静电场中的导体和电介质

避雷针

“法拉第笼”

特斯拉线圈，电压高达几百万伏

处在铁笼内的人为何安然无恙?

雷击飞机

为什么飞机遭遇雷击不会影响飞行?

本章研究的问题

讨论导体和介质带电和它周围电场有何关系．

导体　绝缘体　半导体的概念

1. 导体(Conductor)存在大量的可自由移动的电荷

2. 绝缘体(Dielectric) 理论上认为一个自由移动的电荷也没有，绝缘体也称电介质

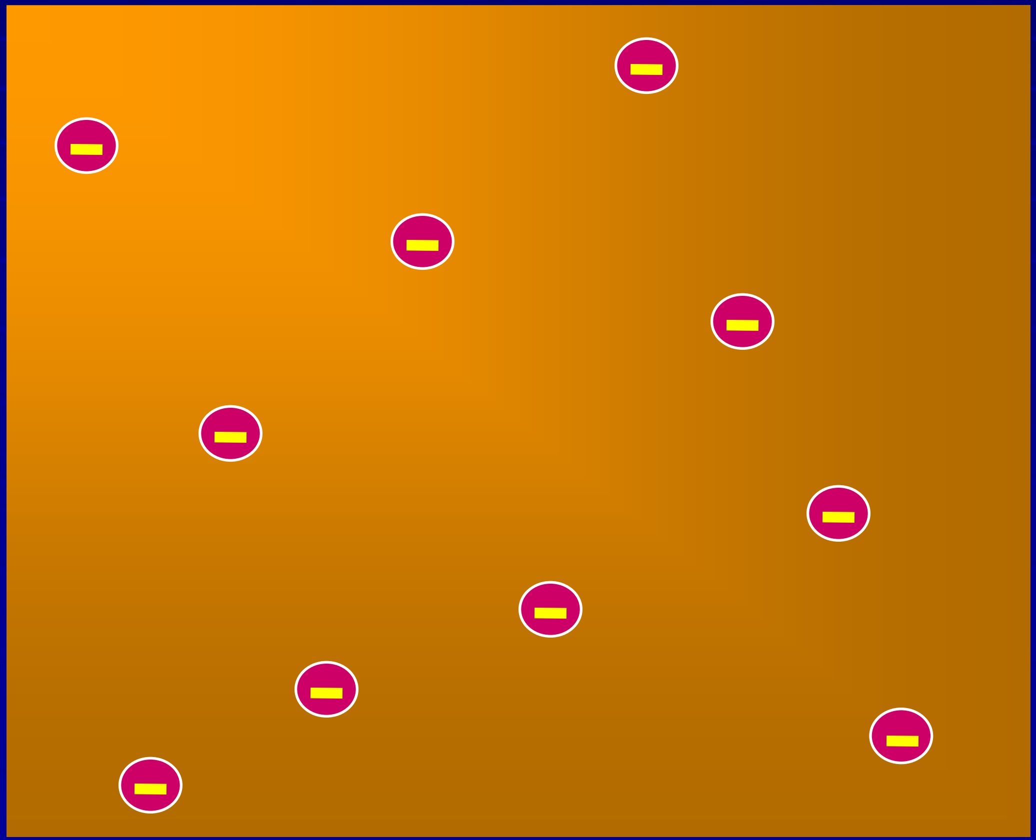
3. 半导体(Semiconductor) 介于上述两者之间

导体的静电平衡条件

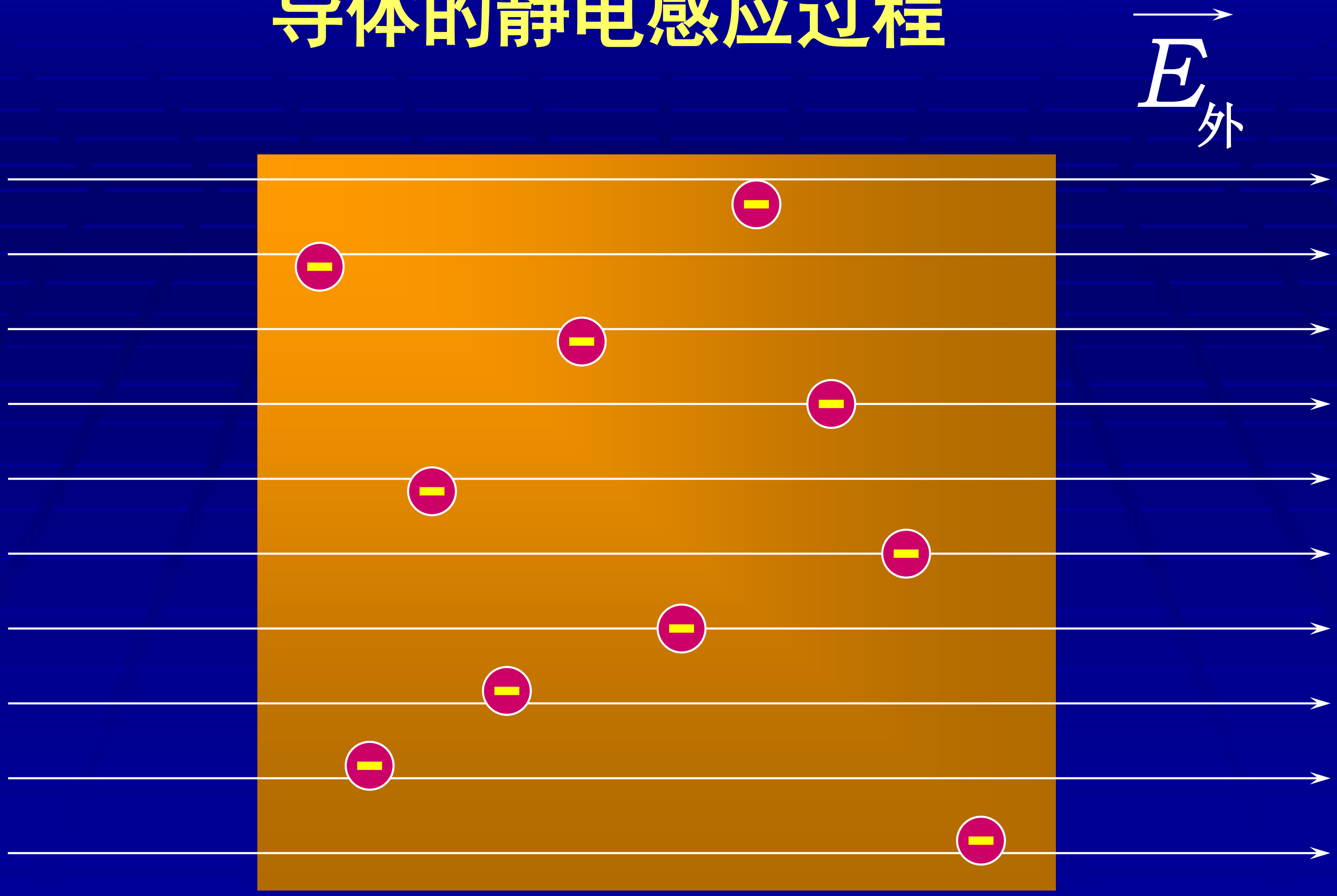
一. 静电感应

金属导体特征：存在大量的自由电子

无外电场时

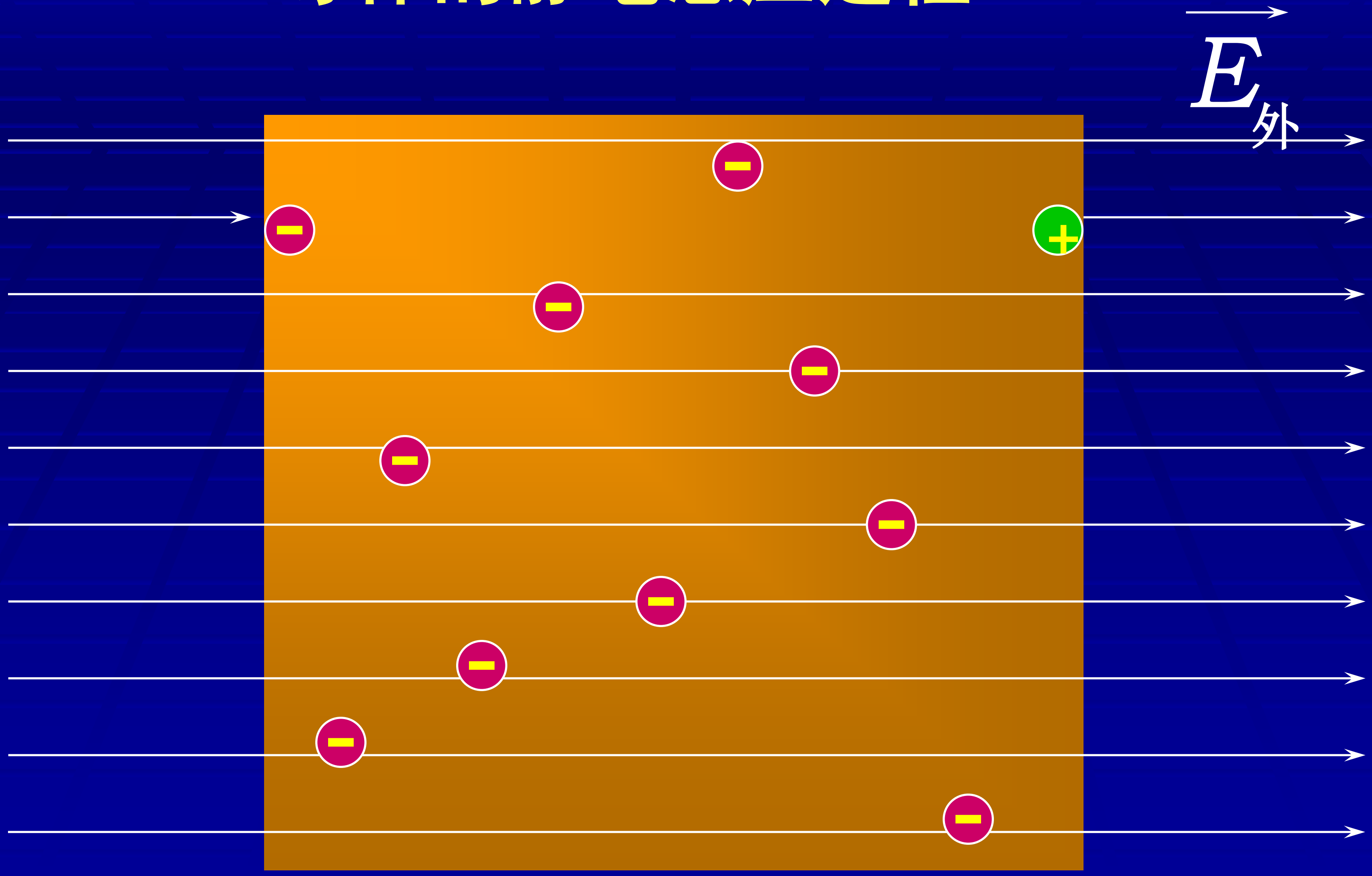


导体的静电感应过程



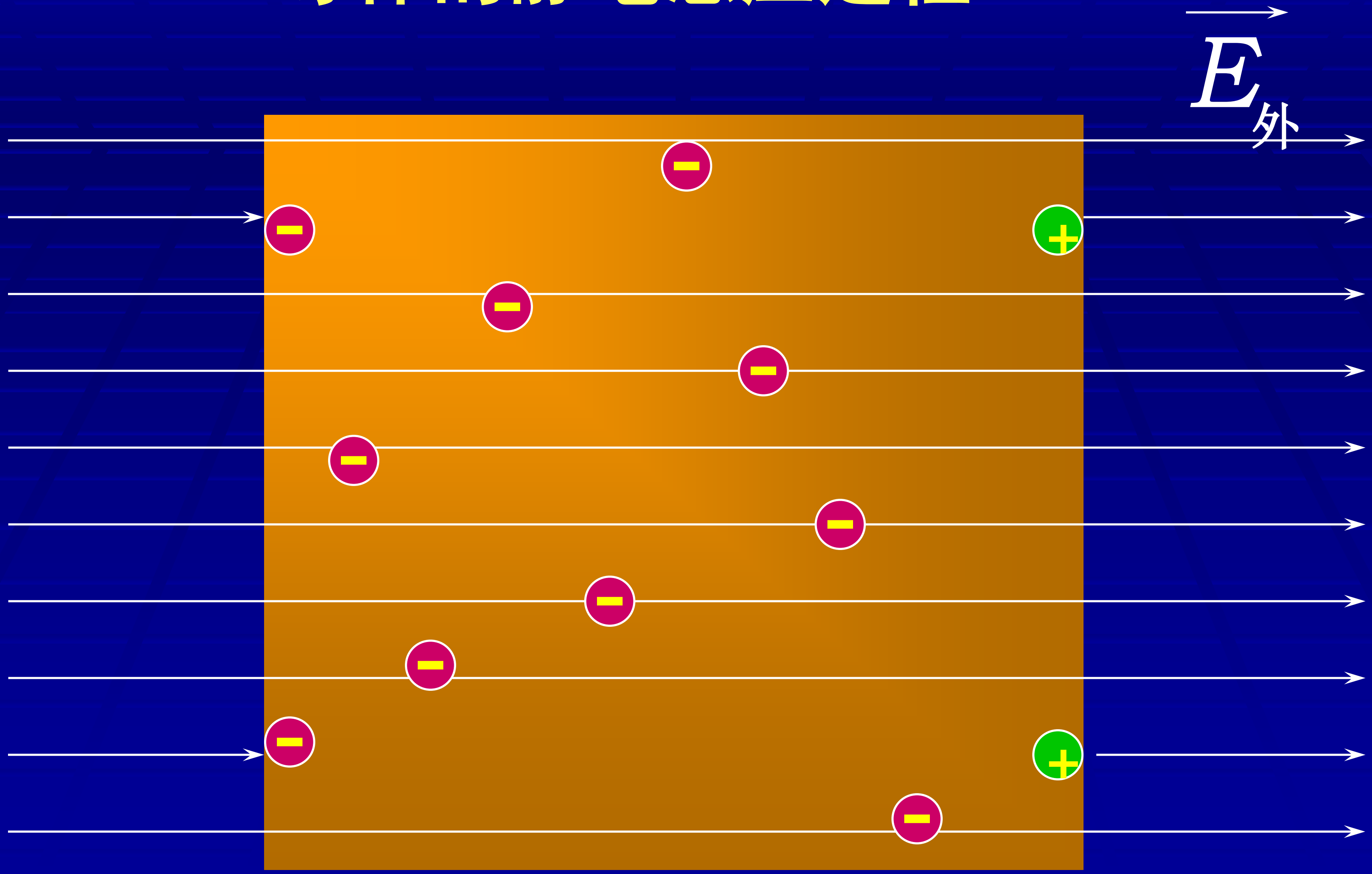
加上外电场后

导体的静电感应过程



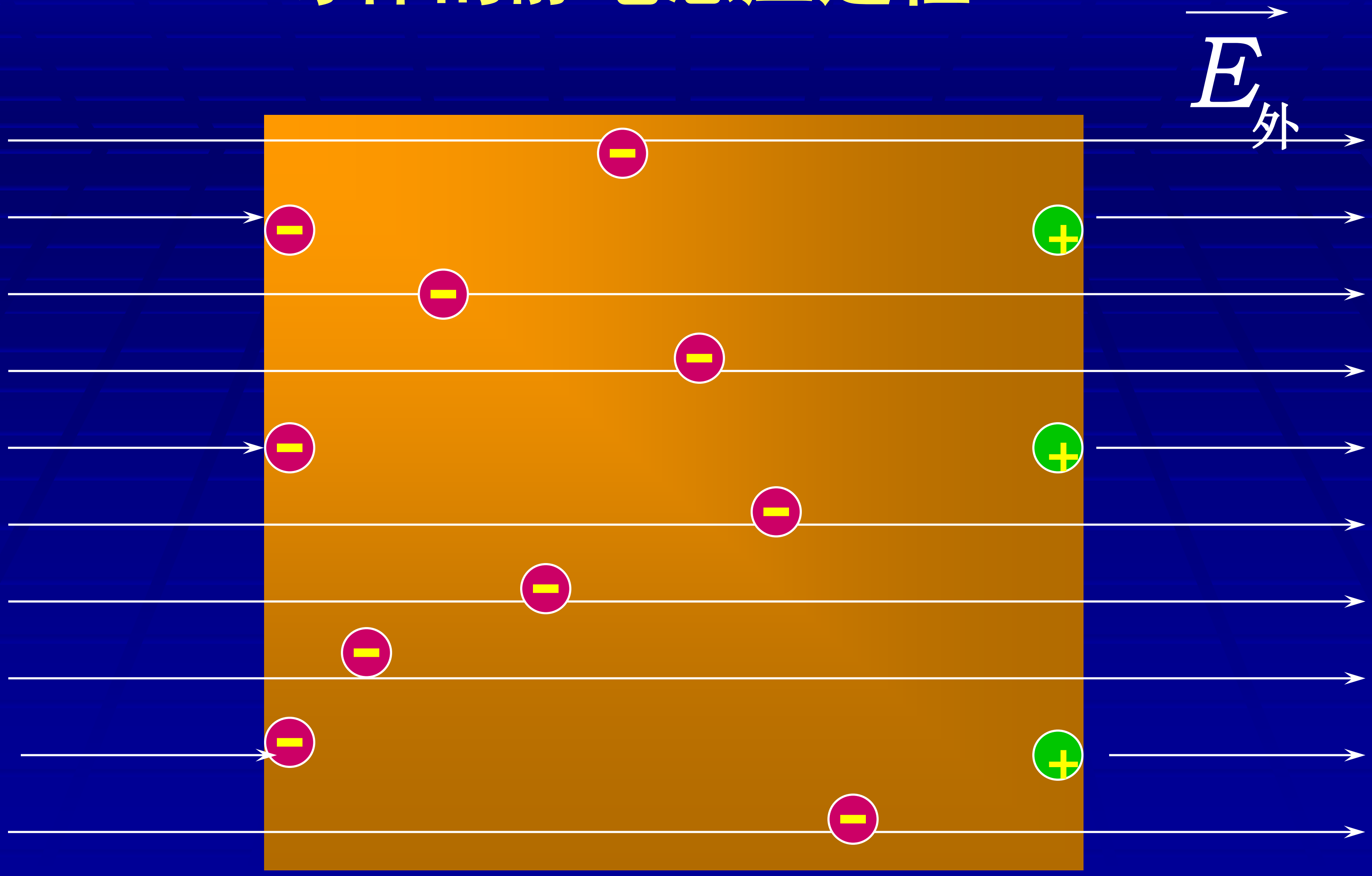
加上外电场后

导体的静电感应过程



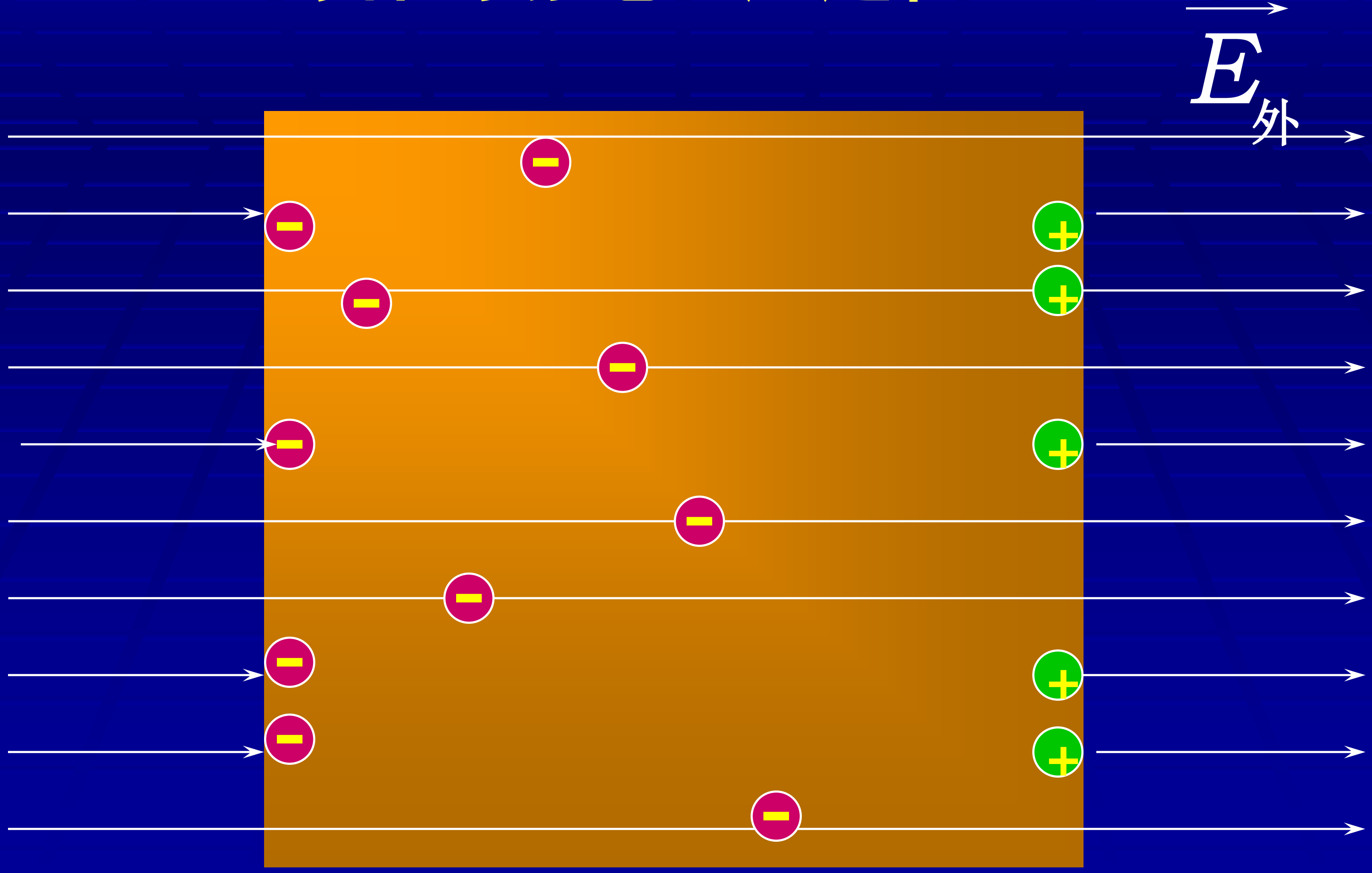
