第七章 静电场

教学要求

1．**掌握**电场强度和电势的概念；

2．**掌握**电场强度和电势的迭加原理，能计算简单电荷分布的带电体的电场强度和电势；（重点、难点）

3．**理解**电力线的概念和静电场的环路定理。

物理学的第二次大综合

库仑定律：电荷与电荷间的相互作用(磁极与磁极间的相互作用)，富兰克林的风筝实验。

奥斯特发现：电流的磁效应

安培发现：电流与电流间的相互作用规律.

法拉第的电磁感应定律： 电磁一体

麦克斯韦电磁场统一理论（19世纪中叶）

赫兹在实验中证实电磁波的存在,光是电磁波.
技术上的重要意义：发电机、电动机、无线电技术等.电磁现象普遍存在于自然界（包括生命现象）中。

电磁学中的场分为四个阶段：

- 静止电荷 → 静电场
- 电　　流 → 稳恒磁场
- 变化磁场 → 电　场
- 变化电场 → 磁　场

场：是物质存在的一种形式，是物质不同于实物这种形式的另一种存在形式。

第一节 电场 电场强度

一. 电荷的量子化

基本性质

1 电荷有正负之分；

2 电荷量子化；电子电荷 $e = 1.602\times10^{-19}\mathrm{C}$

$$q = ne \qquad (n = 1,2,3,\cdots)$$

3 同性相斥，异性相吸.

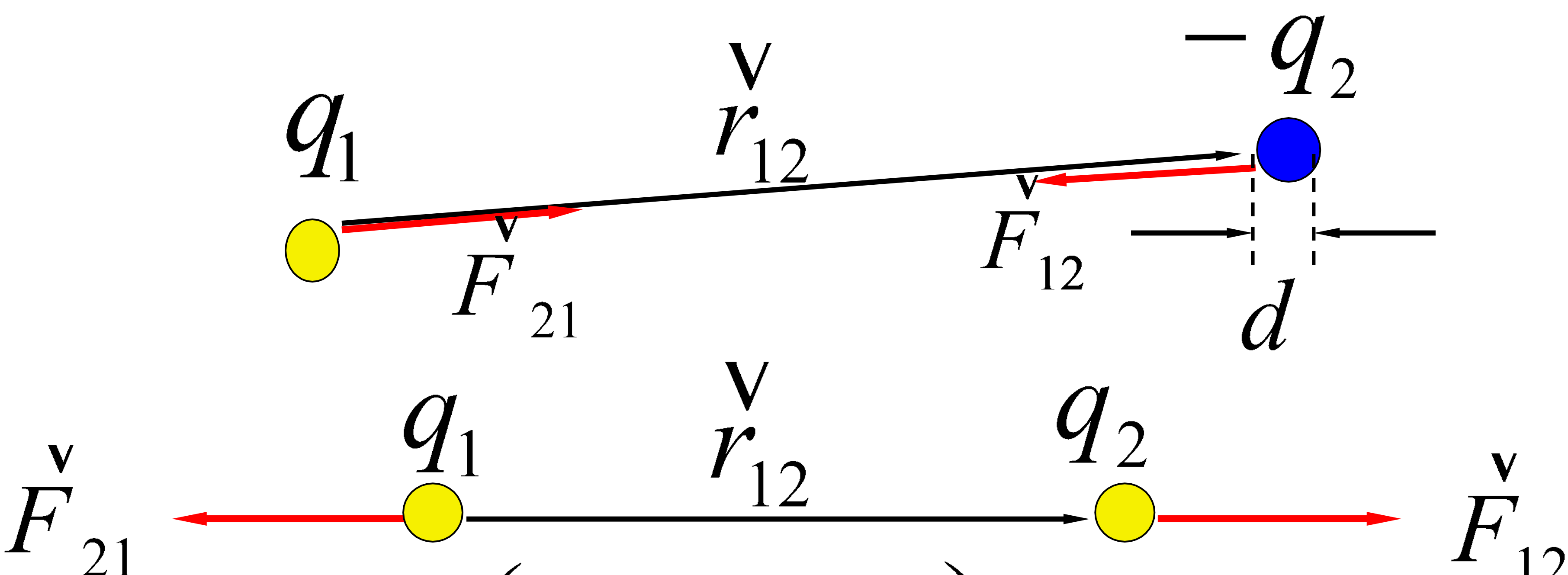
强子的夸克模型具有分数电荷（$\frac{1}{3}$或 $\frac{2}{3}$电子电荷）但实验上尚未直接证明.

二. 电荷守恒定律

在孤立系统中，电荷的代数和保持不变.

（自然界的基本守恒定律之一）

三. 库仑定律（点电荷模型）



$(d \ll r_{12})$

库仑定律

$$\vec{F}_{12} = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\vec{e}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

SI制 $k = 8.98755\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}}$

- 令 $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ （ε_0为真空电容率）

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.8542\times10^{-12}\,\mathrm{C^{2}\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}}$$

在氢原子内，电子和质子的间距为5.3×10^{-11}m. 求它们之间电相互作用力和万有引力，并比较它们的大小.

解 $m_{\mathrm{e}}=9.1\times10^{-31}\mathrm{kg}$ $\quad e=1.6\times10^{-19}\mathrm{C}$

$m_{\mathrm{p}}=1.67\times10^{-27}\mathrm{kg}$ $\quad G=6.67\times10^{-11}\mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$

$$\left.\begin{aligned} F_{\mathrm{e}} &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}=8.1\times10^{-6}\mathrm{N} \\ F_{\mathrm{g}} &= G\frac{m_{\mathrm{e}}m_{\mathrm{p}}}{r^2}=3.7\times10^{-47}\mathrm{N} \end{aligned}\right\} \frac{F_{\mathrm{e}}}{F_{\mathrm{g}}}=2.27\times10^{39}$$

