欢迎大家来到
大学物理课堂！

李 渭

010-62795838

蒙民伟科技大楼南楼 **707**

weili83@mail.tsinghua.edu.cn

本学期教学内容

- 电磁学
- 光学 (波动光学)
- 量子物理

课程要求及目标：

掌握基本物理概念

学会主动处理、简化物理问题

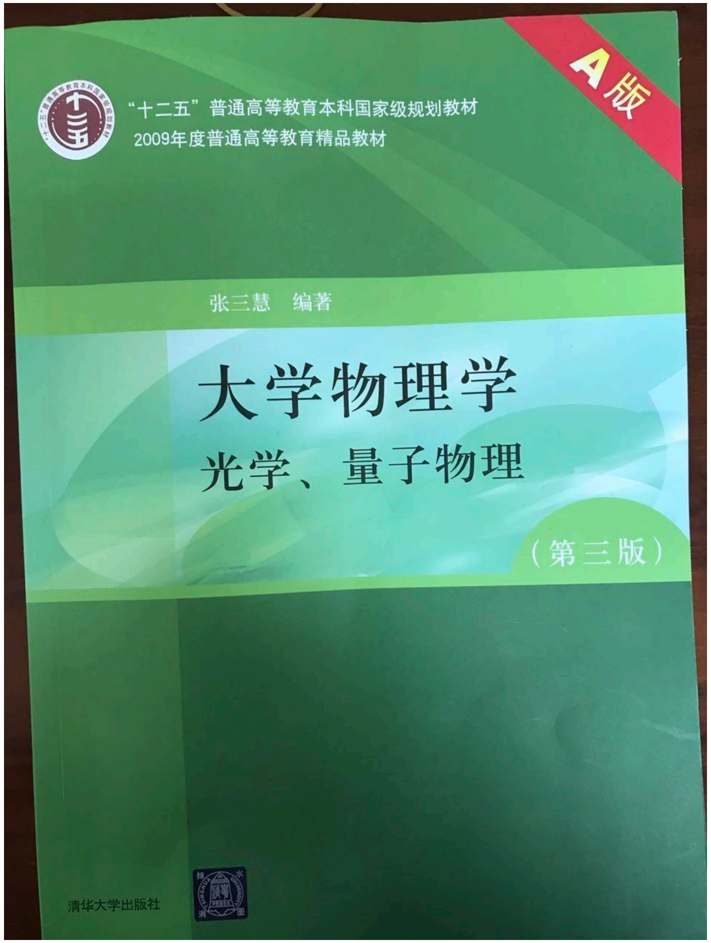
目标：“授人予鱼，不如授人予渔”

其他要求

- 请务必预习和复习，主动培养自学能力。
- 按时完成作业，不抄袭。
- 严守课堂纪律，不影响他人。

▲ 大学物理学《电磁学》张三慧 编

▲ 大学物理学《光学、量子物理》张三慧 编



成绩评定

作业	**10%**
期中考试	**～45%**
期末考试	**～45%**
小论文	**0－3**分
物理竞赛加分	特等奖 **10**分
	一等奖 **7**分
	二等奖 **5**分
	三等奖 **3**分
	未获奖但有非零分成绩 **1**分

