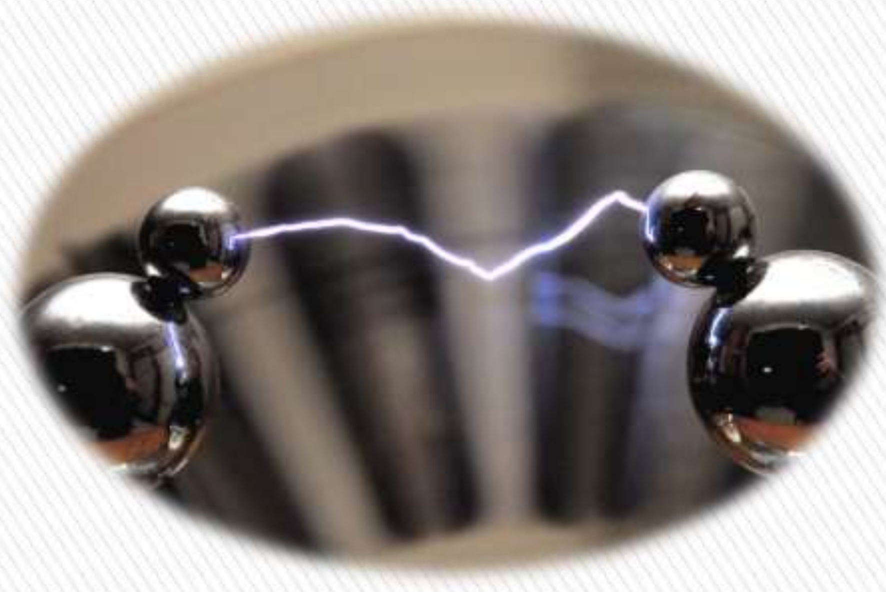
大学物理(1)

