导体　绝缘体 及其它

- 导体 conductor 存在大量的可自由移动的电荷（一般为电子）
- 绝缘体 没有可自由移动的电荷

  电介质　dielectric　　拓扑绝缘体
- 半导体 semiconductor 介于上述两者之间
- 超导体 superconductor 没有电阻, 而且完全排斥磁场(第一类)或磁通限制在周期排列的局域点(第二类)　(超流体)
- 等离子体 plasma 正负带电粒子密度相同或几乎相等　（磁流体）

第三章　静电场中的导体

第三章　静电场中的导体

3.1 静电场中的导体

3.2 有导体存在时静电场场量的计算

3.3 电像法

3.4 导体壳与静电屏蔽

3.5 电容器及电容

3.1 静电场中的导体

一. 导体的静电平衡条件

1. 静电平衡 (electrostatic equilibrium)

导体内部和表面无自由电荷的定向移动，

说导体处于静电平衡状态。

弛豫时间~1ns

2. 导体静电平衡的条件

$$\boxed{E_{内} = 0}$$

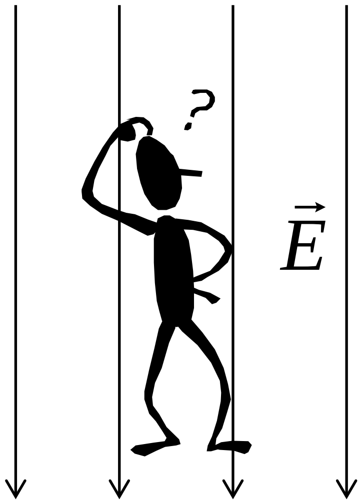
宏观平均电场

3. 导体的电势

$$\int_{(a)}^{(b)} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \qquad \boxed{\phi_a = \phi_b}$$

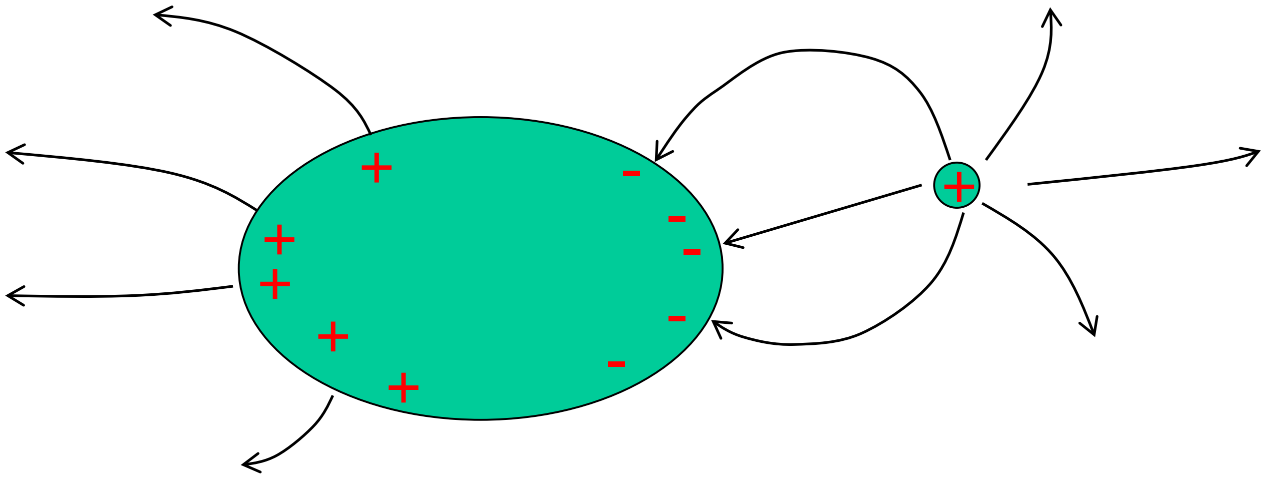
导体静电平衡时，导体是等势体

导体表面是等势面，表面电场处处垂直表面

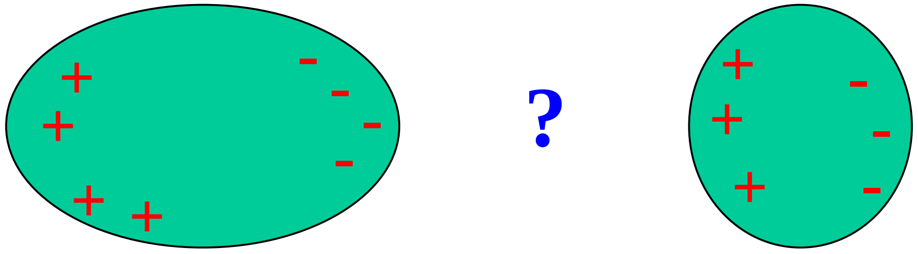


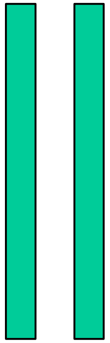
大气电场100V/m，人站立时头脚是否有电击？

静电感应



演示实验





金属板有吸引相互作用

Casimir effect

量子效应

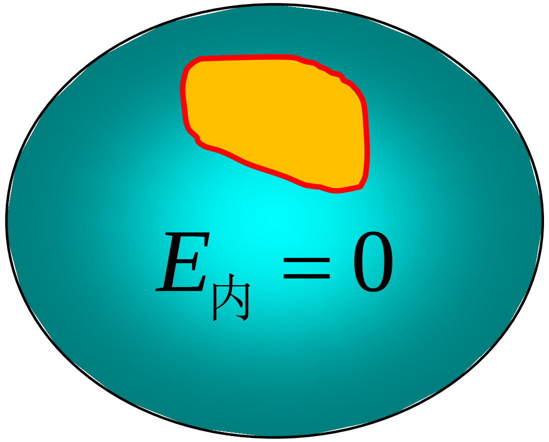
分子力：偶极子力

非极性分子之间：色散力

也是量子效应

二. 导体上电荷的分布

1. 静电平衡时导体体内处处不带电



$$\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}=0=\frac{\sum\limits_i q_{i内}}{\varepsilon_0}$$

导体带电只能在表面！

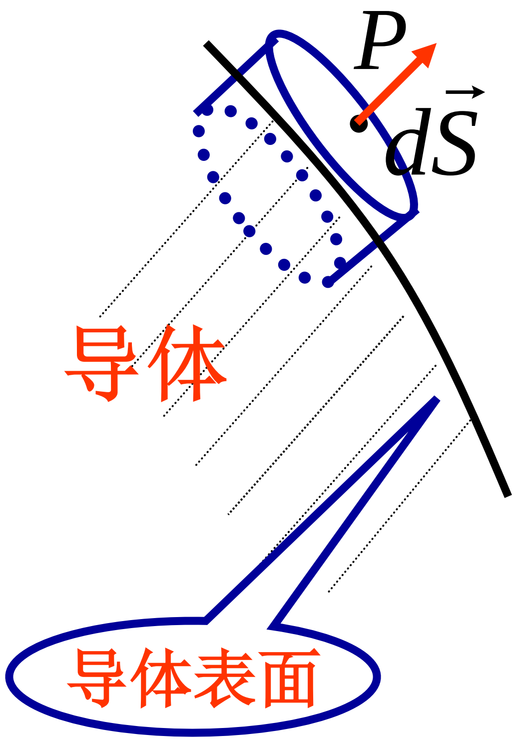
2. 导体表面电荷

导体表面电荷面密度 σ

设 P点紧靠导体外表面

$$\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = E_{表} dS$$

$$= \frac{\sigma dS}{\varepsilon_0}$$



$$\boxed{E_{表} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$

沿外法线方向

思考: 带电导体静电压强?

