

第二节 激光



激光又名莱塞 (Laser)

全名是 “辐射的受激发射光放大”

(Light amplification by stimulated
emission of radiation)

世界上第一台激光器诞生于1960年

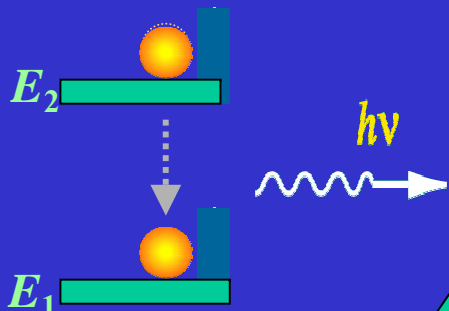
1954年制成了受激发射的微波放大器

——梅塞 (Maser)

它们的基本原理都是基于1916年爱因斯坦
提出的受激辐射理论

一. 光的吸收与辐

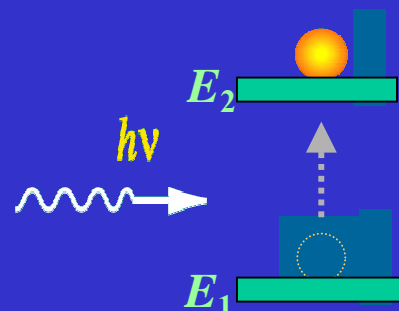
自发辐射



自发辐射系数

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

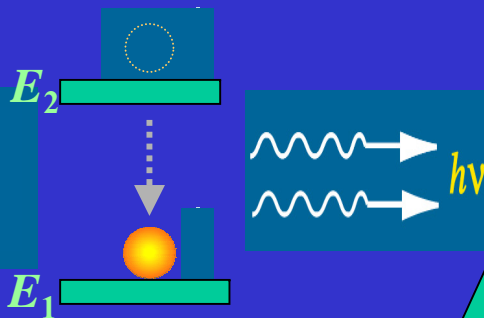
受激吸收



受激吸收系数

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = kN_1 IB'$$

受激辐射



受激辐射系数

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}} = kN_2 IB$$

	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

$$B = B'$$

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

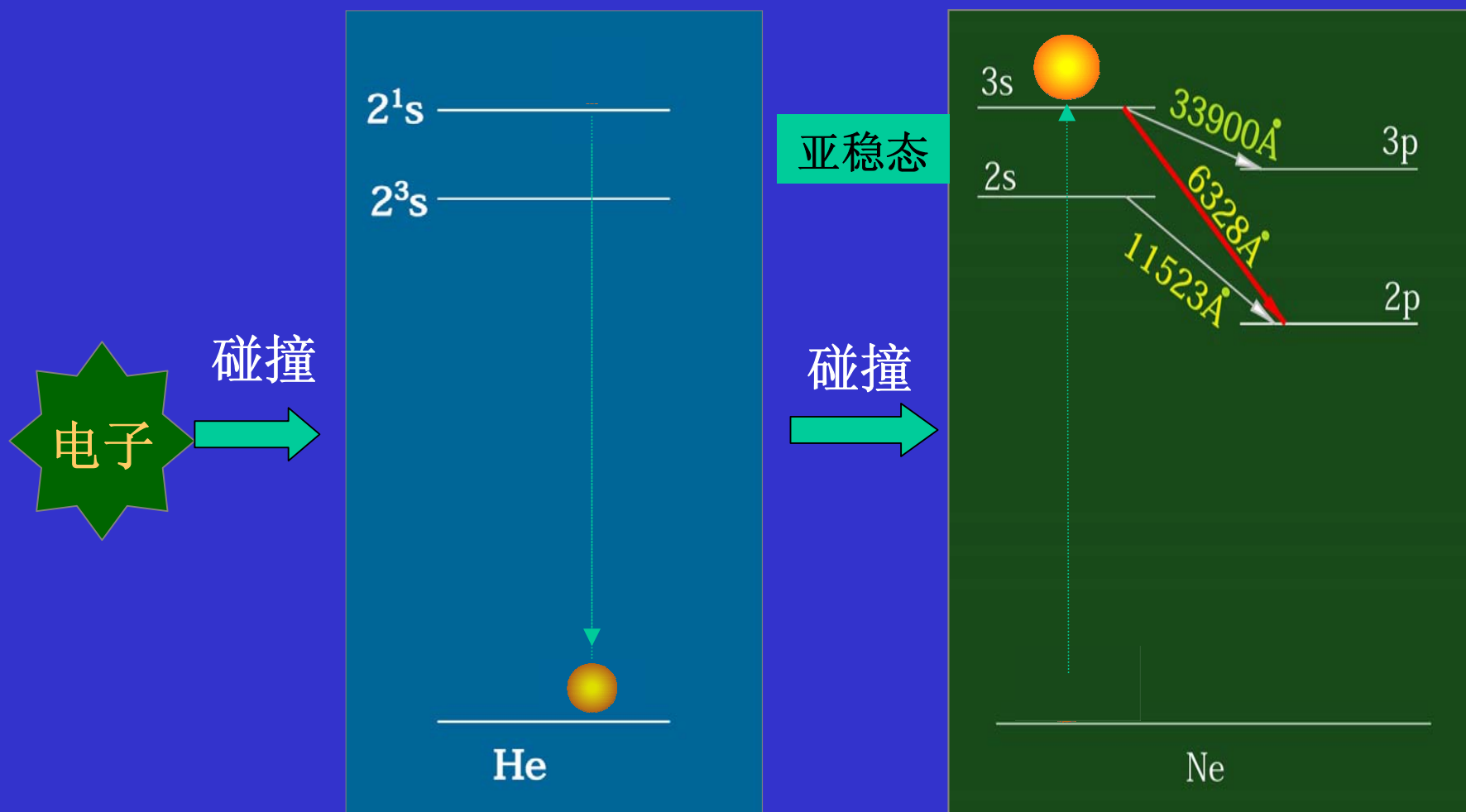
光强变化 $\Delta I \sim (N_2 - N_1)IB$

介质	{	热平衡 状态	$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} < 1$	$N_1 > N_2$	$\Delta I < 0$
		粒子数 反转态			

