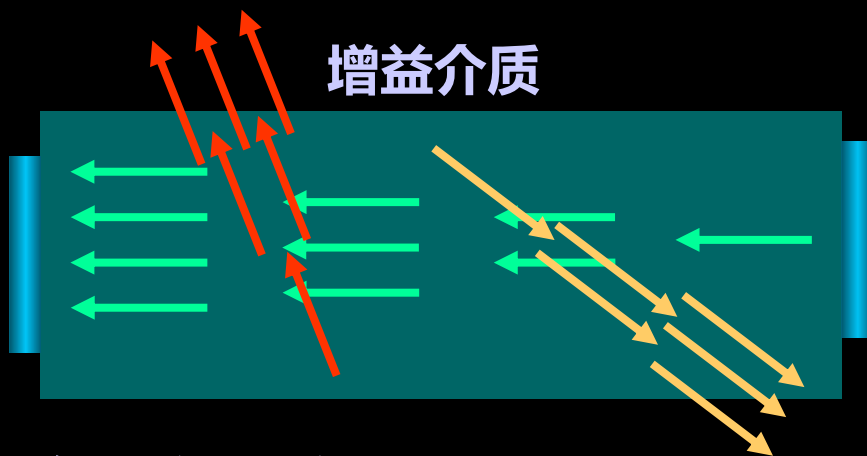
光束在谐振腔内  
来回振荡，在增  
益介质中的传播  
使光得以放大，  
并输出激光。



