



# 激光物理

## LASER PHYSICS

光电科学与工程学院 王智勇



# 课程简介


## 考核方式

笔试（开卷）

## 成绩构成

考勤5%+作业20%+课程论文25%+期末考试50%

## 学习目的

- 掌握场与物质相互作用的半经典理论与方法；
  - 掌握场与物质相互作用的全量子理论与方法；
  - 熟悉场与物质相互作用时的若干特殊物理现象；
  - 熟悉光孤子的形成机制，了解光孤子通信的基本原理；
  - 为将来进一步的专业学习与科研打下数理基础。
- 

# 教材及主要参考书目

(如果有新版本就用最新版本)

- 教材:

- 卢亚雄, 余学才, 张晓霞, 激光物理, 北京邮电大学出版社, 2005年。

- 参考书:

- 1、王雨三, 张中华, 激光物理基础, 哈尔滨工业大学出版社, 2004年。
- 2、钱梅珍, 崔一平, 杨正名, 激光物理 (第二版), 电子工业出版社, 2005年。
- 3、周炳琨等, 激光原理 (第七版), 国防工业出版社, 2014年 (此为电子科大本科生教材)。

## 课程特点与意义

◆有一定的理论深度和难度，但这是从本科生到研究生和博士生阶段必经的专业基础提升之路，为将来做学位论文和从事科研工作打下通用的专业基础，看文献资料时更快速有效，不吃力。

◆考虑工科背景的学生特点，在本课程教学中，将穿插复习和补充学习一些电动力学与量子力学知识（尤其是本科阶段没有学过的那部分），一来有利于更好地掌握本门课，二来有利于进一步提升专业基础。





## 课程特点与意义



◆从**研究**生阶段开始，主要进入“自学（看文献）+研究”的模式，需要系统地把过去所学的全部知识相互串联起来，进行整合和综合运用，并在此基础上进一步自学和研究。所有这些，都需要具备良好的数理基础。

◆只有运用过去全部所学解决实际工程问题、进行研究和创新，才能检验过去所学，活学活用，让所学知识的价值和目的得到体现，同时让所学知识得到进一步的巩固与提升，让专业素质获得一个实质性的飞跃。

◆对于偏工程应用和实验研究的学生，具备足够的专业基础同样是必须的。打算用实验设备研究什么、如何设计实验、如何分析实验结果，所有这些都需要专业基础做后盾。**发表****论文**不等同于写实验报告，需要有理论分析和理论升华。




- 
- 
- 虽然这门课比较抽象，有一定的深度和难度，但只要认真上课，整个学下来其实并不难。
  - 本科阶段主要培养技能型的工程人才（做好现成的产品）；而从研究生阶段开始，是培养具有科研创新能力的人才（基于新原理、新技术、新材料开发新产品）。能走多远、进入多深、达到多高，取决于数理基础的掌握程度。
  - 对于理工科学生而言，专业基础课如同武侠小说中所说的内功，而应用类课程如同招式。有了深厚的内功，学招式又快又好。专业基础课主要靠课堂上学习，而应用类知识，可以凭借数理基础进行自学。
  - 总之，同学们选择这门课，有利于打下必备的数理基础，既有利于学习其他课程，提高专业水平，又有利于将来做毕业课题，能更顺利地阅读文献和出论文。



●电子科技大学，专注于光电科技，其实现原理离不开电磁场与物质之间的相互作用。而激光物理的本质，即是电磁场与物质之间的相互作用理论。

●事实上，人类的全部科技文明，除了核科技和航空航天科技等需要涉及强相互作用、弱相互作用和万有引力相互作用，其他的占人类科技文明**95%**以上的科技，都是基于电磁相互作用的。电磁场与物质（介质）相互作用的半经典与量子理论，是许多学科专业的通用理论基础，包括电子学和光学，现代纳米科技等。



当前的国际形势告诉我们，基础研究与创新，核心技术的原创，是一个国家不受制于人的关键所在。为此我们更需要加强专业基础课程的学习。不能急功近利，要做长远打算。

## 强基计划

热门专业常变，而数理基础不变。以不变应万变





# 第一讲 激光物理基础回顾

**LASER**--- Light Amplification for Stimulated Emission of Radiation

- 1917年A. Einstein提出自发辐射、受激辐射和受激吸收概念
- 1954年, Townes, Basov, Prokhorov提出利用受激辐射放大电磁波: MASER (M: microwave),  $\text{NH}_3$ 分子微波量子放大器研制成功
- 1958年Townes、Schawlow提出把MASER原理用到光频波段, 并在理论上做了计算和证明; 开放式谐振腔(借用FP); 同时, Prokhorov也提出光频波段MASER; Bloembergen提出光泵浦三能级原子系统实现原子数反转
- 1960年Maiman发明第一台激光器红宝石激光694.3nm  
(本页是本科生的基础内容, 学生自己参考)

