



电子科技大学

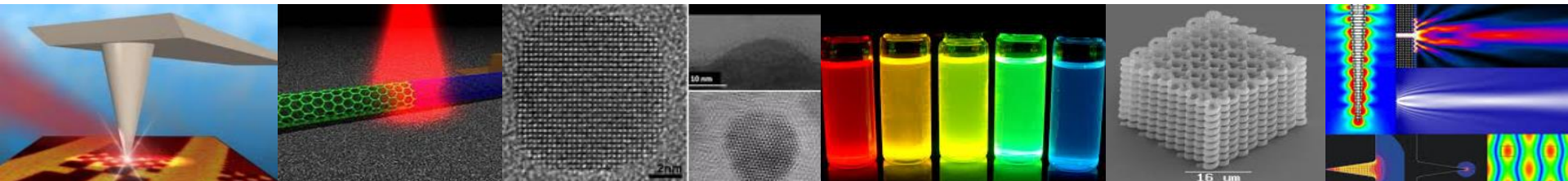
University of Electronic Science and Technology of China

纳米光子学及其应用

第9讲：局域表面等离激元

兰长勇

光电科学与工程学院



回顾

- ▶ SPP的激发：**相位匹配** $k_{x,d} = \beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$

由于 $\beta > \sqrt{\epsilon_d} k_0 = n_d k_0$, $k_{z,d} = \sqrt{n_d^2 k_0^2 - k_{x,d}^2} = i\kappa$

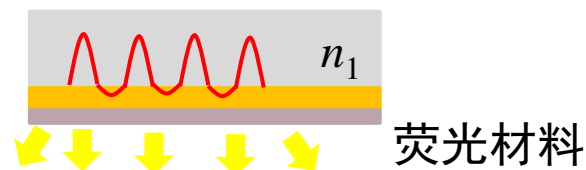
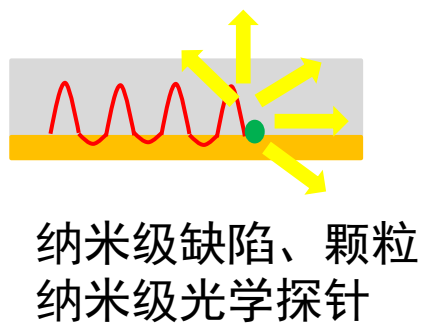
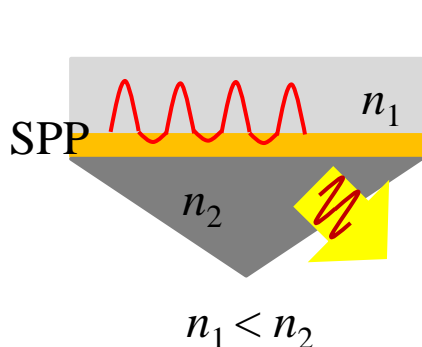
与金属接触介质中的波必须是**倏逝波**才能激发SPP

倏逝波：传播方向波数大于对应介质中的波数 ($k_x > k$)

产生SPP的方法：全内反射棱镜耦合、光栅耦合、散射激发等等。

- ▶ SPP的表征

原理：泄漏辐射、散射作用、荧光成像



等离子体光学

- ▶ 金属光学与体积等离子激元
- ▶ 表面等离子体激元
- ▶ 表面等离子体激元的激发与表征
- ▶ 局域表面等离子体
- ▶ 等离子体集成电路

本讲内容

- ▶ 引言：光与小尺寸物体的相互作用
 - ▶ 金属纳米粒子的局域表面等离子体(Localized Surface Plasmon, LSPs)
 - ▶ LSP与SPP的差异
 - ▶ 金属纳米粒子的色彩效果
 - ▶ 各种金属纳米粒子
 - ▶ LSP的共振条件($d \ll \lambda$)
 - ▶ 偶极辐射问题
 - ▶ LSP的纳米粒子(准静态近似)
 - ▶ LSPR的大小和形状依赖性(Mie理论)
 - ▶ LSP的纳米棒
 - ▶ LSP粒子之间的耦合
 - ▶ LSP的复杂纳米结构-球壳
 - ▶ 体积等离子体、SPP和LSP的比较
-

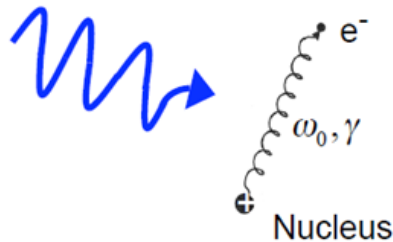
0 引言

光与小尺寸物体的相互作用：**散射**

- 分子：光场驱动下的偶极辐射
- 纳米颗粒 —— **偶极子近似**
 - 绝缘体：瑞利散射
 - 半导体：光谱大于能隙对应共振吸收、发光（尺寸依赖）
 - 金属：在表面等离子体频率处共振吸收——**局域表面等离子体**
- 微米颗粒
 - 同波长同量级或大于波长

绝缘体(介质)小颗粒偶极子近似

- 光场驱动介质中的束缚电子做简谐振动
 - 束缚电子——洛伦兹模型



γ : 阻尼频率

K : 回复力常数

$$\omega_0 = \sqrt{K/m}$$

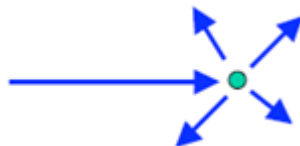
电偶极矩:

$$\mathbf{p} = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \mathbf{E}_L$$

驱动的振荡电场

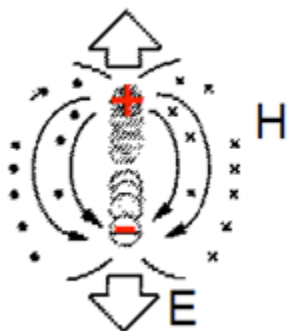
- 振动电荷对外辐射电磁波
 - 辐射的电磁波即为散射光

偶极辐射!

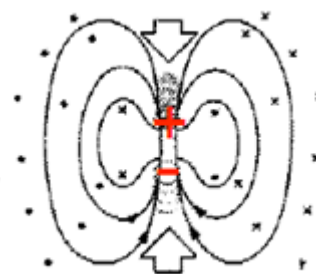


偶极子振荡产生电磁波

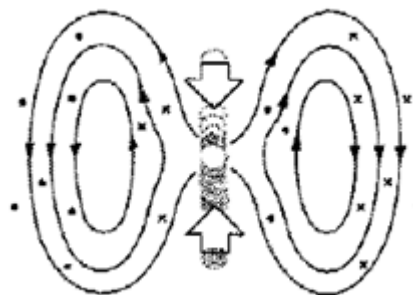
偶极子产生电磁辐射的过程：



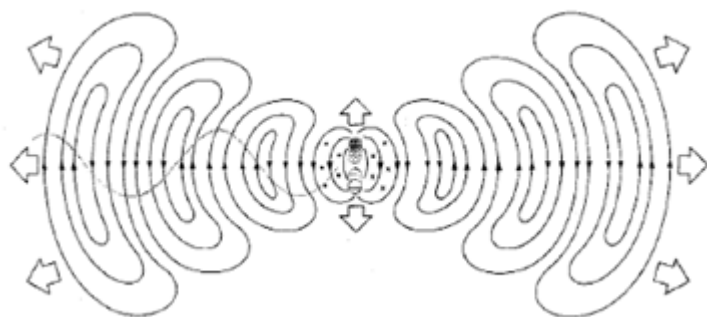
电场线从正电荷出发，终止于负电荷



电荷靠近，电场线闭合
(电场线不能相交)



开始向外辐射电磁波



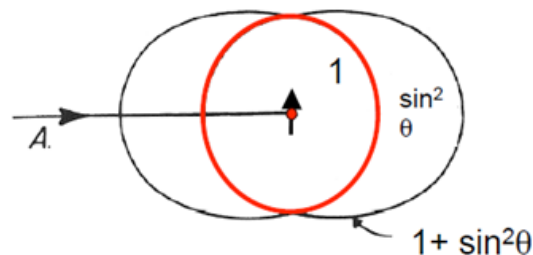
几个周期后，辐射方向与
电荷振动方向大致垂直



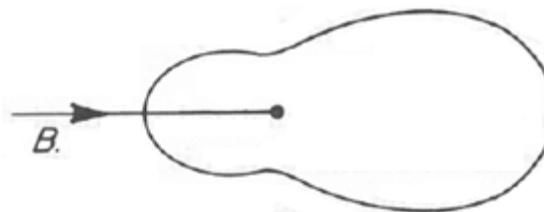


辐射电磁波与物体尺度关系

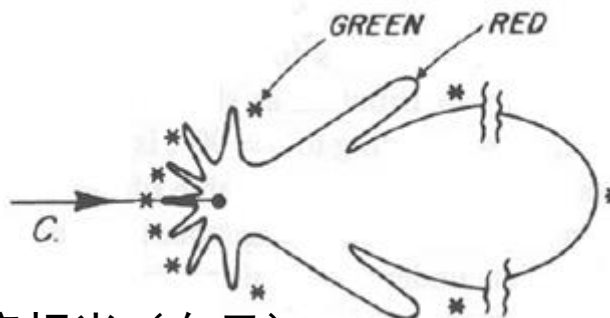
- 颗粒尺寸 $d \ll \lambda$



- 颗粒尺寸 $d \approx \lambda$
 - 向前散射强度更大



- 颗粒尺寸 $d \approx 2\lambda$
 - 很强的向前散射
 - 不同波长的光散射强度相当（白云）
 - 不同波长的光散射强度极值方向不同



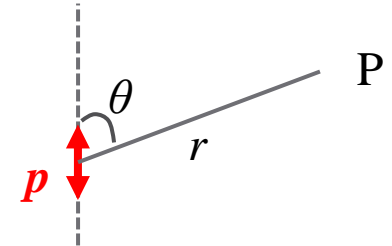
散射强度计算

- 偶极辐射强度：

$$I = \frac{p^2 \omega^4}{32\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \sin^2 \theta$$

- 洛伦兹模型——电偶极矩：

$$\mathbf{p} = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \mathbf{E}_L$$



- 洛伦兹模型偶极辐射强度：

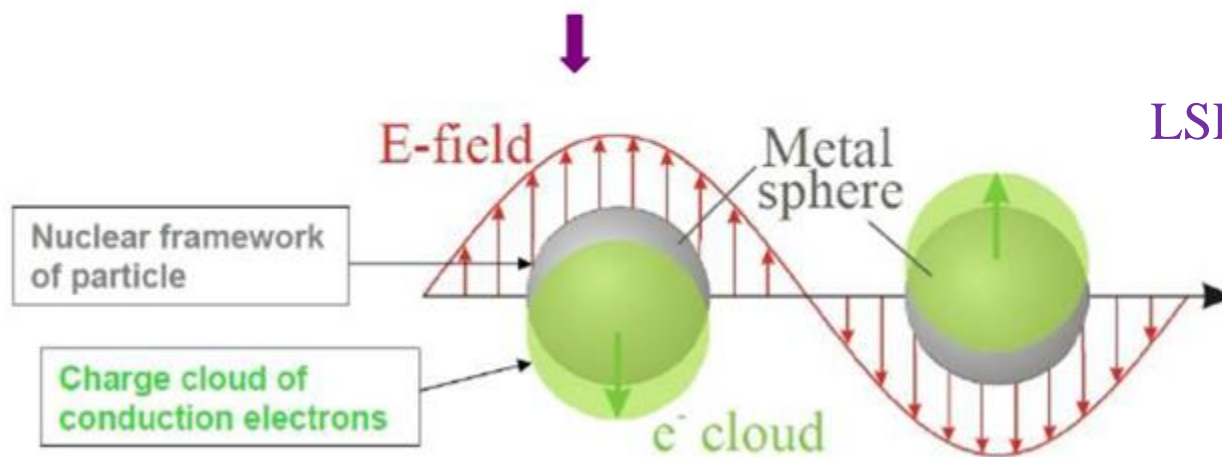
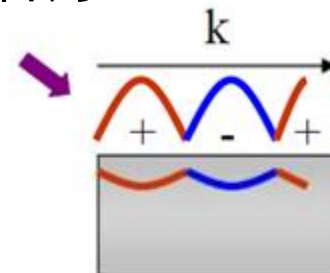
$$I_s = \frac{e^4 \omega^4}{32\pi^2 m^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \right)^2 E_L^2 \sin^2 \theta$$