## 五. 谐振腔的作用

### 1. 限定光的方向

沿轴线的光在增益介质内来回反射，连锁放大，输出形成激光；而其它方向的光很快逸出谐振腔。



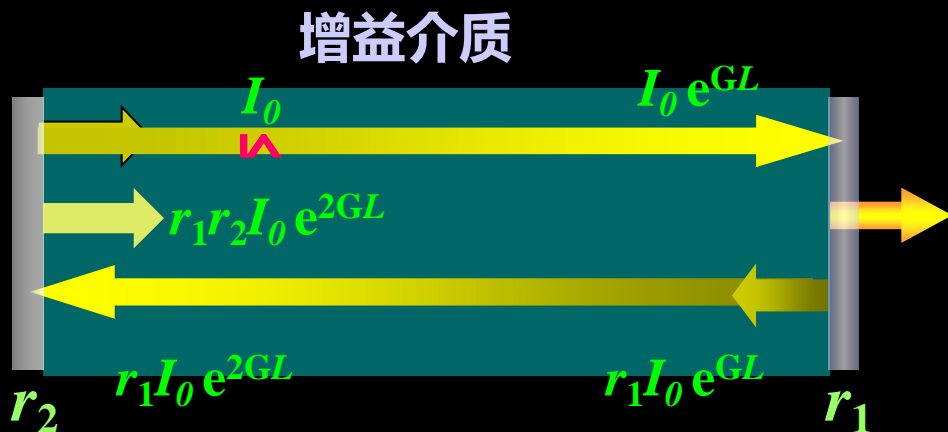
### 2. 选择光振荡的频率（驻波条件）

$$L = k \frac{\lambda_k}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

### 3. 延长增益介质

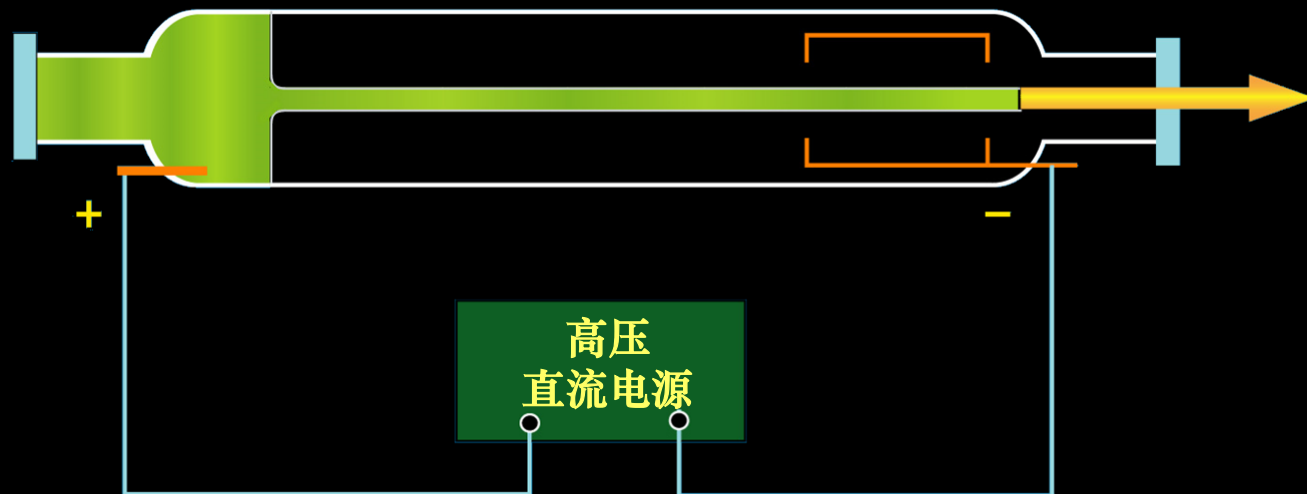
阈值条件

$$r_1 r_2 e^{2GL} \geq 1$$



## 六. 几种常见的激光器

### 1. 氦氖激光器

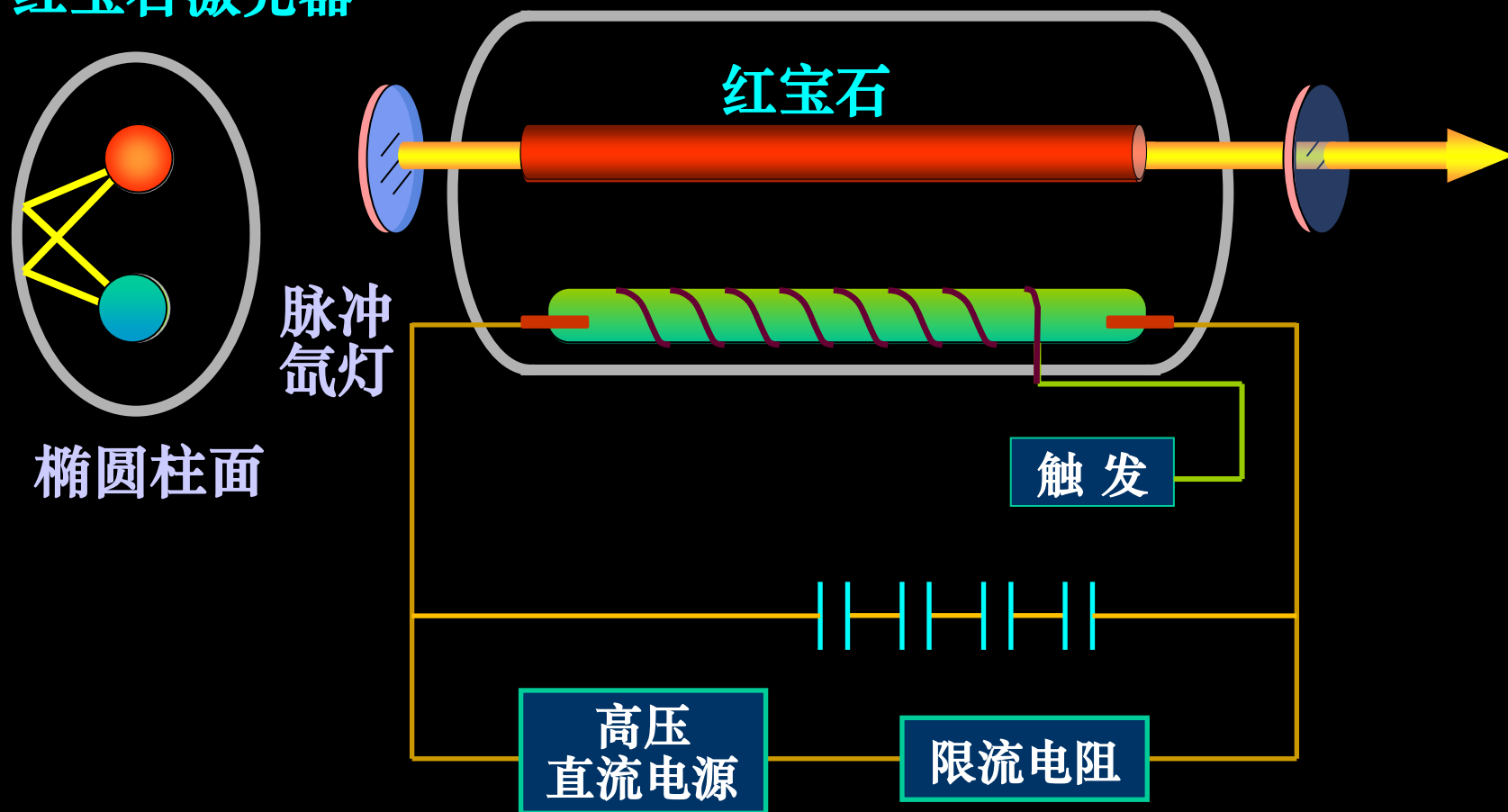


工作物质：氦气

激励方式：直流气体放电

电子经电场加速后，与 He 碰撞。处于激发态的 He 与 Ne 碰撞，把能量传递给 Ne，使它在亚稳态（3S、2S）和激发态（3P、2P）之间形成反转分布。

## 2. 红宝石激光器



激励能源：脉冲氙灯