云南大学

第 9 章

静电场中的导体



9.1 导体的静电平衡条件

» **导体：**

允许电荷在其内迅速、近似自由移动（导电）的物体，如：银、金、铜、铝等金属，掺杂后的半导体，无机盐溶液，等离子体等等。

» **绝缘体：**

电荷在其内几乎无法自由移动的物体，如：普通橡胶、聚乙烯、聚四氟乙烯、二氧化硅、硅油、纯水和干燥的空气等等。

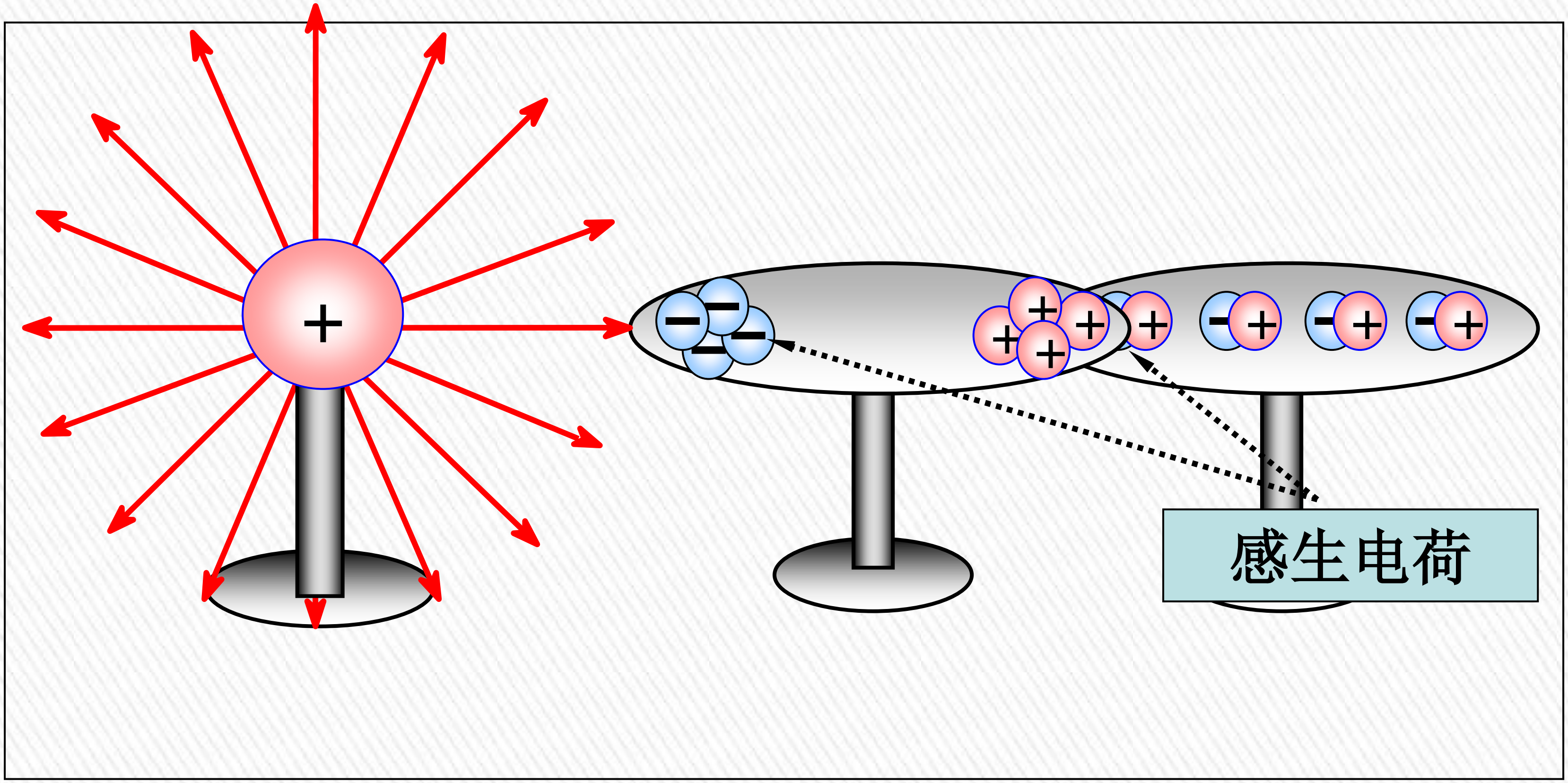
» **半导体：**

有一类物质很特殊，它们的纯净物性质接近绝缘体，但只要在其中掺入微量特殊物质将使其可以像导体那样导电。这样的物质称为半导体。

如：硅、锗和砷化镓等。

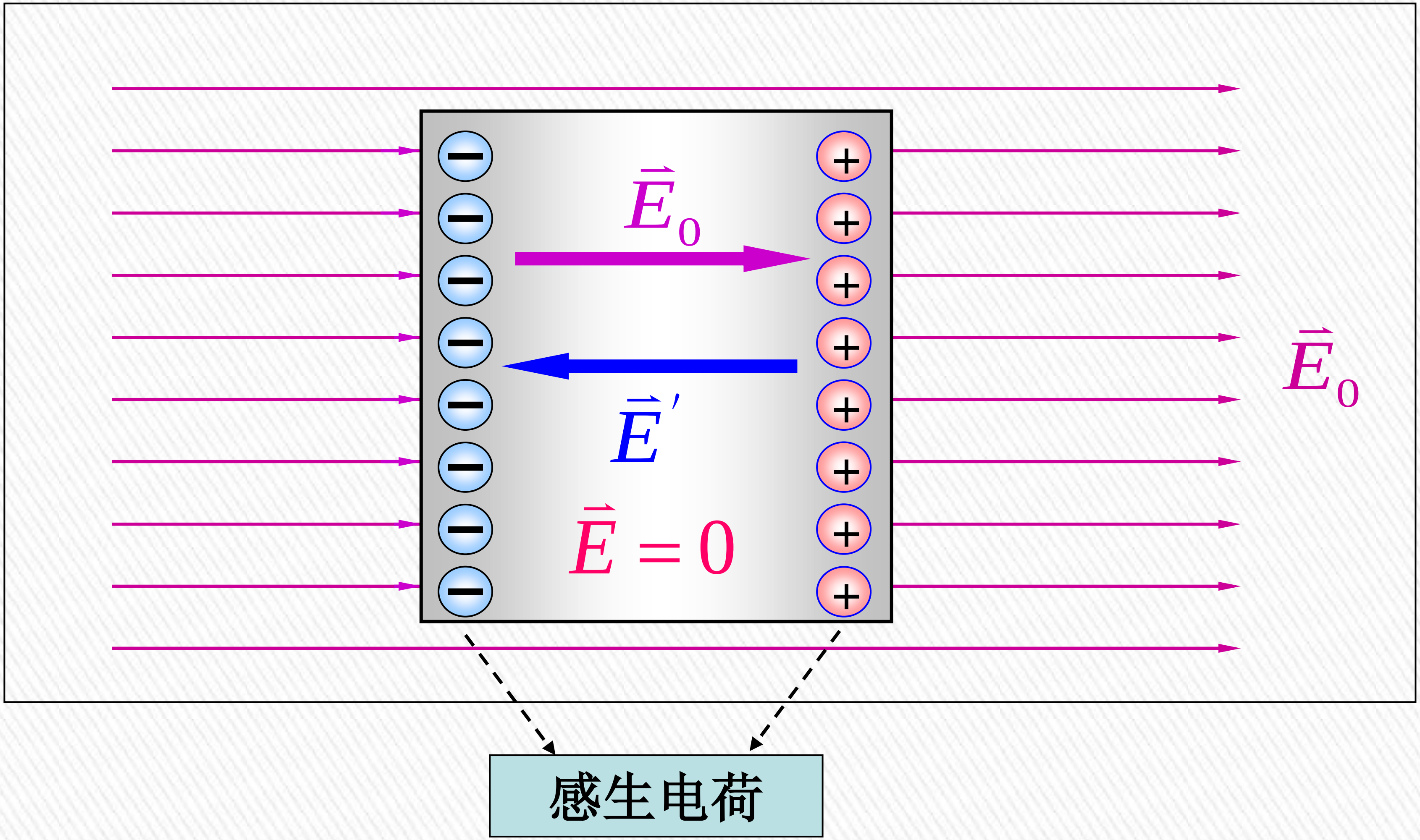
9.1 导体的静电平衡条件

» 静电感应：



9.1 导体的静电平衡条件

» 静电平衡：**感生电荷的场强** $\vec{E}'$ 和 **原场强** $\vec{E}_0$ 互相抵消，使得**导体内部的合场强** $\vec{E}=0$ 。

