



# 微纳光子学

- 现代工程与应用科学学院
  - 2020-3-25



# 光学微腔及应用



## 主要内容

1. 背景简介
2. 物理基础
3. 光学微腔应用

目标:

“图像”

“琢磨”



# 背景简介

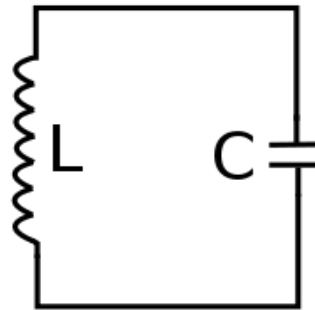


## 腔是什么？

Guitar

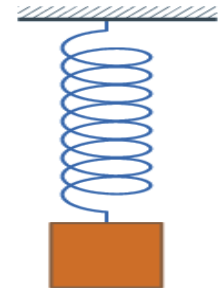


LC circuit



$$\omega = 1/(LC)^{1/2}$$

Harmonic oscillator



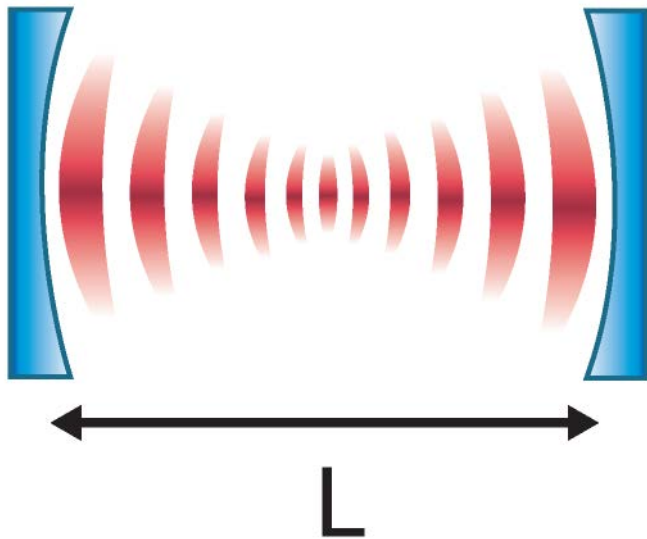
$$\omega = (K/m)^{1/2}$$



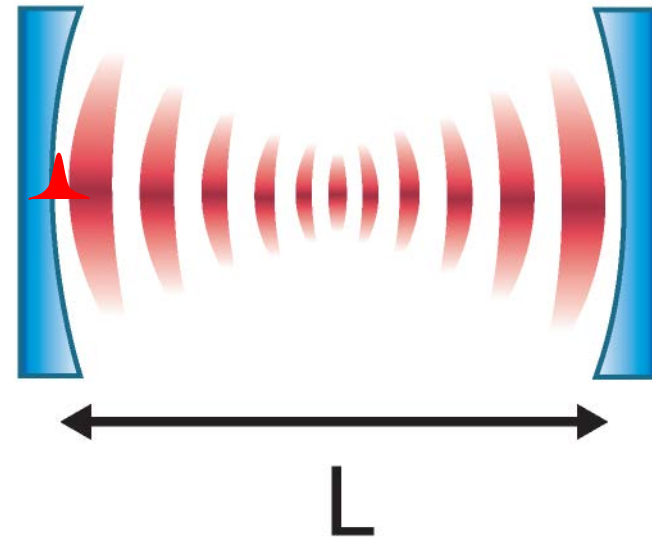
# 背景简介



## 光学谐振腔



$$\omega = \pi mc / (nL)$$



$$\omega = \pi mc / (nL)$$



# 背景简介



## 历史回顾

### 法布里—珀罗谐振腔或法布里—珀罗标准具



**Charles Fabry (1867–1945)**



**Alfred Perot (1863–1925)**

Fabry and Perot constructed an optical resonator for use as an interferometer. Now known as the Fabry–Perot etalon, it is used extensively in lasers.