（微观领域中，万有引力比库仑力小得多，可忽略不计.）

四 静电场

实验证实了两静止电荷间存在相互作用的静电力，但其相互作用是怎样实现的？

电 场

电 荷 ⟷ 电 荷

场是一种特殊形态的物质

场

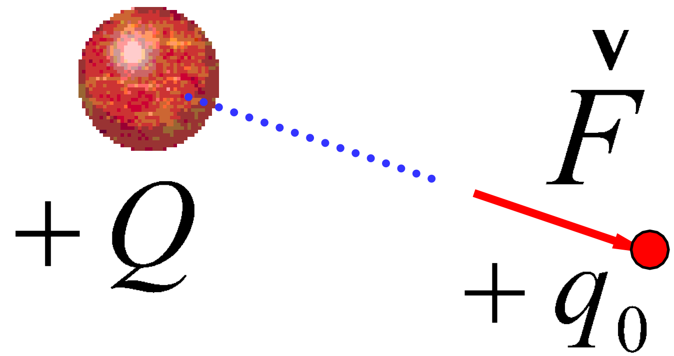
实物

物 质

- 电场的性质：
- 传递带电体之间电相互作用力的一种特殊的物质。
- ①电场对处在场中的带电体会产生力的作用；
- ②电场具有能量。
- 场与实物物体一样，也具有物质的性质——具有能量、质量和动量，是物质的另一种形态。

五 电场强度

电场中某点处的**电场强度**等于位于该点处的**单位试验电荷所受的力**，其方向为**正**电荷受力方向.



$+Q$：场源电荷

$+q_0$：试验电荷

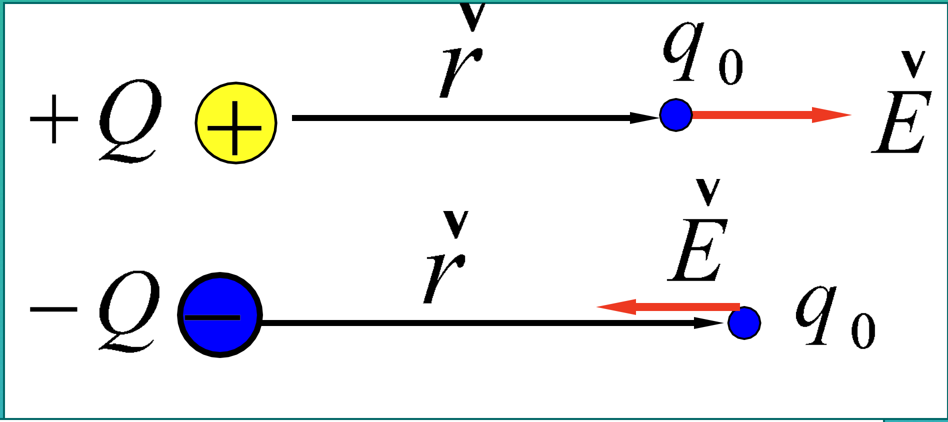
（试验电荷为点电荷、且足够小，故对原电场几乎无影响）

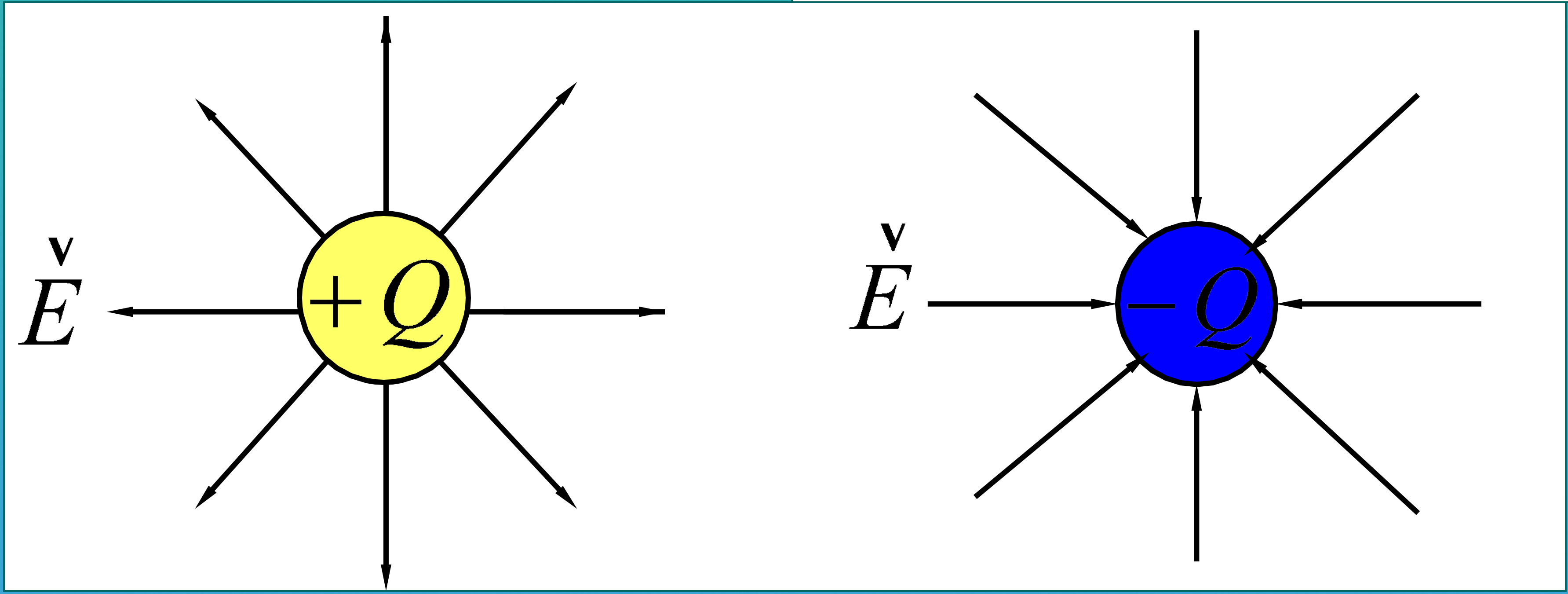
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

- 单位 $\mathrm{N \cdot C^{-1}}$ 或 $\mathrm{V \cdot m^{-1}}$
    - 电荷 q 在电场中受力 $\vec{F} = q\vec{E}$

六 点电荷的电场强度

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_0}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\vec{e}_r$$