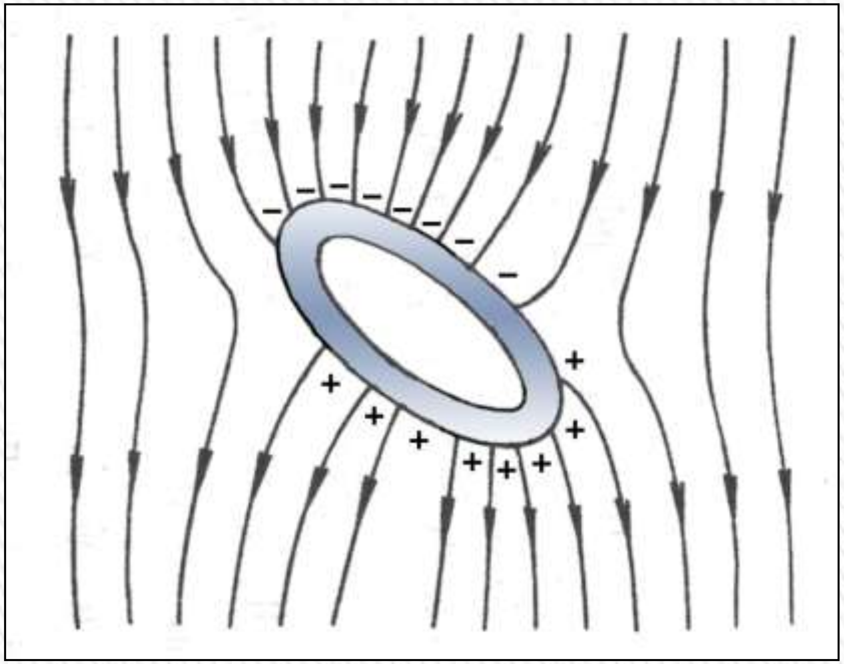


9.1 导体的静电平衡条件

» 静电平衡：

> 导体内部任何一点处的电场强度为零 → **整个导体是一个等势体，导体表面是一个等势面**；

> 等势面和电场线永远垂直 → **导体表面的电场强度的方向与导体表面垂直**。



9.1 导体的静电平衡条件

有导体存在时的静电场

从图片中可以看到，圆环外部的草籽因受到电场作用而极化，从而沿电场方向排列。而圆环内部电场强度为零，草籽未被极化，从而呈现杂乱的排列。

9.2 静电平衡的导体上的电荷分布

» 处于静电平衡的导体具有如下性质：

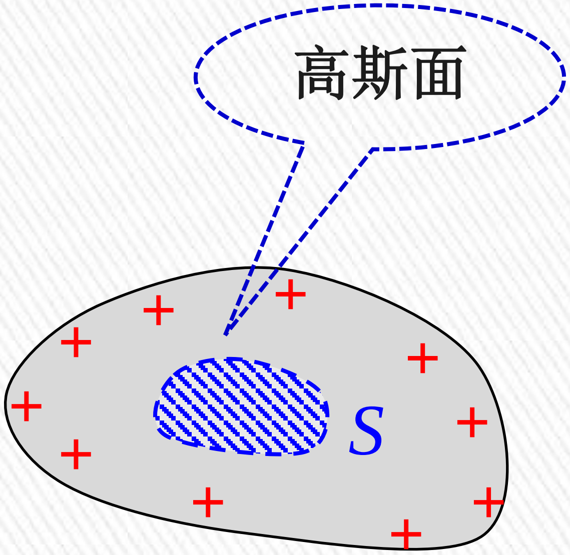
（1）导体**内部**各处的净余电荷为零，电荷只分布在导体表面；

证明：在导体内部任取一高斯面，

$\because\ \vec{E}=0\,,$

高斯定理：$\oint_S \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{S}=0=\dfrac{q}{\varepsilon_0}$

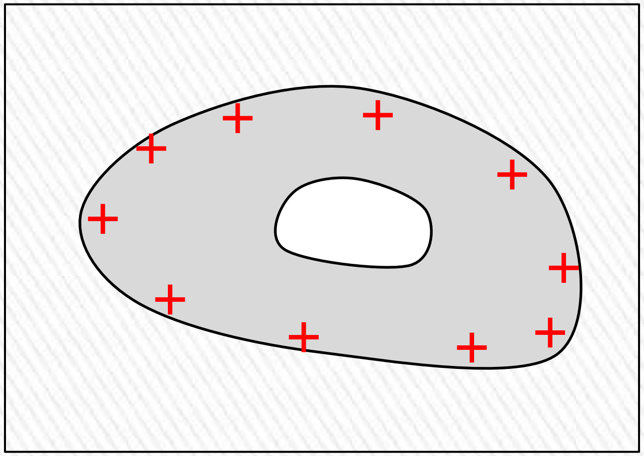
$\therefore\ q=0$



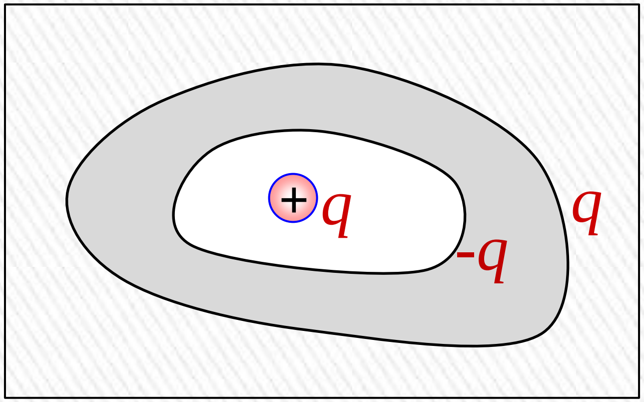
9.2 静电平衡的导体上的电荷分布

» 处于静电平衡的**空腔导体**的电荷分布：

◆ 空腔内无电荷时，电荷分布在外表面，内表面没有电荷。



◆ 空腔内有电荷 q 时，空腔内表面有感应电荷 $-q$，外表面有感应电荷 $+q$



9.2 静电平衡的导体上的电荷分布

» 处于静电平衡的导体具有如下性质：

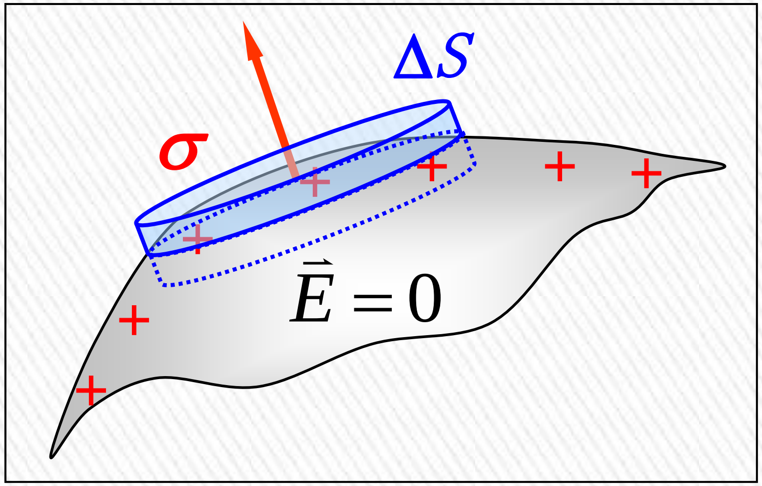
（2）导体表面的场强正比于该处的电荷面密度：

$$E_S = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$ ，因此，$\sigma \uparrow E \uparrow;\ \sigma \downarrow, E \downarrow$

证明：在导体表面作一扁圆柱型高斯面，

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \cdot \Delta S = \frac{\sigma \cdot \Delta S}{\varepsilon_0}$$