加上外电场后

导体的静电感应过程



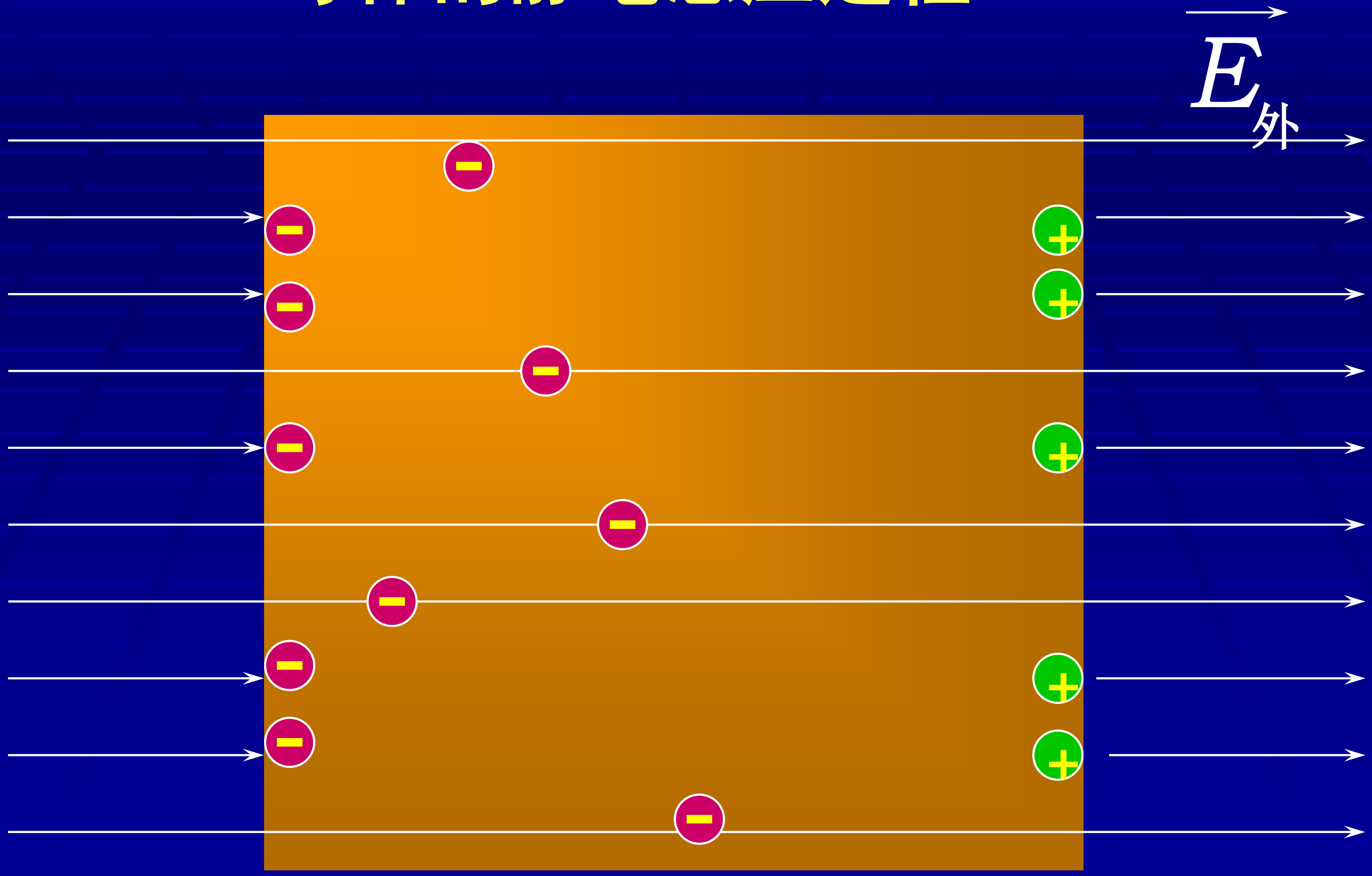
加上外电场后

导体的静电感应过程



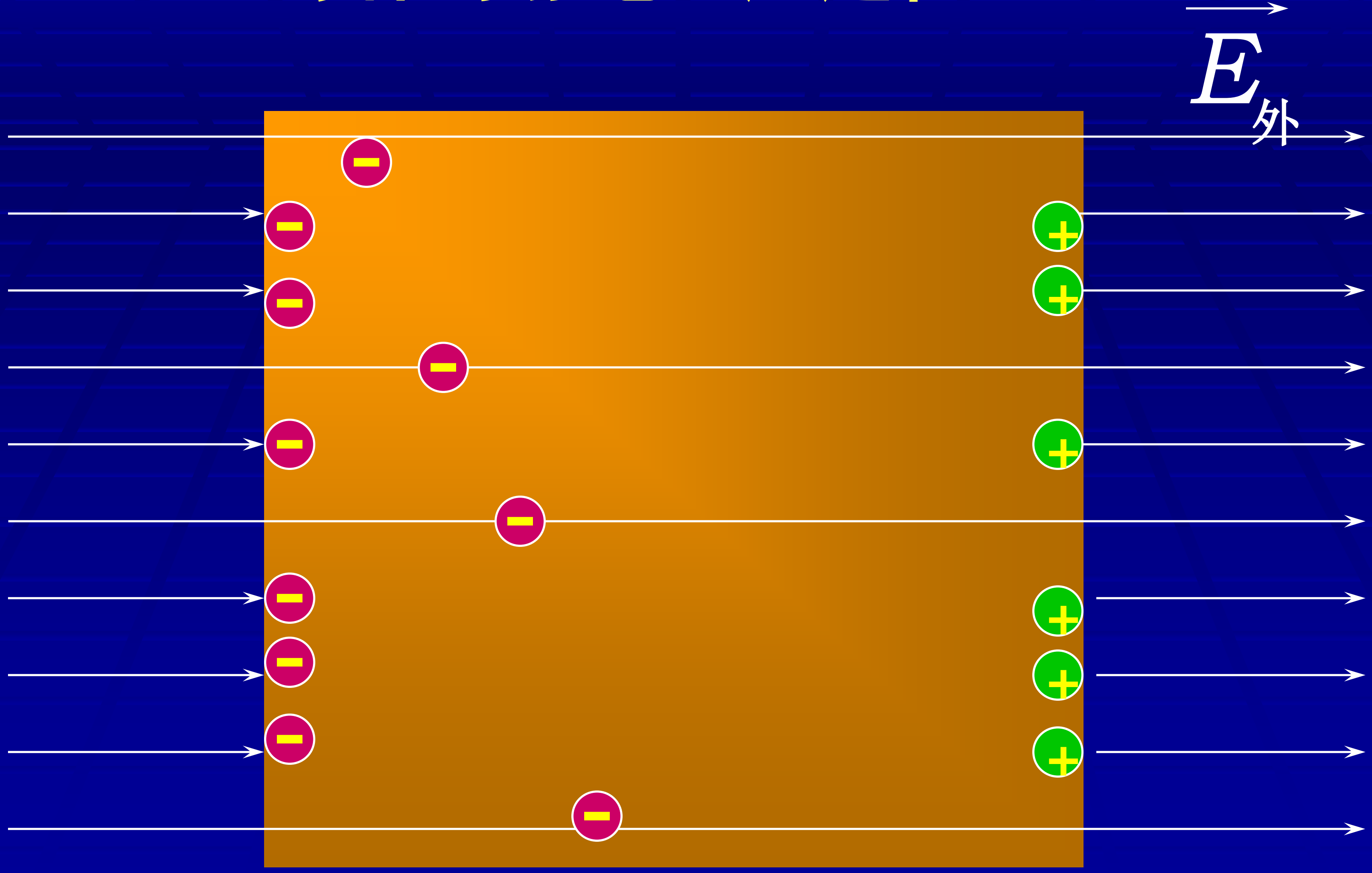
加上外电场后

导体的静电感应过程



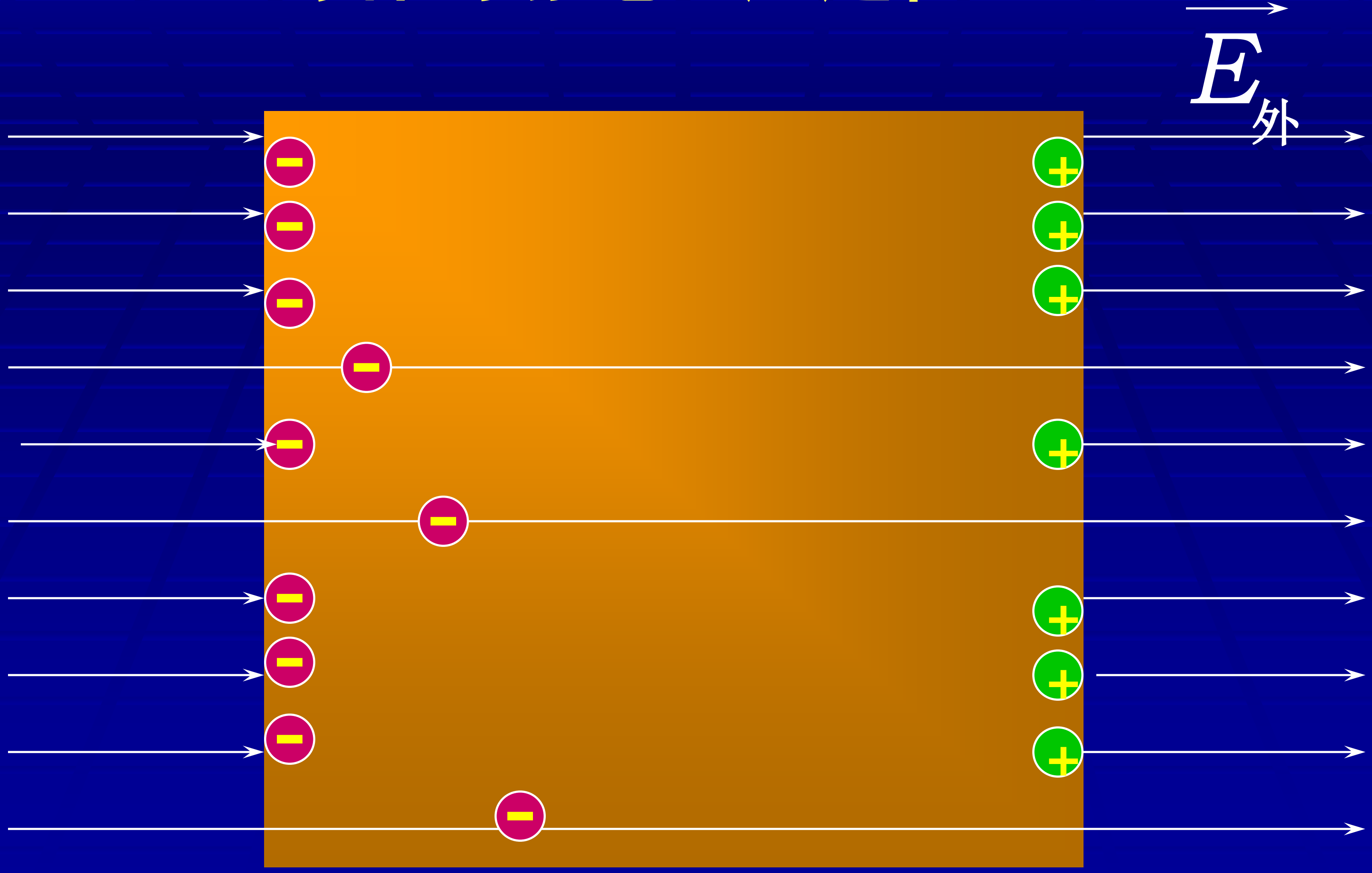
加上外电场后

导体的静电感应过程



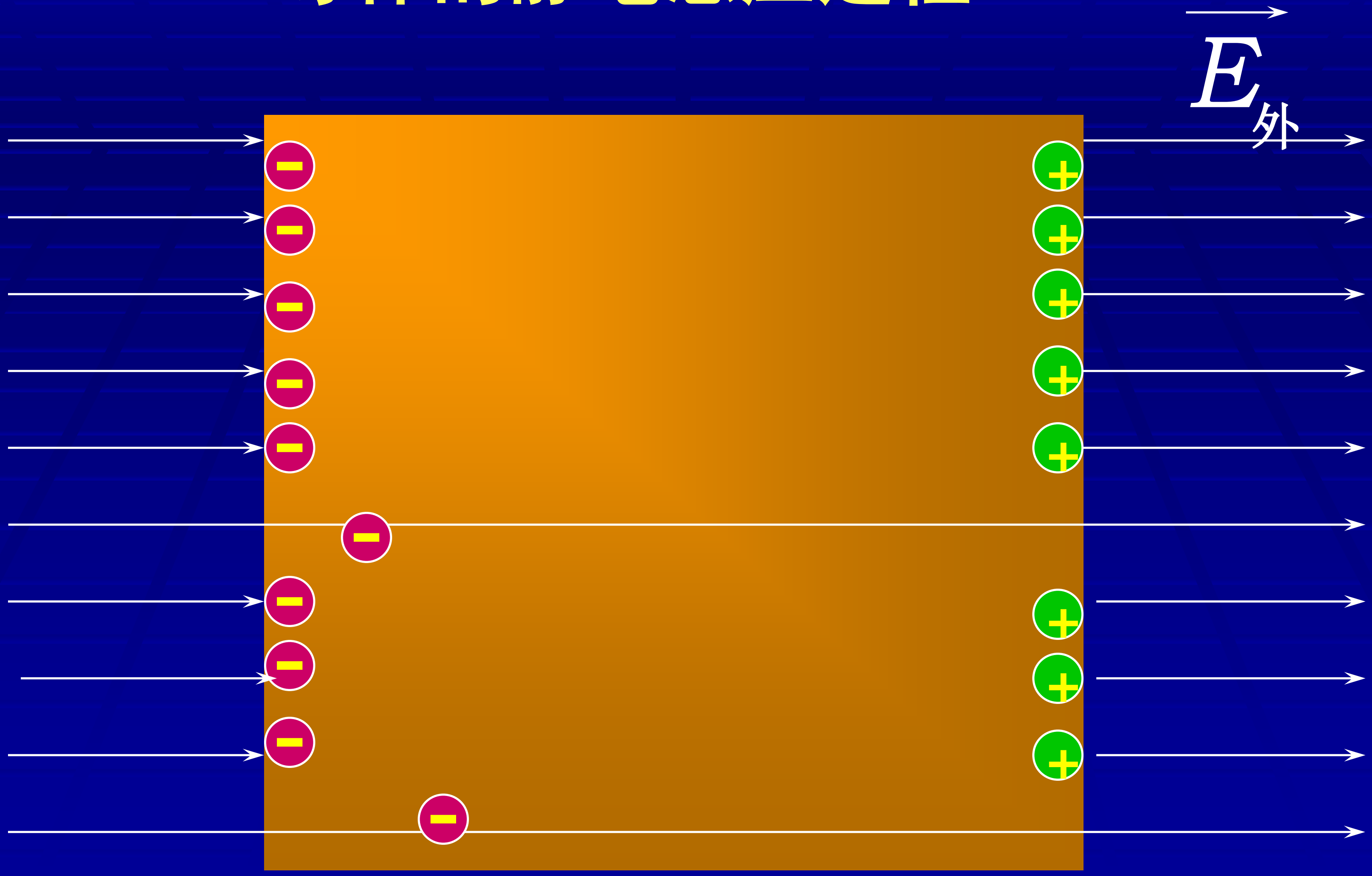
加上外电场后

导体的静电感应过程



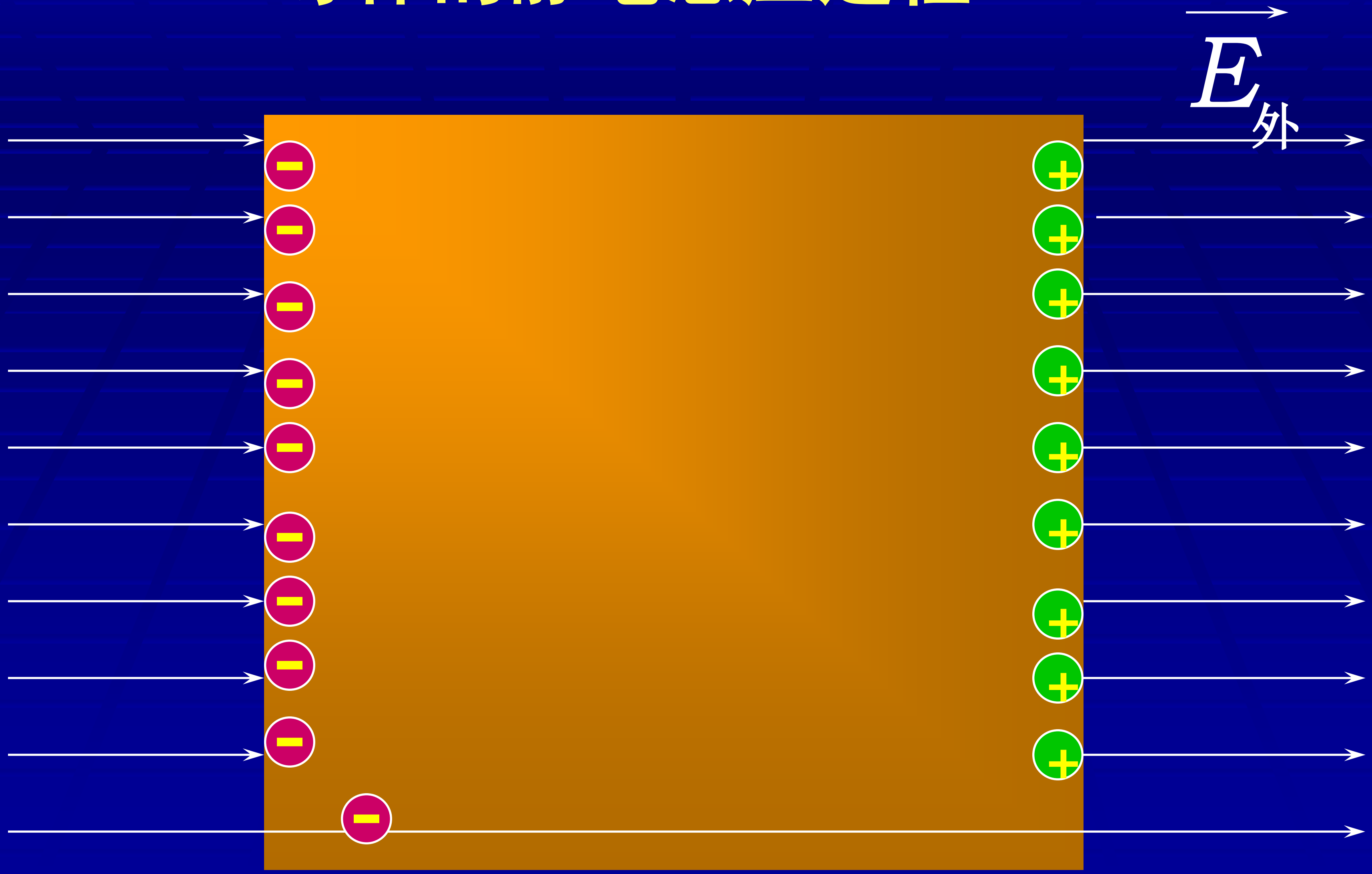
加上外电场后

导体的静电感应过程



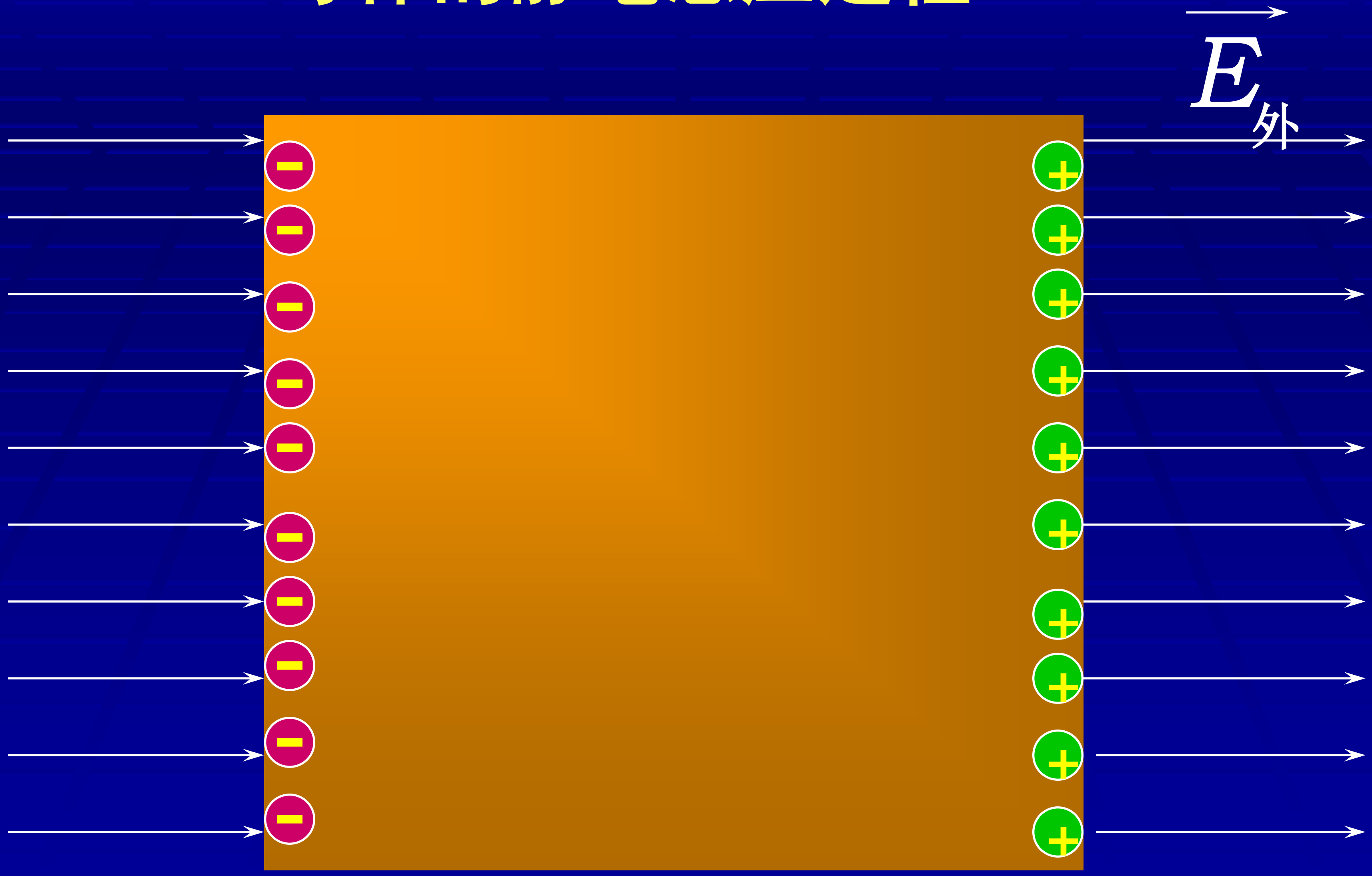
加上外电场后

导体的静电感应过程



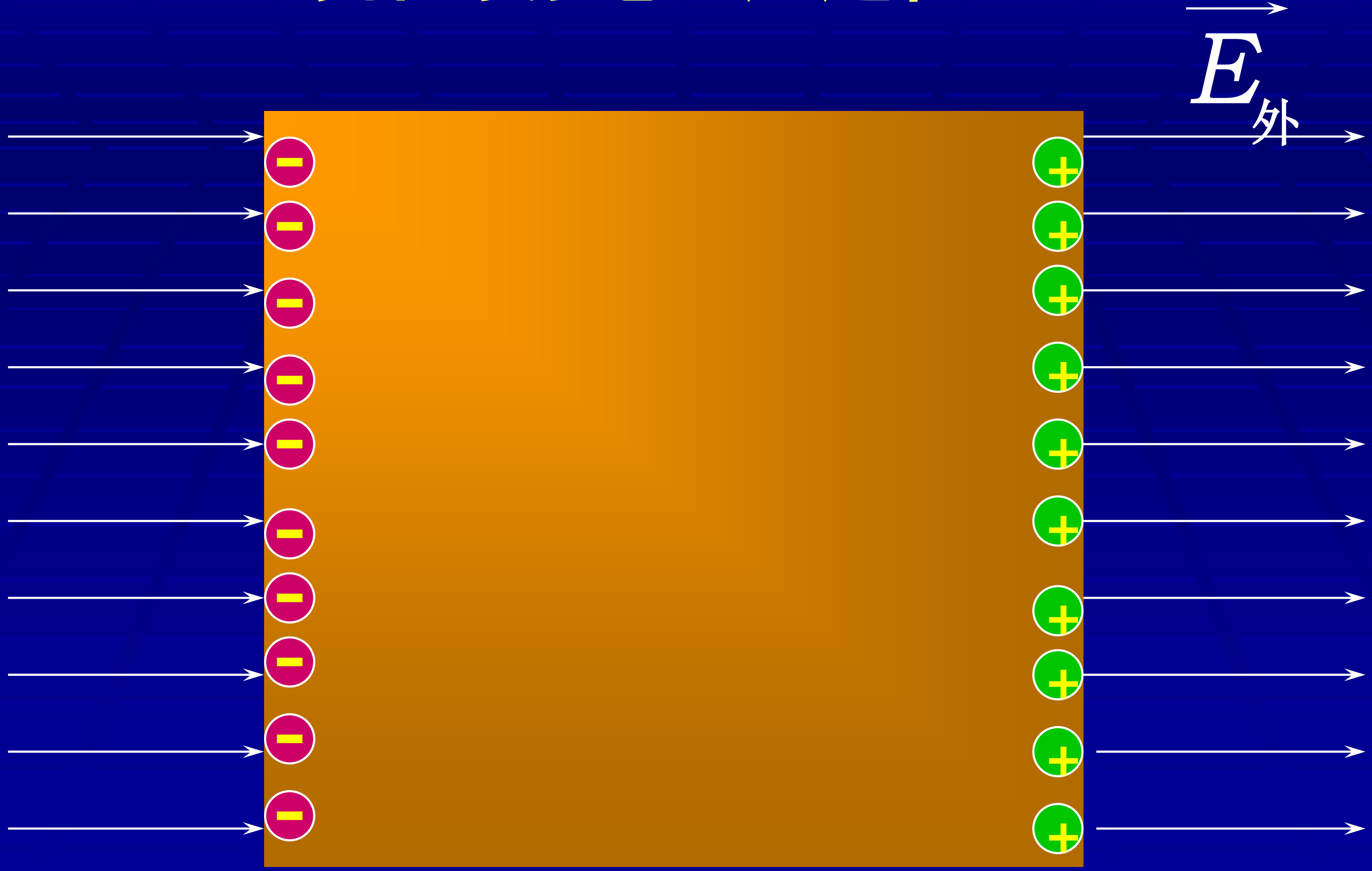
加上外电场后

导体的静电感应过程



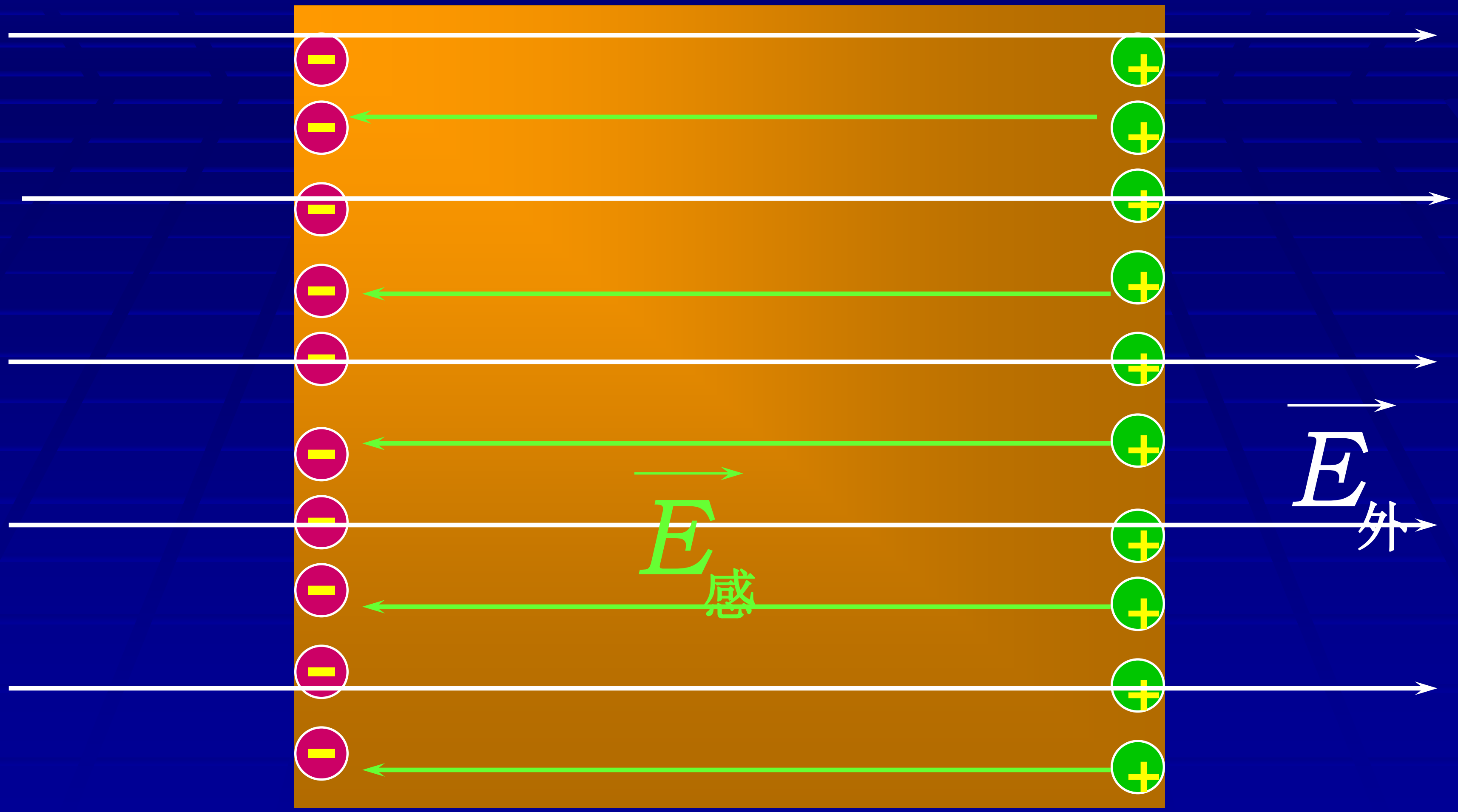
加上外电场后

导体的静电感应过程



加上外电场后

导体达到静平衡



$$\vec{E}_{内} = \vec{E}_{外} + \vec{E}_{感} = 0$$