作业

作业题号在每章结束后会出现在讲义里，每章结束后一周内交作业。

各班选派课代表或者自己交取作业。

地点：理科楼1楼大厅所属教师的作业柜（37，38）

作业成绩占学期总成绩的10%。

小论文

目的： 培养提出问题、独立思考、独立学习和研究问题的能力。

要求： 自由撰写，题目不限，内容最好是对有关教学内容的研究、探讨。文中要有自己的观点、见解或体会。

评审： 小论文要求高，评阅严，获得加分的人数一般不超过10％。

第15周星期四课堂上交。

感谢同学们的选择！让我们一起来体会物理学的美妙！

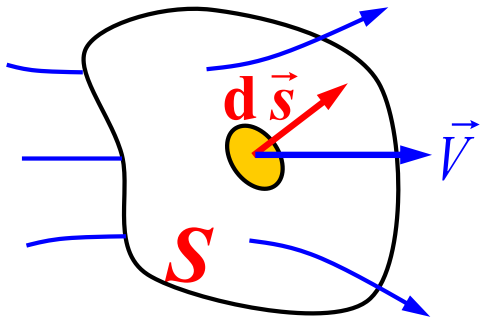
电磁学

李 渭

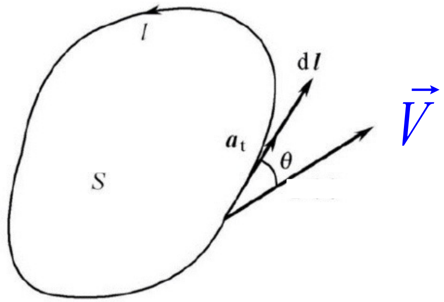
2024.09.10

描述河流的状态

通量

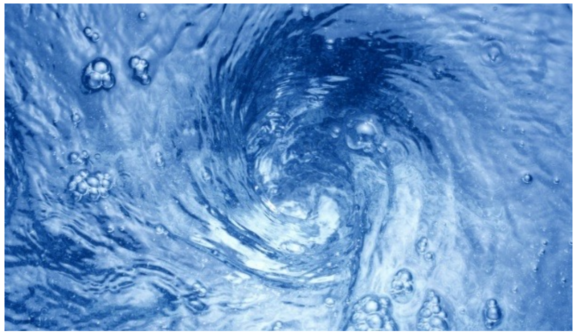


环量



$$\vec{v}(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t)$$

源



漩涡

电磁学研究电磁现象的基本概念和基本规律：

- 电荷、电流产生电场和磁场的规律；
- 电磁场对电荷、电流的作用；
- 电场和磁场的相互联系；
- 电磁场对物质的各种效应。

处理电磁学问题的基本观点和方法

- 观点：电磁作用是“场”作用（近距作用）
- 对象：弥散在空间的电磁场 — 场的分布

- 方法：基本实验规律（特殊） $\xrightarrow[\text{假设}]{\text{归纳}}$ 综合普遍规律（一般）

电磁学的教学内容：

- 静电场（真空、导体、电介质）
- 恒定电流场
- 静磁场（真空、磁介质）
- 电磁感应
- 电磁场与电磁波简介

第十二章 静电场

静电场 — 相对观测者静止的电荷产生的电场

第十二章 静电场

△ § 12.1 电荷、电荷守恒定律

△ § 12.2 库仑定律

△ § 12.3 电场和电场强度

§ 12.4 叠加法求场强

§ 12.5 电场线和电通量

§ 12.6 高斯定理

§ 12.7 高斯定理应用举例

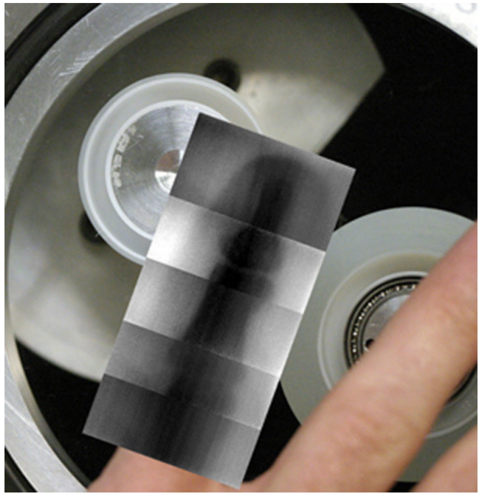
△§12.1 电荷、电荷守恒定律

- 电荷有两种　摩擦生电

  用丝绸摩擦过的玻璃棒带正电；

  用毛皮摩擦过的橡胶棒带负电。

- 电荷局域守恒



- 电荷量子化（charge quantization ）

1906-1917年，芝加哥大学物理学家Robert Millikan与其博士研究生Fletcher用液滴法首先从实验上证明了微小粒子带电量的变化不连续。

e=1.602176565（35） $\times 10^{-19}$ C 库仑

是一个电子或一个质子所带的电荷量。除了夸克以外，任何带电体所带电荷都是e的整数倍或者等于e。

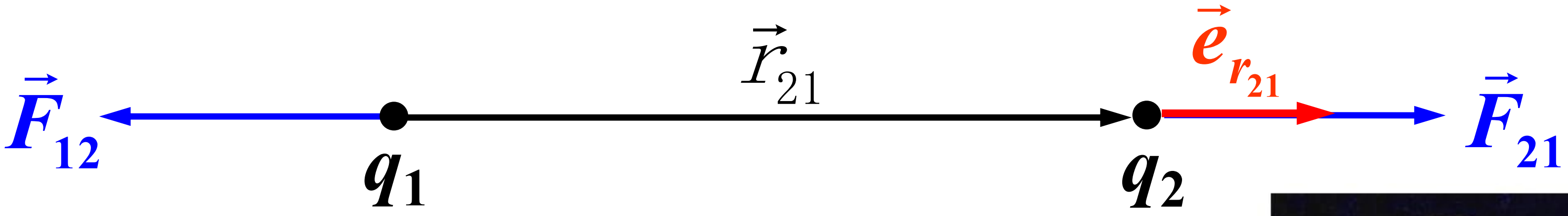
- 电量是相对论不变量

诺贝尔物理学奖(1923)