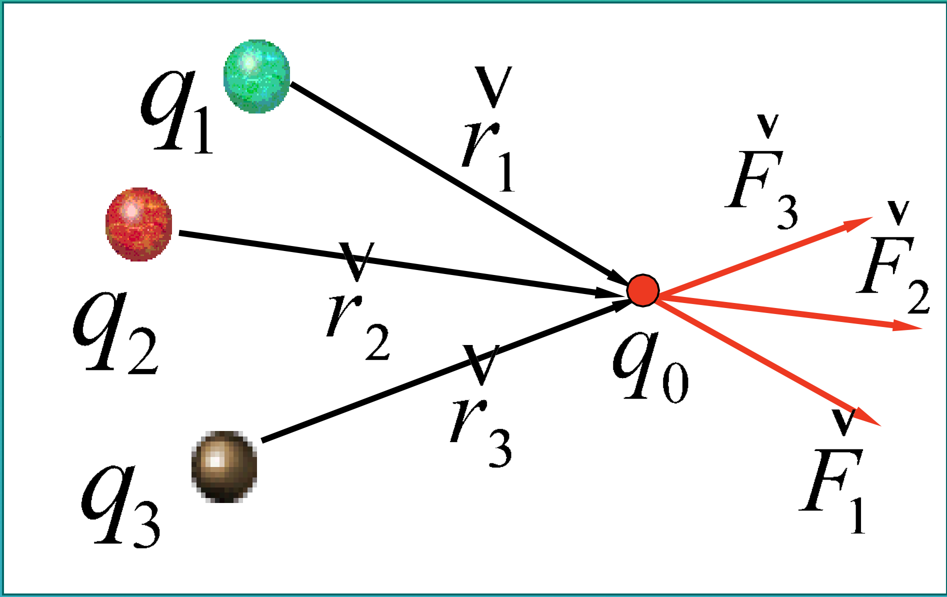


$$r\to 0\quad E\to\infty\,?$$

七 场强叠加原理

点电荷q_i对q_0的作用力

$$\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i q_0}{r_i^3}\vec{r}_i$$



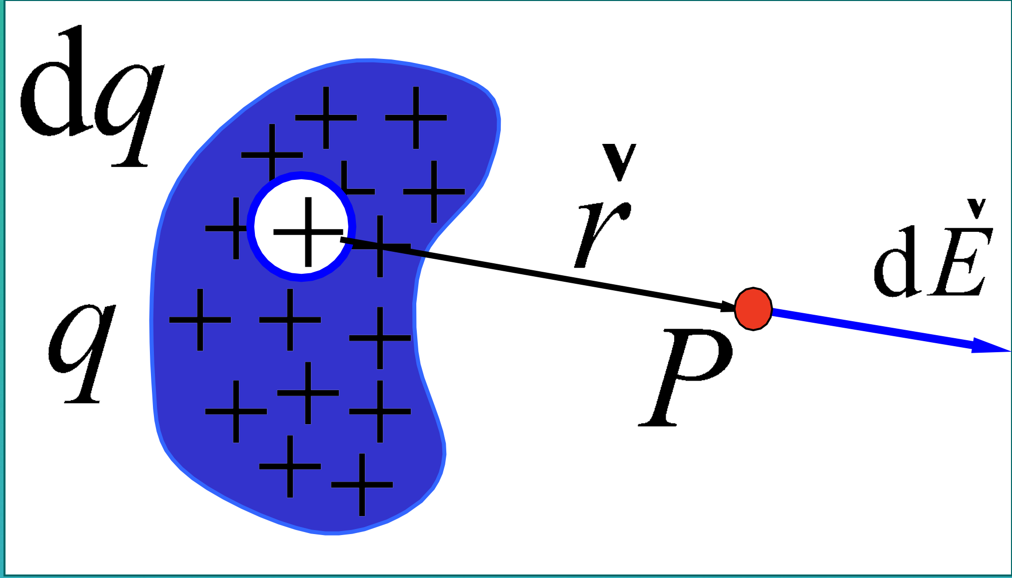
由力的叠加原理得 q_0 所受合力 $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$

故 q_0 处总电场强度 $\vec{E} = \dfrac{\vec{F}}{q_0} = \sum_i \dfrac{\vec{F}_i}{q_0}$

电场强度的叠加原理

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

◆ 电荷连续分布情况



$$\mathrm{d}\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathrm{d}q}{r^2}\vec{e}_r$$

$$\vec{E} = \int \mathrm{d}\vec{E} = \int \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\vec{e}_r}{r^2}\mathrm{d}q$$

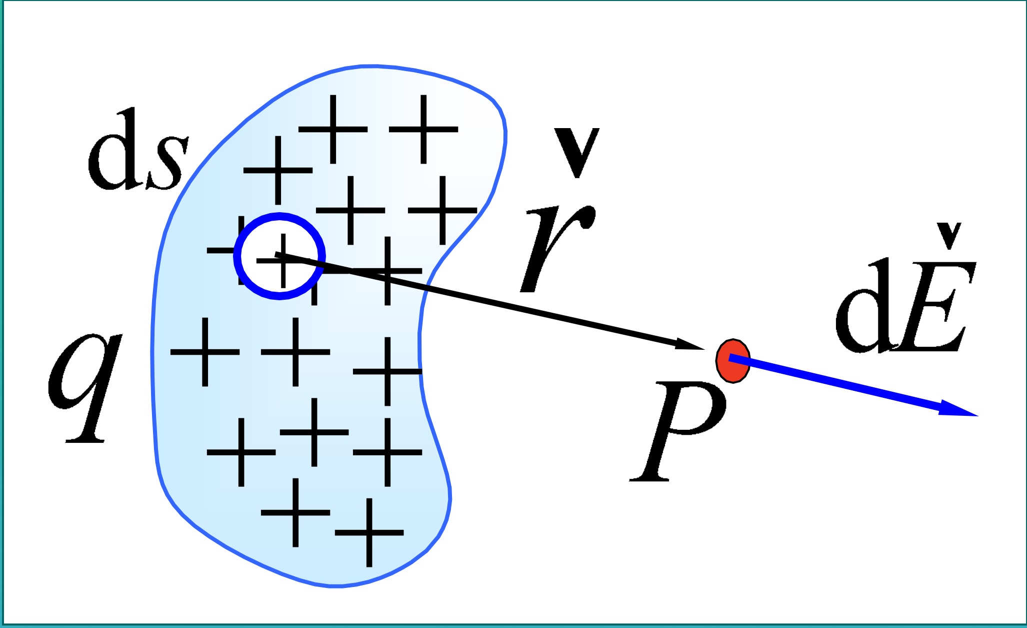
电荷体密度 $\rho = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}V}$