Incoming intensity

- 结论
 - 谐振处（固有频率）散射最强
 - 频率越高（波长越短），散射越强
 - 同时存在向前散射和向后散射

1. LSPs: SPPs与LSPs的区别

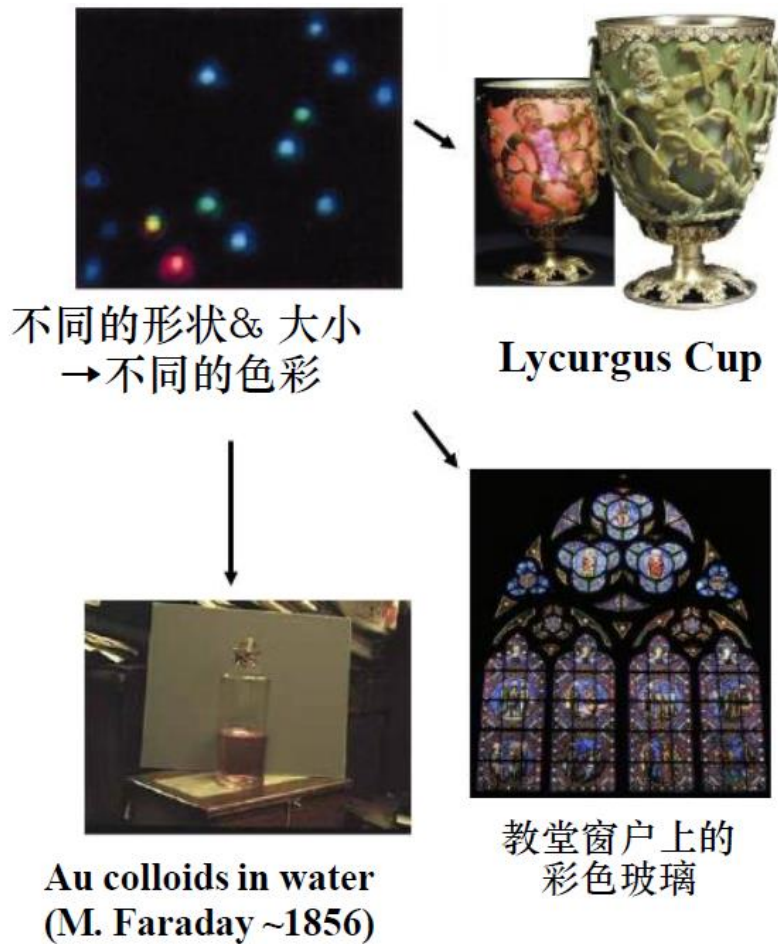
- **SPPs**: 在金属-电介质延展界面上的SP**传输**（光子耦合为SP）
- **LSPs**(Localized Surface Plasmons局域表面等离子体): 在金属纳米粒子/纳米空腔的封闭表面上**不传播**的SPs



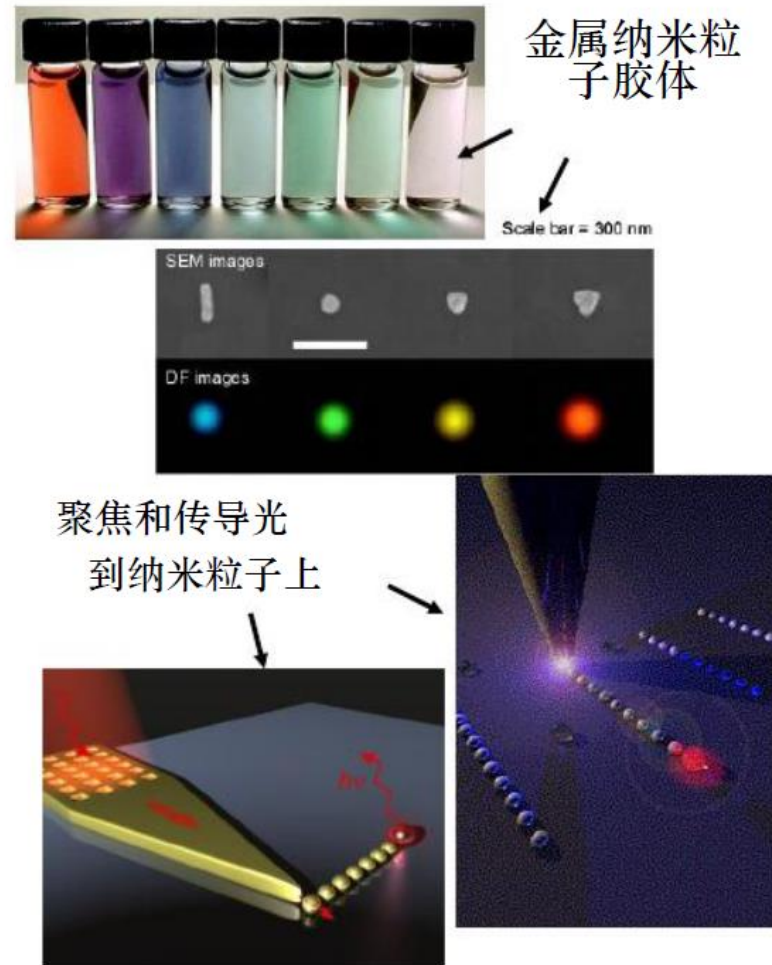
LSP被约束在粒子上

- LSP的激发将影响透过纳米粒子的光的
消光（= 吸收+散射）→ 色彩效果
消光比 = （吸收 + 散射）/入射

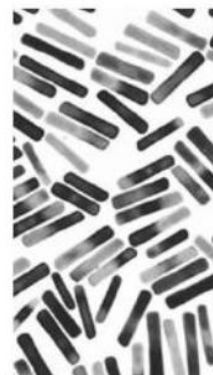
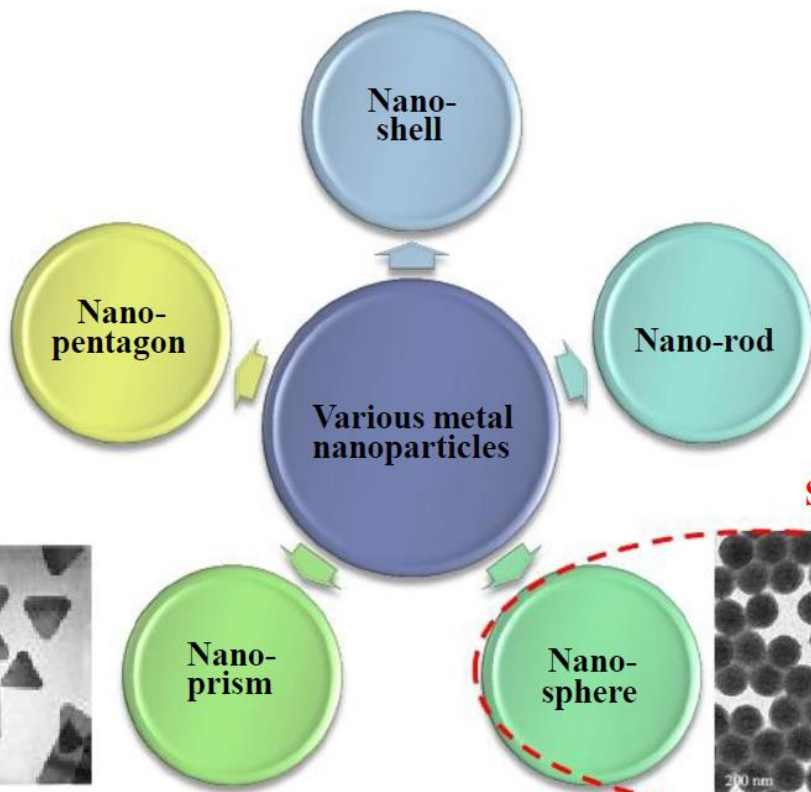
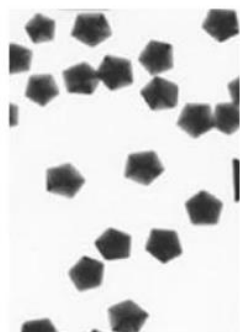
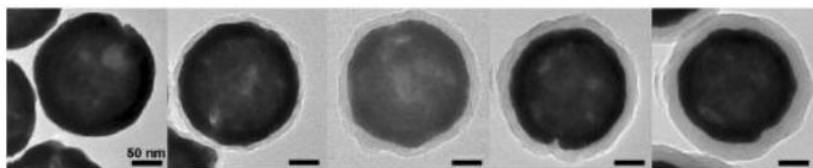
LSP效应-金属纳米粒子的色彩效果



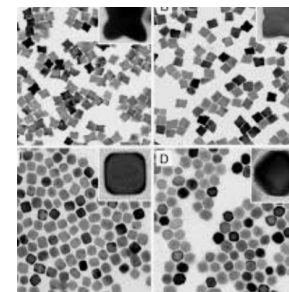
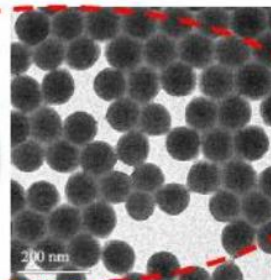
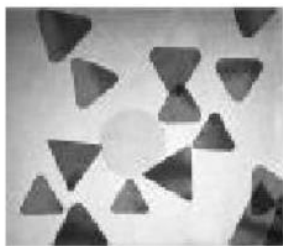
历史中



各种金属纳米粒子



Simplest to analyze



夏幼南(Younan Xia)
@GIT

- 胶体纳米晶及自组装

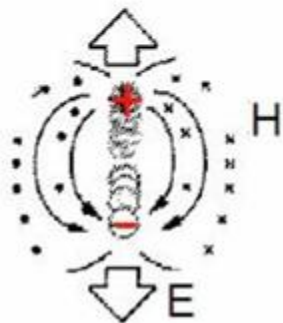
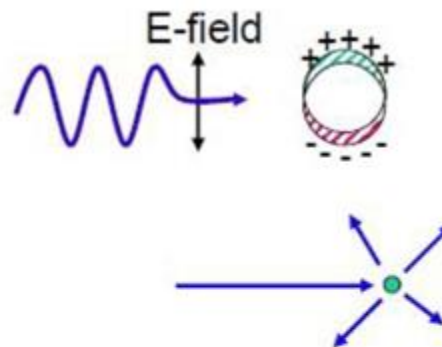
2. LSP共振条件

