

激光原理与技术

第一章 激光的发现

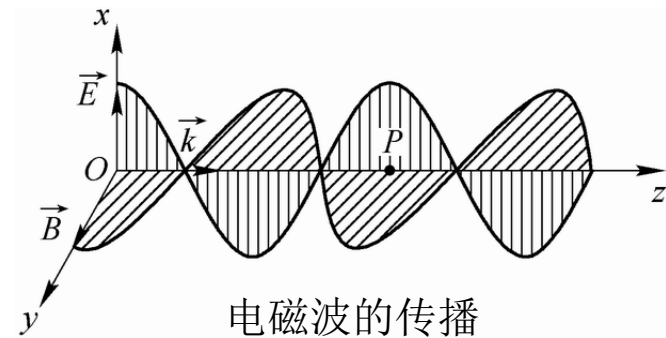
丁铭

仪器科学与光电工程学院

1.1 辐射理论发展概况

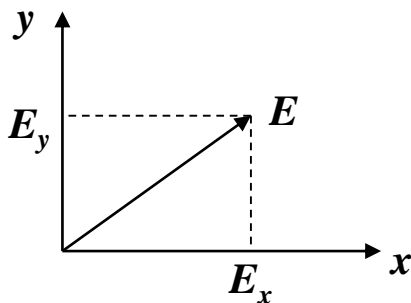
□光波

光波是一种电磁波，是 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 的振动和传播，如右图所示。

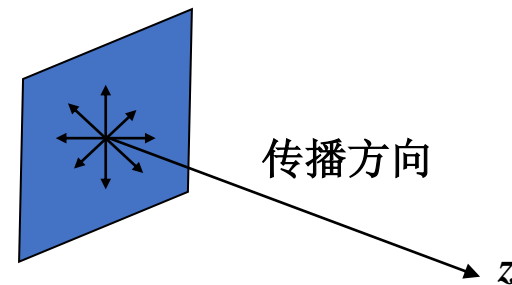


(1) 线偏振光

(1) 线偏振光



(2) 自然光

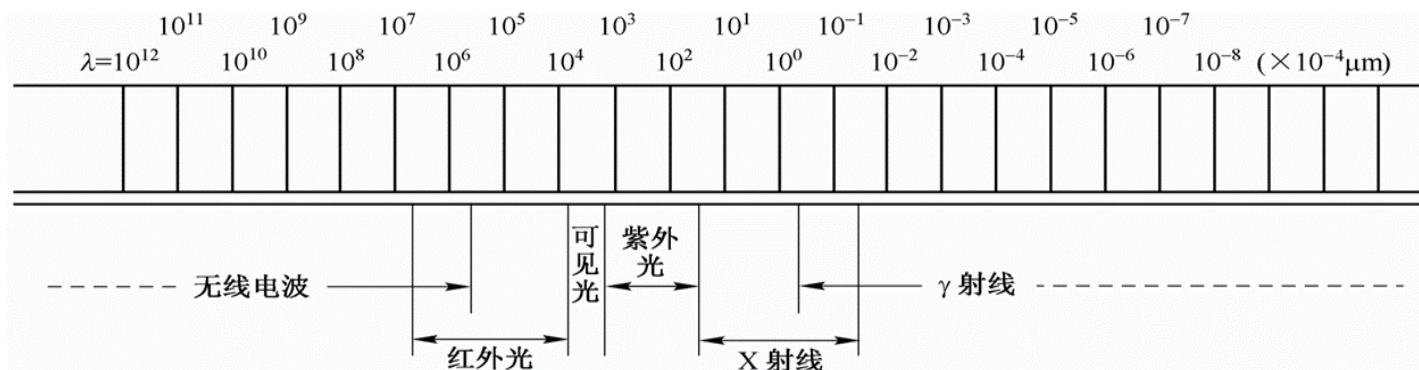


1.1 辐射理论发展概况

□光波

(2) 光速、频率和波长三者的关系

1) 波长：振动状态在经历一个周期的时间内向前传播的距离



2) 光速： $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

3) 频率和周期：光矢量每秒钟振动的次数

4) 三者的关系：

在真空中 $c = \lambda_0 \nu$

在各种介质中传播时，保持其原有频率不变，而速度各不相同

$$v = \frac{c}{\mu} \Rightarrow v = \lambda \nu \left(\lambda = \frac{\lambda_0}{\mu} \right)$$

