电 磁 学——电磁运动

库仑定律：（18世纪） 电荷与电荷间的相互作用

奥斯特的发现： 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.

一 电荷(Electric charge)

1 电荷种类：正电荷、负电荷；

2 同种电荷相斥，异种电荷相吸.

本杰明·富兰克林
Benjamin Franklin
1706—1790年

3 电荷守恒定律 （自然界的基本守恒定律之一）

在孤立系统中, 电荷的代数和保持不变.

4 电荷的相对论不变性

不同参考系中, 同一粒子的带电量不变.

5 电荷量子化； 电子电荷 $e = 1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$

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

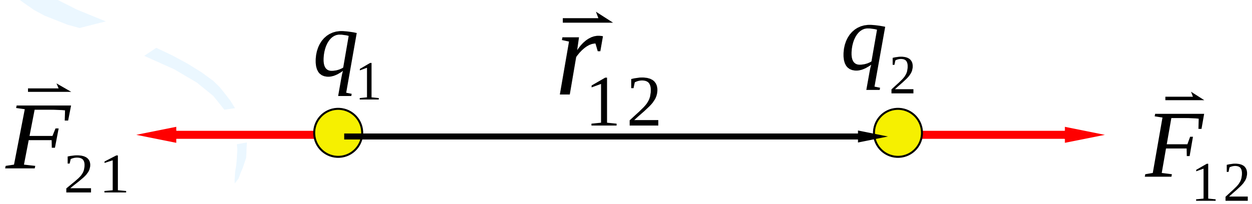
Millikan Robert Andrews
1868.3.22—1953.12.19

美国物理学家

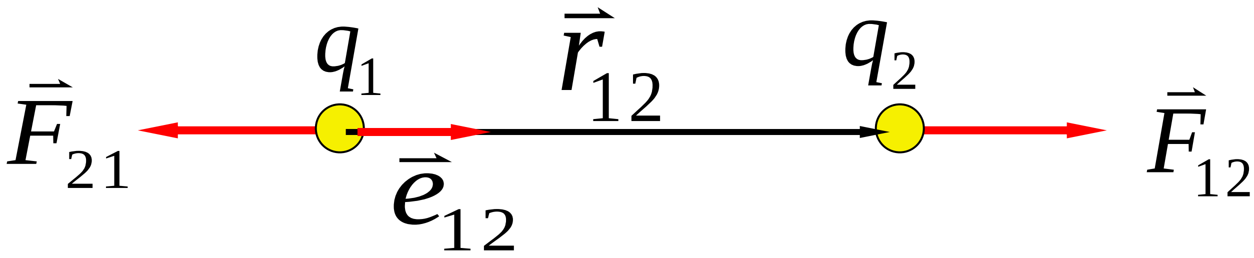
强子的夸克模型具有分数电荷（$\frac{1}{3}e$ 或 $\frac{2}{3}e$ 电子电荷）但实验上尚未直接证明.

二 库仑定律(Coulomb’s Law)

相对于惯性系观察，自由空间（或真空）中两个静止的*点电荷*之间的作用力（库仑力），与它们所带电量的乘积成正比，与它们之间的距离的平方成反比，作用力沿着这两个点电荷的连线。



静 电 场



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

静电力（库仑力）

单位矢量

$$\vec{e}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$$

静电力常量 $k = 8.98755\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}}$

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

$$\boxed{\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\vec{e}_{12}}$$

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

$$= 8.8542\times10^{-12}\,\mathrm{F\cdot m^{-1}}$$

库仑定律

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\vec{e}_{12}$$

- 类比方法的借鉴
- 意义：电学研究进入定量阶段
- 卡文迪许的工作

三 电场和电场强度

1 静电场

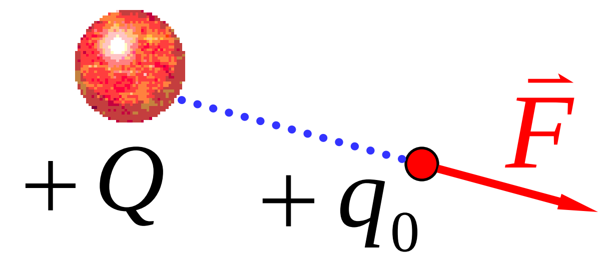
问题：静止电荷间存在相互作用的静电力，其相互作用是怎样传递的？

电荷 ⟷ 电荷
（电 场）

场、实物 } 物 质

2 电场强度

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



$\left\{\begin{array}{l}+Q\text{：场源电荷}\\+q_0\text{：试验电荷}\end{array}\right.$

（试验电荷为点电荷、且电量小）

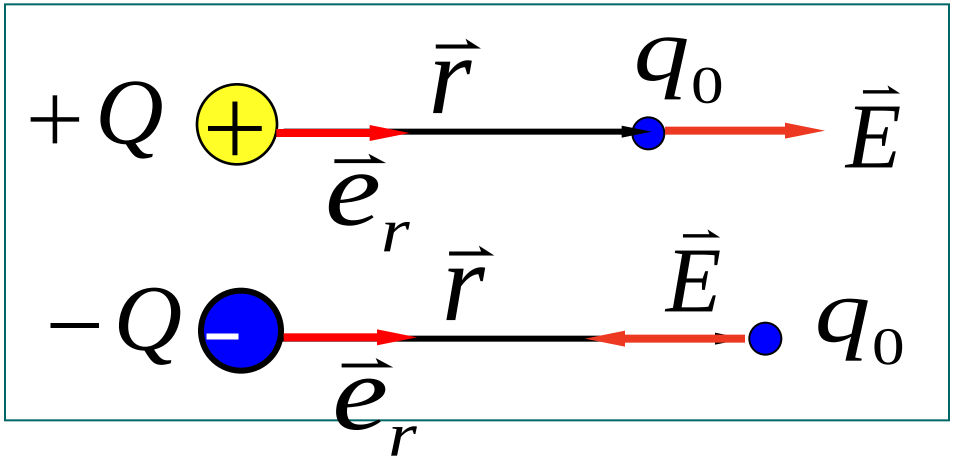
- 物理意义
- 单位 $\mathrm{N\cdot C^{-1}}$ $\mathrm{V\cdot m^{-1}}$
- 矢量：$\vec{E}$方向为正电荷受力方向
- 电荷q在电场中受力 $\vec{F}=q_0\vec{E}$