△ §12.1 电荷、电荷守恒定律

- 电荷的量子化
- 点电荷的概念
- 电荷守恒定律
- 电荷的相对论不变性

△ § 12.2 库仑定律



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

库伦

在真空中， 两个静止点电荷之间的相互作用力大小，与它们的电量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比；作用力的方向沿着它们的联线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。

库仑定律适用条件：

- 真空中点电荷间的相互作用；
- 施力电荷对观测者静止。

库仑定律的有理化：

引入常量： $\varepsilon_0 = \dfrac{1}{4\pi k} = 8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/N\cdot m^2}$

ε_0 — 真空介电常量

$$\boxed{\vec{F}_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{21}^2}\vec{e}_{r_{21}} = -\vec{F}_{12}}$$

库仑力与万有引力之比较

	库仑定律	万有引力定律
适用对象	点电荷	质点
力的性质	静电力或库仑力(电场力)	万有引力
力的方向	既有引力,也有斥力	仅有引力,没有斥力
表达式	$F = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$
表达式的相同点	都与距离的平方成反比	
表达式的不同点	与电荷量的乘积成正比	与质量的乘积成正比
比例系数	静电力常量 $k=9\times10^{9}\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$	引力常量 $G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$

△ § 12.3 电场和电场强度

实验上根据静止的检验电荷所受电场力定义：

电场强度 $$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}}$$

q_0 — 静止检验（点）电荷

$\vec{F}$ — 检验电荷所受电场力

场强叠加原理：

