# 第6节　静电场中的导体

实物按电特性分为：　导体、半导体、绝缘体

1. 导体：存在大量的可自由移动的电荷；

金属导体——自由电子

2. 绝缘体：理论上认为一个自由移动的电荷也没有，又称 电介质；

3. 半导体：介于上述两者之间。

本节讨论金属导体与电场的相互影响规律。

将金属导体放在静电场中：

①导体内的自由电荷，在电场力作用下作宏观定向移动，从而使导体中的电荷重新分布；

②电荷分布改变，电场分布随之改变。

## 一、导体静电平衡条件

### 1. 静电平衡

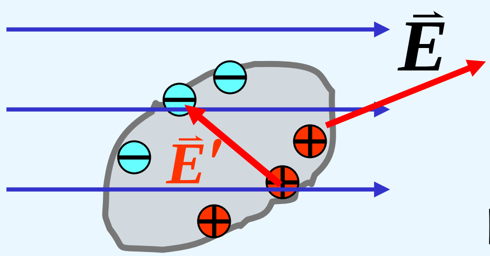
带电系统中，电荷静止不动，从而电场分布不随时间变化，则该系统达静电平衡状态。

## 2. 导体静电平衡条件

① 导体内部任何一点的场强等于 0 。 $\boxed{\vec{E}_{内}=0}$

② 导体表面任何一点的场强都垂直表面。 $\boxed{\vec{E}_{表面}\perp 表面}$

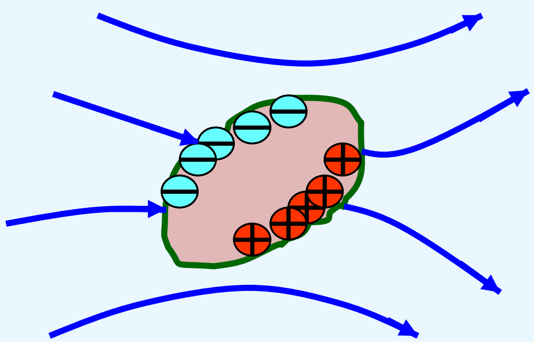
例如：在均匀场放入一导体的情况




表面出现感应电荷

电荷积累到一定程度

$$\vec{E}'=-\vec{E}$$



$\vec{E}_{内}=0$ 电荷不动

达静电平衡

3. **推论：** 导体的静电平衡条件的**电势**描述：

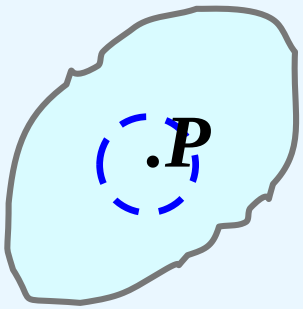
$$\boxed{\vec{E}=-\nabla V}$$

① 导体是等势体。

② 导体表面是等势面。 $V_a-V_b=\int_a^b\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=0$