3　电场强度的计算

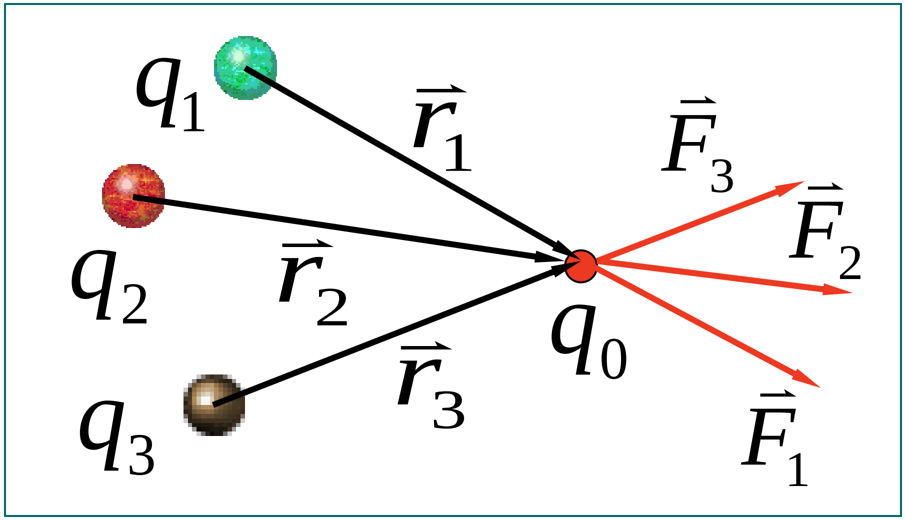
1. 点电荷的电场强度（正、负）

$$\vec{F}_{\text{静}} = \frac{Qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\vec{e}_r$$ 库仑定律

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



2. 点电荷系的电场强度



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

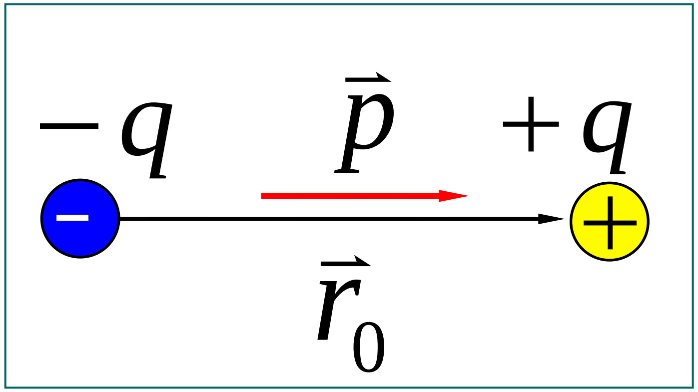
故 q_0 处总电场强度 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \sum_i \frac{\vec{F}_i}{q_0}$