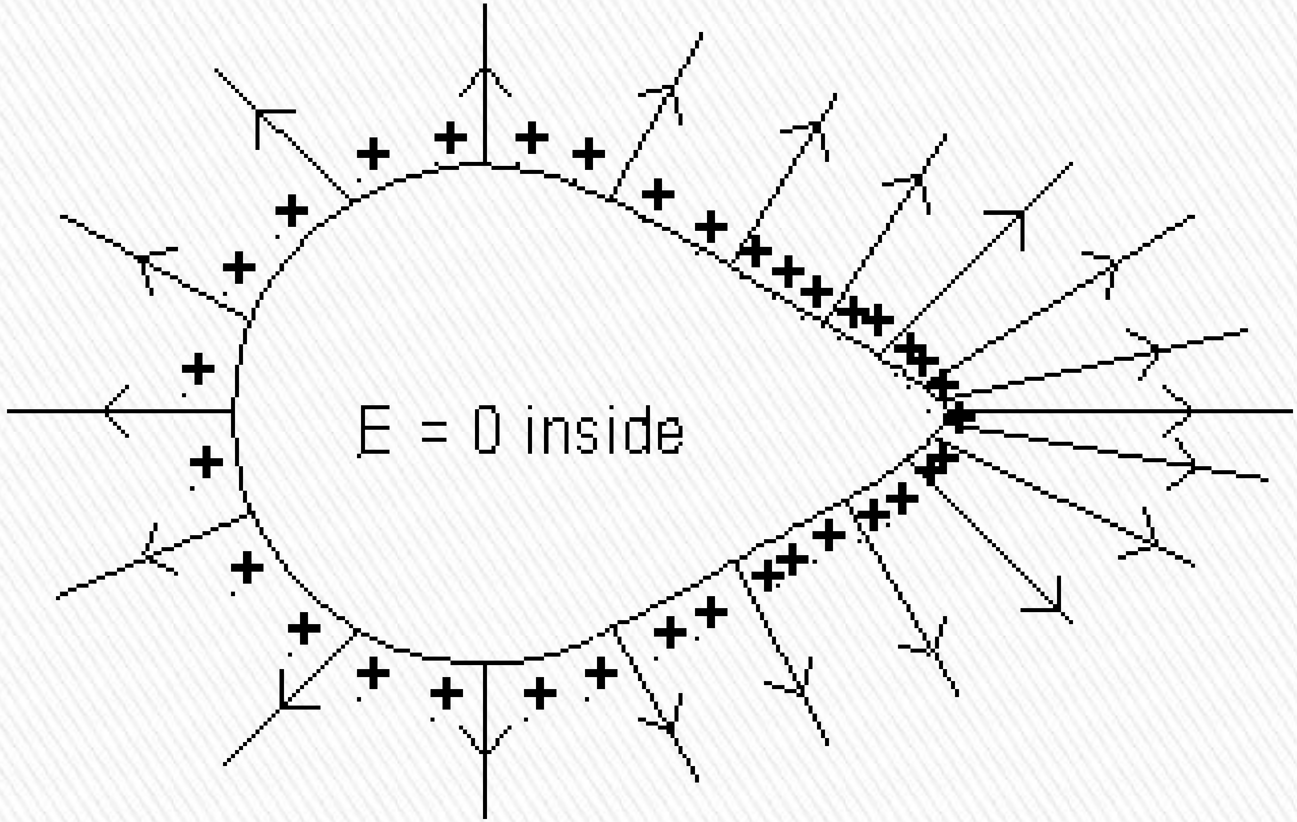
$$\Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