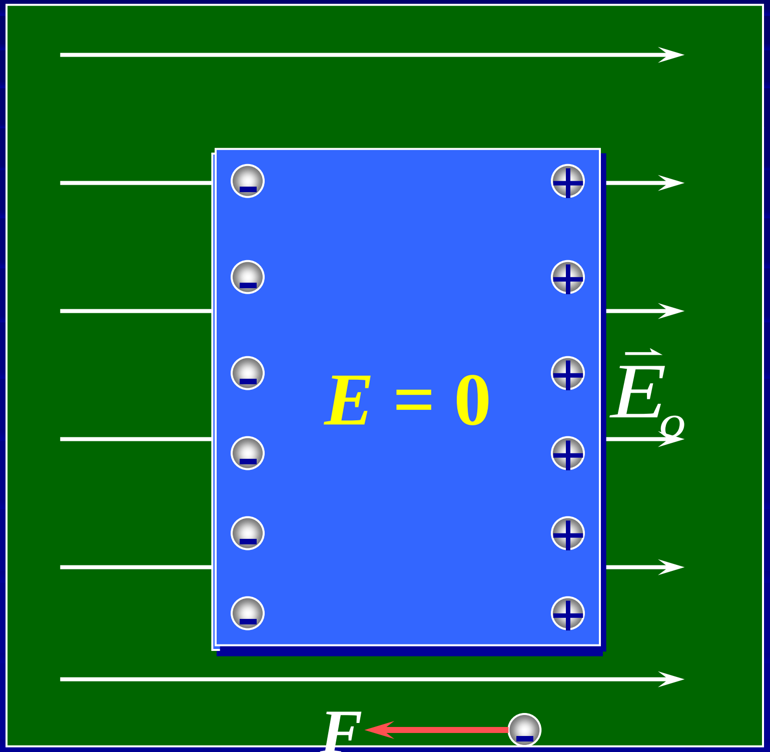
静电感应：在外电场影响下，导体表面不同部分出现正负电荷的现象。

静电平衡：

导体内部和表面没有电荷的宏观定向运动。

感应电荷：

因静电感应而在导体两侧表面上出现的电荷。



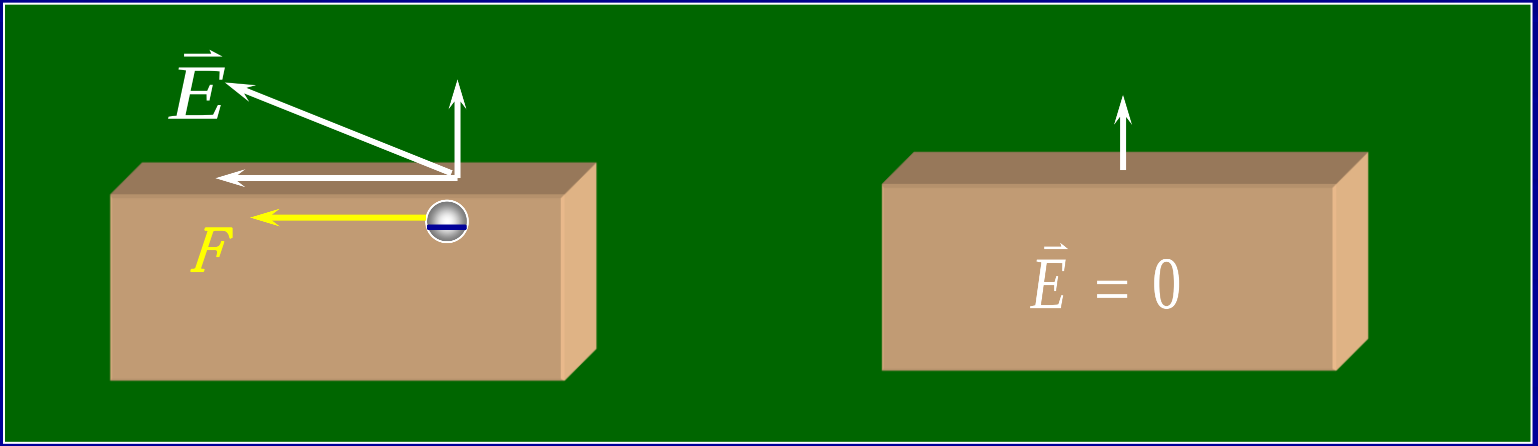
静电平衡时导体中的电场特性

用场强来描写：

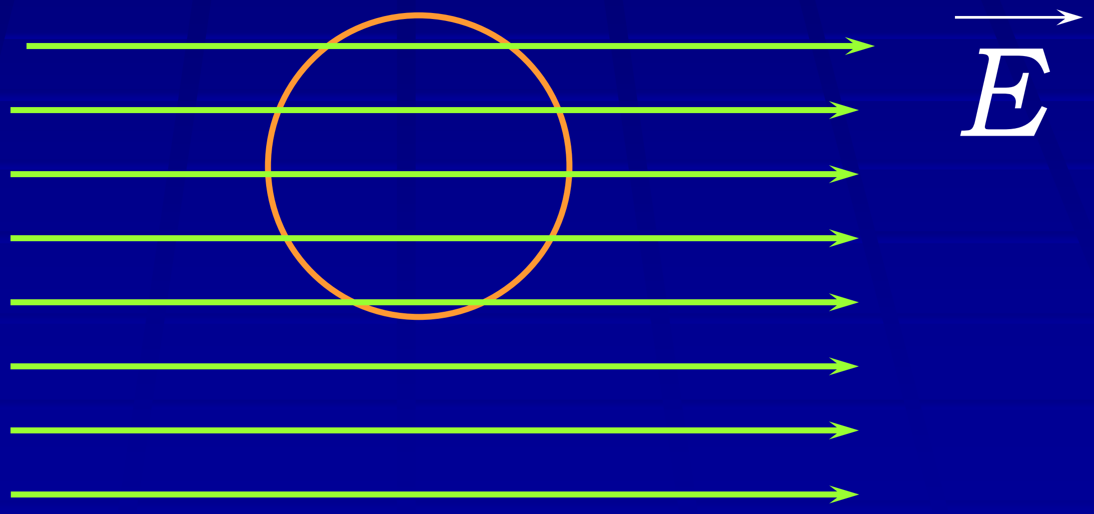
1. 导体内部场强处处为零；
2. 表面场强垂直于导体表面。

用电势来描写：

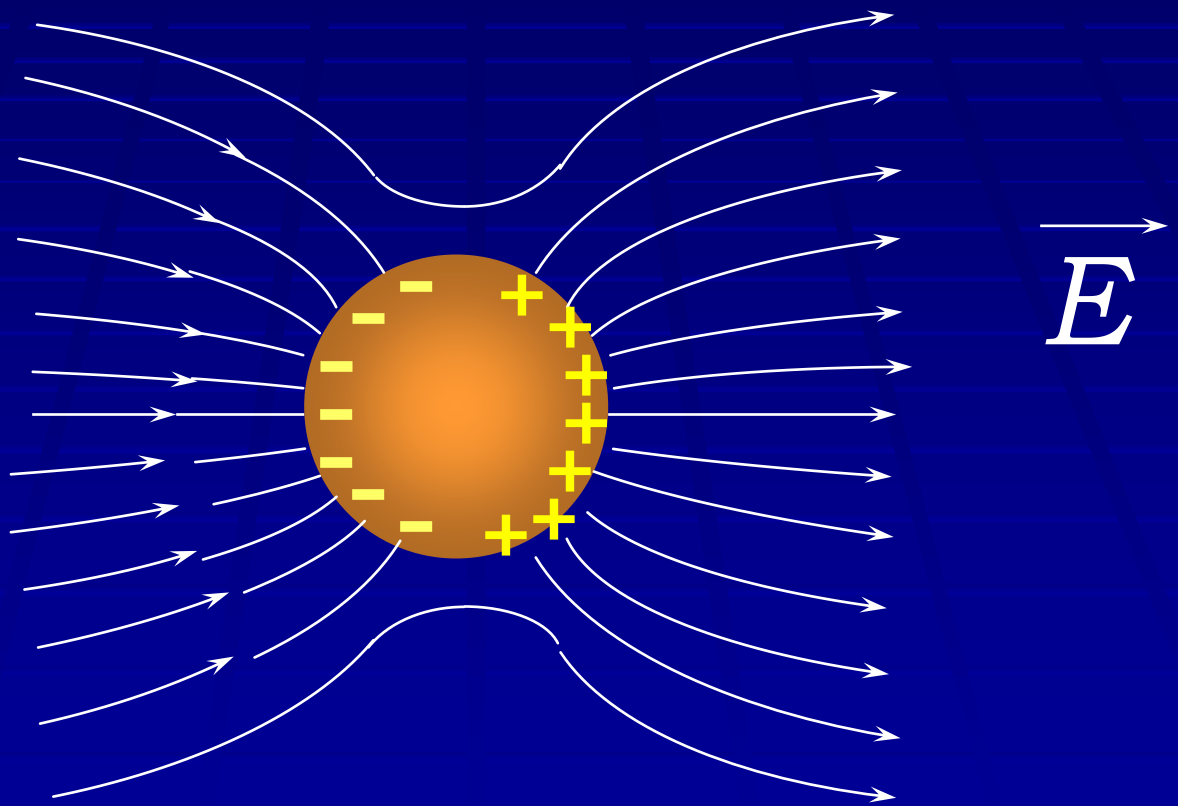
1. **导体为一等势体；**
2. **导体表面是一个等势面。**



金属球放入前电场为一均匀场



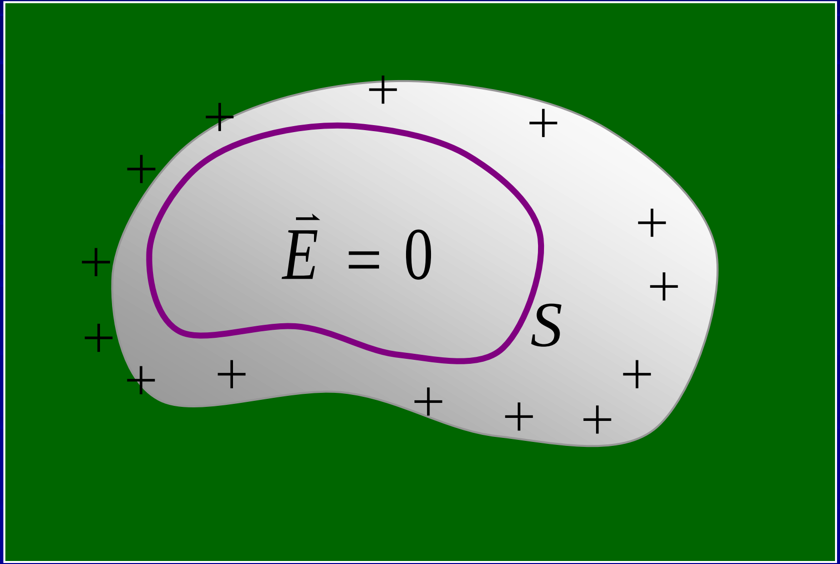
金属球放入后电力线发生弯曲
电场为一非均匀场



二. 静电平衡时导体上的电荷分布

1. 在静电平衡下，导体所带的电荷只能分布在导体的表面，导体内部没有净电荷。

证明： 假设导体内部某区域内有净电荷，作一个包围该电荷的高斯面S，根据高斯定理有：



$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_o} \sum q_i$$

