



第十章

静电场中的 导体和电介质



第十章 静电场中的导体和电介质

解决的问题: 电荷分布是怎样来的?

§ 10-1 静电场中的金属导体

静电感应现象

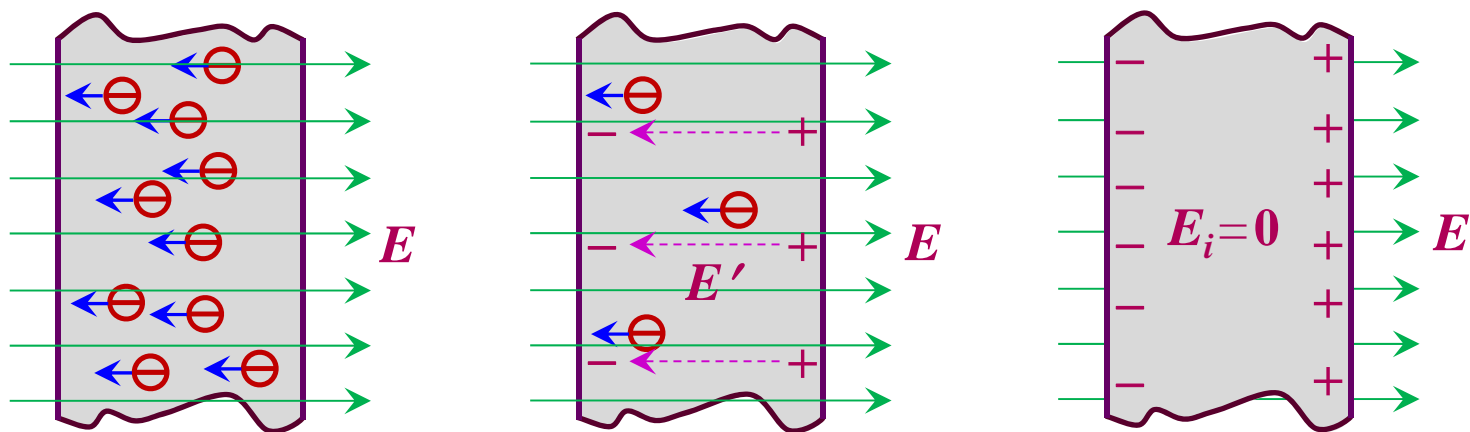
当导体置于外电场的瞬间(10^{-6} s), 导体的两端出现等量异种电荷的现象.

一. 导体的静电平衡

1、导体的静电平衡状态

导体内没有电荷做任何的宏观定向运动.

2、静电平衡的建立



导体静电平衡建立的过程

3、静电平衡的基本特点

① 导体内任一点的电场强度都等于零

无电荷作定向运动,电荷所受电场力

$$F_i = 0 \rightarrow E_i = 0$$

静电平衡的必要条件

② 导体是等势体,其表面是等势面

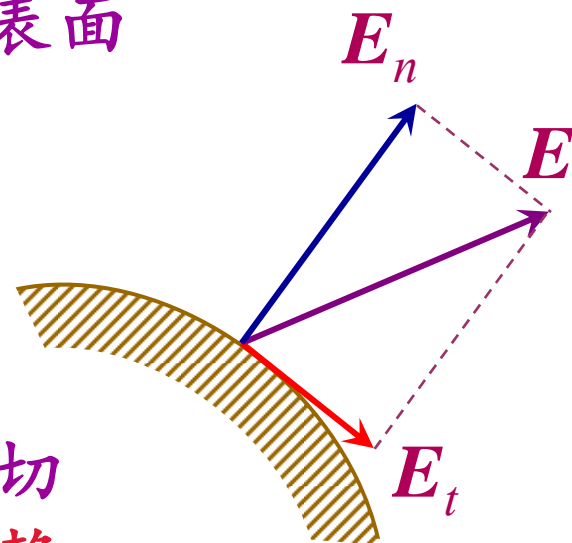
导体内部有 $E=0$, 故任意两点间有

$$U_{pq} = \int_p^q \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

③ 导体表面的场强垂直于导体表面

导体表面电场可不为零,但必须与导体表面垂直,如图所证

否则,电荷在 E_t 的作用下作切向运动(定向运动)而未达到静电平衡



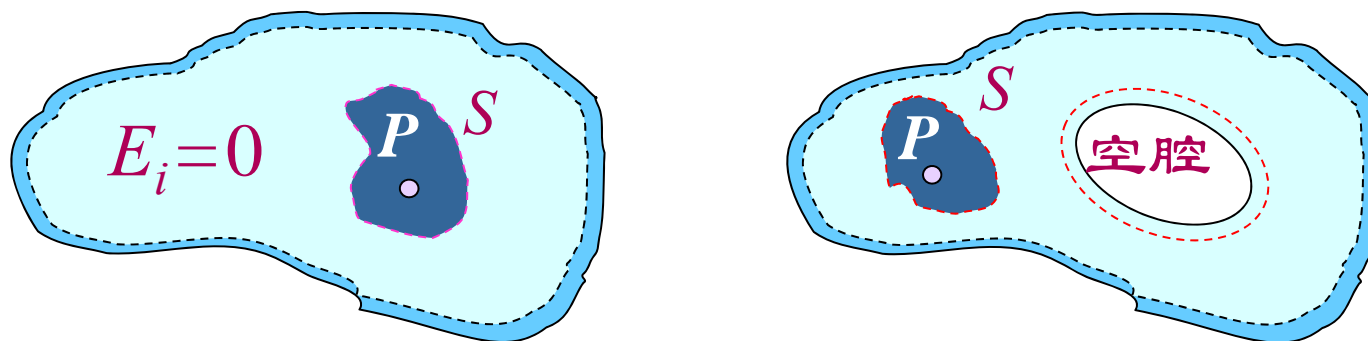
二. 静电平衡时导体上的电荷分布

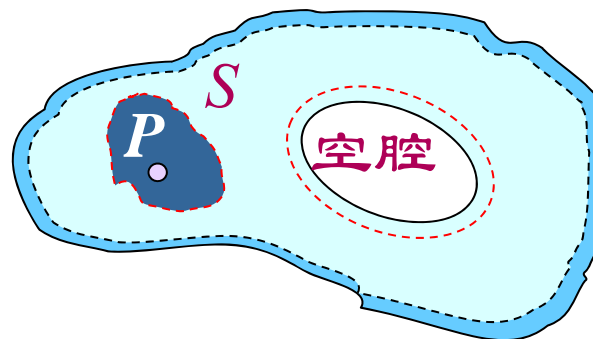
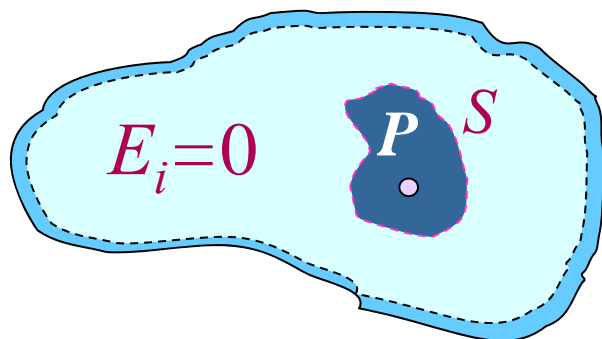
(一) 实心导体