## 二、导体上电荷分布

**1. 体内无空腔** 围任一点$P$作高斯面$S$，由高斯定理：



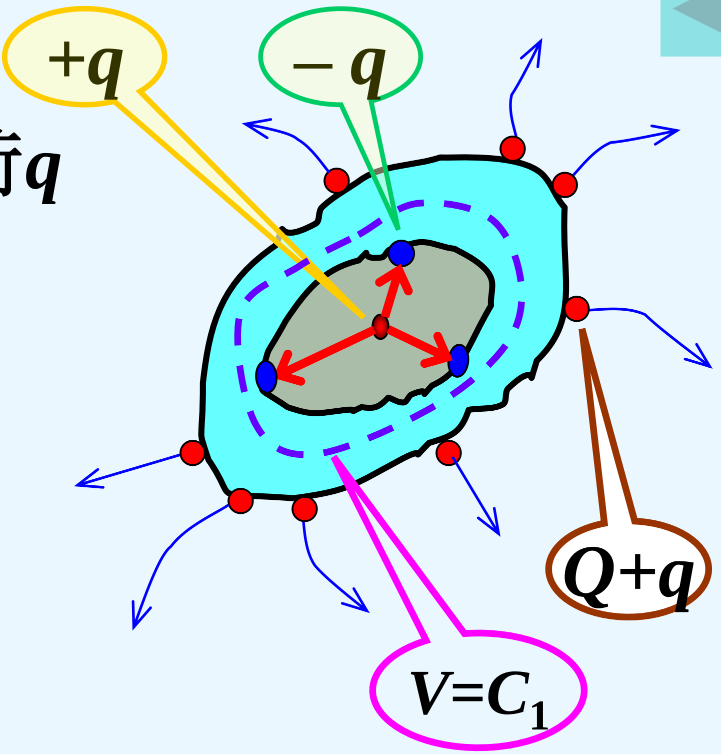

$$\oint_S\vec{E}_{内}\cdot\mathrm{d}\vec{S}=0 \qquad \therefore\sum q_{内}=0$$

**结论：** 导体内部无净电荷；

电荷只分布在导体表面。

## 2. 空腔导体

①空腔内有带电体：如有一正电荷$q$




在导体壳内作一高斯面

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}=0 \qquad \sum q_{内}=0$$

**电荷：** **内表面有感应电荷$-q$。**

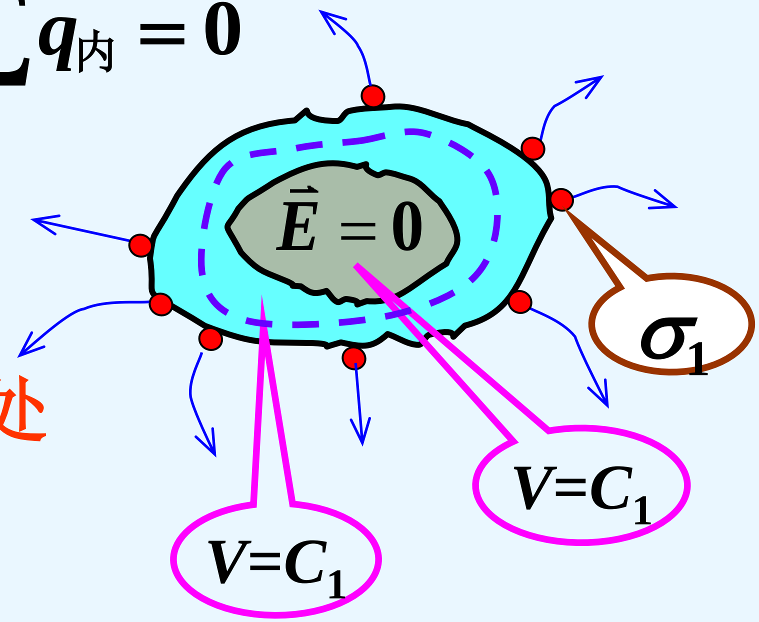
**外表面感应电荷$Q+q$。**

**电场：** $\boxed{(q,\ -q,\ q+Q)\Rightarrow \vec{E}_{内}=0}$

$\boxed{(q,\ -q)\Rightarrow \vec{E}_{外}=0}$ ——空腔静电屏蔽

**电势：** 空腔是等势体，腔内不等电势。

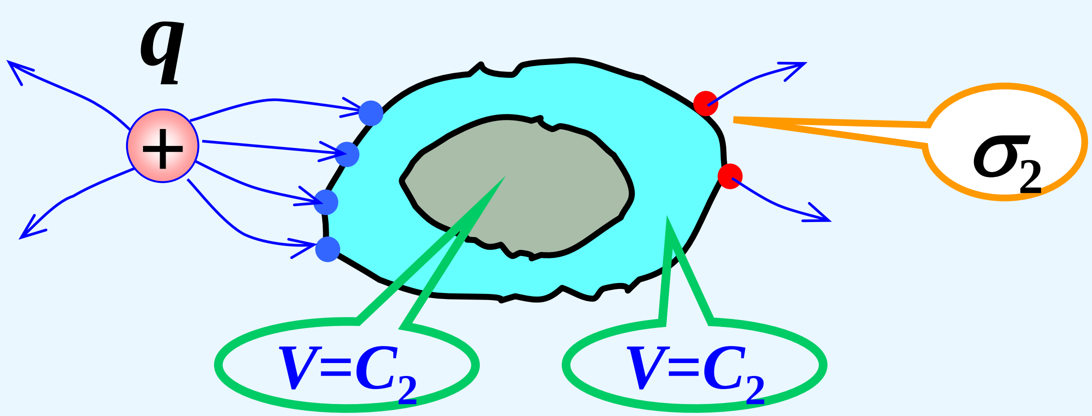
## ②空腔（带电）内无带电体 $\sum q_{内}=0$




**结论：** 电荷分布在外表面，
内表面无电荷。

空腔内部及导体内部电场强度处处为零，即它们等电势。

这些结论不受腔外带电体的影响。

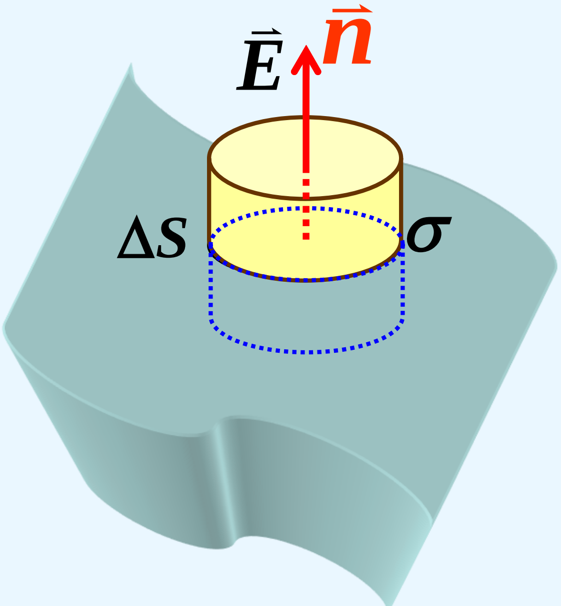



静电屏蔽的另一种含义

腔外带电体与腔外表面电荷在腔内场强总贡献为零

## 三、导体表面上的场强与电荷面密度的关系

以$\Delta S$为底面、轴线垂直$\Delta S$，作高斯柱面：




$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \int_{上}\vec{E}\cdot d\vec{S} + \underbrace{\int_{下}\vec{E}\cdot d\vec{S}}_{0} + \underbrace{\int_{侧}\vec{E}\cdot d\vec{S}}_{0}$$

$$= \int_{上}\vec{E}\cdot d\vec{S} = E\cdot\Delta S$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i = \frac{\sigma\cdot\Delta S}{\varepsilon_0}$$

$$\boxed{E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$ 方向 $\parallel \vec{n}$