点 P 处电场强度

$$\vec{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho\vec{e}_r}{r^2}\mathrm{d}V$$

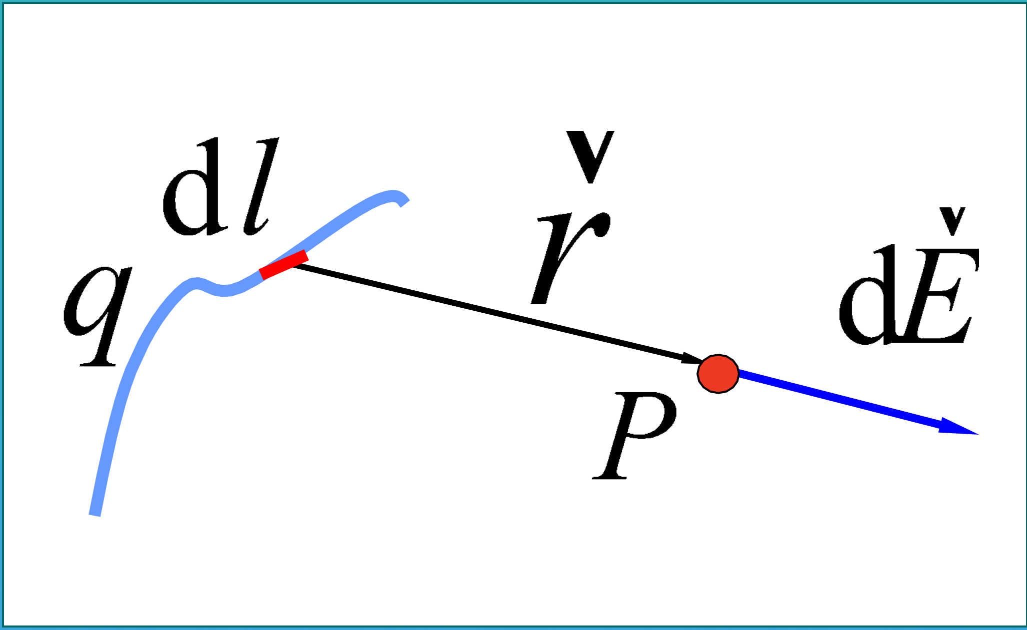
电荷面密度 $\sigma = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}s}$

$$\vec{E} = \int_S \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sigma \vec{e}_r}{r^2} \mathrm{d}s$$



电荷线密度 $\lambda = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}l}$

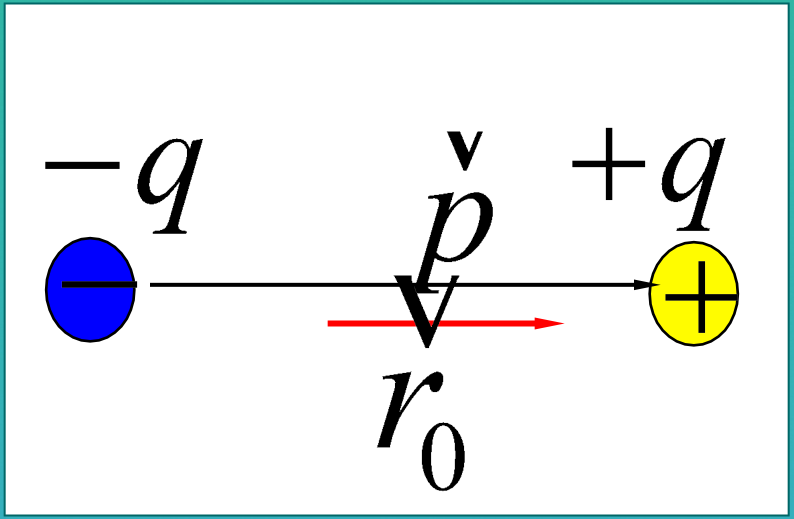
$$\vec{E} = \int_l \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda \vec{e}_r}{r^2} \mathrm{d}l$$