$$\because \quad \vec{E} = 0 \quad \therefore \Rightarrow \sum q_i = 0$$

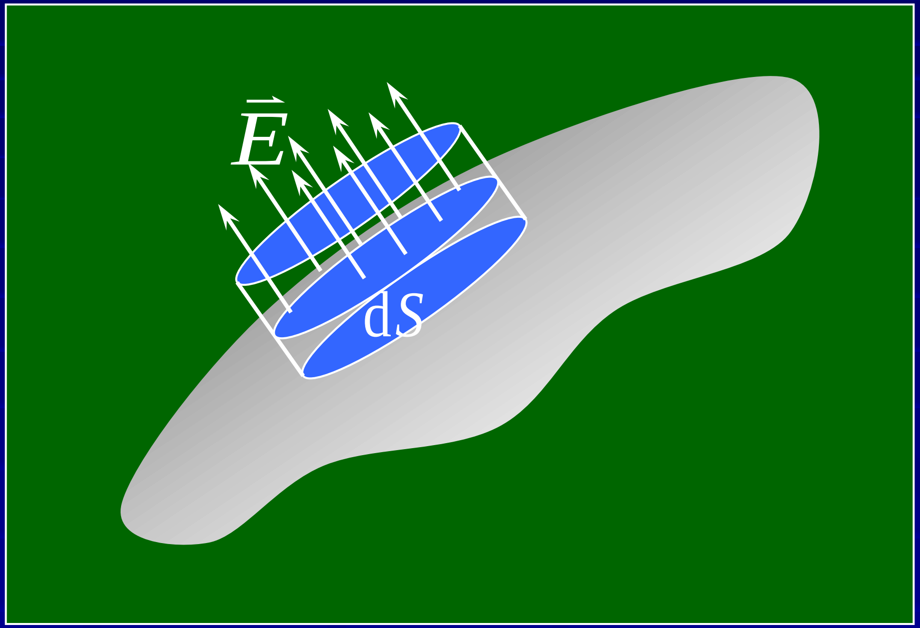
结论： 导体内部没有净电荷，电荷只能分布在导体表面。

2. 处于静电平衡的导体，其表面上各点的电荷密度与表面邻近处场强的大小成正比。

证明：由高斯定理：

$$\oint_s \vec{E} \bullet d\vec{S} = E\,dS = \frac{\sigma\, dS}{\varepsilon_o}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o}$$



3. 静电平衡下的孤立导体，其表面处电荷密度σ 与该表面曲率有关，曲率（1/R）越大的地方电荷密度也越大，曲率越小的地方电荷密度也越小。

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？

解： **由于两球由导线连接，两球电势相等：**

$$U=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

得：