1.1 辐射理论发展概况

□光波

(3) 单色平面波

1) 平面波

- 波阵面或同相面：光波位相相同的空间各点所连成的面
- 平面波：波阵面是平面

2) 单色平面波：具有单一频率的平面波

- 准单色波：实际上不存在完全单色的光波，总有一定的频率宽度，如称为准单色波。
- 理想的单色平面波（简谐波）

设真空中电磁波的电矢量 \vec{E} 在坐标原点沿 x 方向作简谐振动，磁矢量在 y 方向作简谐振动，频率均为 ν ，且 $t=0$ 时两者的初位相均为零。则 \vec{E} 、 \vec{B} 的振动方程分别为：

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t = \vec{E}_0 \cos 2\pi \nu t$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cos \omega t = \vec{B}_0 \cos 2\pi \nu t$$

两式统一写为：
$$U = U_0 \cos \omega t = U_0 \cos 2\pi \nu t$$

其中， U 为场矢量大小，代表 \vec{E} 或 \vec{B} 的大小， U_0 为场矢量的振幅。⁴

1.1 辐射理论发展概况

□光波

(3) 单色平面波

2) 单色平面波：具有单一频率的平面波

➤ 波场中 z 轴上任一点 P 的振动方程，设光波以速度 c 向 z 方向传播

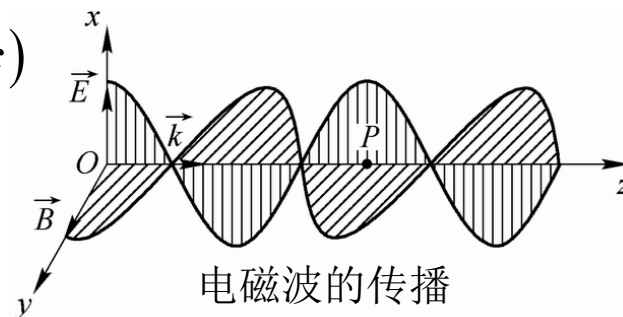
$$U = U_0 \cos \omega(t - \tau) = U_0 \cos \omega(t - z/c)$$

分析：

(a) z 一定时，则 U 代表场矢量在该点作时间上的周期振动

(b) t 一定时，则 U 代表场矢量随位置的不同作空间的周期变化

(c) z 、 t 同时变化时，则 U 代表一个行波方程，代表两个不同时刻空间各点的振动状态。从下式可看出，光波具有时间周期性和空间周期性。时间周期为 T ，空间周期为 λ ；时间频率为 $1/T$ ，空间频率为 $1/\lambda$



$$U = U_0 \cos \omega \left(t - \frac{z}{c} \right) = U_0 \cos \omega \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi z}{\lambda} \right)$$

➤ 简谐波是具有单一频率 ν 的单色波，但通常原子发光的时间约为 10^{-8}s

1.1 辐射理论发展概况

□光波

(3) 单色平面波

3) 平面波的复数表示法

- 线偏振的单色平面波的复数表示:

$$U = U_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad \text{或} \quad U = U_0 \exp[i(\omega t - kz)]$$

- 复振幅： \tilde{U} 模量 U_0 代表振幅在空间的分布，辐角 $(-kz)$ 代表位相在空间的分布

$$\tilde{U} = U_0 \exp(-ikz) \Rightarrow U = \tilde{U} \exp(i\omega t)$$

- 光强：光强与光矢量大小的平方成正比，即 $I \propto U^2$

$$\bar{I} \propto \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} U^2 dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} U_0^2 \cos^2(\omega t - kz) dt = \frac{U_0^2}{2}$$

4) 球面波及其复数表示法

- 球面简谐波方程 $U = \frac{U_0}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$

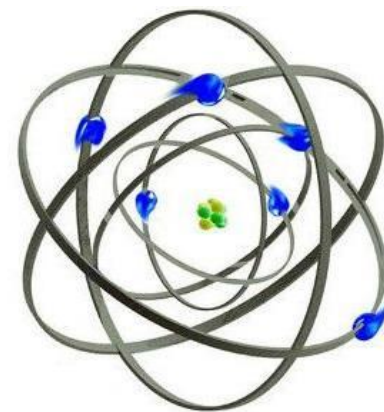
- 球面波的复数表示法 $U = \frac{U_0}{r} e^{i(\omega t - kr)}$