电场强度的叠加原理

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

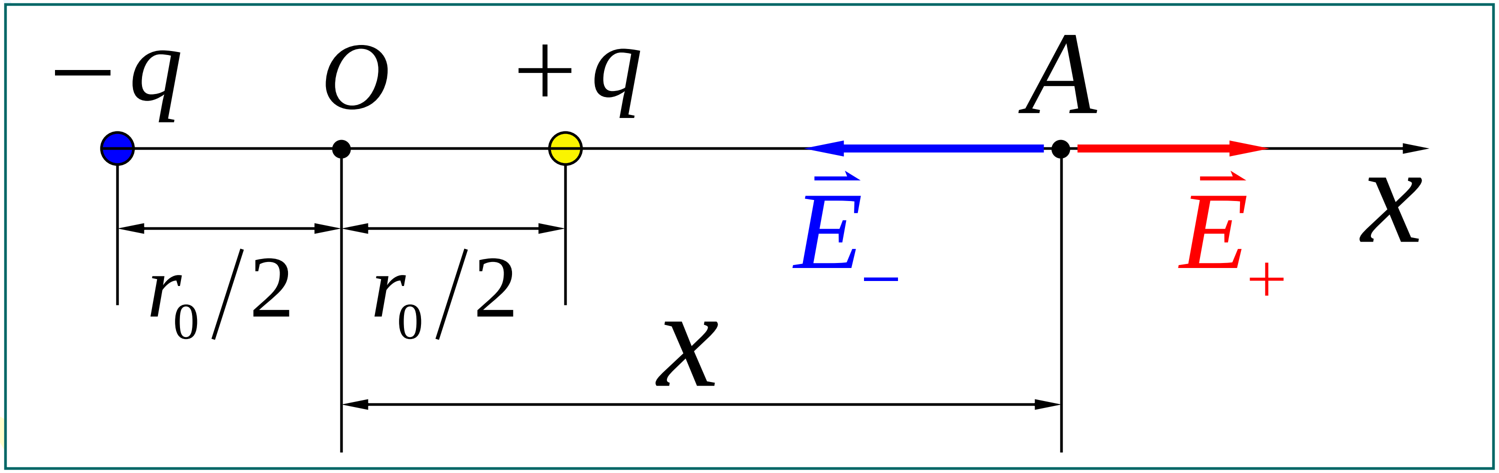
例 电偶极子的电场强度

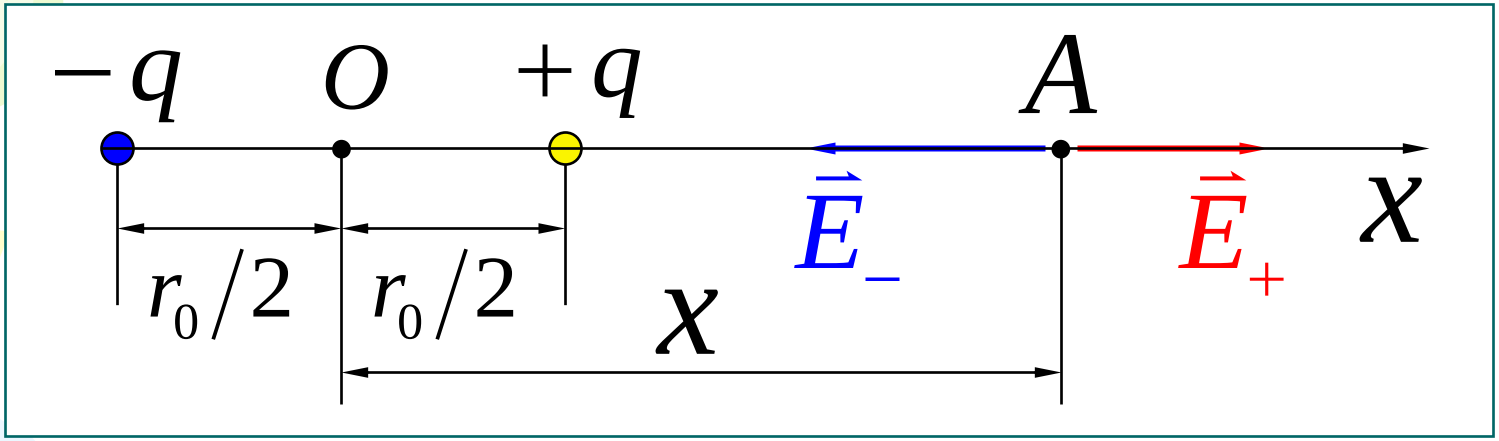
电偶极子的轴 $\vec{r}_0$



讨 论

电偶极子轴线延长线上一点的电场强度





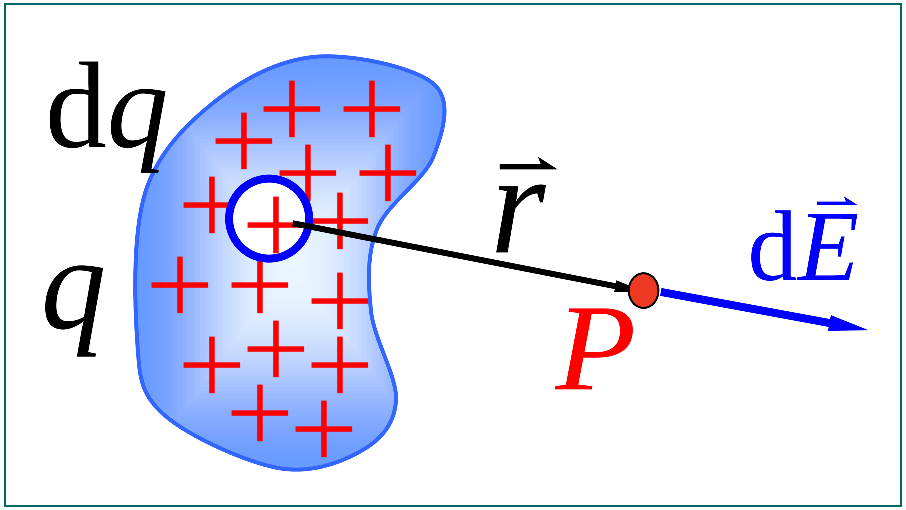
$$\vec{E}_+ = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(x-r_0/2)^2}\vec{i} \qquad \vec{E}_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(-q)}{(x+r_0/2)^2}\vec{i}$$

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

3. 电荷连续分布情况

① 取电荷元 $\mathrm{d}q$

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

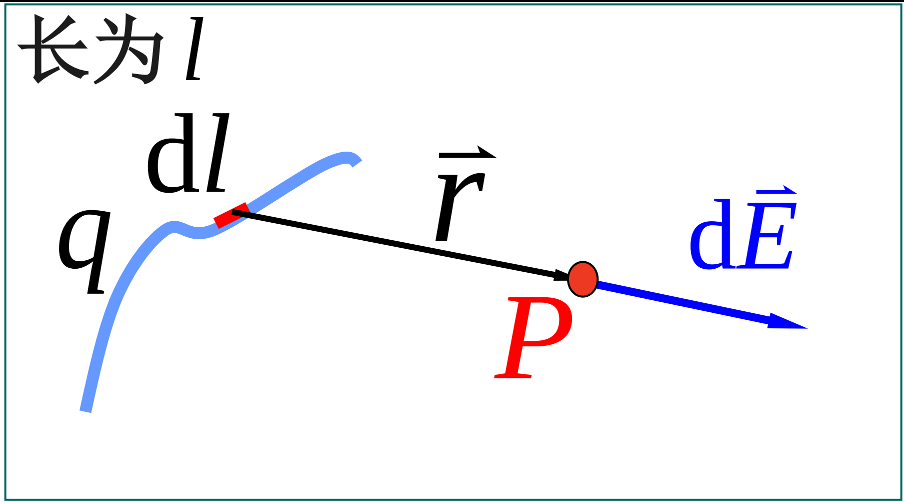


③ $\vec{E} = \int \mathrm{d}\vec{E} = \int \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\vec{e}_r}{r^2}\mathrm{d}q$