八　电偶极子的电场强度

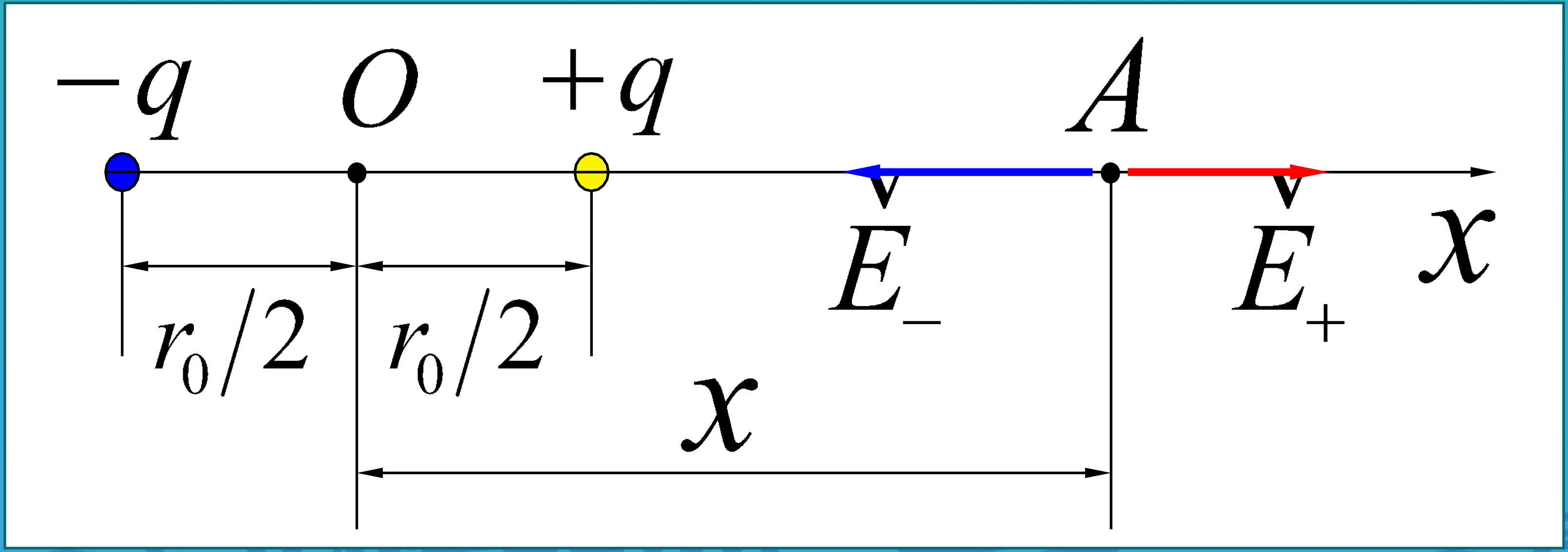
电偶极子的轴 $\vec{r}_0$

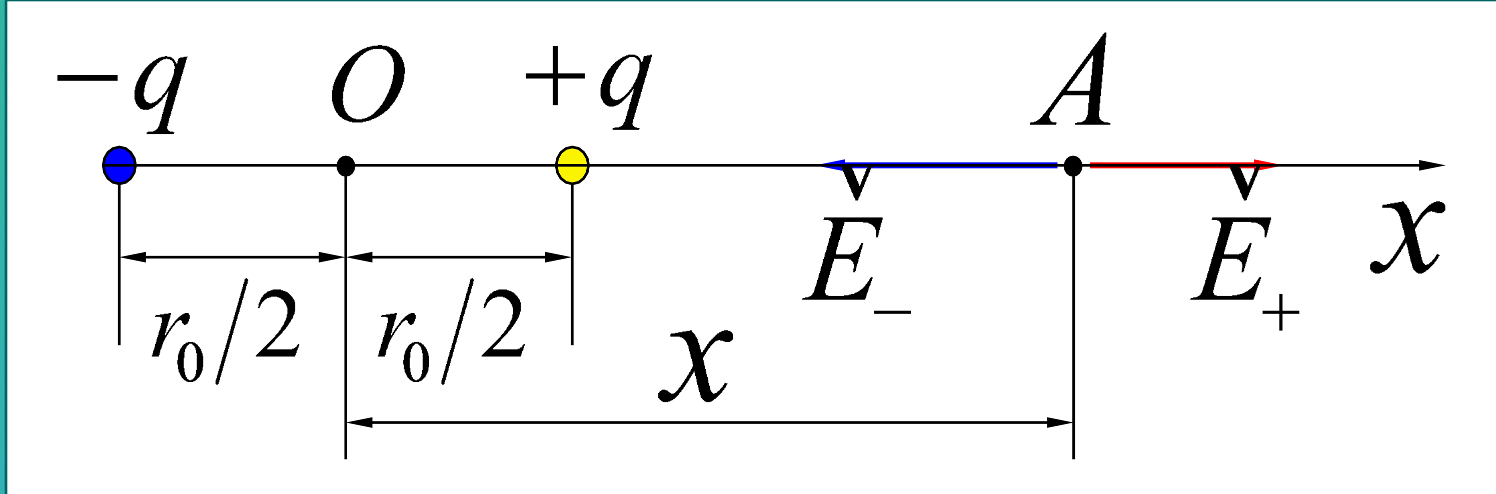
电偶极矩（电矩）$\vec{p} = q\vec{r}_0$



讨论

（1）电偶极子轴线延长线上一点的电场强度





$$\vec{E}_+ = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(x-r_0/2)^2}\vec{i} \qquad \vec{E}_- = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(x+r_0/2)^2}\vec{i}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{2xr_0}{(x^2-r_0^2/4)^2}\right]\vec{i}$$

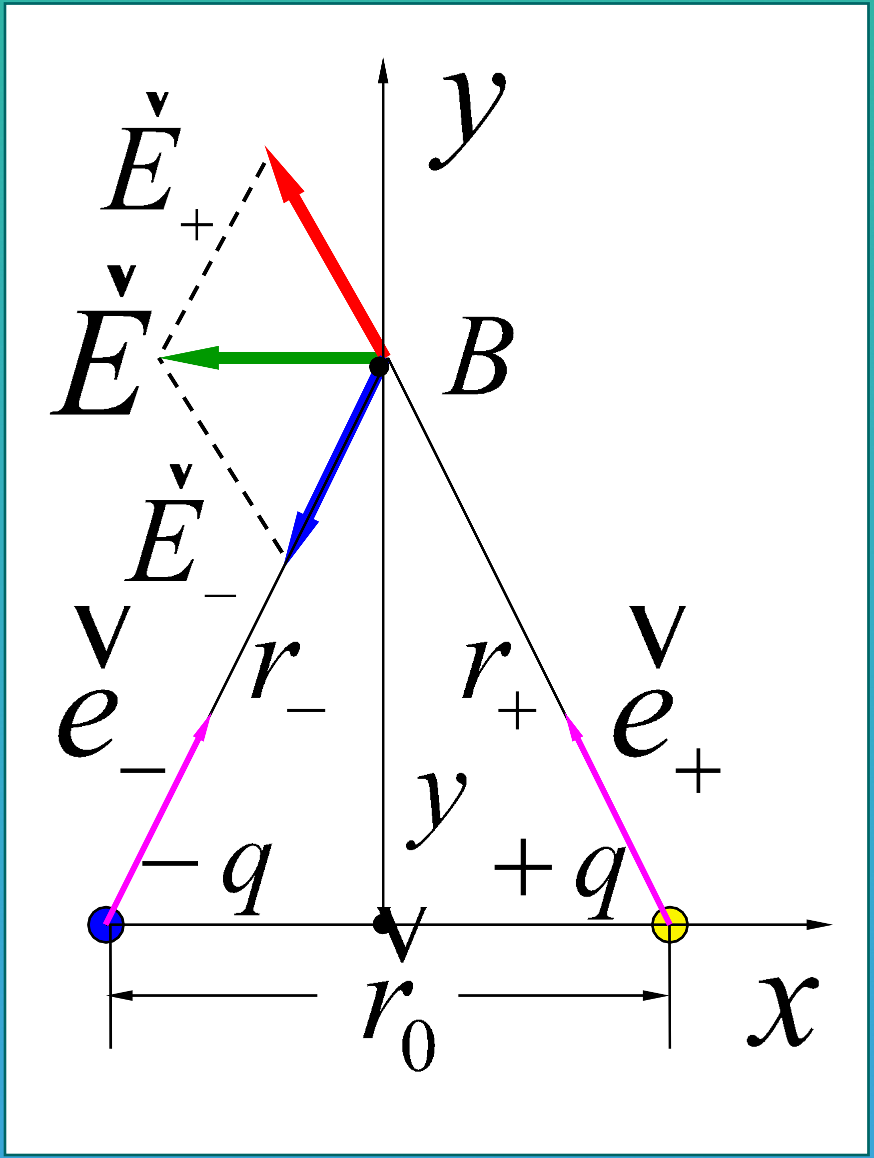
$$x \gg r_0 \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2r_0 q}{x^3}\vec{i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\vec{p}}{x^3}$$