1. 无外电场的带电实心导体 (附近无其它电荷)

(1). 电荷的分布

当带电导体处于静电平衡状态时, 导体内部处处没有净电荷存在, 电荷只能分布在导体表面上. 可用高斯定理证明, 见图示:





论证导体静电平衡时电荷只能分布在导体表面

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\Sigma q}{\epsilon_0}$$

$$\mathbf{E}=\mathbf{0} \rightarrow \Sigma \mathbf{q}=\mathbf{0}$$

有空腔的情况后面具体讨论

(2). 导体表面附近的场强与电荷面密度的关系

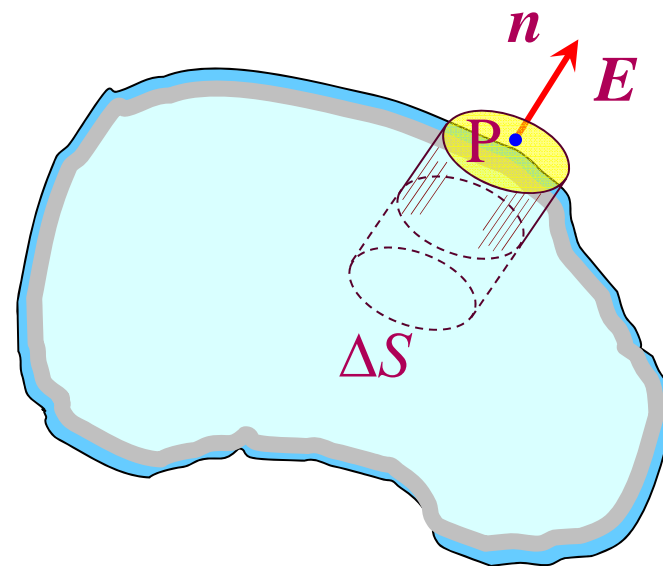
用高斯定理 证明

如图做高斯面，由于导体表面电场可不为零，但必须与导体表面垂直，由高斯定理得：

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\epsilon_0}$$

则： $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ 写成矢量式：

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}$$



实例：导体表面附近的场强与电荷面密度的关系

a. 无限长带电圆柱体金属导体

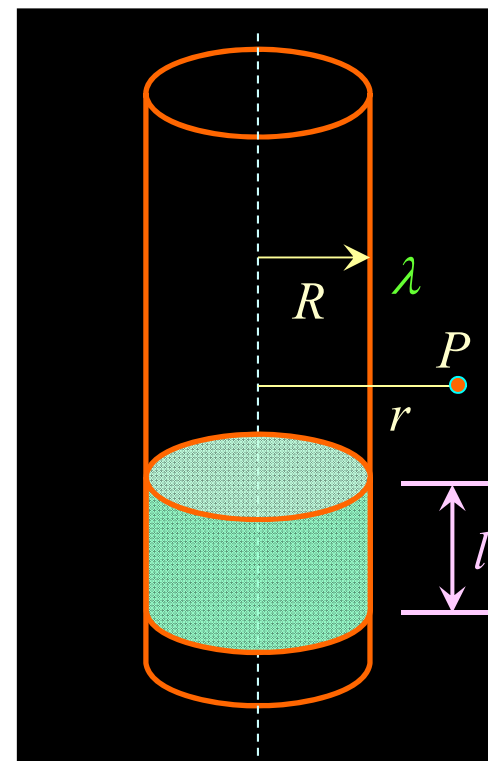
$$E_p = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_R = \lim_{r \rightarrow R} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R}$$

$$\sigma = \frac{\lambda l}{2\pi R l} = \frac{\lambda}{2\pi R}$$

$$E_R = \lim_{r \rightarrow R} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} = \frac{\lambda}{2\pi R \epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

再考虑电场的方向 $\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}$



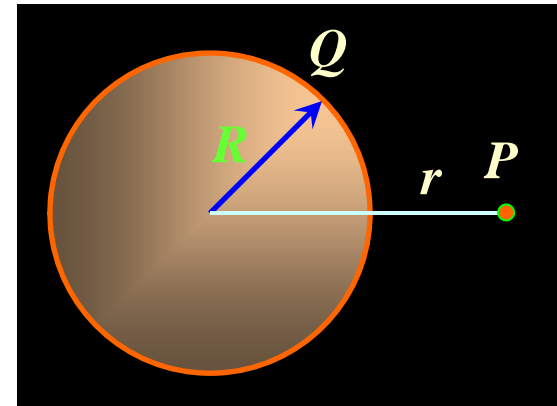
b. 带电金属导体球

$$E_p = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$E_R = \lim_{r \rightarrow R} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

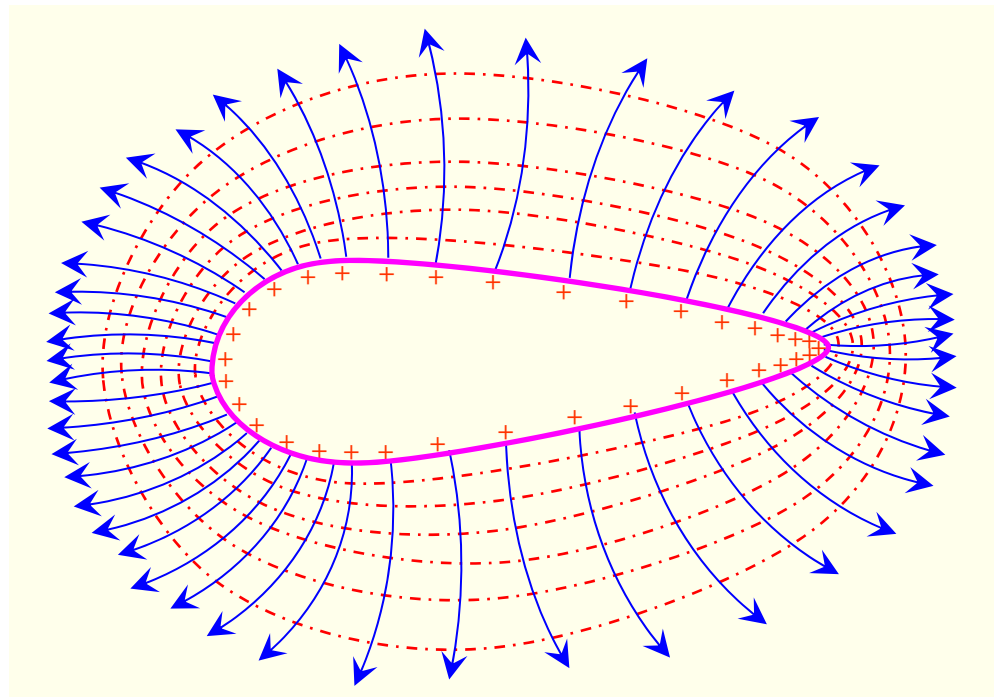
$$= \frac{Q}{4\pi R^2} \frac{1}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

再考虑电场的方向



$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}$$

(3). 电荷面密度与导体表面曲率的关系



电荷在导体表面上的分布规律:

电荷在导体表面上的分布规律与导体表面的曲率有关, 曲率大, 电荷面密度大, 曲率小, 电荷面密度小, 曲率负, 电荷面密度更小.