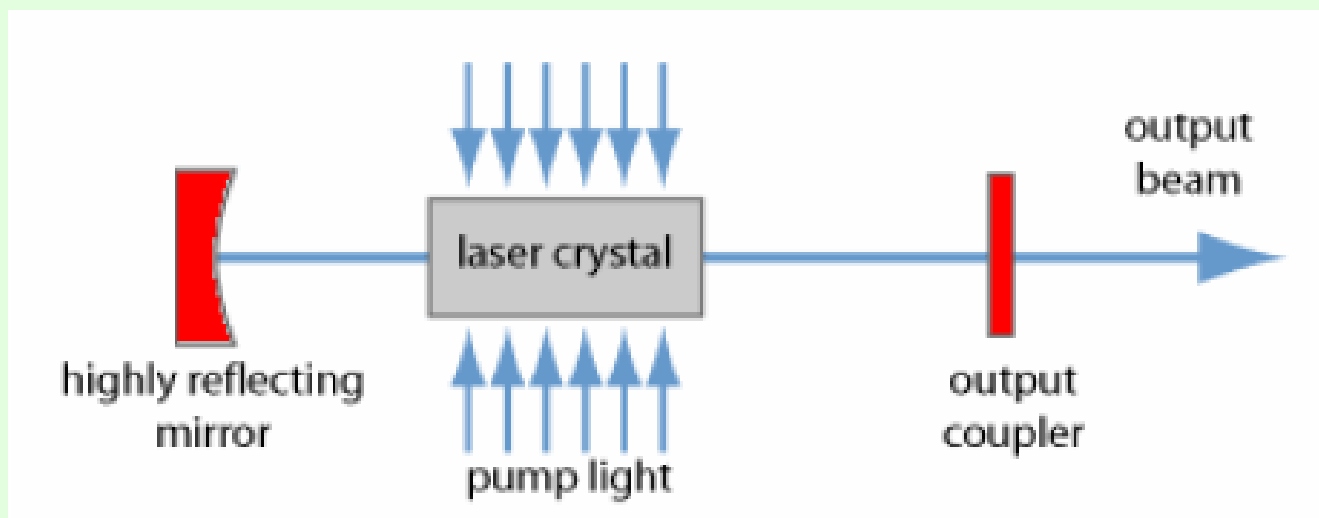
## 1.1 激光器简介

激光器三个主要部分：

**泵浦源**—— 为介质提供能量，形成粒子数反转，最后转化成激光能量

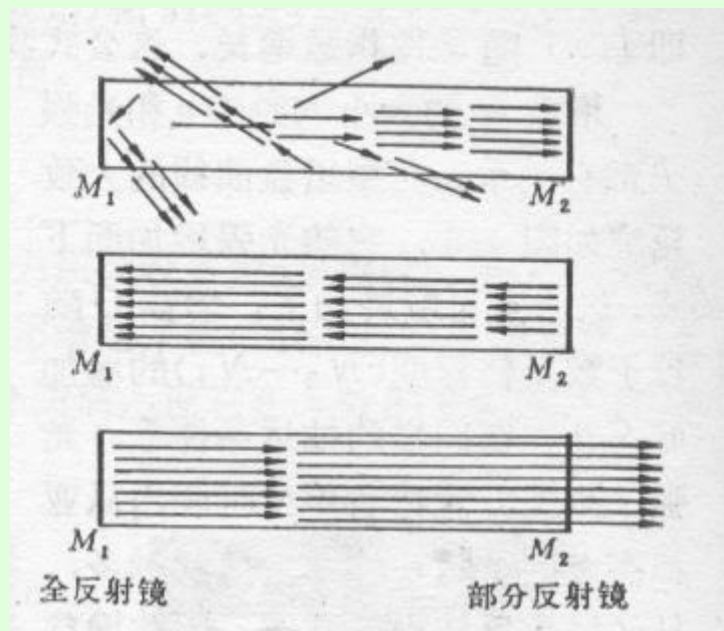
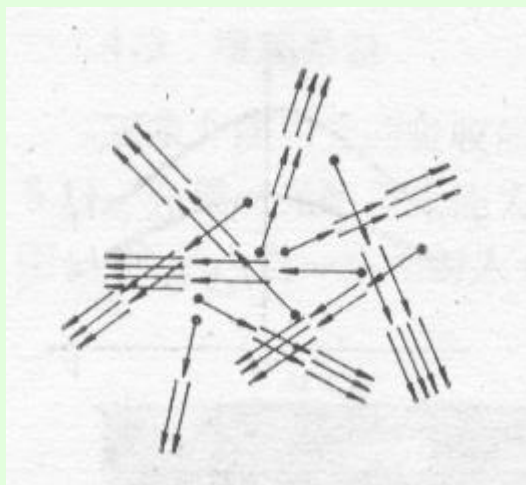
**增益介质**—— 粒子数反转后的激光工作物质，提供受激放大

**谐振腔**—— 选模和限制波形、提供反馈和增益、提供稳定振荡



## 谐振腔

**构成：**两个腔镜，一个全反射，提供最大反馈；一个部分反射，提供部分反馈和输出。



无谐振腔时受激放大

有谐振腔时受激放大

## 激光器的分类：

1、根据工作介质来分类(用来产生激光的物质)

气体激光器：He-Ne, Ar+, CO, CO<sub>2</sub>, XeF, KrCl

固体激光器：Ruby, YAG, YLF, Ti: Sapphire

染料激光器：DCM, R6G

半导体激光：GaN, GaAs

自由电子激光：电子在周期静磁场中通过时产生的相干辐射

2、根据激光特性来分类(产生的激光束特点)