关键：$\mathrm{d}q$ 怎么取，怎样对 $\mathrm{d}\vec{E}$ 积分

连续分布电荷的电场强度：

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



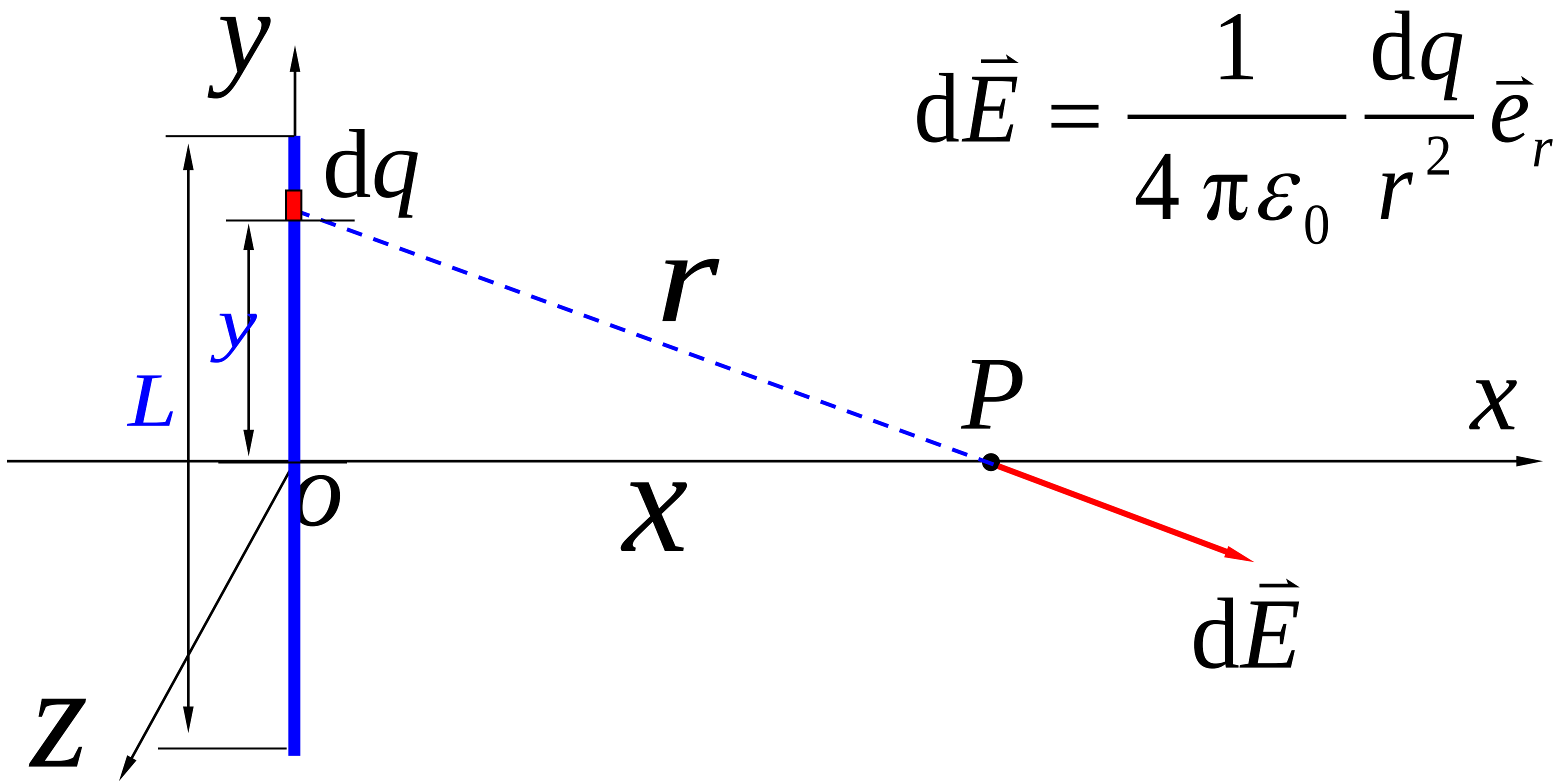
线状带电体

电荷线密度

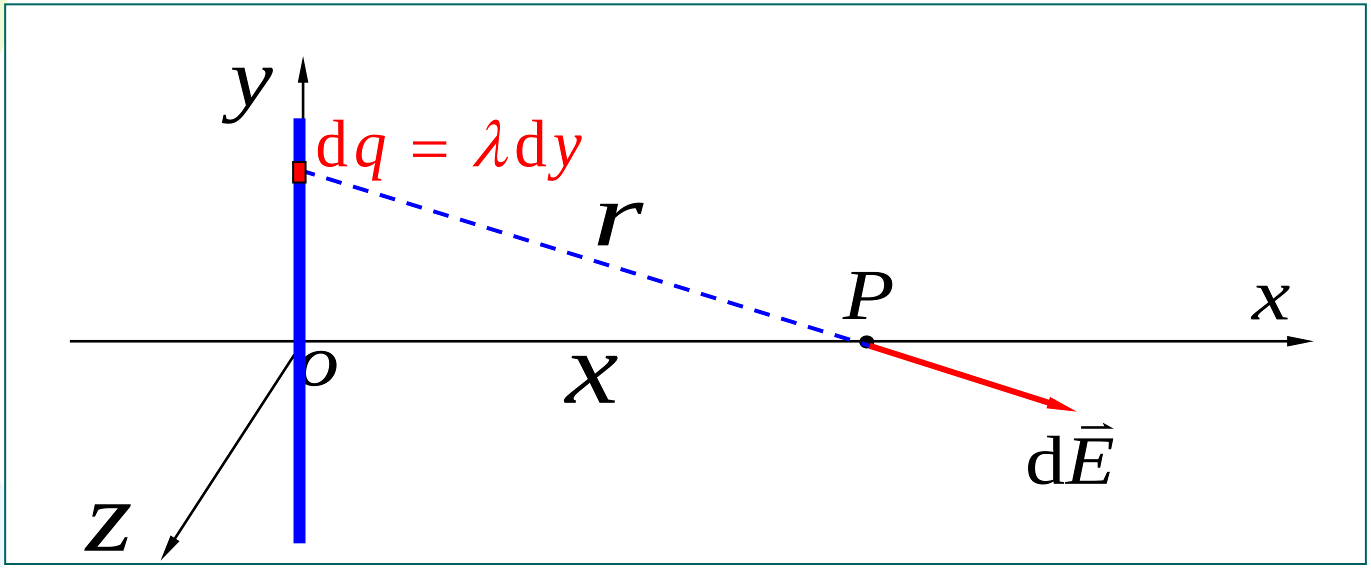
$$\lambda=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}l}=\frac{q}{L}$$

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

例1 一均匀带电直棒，线电荷密度为 λ ，求直线中垂线上任意一点的电场强度.