导体表面上一点的场强 $E$ 正比于该点的电荷面密度$\sigma$

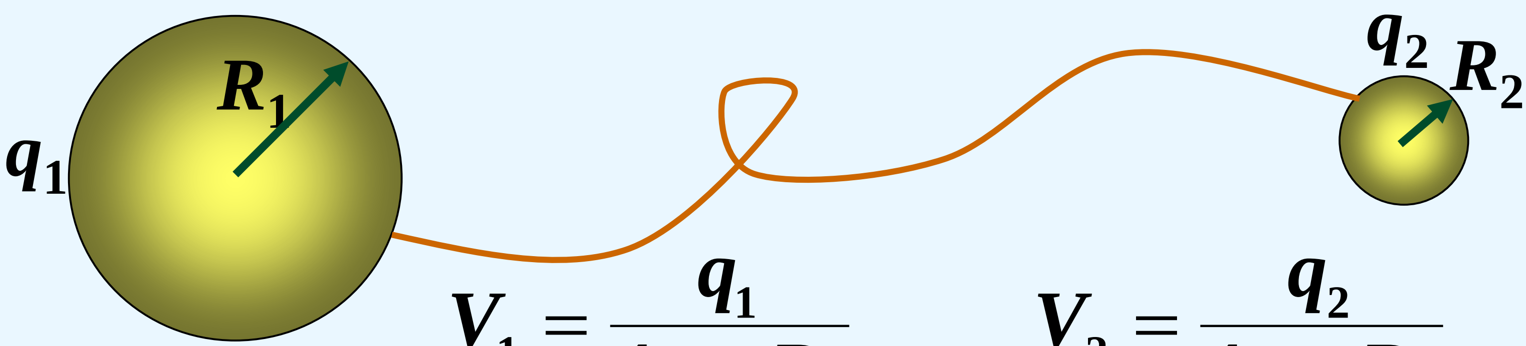
注：(1) $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$ 仅表示$E$与$\sigma$的量值关系。但由$\sigma$可简便求出$E$的大小。

(2) 表面（空间）各点的电场，是所有电荷产生的。

## 四、电荷面密度与导体表面曲率的关系

一般导体电荷的分布与 $\begin{cases} \text{导体形状有关} \\ \text{与附近其它带电体有关} \end{cases}$

**孤立导体**处于静电平衡时，电荷分布有定性规律：




$$V_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} \qquad V_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$$

两球用导线相连：$V_1 = V_2$ $\qquad \dfrac{q_1'}{R_1} = \dfrac{q_2'}{R_2} \qquad q_1' + q_2' = q_1 + q_2$

$$\frac{\sigma_1 \cdot 4\pi R_1^2}{R_1} = \frac{\sigma_2 \cdot 4\pi R_2^2}{R_2} \qquad \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