$$\frac{Q}{q}=\frac{R}{r}$$

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：

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：

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

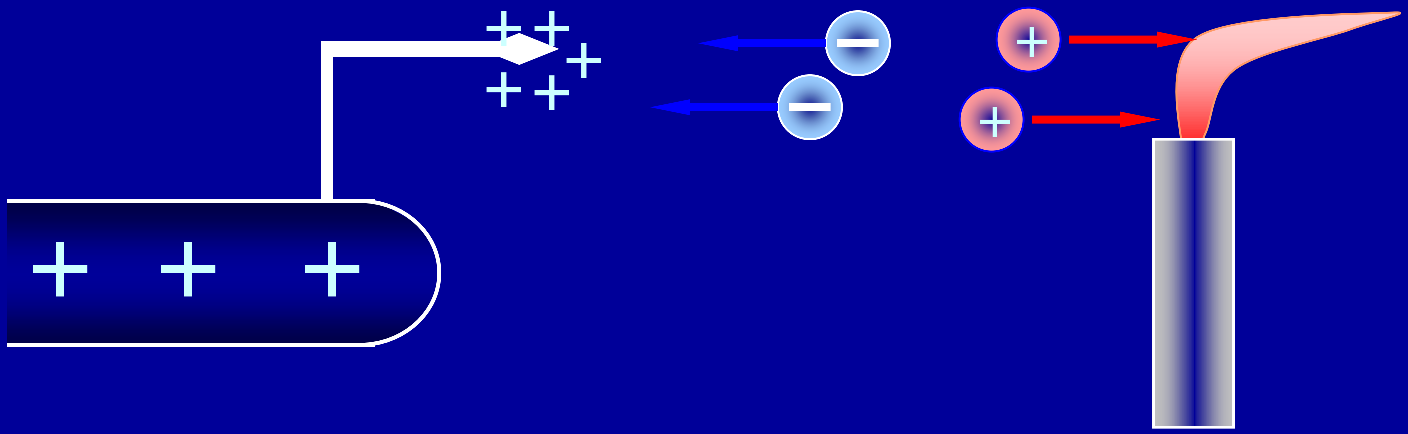
所以：

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_r} = \frac{Qr^2}{qR^2} = \frac{r}{R}$$

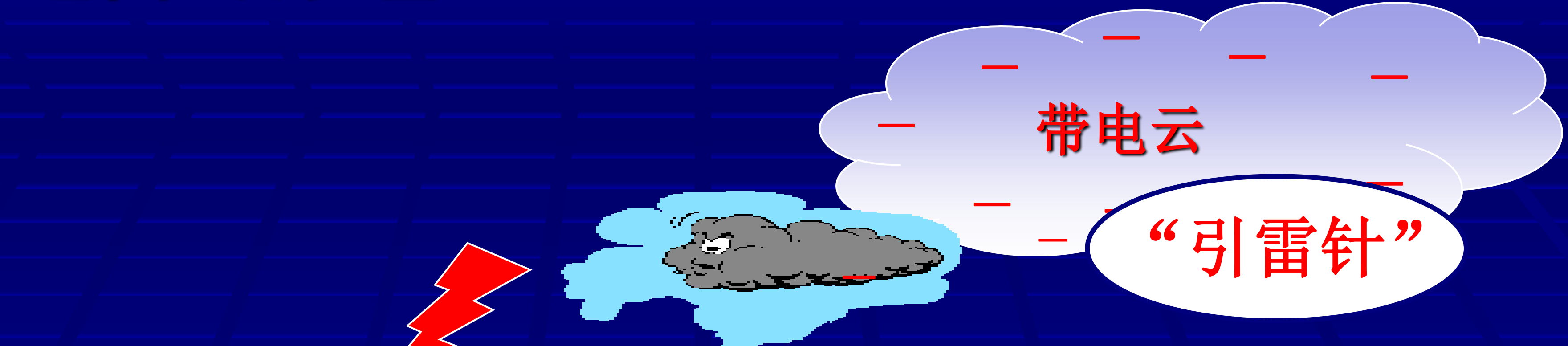
结论：两球电荷面密度与曲率半径成反比，即与曲率成正比。

➢ 尖端放电

导体尖端处由于大量电荷积聚产生强电场，致使附近空气电离从而产生的一种放电现象。



➢ 避雷针原理



应 用

避雷针:Lightning Mast或Lightning Rod

一个柱子或基础结构，由它的顶到地有一垂直导体或它本身就是一到地的导体，其目的通过引导与疏导，把接闪的雷电流释放到大地, 拦截雷击使不落在其保护范围内的物体上，保护建筑物免遭直接雷击的破坏。