- 当金属纳米球足够小 ($d \ll \lambda$), 它可以被看作一个有效电偶极子

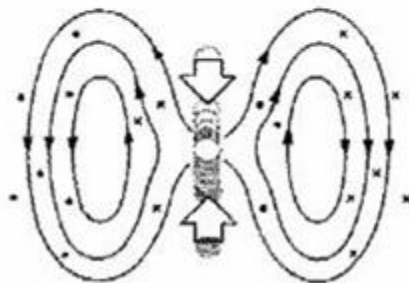
时谐电场驱动自由电子的简谐振荡



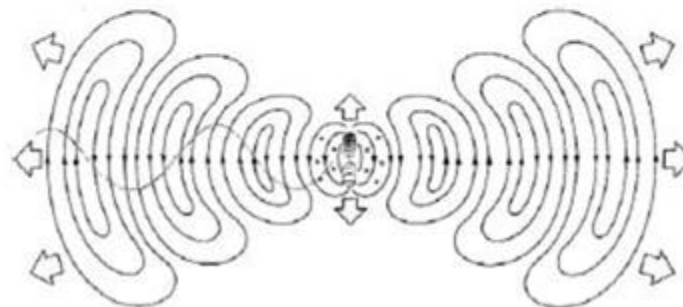
振荡偶极子辐射 (光散射)



开始振荡



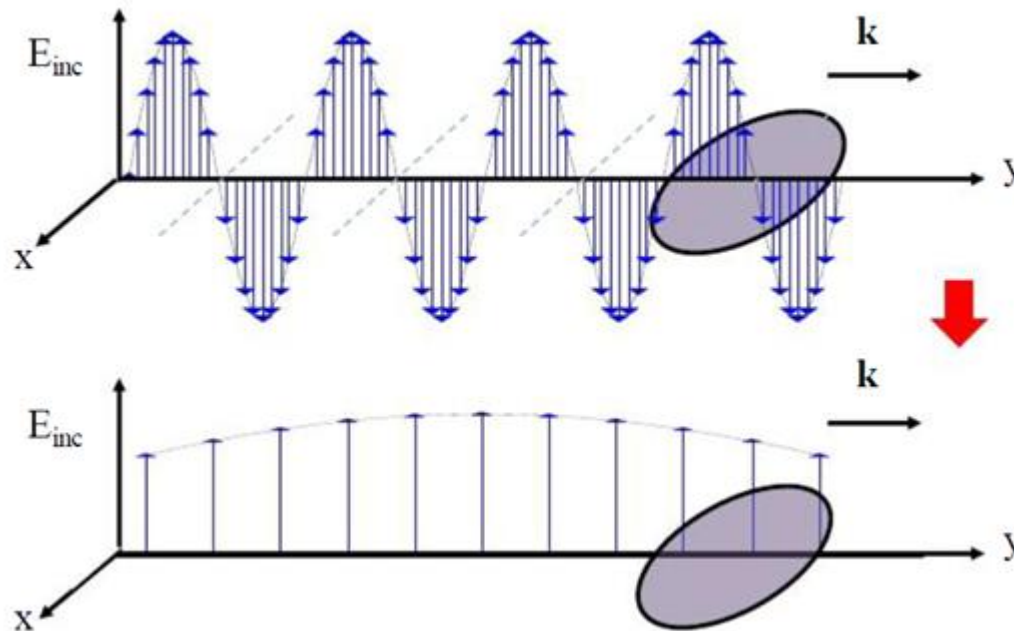
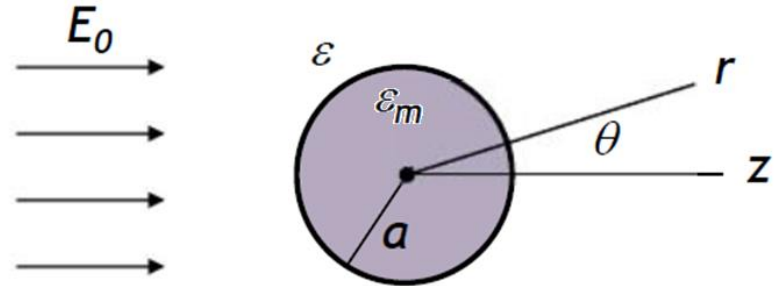
产生电磁波



几个周期后

纳米球的LSP

- 如果粒子足够小 ($2a \ll \lambda$)
→ 看做**电偶极子**
- **准静态近似**: 整个颗粒体的等相位



$$E_{inc}(r, t) = E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)}$$

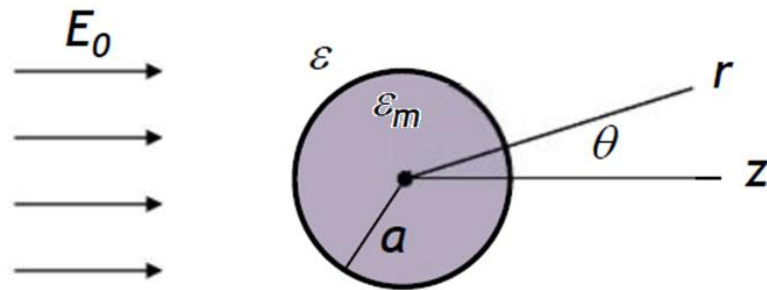
- 大颗粒
- 不同位置相位不同

$$E_{inc}(r, t) = E_0 e^{-i\omega t}$$

- 小颗粒
- 不同位置相位几乎相同

求解

- 入射：均匀静电场 $E_{\text{inc}} = E_0 \hat{z}$
- 球内电场(E_{in})和球外电场(E_{out})可以通过标势 Φ , 准静态下可利用 $E = -\nabla\Phi$ 得到



- 电势满足Laplace's方程： $\nabla^2\Phi = 0$
设球内标势为 Φ_{in} , 球外标势为 Φ_{out}

- 边界条件： $\Phi_{\text{in}}|_{r=a} = \Phi_{\text{out}}|_{r=a}$, $\epsilon_0 \epsilon_m \frac{\partial \Phi_{\text{in}}}{\partial r} \Big|_{r=a} = \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \Phi_{\text{out}}}{\partial r} \Big|_{r=a}$, $\lim_{r \rightarrow \infty} \Phi_{\text{out}} = -E_0 z$

- 方程的解：

$$\Phi_{\text{in}} = -E_0 r \cos \theta + \frac{\epsilon_m - \epsilon}{\epsilon_m + 2\epsilon} \cdot E_0 r \cos \theta = -\frac{3\epsilon}{\epsilon_m + 2\epsilon} E_0 r \cos \theta$$

$$\Phi_{\text{out}} = \underbrace{-E_0 r \cos \theta}_{\text{作用场}} + \underbrace{a^3 \cdot \frac{\epsilon_m - \epsilon}{\epsilon_m + 2\epsilon} \cdot E_0 \cdot \frac{\cos \theta}{r^2}}_{\text{球心处有效偶极子}}$$

为什么？

LSP共振

- 球内的电场为: $\mathbf{E}_{\text{in}} = -\nabla\Phi_{\text{in}} = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} \mathbf{E}_0$ 常数
- 球内的电位移: (考虑偶极子位于介电常数为 ε 的介质中)

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_m \mathbf{E}_{\text{in}} = \varepsilon_0 \mathbf{E}_{\text{in}} + \mathbf{P}_\varepsilon + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}_{\text{in}} + \mathbf{P}$$

- 偶极子对应电极化强度:

$$\Rightarrow \mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_m - \varepsilon) \mathbf{E} = 3\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} \mathbf{E}_0$$

- 球对应的电偶极矩:

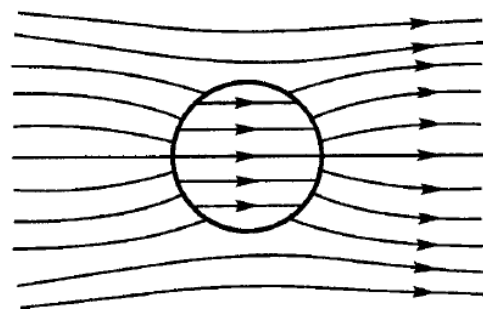
$$\mathbf{p} = \mathbf{P}V = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon a^3 \mathbf{E}_0$$

- 电偶极矩产生的电势:

$$\Phi_{\text{out}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = a^3 \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} \cdot E_0 \cdot \frac{\cos\theta}{r^2}$$

- 总的电势:

$$\Phi_{\text{out}} = -E_0 r \cos\theta + a^3 \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} \cdot E_0 \cdot \frac{\cos\theta}{r^2}$$



LSP共振

- 极化率 (α) 的定义为: $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \varepsilon \alpha \mathbf{E}_0$

$$\therefore \mathbf{p} = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon a^3 \mathbf{E}_0$$

$$\therefore \alpha = 4\pi a^3 \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon}$$

$\varepsilon_m = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega)$
金属的介电常数

ε 背景介质的介电常数

- 谐振增强条件:

$$|\varepsilon_m(\omega) + 2\varepsilon| = \text{最小值} \quad \leftarrow \text{被称为 “Fröhlich条件”}$$

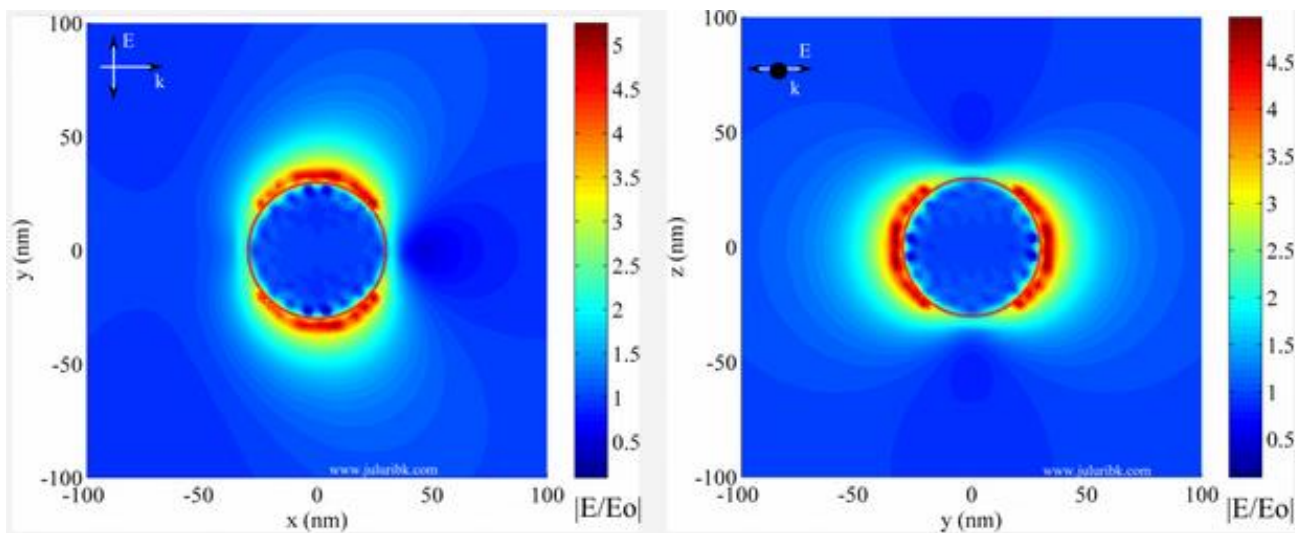
- 理想Drude金属:

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \rightarrow \quad \boxed{\omega_{\text{lsp}} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2\varepsilon}}} \quad \rightarrow \text{可以用于传感}$$

LSP共振

- 电场可以通过 $E = -\nabla\Phi$ 得到:

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon_m + 2\varepsilon} \mathbf{E}_0 \quad \mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{E}_0 + \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \frac{1}{r^3} \quad \left(\text{其中: } \mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}}{r} \right)$$



60nm Au sphere in water, 532nm

- 共振时，消光比（散射+吸收）较大 消光比=（散射光+吸收光）/入射光
- **近场增强**→有许多重要应用，如传感，表面增强拉曼散射，非线性增强，数据存储，...