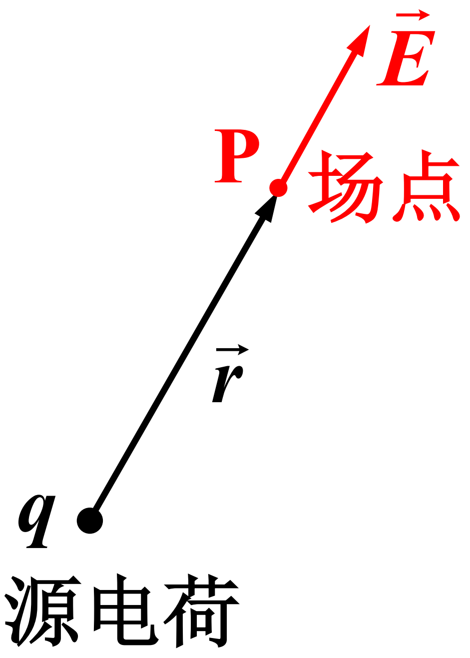
点电荷系产生的总场强等于每个点电荷单独存在时在场点产生的场强的叠加：

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

§ 12.4 叠加法求场强

库仑定律＋场强叠加原理 ⇒ 完备描述静电场

一. 点电荷的场强



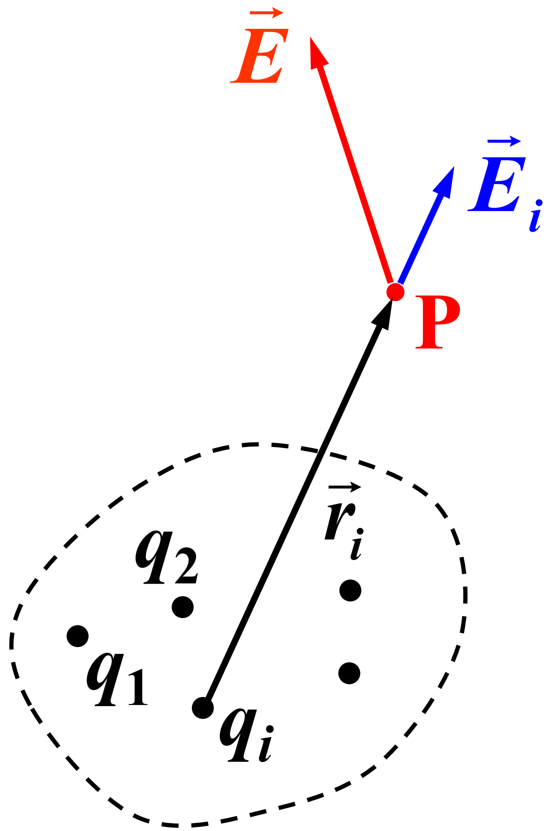
（相对观测者静止）

根据库仑定律和电场强度定义得：

$$\boxed{\vec{E}=\frac{q\,\vec{e}_r}{4\pi\varepsilon_0 r^2}}$$

场强分布特点： $E\propto\dfrac{1}{r^2}$

二. 点电荷系的场强



点电荷系

点电荷 q_i 的场强：

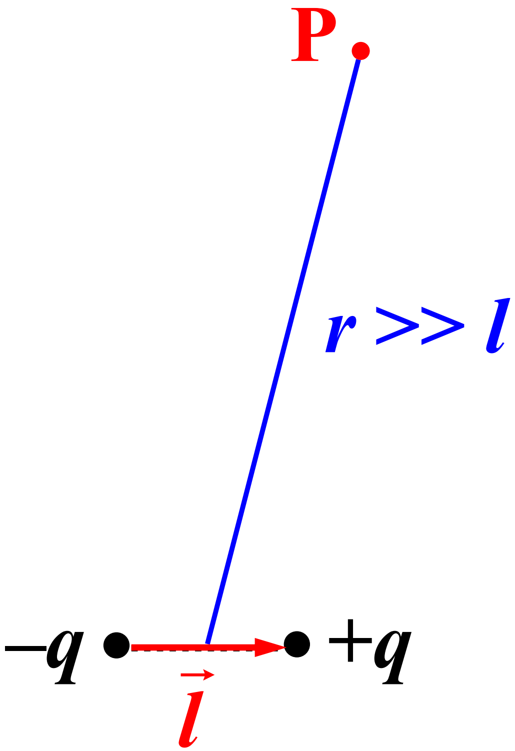
$$\vec{E}_i = \frac{q_i \vec{e}_{r_i}}{4\pi\varepsilon_0 r_i^2}$$

由叠加原理，点电荷系总场强：

$$\vec{E} = \sum_i \frac{q_i \vec{e}_{r_i}}{4\pi\varepsilon_0 r_i^2}$$

1. 电偶极子的场强

电偶极子： 由一对靠得很近的等量异号的点电荷构成的电荷系。



定义电偶极矩：

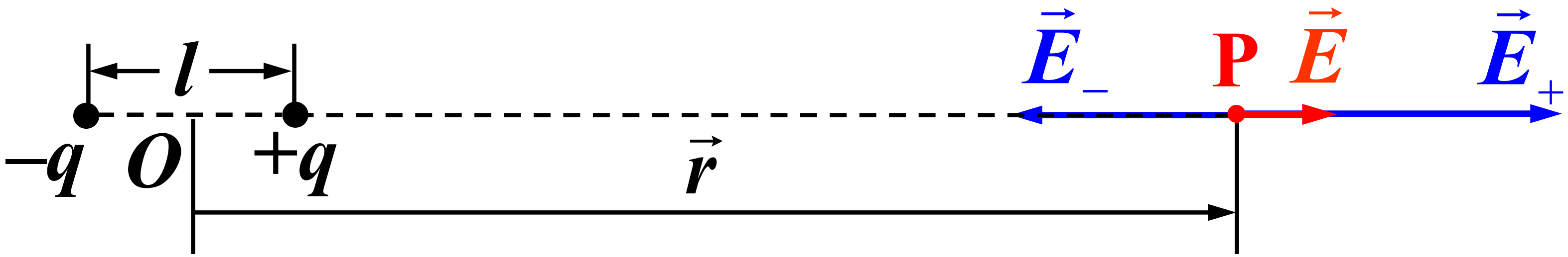
$$\boxed{\vec{p} = q\vec{l}}$$

$\vec{l}$ 是 $+q$ 相对 $-q$ 的位矢

电偶极子概念适用于下面情形：

场点距离 $r >> $ 电偶极子线度 l

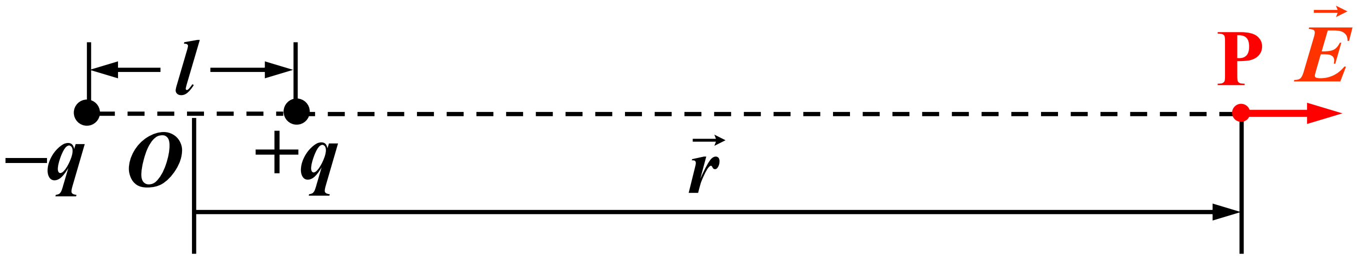
▲ 轴线上的场强



$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q\vec{e}_r}{(r-\frac{l}{2})^2} + \frac{-q\vec{e}_r}{(r+\frac{l}{2})^2}\right]$$

$r >> l$ 时：

$$\frac{1}{(r\mp\frac{l}{2})^2} = \frac{1}{r^2}(1\mp\frac{l}{2r})^{-2} \approx \frac{1}{r^2}(1\pm\frac{l}{r})$$