即：$\sigma \propto \dfrac{1}{R}$

**结论：** $\boxed{\sigma \propto \dfrac{1}{R}}$ 孤立导体表面的电荷面密度与该处的曲率半径成反比。

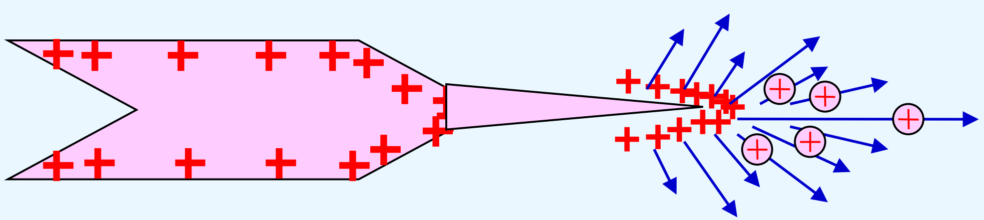
即：曲率越大的地方，电荷面密度越大。

$\boxed{E \propto \sigma}$

平坦处： $R$大 $\sigma$ 小，则$E$ 小；

尖端处： $R$ 很小，$\sigma$ 很大，则$E$ 很强；

凹面处： 曲率为负值， $\sigma$更小，则$E$ 很弱。



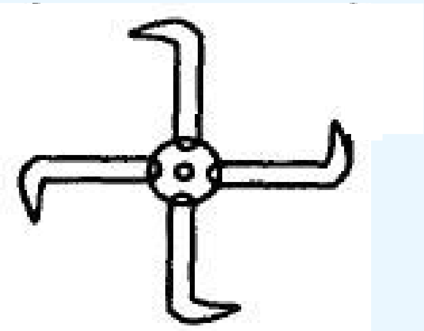
尖端放电

曲率很大的尖端：

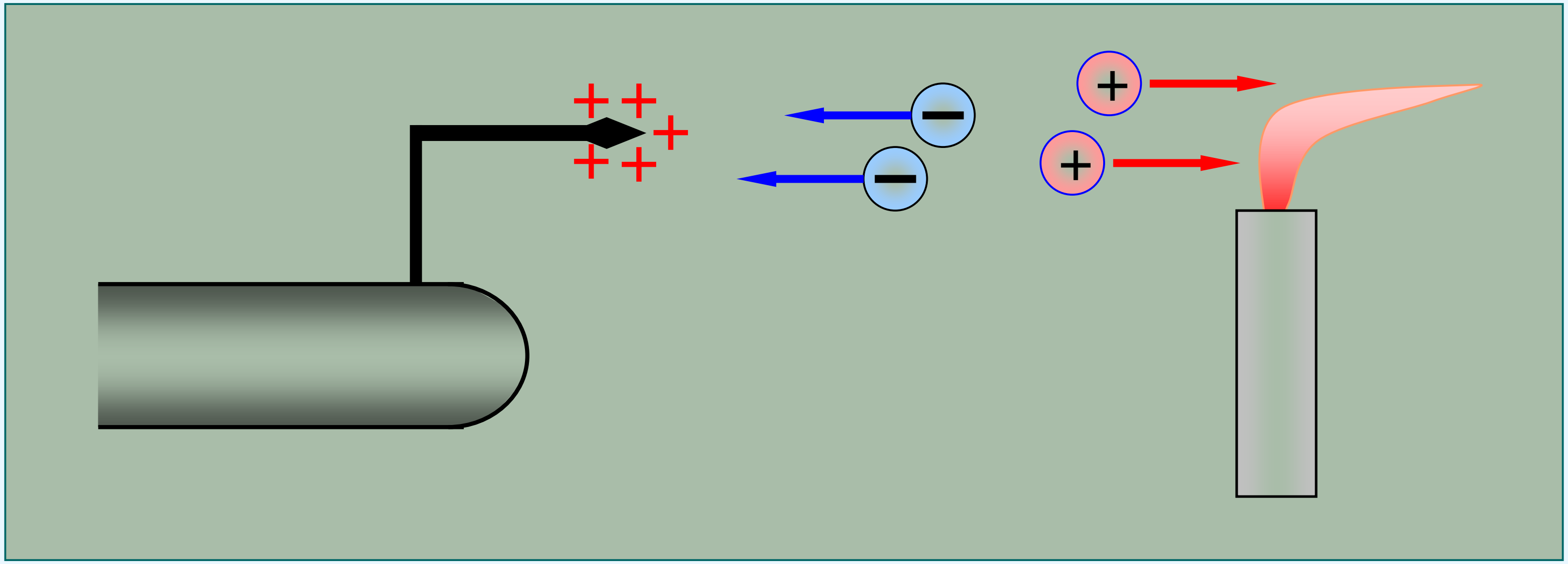
$E \to$ 极强

# 尖端放电

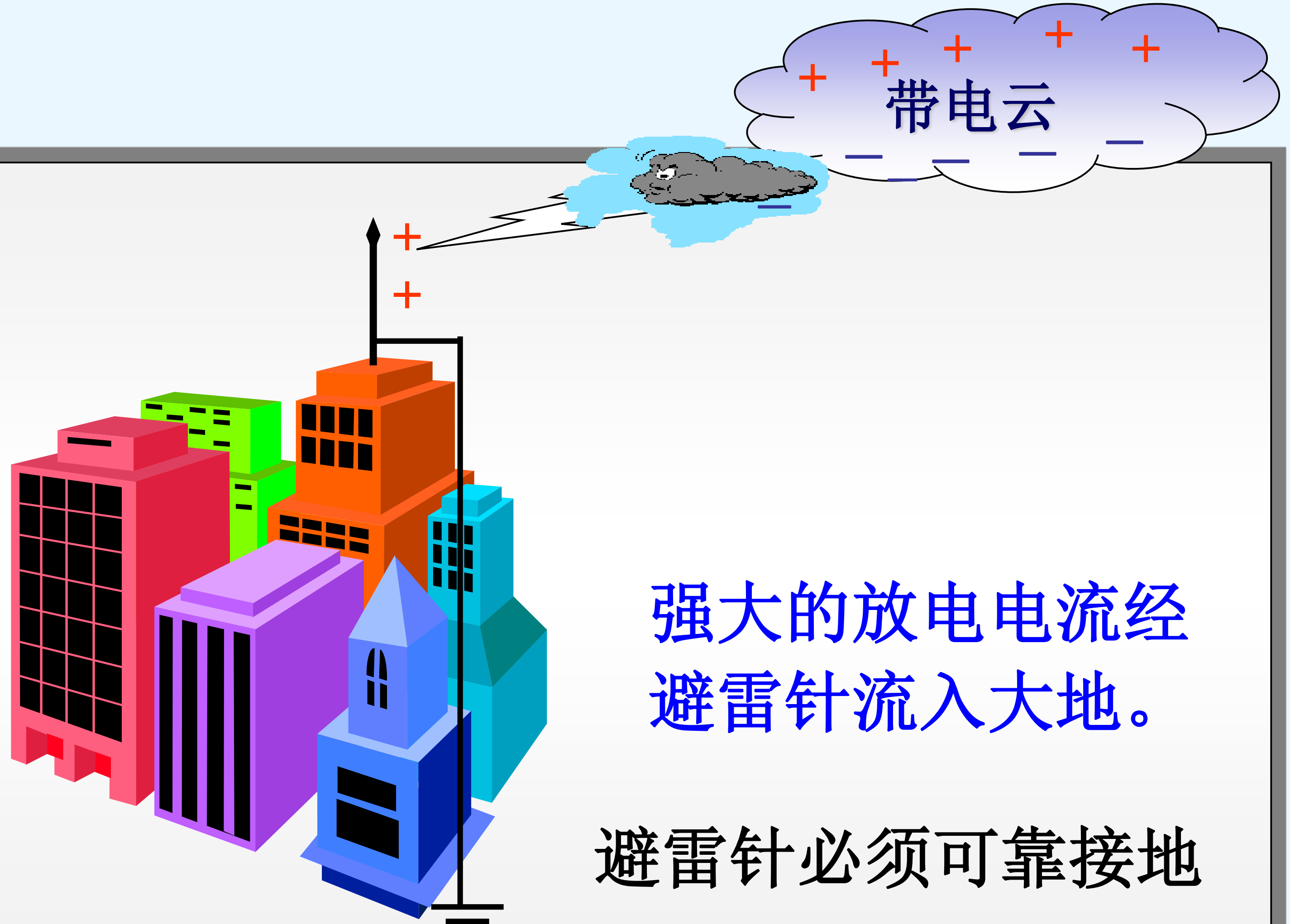
带电导体尖端附近的电场特别大，可使尖端附近的空气发生电离而成为导体产生放电现象。