9.2 静电平衡的导体上的电荷分布

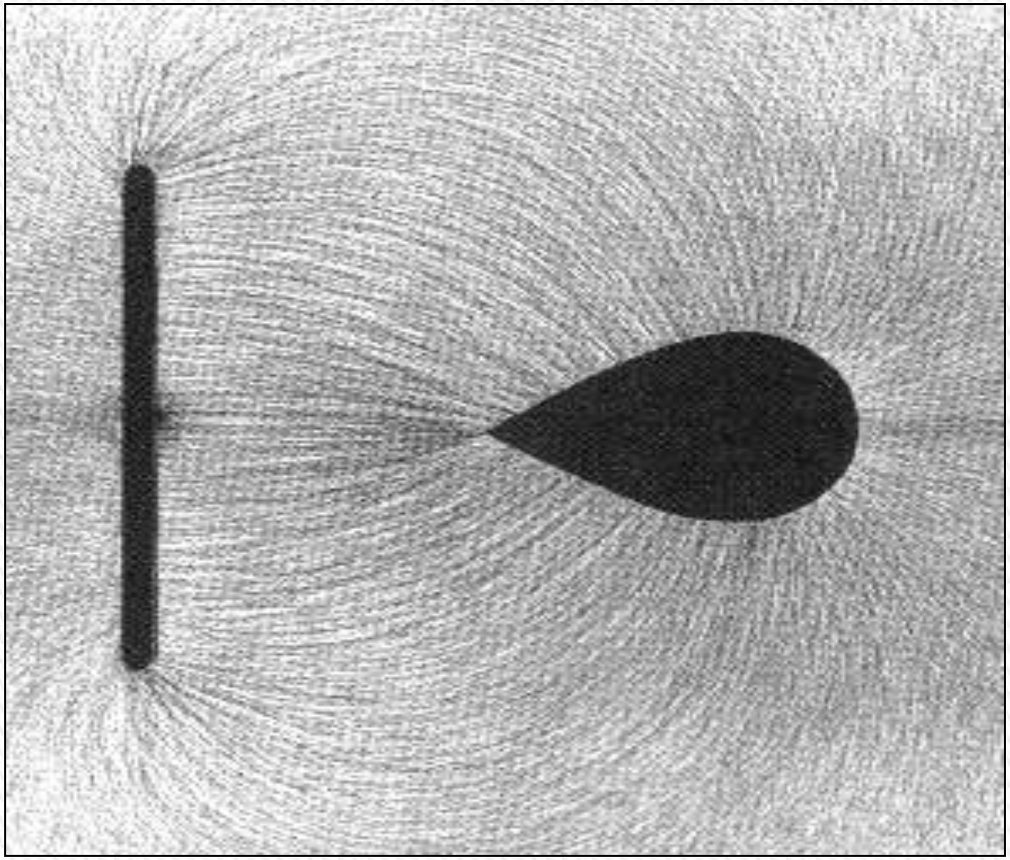
» 处于静电平衡的导体具有如下性质：

（3）孤立导体表面各处的电荷面密度与该处表面的曲率有关，曲率大的地方电荷密度大，曲率小的地方电荷密度小。



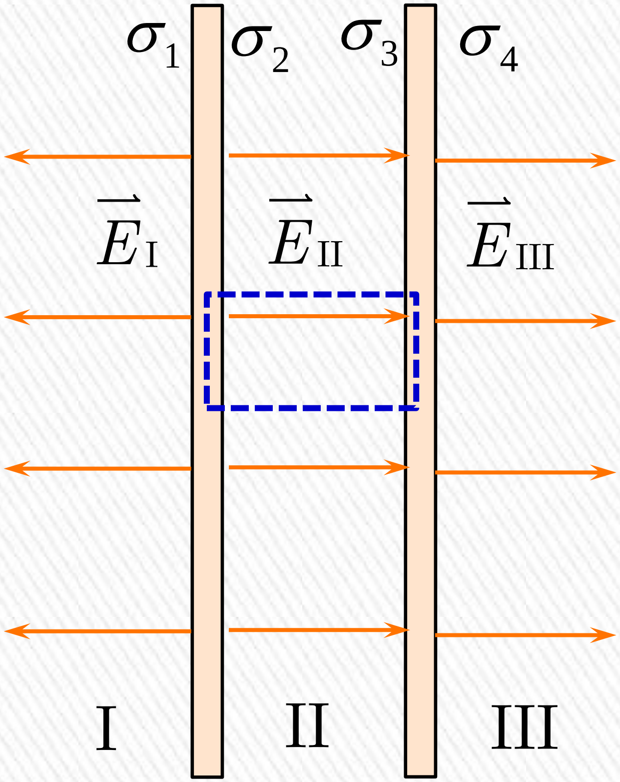
9.2 静电平衡的导体上的电荷分布

» 尖端放电：带电导体尖端附近的电场特别大，可使尖端附近的空气发生电离而成为导体产生放电现象.



9.3 有导体存在时静电场的分析与计算

P286 例 9.1：有一大块金属平板，面积 S，带电量 Q，今在其附近平行地放置第二块大金属板，此板不带电。(1) 求静电平衡时，金属板上的电荷分布，及周围空间的电场强度分布；



(1) 解：由于静电平衡时导体内部无电荷，所以电荷只能分布在两块金属板的表面上。设 4 个表面上的电荷密度分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$，由电荷守恒定律可知：

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{Q}{S}\ ,\quad \sigma_3 + \sigma_4 = 0$$

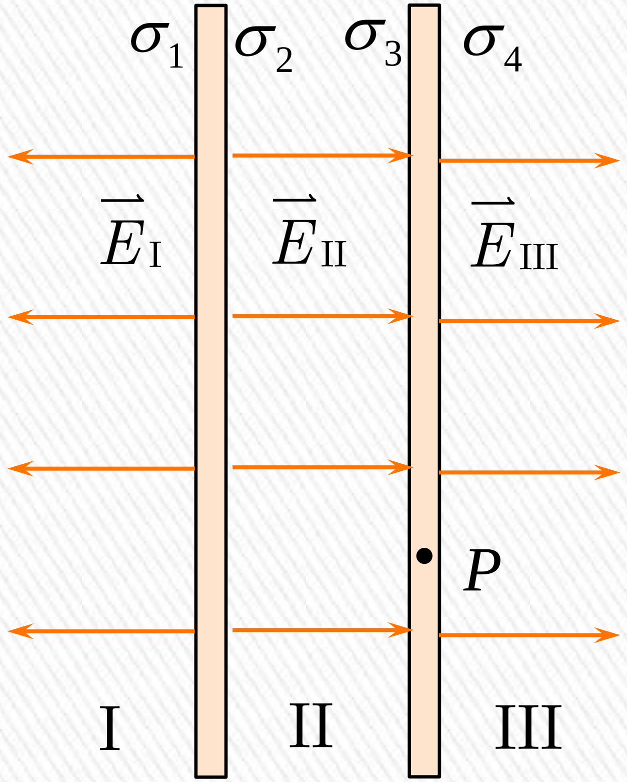
作如图蓝色虚线所示的高斯面，可知通过该高斯面的电场强度通量为 0，根据高斯定理可得：

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

9.3 有导体存在时静电场的分析与计算

P286 例 9.1：有一大块金属平板，面积 S，带电量 Q，今在其附近平行地放置第二块大金属板，此板不带电。(1) 求静电平衡时，金属板上的电荷分布，及周围空间的电场强度分布；

(1) 解(续)：在金属板中任选一点 P，该点的场强为 4 个带电平面的场强之和，同时也为 0 ：



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

$$\Rightarrow \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_4 = 0$$

联立以上方程解得：

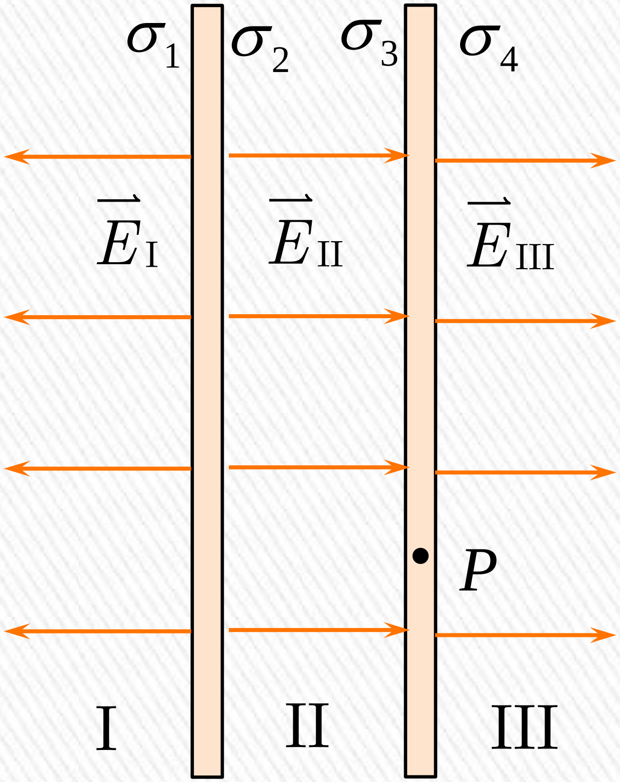
$$\sigma_1 = \frac{Q}{2S}, \quad \sigma_2 = \frac{Q}{2S}, \quad \sigma_3 = -\frac{Q}{2S}, \quad \sigma_4 = \frac{Q}{2S}$$

9.3 有导体存在时静电场的分析与计算

P286 例 9.1：有一大块金属平板，面积 S，带电量 Q，今在其附近平行地放置第二块大金属板，此板不带电。(1) 求静电平衡时，金属板上的电荷分布，及周围空间的电场强度分布；