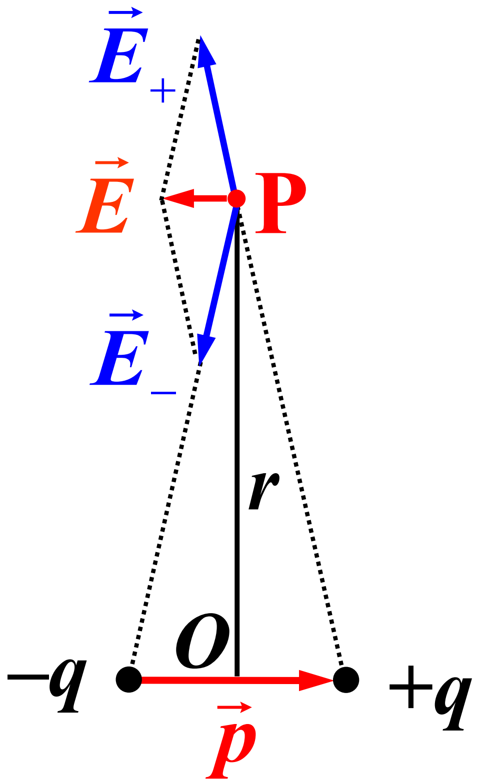


$$\vec{E}=\frac{q\vec{e}_r}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{r^2}\left[\left(1+\frac{l}{r}\right)-\left(1-\frac{l}{r}\right)\right]=\frac{2\vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