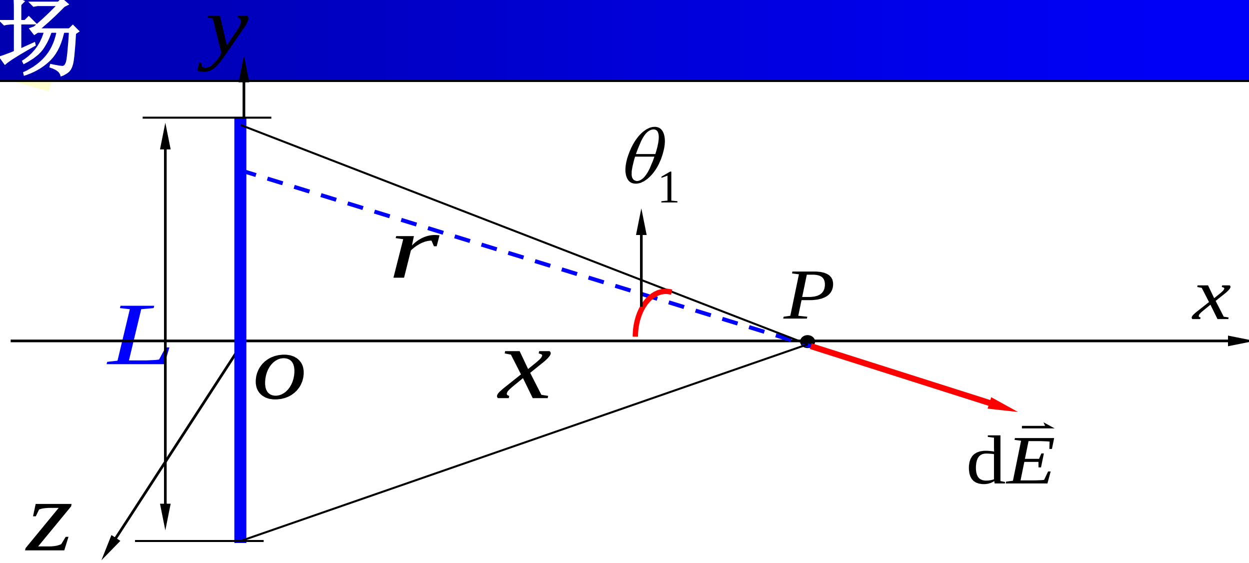


$$\mathrm{d}\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathrm{d}q}{r^2}\vec{e}_r$$



$$dq = \lambda dy \quad \mathrm{d}\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda \mathrm{d}y}{r^2}\vec{e}_r \Longrightarrow dE_x、dE_y$$

$$E = \int \mathrm{d}E \cdot \cos\theta = \int \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda \mathrm{d}y}{r^2} \cdot \cos\theta$$



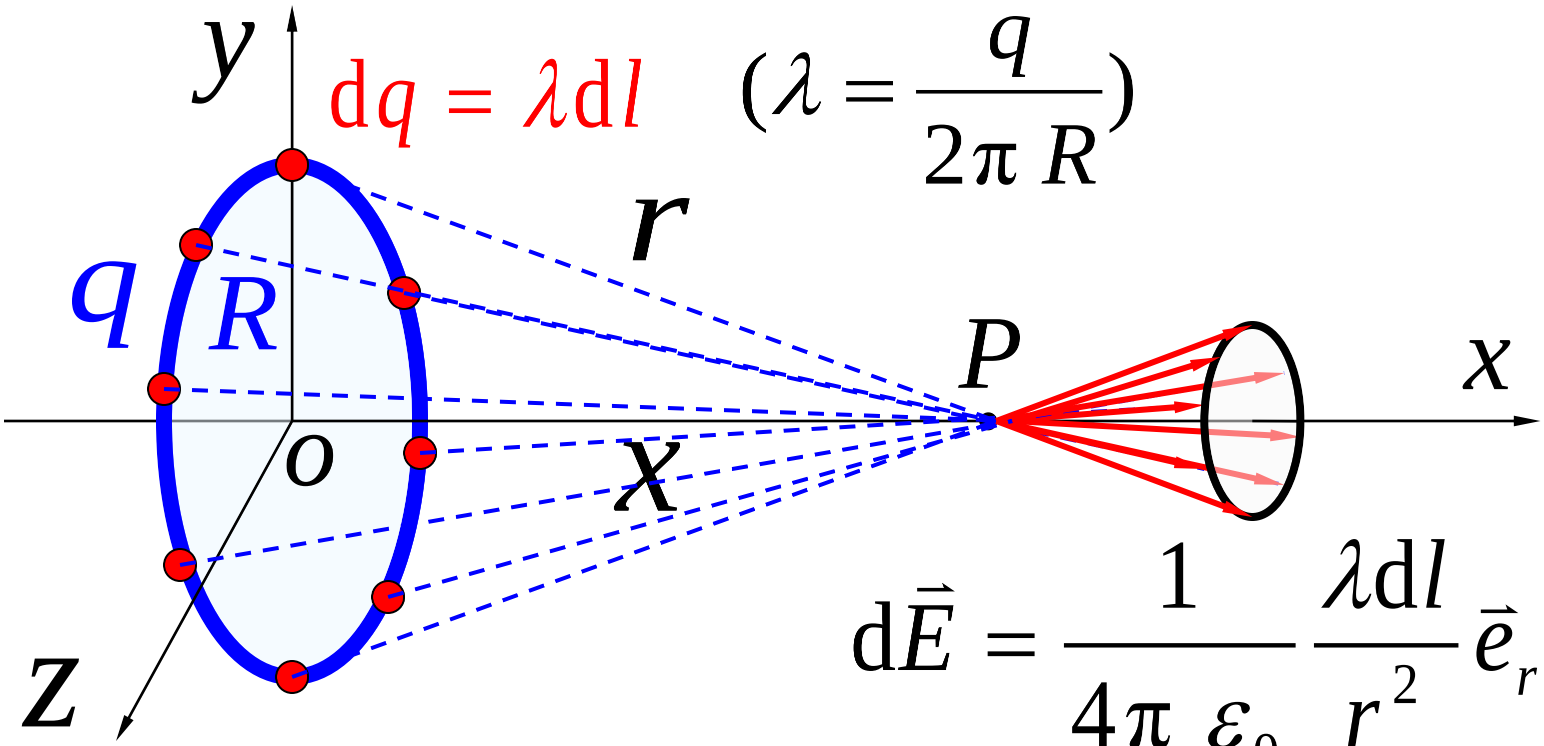
$$E=\int \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda \mathrm{d}y}{r^2}\cdot\cos\theta=\int_{-\theta_1}^{\theta_1}\frac{\lambda\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 x}\cdot d\theta$$

$$=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x}\cdot\sin\theta_1=\frac{\lambda\cdot L}{4\pi\varepsilon_0 x\left(x^2+L^2/4\right)^{1/2}}$$