(1) 解(续)：4 个带电平面的电荷密度分别为：

$$\sigma_1=\frac{Q}{2S},\ \sigma_2=\frac{Q}{2S},\ \sigma_3=-\frac{Q}{2S},\ \sigma_4=\frac{Q}{2S}$$



因此容易得 I、II、III 区的电场强度：

$$E_{\mathrm{I}}=\frac{Q}{2\varepsilon_0 S}，\ 方向\leftarrow$$

$$E_{\mathrm{II}}=\frac{Q}{2\varepsilon_0 S}，\ 方向\rightarrow$$

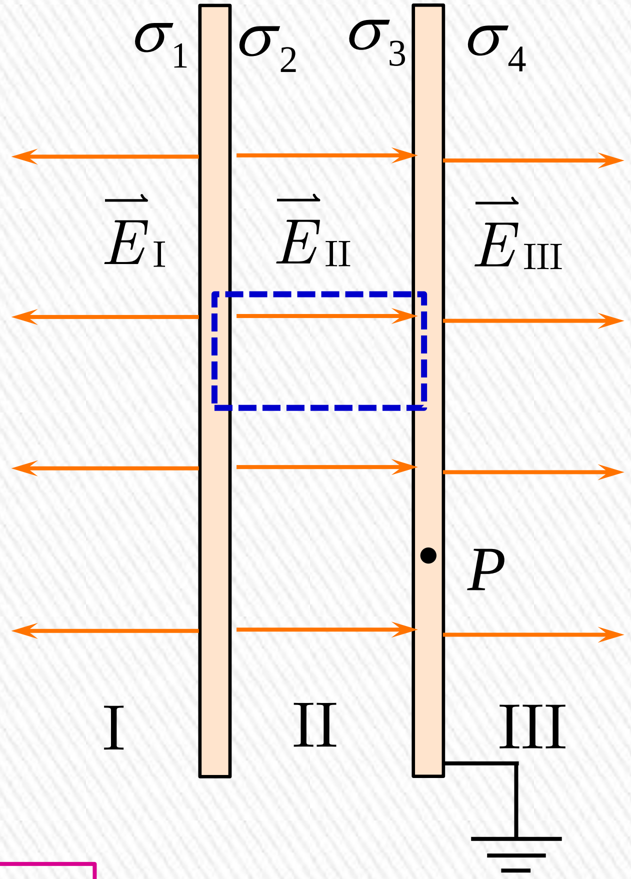
$$E_{\mathrm{III}}=\frac{Q}{2\varepsilon_0 S}，\ 方向\rightarrow$$

9.3 有导体存在时静电场的分析与计算

P286 例 9.1：有一大块金属平板，面积 S，带电量 Q，今在其附近平行地放置第二块大金属板，此板不带电。

(2) 如果第二块金属板接地，情况又如何？

(2) 解：金属板接地之后，那一面的电荷将会消失在地面上，即 $\boxed{\sigma_4 = 0}$



根据第一块金属板的电荷守恒仍然可得：

$$\boxed{\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{Q}{S}}$$

根据高斯定理仍然可得：$\boxed{\sigma_2 + \sigma_3 = 0}$

为了使点 P 处的场强为 0，仍然有：

$$\boxed{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0}$$

联立解得：$\boxed{\sigma_1 = \sigma_4 = 0,\ \sigma_2 = \frac{Q}{S},\ \sigma_3 = -\frac{Q}{S}}$