三 ．有导体存在时静电场的分析与计算

空腔导体

导体静电平衡特性：

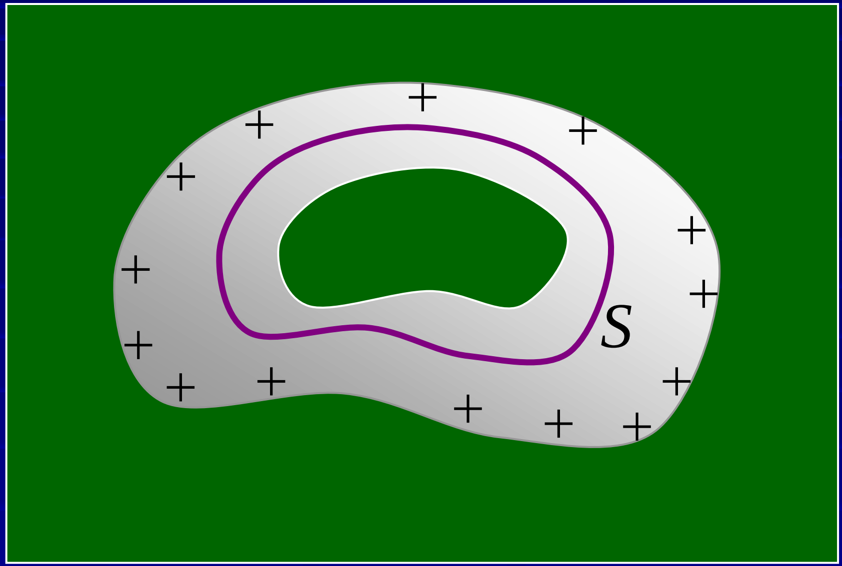
导体内部场强处处为零；电荷只分布在导体表面

问题：

- 内表面、外表面电荷如何分布？
- 腔内、腔外空间电场如何分布？

1. 腔内无带电体

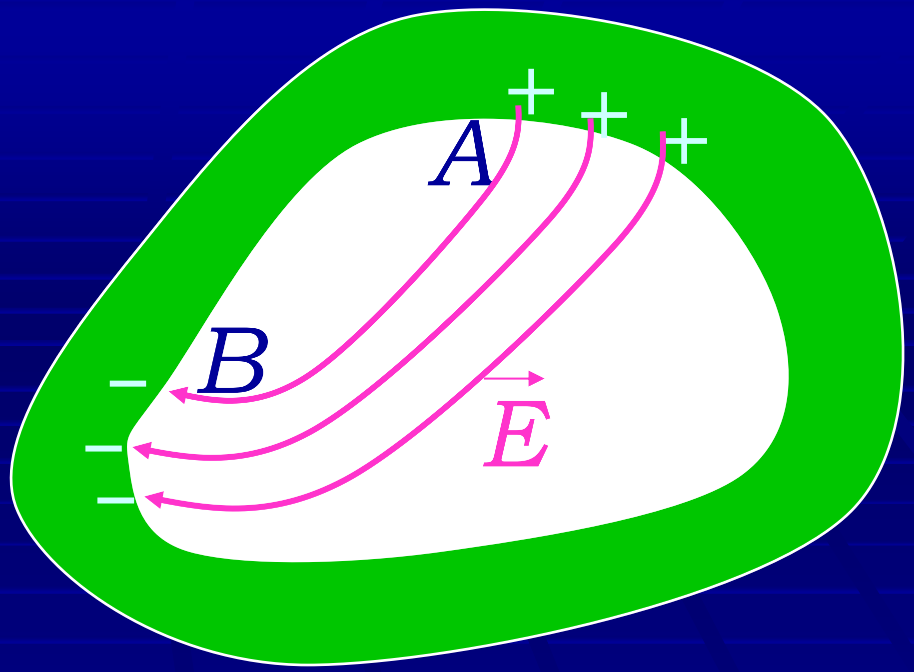
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_o} \sum q_i$$



$$\because \quad \vec{E} = 0 \quad \therefore \Rightarrow \sum q_i = 0$$

结论： 电荷分布在导体外表面，导体内部和内表面没净电荷。

- 设内表面存在净电荷，画出电场线，如图。

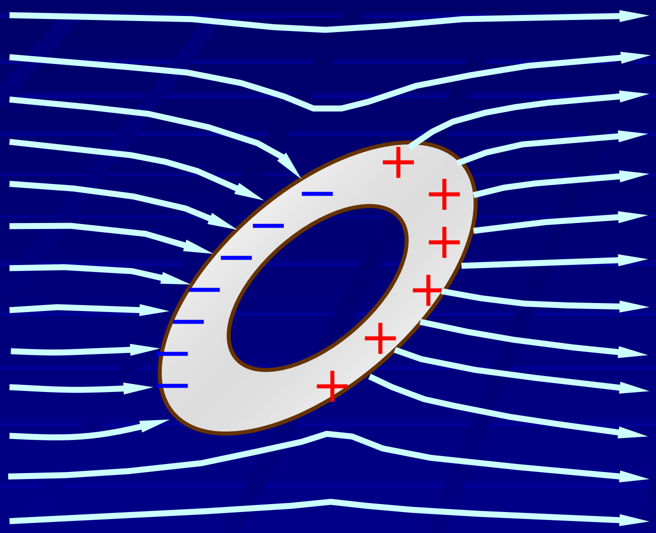


- 将单位正电荷从导体上的A点沿着电场线移到B点，电场力的功为：

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \neq 0 \quad \text{即：} \quad V_A \neq V_B$$