偶极子辐射

- $a \ll \lambda$ 准静态下, 小球等效为理想偶极子
- 在时变电场作用下, 电场感应出振荡偶极矩:

$$\mathbf{p}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon \alpha \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}$$

- 偶极辐射 \rightarrow 对电磁波的散射

- 散射电磁波: $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}e^{-i\omega t}, \quad \mathbf{E}(t) = \mathbf{E}e^{-i\omega t}$ (其中: $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}}{r}$)

- 其中:

$$\mathbf{H} = \frac{ck^2}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr}\right), \quad \text{其中: } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \left\{ k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} + [3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}] \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr} \right\}$$

辐射区: $kr \gg 1$

近场区域: $kr \ll 1$

$$\mathbf{H} = \frac{ck^2}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \quad \text{球面波}$$

$$\mathbf{H} = \frac{i\omega}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{1}{r^2}$$

$$\mathbf{E} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0\varepsilon}} \mathbf{H} \times \mathbf{n} \quad \text{行波场: } \mathbf{E} \perp \mathbf{n}, \mathbf{H} \perp \mathbf{n}$$

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{1}{r^3}$$

偶极子辐射

近场区域: $kr \ll 1$

$$\mathbf{H} = \frac{i\omega}{4\pi} (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{1}{r^2} \quad \text{仅有横向分量} (\mathbf{H} \perp \mathbf{n), \text{虚数}} \quad \left(\text{其中: } \mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}}{r} \right)$$

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{1}{r^3} \quad \text{电场远大于磁场, 准静态下, 磁场消失}$$

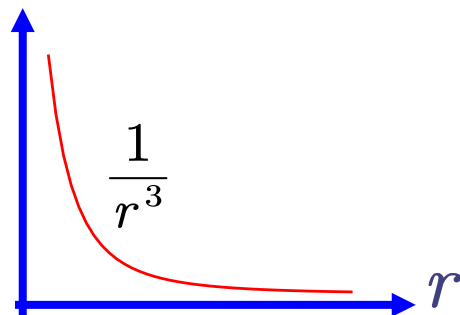
近场类似于纯电场!

$$\text{纵向 } E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{p \cos\theta}{r^3}$$

$$\text{横向 } E_\theta = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{p \sin\theta}{r^3} \quad \text{忽略时谐因子} \exp(-i\omega t), \text{近场区电场表达式同偶极子电场表达式一致, 准静电场}$$

$$\text{辐射能流密度: } \bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}) = 0$$

近场不辐射能量, 远场辐射。近场是一种隐失场
角谱丰富



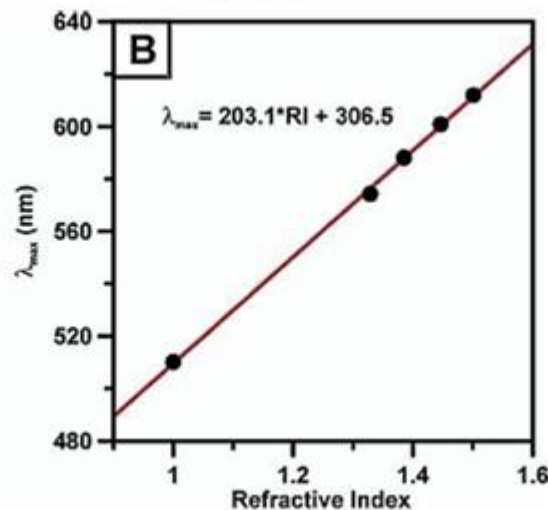
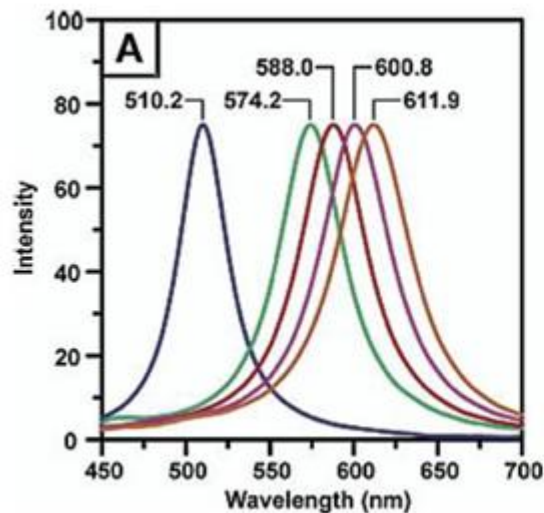
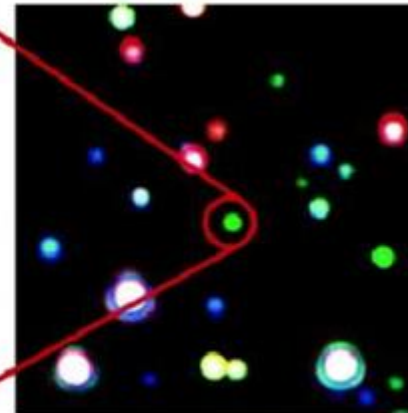
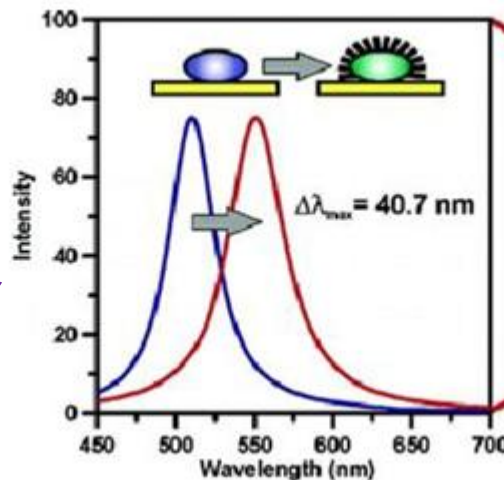
光照射在纳米颗粒上可以激发隐失场, 如果颗粒位于金属-介质界面, 便可以激发表面等离激元; 反过来, 表面等离激元可以在纳米颗粒中激发偶极辐射, 从而实现束缚电磁场向辐射电磁场的转换。

LSP共振应用实例——单分子检测

消光谱

检测35nmAg纳米球

单层小分子吸附在Ag
纳米粒子上



谐振峰变化与周围介质的折射率
变化成比例

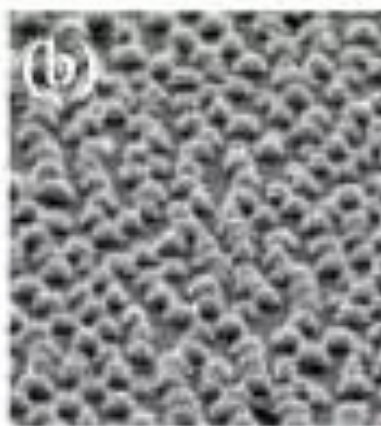
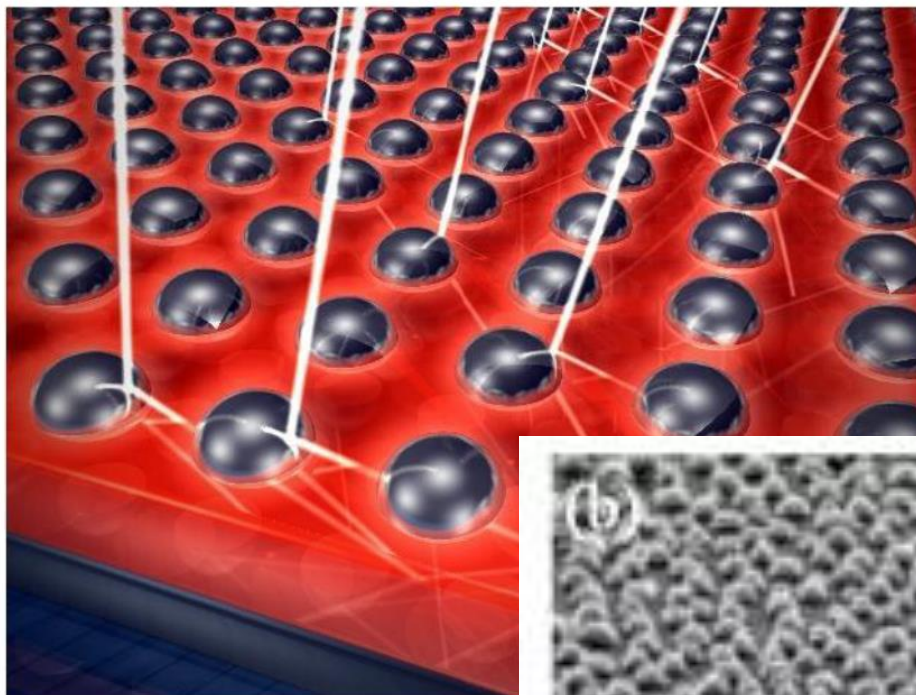


改变周围介质折射率

McFarland and Duyne, Nano Lett. **3**, 1057(2003).

应用实例——太阳能电池

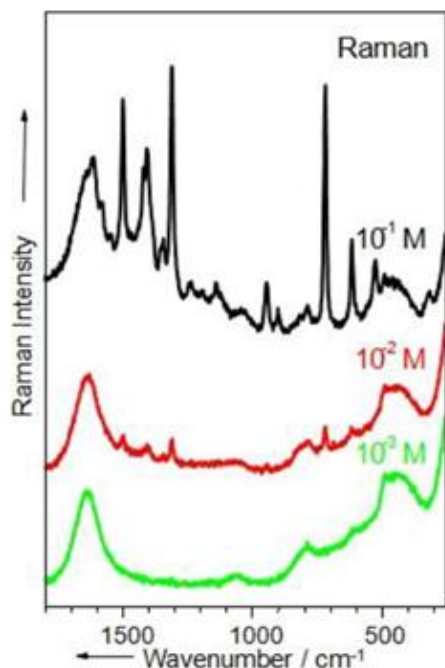
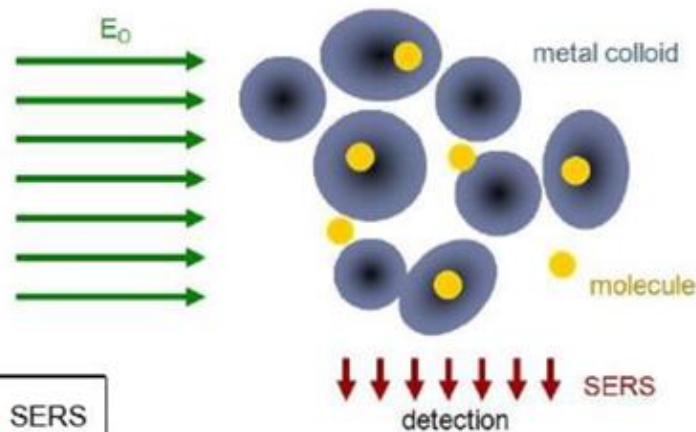
在太阳能电池中通过金属纳米粒子集光：**散射**增强光进入活性介质的量；**局域场增强**，增强光与活性介质相互作用