连续

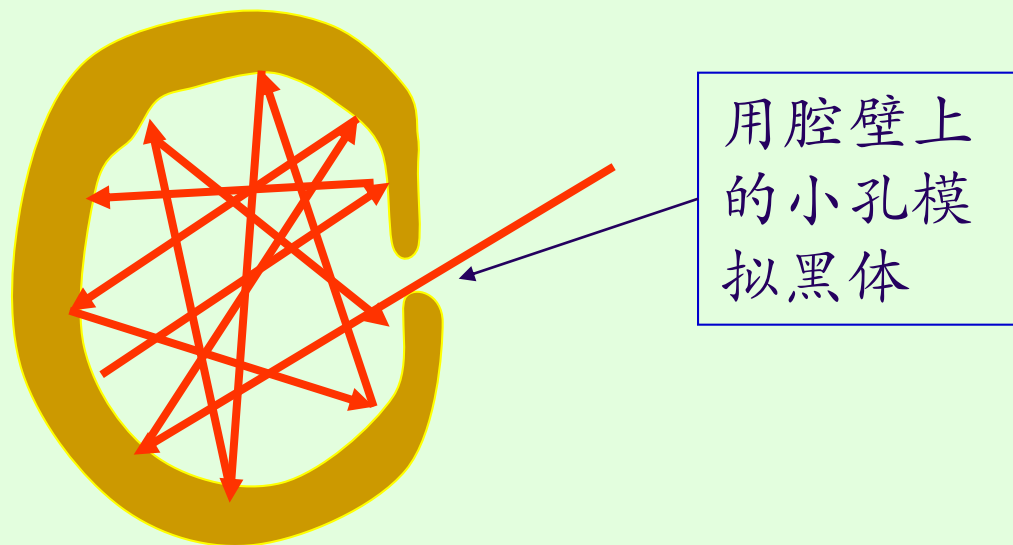
脉冲（调Q、锁模）

不同激光器适用于不同场合

BTW，我们学校的老校长刘盛纲院士原来就研究过自由电子激光。它是利用自由电子为工作媒质产生的强相干辐射，它的产生机理不同于原子内束缚电子的受激辐射。

## 1.2 黑体辐射的Planck公式

- 处于任何温度下的物体，都能吸收或辐射电磁波；这种与温度有关的辐射称为**热辐射**
- **黑体**：一种理想化物体，能够完全吸收任何波长的电磁辐射（实际物体吸收率总是小于1）