## 电风实验



# 避雷针的工作原理



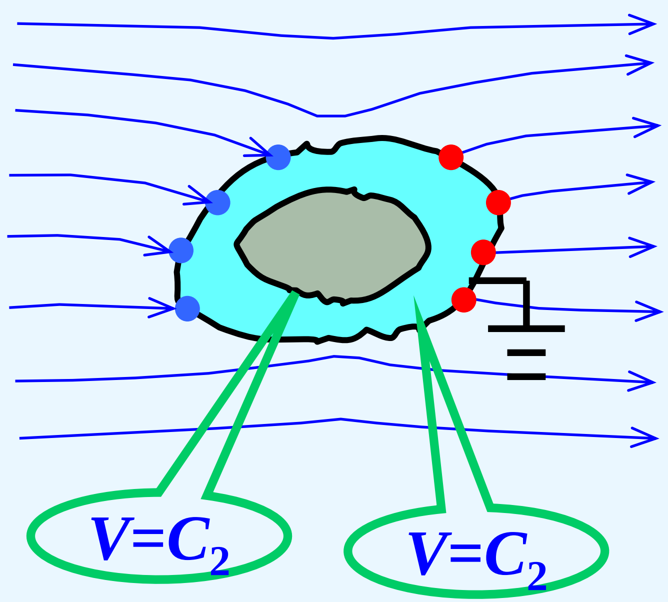

强大的放电电流经避雷针流入大地。

避雷针必须可靠接地

# 五、静电屏蔽

隔绝静电场和导体间的相互影响。

## 1. 空腔导体屏蔽外电场




使空腔内的物体不受外电场的影响。

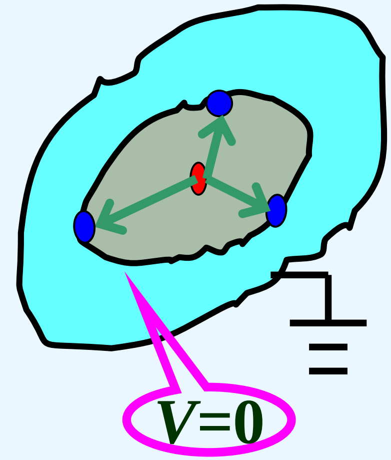
电势？

受外电场的影响

要维持空腔导体的电势不变，可把空腔导体**接地**。

## 2. 空腔导体消除空腔中的带电体对空腔外物体影响。

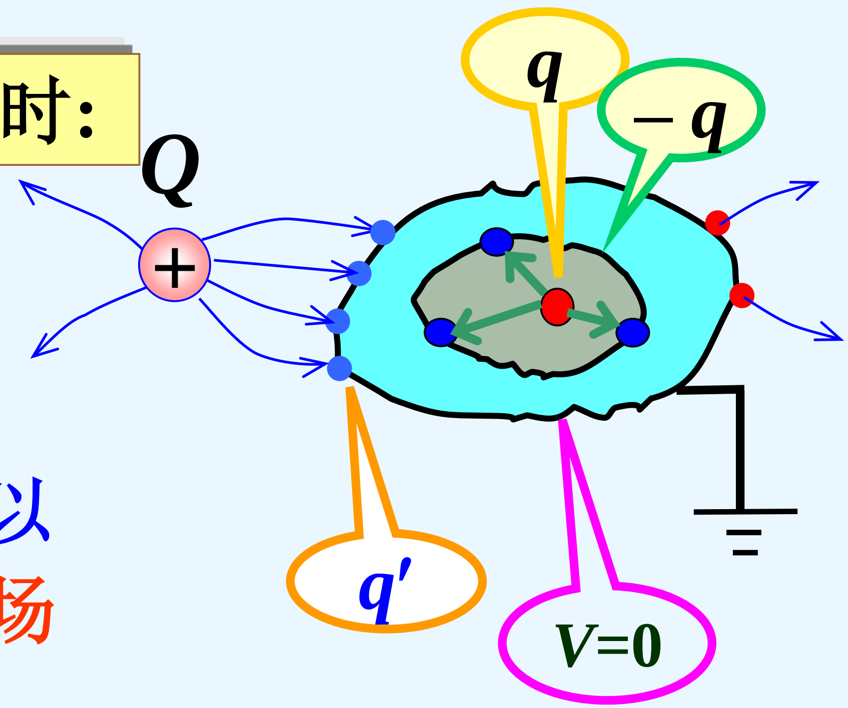
**①空腔接地，腔外没有带电体时：**




外表面上的感应电荷被大地电荷全部中和（即外表面不带电）。

金属空腔是零等势体。

**②空腔接地，腔外有带电体时：**

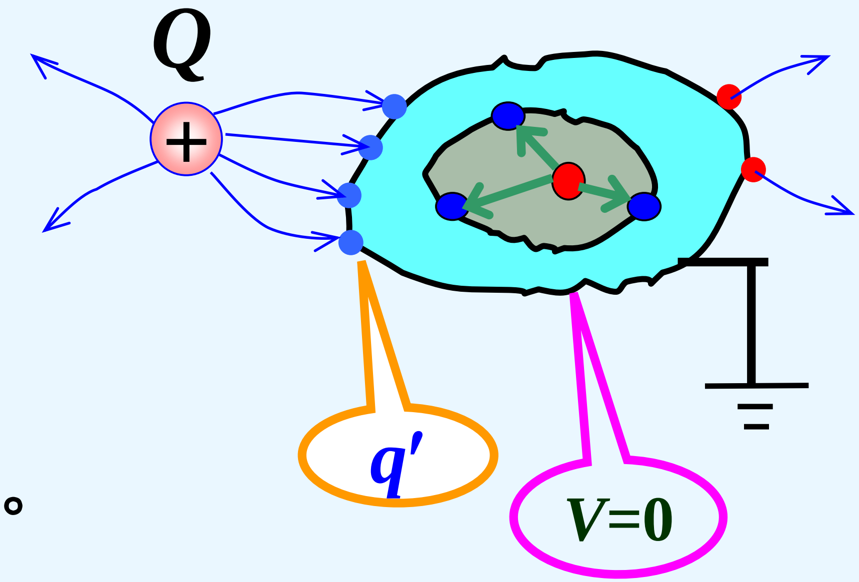



外表面上的感应电荷被大地电荷部分中和，所带电量？

空腔满足静电平衡条件：

腔内、腔内表面、腔外表面以及腔外电荷在导体内产生的场强为零，金属空腔是零电势。

此时壳内的任何电场都不影响外界，也不受外界影响。




例如电子仪器设备都用金属导体壳接地做保护，它起静电屏蔽作用，内外互不影响。

**一个接地的空腔导体可以隔离内外静电场的影响。**

## 六、有导体存在时静电场的计算

$$\left\{\begin{array}{l}\text{电荷分布}\\\text{电场分布}\end{array}\right.$$

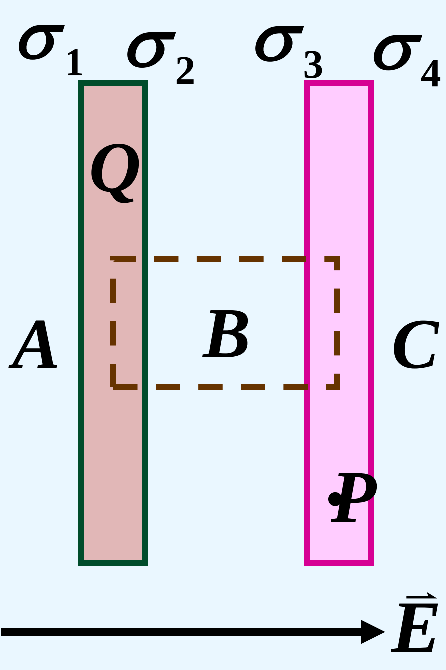
高斯定理、电势概念、电荷守恒定律、导体静电平衡条件。

**例1.**一块金属平板，面积为$S$带电$Q$，在其旁放置第二块同面积的不带电金属板。求①达静电平衡时，电荷分布及空间电场分布。②若第二块板接地？(忽略边缘效应)

**解：** ①达静电平衡，导体内部无净电荷，电荷只分布在表面上。

不考虑边缘效应，电荷是均匀分布。

设四个面上电荷面度分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$