例：两个半径分别为 R 和 r 的球形导体 ($R>r$)，用一根很长的细导线连接起来，使这个导体组带电，电势为 U ，求两球表面电荷与曲率的关系？**设两球相距较远，电荷分布互相不影响。**



解：由于两球由导线连接，两球电势相等：

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad \text{得:} \quad \frac{Q}{q} = \frac{R}{r}$$

可见，大球所带电量 Q 比小球 q 多。



两球的面电荷密度分别为：

$$\sigma_R = \frac{Q}{4\pi R^2} \quad \sigma_r = \frac{q}{4\pi r^2}$$

所以：

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_r} = \frac{(Q/4\pi R^2)}{(q/4\pi r^2)} = \frac{Qr^2}{qR^2} = \frac{r}{R}$$

结论：两球电荷面密度与曲率半径成反比，
即与曲率成正比。

上述试验结果在技术上有十分重要的应用：
尖端放电，避雷针，高压输电线路的防漏电。

2. 外电场中的实心导体 (附近存在其它电荷)

(1) 导体内任一点的电场强度都等于零

(2) 电荷只能分布在导体表面上

(3) 导体表面的场强垂直于导体表面

(4)

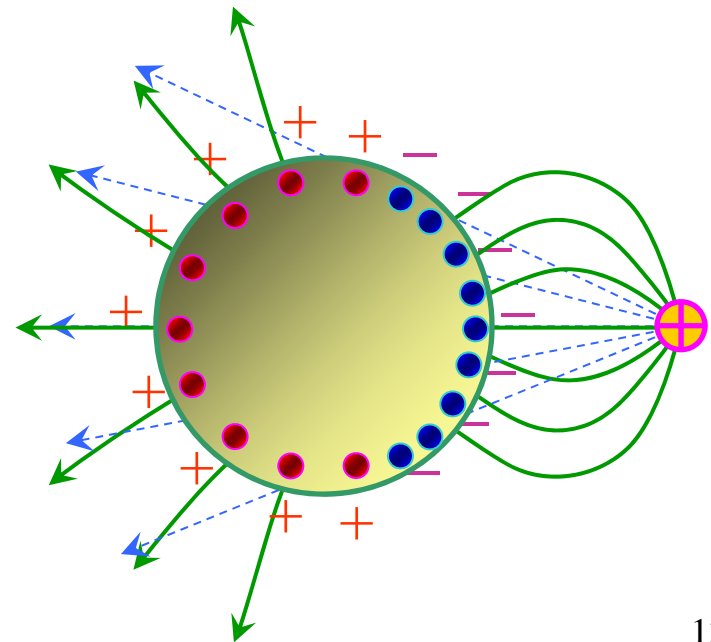
$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \hat{n}$$

电场 E 为所有电荷
共同激发而产生的

(5) 电荷面密度

(i) 不仅与导体表面
曲率有关,

(ii) 而且与外电场有关,
即与其它电荷有关



(二). 空腔导体

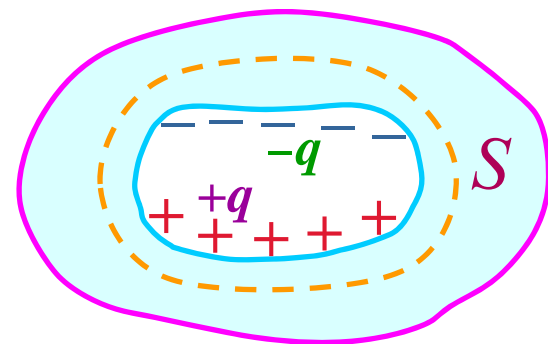
空腔外电场与实心导体类似

1. 腔内无带电体的带电空腔导体

(1). 电荷分布

在导体内做高斯面可证明,空腔的金属导体内电场强度为零,高斯面内净电荷为零.故电荷分布在**外表面**,**内表面没有净电荷**.

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 = \frac{\sum q}{\epsilon_0} \quad \sum q = 0$$



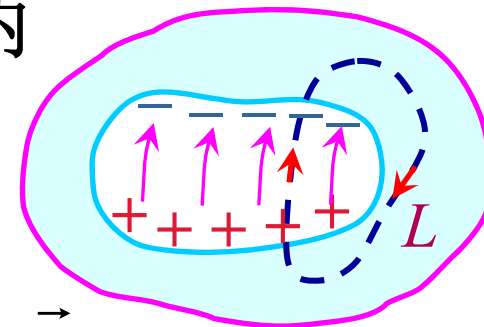
(2). 腔内电场

高斯定理不能证明空腔导体的**内表面有无等量异种电荷**. 因为这种分布与导体内 **$E=0$** 并没有矛盾,并不违反高斯定理,似乎有存在这种电荷分布的可能.

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum q / \epsilon_0 = (q - q) / \epsilon_0 = 0$$

要证明导体空腔内表面无等量异种电荷, 即空腔内无电场, 需借助于静电场的环路定理.

用反证法: 若存在这种情况, 则空腔内表面带正负电荷, 在空腔内 $E \neq 0$, 取如图的闭合路径 L , 做环路积分:



$$\begin{aligned}\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} &= \int_{\text{沿电场线}} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{导体内}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_{\text{沿电场线}} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{导体内}} 0 \cdot d\vec{l} \\ &= \int_{\text{沿电场线}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{\text{沿电场线}} E \cos \theta dl \\ &= \int_{\text{沿电场线}} E \cdot dl \neq 0\end{aligned}$$

静电场环路定理

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

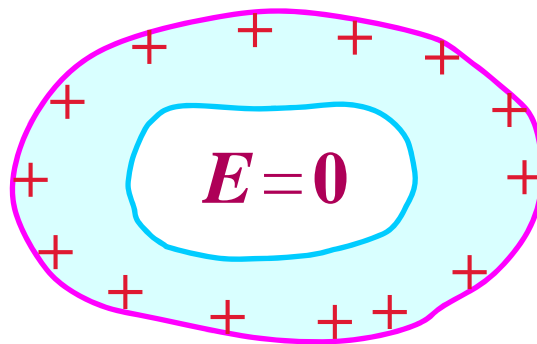
产生矛盾

由于在沿电场线一段的线积分不为零, 则:
 $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} \neq 0$ 此式与静电场环路定理矛盾