黑体辐射用单色功率密度 $\rho_\nu$ 描述，它是黑体温度 $T$ 和辐射场频率 $\nu$ 的函数，其定义为：

在单位体积内，在单位频率间隔 $\nu-\nu+d\nu$ 中的电磁辐射功率。

也即为：单位时间内所辐射的、单位频率间隔中的能量密度。

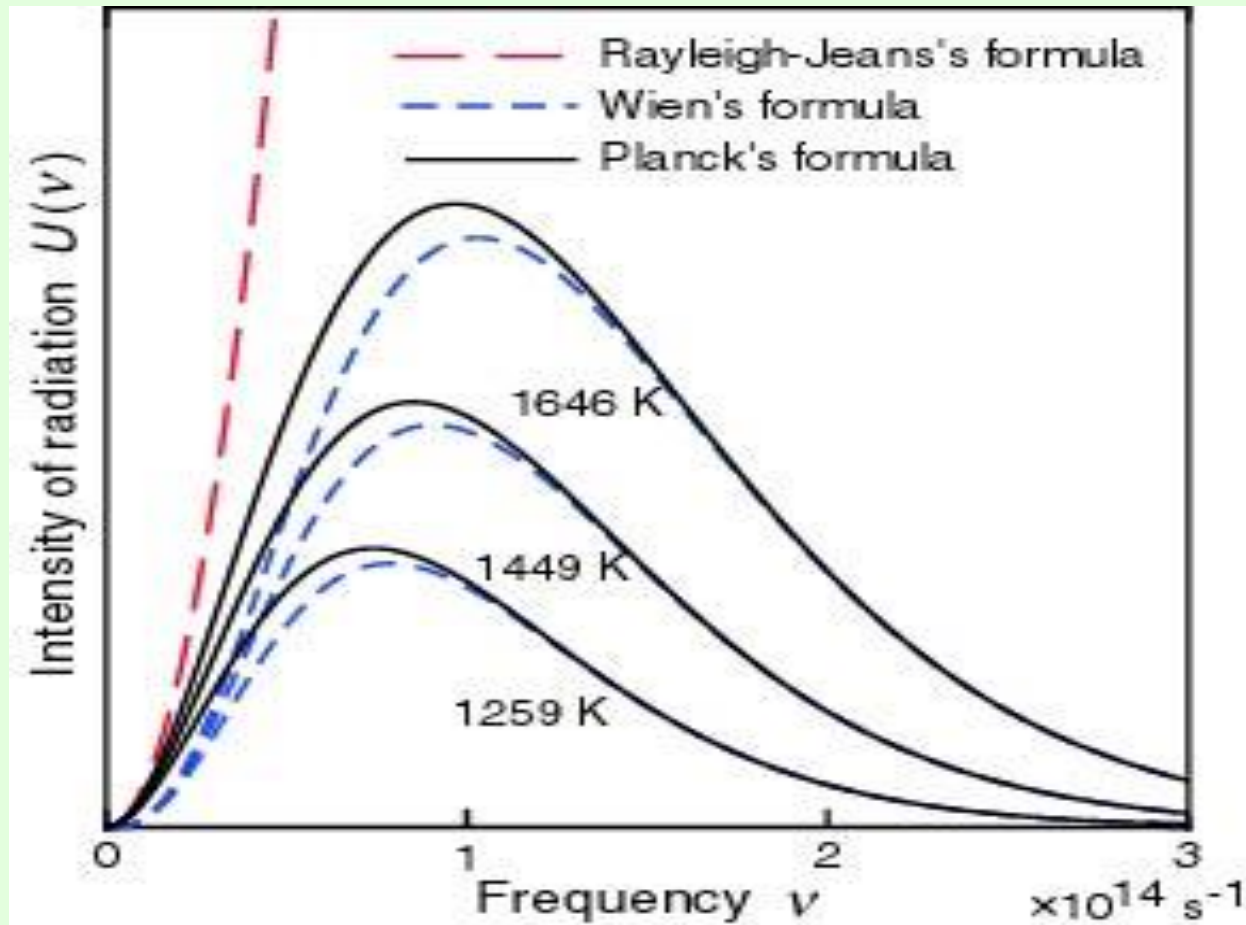
单色功率密度 $\rho_\nu$ 由普朗克 (Planck) 公式给出

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

真空中的光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

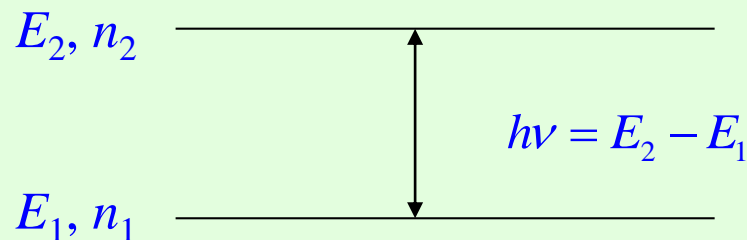
Planck常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

玻尔兹曼常数 $k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$



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

## 1.3 自发辐射、受激辐射与受激吸收

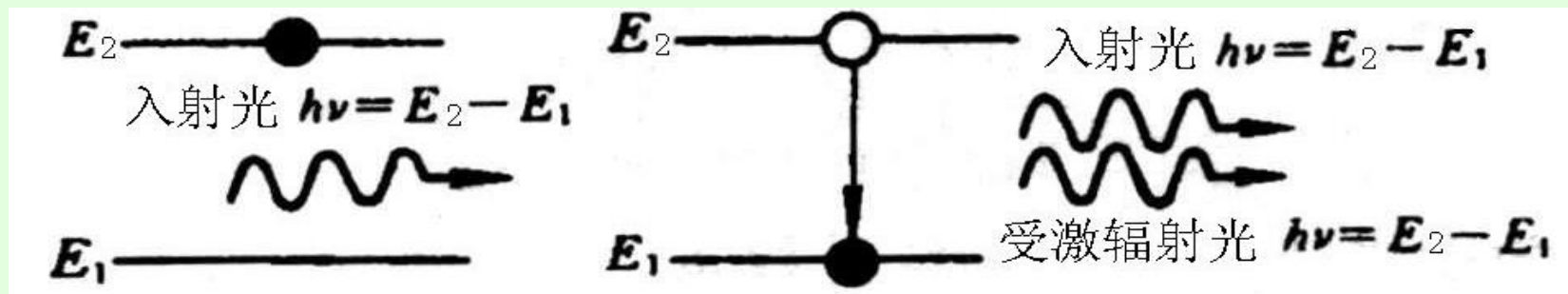


二能级原子图

- 物质吸收或发射光子，实质上是辐射场和物质原子相互作用的结果
- 爱因斯坦从量子论观点出发提出：该相互作用应包含原子的自发辐射、受激辐射和受激吸收等三种跃迁过程
- 两个能级  $E_2$  和  $E_1$  满足  $E_2 - E_1 = h\nu$ 。单位体积内处于两个能级的原子数分别用  $n_2$  和  $n_1$  表示。

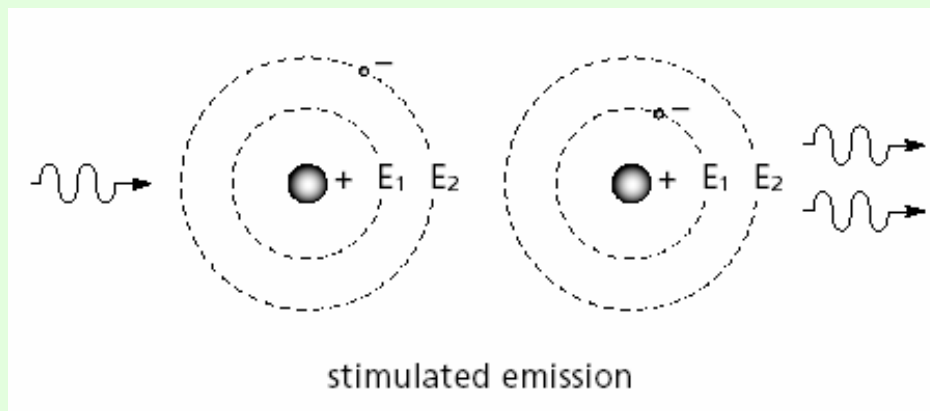


## 受激辐射



处于上能级的原子，在频率  $\nu = (E_2 - E_1)/h$  的辐射场作用下，跃迁至下能级并辐射出一个与入射光子状态完全相同的光子（频率、相位、传播方向和极化状态均相同）。这个过程称为受激辐射。