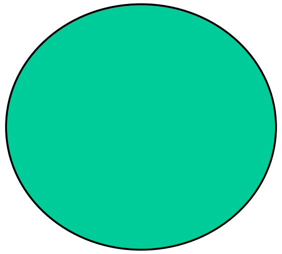
3. 孤立带电导体表面电荷分布

孤立的带电导体：

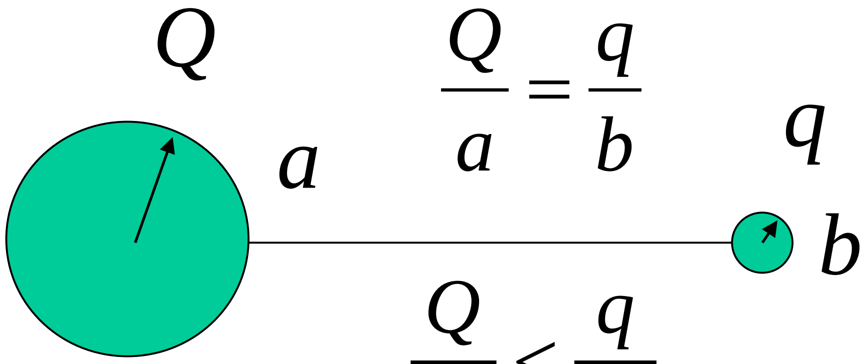
在表面凸出的尖锐部分(曲率是正值且较大)电荷面密度较大,在比较平坦部分(曲率较小)电荷面密度较小，在表面凹进部分带电面密度最小