则有： $\sigma_1 + \sigma_2 = Q/S$

如图取高斯柱面可得： $\sigma_3 + \sigma_4 = 0$

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \sum q_i = 0$

即： $\sigma_2 + \sigma_3 = 0$

导体内任意一点$P$，其电场 $E=0$

则有： $\dfrac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \dfrac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} + \dfrac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} - \dfrac{\sigma_4}{2\varepsilon_0} = 0$

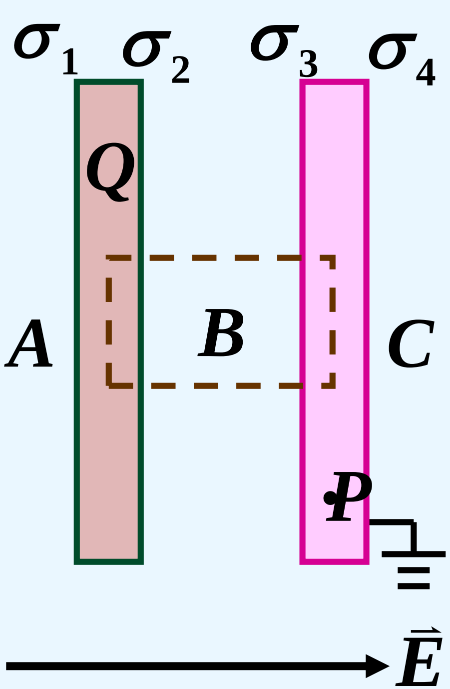
联立求解

解得：$\sigma_1=\sigma_2=\dfrac{Q}{2S}$ $\sigma_3=-\dfrac{Q}{2S}$ $\sigma_4=\dfrac{Q}{2S}$

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

场强：$E_A=-\dfrac{Q}{2\varepsilon_0 S}$， $E_B=\dfrac{Q}{2\varepsilon_0 S}$， $E_C=\dfrac{Q}{2\varepsilon_0 S}$

②第二板接地　则第二板与大地构成一导体 $\sigma_4=0$

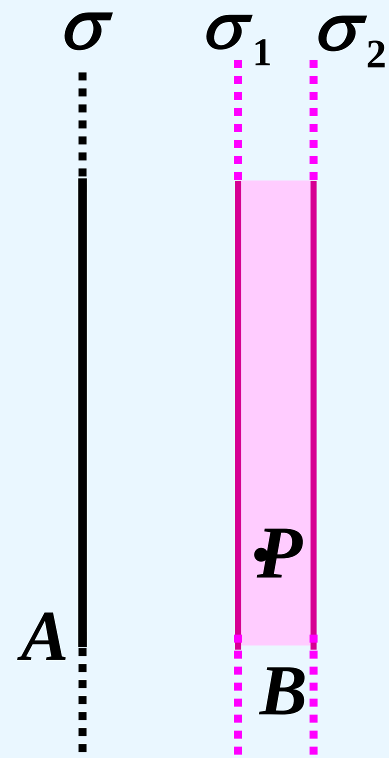



同理可得：
$$\left.\begin{aligned}\sigma_1+\sigma_2&=\frac{Q}{S}\\ \sigma_2+\sigma_3&=0\\ \sigma_1+\sigma_2+\sigma_3&=0\end{aligned}\right\}$$
联立求解：