1.1 辐射理论发展概况

□原子能级、简并度及波尔兹曼分布

(1) 原子能级—玻尔理论

- 原子内的电子并非沿着任意轨道，而是沿着具有一定半径或能级的轨道运动。
- 原子内的电子可由某一定态跃迁到另一定态，这一过程要吸收和辐射能量。
- 对于原子内的电子可能存在的状态有一定的限制，即电子的轨道运动的角动量必须满足玻尔的量化条件



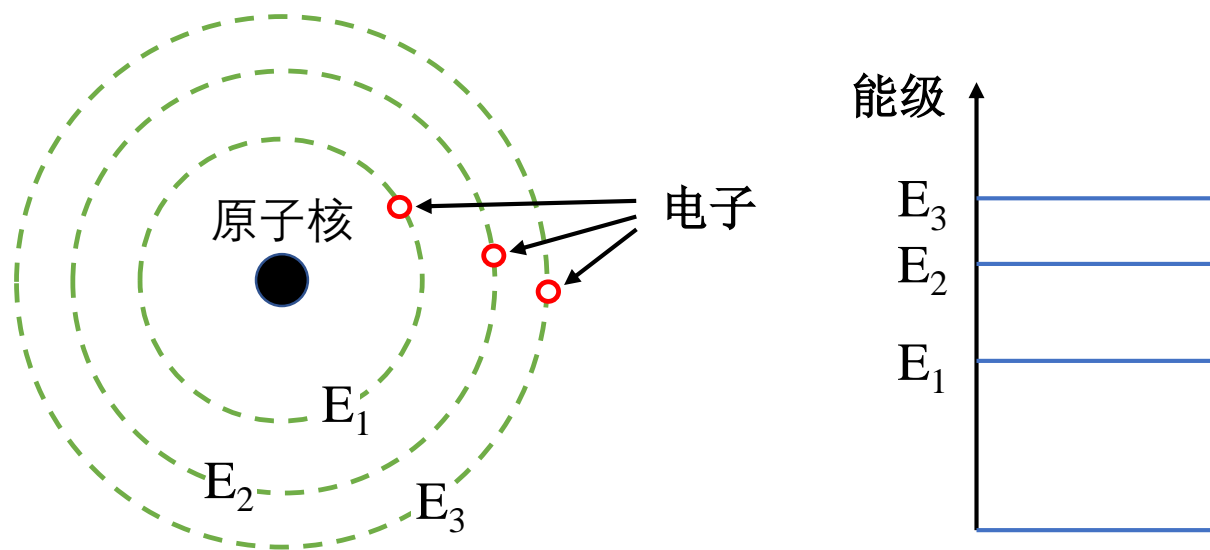
玻尔电磁轨道理论

$$P_{\phi} = n \frac{h}{2\pi}$$

1.1 辐射理论发展概况

□原子能级、简并度及波尔兹曼分布

(1) 原子能级—玻尔理论



跃迁：原子从某一能级吸收或释放能量，变成另一能级。

$$\left. \begin{array}{l} \text{吸收跃迁: 低} \xrightarrow{\text{吸收能量}} \text{高} \\ \text{辐射跃迁: 高} \xrightarrow{\text{释放能量}} \text{低} \\ \text{(自发辐射)} \end{array} \right\} h\nu = E_2 - E_1$$