讨论：若棒是无限长呢？

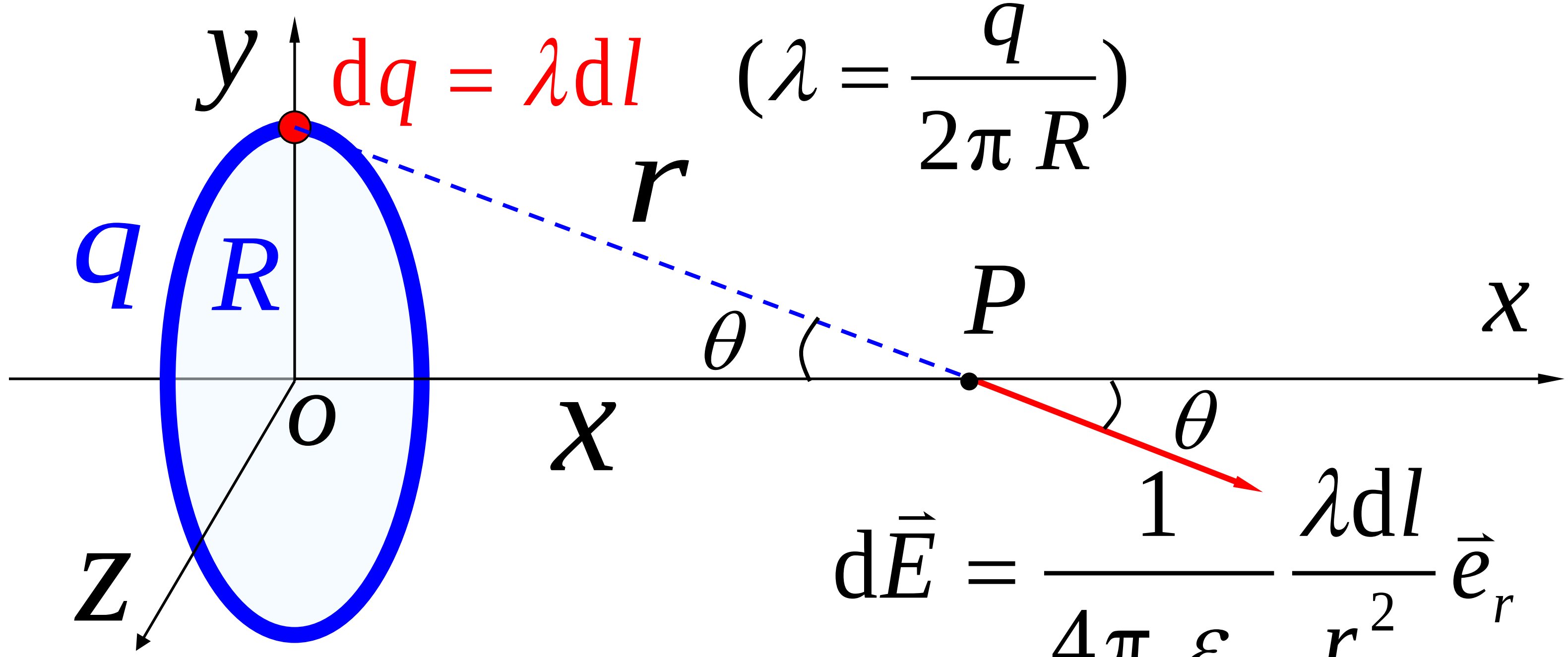
例2 正电荷 q 均匀分布在半径为 R 的圆环上. 计算在环的轴线上任一点 P 的电场强度.

解 $\vec{E}=\int \mathrm{d}\vec{E}$ 由对称性有 $\vec{E}=E_x\vec{i}$



$$\mathrm{d}q=\lambda \mathrm{d}l \quad (\lambda=\frac{q}{2\pi R})$$

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



$$\mathrm{d}q = \lambda \mathrm{d}l \qquad \left(\lambda = \frac{q}{2\pi R}\right)$$

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

$$E = \int_l \mathrm{d}E_x = \int_l \mathrm{d}E\cos\theta = \int_l \frac{\lambda \mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\frac{x}{r}$$

$$= \int_0^{2\pi R}\frac{x\lambda \mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^3} = \frac{qx}{4\pi\varepsilon_0 (x^2+R^2)^{3/2}}$$