于是, 空腔内的场强 $E=0$

结论: 空腔导体 (腔内无带电体) 带电或在外电场中,
其电荷分布和电场分布的特点为:

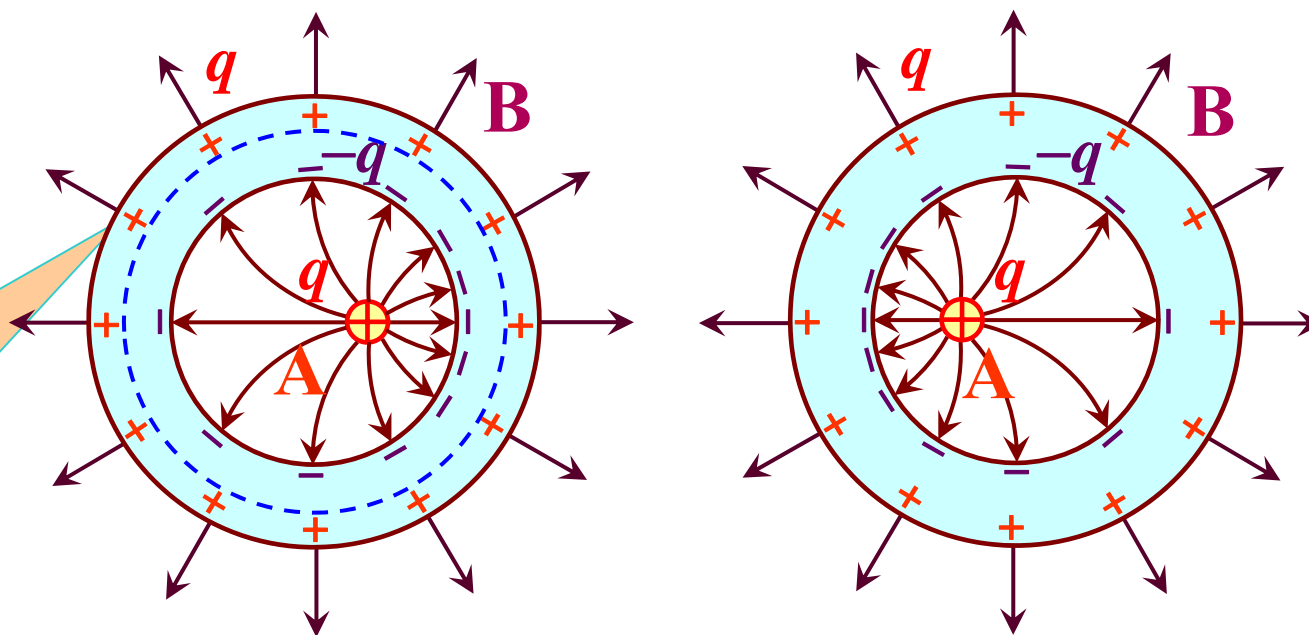
- (i) 电荷只能分布在导体外表面上,
内表面上没有净电荷.
- (ii) 导体内部及空腔内的总场强等于零.



2. 腔内有带电体的空腔导体

(1) 腔内部有带电体的不接地导体空腔

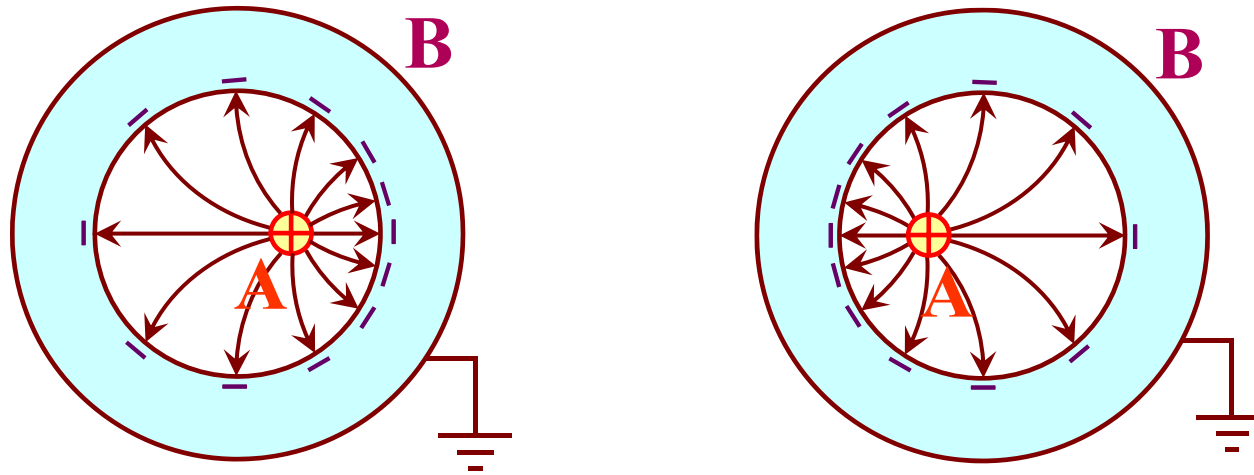
不能改变外表面的电荷分布



电荷分布的特点:

- (i) 腔内电荷A可在导体空腔的内、外表面激发电荷
- (ii) 腔内电荷A可以改变导体内表面的电荷量及其分布
- (iii) 腔内电荷A只能改变导体外表面的电荷量, 其位置的变化却不能改变导体外表面的电荷分布.