导体等势条件决定的

孤立带电导体球



$$\boxed{\sigma = C}$$



$$\frac{Q}{a} = \frac{q}{b}$$

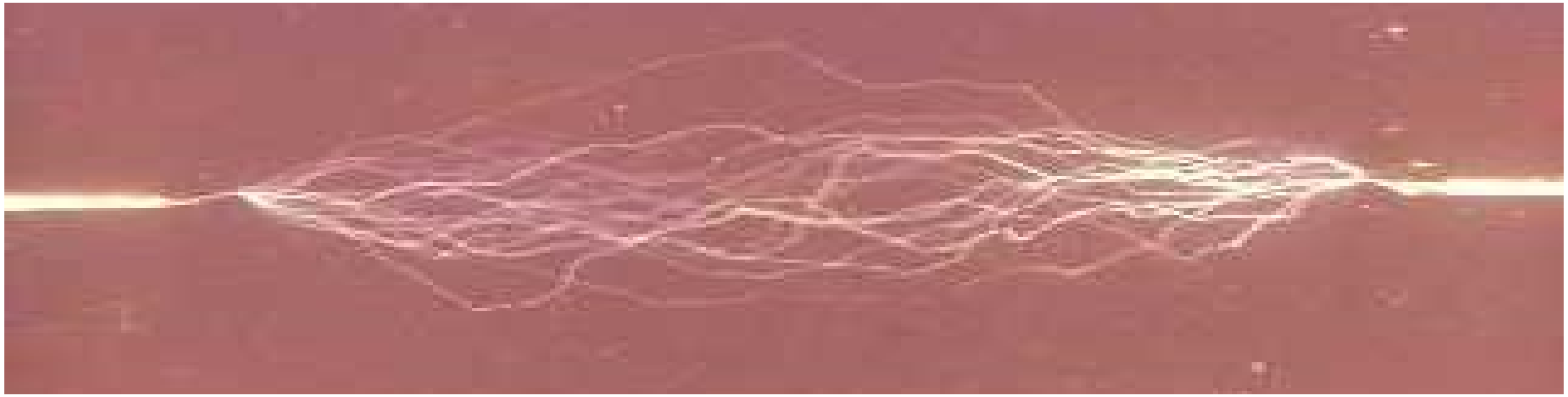
$$\frac{Q}{a^2} < \frac{q}{b^2}$$

正曲率较大的电荷密度较大

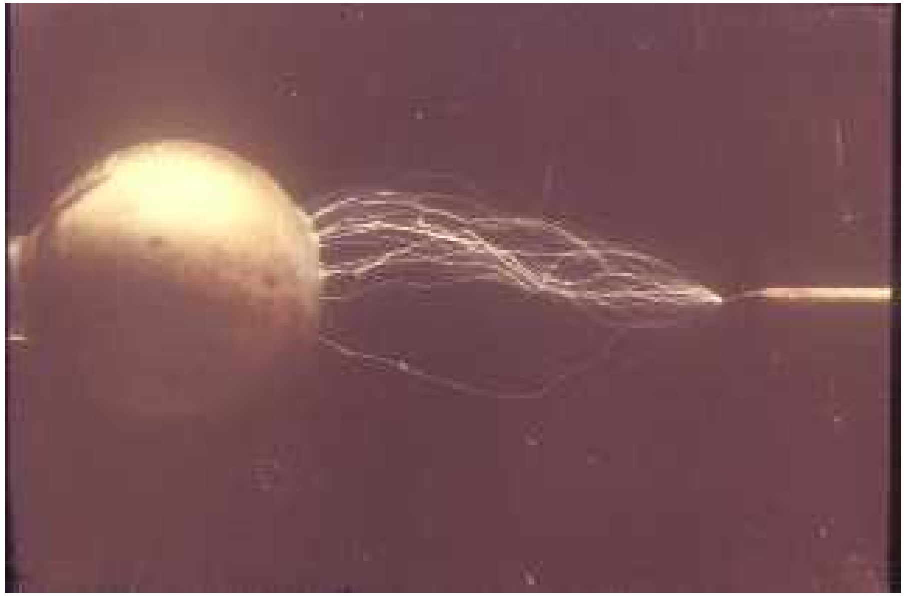
尖端放电

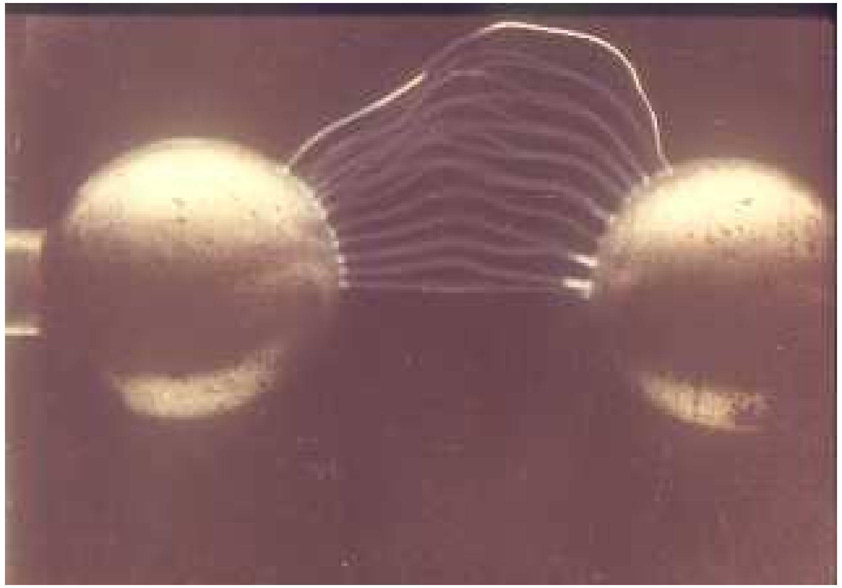
孤立导体

空气中的直流高压放电图片：



演示实验

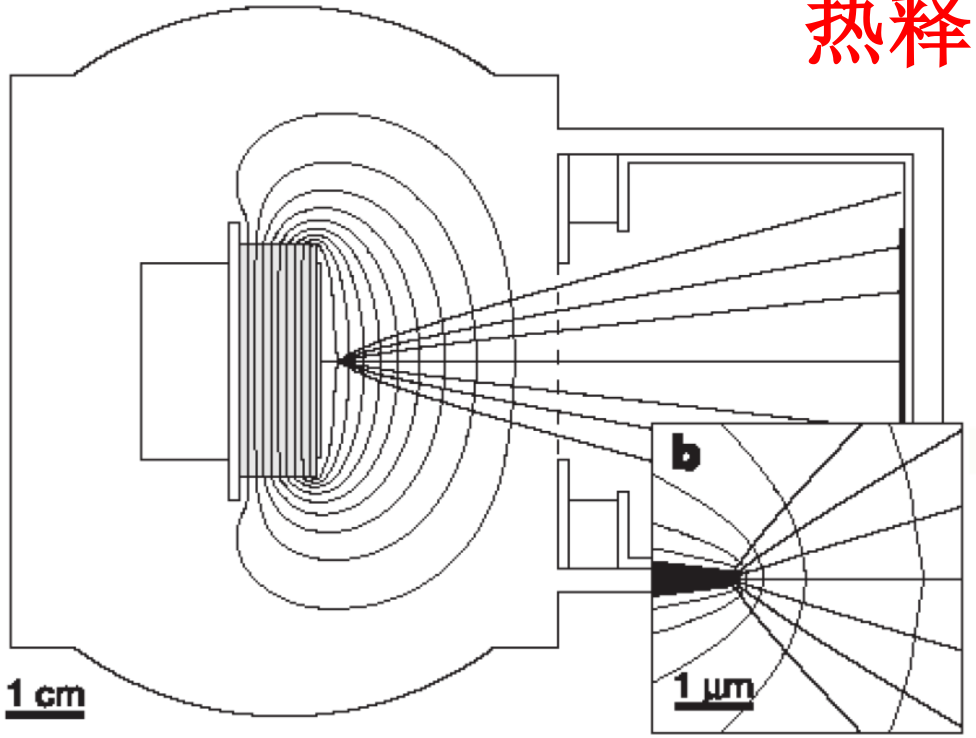




$D+D={}^{3}He + n$ (2.45 MeV)

letters to nature

热释电材料



10^4V

NATURE |VOL 434 |28 APRIL 2005

闪电的图片：

云层和大地间的闪电

雷击大桥

遭雷击后的草地

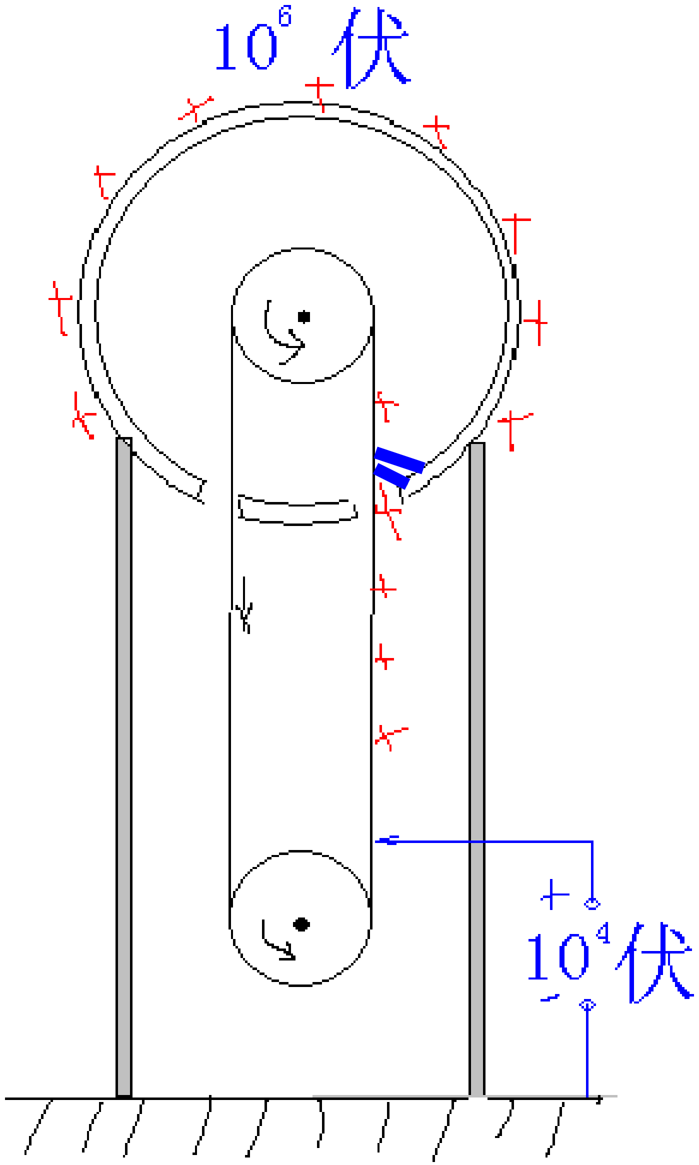
避雷针演示

2006年4月某日，一架飞机正要在武汉机场降落时，遭遇雷击，起落架附近有几处被击痕迹，飞机安全降落。

导体空腔演示

导体丝实验

俘获闪电：激光束引起空气电离，使闪电改道



内表面处处没有电荷应用：

范德格喇夫起电机静电加速器

3.2 有导体时静电场的计算

一、普通方法 点电荷+叠加原理

1. 基本性质方程

$$\boxed{\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}=\frac{\sum_i q_i}{\varepsilon_0}}$$