★ 说明

若介质处于粒子数反转态，光在其中传播时得以放大。

例 He-Ne激光器中Ne气粒子数反转态的实现



三. 增益介质中光强随传播距离的变换关系

增益介质：处于粒子数反转态的介质。光传播时被放大。

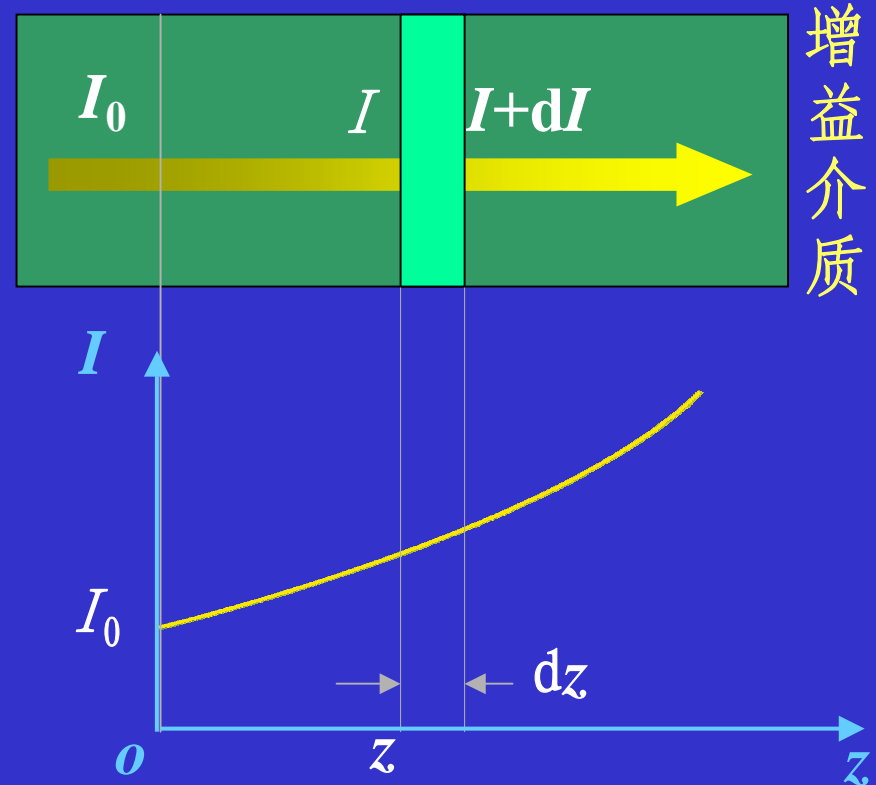
经过介质薄层，光强增量为

$$dI = GIdz$$

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

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

G -- 增益系数



★ 说明

在增益介质内，光强 I 随传播距离按指数增加。

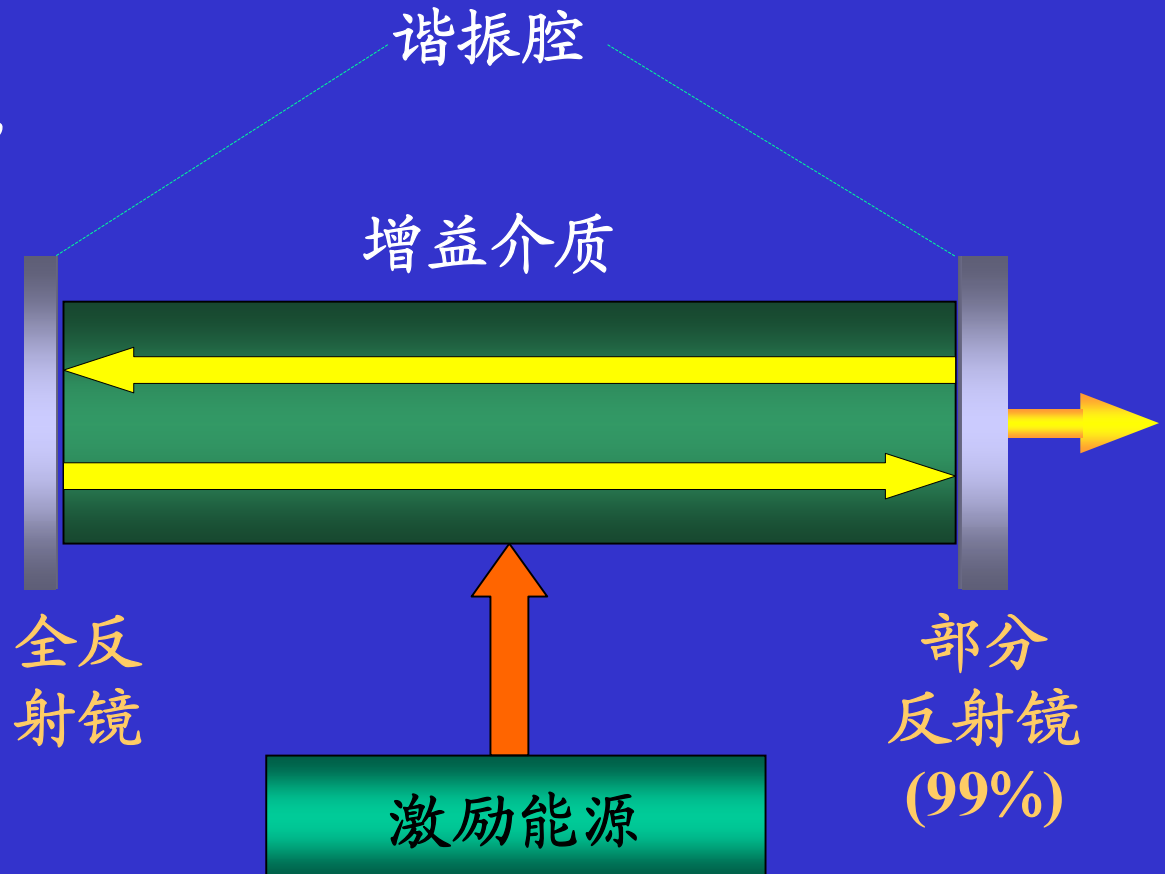
四. 激光器的基本构成及激光的形成

1. 基本构成部分

谐振腔，增益介质，
激励能源。

2. 激光的形成

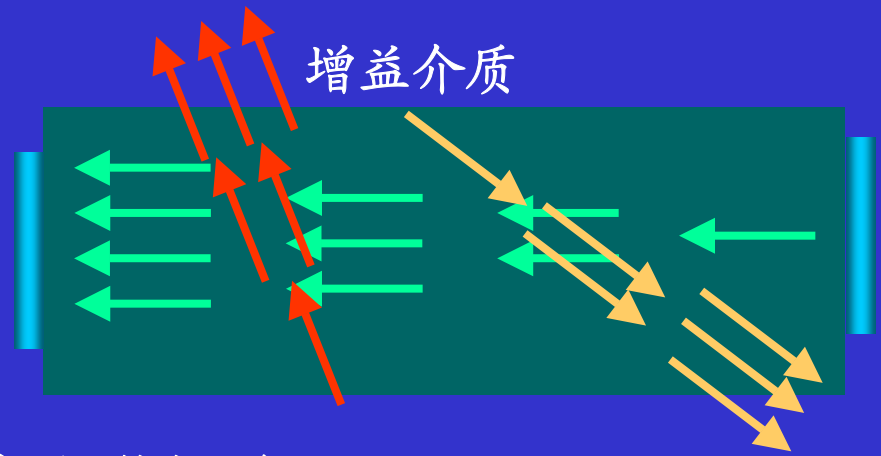
光束在谐振腔内
来回震荡，在增
益介质中的传播
使光得以放大，
并输出激光。



五. 谐振腔的作用

1. 限定光的方向

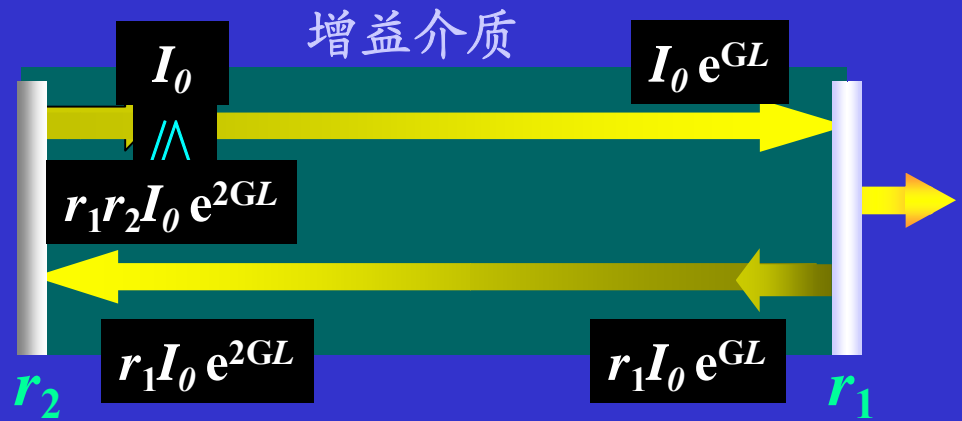
沿轴线的光在增益介质内来回反射，连锁放大，输出形成激光。其它方向的光很快逸出谐振腔。



2. 延长增益介质

阈值条件

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



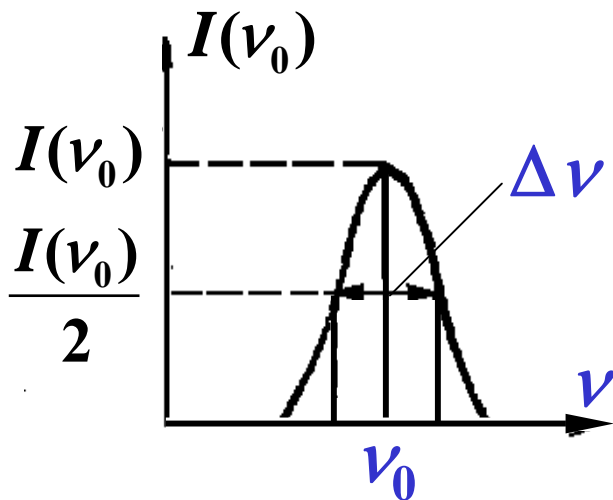
3. 光学谐振腔的选频

在光学谐振腔的作用下可形成纵模和横模

1) 纵模

沿光学谐振腔纵向形成的每一种稳定的光振动（驻波）称为一个纵模

谱线是有一定的宽度的



例如Ne原子的0.6328 μm 谱线的频率宽度为