(2) 接地导体

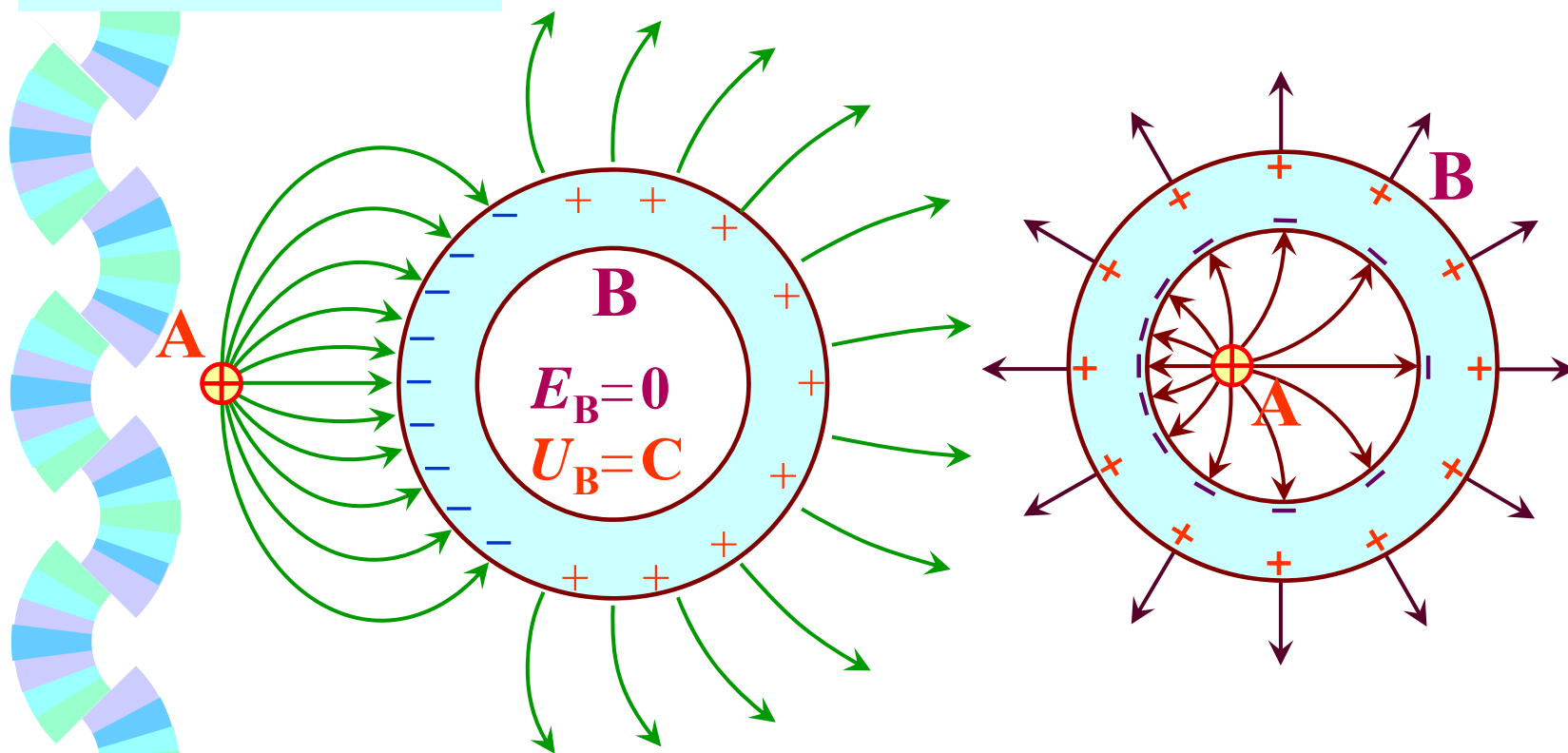


外表面积地时, 空腔导体电荷分布特点:

- (i) 腔内电荷A可激发导体内表面电荷, 但导体外表面的电荷分布被中和.
- (ii) 腔内电荷A可以改变导体内表面的电荷量及其分布.
- (iii) 腔内电荷A不会对导体外的物体产生影响.

三. 静电屏蔽

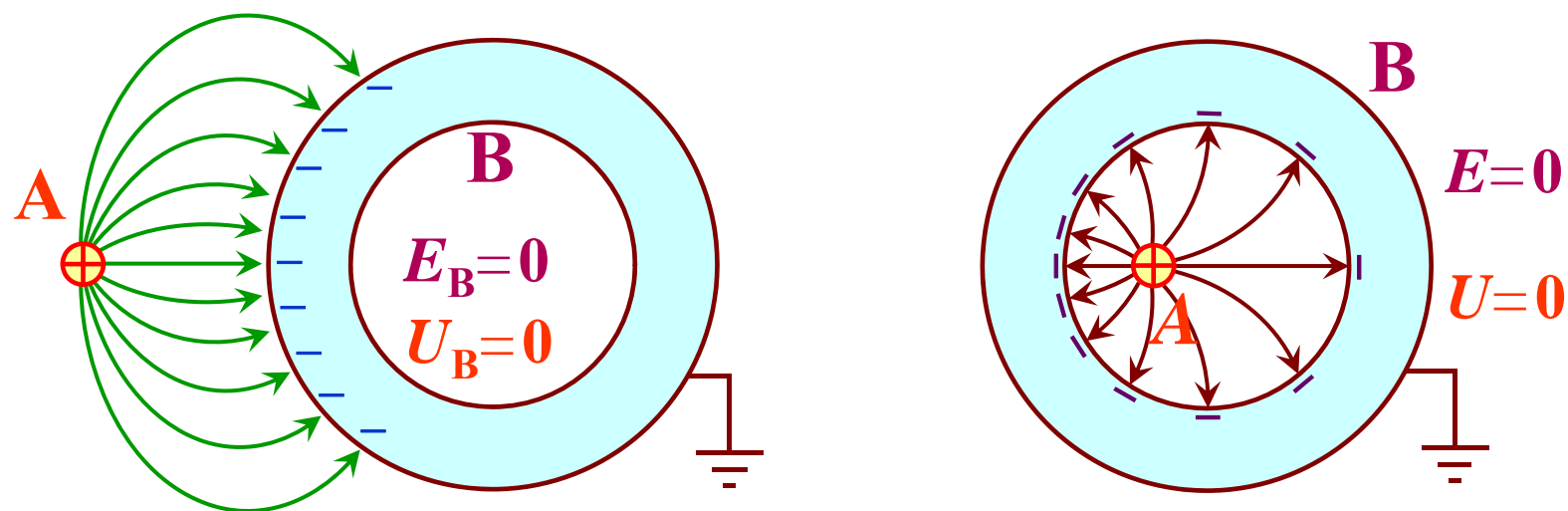
利用导体空腔将内外电场隔离



1. 情形一：未接地导体空腔

- (1) 外电场不影响腔内电场 (通过感应电荷的作用).
故腔外电荷对腔内电荷的作用力为0.
- (2) 空腔外电荷仍影响空腔内电势 (空腔内为等势体)
- (3) 空腔内电荷仍影响空腔外电场和电势

2. 情形二：接地导体空腔



(1) 外电场不影响腔内电场, 也不影响腔内电势.

(2) 空腔内电荷也不影响空腔外电场和电势

因此, 将金属导体外表面接地, 则腔外电场不影响腔内电场, 腔内电场也不影响腔外电场. 即腔内外电场互不影响.

这些结果都是通过感应电荷实现的.

3. 静电屏蔽的应用

- (1) 高压带电作业, 金属丝网制成的均压服;
- (2) 电气设备金属罩壳接地;
- (3) 小信号的提取, 如生物电信号, 信号数量级在 mV 、 μV , 装置、导线用金属丝网屏蔽.