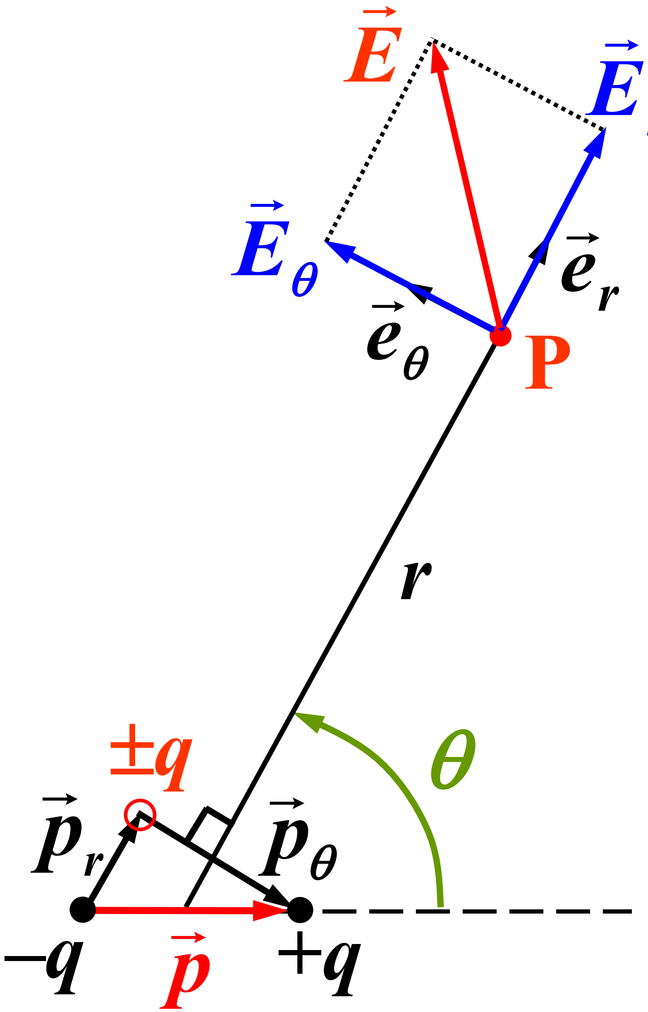
▲ 中垂线上的场强

参考书上例题：

$$\vec{E}=-\frac{\vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$



▲ 一般情况的场强

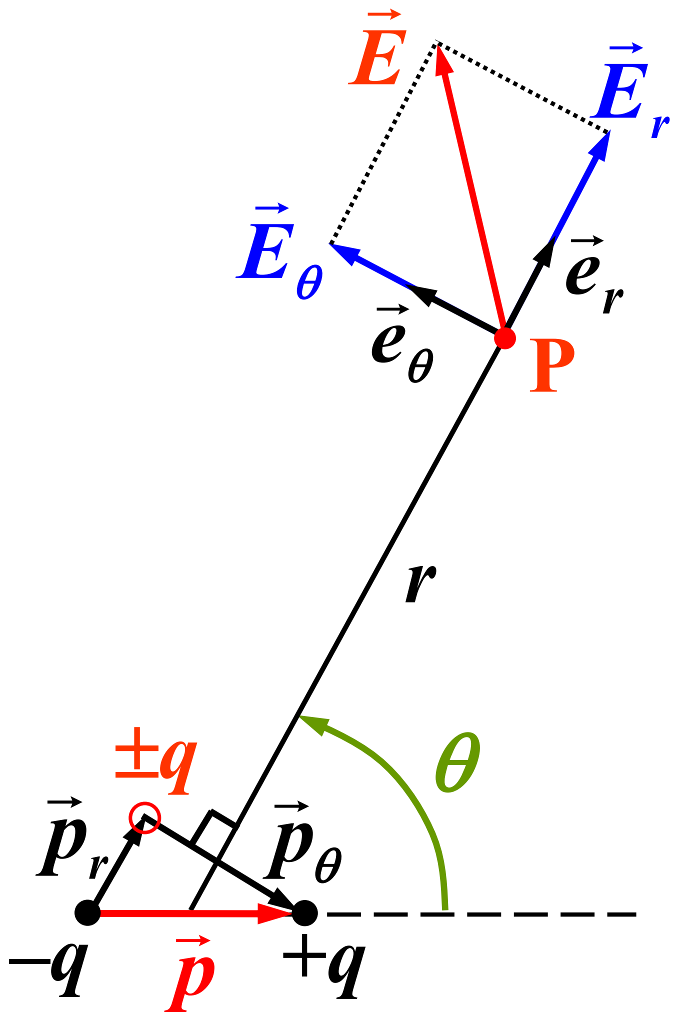


$$\vec{E}=\vec{E}_r+\vec{E}_\theta$$

$$=\frac{2\vec{p}_r}{4\pi\varepsilon_0 r^3}+\frac{-\vec{p}_\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

$$=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(3\vec{p}_r-\vec{p})$$

$$\boxed{\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\left[\frac{3(\vec{r}\cdot\vec{p})\vec{r}}{r^2}-\vec{p}\right]}$$



$$\vec{E}=\frac{2\vec{p}_r}{4\pi\varepsilon_0 r^3}+\frac{-\vec{p}_\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

$$=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^3}[2p\cos\theta\cdot\vec{e}_r+p\sin\theta\cdot\vec{e}_\theta]$$

$$E=\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\cdot\sqrt{3\cos^2\theta+1}$$