- 这说明导体还没有达到静电平衡，和静电平衡的前提导体为等势体相矛盾。所以这种电荷分布是不可能出现的。

电场中的空腔导体



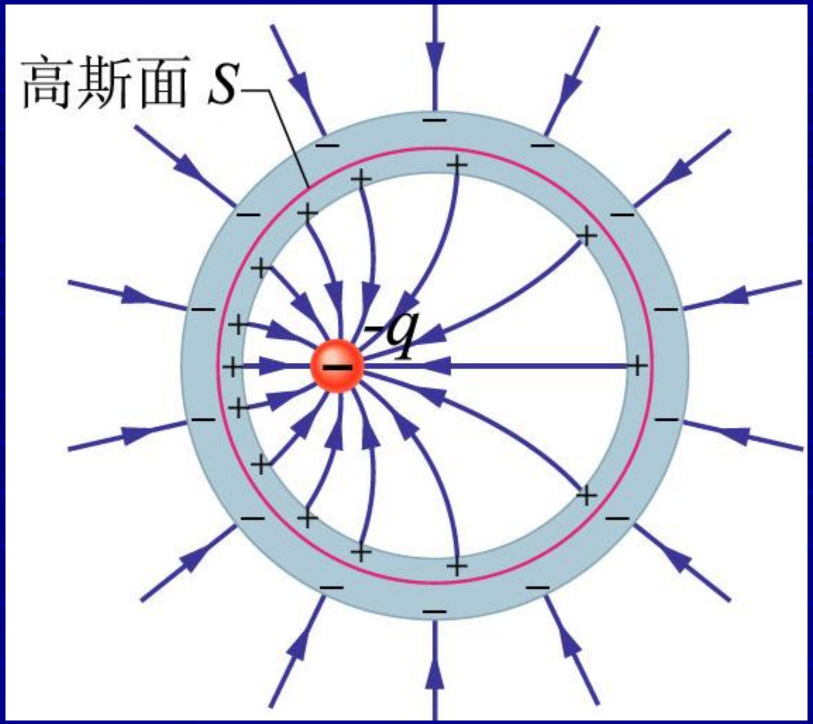
空腔导体屏蔽外场

2. 腔内有带电体

根据高斯定理：

$$\because \quad \vec{E} = 0 \quad \therefore \Rightarrow \sum q_i = 0$$

$$q' = -q$$



结论：

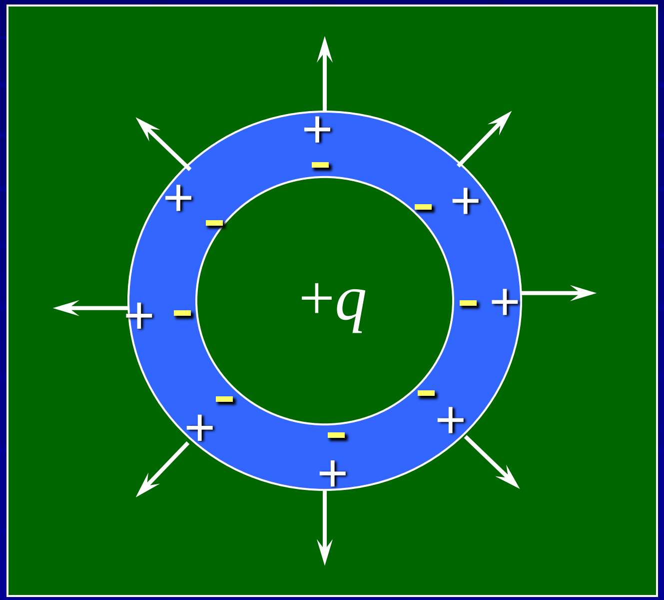
在静电平衡下，电荷分布在导体内、外两个表面，其中内表面的电荷是空腔内带电体的感应电荷，与腔内带电体的电荷等量异号。