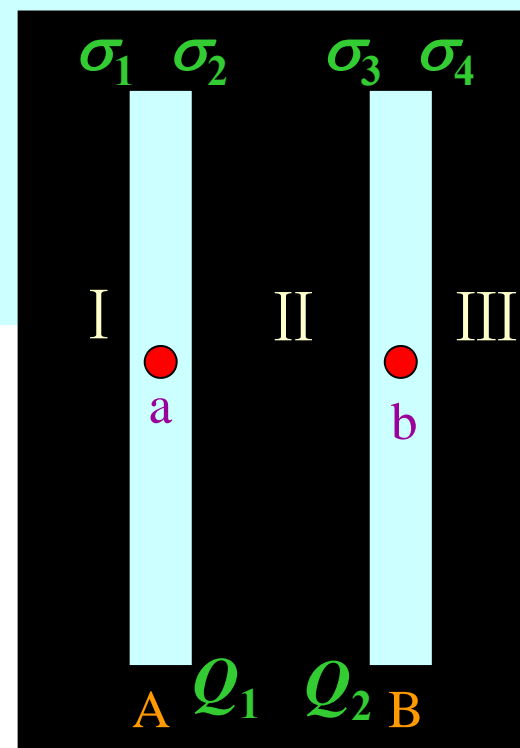
例：如图所示，两块大小相同的平行板金属板A和B，所带的电量分别为 Q_1 和 Q_2 ，且 $Q_1 > Q_2 > 0$ 。设两块金属板的面积均为 S ，略去边缘效应，试求：

- (1) 两导体四个表面上的电荷分布；
- (2) I, II, III三个区域的电场强度；
- (3) 若B板接地，两导体的电荷分布。

解： (1) 两导体四个表面上的电荷分布

由于两块金属板均很大，均可视作无限大平板，**两金属板电荷均分布在其表面**，设四个表面电荷的面密度分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ ，(均 > 0)

空间任意一点的场强等于这四个无限大带电平面分别产生的场强叠加，每个无限大平面产生的场强为 $\sigma/(2\epsilon_0)$ ，方向垂直于带电平面，当 $\sigma > 0$ 时，离开平面。



当达到静电平衡时，两导体电荷均分布在表面，而导体内部的场强为0.

先假设各导体平面均带正电

导体A内任意一点a, 有

$$E_a = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} = 0$$

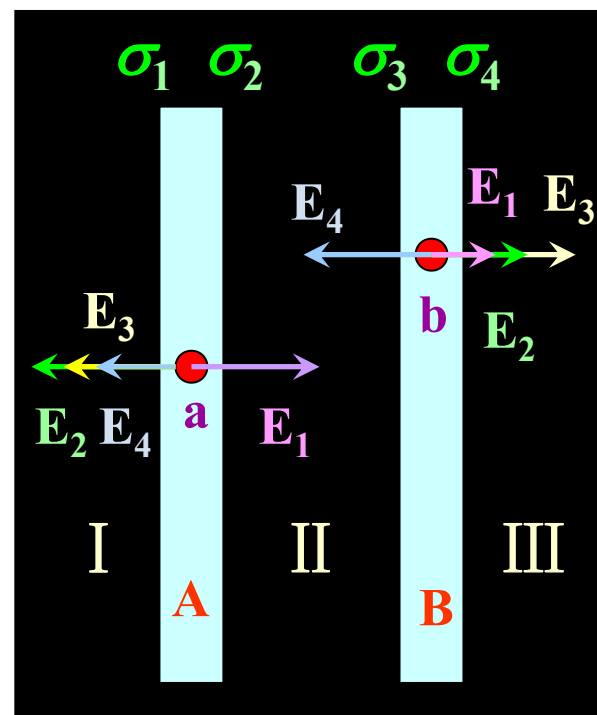
导体B内任意一点b, 有

$$E_b = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} = 0$$

由金属板的电荷守恒定律

$$\text{导体A: } \sigma_1 S + \sigma_2 S = Q_1$$

$$\text{导体B: } \sigma_3 S + \sigma_4 S = Q_2$$



解方程组, 得:

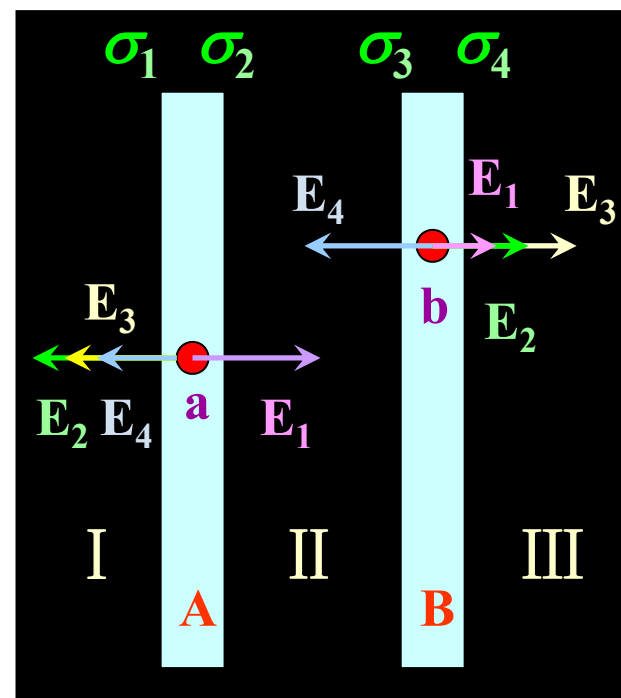
$$\sigma_1 = \sigma_4 = \frac{Q_1 + Q_2}{2S}$$

$$\sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{Q_1 - Q_2}{2S}$$

故两导体的电荷分布为

$$q_1 = \sigma_1 S = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

$$q_3 = \sigma_3 S = -\frac{Q_1 - Q_2}{2}$$



$$q_2 = \sigma_2 S = \frac{Q_1 - Q_2}{2}$$

$$q_4 = \sigma_4 S = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

可见,两导体板**相对的内侧表面**带有**等量异号电荷**,**外侧表面**带有**等量同号电荷**

★讨论: 由高斯定理

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{\text{in}} q_i = \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)\Delta S}{\epsilon_0}$$



得: $\sigma_2 = -\sigma_3$

导体A内任意一点a,有

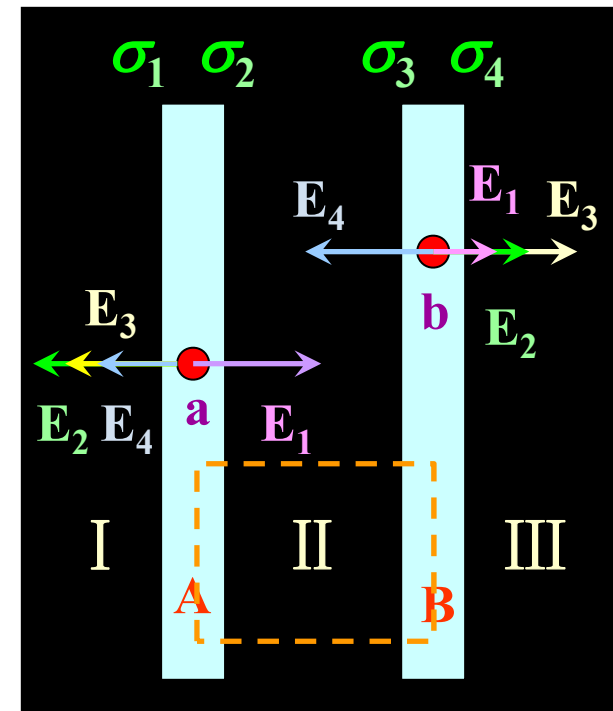
$$E_a = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma_3}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\epsilon_0} = 0$$