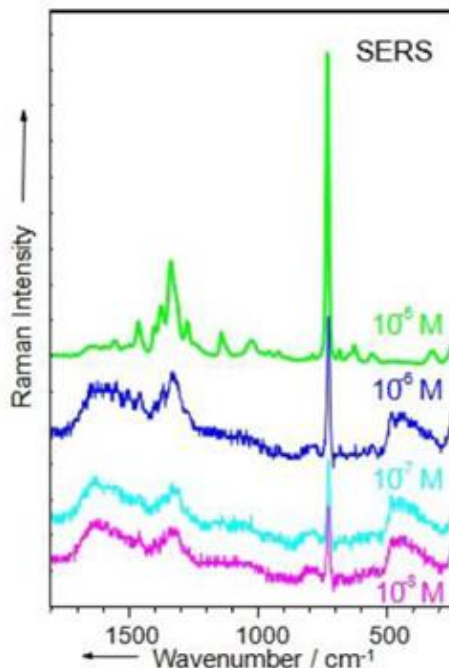
应用实例——拉曼增强光谱

表面增强拉曼光谱 (SERS)

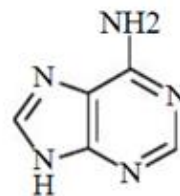
使被测定物的拉曼散射产生极大的增强效应。其增强因子可达 $10^3 \sim 10^7$



没有金属纳米颗粒



有金属纳米颗粒



Adenine
腺嘌呤

SERS增强检测极限

LSPR的尺寸和形状相关性

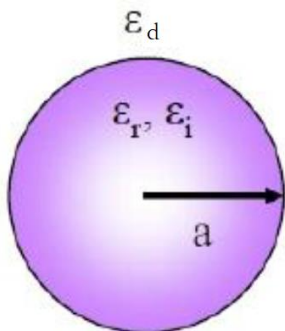
- 准静态近似仅对在可见光和近红外光频段尺寸小于100nm纳米粒子有效, 无法捕捉尺寸的相关性。
- 对纳米球的严格分析-Mie理论



Mie theory (1908): 尺寸相关

$$E(\lambda) = \frac{24\pi^2 N a^3 \epsilon_d^{3/2}}{\lambda \ln(10)} \left[\frac{\epsilon_i}{(\epsilon_r + \chi \epsilon_d)^2 + \epsilon_i^2} \right]$$

形状相关



$E(\lambda)$ = Extinction spectrum = absorption + scattering

χ = shape factor (2 for sphere, > 2 for spheroid)

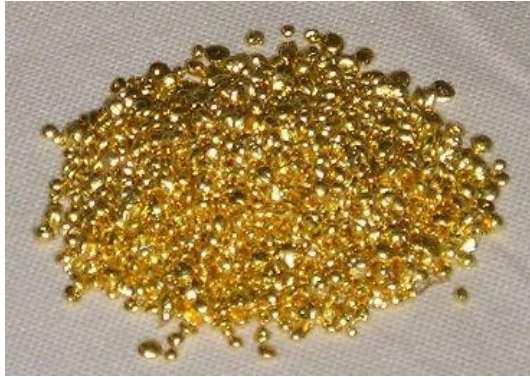
ϵ_d = external dielectric constant

ϵ_r = real metal dielectric constant

ϵ_i = imaginary metal dielectric constant

Mie, *Ann. Phys.* 1908, 24, 377

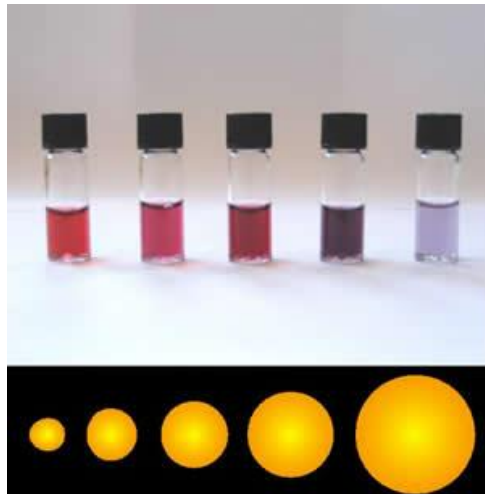
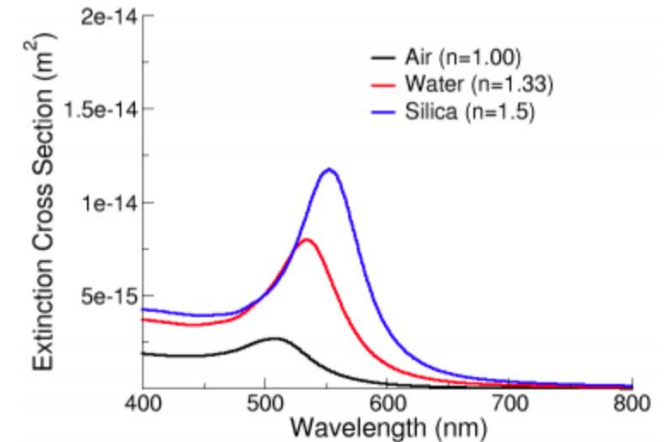
Au颗粒的消光与颗粒大小、环境的关联



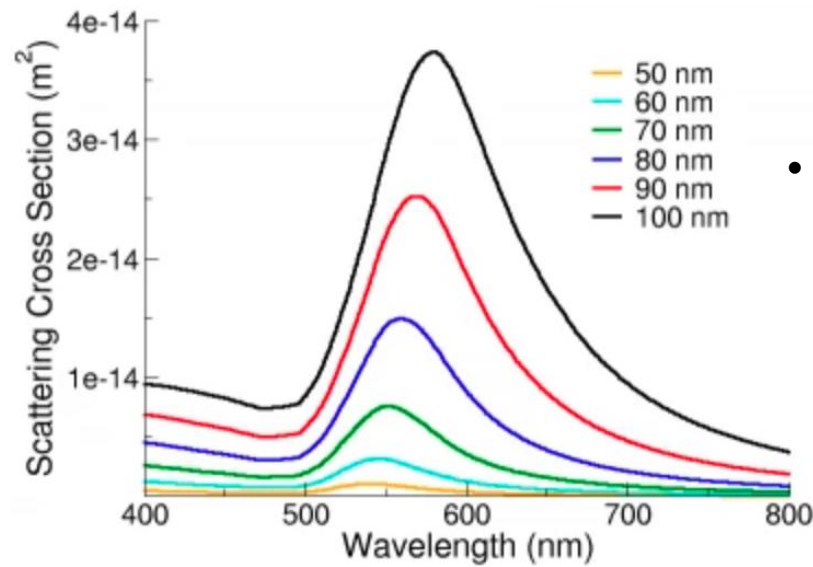
Au pellet



Au nanopowder



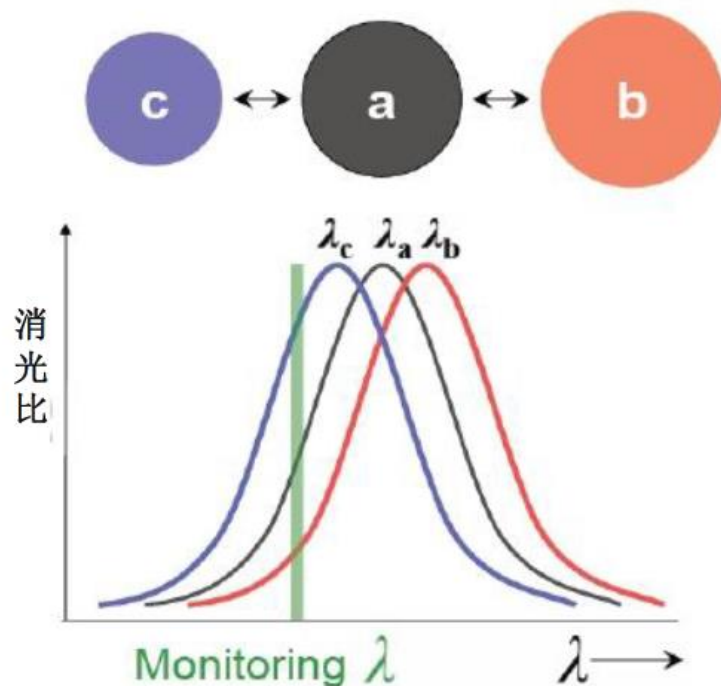
Au nanopowder in water



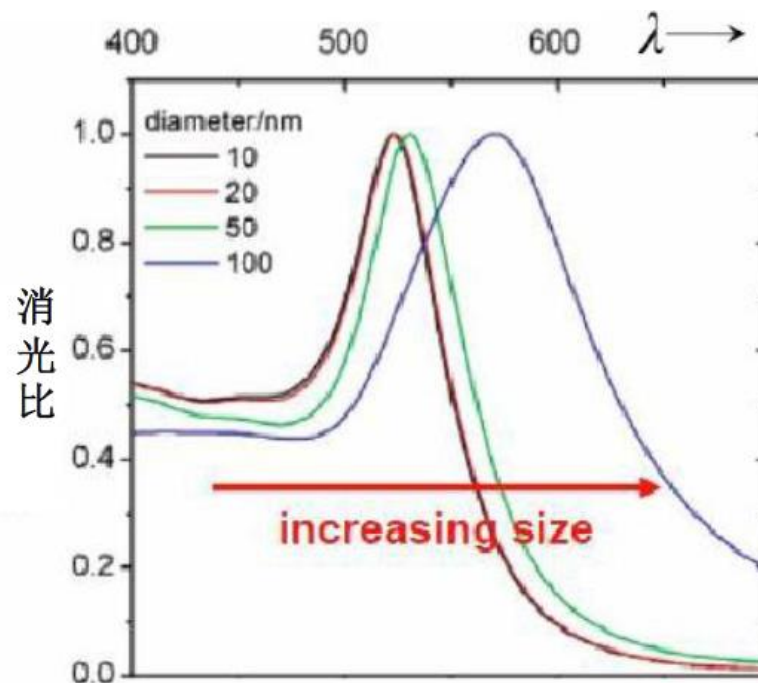
- often used as bioimaging tags in dark field microscopy techniques

<https://nanocomposix.com/pages/gold-nanoparticles-optical-properties#target>

尺寸相关性



理论模型



测量

定性地理解尺寸的依赖性:

纳米球尺寸 $\uparrow \Rightarrow$ 电荷距离 $\uparrow \Rightarrow$ 回复力 $\downarrow \Rightarrow$ 共振频率 $\omega \downarrow \Rightarrow$ 共振波长 \uparrow

形状相关性

- 纳米椭球/纳米棒的响应 - **Gans 理论** (Mie理论的扩展)