$$\boxed{\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l}=0}$$

2. 电荷守恒定律

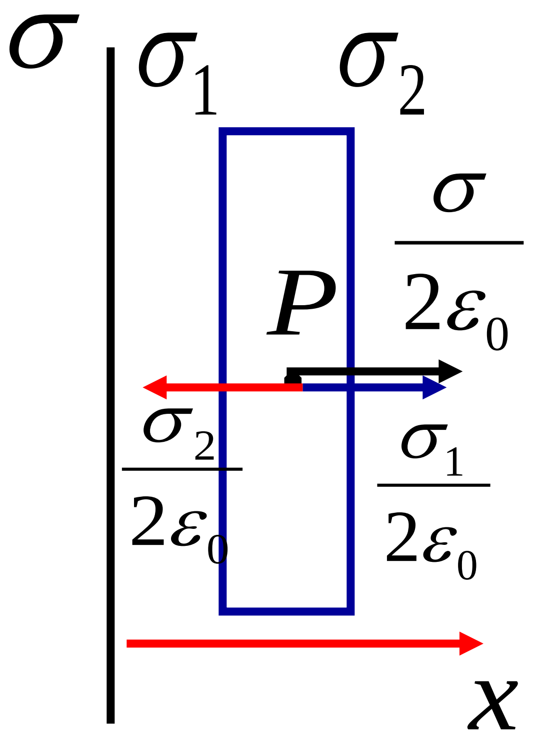
$$\boxed{\sum_i Q_i = const.}$$

3. 静电平衡的条件

$$\boxed{E_{内}=0} \quad \boxed{or\ \phi = c}$$

例1 无限大的带电平面的场中平行放置一无限大金属平板

求：金属板两面电荷面密度



解: 设金属板面电荷密度 σ_1， σ_2

由对称性和电量守恒

$$\sigma_1 = -\sigma_2$$

导体体内任一点P场强为零

$$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} = 0$$

$$\boxed{\sigma_1 = -\frac{1}{2}\sigma}$$

$$\boxed{\sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma}$$

例2 金属球A与金属球壳B同心放置

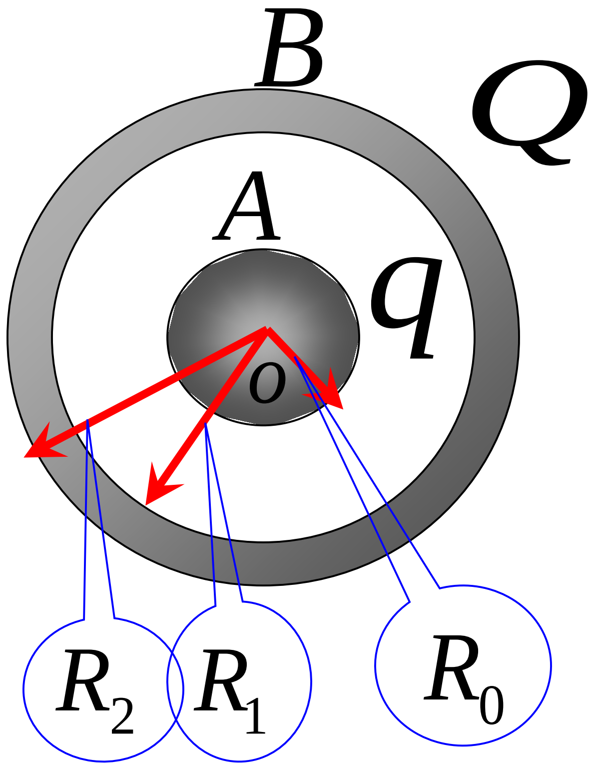
已知：球A半径为 R_0 带电为 q

金属壳B内外半径分别为R_1，R_2

带电为 Q

求:1) 电量分布

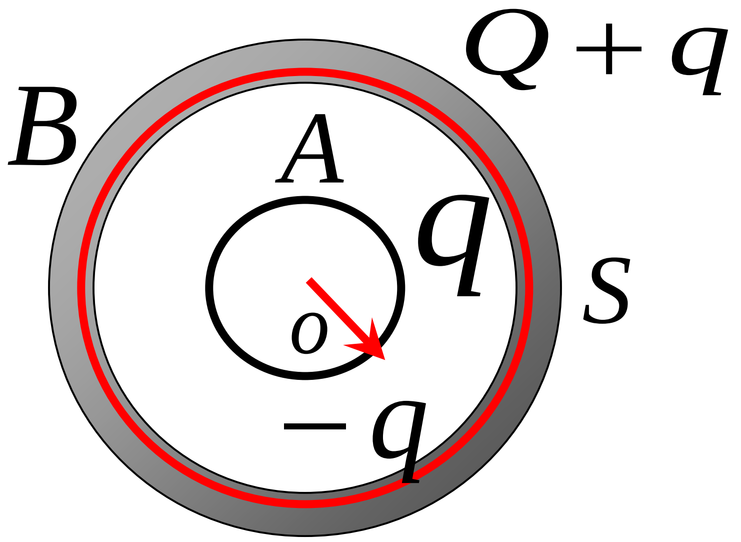
2) 球A和壳B的电势



解：电量在表面均匀分布

在B内紧贴内表面作高斯面 S

$$\boxed{\oint\!\!\!\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = 0}$$



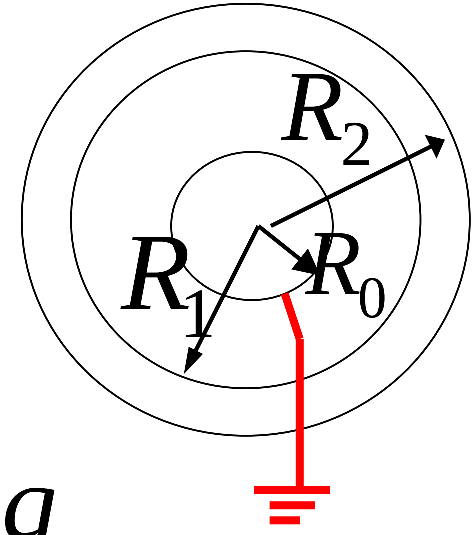
高斯定理 $\longrightarrow$ $\sum_i q_i = 0$

$\longrightarrow$ $Q_{B内} = -q$

电荷守恒定律 $\longrightarrow$ $Q_{B外} = Q + q$

2) 求电势，等效为：

在真空中三个均匀带电的球面



利用叠加原理

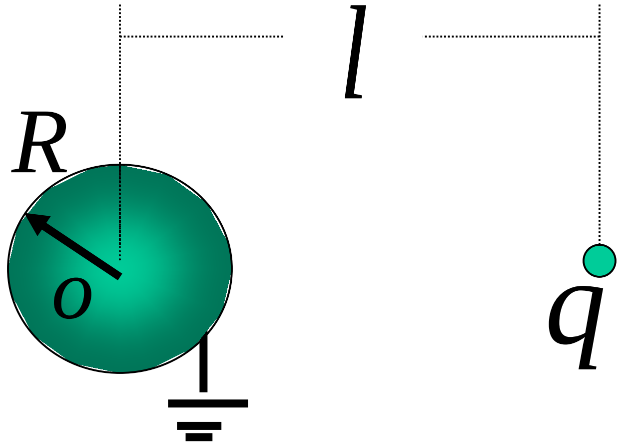
$$\phi_A = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R_0} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{Q+q}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$$