电偶极子场强分布特点：$E\propto\dfrac{1}{r^3}$

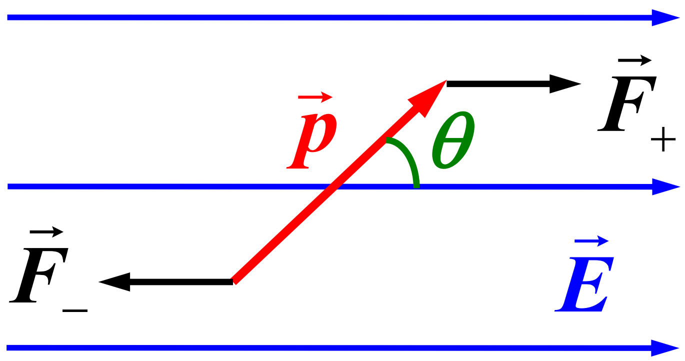
电偶极子的 q 和 $\vec{l}$ 作为整体影响远处电场。

▲ 电偶极子在均匀外电场中所受力矩

$$F_+ = qE, \quad F_- = -qE,$$

电偶极子受力偶矩作用：

（力偶矩与参考点无关）



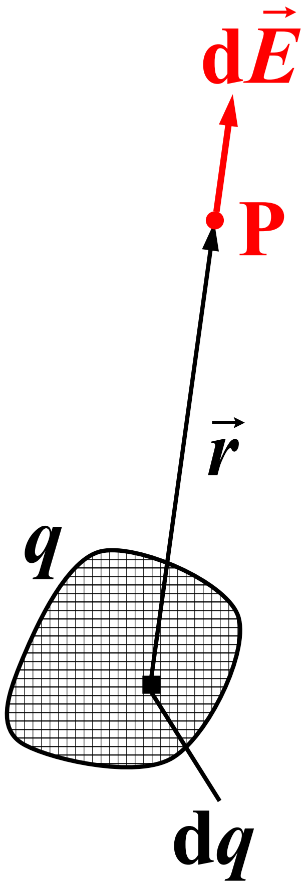
$$M = qEl\sin\theta = pE\sin\theta$$

$$\boxed{\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}}$$

力矩会使电偶极子 $\vec{p}$ 的空间取向尽量保持与外电场 $\vec{E}$ 的方向一致。

三. 连续带电体的场强

将带电体分割成无限多的小电荷元：



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

体电荷元 $\mathrm{d}q=\rho\,\mathrm{d}v$

ρ：体电荷密度

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

σ：面电荷密度

线电荷元 $\mathrm{d}q=\lambda\,\mathrm{d}l$

λ：线电荷密度

【演示】

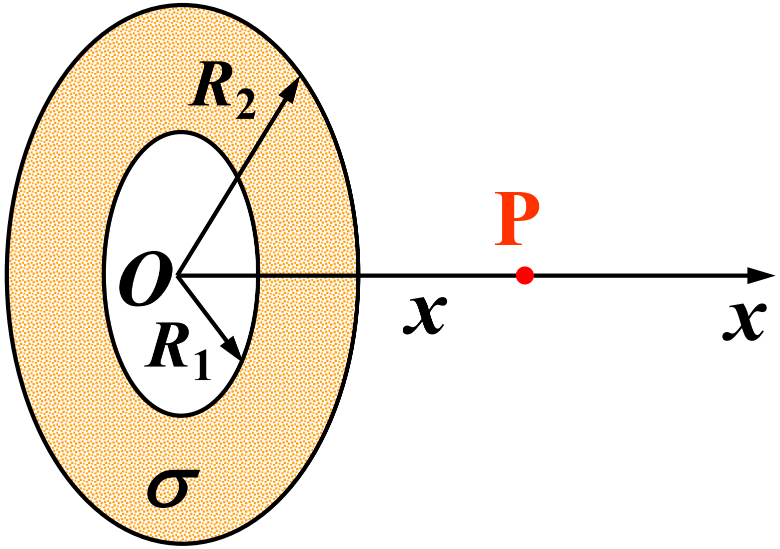
静电跳球

静电摆球

电场激发日光灯起辉

【例】已知：均匀带电环面的σ，R_1，R_2

求：轴线上的场强$\vec{E}$

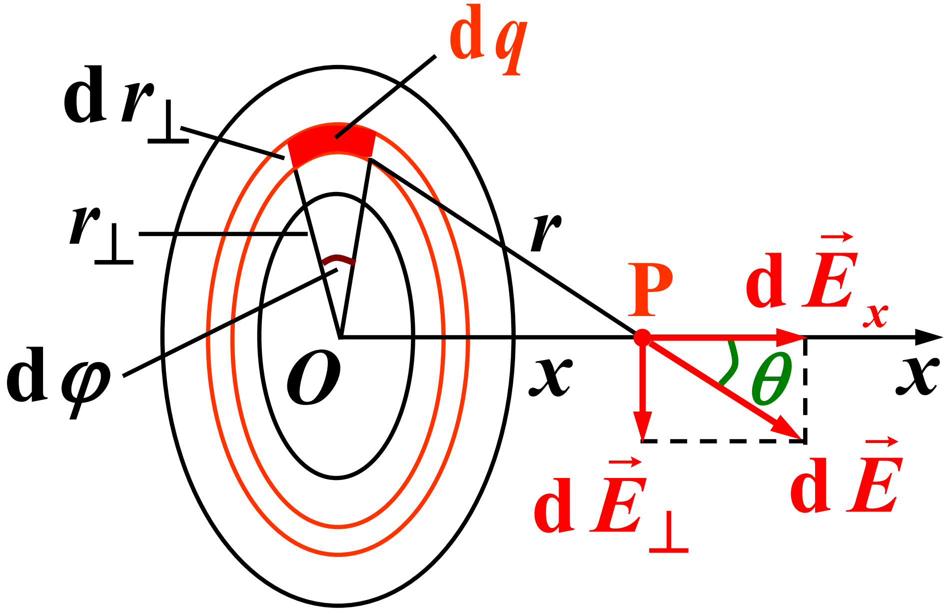


解：▲ 划分电荷元

$$\mathrm{d}q=\sigma\,\mathrm{d}s$$

$$=\sigma\, r_\perp\,\mathrm{d}r_\perp\cdot\mathrm{d}\varphi$$

▲ $\vec{E}$ 的分布特点



$$\mathrm{d}E_x=\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\cos\theta$$

$$\mathrm{d}E_\perp=\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\sin\theta$$

▲ 积分求 $\vec{E}$

$$\vec{E} = \int_q \mathrm{d}\vec{E} = \int_q \mathrm{d}\vec{E}_x + \int_q \mathrm{d}\vec{E}_\perp = \vec{i}\int_q \mathrm{d}E_x = E_x\vec{i}$$

$$E_x = \int_q \frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\cos\theta = \int_0^{2\pi}\int_{R_1}^{R_2} \frac{\sigma r_\perp \mathrm{d}r_\perp \mathrm{d}\varphi}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\frac{x}{r}$$

$$= \frac{2\pi\sigma}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\int_{R_1}^{R_2}\frac{r_\perp\cdot\mathrm{d}r_\perp}{(x^2+r_\perp^2)}\cdot\frac{x}{\sqrt{x^2+r_\perp^2}}$$

$$= \frac{\sigma x}{2\varepsilon_0}\cdot\left[\frac{1}{\sqrt{x^2+R_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2+R_2^2}}\right]$$