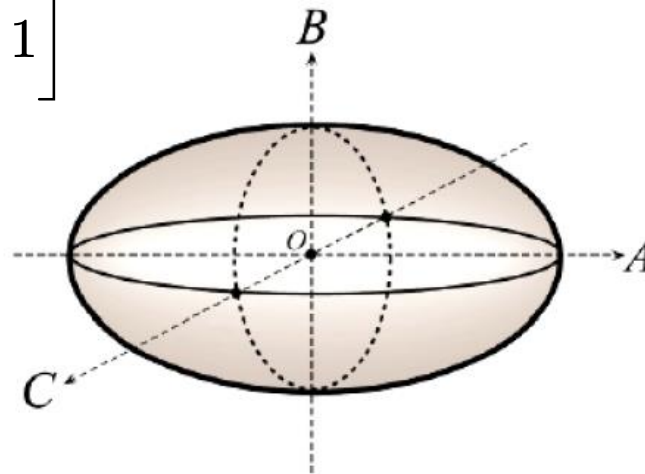
消光系数 $\sigma_{\text{ext}} = \frac{2\pi V \epsilon_{\text{med}}^{3/2}}{3\lambda} \sum_j \frac{\frac{1}{P_j^2} \epsilon''}{\left(\epsilon' + \frac{1-P_j}{P_j} \epsilon_{\text{med}} \right)^2 + (\epsilon'')^2} \quad (A > B = C)$

去极化因子: $P_A = \frac{1-e^2}{e^2} \left[\frac{1}{2e} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) - 1 \right]$

$$P_B = P_C = \frac{1-P_A}{2}$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{A} \right)^2}$$

纵横比: $R = \frac{A}{B}$



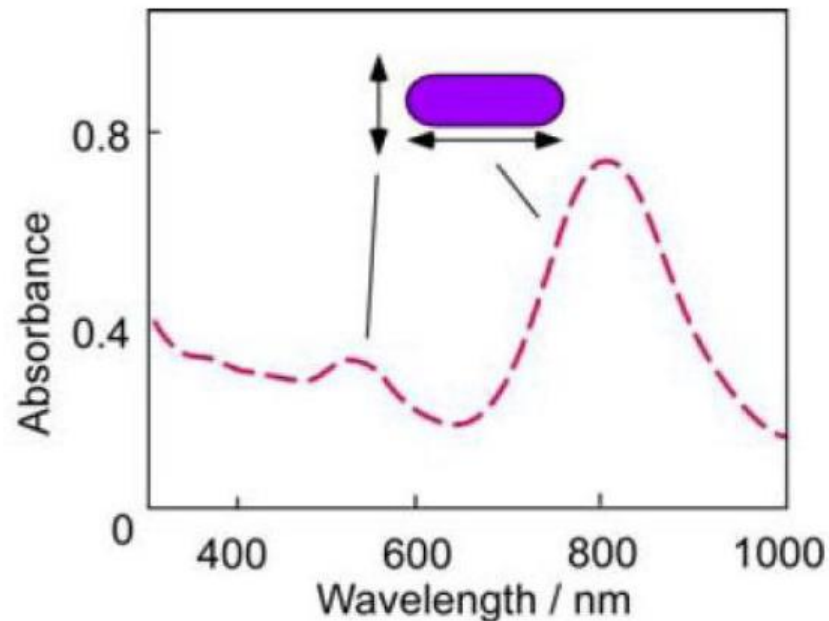
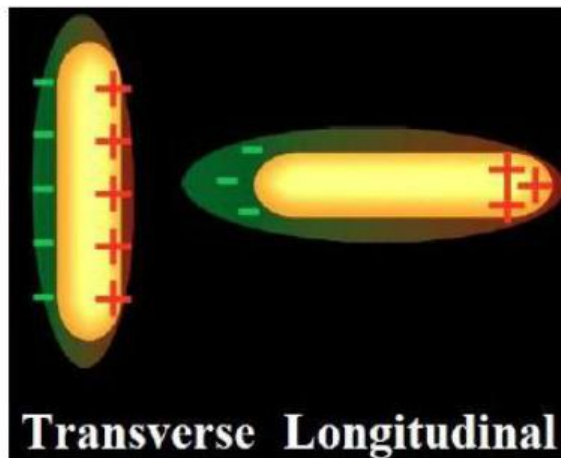
Link et al., J. Phys. Chem. B **103**, 3073 (1999).

形状相关性

消光比光谱中有**两个极大值**，对应的两个谐振模式：

-**纵模**(偶极振荡沿长轴方向)

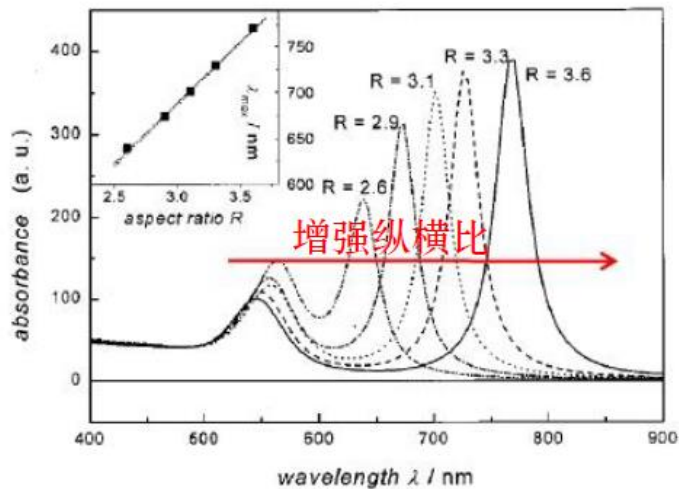
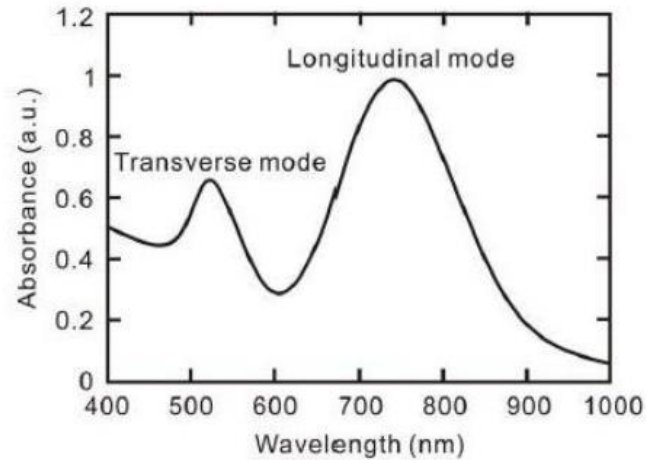
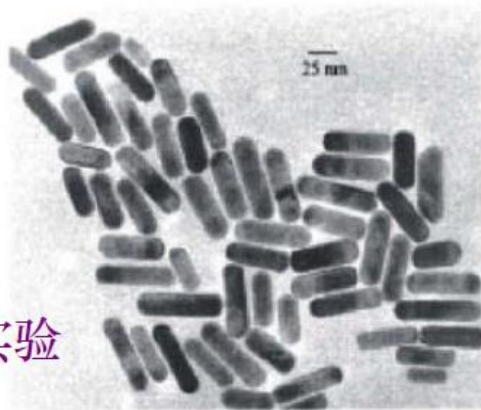
-**横模**(偶极振荡沿短轴方向)



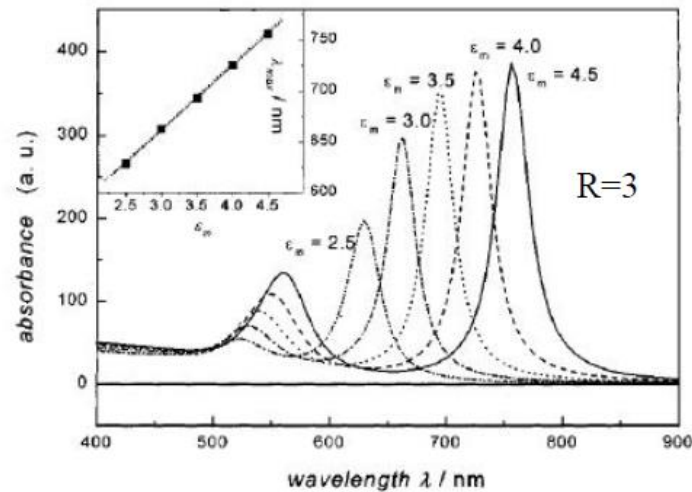
Gold nanorods show two absorption peaks;
Visible region: 520-530 nm, Transverse Mode
Near-infrared region: 700-1500 nm, Longitudinal Mode

金纳米棒的横模和纵模

金纳米棒实验

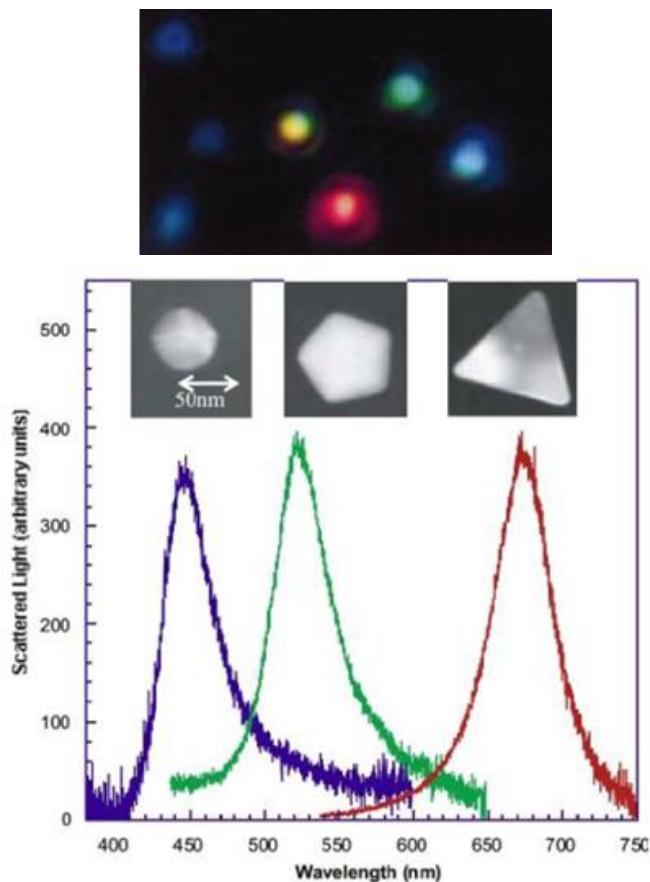


纵横比的相关性



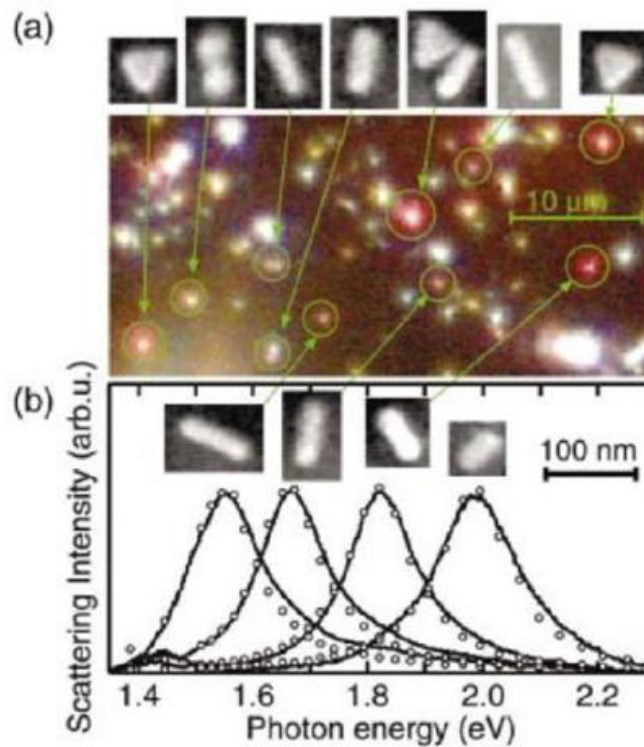
周围媒质的相关性

不同形状金属纳米颗粒的散射光谱



Mock et al., J. Chem. Phys. **116**, 6755 (2002).