9.3 有导体存在时静电场的分析与计算

P286 例 9.1：有一大块金属平板，面积 S，带电量 Q，今在其附近平行地放置第二块大金属板，此板不带电。

(2) 如果第二块金属板接地，情况又如何？

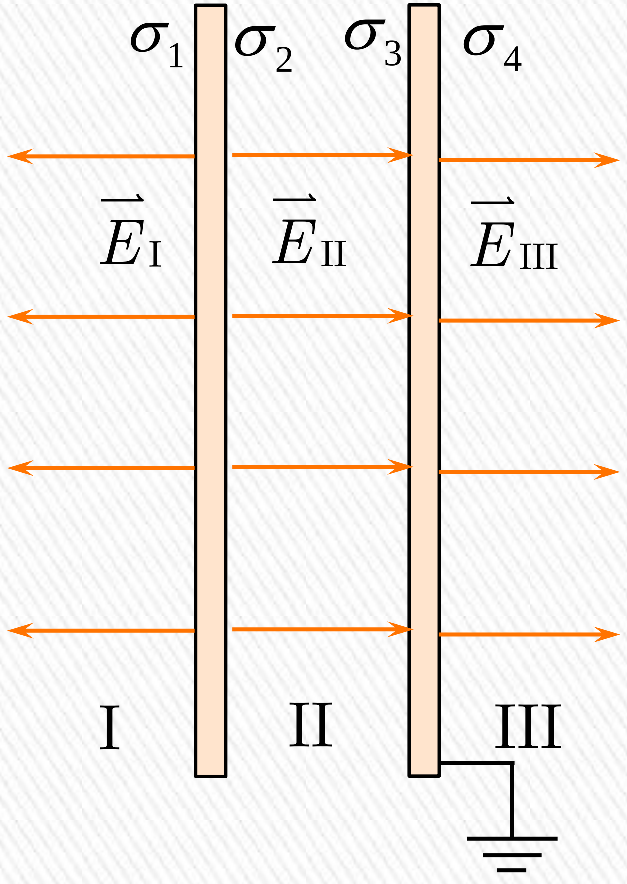
(2) 解(续)：4 个带电平面的电荷密度分别为

$$\sigma_1=\sigma_4=0,\ \sigma_2=\frac{Q}{S},\ \sigma_3=-\frac{Q}{S}$$

因此容易得 I、II、III 区的电场强度：

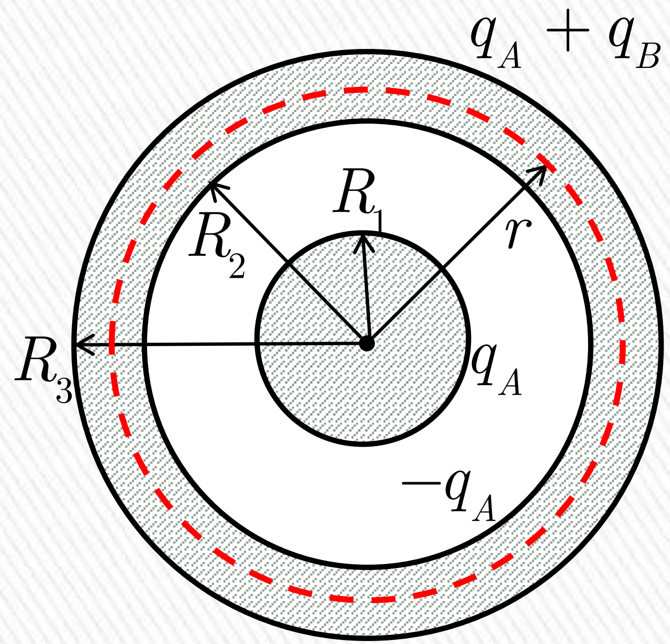
$$E_{\mathrm{I}}=E_{\mathrm{III}}=0$$

$$E_{\mathrm{II}}=\frac{Q}{\varepsilon_0 S}$$，方向➞



P287 例 9.2：一个半径为 R_1 的金属球 A，外面套一个同心的金属球壳 B，其内外半径分别为 R_2 和 R_3。二者带电后电势分别为 φ_A 和φ_B。

(1) 求此系统的电荷以及电场的分布。



(1) 解：设球 A 和球壳 B 带电量分别为 q_A 和 q_B，根据静电平衡分析得，A 的电荷 q_A 分布在它表面上，B 的内表面感应出 $-q_A$ 的电荷，外表面的电荷为 q_A+q_B。

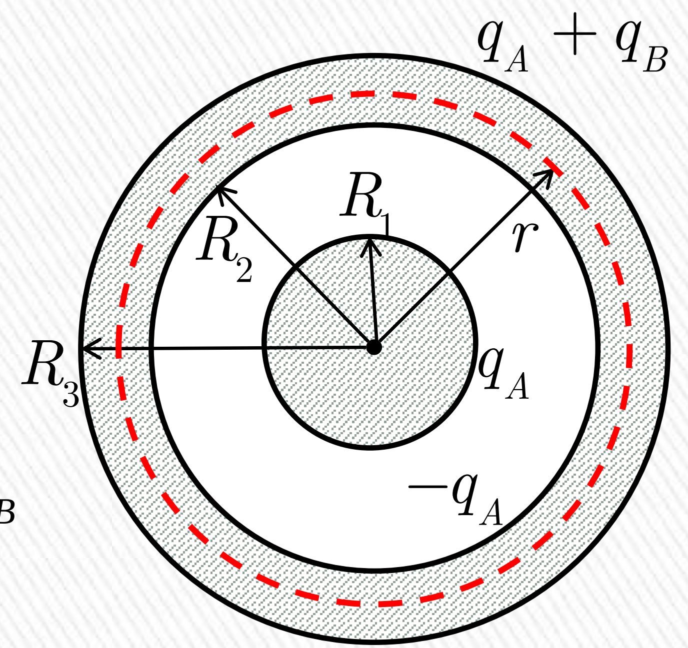
根据电势的叠加原理，采用 **P267 例 8.1** 和 **习题 9.2** 的结论，A 和 B 的电势分别为：

$$\begin{cases} \varphi_A = \dfrac{q_A}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \dfrac{-q_A}{4\pi\varepsilon_0 R_2} + \dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0 R_3} \\ \varphi_B = \dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0 R_3} \end{cases}$$

解得：

$$\begin{cases} q_A = \dfrac{4\pi\varepsilon_0(\varphi_A-\varphi_B)R_1R_2}{R_2-R_1} \\ q_A+q_B = 4\pi\varepsilon_0 R_3\varphi_B \end{cases}$$

P287 例 9.2：一个半径为 R_1 的金属球 A，外面套一个同心的金属球壳 B，其内外半径分别为 R_2 和 R_3 。二者带电后电势分别为 φ_A 和φ_B 。(1) 求此系统的电荷以及电场的分布。



(1) 解(续)：静电平衡分析得，A 的电荷 q_A 分布在它表面上，B 的内表面感应出 $-q_A$ 的电荷，外表面的电荷为 q_A+q_B ，且

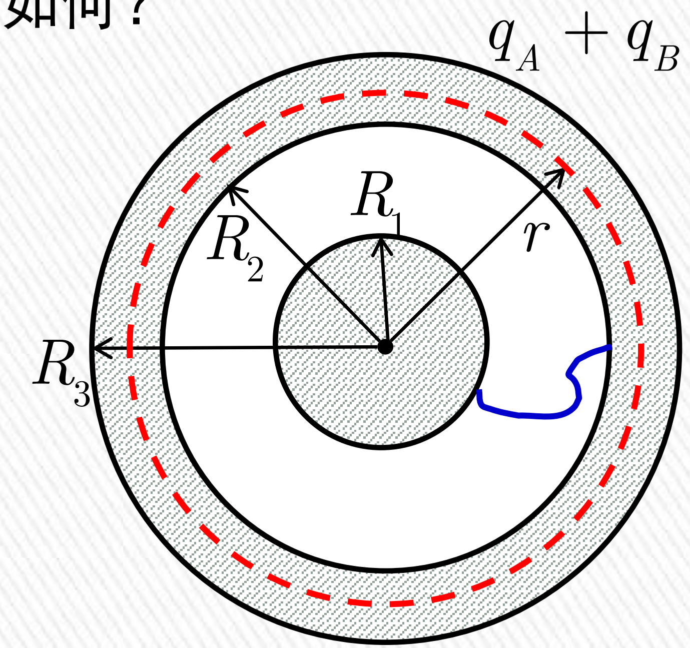
$$q_A=\frac{4\pi\varepsilon_0(\varphi_A-\varphi_B)R_1R_2}{R_2-R_1},\quad q_A+q_B=4\pi\varepsilon_0R_3\varphi_B$$

利用高斯定理求得电场分布为：

$$E=\begin{cases}0 & ,\ r<R_1\\ \dfrac{q_A}{4\pi\varepsilon_0r^2} & ,\ R_1\le r<R_2\\ 0 & ,\ R_2\le r<R_3\\ \dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0r^2} & ,\ r\ge R_3\end{cases}$$