$$\Delta\nu \approx 1.3 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{0.6328 \times 10^{-6}} \approx 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1.3 \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-14}} \approx 3 \times 10^{-6}$$

而为什么He—Ne激光器输出激光的

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \text{ 会小到 } 10^{-15} \text{ 呢?}$$

原因：光在谐振腔两端来回反射要产生干涉

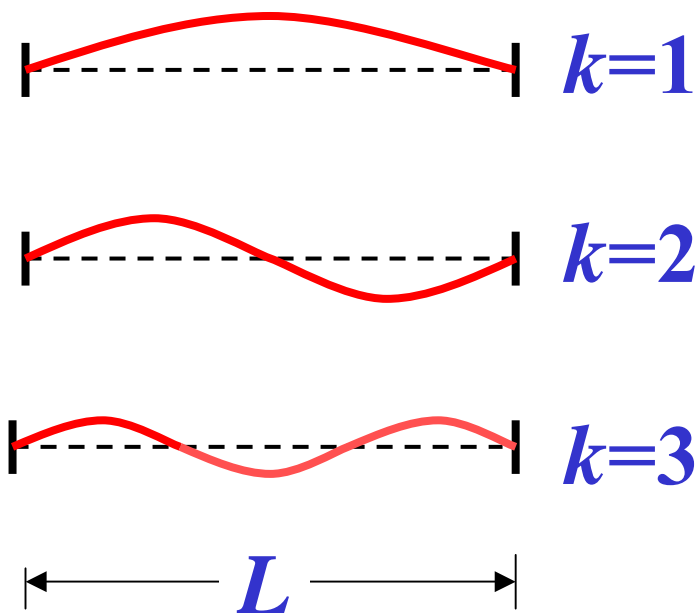
由驻波条件知 往返光程

$$2nL = k\lambda_k \quad (k=1, 2, 3, \dots)$$

n — 谐振腔内工作物质的折射率

λ_k — 真空中的波长

$$\lambda_k = \frac{2nL}{k}$$



可以存在的纵模频率为 $\nu_k = \frac{c}{\lambda_k} = k \frac{c}{2nL}$

相邻两个纵模频率的间隔为 $\Delta\nu_k = \frac{c}{2nL}$

数量级估计:

$$L \sim 1 \text{ m}$$

$$n \sim 1.0$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

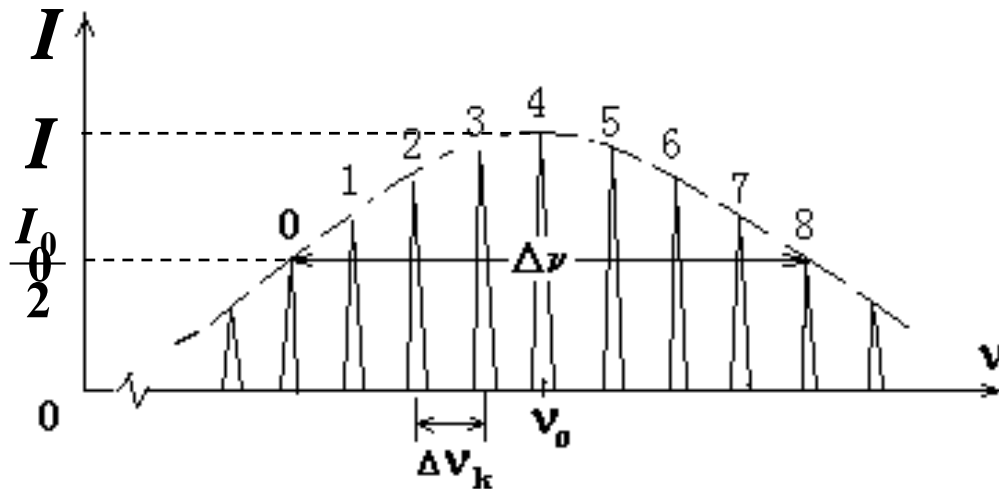
$$\Delta\nu_k = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 1} = 1.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