1.1 辐射理论发展概况

□原子能级、简并度及波尔兹曼分布

(2) 简并度、简并能级

电子运行的状态不同，其能量相同

能量相同的能级对应不同的电子运动状态



简并度

☞ 同一能级对应的不同的电子运动状态的数目

简并能级

☞ 电子可以有两个或两个以上的不同运动状态具有相同的能级，这样的能级叫做简并能级

1.1 辐射理论发展概况

□原子能级、简并度及波尔兹曼分布

(3) 波尔兹曼分布

由大量粒子所组成的系统在热平衡状态下
粒子按能级的分布规律

$$N_i \propto g_i e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

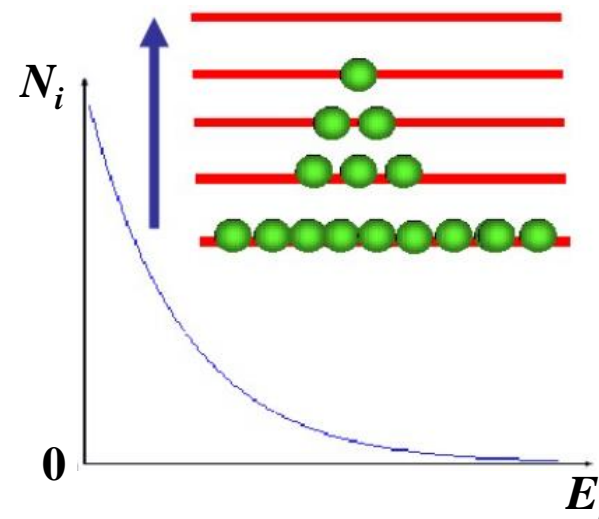
处在 E_m 和 E_n 能级的粒子数目之比为

$$\frac{N_m / g_m}{N_n / g_n} = e^{-\frac{E_m - E_n}{kT}}$$

由 $E_m > E_n \Rightarrow \frac{N_m}{g_m} < \frac{N_n}{g_n}$

结论

高能级的粒子数目少于低能级的粒子数目



1.1 辐射理论发展概况

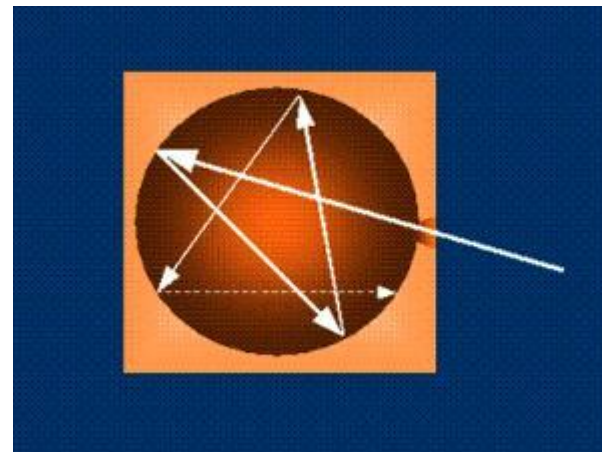
□光电效应与光量子假说

1900年，普朗克（Max Planck）提出辐射**能量量子**的概念，他在对黑体辐射实验进行理论解释的时候发现，必须大胆假设：

黑体辐射的能量是**不连续**的，存在一个最小的能量单元，这就是**量子**。