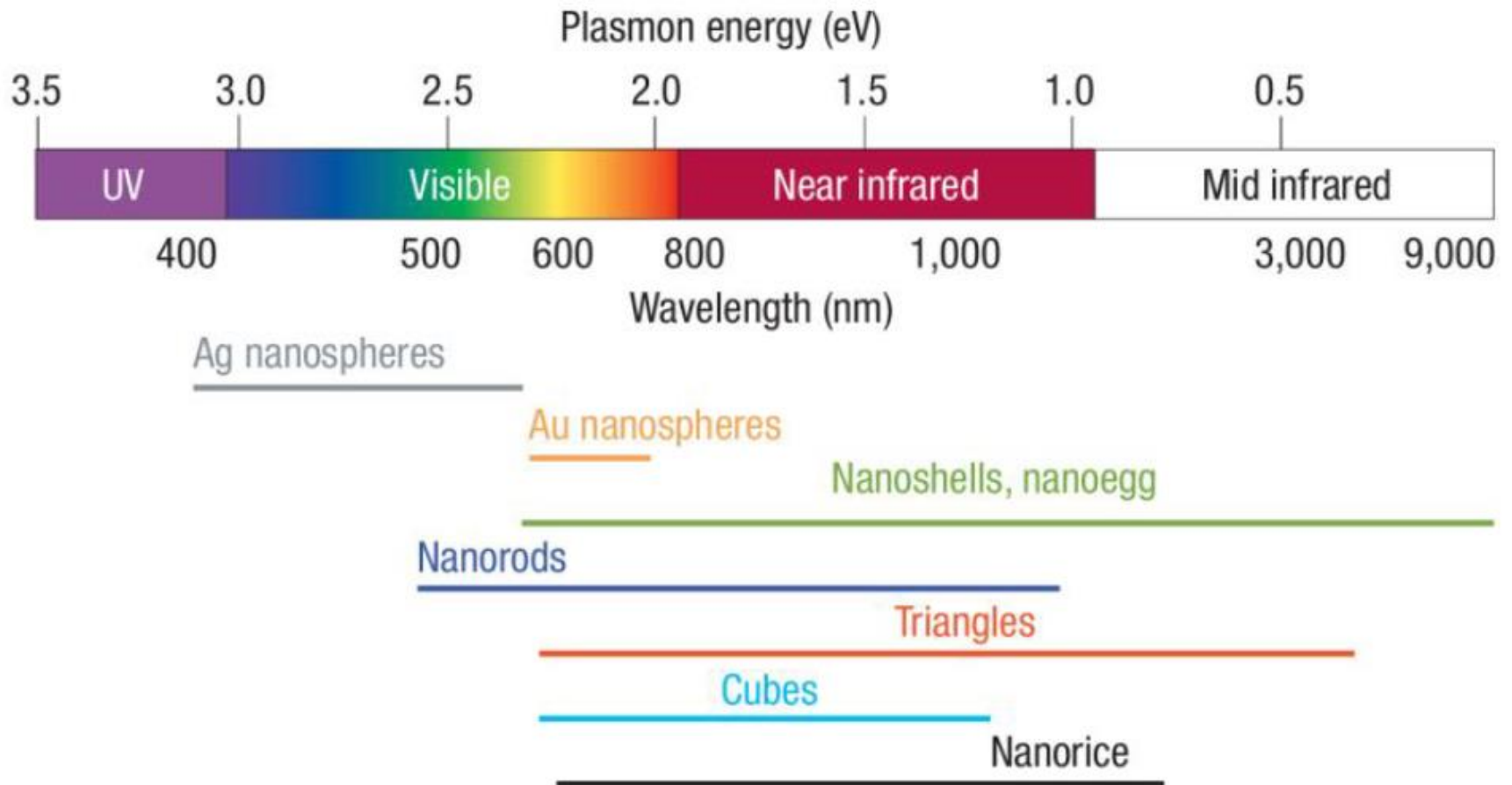
Ag纳米颗粒



Kuwata et al., APL **83**, 4625 (2003).

Au纳米颗粒

颗粒形状变化时LSPR的范围



Lal et al., Nature Photon. **1**, 641 (2007).

3. 纳米颗粒间的LSP耦合

对单纳米粒子：



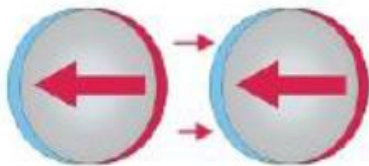
一个孤立的球是对称的，所以极化方向并不重要。

紧密排列的纳米粒子-近场相互耦合：



横向：

与邻近的耦合使回复力**增大**
→谐振峰向**高频(短波)**移动



纵向：

与邻近的耦合使回复力**减小**
→谐振峰向**低频(长波)**移动

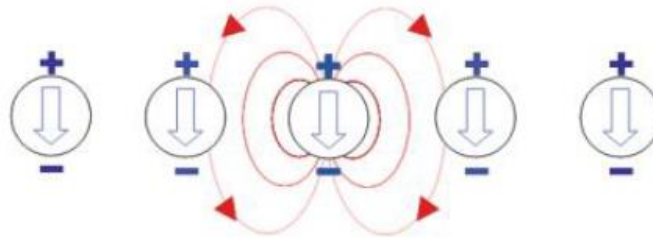
蓝移

红移

依赖于
入射场的
偏振
方向

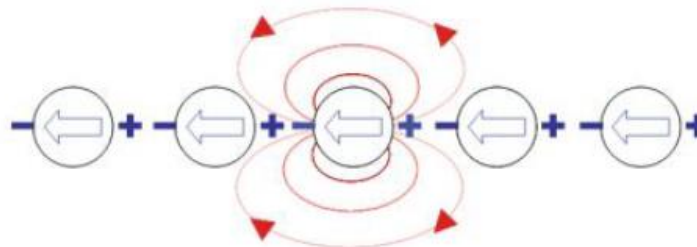
3. 纳米颗粒间的LSP耦合

增加回复力
更高频率（蓝移）



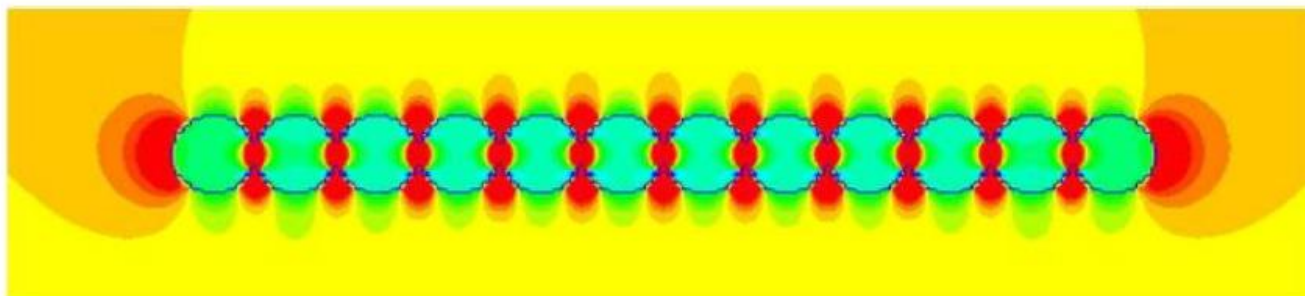
横模

减小回复力
更低频率（红移）



纵模

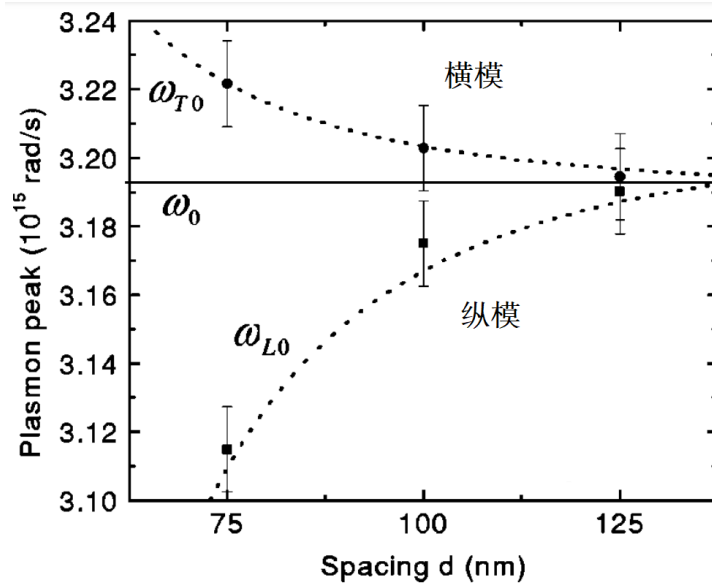
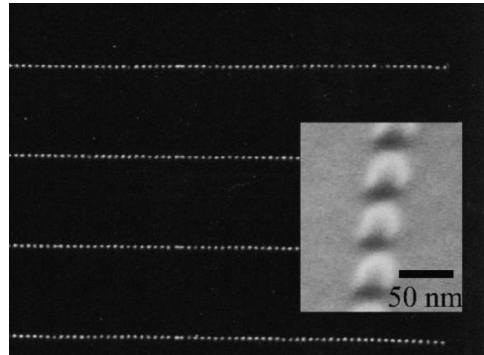
另一个结果：缝隙中近场增强（纵模）



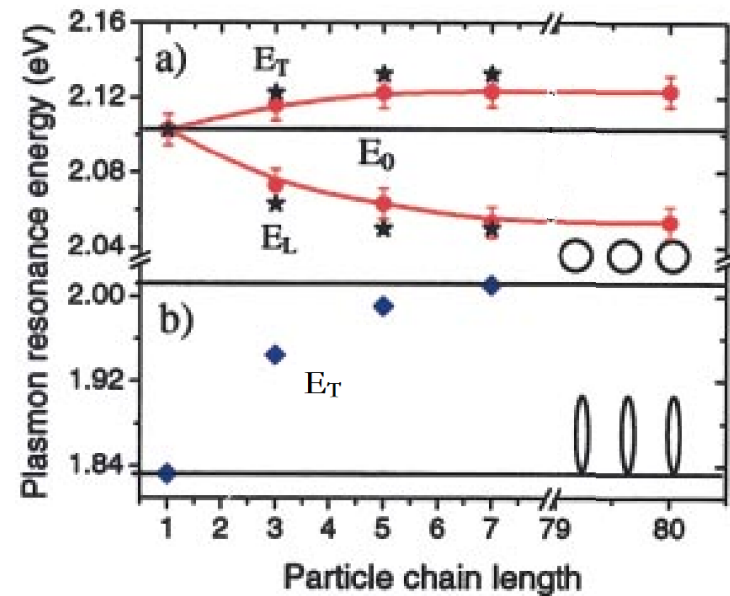
3. 纳米颗粒间的LSP耦合

实验验证:

空间相关性



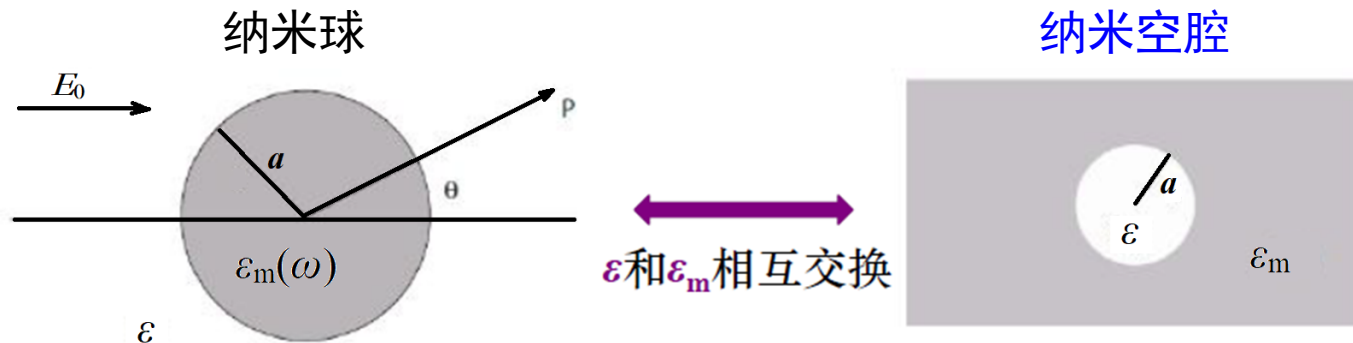
粒子链的长度相关



Maier et al., *Phys. Rev. B*, 65, 193408 (2002). Maier et al., *Appl. Phys. Lett.*, 81, 1714 (2002).