而氦氖激光器 $0.6328 \mu\text{m}$ 谱线的宽度为

$$\Delta\nu = 1.3 \times 10^9 \text{ Hz}$$

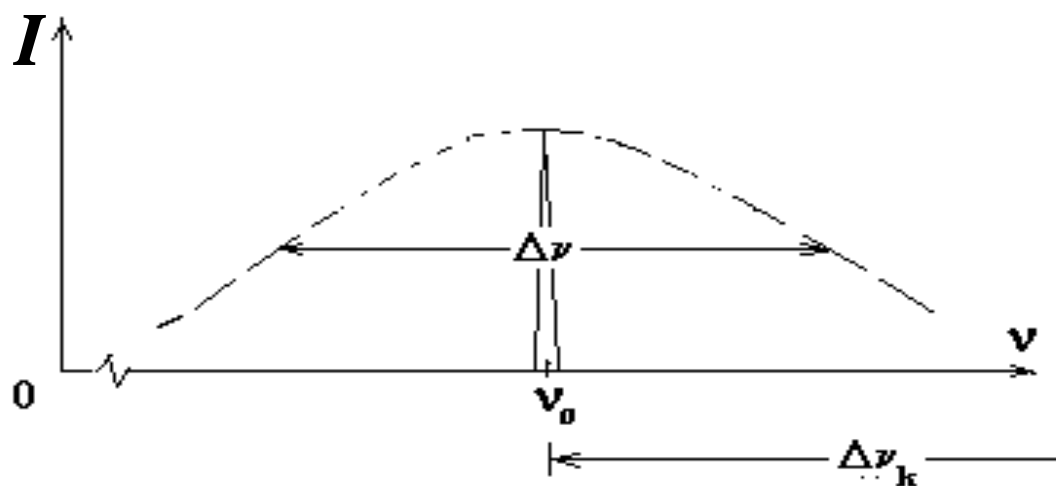
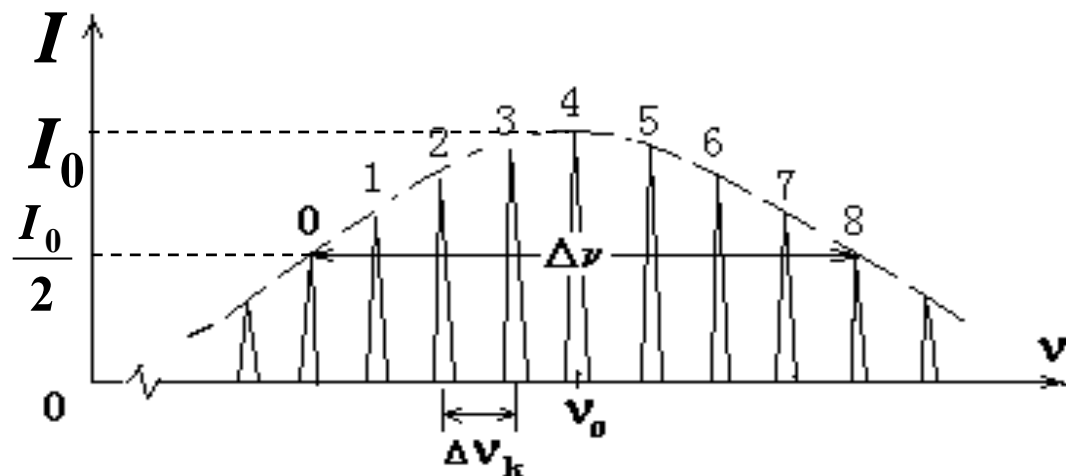
在 $\Delta\nu$ 区间中 可以存在的纵模个数为

$$N = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_k} = \frac{1.3 \times 10^9}{1.5 \times 10^8} \cong 8$$



通过缩短腔长和
控制反射镜膜厚
等手段可使输出
纵模个数减少

例如利用缩短腔长来加大 $\Delta\nu_k$
可以使 $\Delta\nu$ 区间中只存在一个纵模频率



如上述He—Ne激光器 L 从 1m 缩短到 0.1m

则 $\Delta\nu_k$ 要增大到 10 倍

在 $\Delta\nu$ 区间中可能存在的纵模个数 N 仅为 1

从而获得了线宽极窄的 **0.6328 μm** 激光

极大地提高了单色性（但损失了光强）

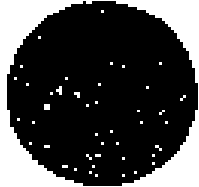
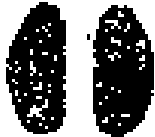
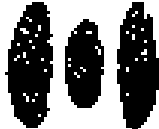
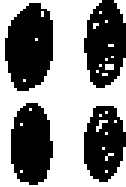
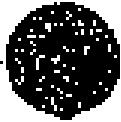


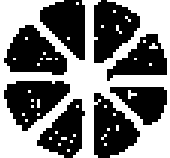
也可以在腔内插入 F—P 标准具选频

2) 横模

激光光强沿谐振腔**横向**的每一种稳定的**模式**

产生横模的主要原因:谐振腔两端反射镜的**衍射作用**和初始自发辐射的**多样性**

某些激光横模的光强分布

	基模	高阶横模		
中心对称				
旋转对称				

基横模光束质量高 高阶横模输出功率大

没有特殊要求通常都选择基横模输出

基横模输出的特点:

- 亮度高
- 发散角小
- 光束横截面上径向光强分布较均匀
- 横截面上各点的相位相同
- 空间相干性最好

小结：激光器的三个主要组成部分

1. 激活介质：

有合适的能级结构 能实现粒子数反转

2. 激励能源：

使原子激发 维持粒子数反转

3. 光学谐振腔：

保证光放大 使激光有良好的方向性和单色性

四、激光的特点

1.相干性极好

- 时间相干性好 相干长度可达几十公里
- 空间相干性好 激光波面上各个点可以做到都是相干的（如基横模）

2.方向性极好

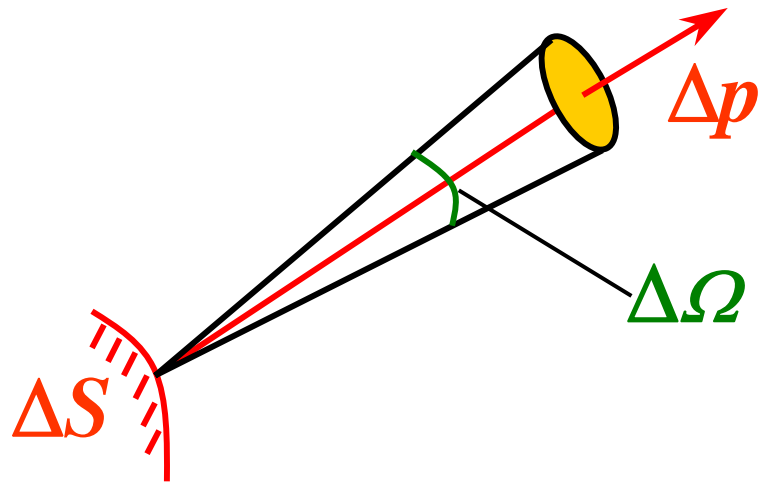
发散角可小到 $\sim 10^{-4}\text{rad}$ ($\sim 0.1'$)

投射到月球（38万公里）光斑直径仅约

2公里 测地—月距离精度达几厘米

3.亮度和强度极高

亮度： $B > 10^{16} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Sr} \sim 10^{10} B_{\text{太阳}}$