▲ 验结果

$$\vec{E}=\frac{\sigma x}{2\varepsilon_0}\cdot[\frac{1}{\sqrt{x^2+R_1^2}}-\frac{1}{\sqrt{x^2+R_2^2}}]\cdot\vec{i}$$

- 量纲正确；
- $x=0$ 处 $\vec{E}=0$，正确；
- 当 $x>>R_2$ 时：

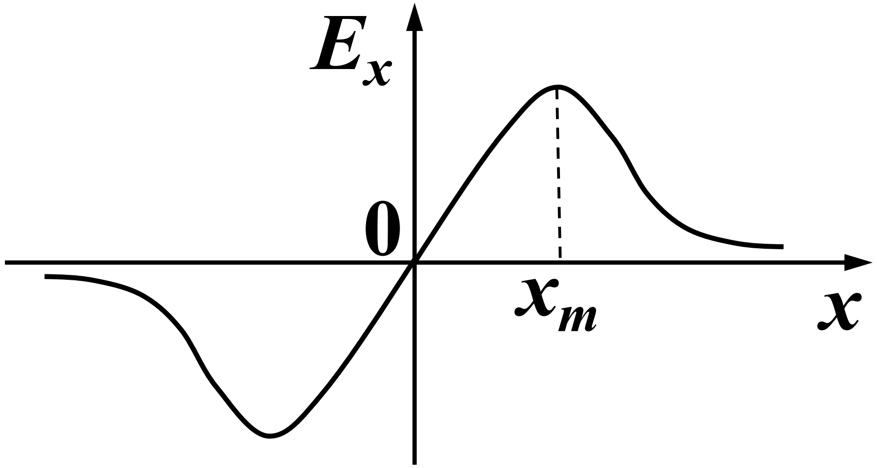
$$\frac{1}{\sqrt{x^2+R^2}}=\frac{1}{x\sqrt{1+R^2/x^2}}=\frac{1}{x}(1+\frac{R^2}{x^2})^{-\frac{1}{2}}\approx\frac{1}{x}(1-\frac{R^2}{2x^2})$$

$$E_x\approx\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\cdot\frac{R_2^2-R_1^2}{2x^2}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}\propto\frac{1}{x^2},$$ 合理。

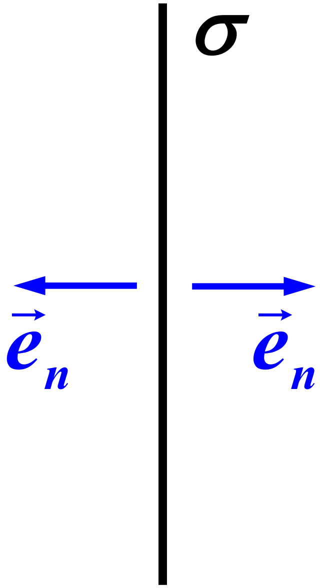
▲ 结果讨论

- E 的分布

  x_m 自己计算。



- $R_1 \to 0$，$R_2 \to \infty$，成无限大均匀带电平面

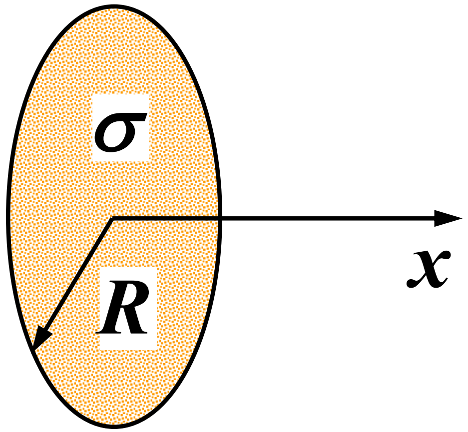


$$\boxed{\vec{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\vec{e}_n}$$

大小：常量 $\left|\sigma/2\varepsilon_0\right|$

方向：两侧相反

- $R_1 \to 0$，$R_2 = R$，变成均匀带电圆盘



$$E_x = \frac{\sigma x}{2\varepsilon_0}\left[\frac{1}{|x|} - \frac{1}{\sqrt{x^2+R^2}}\right]$$

$$= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\cdot\frac{x}{|x|}\left[1 - \frac{|x|}{\sqrt{x^2+R^2}}\right]$$

【思考】 x 轴上 $E=?$

场点距离 >> 电荷线度，E的 特点？

挖一圆孔的无限大均匀带电平面