受激辐射发出的光波称为受激辐射。

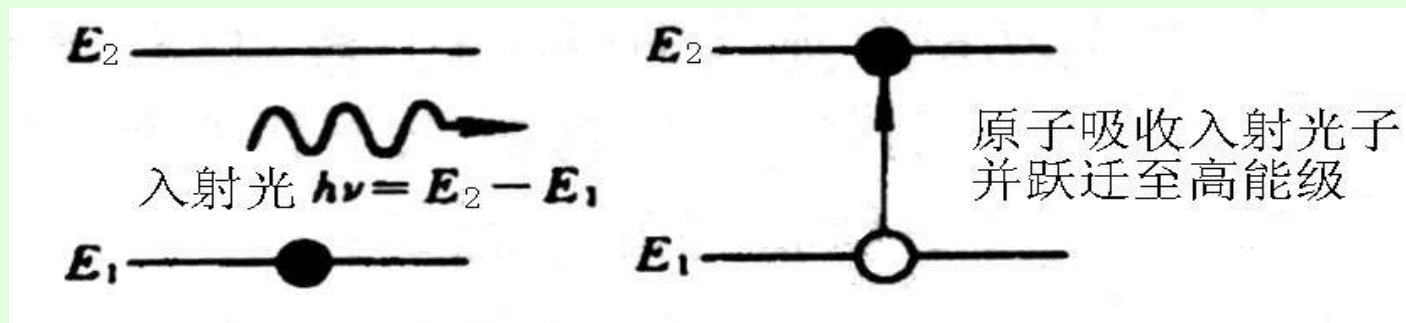


（单个原子）受激辐射的跃迁几率为

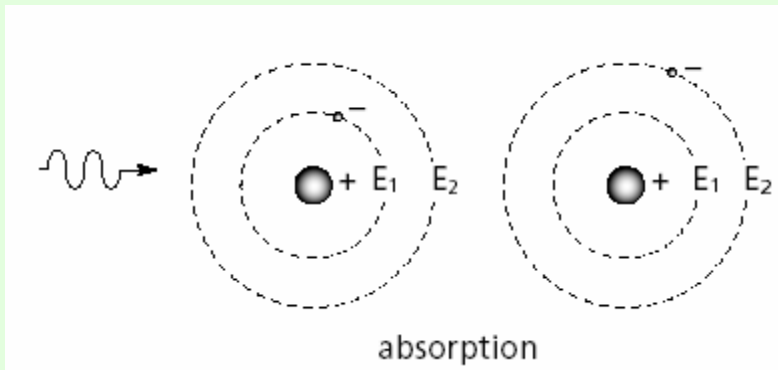
$$W_{21} = -\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{st}} \frac{1}{n_2} \triangleq B_{21}\rho_\nu$$

其中 $B_{21}$ 为受激辐射的爱因斯坦系数，它只与原子的性质有关。 $\rho_\nu$ 是前面讲到过的黑体单色功率密度（下同）。单位体积中处于上能级原子数 $n_2$ 的减少速率与 $n_2$ 成正比。上述定义加负号是为了让结果为正，除以 $n_2$ 使得定义与初始粒子数无关。

## 受激吸收



处于下能级的一个原子，在频率为  $\nu$  的辐射场作用下吸收一个能量为  $h\nu$  的光子，并跃迁至高能级，这种过程称为受激吸收。



处于低能级轨道上的电子，吸收光子能量跃迁到高能级轨道上。电子轨道是量子力学产生之初的过渡性概念，应代之以电子云。

## 受激吸收跃迁几率为

$$W_{12} = -\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{\text{st}} \frac{1}{n_1} \triangleq B_{12}\rho_\nu$$


式中 $B_{12}$ 为受激吸收的爱因斯坦系数，只与原子性质有关。此时是单位体积中处于下能级原子数 $n_1$ 的在减少。

**思考：**为何原子在两个能级之间的受激跃迁几率，与介质中电磁场(光子)的单色功率密度成正比？



**问题：**为何原子在两个能级之间的受激跃迁几率，与介质中电磁场(光子)的单色功率密度成正比？

**回答：**原子在两个能级之间的受激跃迁（受激吸收和受激辐射），是由原子与光子之间的相互作用引起的。因此在介质中，单位体积内的光子数越多，引发原子发生能级跃迁的可能性就越大，而单位体积内的光子数与光子辐射的单色功率密度成正比。因此原子在两个能级之间的受激跃迁几率，与介质中光子的单色功率密度成正比，其比例系数是受激辐射或受激吸收的爱因斯坦系数。爱因斯坦的这一假设在理论上是合理的，在实践上也经得住实验检验。



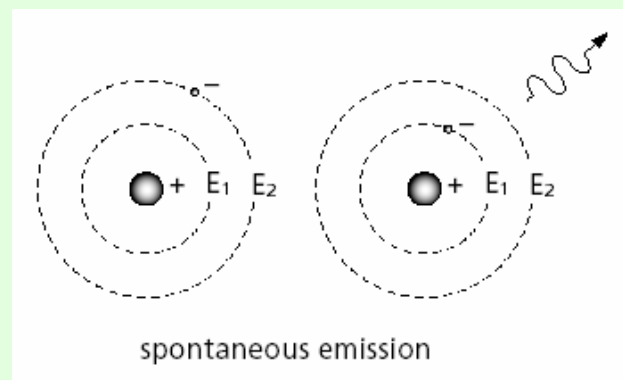
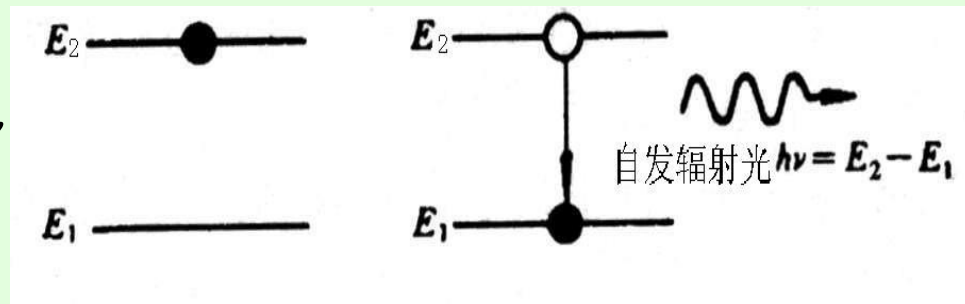
# 自发辐射