P287 例 9.2：一个半径为 R_1 的金属球，外面套一个同心的金属球壳 B，其内外半径分别为 R_2 和 R_3。二者带电后电势分别为 φ_A 和φ_B。

(2) 如果用导线将球和球壳连起来，结果又将如何？



(2) 解：如果用导线将球和球壳连起来，则球的表面的电荷和球壳的内表面的电荷会中和，而球壳外表面的电荷不变，仍为 $q_A + q_B$。

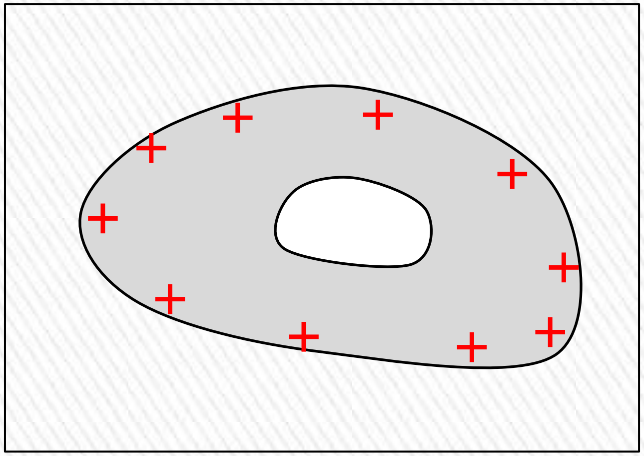
则电场分布为：
$$E=\begin{cases}0 & , \ r\le R_3\\ \dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0 r^2} & , \ r>R_3\end{cases}$$

电势分布为：
$$\varphi=\begin{cases}\dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0 R_3} & , \quad r\le R_3\\ \dfrac{q_A+q_B}{4\pi\varepsilon_0 r} & , \quad r>R_3\end{cases}$$

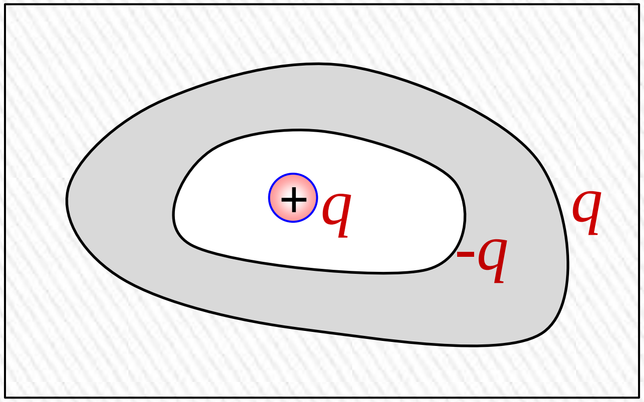
9.4 静电屏蔽

» 对一个空腔导体， 空腔内无电荷时，如果它带有电荷，那么电荷全都分布在外表面，内表面没有电荷。

» 使用高斯定理可以证明，**空腔内部的电场强度为 0**。



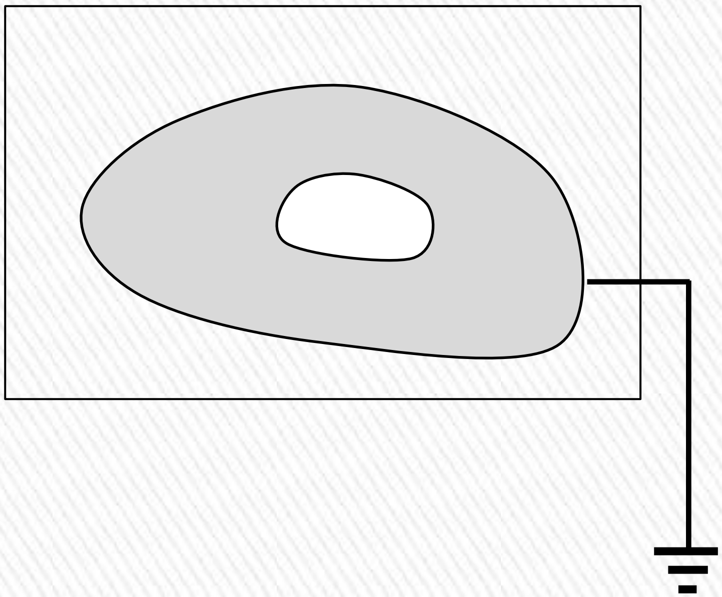
» 当空腔内有电荷时，**空腔内的电荷会影响空腔内的电场和导体外部的电场**，但**导体外部的电场不会反过来影响空腔内的电场**。

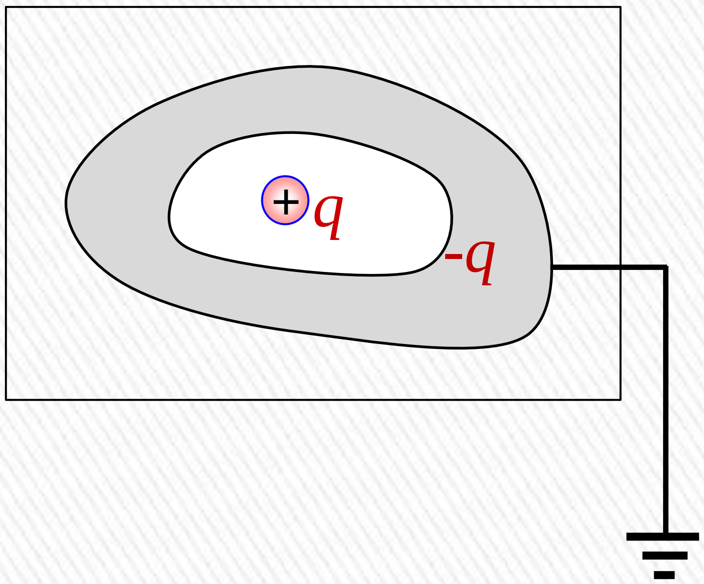


9.4 静电屏蔽

» 当空腔导体的外表面接地时，

» 无论空腔内部有没有电荷，**空腔内的电场都不发生变化**，但**导体外部的电场会被清零**。





9.4 静电屏蔽

» 上述由于封闭导体壳的存在，使得壳体外部电场不影响壳内电场的现象称为**静电屏蔽**。

» 静电屏蔽的一般规律：

（1）无论壳体接地与否，壳内空间不受壳外电荷影响。但不接地时，壳外空间会受到壳内电荷影响；

（2）当壳体接地后，壳内外电场互不影响。