光源亮度：

$$B = \frac{\Delta p}{\Delta S \cdot \Delta \Omega}$$

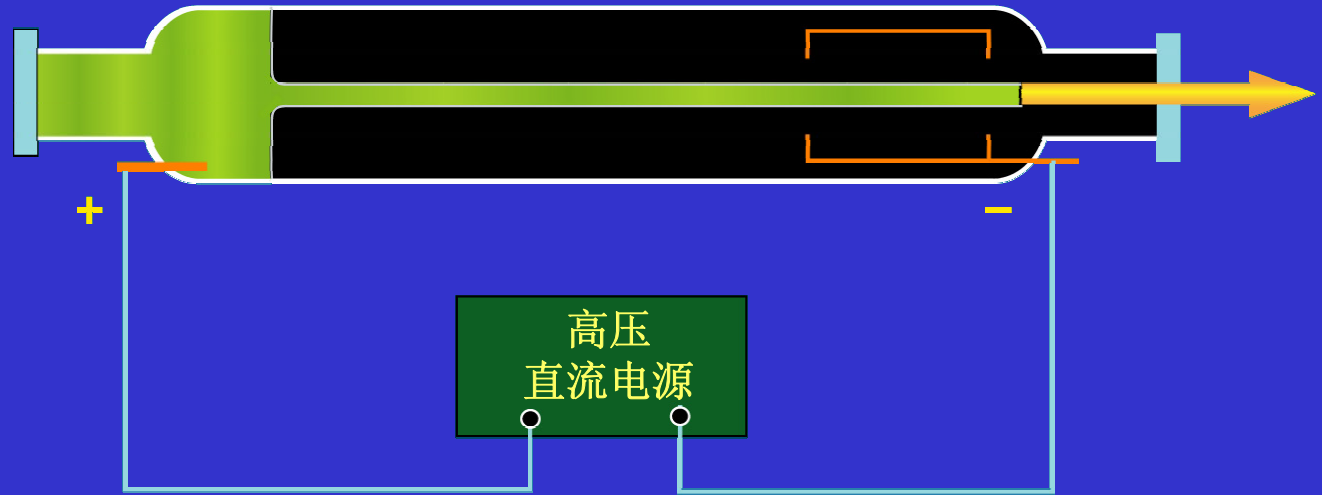
强度：聚焦状态可达到 $I > 10^{17} \text{ W/cm}^2$

脉冲瞬时功率可达 $\sim 10^{14} \text{ W}$

可产生 10^8 K 的高温 引起核聚变

六. 几种常见的激光器

1. 氦氖激光器

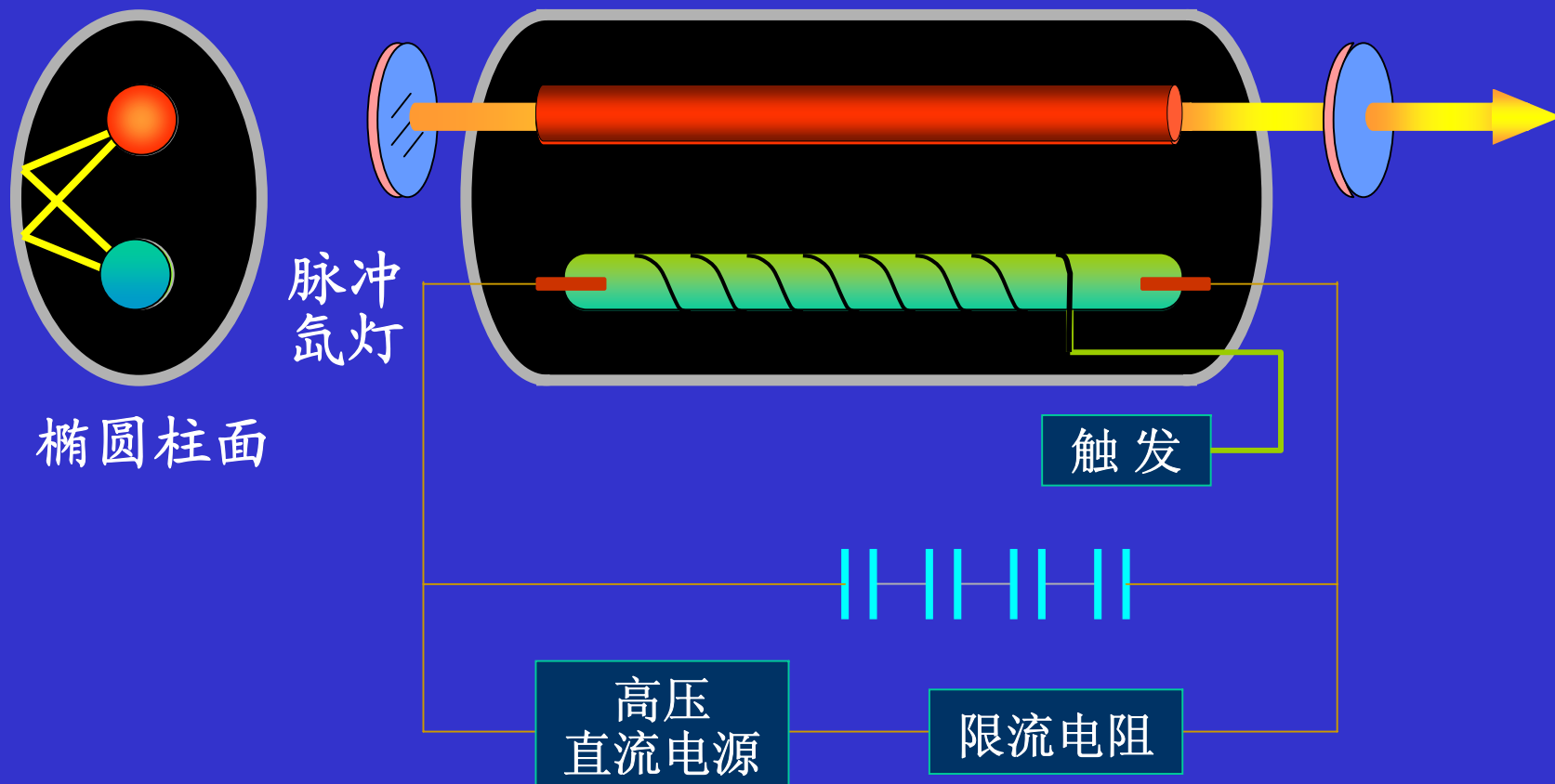


工作物质：氦气

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 Cr^{+3}

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

五、应用

激光的应用已遍及科技、工农业、医疗、军事、生活等各个领域，这里只列举几个方面：

- 利用激光高强度 良好的聚焦性（平行性）

★加工：

钻孔(烧穿)：效率高 可加工硬质合金钻石等

焊接(烧熔)：迅速 非接触 可在空气中进行

切割(连续打孔)：如芯片电路的准确分割

调节精密电阻

绘制集成电路图 刻制光栅等

★ 测量：准直、测距等

★ 医疗：激光手术刀 血管内窥镜 治癌等

★ 军事：激光制导 激光炮等

★ 核技术：激光分离同位素

(还利用了频率准确的特点)

激光核聚变

(10^7 — 10^9 K, 氘—氚小弹丸) 等

•利用激光极好的相干性:

★测量: 精密测长、测角, 测流速 (10^{-5} — 10^4 m/s)

准确测定光速 c (定义 $1\text{m}=c / 299752458$)

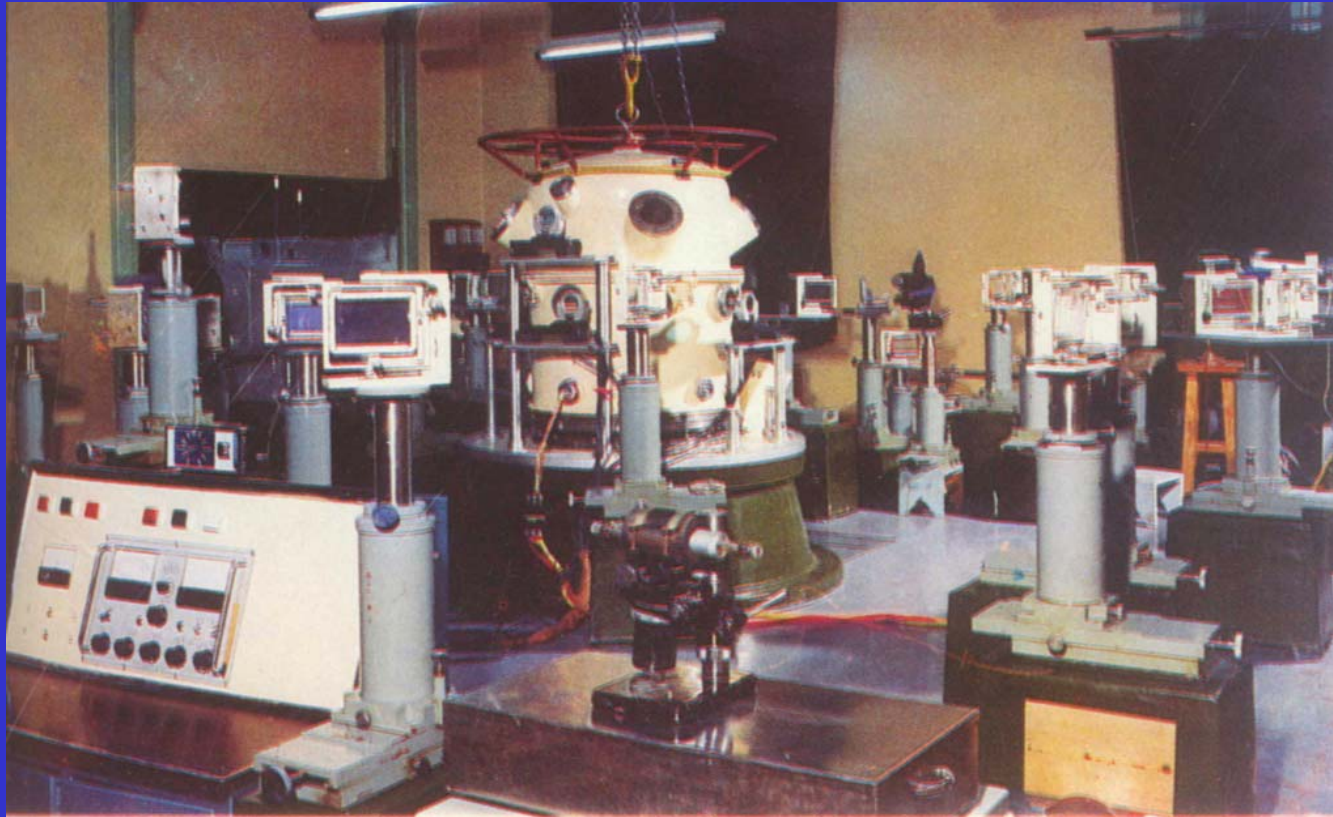
定向(激光陀螺) 测电流电压(磁光效应)

激光雷达(分辨率高, 可测云雾)等

★全息技术: 全息存储 全息测量 全息电影
全息摄影等

★探测：微电子器件表面探测（激光—原子力显微镜可测25个原子厚度的起伏变化）
单原子探测（利用光谱分析能测出 10^{20} 个原子中的一个原子） 分子雷达
（可探测活细胞内的新陈代谢过程）