处于上能级的原子自发地向下能级跃迁，并发射能量为  $h\nu$  的光子，这种过程称为自发辐射，其跃迁几率为

$$A_{21} = -\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{sp}} \frac{1}{n_2}$$

产生自发跃迁的物理原因，将用激光物理的全量子理论进行解释（真空涨落）。

**思考：**为何不照样地把它写成与单色功率密度成正比的样子，并且把比例系数定义为自发辐射的爱因斯坦系数？



由于自发跃迁的存在，单位体积内处于上能级的原子数随时间的变化率为：

$$A_{21} = -\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{sp}} \frac{1}{n_2} \longrightarrow \frac{dn_2}{dt} = -A_{21}n_2 \longrightarrow$$

$$n_2(t) = n_{20} \exp(-A_{21}t) \triangleq n_{20} \exp(-t/\tau)$$

$$A_{21} = 1/\tau$$

式中 $\tau$ 是原子处在上能级的平均寿命。把 $A_{21}$ 直接称为自发辐射的爱因斯坦系数，它只与原子本身性质有关。

注：一般地，衰减到某物理量初始值的 $\exp(-1)$ 倍所花的时间，被定义为与该物理量相关的寿命。

## 受激辐射的相干性

◆ 自发辐射：单个原子的自发辐射其位相是随机的，所以大量原子的自发辐射场是**不相干**的。

◆ 受激辐射：受激辐射场与入射场具有**相同的频率、相位、传播方向和偏振状态**，因此，受激辐射场与入射场属于同一模式。大量粒子在同一入射场激励下，产生的受激辐射处于同一光场模式，使得受激辐射是**相干**的。

**Note:** 由量子力学知，处于同一个量子力学状态的粒子，会产生相干的量子力学效应。处于同一个光场模式的所有光子，它们的量子力学状态完全相同，从而具有相干性。



## 爱因斯坦关系式

黑体辐射的普朗克公式  $\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$  (1)

在热平衡状态，腔内物质原子数按能级分布应服从玻耳兹曼分布

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{f_2}{f_1} \exp[-(E_2 - E_1)/kT] \quad (2)$$

$f_1$ 、 $f_2$ 能级 $E_2$ 、 $E_1$ 的简并度(处于同一能级上的微观状态数量)。在热平衡状态下，辐射与吸收平衡，于是可利用定义推导如下：

$$\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{st}} = -n_2 B_{21} \rho_\nu, \quad \left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{\text{st}} = -n_1 B_{12} \rho_\nu, \quad \frac{dn_2}{dt} = -A_{21} n_2$$
$$\left(\frac{\partial n_2}{\partial t}\right)_{\text{sp}} + \left(\frac{\partial n_2}{\partial t}\right)_{\text{st}} = \left(\frac{\partial n_1}{\partial t}\right)_{\text{st}} \Rightarrow n_2 A_{21} + n_2 B_{21} \rho_\nu = n_1 B_{12} \rho_\nu \quad (3)$$

联立上面三式，并利用  $E_2 - E_1 = h\nu$ ，可得

$$\frac{c^3}{8\pi h\nu^3} [\exp(h\nu/kT) - 1] = \frac{B_{21}}{A_{21}} \left[ \frac{B_{12}f_1}{B_{21}f_2} \exp(h\nu/kT) - 1 \right]$$

上式对所有温度  $T > 0$  都应成立，考虑  $T \rightarrow \infty$  时的极限，由上式可得 爱因斯坦关系式

$$\frac{B_{21}}{B_{12}} = \frac{f_1}{f_2}, \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (4)$$

当上下能级简并度相等时，有  $B_{12} = B_{21}$

## 1.4 激光产生的条件

● 受激辐射 → 光子数增加


● 受激吸收 → 光子数减少

● 热平衡条件下,  $\text{let } f_1 = f_2 \Rightarrow B_{21} = B_{12}$

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp[-(E_2 - E_1)/kT] = \exp(-h\nu/kT) < 1$$

$$\left| \left( \frac{dn_2}{dt} \right)_{\text{st}} \right| = n_2 B_{21} \rho_\nu < \left| \left( \frac{dn_1}{dt} \right)_{\text{st}} \right| = n_1 B_{12} \rho_\nu$$

受激吸收 > 受激辐射, 故光强减弱 (同一时间间隔内, 介质吸收的光子超过介质发射的光子)。此时不能实现光放大。




如果通过泵浦使 $n_2 > n_1$ （这种状态称为粒子数反转），此时受激吸收 $<$ 受激辐射，光强就会得到放大。

此即激光放大器的基本原理

- 由此可见，形成粒子数反转，是产生激光或激光放大的必要条件。
- 为了形成粒子数反转，必须要对发光物质输入能量，我们称这一过程为激励、抽运或者是泵浦。

**课外思考：**当介质处于粒子数反转时，温度如何？，如何理解？

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}\right] > 1, E_2 > E_1 \Rightarrow T < 0?$$