1905年爱因斯坦（Albert Einstein）在解释光电效应实验的时候进一步提出：

光也是由最小能量单元 **$h\nu$** —光子组成



黑体辐射

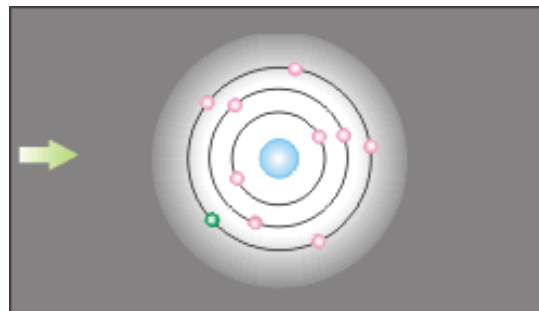
1.1 辐射理论发展概况

□光与物质的相互作用

1917年，爱因斯坦提出**受激辐射**概念

—奠定了激光发明的理论基础

爱因斯坦发现，若只有吸收辐射和自发辐射，黑体和辐射场之间不可能达到**热平衡**，要达到热平衡，还必须存在**受激辐射**。

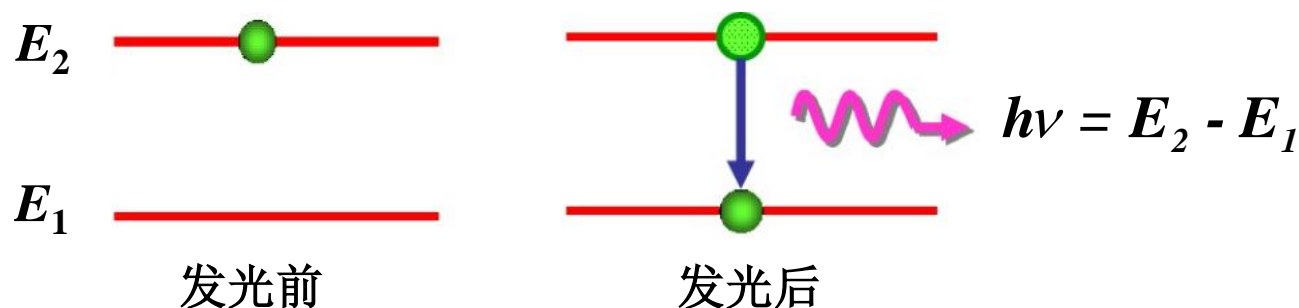


预示了利用受激辐射来**放大（振荡）**光的可能性！

1.1 辐射理论发展概况

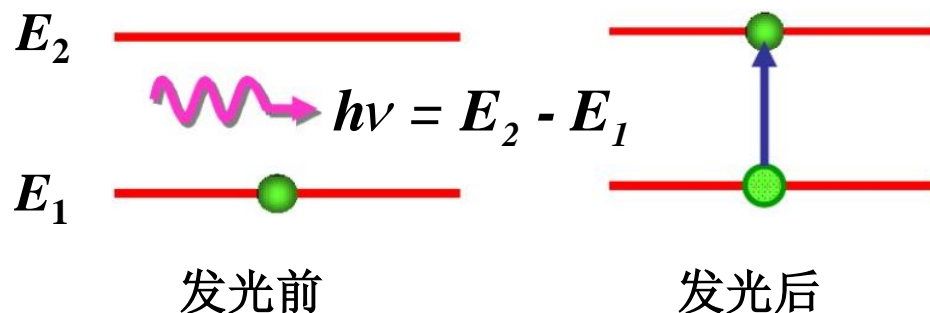
□光与物质的相互作用

➤ 自发辐射



普通光源发光过程为自发辐射,各原子自发辐射发出的光彼此独立,频率、振动方向、相位不一定相同—为**非相干光**。

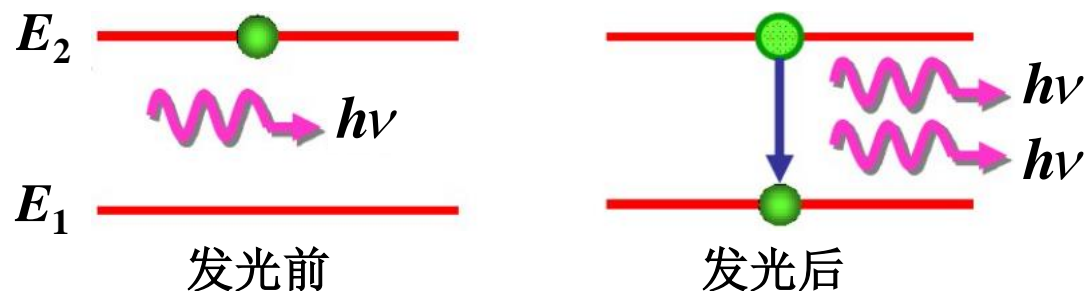
➤ 受激吸收



1.1 辐射理论发展概况

□光与物质的相互作用

➤ 受激辐射



$$h\nu = E_2 - E_1$$

当外来光子的频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ 时，原子中处于高能级的电子在外来光子的激发下向低能级跃迁而发光。