(2) 电偶极子轴线的中垂线上一点的电场强度

$$\begin{cases} \vec{E}_+ = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r_+^2}\vec{e}_+ \\ \vec{E}_- = -\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r_-^2}\vec{e}_- \end{cases}$$

$$r_+ = r_- = r = \sqrt{y^2 + (\frac{r_0}{2})^2}$$

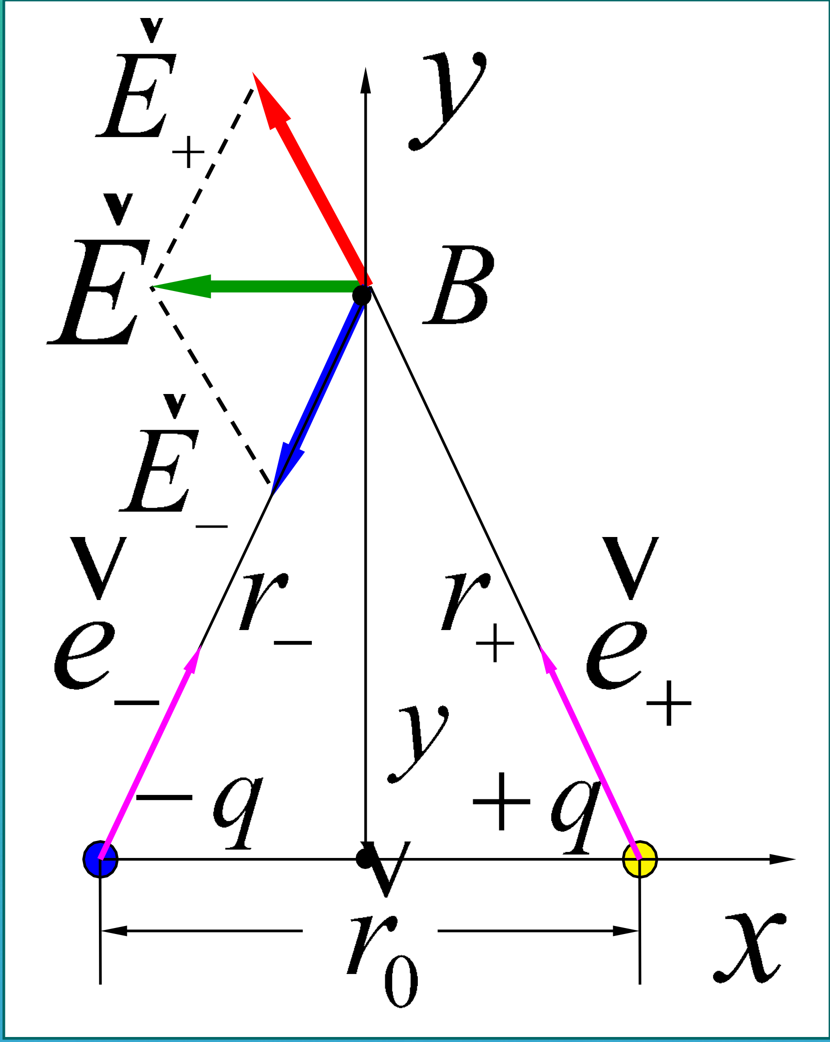
$$\begin{cases} \vec{e}_+ = (-r_0/2\vec{i} + y\vec{j})/r \\ \vec{e}_- = (r_0/2\vec{i} + y\vec{j})/r \end{cases}$$



$$\begin{cases} \vec{E}_+ = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^3}(y\vec{j} - \dfrac{r_0}{2}\vec{i}) \\ \vec{E}_- = -\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^3}(y\vec{j} + \dfrac{r_0}{2}\vec{i}) \end{cases}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qr_0\vec{i}}{r^3}$$

$$= -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qr_0\vec{i}}{(y^2 + \frac{r_0^2}{4})^{3/2}}$$



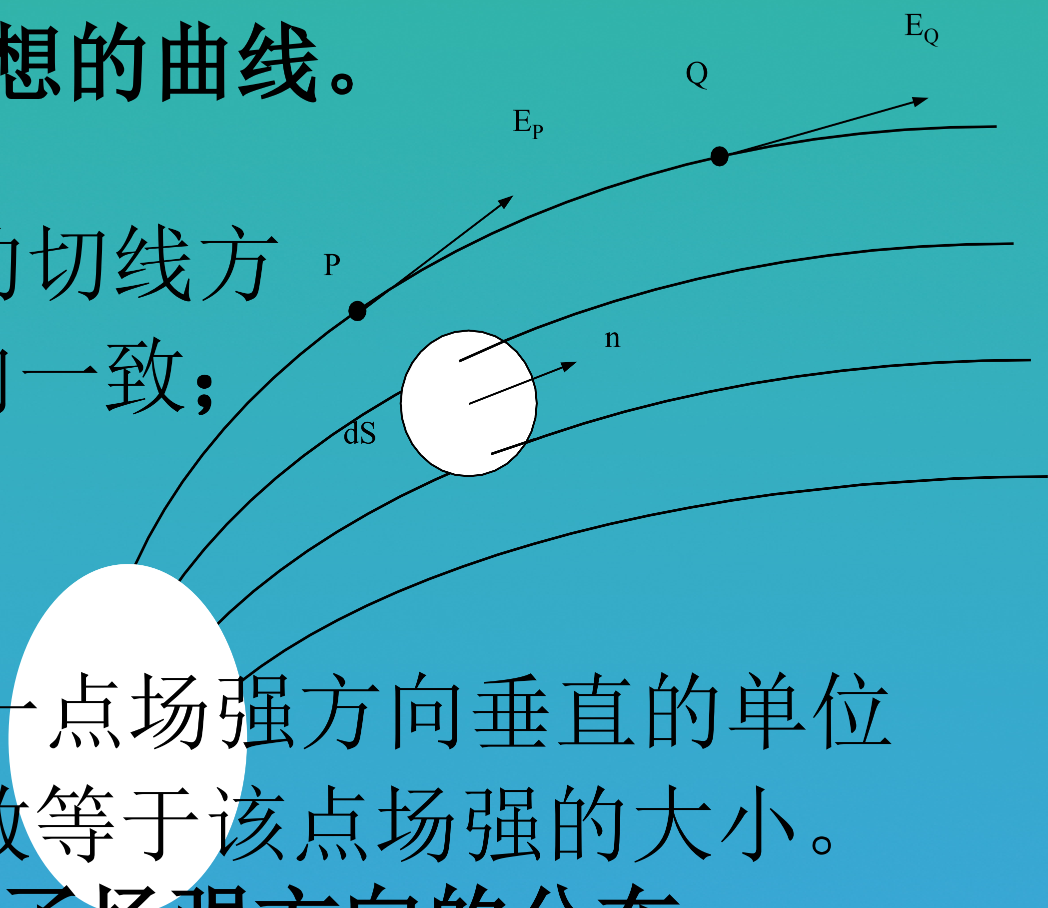
$$y >> r_0 \quad \vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qr_0\vec{i}}{y^3} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\vec{p}}{y^3}$$