## 1.5 谱线加宽

实际的辐射并不是单色的，而是分布在谱线的中心频率  $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$  附近的某一个频率范围内，这种现象叫做谱线加宽。

$$\nu = \nu_0 = (E_2 - E_1)/h \rightarrow \nu \in [\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}, \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2}]$$

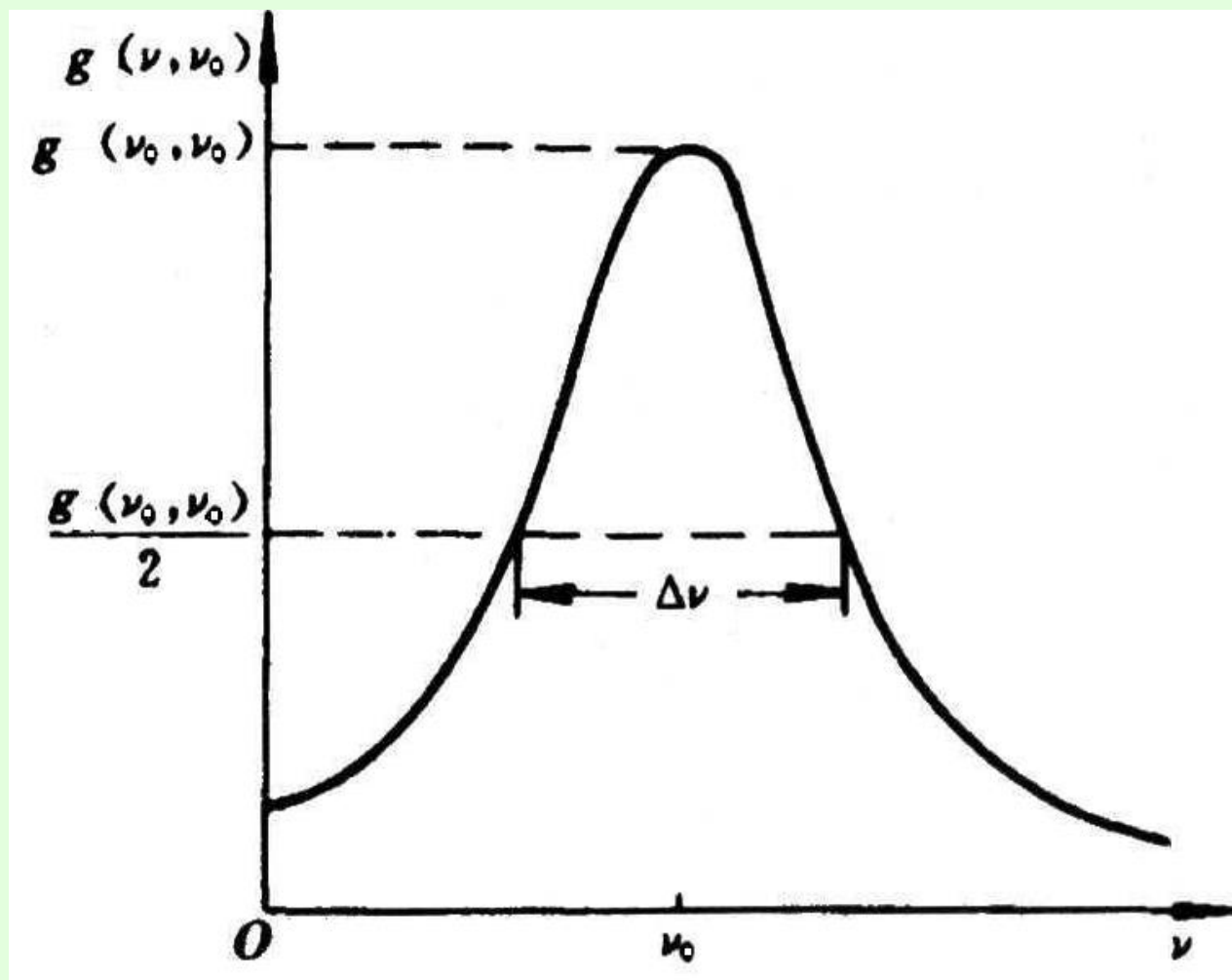
利用单色功率密度  $\rho_\nu$ ，定义谱线的线型函数如下

$$g(\nu, \nu_0) = \frac{\rho_\nu}{\int_{-\infty}^{+\infty} \rho_\nu d\nu} \quad \longrightarrow \quad \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu, \nu_0) d\nu = 1$$

{  $\rho_\nu$  为单位频率间隔内的辐射功率密度 }。线型函数在  $\nu = \nu_0$  时有最大值，假定它在  $\nu = \nu_0 \pm \Delta\nu/2$  下降至最大值的一半，即

$$g\left(\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu}{2}, \nu_0\right) = \frac{g(\nu_0, \nu_0)}{2}$$

按上面的定义  $\Delta\nu$  称为谱线宽度。



$$g(\nu_0 \pm \Delta\nu/2, \nu_0) = g(\nu_0, \nu_0)/2 \quad \Delta\nu \text{ 称为谱线宽度}$$

## 量子解释

- 根据量子力学，原子的能级大小不能简单地用一个确定的数值来表示，而是在一定的范围内分布。数值分布的区间长度称为能级自然宽度。
- 根据量子力学，时间和能量是不能同时确定的：