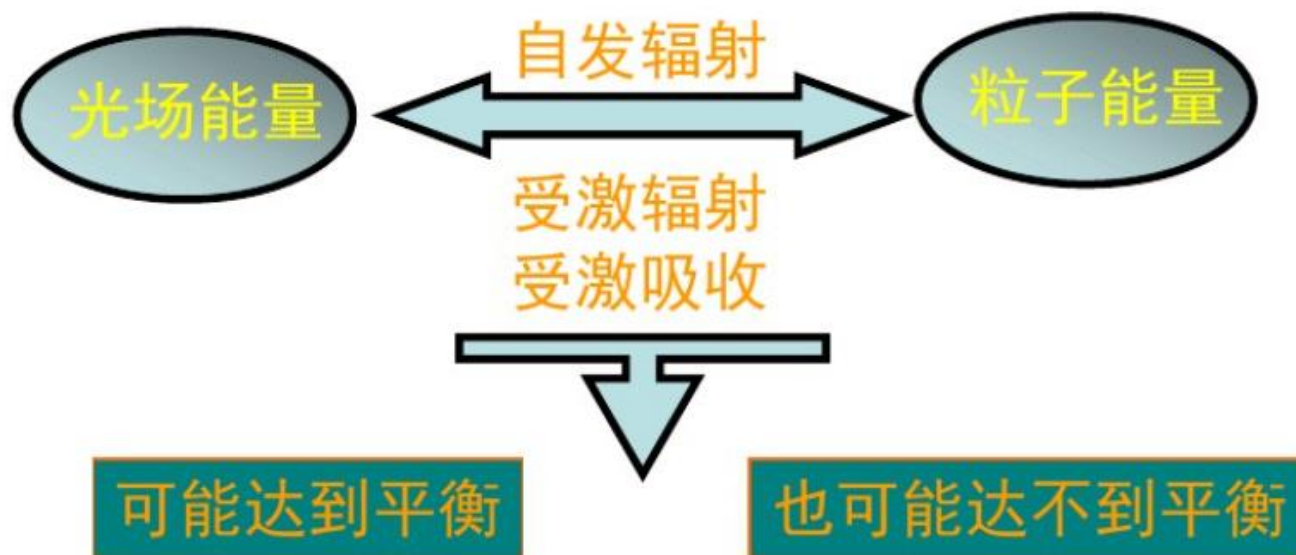
受激辐射：受激辐射产生的光子与引起受激辐射的外来光子具有相同的特征（频率、相位、振动方向及传播方向均相同）。

受激辐射光子与入射光子属同一光子态——相干光

1.1 辐射理论发展概况

□光与物质的相互作用

当光与原子相互作用时，总是同时存在这三种过程



1.2 激光的偶然发现

- 1921年，美国赫耳发明的磁控管能产生微波振荡，使人类开始了微波的研究
- 1924年，物理学家托尔曼根据原子、分子系统内激发态上粒子数分布的情况，指出可以得到负吸收或放大，并在实验中观察到了这种机制引起的吸收系数的变化
- 1928年，拉登伯格和科普夫曼在气体放大的色散测量中，观测到由于受激辐射所引起的负色散现象
- 1934年，美国的斯勒特和维维里曼做了波长1~4cm的各种磁控管，发现氨分子在1.3cm波长处有强烈的吸收，这是用相干振荡器发现电磁波和分子相互作用的最早实验，也是电磁波谱学的最早实验；
- 1938年，捷克尼在计算各种干涉条件下的光束强度中提出“相干度”的概念

—受激辐射概念开始形成

1.2 激光的偶然发现

1939年，法布里坎特在讨论气体放电的发光机理时：

- 分析了由负吸收产生光放大的可能性，以及由此所引起的光强度和方向性增加的问题
- 根据拉登伯格发现的吸收系数、爱因斯坦系数与粒子数分布的关系指出：要使辐射通过介质不但不衰减而且还要放大的话，必须实现
粒子数反转