$$\phi_B = \frac{Q+q}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$$

思考：内球接地情形

例3 接地导体球附近有一点电荷, 如图所示。

求:导体上感应电荷的电量



解: 接地 即 $\phi = 0$

设感应电量为 Q

由导体是个等势体

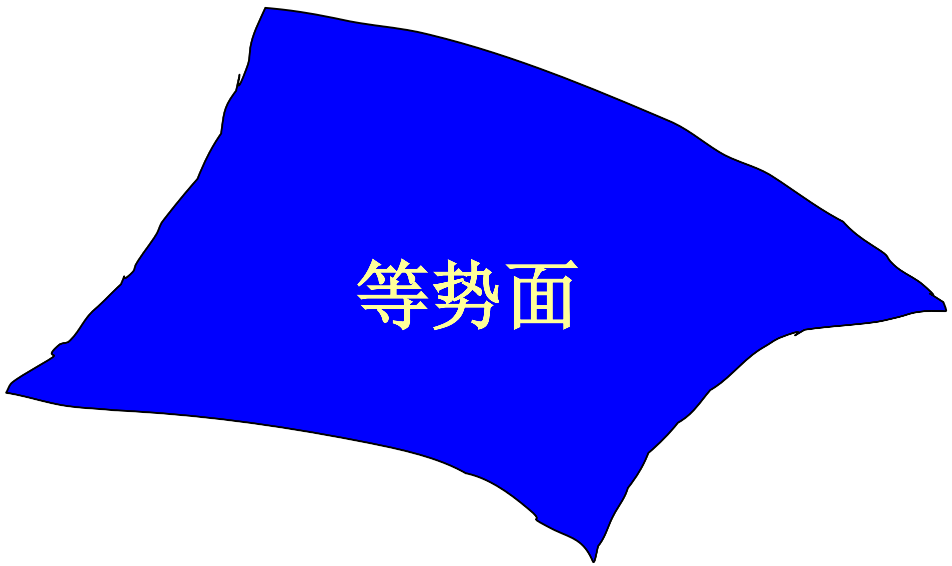
O点的电势为0 则

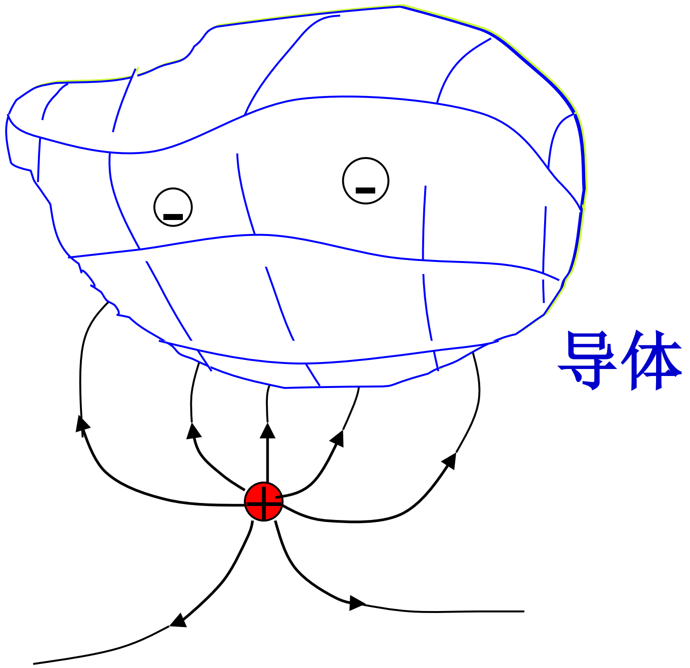
$$\boxed{\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 l} = 0}$$

思考: 不接地情形

$$\boxed{Q = -\frac{R}{l} q}$$

3.3 电像法*





导体薄片放在等势面上, 使电势值与原来相同, 不可察觉

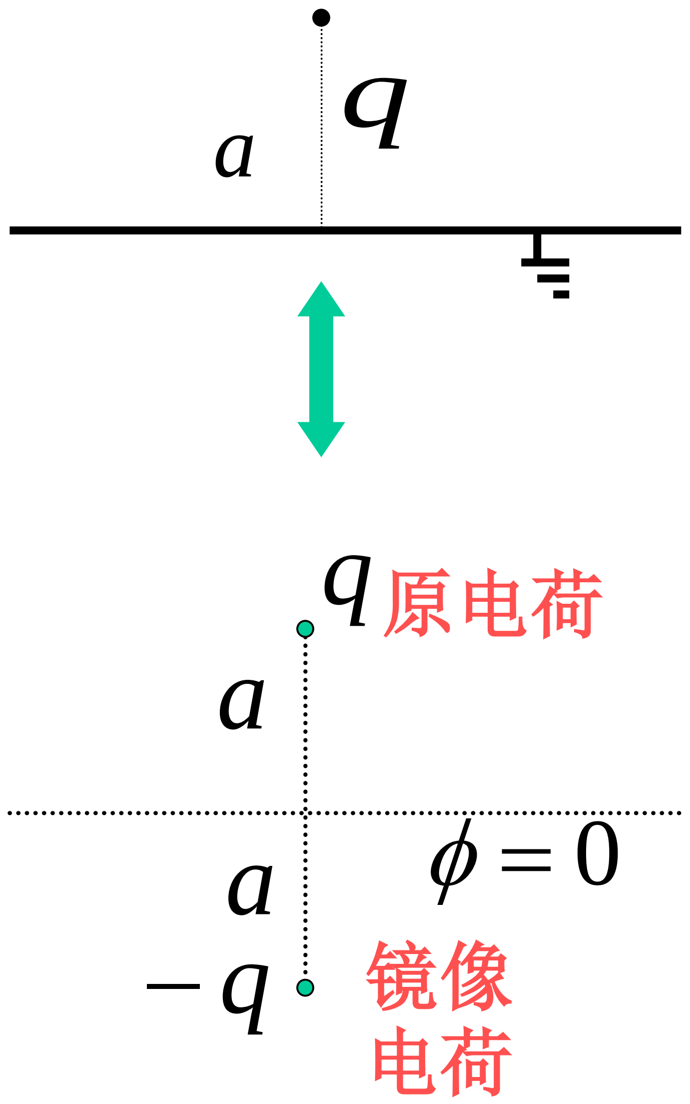
去掉导体, 里面放一些(像)电荷, 大小位置合适, 刚好使导体区域表面是原来的等势面, 导体外面区域不可察觉