$\sigma_1=0$ $\sigma_2=\dfrac{Q}{S}$ $\sigma_3=-\dfrac{Q}{S}$

$E_A=E_C=0$ $E_B=\dfrac{Q}{\varepsilon_0 S}$

**例.** 无限大均匀带电平面*A*，其附近放置一块与它平行的有一定厚度的无限大平面导体板*B*。已知*A*上的电荷面密度为+$\sigma$，则在导体板*B*的两个表面上的电荷面密度为：




（A）$\sigma_1=-\sigma,\sigma_2=+\sigma$

√（B）$\sigma_1=-\frac{1}{2}\sigma,\sigma_2=+\frac{1}{2}\sigma$

（C）$\sigma_1=-\frac{1}{2}\sigma,\sigma_2=-\frac{1}{2}\sigma$

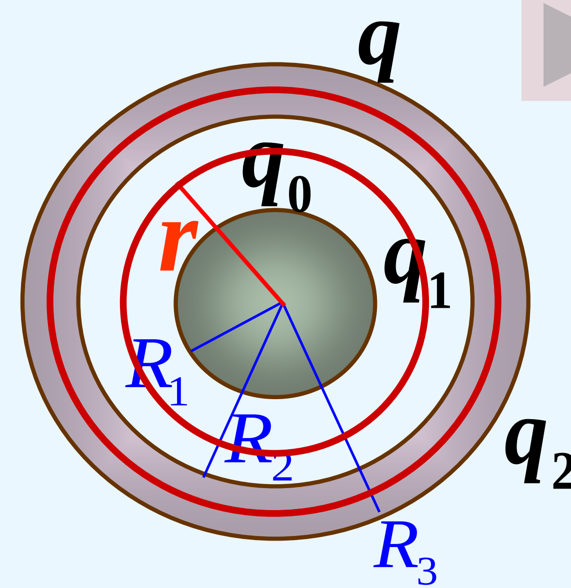
（D）$\sigma_1=-\sigma,\sigma_2=0$

$$\sigma_1+\sigma_2=0$$

$$\sigma+\sigma_1-\sigma_2=0$$

**例2.**一个带电金属球A半径$R_1$，带电量$q_0$，放在另一个带电球壳B内，其内外半径分别为$R_2$、$R_3$，球壳带电量为 $q$ 。试求此系统的电荷、电场分布以及球与球壳间的电势差。

**解：** 设球壳内外表面电量：$q_1$，$q_2$




由高斯定理 $q_1 = -q_0$

由电荷守恒 $q = q_1 + q_2$

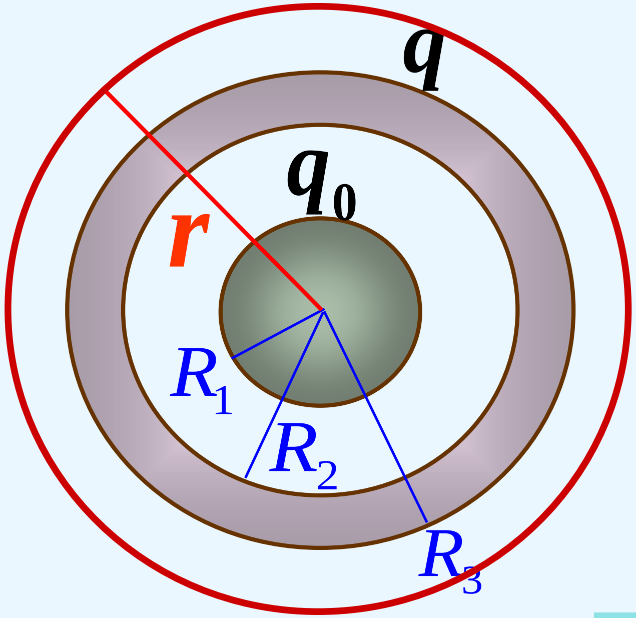
$$q_2 = q + q_0$$

由电荷分布的对称性利用高斯定理得：

$$E = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad R_1 < r < R_2$$

$$E=\frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad R_1<r<R_2$$

$$E=\frac{q_0+q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad r>R_3$$




所以金属球A与金属壳B
之间的电势差为:

$$V_{AB}=\int_{R_1}^{R_2}\frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\mathrm{d}r=\frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

如果用导线将球壳和球接一下情形如何？

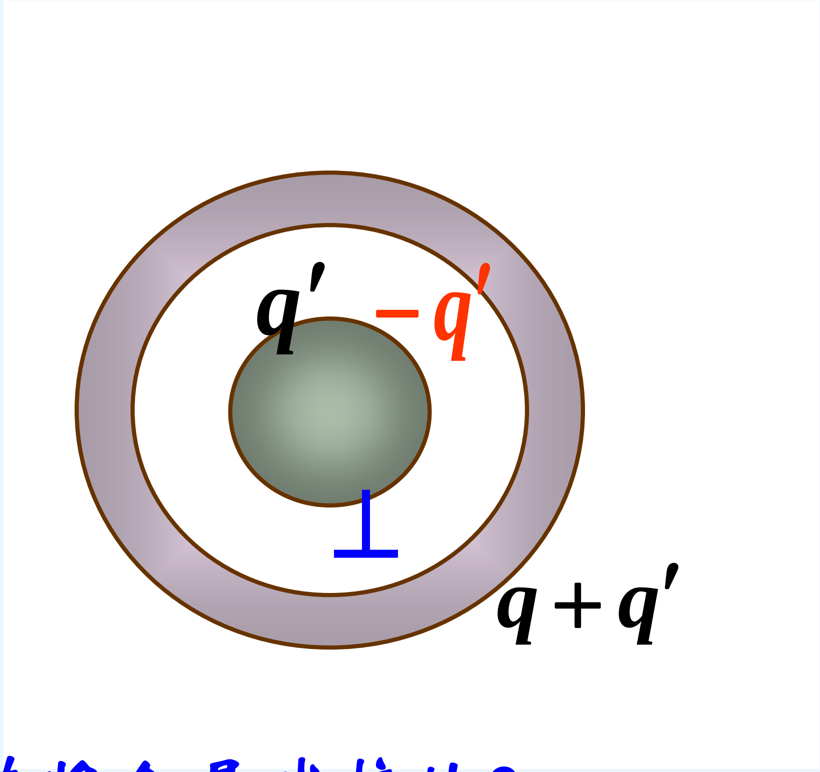
球壳B的内表面和球A表面的电荷完全中和，重新达到静电平衡，二者之间的电势差为零、场强为零。