四. 静电屏蔽

静电屏蔽： 一个接地的空腔导体可以隔离内外电场的影响。

1、**空腔导体，腔内没有电荷**

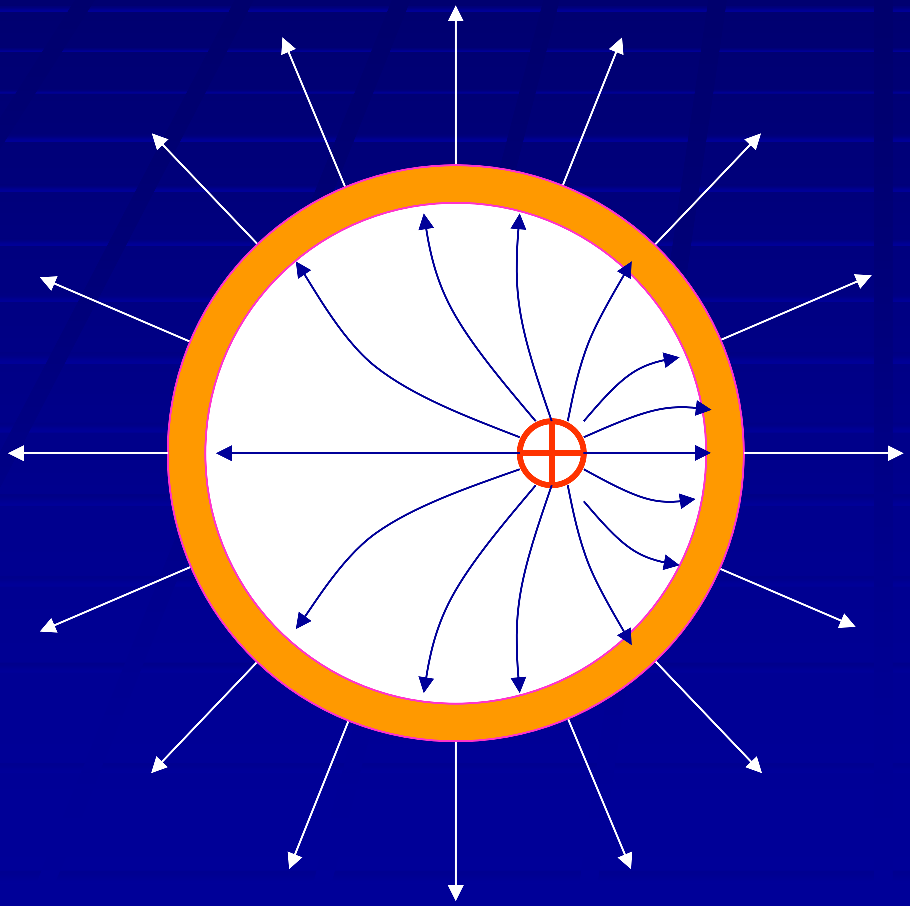
空腔导体起到屏蔽外电场的作用。



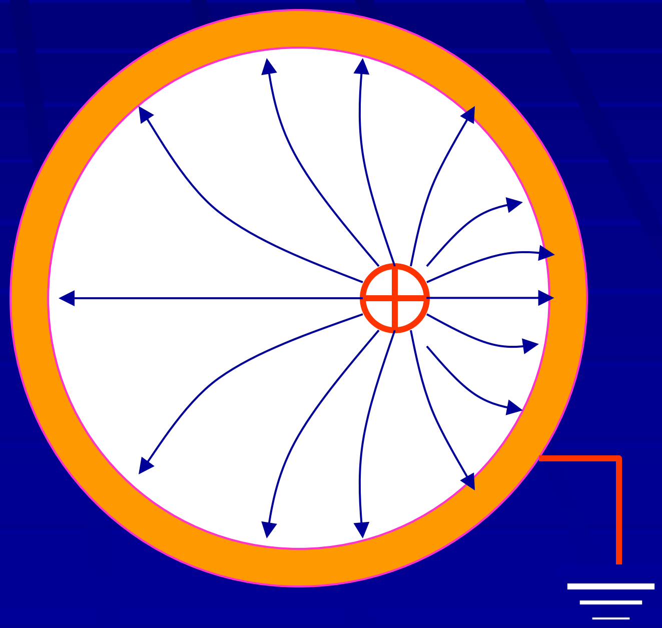
2、**空腔导体，腔内存在电荷**

接地的空腔导体可以屏蔽内、外电场的影响。

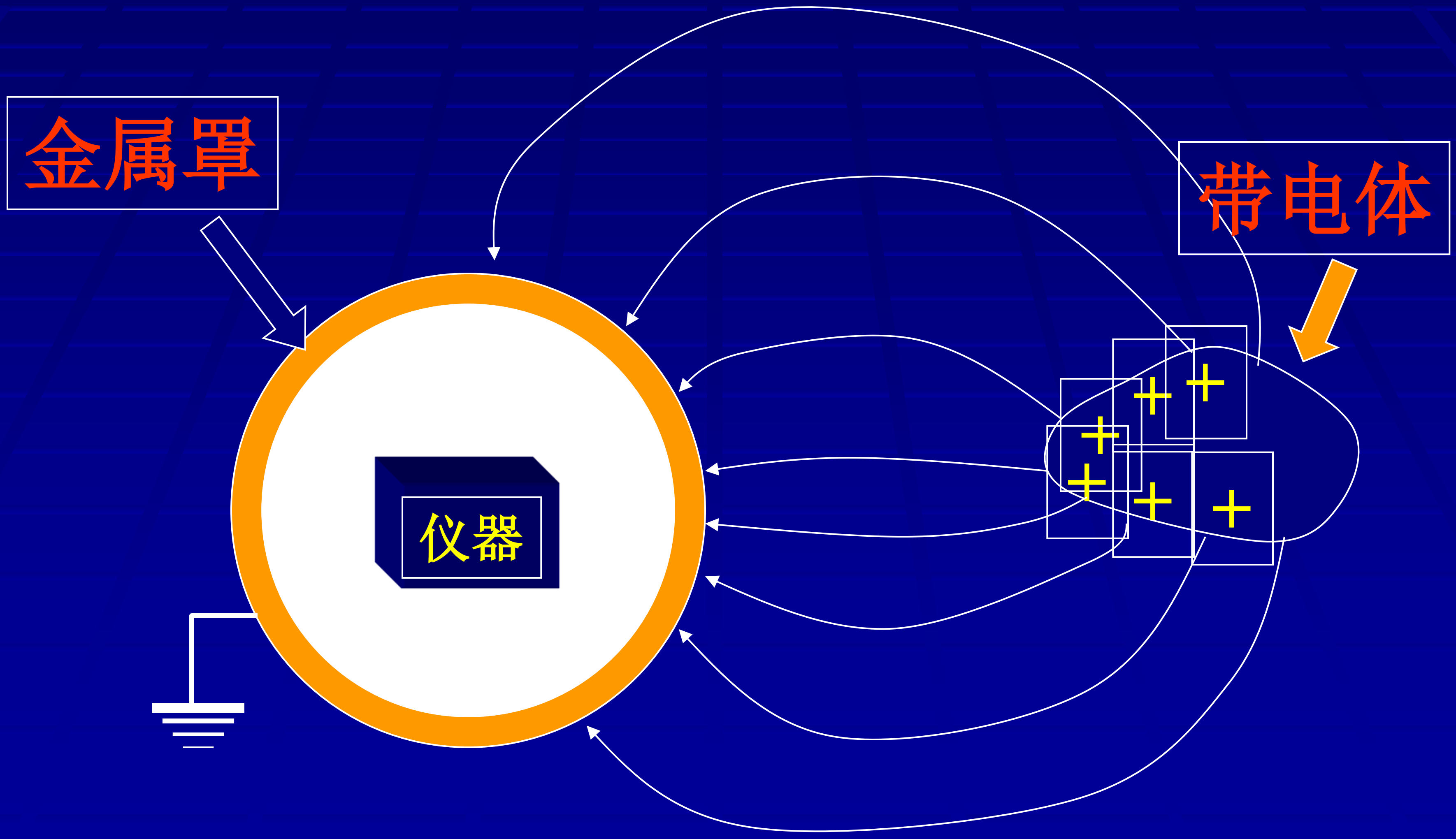
不接地的导体腔



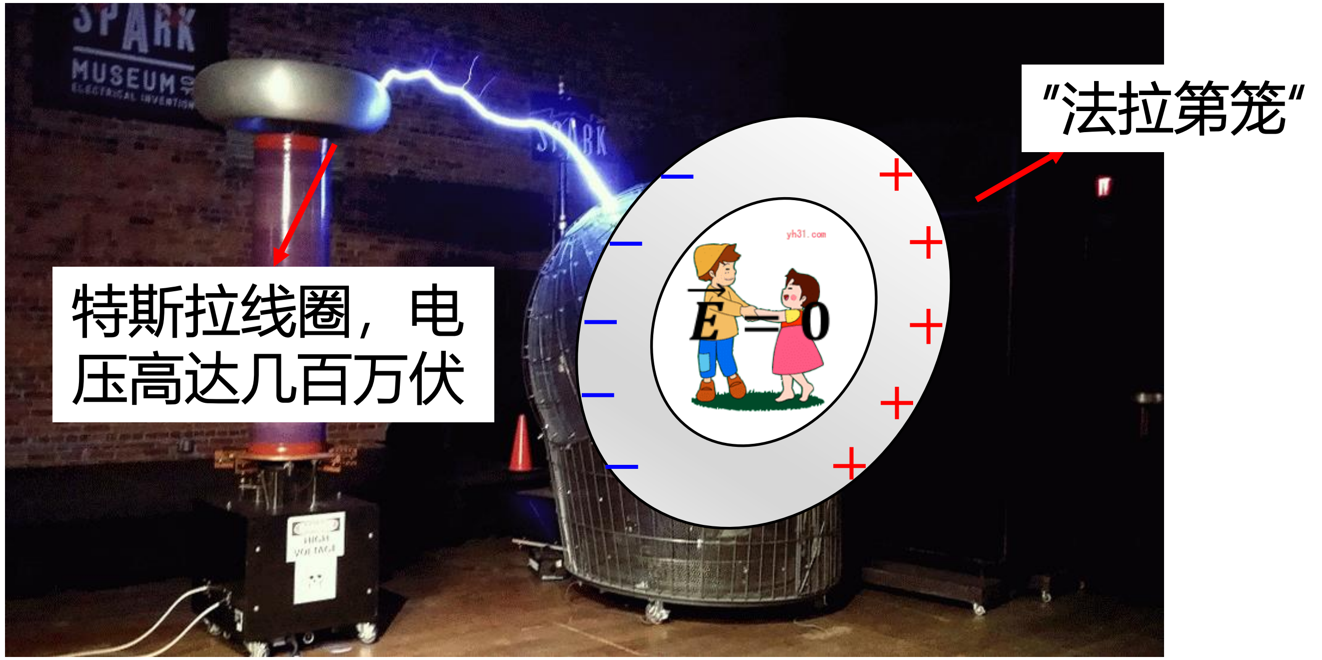
接地的导体腔



静电屏蔽



处在”法拉第笼“内的人为何安然无恙？



应用：防雷小知识

两米以上距离

躲进室内，关闭门窗

大家快到车里来！

不宜使用移动电话

尽量移开金属物件

下蹲，双脚并拢

有导体存在时静电场场量的计算原则

1. 静电平衡的条件

$$E_{内} = 0 \qquad 或\ V = c$$

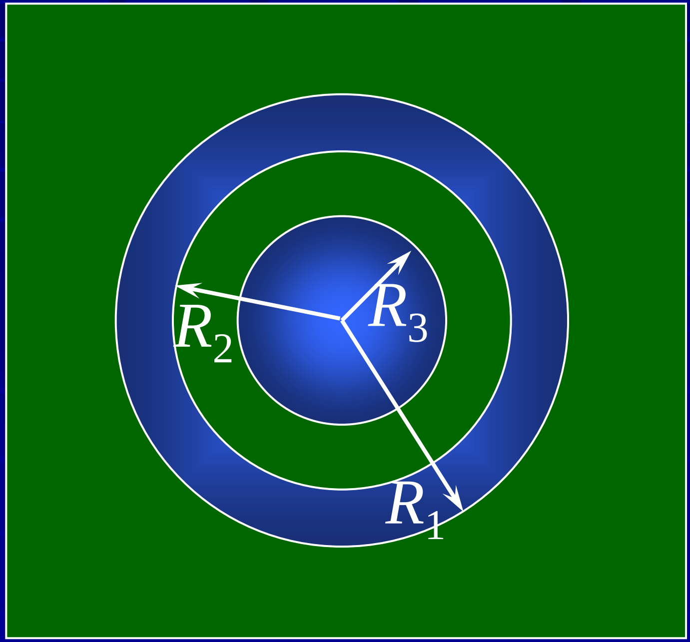
2. 基本性质方程

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum_i q_i}{\varepsilon_0} \qquad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

3. 电荷守恒定律

$$\sum_i Q_i = const.$$

例1. 有一外半径R_1，内半径为R_2的金属球壳。在球壳中放一半径为R_3的金属球，球壳和球均带有电量$q=10^{-8}$C的正电荷。问：（1）两球电荷分布。（2）球心的电势。（3）球壳电势。



解：（1）1、电荷$+q$分布在内球表面。

2、球壳内表面带电$-q$。

3、球壳外表面带电$2q$。

（2）

$$\vec{E}_3 = 0 \qquad (r < R_3)$$

$$E_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \qquad (R_3 < R_2)$$

$$E_1 = 0 \qquad (R_2 < R_1)$$

$$E_0 = \frac{2q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \qquad (r > R_1)$$

$$V_o = \int_0^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_0^{R_3} + \int_{R_3}^{R_2} + \int_{R_2}^{R_1} + \int_{R_1}^\infty$$

$$V_o = \int_{R_3}^{R_2} E_2 dr + \int_{R_1}^\infty E_o dr = \int_{R_3}^{R_2} \frac{qdr}{4\pi\varepsilon_o r^2} + \int \frac{2qdr}{4\pi\varepsilon_o r^2}$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{2q}{4\pi\varepsilon_o R_1} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_2} + \frac{2}{R_1}\right)$$

（3） $$V_1 = \int_{R_1}^\infty \frac{2q}{4\pi\varepsilon_o r^2} dr = \frac{2q}{4\pi\varepsilon_o R_1}$$

例2. 两块大导体平板，面积为S，分别带电q_1和q_2，两极板间距远小于平板的线度。求平板各表面的电荷密度。

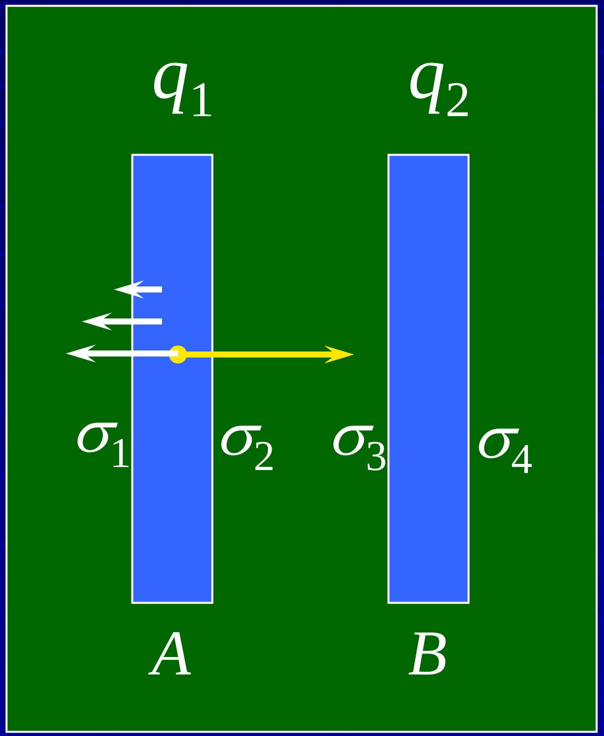
解： 电荷守恒：$\sigma_1 S + \sigma_2 S = q_1$

$$\sigma_3 S + \sigma_4 S = q_2$$

由静电平衡条件，导体板内 $\boldsymbol{E} = 0$

$$E_A = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_o} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_o} - \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_o} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_o} = 0$$

$$E_B = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_O} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_O} + \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_o} - \frac{\sigma_4}{2\varepsilon_o} = 0$$



$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{q_1}{S} \qquad \sigma_3 + \sigma_4 = \frac{q_2}{S}$$

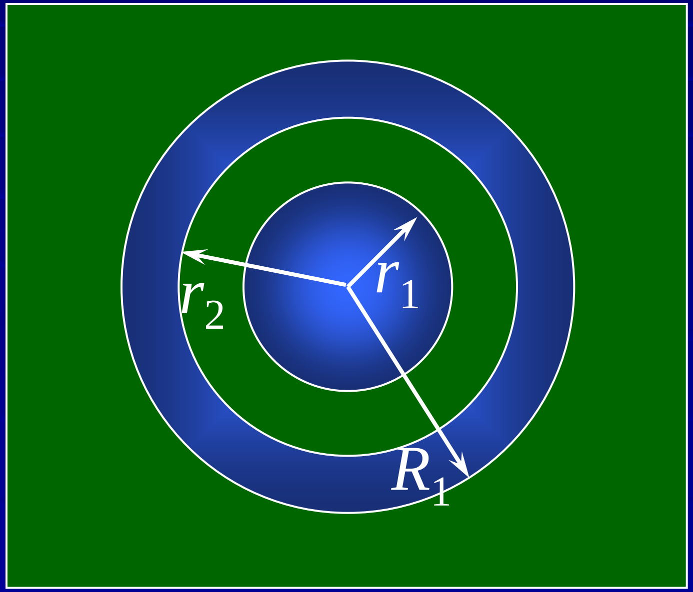
$$\sigma_1 = \sigma_4 = \frac{q_1 + q_2}{2S} \qquad \sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{q_1 - q_2}{2S}$$

例3.　半径为r_1、$r_2(r_1<r_2)$的两个同心导体球壳互相绝缘，现把$+q$ 的电荷量给予内球，求：

（1）外球的电荷量及电势；

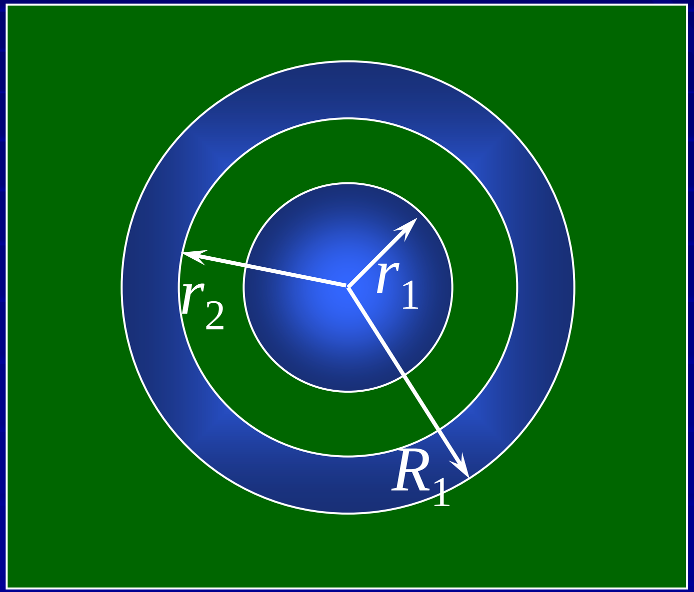
（2）把外球接地后再重新绝缘，外球的电荷量及电势；

（3）然后把内球接地，内球的电荷量及外球的电势(设内球离地球很远)。



解： (1) 由于静电感应，外球内表面电量为$-q$，外表面电量为$+q$

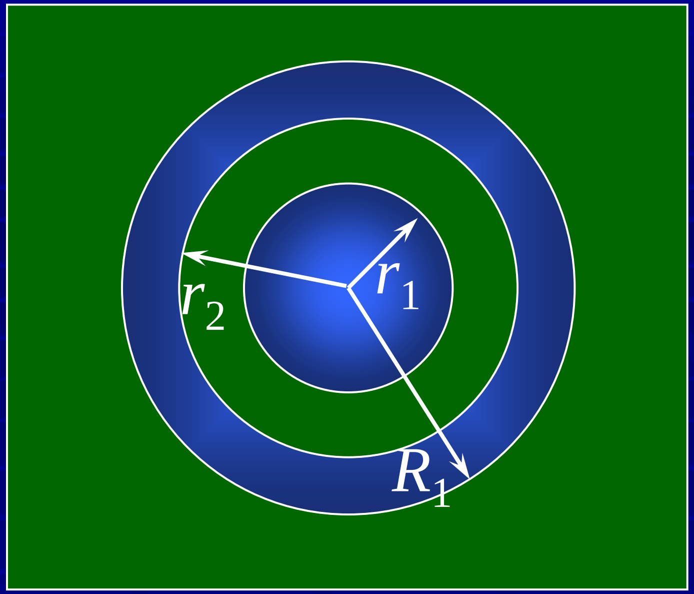
外球的电势为： $U_2 = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_2}$



(2) 外球内表面电量仍为$-q$, 外表面电量为零

外球的电势为： $U_2' = 0$

(3) 设内球电量为q_1,内球电势为零



$$U_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1} + \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 r_2} = 0$$

$$q_1 = \frac{r_1}{r_2} q$$

外球的电势为： $$U_{外} = \frac{q_1 - q}{4\pi\varepsilon_0 r_2}$$

空腔金属导体总结：

1. 空腔金属导体产生的感应电荷总是出现在表面（内表面或外表面）。

2. 空腔金属导体内部没有电场（线），空腔内部电场和空腔外部电场是各自独立的-----静电屏蔽。

3. 空腔金属导体内部和外部的电势是通过金属导体联系在一起的-----金属导体是等势体。