★激光光纤通讯：载波频率高（ 10^{11} — 10^{15} Hz）
信息容量大 清晰 功耗小
抗干扰性强



核聚变实验的六路真空靶室

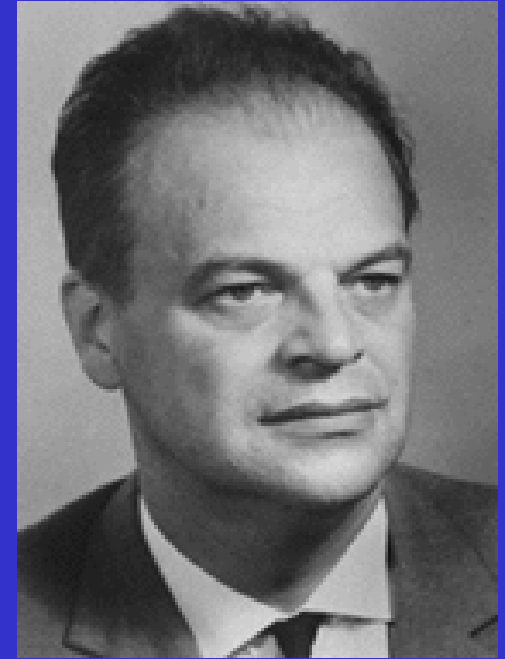
实验中采用大功率(10^{14} KW)钕玻璃激光器



C.H.Townes



A.M.Prokhorov

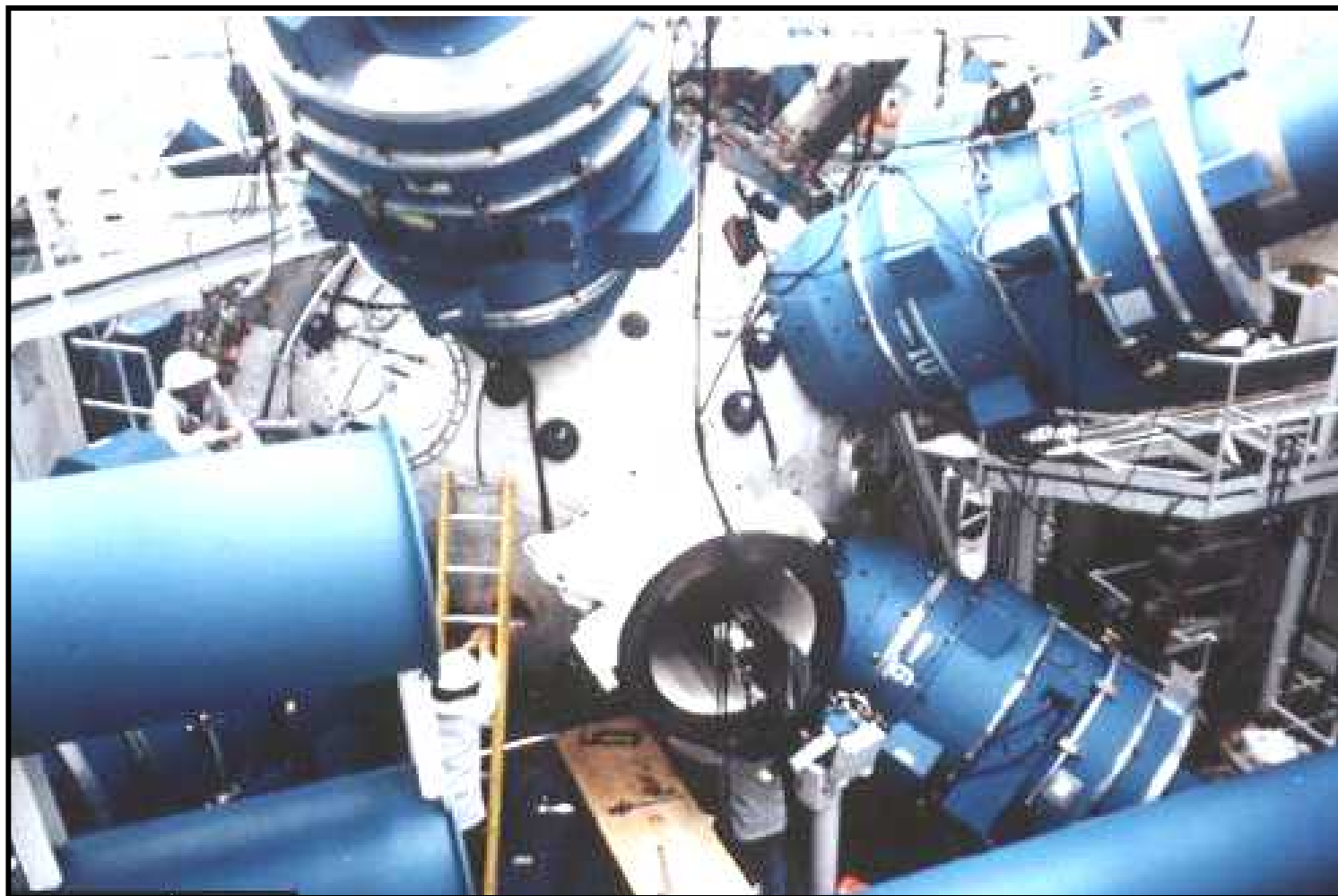


N.G.Basov

The Nobel Prize in Physics 1964

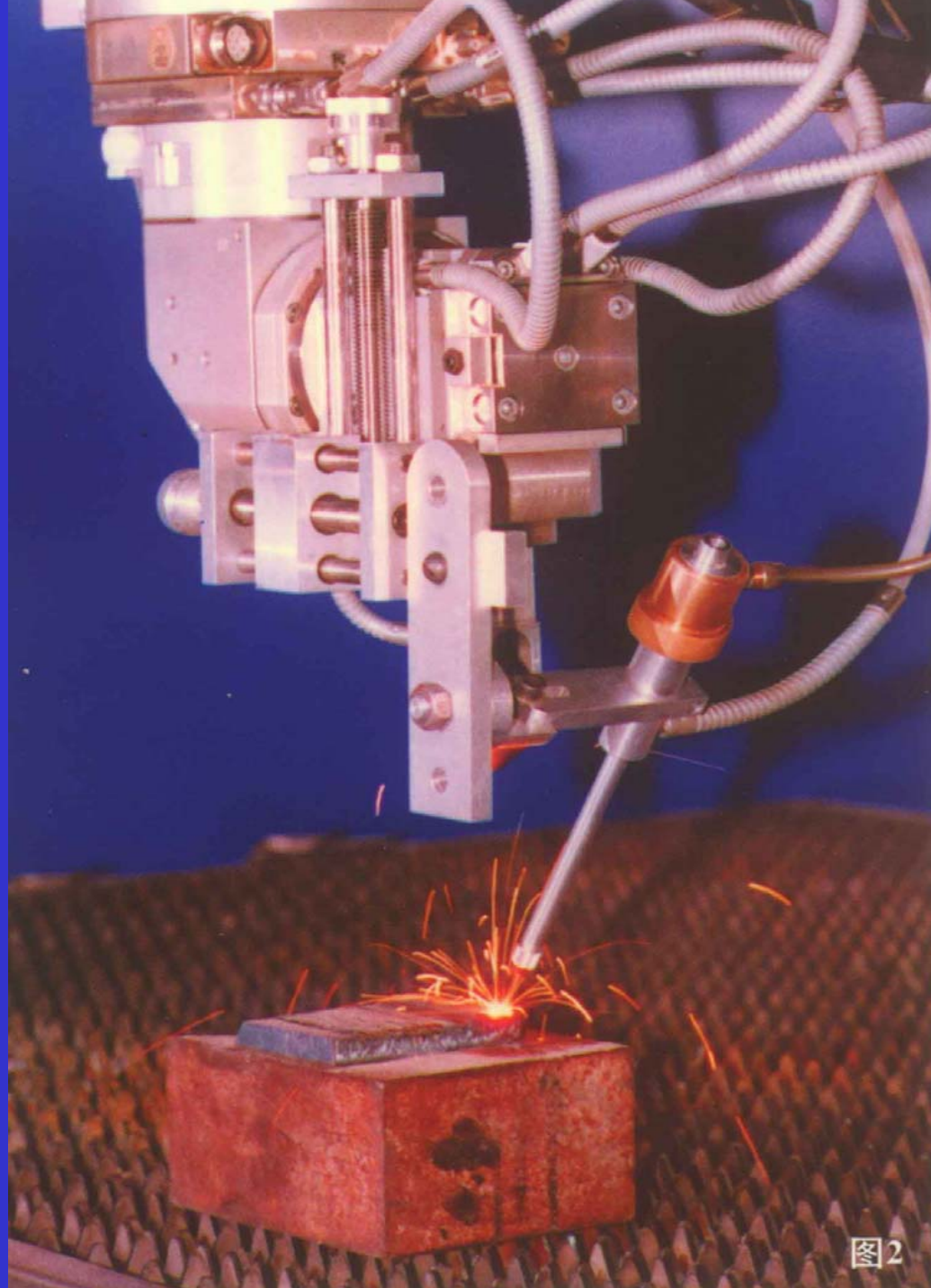