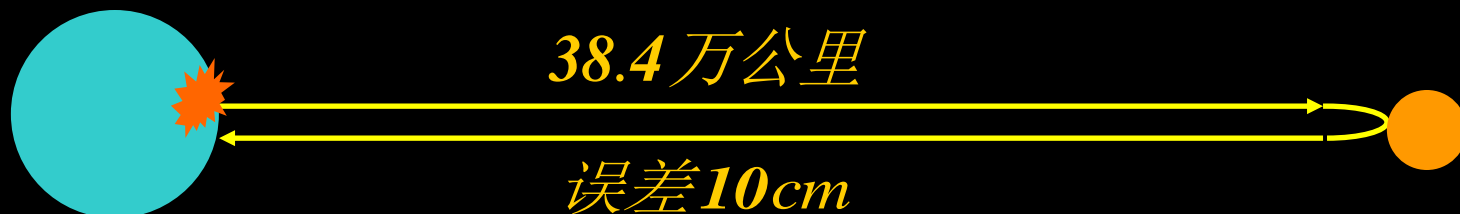
工作物质：红宝石中的 $\text{Cr}^{+3}$

脉冲氙灯发出的光照射红宝石，使得 $\text{Cr}^{+3}$ 在亚稳态和基态之间形成反转分布。

# 七. 激光的特性及应用

## 1. 高定向性

激光发散角极小，可用于定位，准直，导向，测距等。



## 2. 高单色性

氦—氖激光器的单色性为

$$\Delta\lambda < 10^{-17} \text{ m}$$

普通光源中，氪( $\text{Kr}^{86}$ )灯单色性最好

$$\Delta\lambda = 4.7 \times 10^{-13} \text{ m}$$

能量集中在很窄的频率范围，激光的谱线分辨率高，可用于研究原子、分子、晶体等物质的能级和光谱的精细结构，超精细结构等。



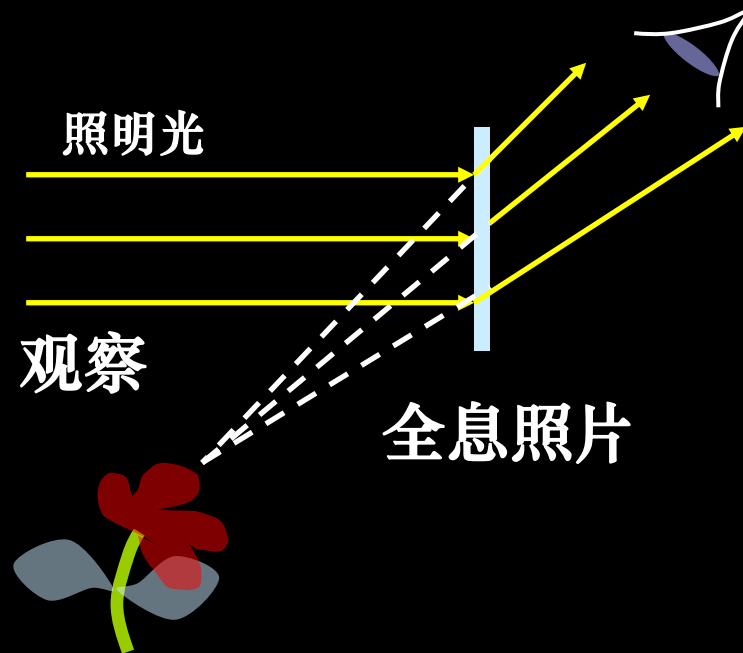
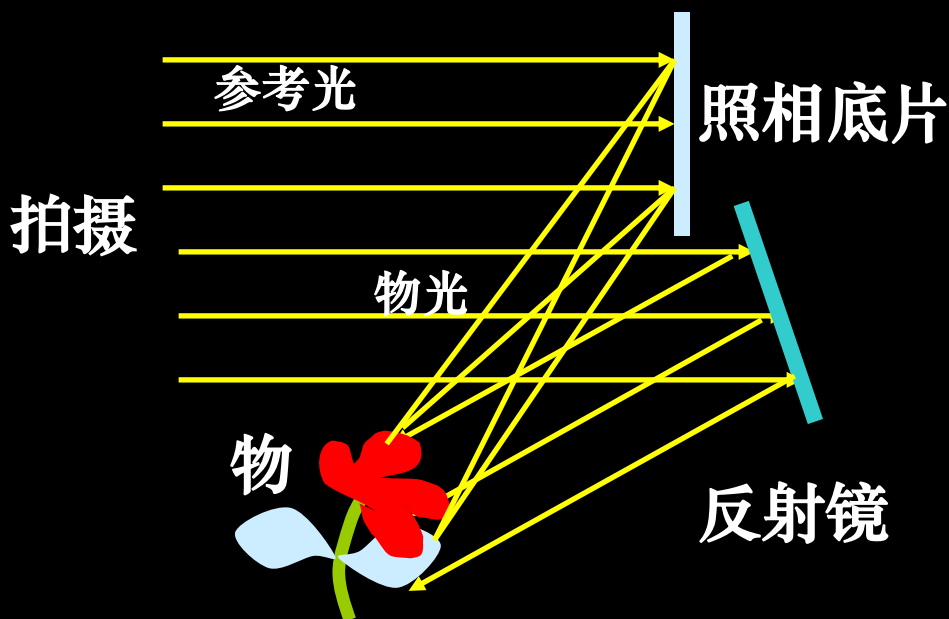
### 3. 高亮度

太阳表面亮度约	$10^3$	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
大功率激光亮度	$10^{10} \sim 10^{17}$	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$

可用于精密加工，医学，核聚变等。

### 4. 高相干性

用于测量长度、干涉以及全息术，X 射线激光可作分子和生物高分子的全息图。



*REVIEW*

内容多

覆盖面宽

机械振动

机械波

波动光学

热力学与气体动理论

量子物理基础

激光、固体能带理论

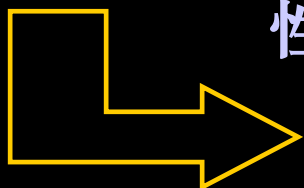
整体相关性

宏观与微观

整体相关性

# 一、基本要求

(1) **抓概念**：平衡态，可逆与不可逆，熵与熵增，波粒二象性，能带，激光工作原理等。



明确定义、表述、条件等。

(2) **抓基本方法**：计算方法、推导证明方法、表述方法等。

- **推导证明**：压强公式，绝热方程，康普顿效应公式，一维无限深势阱下的粒子能量，...