解题步骤

1. 建立坐标系，选电荷元 $dq = \lambda dl$

2. 确定$d\vec{E}$ 的大小

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}$$

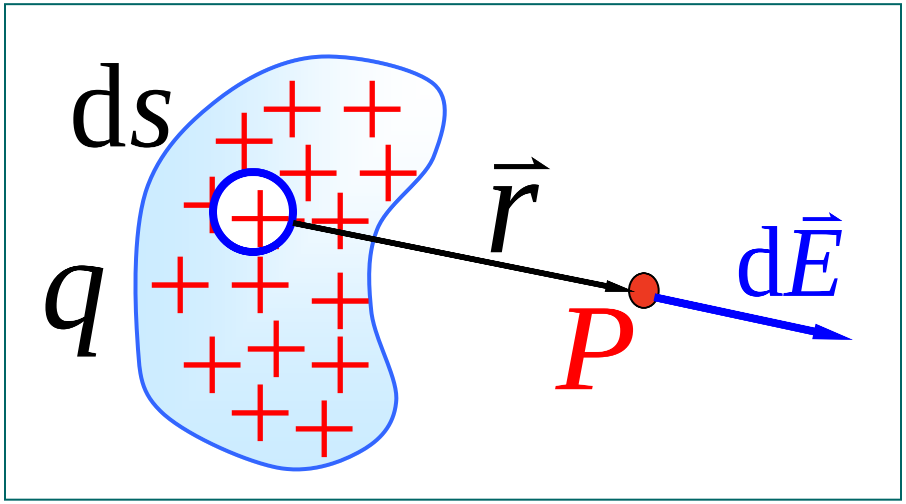
3. 确定$d\vec{E}$的方向

$$dE_x = dE\cos\theta \quad dE_y = dE\sin\theta$$

4. 选择积分变量，进行积分计算 $E = \int dE_x$

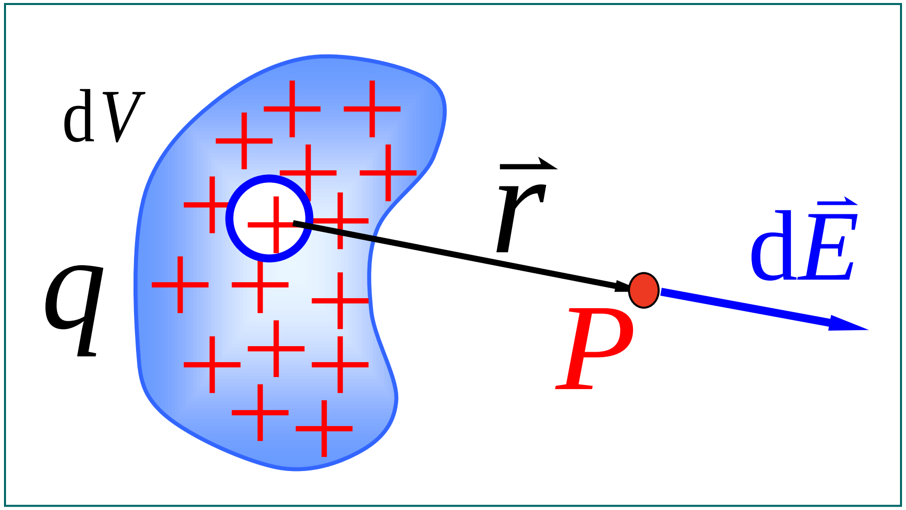
电荷面密度 $\sigma = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}s}$

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



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

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



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

<u>电荷元随不同的电荷分布应表达为</u>

线电荷 $\mathrm{d}q=\lambda \mathrm{d}l$

面电荷 $\mathrm{d}q=\sigma\, \mathrm{d}S$

体电荷 $\mathrm{d}q=\rho\, \mathrm{d}V$

例 均匀带电薄圆盘轴线上的电场强度.

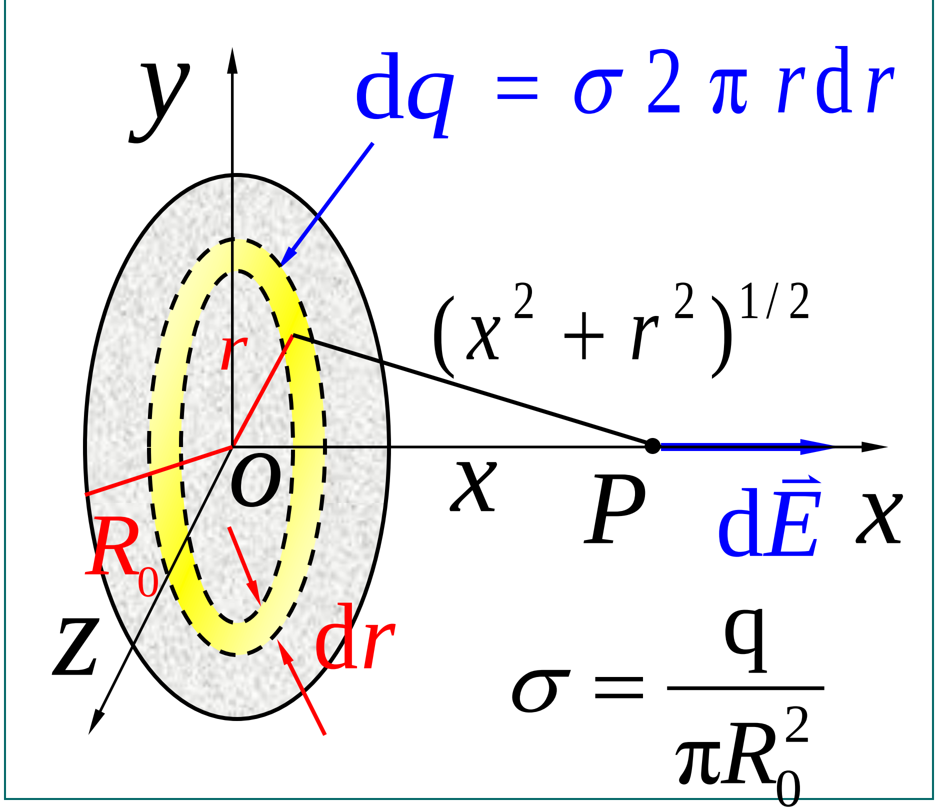
有一半径为 R_0，电荷均匀分布的薄圆盘，其电荷面密度为 σ． 求通过盘心且垂直盘面的轴线上任意一点处的电场强度.

解 由上例

$$E = \frac{\boxed{q}\,x}{4\pi\varepsilon_0 (x^2+r^2)^{3/2}}$$

$$\mathrm{d}E_x = \frac{\boxed{\mathrm{d}q}\cdot x}{4\pi\varepsilon_0 (x^2+r^2)^{3/2}}$$

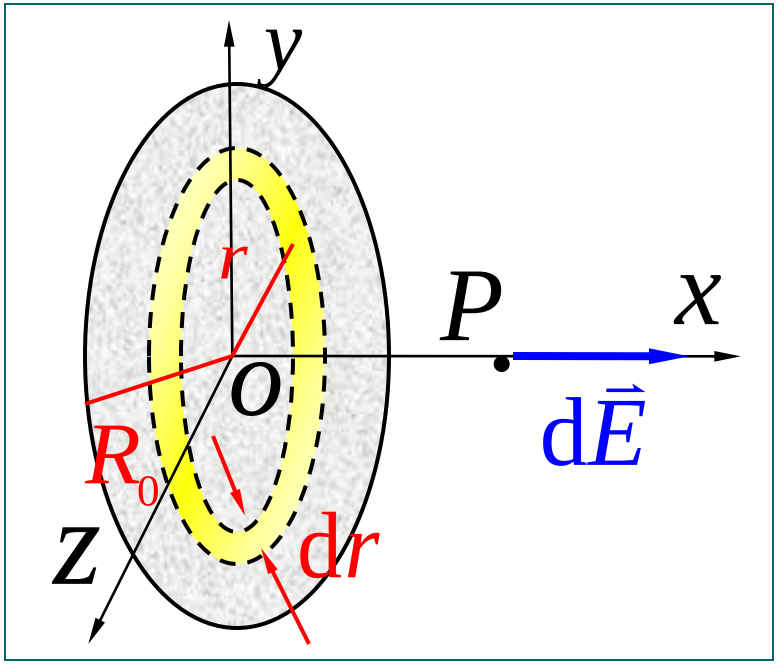
$$= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\frac{xr\mathrm{d}r}{(x^2+r^2)^{3/2}}$$



$$\mathrm{d}E_x = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \frac{x r \mathrm{d}r}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$E = \int \mathrm{d}E_x$$

$$= \frac{\sigma x}{2\varepsilon_0} \int_0^{R_0} \frac{r \mathrm{d}r}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