得: $\sigma_1 = \sigma_4$

由电荷守恒定律

导体A: $\sigma_1 S + \sigma_2 S = Q_1$

导体B: $\sigma_3 S + \sigma_4 S = Q_2$



可得同样结果

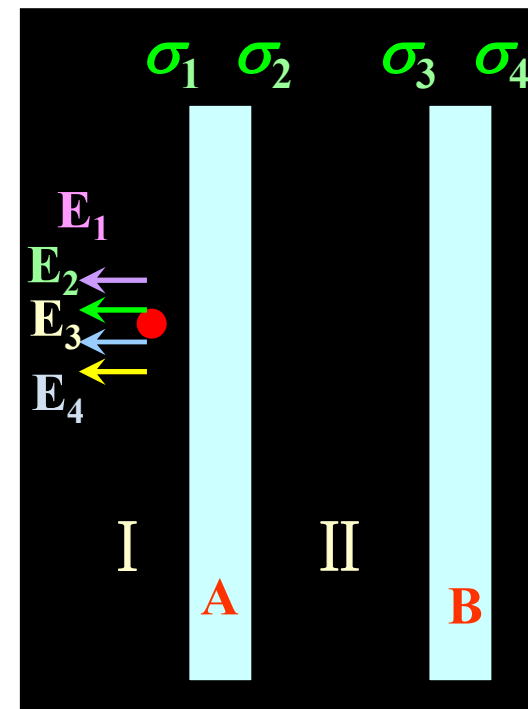
(2) I、II、III三个区域的电场强度

用场强叠加原理

I 区的场强:

$$\begin{aligned}
 E_I &= -\frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} \\
 &= -\frac{(Q_1 + Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} - \frac{(Q_1 - Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} \\
 &\quad - \frac{-(Q_1 - Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} - \frac{(Q_1 + Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} \\
 &= -\frac{(Q_1 + Q_2)}{2\varepsilon_0 S}
 \end{aligned}$$

负号表示方向向左



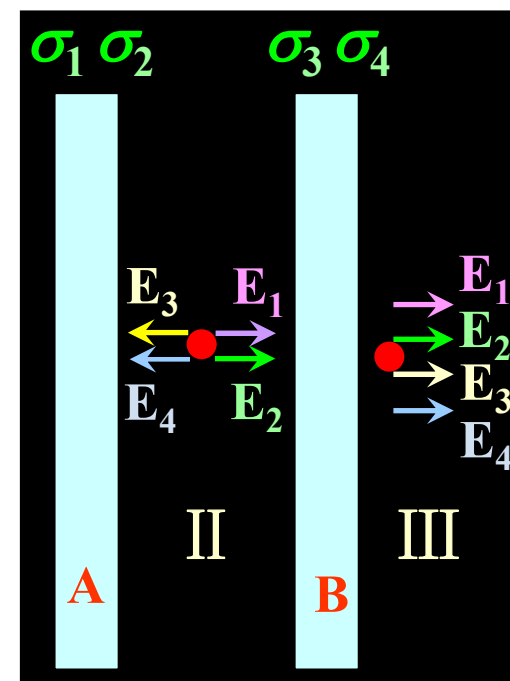
II

区:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{II}} &= \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} \\
 &= \frac{(Q_1 + Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} + \frac{(Q_1 - Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} \\
 &\quad - \frac{-(Q_1 - Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} - \frac{(Q_1 + Q_2)/2S}{2\varepsilon_0} \\
 &= \frac{(Q_1 - Q_2)}{2\varepsilon_0 S} \quad \text{方向向右}
 \end{aligned}$$

III区:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{III}} &= \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} \\
 &= \frac{(Q_1 + Q_2)}{2\varepsilon_0 S} \quad \text{方向向右}
 \end{aligned}$$



(3) 若B板接地,两导体的电荷分布.

由于忽略边缘效应, 故

$$\sigma_4' = 0 \quad \text{为什么?}$$

由高斯定理

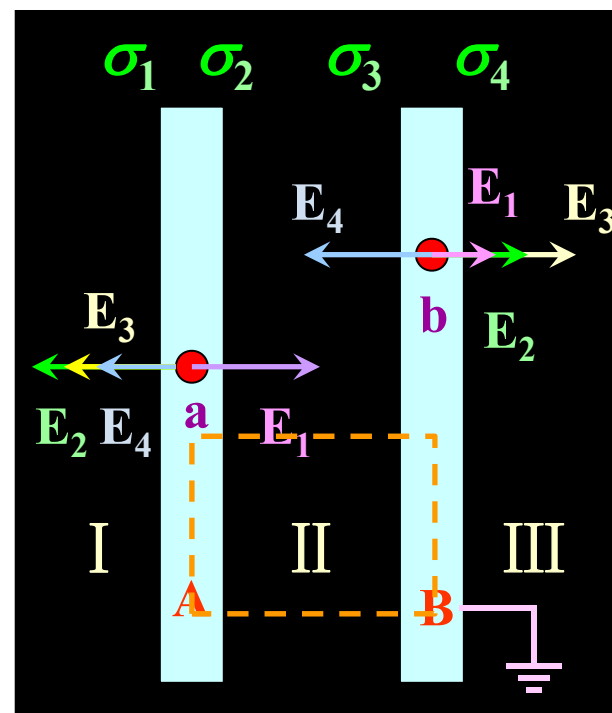
$$\text{得: } \sigma_2' = -\sigma_3'$$

导体A内任意一点a, 有

$$E_a = \frac{\sigma_1'}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2'}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_3'}{2\varepsilon_0} = 0$$