Fabry, C., and A. Perot, *Theorie et applications d'une nouvelle methode de spectroscopie interferentielle*. *Ann. Chim. Phys.* **16**:115 (1899).



# 背景简介



## 历史回顾

### Townes



Charles H. Townes  
(born 1915)



Nikolai G. Basov  
(born 1922)



Aleksandr M. Prokhorov  
(born 1916)

Townes, Basov, and Prokhorov developed the principle of *light amplification by the stimulated emission of radiation (laser)*. They received the Nobel Prize in 1964.



# 背景简介



## 历史回顾

### Townes



**Arthur L. Schawlow (born 1921)**



**Theodore H. Maiman (born 1927)**

In 1958 Schawlow, together with Charles Townes, showed how to extend the principle of the maser to the optical region. He shared the 1981 Nobel Prize with Nicolaas Bloembergen. Maiman demonstrated the first successful operation of the ruby laser in 1960.



# 背景简介



## 历史回顾



**Charles H. Townes**  
(born 1915)



**Arthur L. Schawlow** (born 1921)





# 背景简介



## 历史回顾

1949 年Townes接受Rabi的offer来到哥伦比亚大学工作



Townes雇佣Schawlow（博士后），利用微波光谱研究有机化学



1951年Schawlow离开哥伦比亚到Bell lab（1951-1961），  
Townes开始研究微波激射器（Maser）



1960年Maiman发明激光器  
1964年Townes获得诺贝尔奖

1961年Schawlow（40岁）来到斯坦福工作主要从事激光光谱的研究





# 背景简介



## 历史回顾

1970 年Schawlow雇佣Hansch（博士后），开始一段长期的合作。



1981年Schawlow获得诺贝尔奖（激光光谱）



2005年Hansch获得诺贝尔奖（精密光谱和光梳）



2001年Hansch 的学生Carl Wieman获得诺贝尔奖（玻色爱因斯坦凝聚）



下一个是谁？





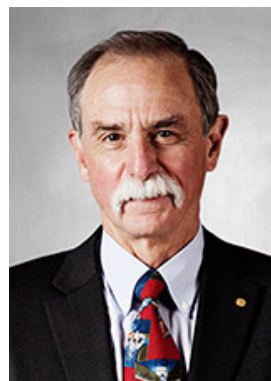
# 背景简介



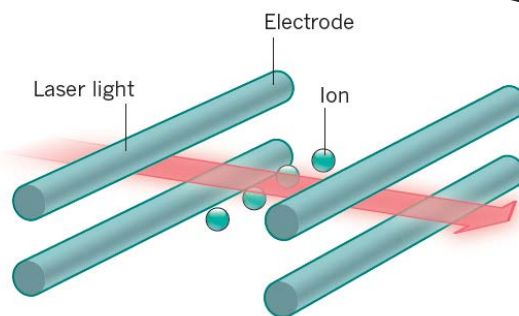
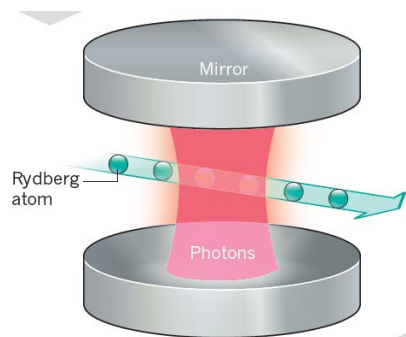
## 历史回顾-2012 诺贝尔物理学奖 操纵单个量子粒子