- **表述方法**：热二定律的两种表述，波函数统计解释，惠更斯-菲涅尔原理，普朗克能量子假设，玻尔氢原子描述，物质波的描述，...

(3) **抓结构与联系**：

例如：波动中的波程差，光学中的光程差 → 干涉与衍射。

例如：热力学中的两个基本定律 → 循环与转换。

考试的特点： ☆ 涉及面宽，内容较多。  
☆ 概念题，分析题，计算题等。

---

## 二、基本内容与要求

### 1 热力学基础

#### (1) 第一定律的定义与应用

$$Q = \Delta E + A$$

平衡态，准静态过程

三个等值过程：等  $P.T.V.$ 。  
绝热过程 会定  $\gamma, C_V, C_p$

循环过程



热机，求  $\eta$

致冷

→ 致冷系数

卡诺循环

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

注意：① 判断热机与致冷循环

$$P-V, P-T, V-T, \dots$$

② 确定热容量的正负

$$C = dQ / dT \Rightarrow C_V = \frac{i}{2} R, C_P = R + C_V$$

## (2) 第二定律

两种表述，证明两者的一致性

自然过程的方向性

宏观描述（熵变），微观描述（概率）  
熵增原理的描述

可逆与不可逆

卡诺定理的表述

注意：① 用第二定律证明有关问题

② 热力学第一定律与第二定律的关系

## 2 气体动理论

### (1) 统计方法以及对平衡态中理想气体的规律

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0 \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \overline{v^2}/3$$

(a) 压强公式（会推导，包括统计解释）

(b) 温度公式（会推导，包括统计解释）

} 统计结果

### (2) 麦氏速率分布律

$$f(v) = dN / Nd v$$

其中包括：

① 物理意义：  $f(v)dv, Nf(v)dv, \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv,$

$$\int_0^{\infty} v f(v) dv \dots\dots$$

② 分布曲线的意义和变化

③ 三种典型速率的数值与用途

注意：① 用归一化条件解题

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$$

② 由速率分布律求能量分布律

(3) 能量均分原理

其核心： $\frac{1}{2}kT$

→ 平均平动动能，平均动能，内能

$$3kT/2$$

$$ikT/2$$

$$viRT/2$$



注意：① 内能公式的应用  $\Delta E = \frac{i}{2} \nu RT$

② 内能不同于机械能

③ 能均分原理的条件 —— 平衡态

(4) 玻氏能量分布律  $\Delta N \propto \exp(-\frac{E}{kT}) = \exp(-\frac{E_k + E_p}{kT})$

重力场中的规律  $n = n_0 \exp(-\frac{mgh}{kT}) \quad P = P_0 \exp(-\frac{mgh}{kT})$

(5) 碰撞规律

① 平均碰撞的规律

② 平均自由程  $\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$

### 3 机械振动

- 分析振动系统——简谐振动  $\left\{ \begin{array}{l} f = -kx \\ a = -\omega^2 x \\ E = E_k + E_p = C \end{array} \right.$

- 建立动力学方程

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad \longrightarrow \quad \omega$$

- 求解运动学方程  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$

$\omega, T, \nu$  三者的关系

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) = A \cos(2\pi \nu t + \varphi)$$

- 确定运动学方程中的三个重要参量

振动曲线分析法 (两个以上简谐振动的相位关系的分析)

旋转矢量法 —— 确定初相位较为方便

初始条件法 
$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} \quad \tan \varphi = -\frac{v_0}{x_0 \omega}$$