像电荷代替了导体的作用

例1 无限大接地导体平板附近有一点电荷 q

求:1)点电荷一侧的场的分布

2)导体表面的感应电荷面密度

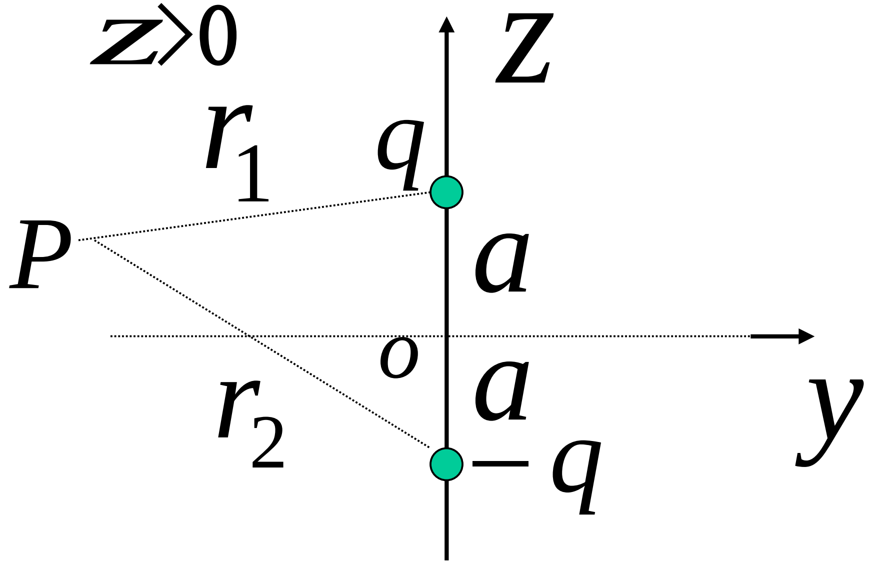


解: 镜像电荷与原电荷产生的合场满足同样的边界条件

1) 求场量

$$\phi = \phi_{+q} + \phi_{-q}$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_1} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 r_2}$$



$$\phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+(z-a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+(z+a)^2}}\right]$$

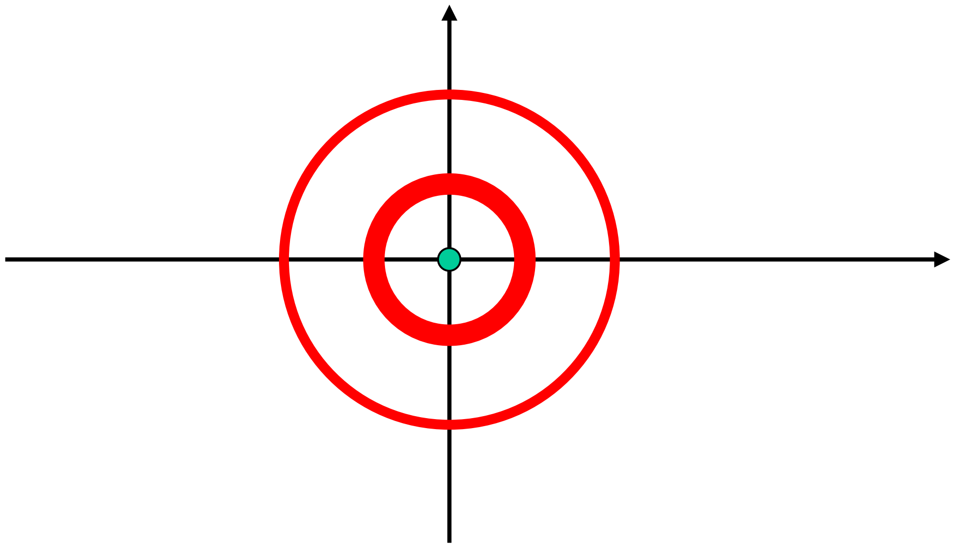
$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad = \frac{qx}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}\right]$$

$$E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad = \frac{qy}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}\right]$$

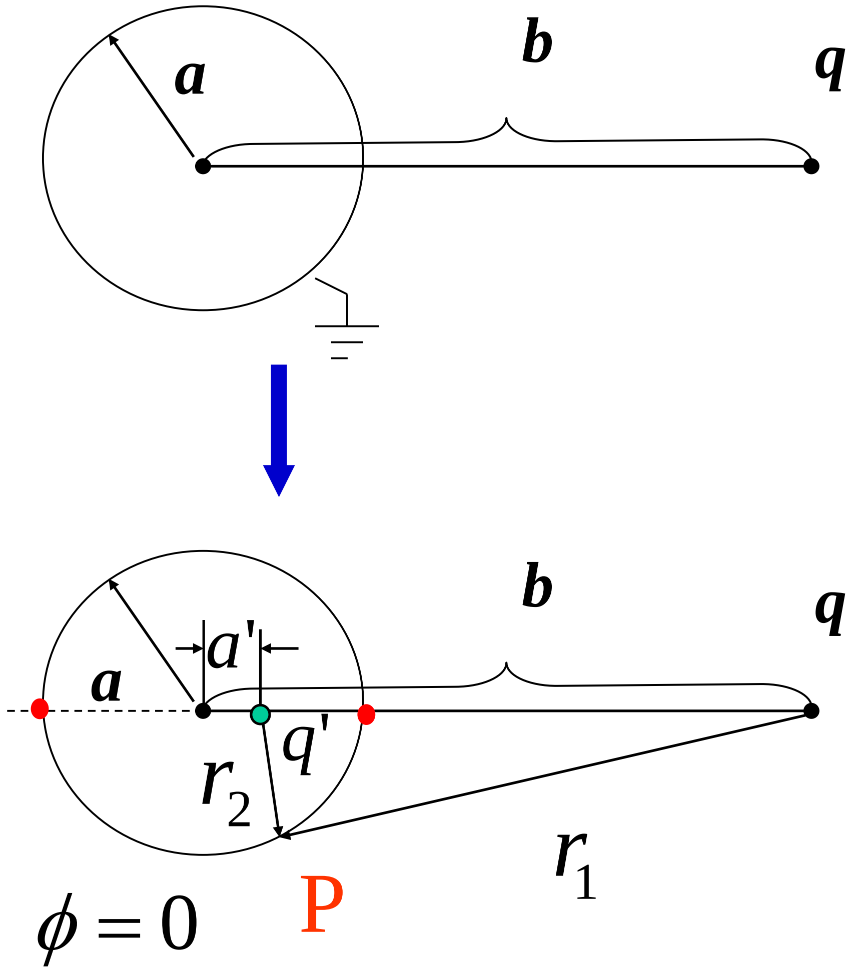
$$E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{z-a}{r_1^3} - \frac{z+a}{r_2^3}\right]$$

2) 平板上电荷面密度 $z=0$

$$\sigma=\varepsilon_0 E_z \quad = \frac{-qa}{2\pi\left[x^2+y^2+a^2\right]^{3/2}}$$