—指出了产生激光最重要的条件

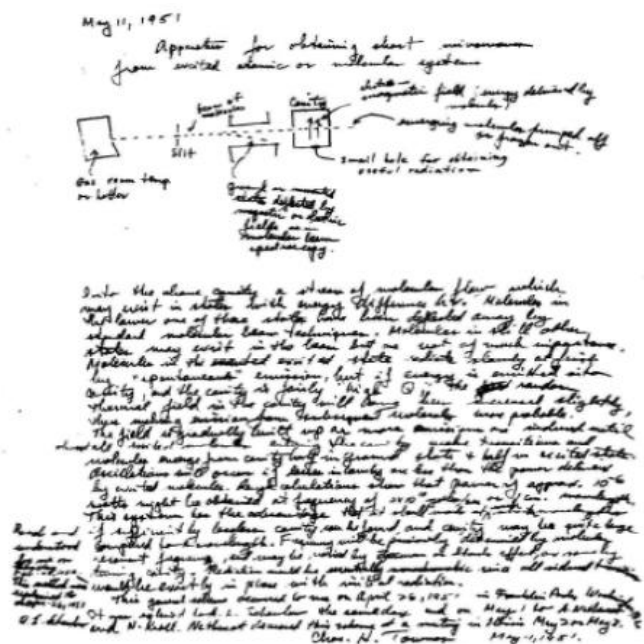
- 1946年，美国和英国几乎同时发现氨分子谱线中的精细结构和超精细结构，并开始了微波波谱学的研究
- 1950年，卡斯特勒提出用“**抽运**”方法实现粒子数反转的设想
- 1951年，珀塞尔和庞德在美国哈佛大学研究核磁共振时，第一次在实验上用核磁共振实现负温度状态

—激光产生的技术条件

1.2 激光的偶然发现

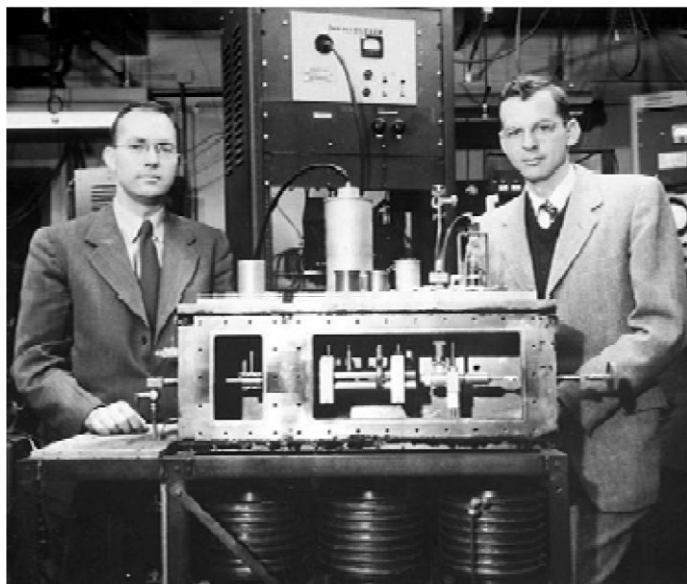
20世纪50年代，人们已经意识到可以通过受激辐射获得放大效应，关于受激辐射的想法到处游荡。