$$q_0 = 0, \quad q_1 = 0$$

球壳外表面：

均匀分布 $q_2 = q + q_0$

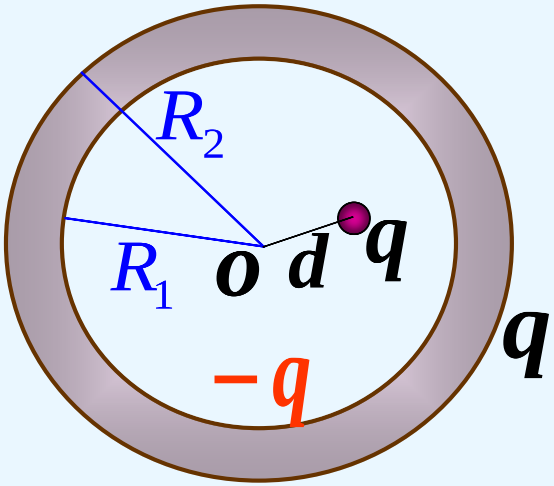
$$E = \frac{q+q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad r > R_3$$




若将金属球接地？

此时金属球带电不为零！

但其电势为零！

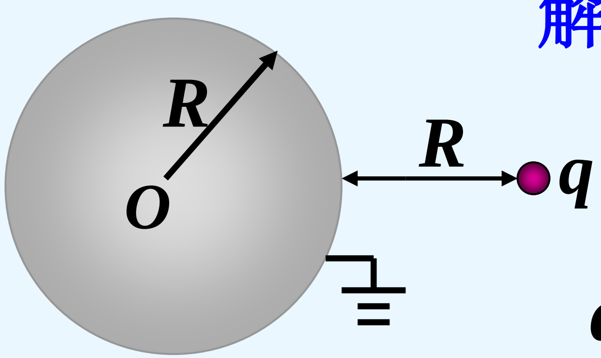



求球心$O$的电势

$$V_O = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 d} - \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R_2}$$

**例3.** 半径为$R$的金属球与地相连接，在与球心相距$d=2R$ 处有一点电荷$q(>0)$，问球上的感应电荷 $q'=?$

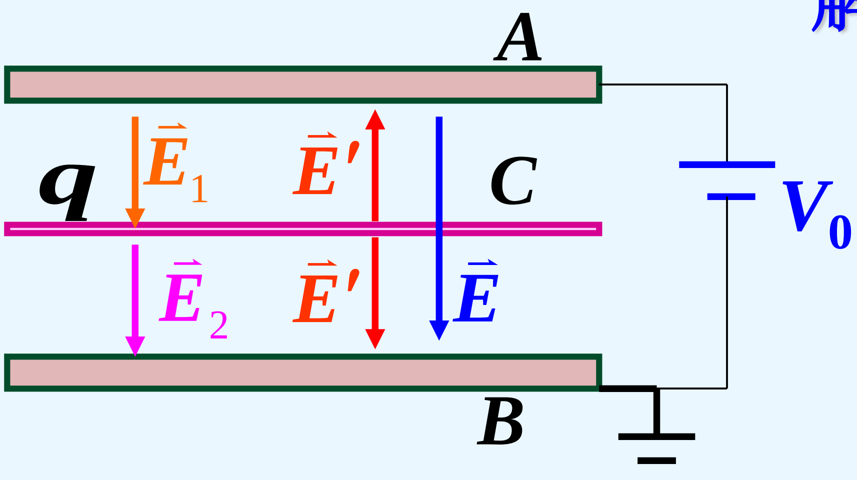
**解：** 金属球是等势体




球体上处处电势$V=0$，球心处$V_o=0$

$$\frac{q'}{4\pi\varepsilon_0 R} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 2R} = 0 \qquad \therefore q' = -\frac{q}{2}$$

**例4.** 两平行放置的无限大导体板$A$、$B$，面积均为$S$，间距为$d$，连接电源后，$A$板的电势$V_A=V_0$，$B$板的电势$V_B=0$。现将一带电量为$q$，面积也是$S$而厚度可忽略的导体片$C$平行地插在两导体板中间位置，求导体片$C$的电势。




**解：** 原板间电场为：

$$E=\frac{V_0}{d}$$

$C$板插入后，在两侧产生电场：

$$E'=\frac{q}{2\varepsilon_0 S}$$

$$E_1=E-E'=\frac{V_0}{d}-\frac{q}{2\varepsilon_0 S}$$

$$E_2=E+E'=\frac{V_0}{d}+\frac{q}{2\varepsilon_0 S}$$

$$V_C=E_2\frac{d}{2}=\frac{V_0}{2}+\frac{qd}{4\varepsilon_0 S}$$