例2接地导体球附近有一个点电荷



$$\frac{q}{r_1} + \frac{q'}{r_2} = 0$$

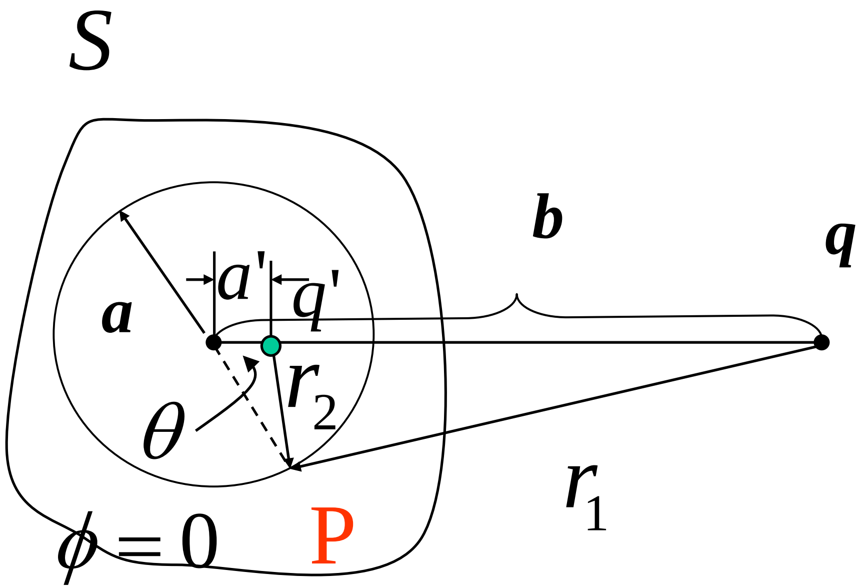
两个特殊点

$$\frac{q}{b-a} + \frac{q'}{a-a'} = 0$$

$$\frac{q}{b+a} + \frac{q'}{a+a'} = 0$$

$$q' = -\frac{a}{b}q \qquad a' = \frac{a^2}{b} \qquad \frac{q}{r_1} + \frac{q'}{r_2} = 0$$

$$\frac{q}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta}} + \frac{q'}{\sqrt{a^2 + a'^2 - 2aa'\cos\theta}} = 0$$



没有接地情形

$$\oiint_S \vec{E}\cdot\hat{n}da = 0$$

$$q'' = -q' = \frac{a}{b}q$$

放球心

电像法的理论依据：静电场的唯一性定理

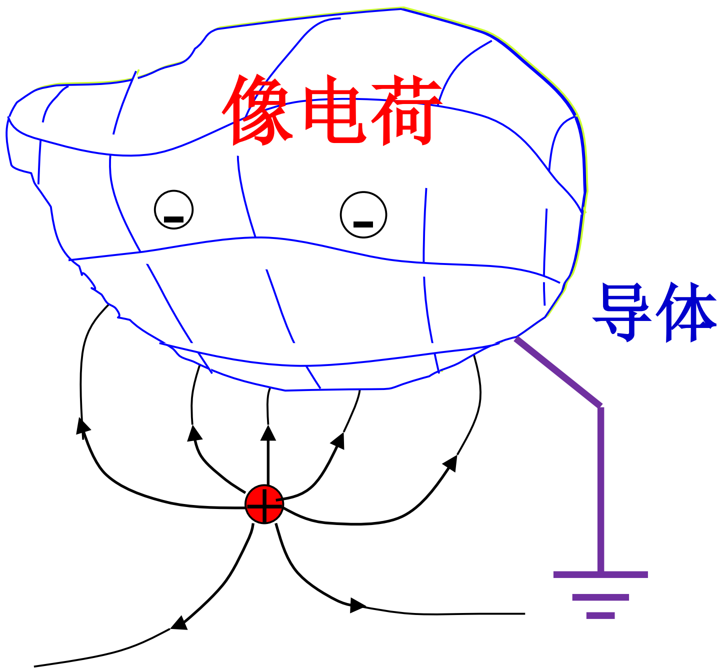
静电场方程：　高斯定理+环路定理

边界条件给定, 空间电荷分布及导体带电量或电势已知, 电场唯一确定

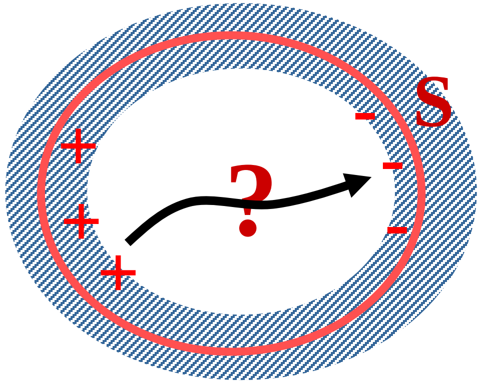
边界电势或电场法线分量给定

导体表面是静电场的边界

找到镜像电荷（猜出一个解）



3.3 导体壳与静电屏蔽 (electrostatic shielding)



腔内无带电体

$$\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = 0$$

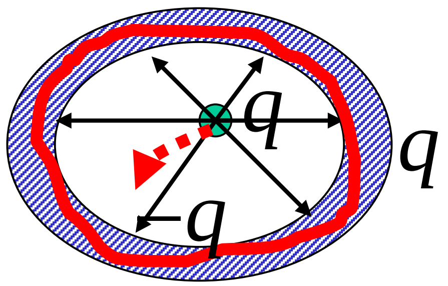
内表面处处没有电荷　　　腔内无电场

这些讨论与腔外有无电荷无关　静电屏蔽

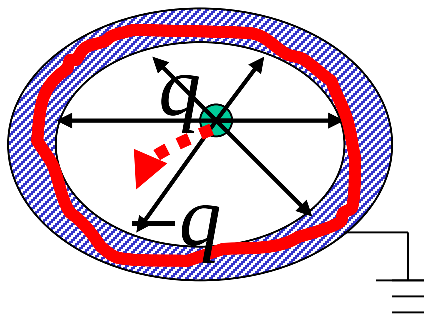
讨论：

$$\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = 0$$

- 腔内有带电体，腔外没有电荷

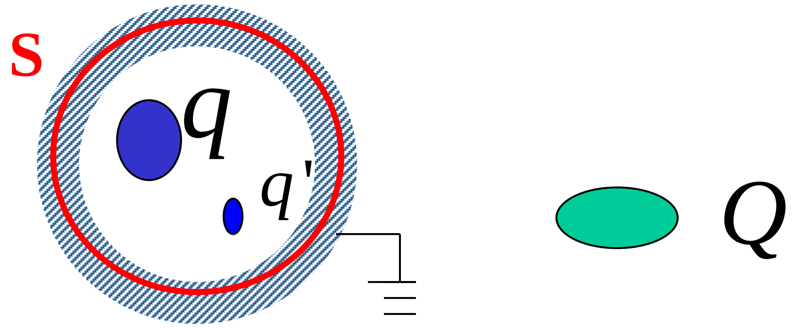


- 腔内有带电体，外壳接地
  - 外表面没有电荷
  - 腔外无电场
  - 腔内电荷对外面没有影响
  - 静电屏蔽



接地

接地导体腔内、腔外都有电荷



静电场的唯一性定理：边界条件给定，空间电荷分布及导体带电量或电势已知，电场唯一确定。

导体壳静电屏蔽：

- 里面总被屏蔽
- 外面

1. 接地　　屏蔽
2. 不接地　　不屏蔽

外表面有感应电荷

3.4 电容器及电容 （capacitor capacity）

一. 孤立导体的电容

孤立导体的电势

$$\phi \propto Q$$

$$\boxed{C \equiv \frac{Q}{\phi}}$$

量纲： SI

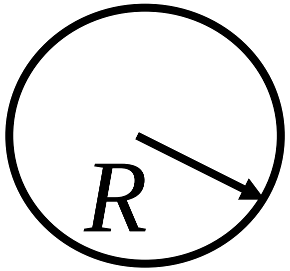
单位:法拉 F

电容只与几何因素和介质有关, 是效率

考虑介质耐压特性, 才变成容量大小的概念

例1 求真空中孤立导体球的电容(如图)