九　电力线

- 用来直观描述电场在空间的分布而在电场中作出的一系列假想的曲线。

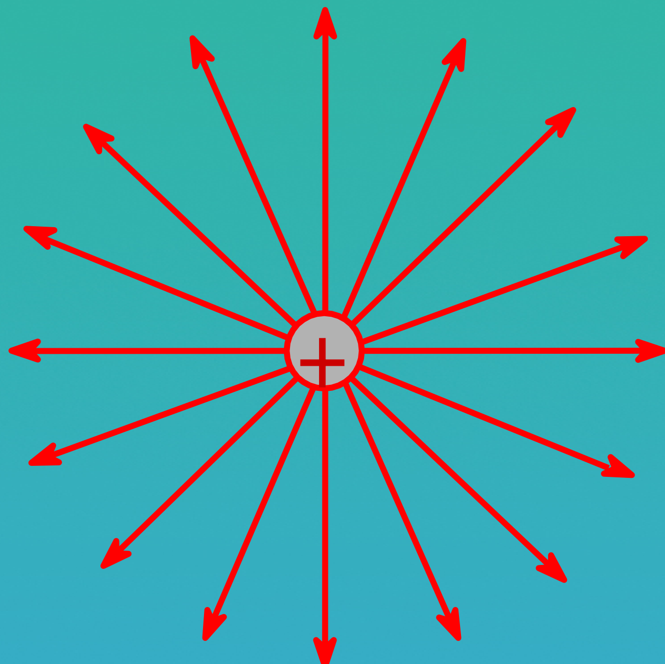
电力线的画法规定：

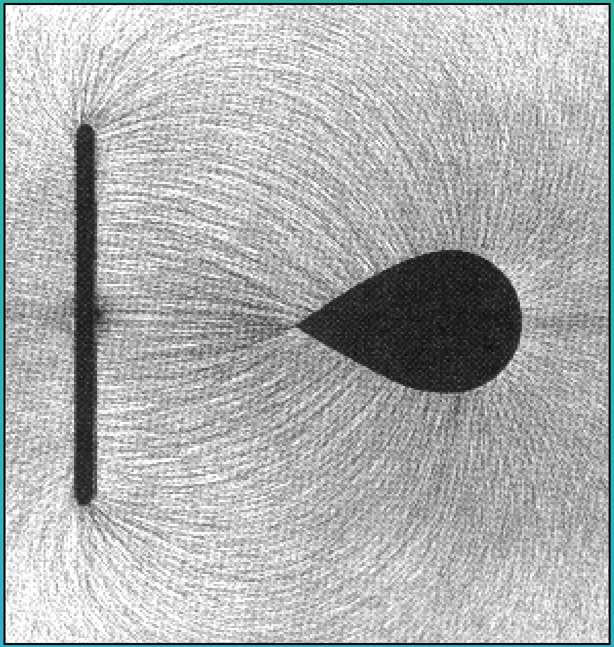
- ①电力线上每一点的切线方向与该点场强的方向一致；

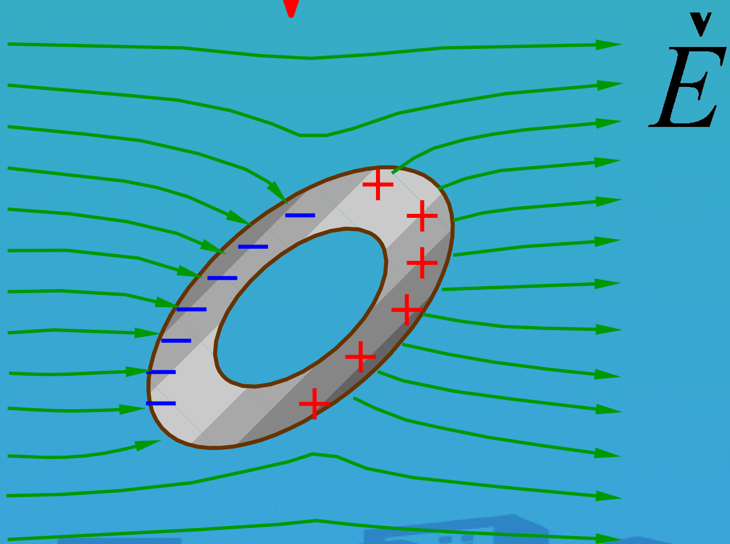


- ②穿过与电场中任一点场强方向垂直的单位面积的电力线条数等于该点场强的大小。
- **电力线的方向反映了场强方向的分布；电场线的疏密反映场强大小的分布。**

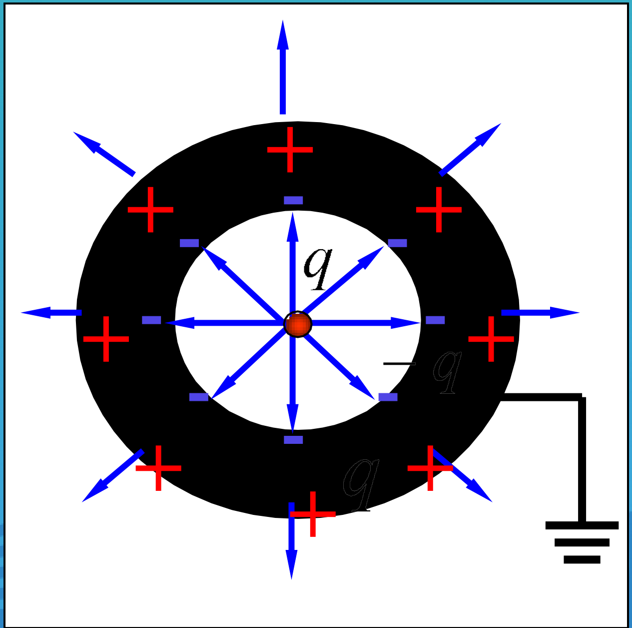
几种常见电场的电力线







空腔导体屏蔽外电场



第二节　电　势

一. 点电荷的静电场力所做的功

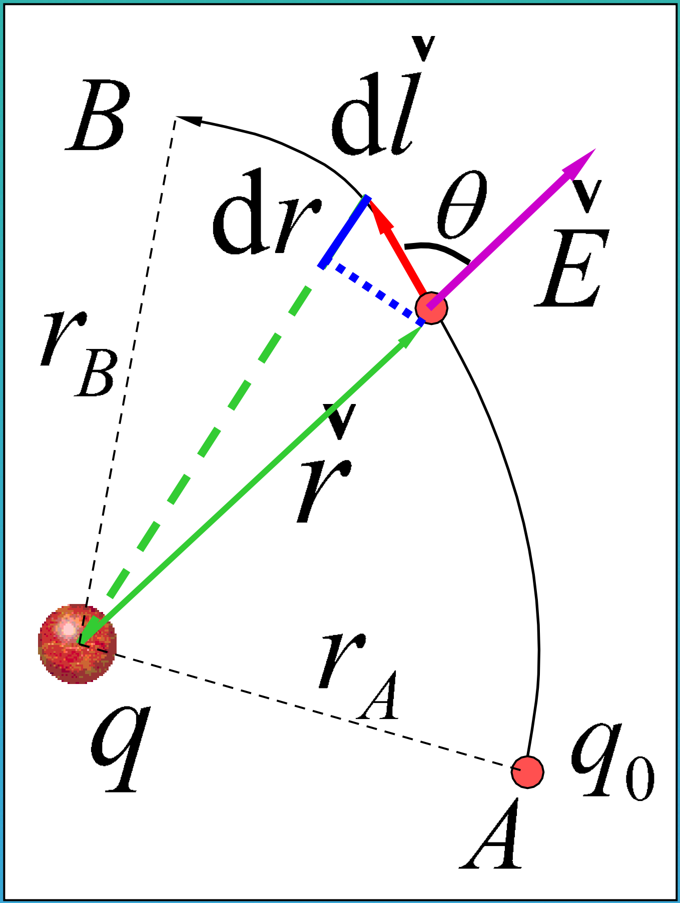
$$\mathrm{d}A = q_0 \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \vec{r} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$$\vec{r} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = r\mathrm{d}l\cos\theta = r\mathrm{d}r$$

$$\mathrm{d}A = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\mathrm{d}r$$

$$A_{AB} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\int_{r_A}^{r_B}\frac{\mathrm{d}r}{r^2}$$