4. LSPs的复杂纳米结构-纳米壳

首先考虑纳米球 vs. 纳米空腔：



极化率 $\alpha = 4\pi a^3 \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon}{\epsilon_m + 2\epsilon} \right)$

$\alpha = 4\pi a^3 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_m}{\epsilon + 2\epsilon_m} \right)$

Fröhlich条件 $\text{Re}[\epsilon_m] = -2\epsilon$

$\text{Re}[\epsilon_m] = -\frac{1}{2}\epsilon$

Drude金属 $\omega_{lsp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2\epsilon}} \stackrel{\text{in air}}{=} \frac{\omega_p}{\sqrt{3}}$

$\omega_{lsp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}\epsilon}} \stackrel{\text{in air}}{=} \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_p$

纳米壳—等离子体复合

$$\omega_{l,\pm}^2 = \frac{\omega_p^2}{2} \left[1 \pm \frac{1}{2l+1} \sqrt{1 + 4l(l+1) \left(\frac{a^{2l+1}}{b} \right)} \right]$$

(l : 球谐函数阶数)

• 纳米壳模式=球模式+空腔模式

→ 反键合 ω^+ 模式

→ 键合 ω^- 模式

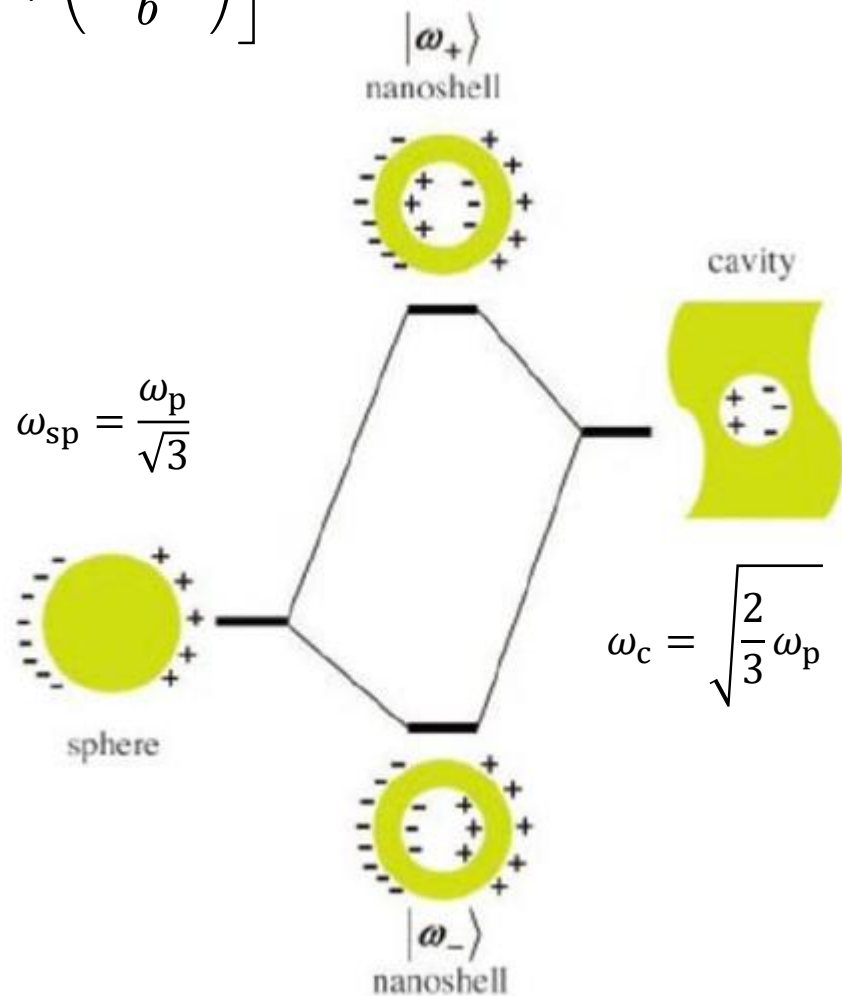
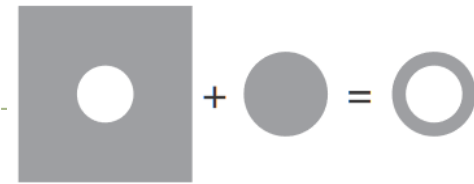
• 结果

→ 共振频率移向近红外

→ 使共振线宽变窄

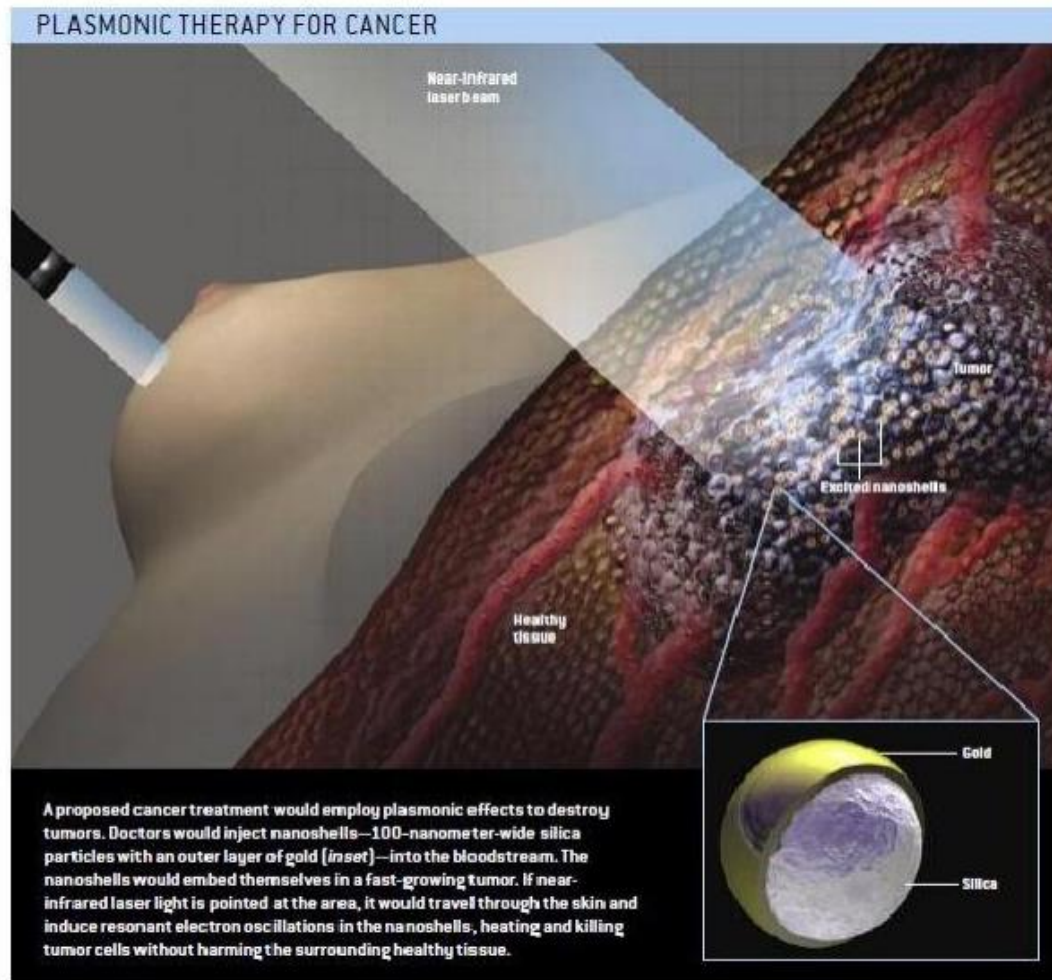
• 常用于传感和生物医学应用

(例如, 肿瘤的治疗)



Prodan et al., Science **302**, 419(2003).

纳米壳-应用




Alexandria Journal of Medicine

Volume 47, Issue 1, March 2011, Pages 1–9

Review Article

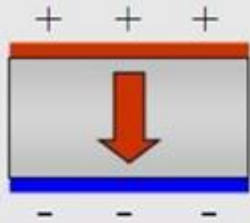
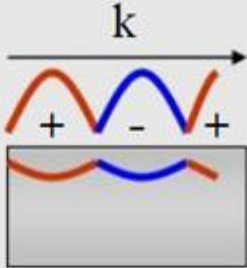
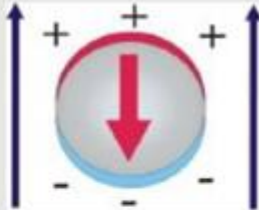
Plasmonic photo-thermal therapy (PPTT)

Xiaohua Huang^a, Mostafa A. El-Sayed^b,  

将金包裹的Si纳米颗粒植入到肿瘤细胞中，通过近红外光照射，利用LSP的共振效应，吸收近红外光并转换为热，杀死肿瘤细胞

肿瘤治疗

5. VP(体积等离子体)、SPPs和LSPs的比较

	Volume plasmons	SPPs	LSPs (nanosphere)
原理图			
模式性质	金属体内的电荷的集体振荡	金属表面的传播模式	不传播 束缚模式
波的性质	纵向	横向&纵向	—
特征频率	$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}}$	$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_d}}$	$\omega_{lsp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2\epsilon_d}}$
与光的相互作用	不相互作用 (non-EM wave)	与光子耦合 产生谐振	谐振消光 (散射+吸收)

小结

- 局域表面等离子体(LSP)
 - LSP: 限制在纳米粒子/微腔中的非传播SP
- LSP共振条件
 - 金属纳米粒子作为有效电偶极子
 - 准静态近似, Frohlich条件, 大小和形状的依赖(Mie理论), 纳米棒的LSP, LSP的传感和生物医学应用
- 纳米粒子之间的LSP耦合
 - 横向和纵向模式, 间隙中的近场增强
- 复杂纳米结构——球壳的LSP
 - 纳米球和纳米谐振腔的LSP, 纳米壳中的等离子混合
- 体积等离子体, SPP和LSP的比较