解：设球带电为 Q



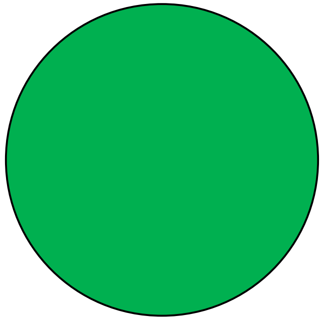
导体球电势 $\phi = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$

介质

导体球电容 $C = \dfrac{Q}{\phi}$ $\boxed{= 4\pi\varepsilon_0 R}$

几何

半径20cm，导体球电势1万伏



$$C = 4\pi\varepsilon_0 R \quad \sim 2\times10^{-11}\mathrm{F}$$

$$Q \sim 2\times10^{-7}\mathrm{C}$$

人体安全： $30\mathrm{mA}\cdot\mathrm{s} \sim 3\times10^{-2}\mathrm{C}$

欲得到 $1F$ 的电容　孤立导体球的半径 R **？**

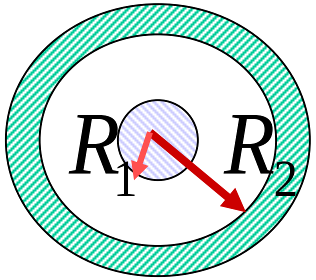
由孤立导体球电容公式知

$$R = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\times10^{9}\,m \;\approx 10^{3}\,R_E$$

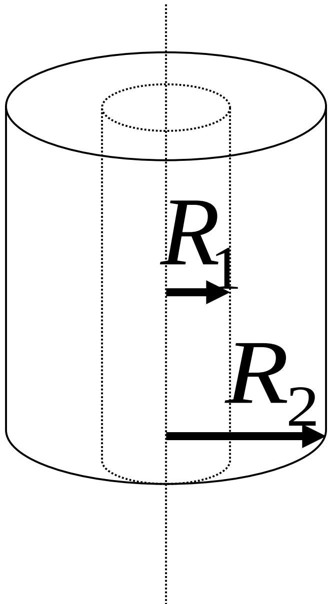
二.导体组的电容

典型的电容器 (效率大大提高)

球形

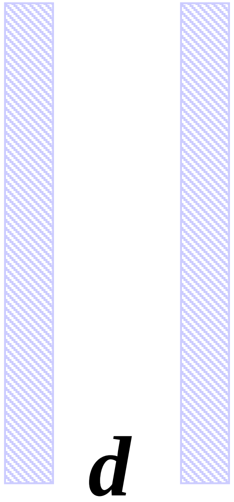


柱形



莱顿瓶

平行板



内部电场被屏蔽， 带等量异号电荷

$\Delta\phi \propto Q$ 定义 $$\boxed{C = \frac{Q}{\Delta\phi}}$$

例2　求平行板电容器的电容

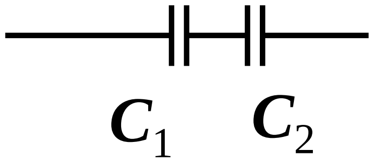
平行板

解:

$$\Delta\phi = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{Qd}{\varepsilon_0 S}$$

$$\boxed{C = \frac{Q}{\Delta\phi} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}}$$

串联:

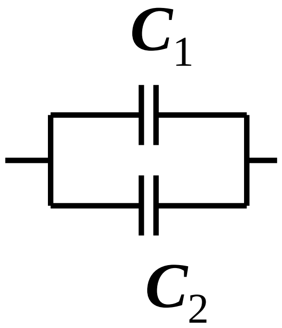


$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

并联:

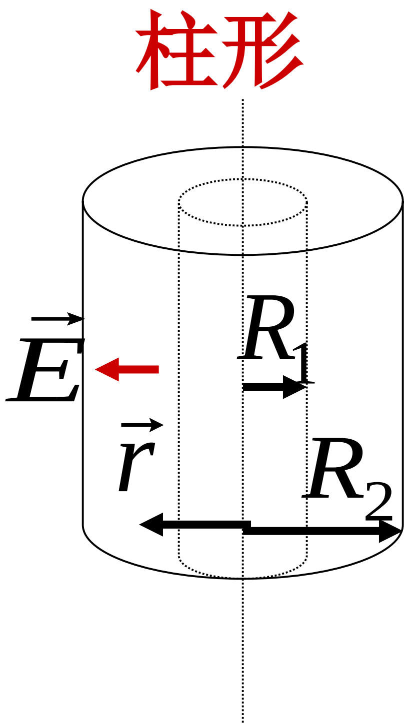


$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$C = C_1 + C_2$$

例3　求柱形电容器单位长度的电容



解：设单位长度带电量为λ

$$R_1 < r < R_2 \qquad E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

$$\Delta\phi = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{R_2}{R_1}$$

$$C = \frac{\lambda}{\Delta\phi} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}$$

三. 电容器的储（静电）能

$$W=\frac{1}{2}\int_{(Q_A)} dq_A\phi_A+\frac{1}{2}\int_{(Q_B)} dq_B\phi_B$$

$$\overline{\overline{\quad\quad\quad}}\quad \frac{1}{2}Q_A\phi_A+\frac{1}{2}Q_B\phi_B \qquad Q_A=-Q_B$$

导体是等势体

$$\boxed{W=\frac{1}{2}Q\Delta\phi}$$

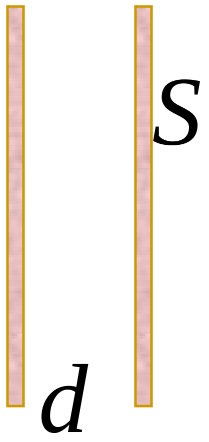
电容器储能

$$\boxed{W=\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}=\frac{1}{2}C(\Delta\phi)^2}$$

（电容器演示实验）

四. 静电场能

能量储存于场中



$$W_e = \frac{1}{2} Q(\Delta\phi)$$

$$= \frac{1}{2} S\varepsilon_0 EEd = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 V$$

电场能量密度为

$$\boxed{w_e = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2}$$

普适结果