$$= \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$



结果：A仅与 q_0 的始末位置有关，与路径无关.

二. 任意电荷的电场（视为点电荷的组合）

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

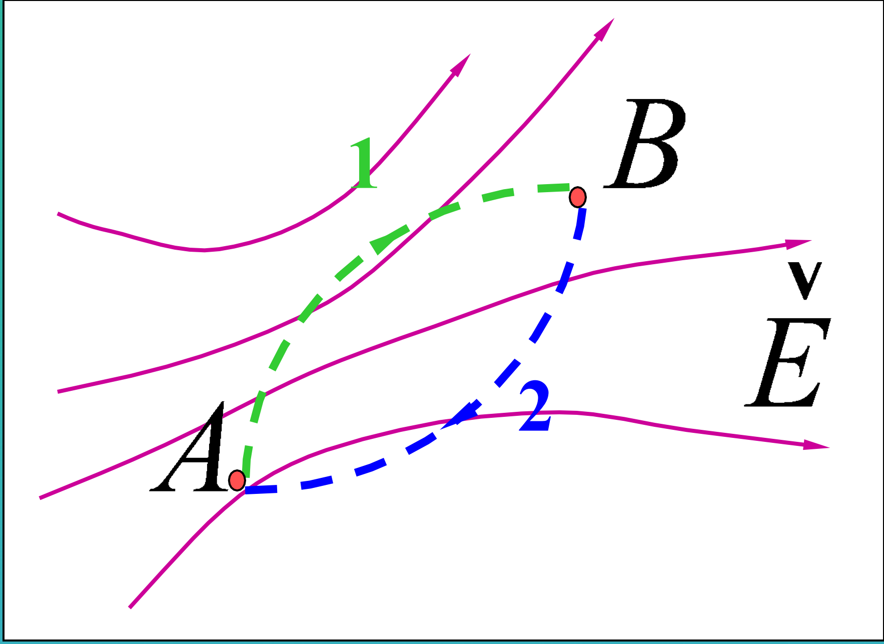
$$A_{AB} = q_0 \int_{r_A}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \sum_i q_0 \int_{r_A}^{r_B} \vec{E}_i \cdot d\vec{l}$$

$$= \sum_i \frac{q_i q_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_{Ai}} - \frac{1}{r_{Bi}}\right)$$

结论：静电场力做功与路径无关.

即:静电场力是保守力，静电场是保守力场

三. 静电场的环路定理



$$q_0 \int_{A1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = q_0 \int_{A2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$$q_0\left(\int_{A1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{B2A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} \right) = 0$$

静电场是保守场

$$\oint_{l} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0$$