—查尔斯.H.汤斯 《激光如何偶然发现》



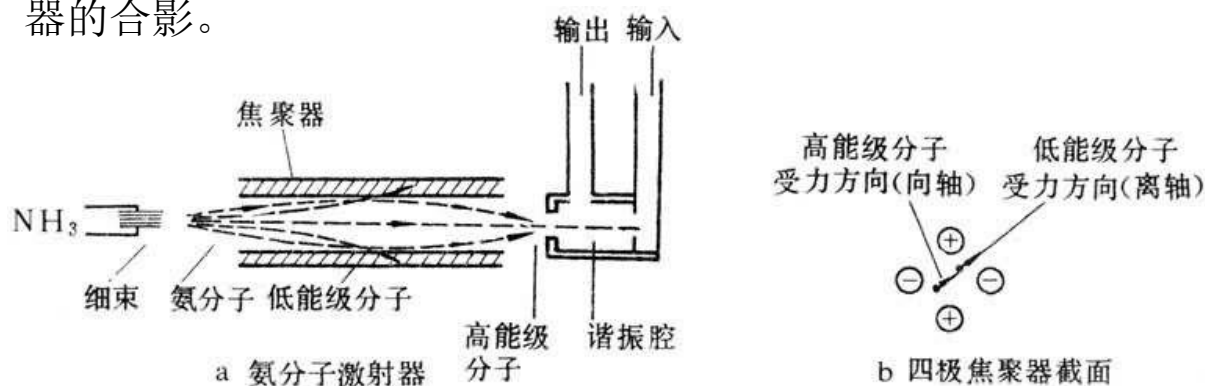
查尔斯.H.汤斯1951年5月11日手稿
华盛顿 富兰克林公园

1.2 激光的偶然发现



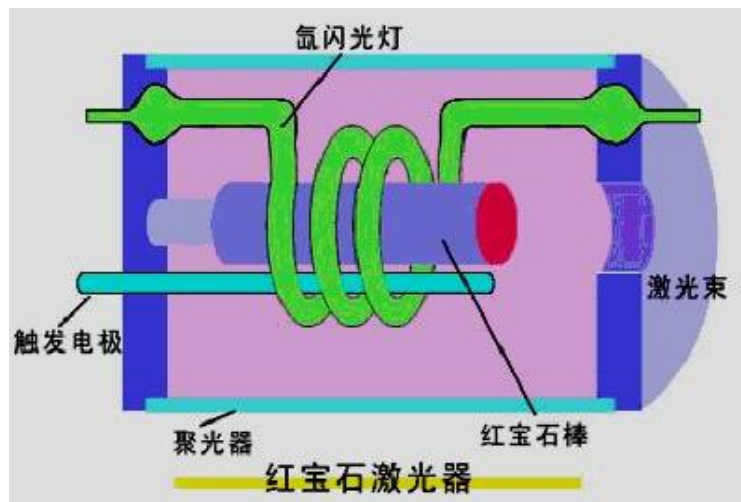
查尔斯.H.汤斯（左）与戈登（右）
同哥伦比亚大学的第二台微波激射
器的合影。

在谐振腔中，分子在反演能级间产生受激辐射、发出频率约为23870兆赫兹（波长为1.25厘米）的电磁波。



氨分子激射器示意图

1.2 激光的偶然发现



红宝石激光器



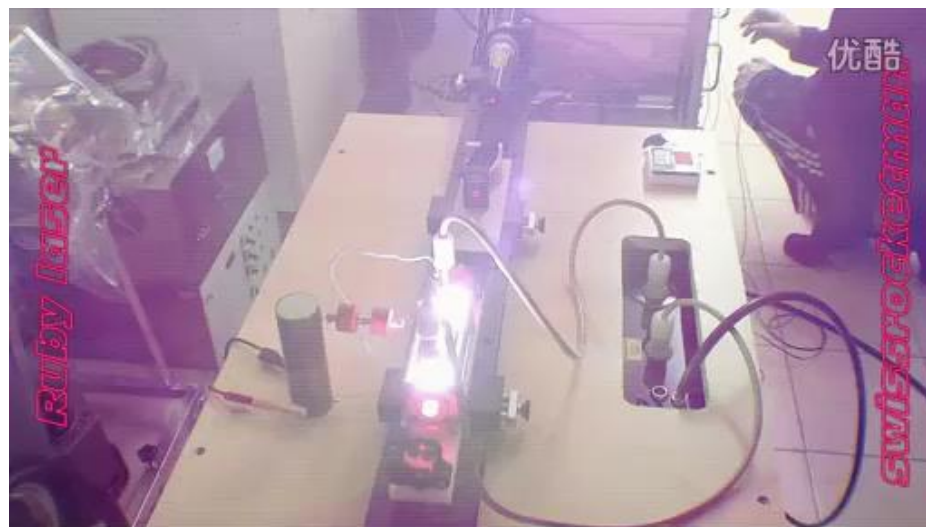
梅曼与红宝石激光器

1.2 激光的偶然发现

- ✓ 我国从1958年开始微波激光器的研究
- ✓ 1961年在长春光机所研制出第一台红宝石激光器



我国第一台红宝石激光器



红宝石激光器测试视频

1.3 激光的发展状况

□20世纪60年代

- He-Ne 激光器, Rb玻璃Q开关激光器, 红宝石倍频激光器
- 63年, 液体激光器
- 64年, 钕铝石榴石激光器, CO_2 激光器, 化学激光器和锁模激光器
- 65年, 激光器参量振荡器
- 66年, 染料激光器
- 67年, 超短脉冲激光器
- 68年, 金属蒸汽激光器

□20世纪70年代以来

半导体激光器、真空紫外分子激光器、高压气体激光器、气动激光器、高功率化学激光器、准分子激光器、自由电子激光器、光纤激光器....