Serge Haroche



David J. Wineland



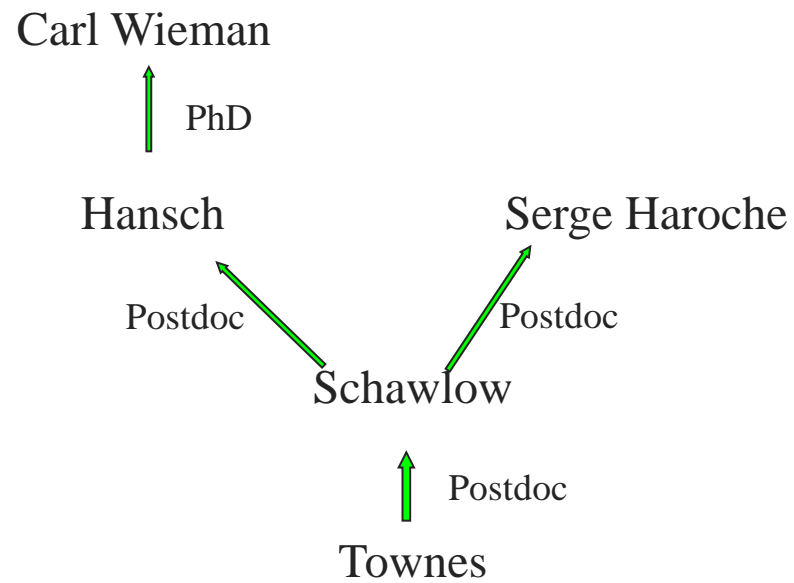
Schawlow的博士后  
(1972-1973)



# 背景简介



## Family tree





# 简介



## 光学微腔的理论概念

品质因子

$$Q = \omega_0 \frac{U}{P} = -\omega_0 \frac{U}{dU/dt} \quad (1)$$

$P = -dU/dt$  为耗散功率

$U$ 为腔内存贮能量

品质因子是光学谐振腔的一个最基本的物理量，用于表征谐振腔的损耗或其存储光能的能力。

光子寿命

$$U(t) = U_0 e^{-\omega_0 t / Q} \quad (2)$$

定义腔内能量衰减至其初始值的 $1/e$ 时，所需要的时间为光子寿命。

$$\tau = \frac{Q}{\omega_0}$$

则  $U(t) = U_0 e^{-t/\tau} \quad (3)$





# 简介



## 光学微腔的理论概念

由 (3) 式

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 e^{-t/2\tau} \cos(\omega_0 t) \\ &= \frac{E_0}{2} [e^{-t/2\tau} (e^{i\omega_0 t} + e^{-i\omega_0 t})] \\ &= \frac{E_0}{2} [e^{i(\omega_0 + \frac{i}{2\tau})t} + e^{-i(\omega_0 - \frac{i}{2\tau})t}] \end{aligned}$$

$E(t)$  的傅里叶变换为

$$\begin{aligned} E(\omega) &= \int_0^{+\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt \\ &= \frac{E_0}{2} \left[ \frac{i}{\omega_0 - \omega + \frac{i}{2\tau}} - \frac{i}{\omega_0 + \omega - \frac{i}{2\tau}} \right] \end{aligned}$$

当  $\omega \approx \omega_0$  时

$$|E(\omega)|^2 \propto \frac{1}{(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{4\tau^2}} \quad (4)$$

式(4)为洛仑兹线型，其峰值下降至一半时对应的频率间隔称为半高宽(或线宽)。

$$\delta\omega = 1/\tau = \frac{\omega_0}{Q} \quad (5)$$



# 简介



## 光学微腔的理论概念

共振条件:

$$nL = m\lambda = m \frac{c}{f} = m \frac{2\pi c}{\omega} \quad (6)$$

其中 $m$ 为正整数，对应于不同的共振模式。 $n$ 是折射率， $L=2l$ （ $l$ 腔镜的距离）

自由光谱范围（FSR）：

相邻谐振模式的频率或波长间隔

$$FSR(\lambda) = \Delta\lambda = \lambda^2 / (nL) \quad (7)$$

若以角频率表示自由光谱范围：

$$FSR(\omega) = \Delta\omega = 2\pi c / (nL) \quad (8)$$

若以频率表示自由光谱范围：

$$FSR(\nu) = \Delta\nu = c / (nL) \quad (9)$$



# 简介



## 光学微腔的理论概念

光在腔内的单程往返时间(Round trip time)为  $T_{rt}$

$$T_{rt} = L/(c/n) = nL/c$$

由 (8)、(9) 式子得

$$FSR(\omega) = 2\pi/T_{rt}$$

$$FSR(\nu) = 1/T_{rt} \quad (10)$$

若以角频率表示自由光谱范围:

$$FSR(\omega) = 2\pi c/(nL)$$

若以频率表示自由光谱范围:

$$FSR(\nu) = c/(nL)$$

自由光谱范围 (以频率表示) 等于单程往返时间的倒数。





# 简介



## 光学微腔的理论概念

光在腔内的单程往返时间(Round trip time)为  $T_{rt}$

$$T_{rt} = L/(c/n) = nL/c$$

由式 (8)、(9) 得

$$FSR(\omega) = 2\pi/T_{rt}$$

$$FSR(\nu) = 1/T_{rt} \quad (10)$$

自由光谱范围（以频率表示）等于单程往返时间的倒数。

精细度：

自由光谱范围与半高宽之比

$$F = \frac{\Delta\omega}{\delta\omega}$$

由式 (8)、(10) 得

$$F = 2\pi \frac{\tau}{T_{rt}}$$

精细度等于光在光子寿命内在腔内往返的次数  $N = \frac{\tau}{T_{rt}}$  乘以  $2\pi$



# 简介



## 光学谐振腔的理论概念

对Q、F的一点思考

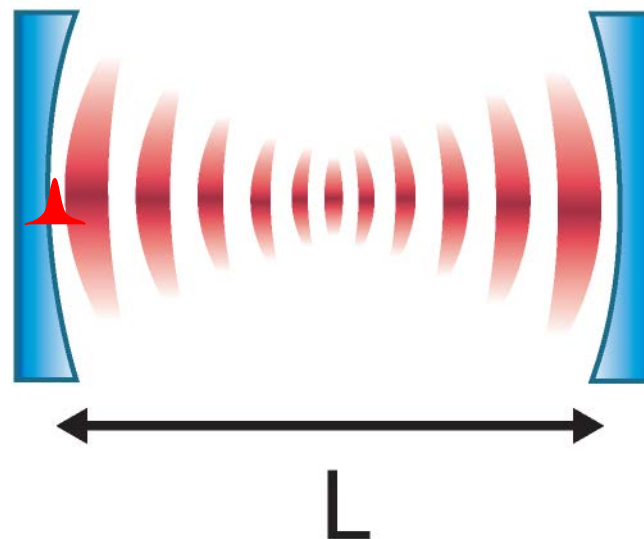
$$N = \frac{\tau}{T_{rt}} = \frac{Q/\omega}{nL/c} = \frac{Q}{\omega nL/c} = \frac{QFSR(\omega)}{\omega 2\pi}$$
$$= \frac{Q}{2\pi m}$$

$$Q = 2\pi m N$$

$$\frac{Q}{F} = m = \frac{\omega}{FSR(\omega)}$$

$$Q = \omega \tau = 2\pi m N$$

$$F = 2\pi N$$



$$\omega = \pi m c / (nL)$$

哪一个更好的物理量？



# 简介



## 光学谐振腔的理论概念

Q的极限

$$P = P_0 e^{-\alpha L}$$

$\alpha$ 表示损耗（吸收、散射等）

$$\text{当 } \frac{P}{P_0} = e^{-1} \text{ 时}$$

$$L_0 = \frac{1}{\alpha}$$

$$\tau = \frac{L_0}{c/n} = \frac{n}{\alpha c}$$

## 作业

1. 已知光纤（氧化硅）在1.55微米波长的损耗约为0.2 dB/Km，计算用氧化硅制备的光学微腔的Q的极限是多少？
2. Family Tree →  
I. I. Rabi..... Eric Cornell, Carl Wieman