$$\text{得: } \sigma_1' = 0$$

可见, 两导体板相对的内侧表面带有等量异号电荷, 外侧表面不带电



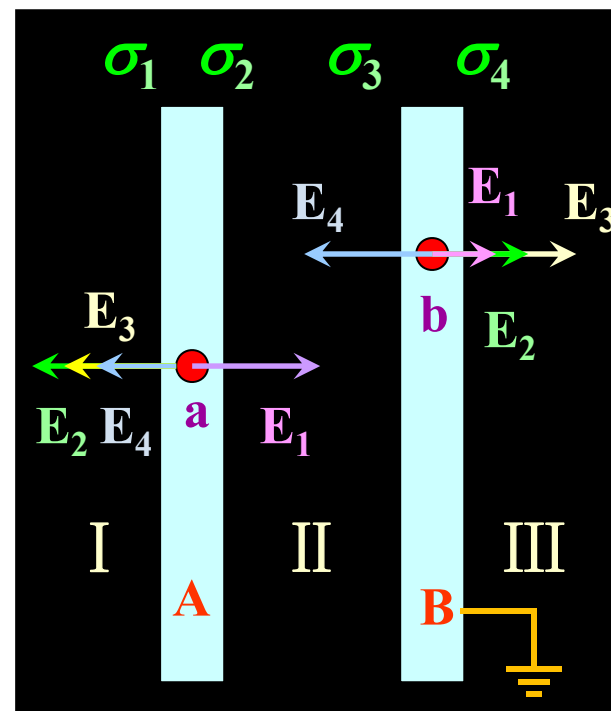
由A极板的电荷守恒定律

$$\sigma_1' S + \sigma_2' S = Q_1$$

$$\text{得: } \sigma_2' = \frac{Q_1}{S} \quad \sigma_3' = -\frac{Q_1}{S}$$

故B极板所带的电荷为

$$Q_B = \sigma_3' S + \sigma_4' S = -Q_1$$



★思考题：大地向导体B提供了多少电量？

I、III区的场强： $E=0$

II区的场强：

$$E_{II} = \frac{\sigma_2'}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_3'}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma_2'}{\varepsilon_0} = \frac{Q_1}{\varepsilon_0 S} \quad \text{方向向右}$$

例：如图,均匀带电量 Q ,半径为 R_2 的导体薄球壳,内有一半半径为 R_1 的同心导体球,若导体球接地,求场强分布和电势分布

解：内球接地,内球带电吗?

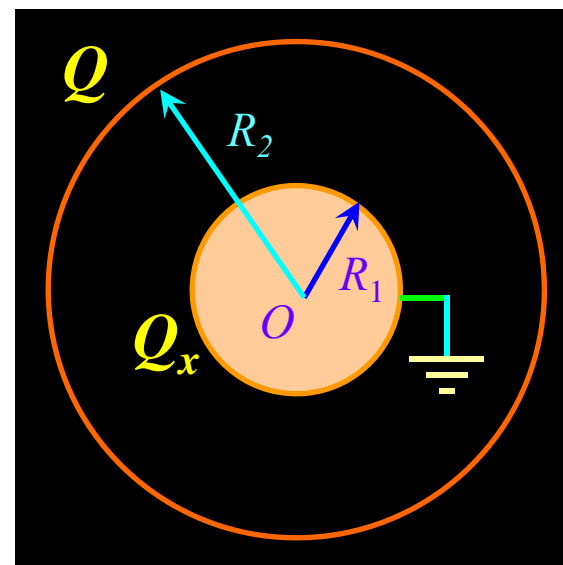
内球接地,表明内球与无穷远处等电势.当外球壳带电量时,内球也必带电量,否则,内球的电势不会为0

设内球带电量为 Q_x ,由球心电势为0

$$U_{1R_1} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0 R_1} = 0$$

$$Q_x = -\frac{R_1}{R_2} Q$$

即使球形导体表面的电荷分布不均匀,仍可以用该方法求球心的电势.



由高斯定理, 得场强分布为:

$$E_1 = \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (R_1 < r < R_2)$$

$$E_2 = \frac{Q_x + Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (r > R_2)$$

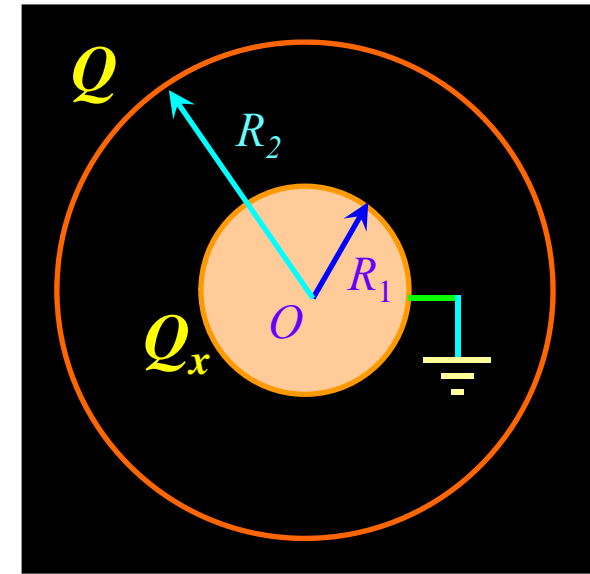
$$E_3 = 0 \quad (r < R_1)$$

由电势的定义, 可得电势分布:

$$(r < R_1) \quad U_3 = 0$$

$$(R_1 \leq r \leq R_2)$$

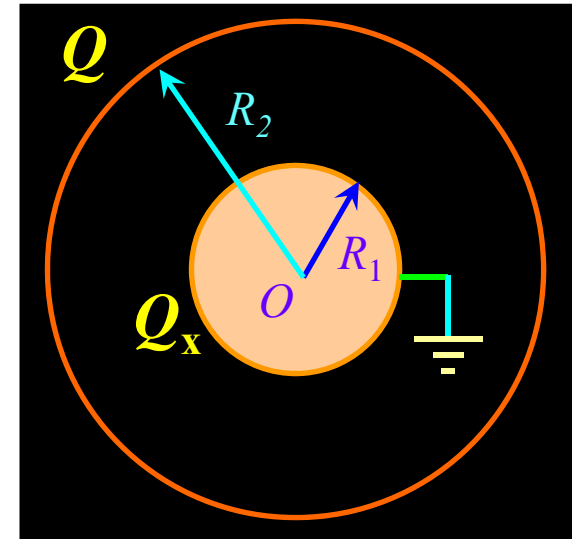
$$U_1 = \int_r^{R_1} \vec{E}_1 \cdot d\vec{l} = \int_r^{R_1} \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1} \right)$$



由于内球也是零电势

$$(r \geq R_2)$$

$$U_2 = \int_r^\infty \vec{E}_2 \cdot d\vec{l} = \int_r^\infty \frac{Q_x + Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr$$
$$= \frac{Q_x + Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$




导体接地时,其外表面电荷不一定为零!
但电势一定为零.

最后,将 Q_x 代入以上各式,可求得各处的场强和电势的分布为:

$$(R_1 < r < R_2)$$

$$E_1 = \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{Q(-R_1 / R_2)}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{R_1 Q}{4\pi\epsilon_0 R_2 r^2}$$


$$(R_1 \leq r \leq R_2)$$

$$U_1 = -\frac{R_1 Q}{4\pi\epsilon_0 R_2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R_2} - \frac{R_1 Q}{4\pi\epsilon_0 R_2 r}$$

$$(r > R_2) \quad E_2 = \frac{Q(-R_1 / R_2) + Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{(R_2 - R_1)Q}{4\pi\epsilon_0 R_2 r^2}$$

$$(r \geq R_2) \quad U_2 = \frac{Q(-R_1 / R_2) + Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} = \frac{(R_2 - R_1)Q}{4\pi\epsilon_0 R_2} \frac{1}{r}$$

其余为0

能否由电势叠加原理求电势 ?