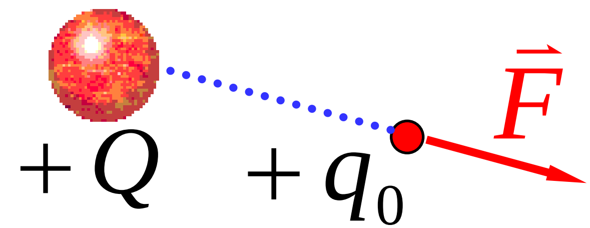


$$E = \frac{\sigma x}{2\varepsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + R_0^2}} \right) = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R_0^2}} \right)$$

小 结

电场强度 $\boxed{\vec{E}=\dfrac{\vec{F}}{q_0}}$ 物理意义，引入方法

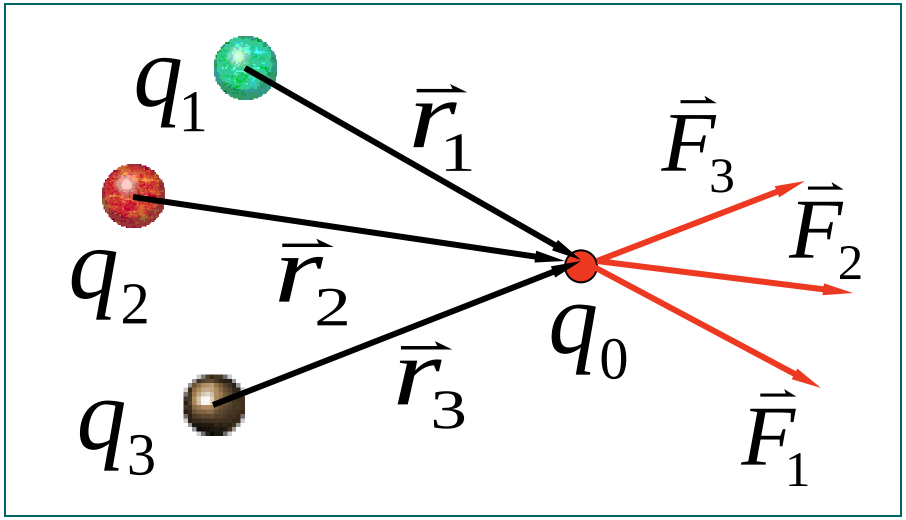
①点电荷： $\vec{E}=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q}{r^2}\vec{e}_r$



②点电荷系： $\boxed{\vec{E}=\sum_i \vec{E}_i}$ 电场强度的叠加原理

③连续分布电荷： $\vec{E}=\int \mathrm{d}\vec{E}=\int \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\vec{e}_r}{r^2}\mathrm{d}q$

2. 点电荷系的电场强度



点电荷 q_i 对 q_0 的作用力

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

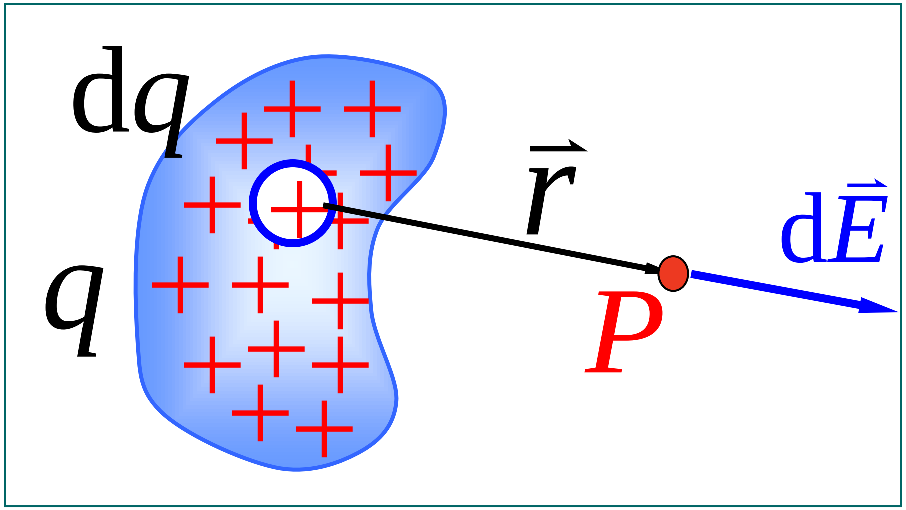
由力的叠加原理得 q_0 所受合力 $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$

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

电场强度的叠加原理

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

3. 电荷连续分布情况



① 取电荷元 $\mathrm{d}q$

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

③ $\vec{E}=\int \mathrm{d}\vec{E}=\int\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\vec{e}_r}{r^2}\mathrm{d}q$

关键：$\mathrm{d}q$ 怎么取，怎样对 $\mathrm{d}\vec{E}$ 积分

$dq=\lambda dl$

电荷面密度 $\sigma=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}s}$　　电荷体密度 $\rho=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}V}$

解题步骤

1. 建立坐标系，选电荷元 $dq = \lambda dl$

2. 确定 $d\vec{E}$ 的大小

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}$$

3. 确定 $d\vec{E}$ 的方向

$$dE_x = dE\cos\theta \quad dE_y = dE\sin\theta$$

4. 选择积分变量，进行积分计算 $E = \int dE_x$