- 简谐振动的合成

同方向、同频率谐振动的合成  $\longrightarrow$  谐振动  $A, \varphi$

同方向、不同频率谐振动的合成  $\longrightarrow$  拍  $\nu = |\nu_1 - \nu_2|$

不同方向、同频率谐振动的合成  $\longrightarrow$  谐振动、椭圆振动等

## 4 机械波

### ▲ 建立波函数 (振动方程, 波动曲线, 初始条件, 振动曲线)

$$y = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right]$$
 与坐标的关系 (超前与落后)

$\longrightarrow$  波动方程

## ▲ 波的干涉（相干条件，叠加原理）

### ① 一般干涉条件

$$\Delta\phi = 2k\pi, (2k+1)\pi \quad \Delta r = k\lambda, (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

→ 波程差与相位差的关系

### ② 驻波（现象，波腹和波节的位置，相位特征，能量分布）

### ③ 半波损失（含义，图示，公式表示）

### ④ 惠更斯原理（会作图）

## ▲ 波的能量（特征， $E_P$ , $E_k$ 的关系，与总能量守恒的关系）

### ① 平均能流密度 ② 强度关系

## ▲ 多普勒效应

★分清楚波源与观测者→应用：“拍频”

注意：① 振动能量与波动能量的区别

② 波速与振动速度的区别

③ 振动与波动不可分 ④ 反射波函数的确定，波的叠加

## 5 波动光学

▲ 电磁波（性质，能量关系，电场与磁场的关系）

▲ 干涉（核心是光程差）

① 双缝干涉（包括干涉公式，特征等）

★ 双缝干涉的拓展——洛埃镜的应用

★ 确定明纹和暗纹间距

★ 条纹的移动（移动狭缝，加介质，斜入射等）

★ 分辨本领（复色光或白光照射）

② 等倾干涉在垂直入射时，增反与增透膜的条件

③ 等厚干涉（劈尖，牛顿环）

涉及条纹移动，测量微小厚度，工件检测应用问题

④ 迈克尔孙干涉仪的工作原理及其应用，测  $n, d$

注意：半波损失的分析（尤其是劈尖的棱边情况）

## ▲ 衍射

(1) 惠—菲原理的表述和作用以及物理意义

(2) 单缝夫琅禾费衍射（半波带法），求

$$a, \lambda, f, \Delta\theta, \Delta d$$

(3) 瑞利判据表述和分辨本领公式应用

(4) 光栅公式（包括光栅衍射的特征）

注意：斜入射，缺级条件，最大级次等变化条件

注意：① 光栅衍射中主极大，次级大，暗纹之间的关系

② 光栅衍射现象的描述，光栅的暗纹公式和分析方法

③ 明纹宽度——两个暗纹（相邻）的间距

## ▲ 偏振（与电磁波的偏振性统一）

(1) 自然光，偏振光，部分偏振光的表述和起偏检偏方法

(2) 马吕斯定理和布儒斯特定律

(3) 双折射现象（主要是定性的）

① 寻常光与非常光的规律（主平面，偏振化方向）

② 惠更斯作图法（正负晶体，光轴取向）

(4) 偏振光的干涉

① 如何形成偏振光的干涉（相干条件）

② 基本概念（色偏振、波片、光弹效应等）

③ 描述圆偏振、椭圆偏振、线偏振等现象和形成过程

## 6 量子物理

▲ 黑体辐射、光电效应、康普顿散射、氢原子光谱

▲ 能量子假说、光量子假说

▲ 光的波-粒二象性和微观粒子的波-粒二象性

$$p = m\nu = \frac{h}{\lambda} \quad E = mc^2 = h\nu$$

▲ 物质波的统计解释和不确定关系

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

▲ 物质波波函数和薛定谔方程

概率密度——单值、有限、连续，归一化

▲ 一维无限深势阱；谐振子模型和氢原子模型

▲ 自旋和四个量子数，原子的壳层分布



*Good Luck!*