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

对原子能级来说，时间的不确定度 $\Delta t$ 相当于原子的平均寿命 $\tau$ ，也即原子在该能级的平均停留时间，由此得能级宽度(对应能量的不确定度 $\Delta E$ )

$$\text{let } \Delta E \Delta t = \hbar/2\pi, \Delta t = \tau \Rightarrow \Delta E = \hbar \Delta \nu = \hbar/2\pi \tau$$



● 由于能级有宽度，所以原有频率 $\nu$ 应理解为中心频率 $\nu_0$ ，而频率宽度 $\Delta\nu$ 的大小由能级宽度决定。

● 上能级宽度为 $\Delta E_2$ 的原子，跃迁到宽度为 $\Delta E_1$ 的下能级时，围绕中心频率 $\nu_0$ 的谱线宽度为（辐射电磁波的频率带宽）

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{h} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right)$$

$$\nu \in \left[ \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}, \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2} \right]$$

上下能级的寿命

$$\Delta E = h\Delta\nu = h/2\pi\tau$$

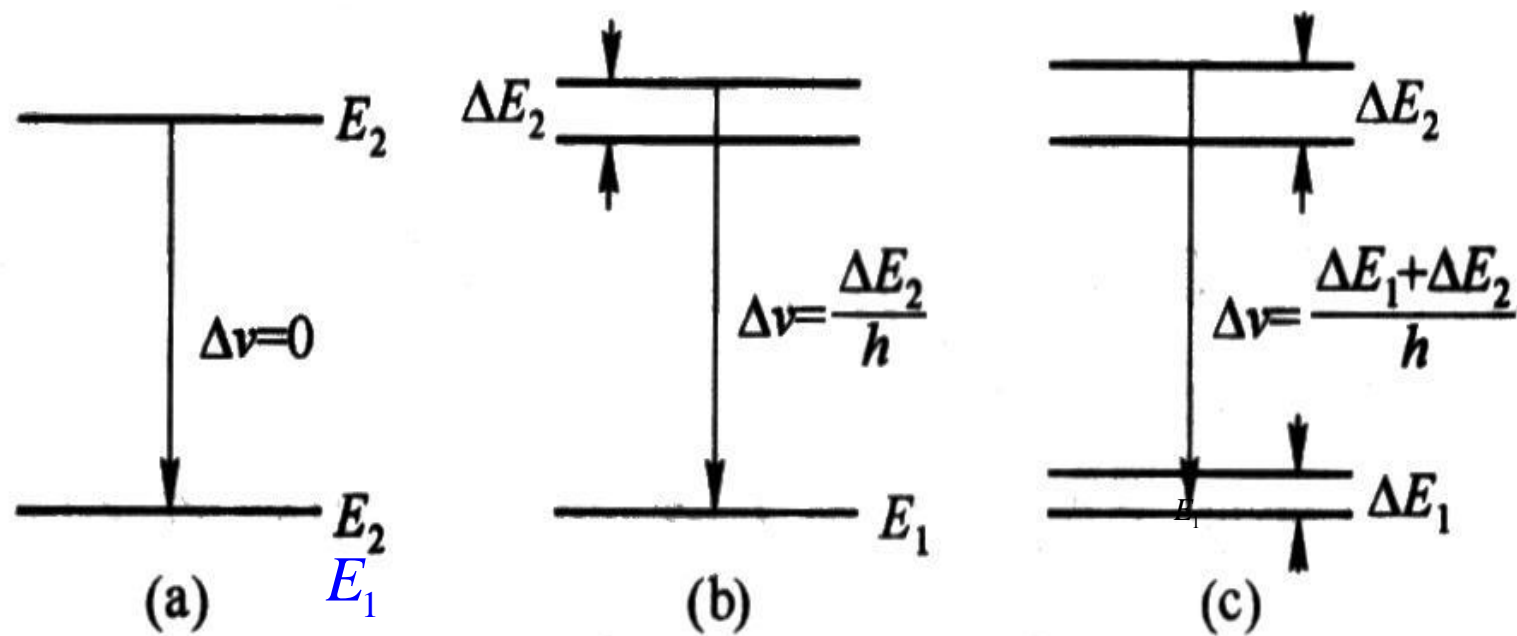
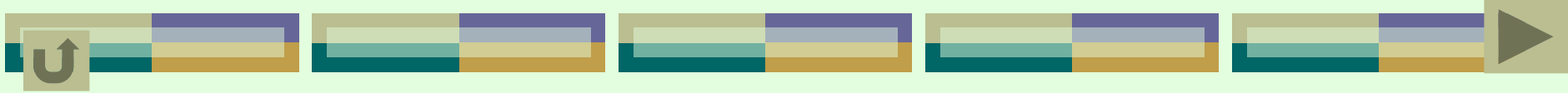


图 三种不同情况下辐射跃迁谱线的宽度



**均匀加宽：**引起的加宽的物理机制和谱线加宽结果对每个原子都是相同的。例如：自发辐射引起的自然加宽、碰撞加宽及晶格振动加宽。

**非均匀加宽：**同类原子的加宽机制和线型函数是相同的，不同类原子的谱线加宽中心频率是不同的。例如多普勒加宽、晶格缺陷加宽均属非均匀加宽。





实际上往往同时两种加宽因素，即综合加宽。

当均匀加宽的线宽比非均匀加宽的线宽大得多时，可近似认为是均匀加宽，反之认为是非均匀加宽。（即哪种加宽的贡献占主导，就近似认为是哪种加宽）