汤斯1954年在量子电子学研究中实现了氨分子的粒子数反转，研制了微波激射器和激光器；普罗霍洛夫和巴索夫1958年几乎同时在量子电子学的基础研究中，根据微波激射器和激光器原理研制了振荡器和放大器。以上工作导致了激光器的发明。

激光核聚变

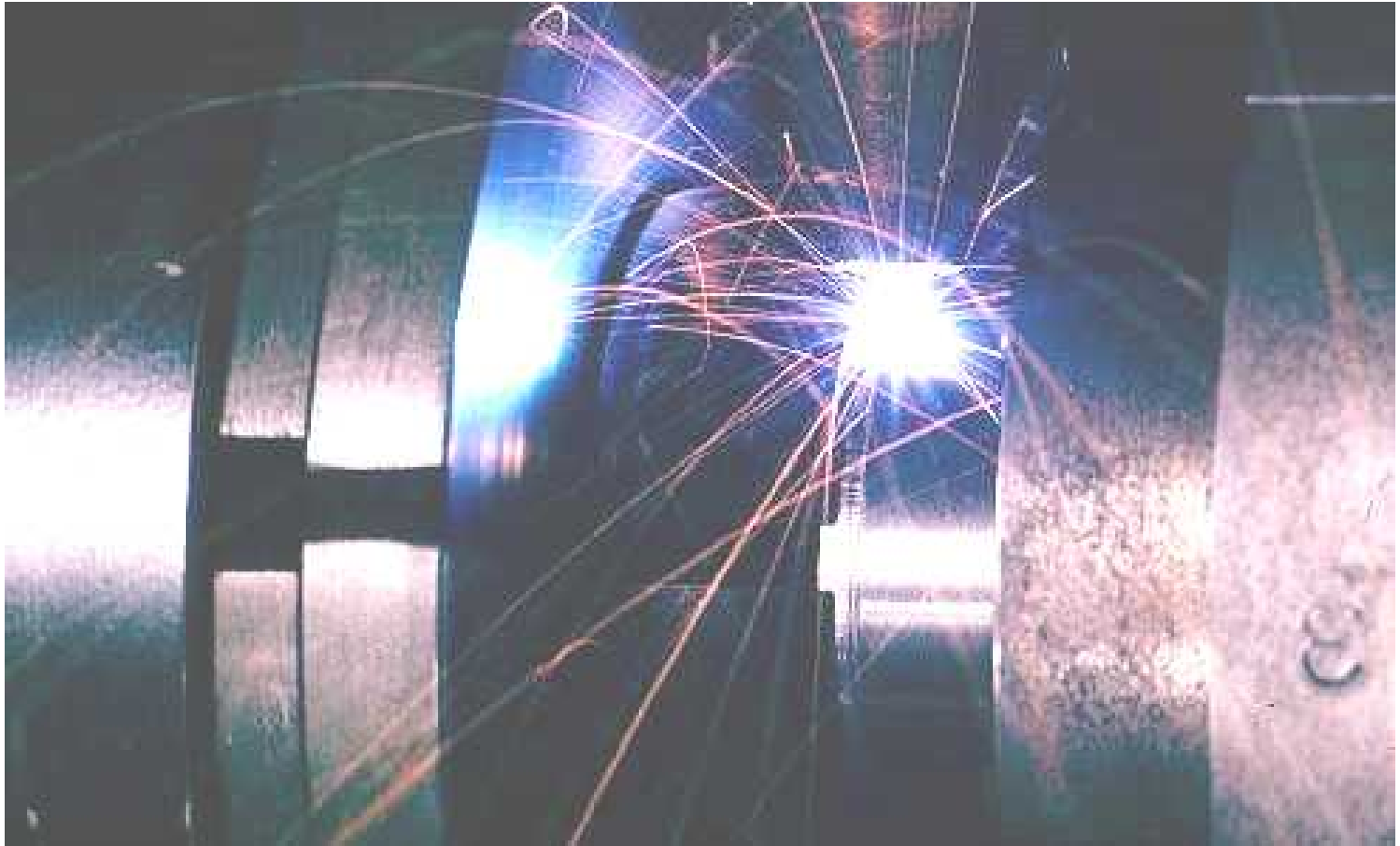


这是激光**NOVA**靶室，在靶室内十束激光同时聚向一个产生核聚变反应的小燃料样品上，引发核聚变。

激光加工—6KW
CO₂激光加工机
在进行金属表面
涂敷合金粉末的
作业



激光焊接



高能激光（能产生约5500 °C的高温）
把大块硬质材料焊接在一起

用脉冲的染料激光（波长585nm）处理皮肤色素沉着



处理前

处理后

用激光使脱落的视网膜再复位



(目前已是常规的医学手术)