

فصل ۱۸ - میدان الکتریکی

- (۱) مقدمه
- (۲) میدان الکتریکی
- (۳) خطوط نیرو
- (۴) محاسبه میدان الکتریکی ناشی از یک بار نقطه ای
- (۵) بار نقطه ای در میدان الکتریکی
- (۶) دوقطبی در میدان الکتریکی

میدانهای الکتریکی



تولید مثل بسیاری از گلها به حشراتی بستگی دارد که گردهها را از یک گل به گل دیگر انتقال می دهند. زنبورهای عسل عموماً این کار را به هنگام برخورد با گلها جهت جمع آوری شهد گل انجام می دهند. ولی گردهها، مانند ذره های غباری که از یک سطح گرد و خاکی زده می شوند، از روی گل پاک نمی شوند. بلکه گردهها از گل به زنبور منتقل می شوند و در ضمن پرواز به گل بعدی به زنبور و پس از پرش به گل بعد به آن می چسبند. چه چیزی موجب می شود که گرده ابتدا به زنبور بچسبد و سپس از آن جدا شود؟

مقدمه

از فیزیک فصل گذشته آموختیم که چگونه نیروی الکتریکی وارد بر ذره ۱ با بار $+q_1$ را که در نزدیکی ذره ۲ با بار $+q_2$ قرار گرفته است، محاسبه کنیم. با این حال هنوز یک پرسش آزار دهنده باقی است: ذره ۱ چگونه از حضور ذره ۲ «باخبر» می‌شود؟ یعنی وقتی ذره‌ها در تماس با یکدیگر نیستند چگونه ذره ۲ می‌تواند بر ذره ۱ نیرو وارد کند؟ - چگونه چنین کنش از راه دوری می‌تواند بدون هیچ ارتباط قابل مشاهده‌ای بین ذره‌ها، وجود داشته باشد؟

بر اساس
چه
مکانیسمی
دو ذره
بارداری که
با هم
تماسی
ندارند می
توانند بر هم
نیرو وارد
کنند؟

یک هدف فیزیک گزارش مشاهده‌هایی درباره دنیای ما، از قبیل بزرگی و جهت نیروی وارد بر ذره ۱ است. هدف دیگر فیزیک ارائه توضیحی عمیقتر از آن چیزی است که گزارش شده است. یکی از هدفهای این فصل، ارائه چنین توضیح ژرفتری به

پرسشهای آزار دهنده ما درباره نیروی الکتریکی در یک مسافت است. این پرسشها را با این گفته می توان پاسخ داد که ذره ۲ یک میدان الکتریکی در فضای اطراف خود ایجاد می کند. اگر ذره ۱ را در هر نقطه ای از این فضا قرار دهیم، این ذره به آن دلیل از وجود ذره ۲ «باخبر» می شود که تحت تأثیر میدان الکتریکی ذره ۲ که پیشتر در آن نقطه ایجاد شده است، قرار می گیرد. بنابراین، ذره ۲ نه با تماس با ذره ۱، بلکه به وسیله میدان الکتریکی ایجاد شده در اطراف خود بر ذره ۱ نیرو وارد می کند.

هدف ما در این فصل، تعریف میدان الکتریکی و بحث درباره چگونگی محاسبه آن برای آرایشهای مختلف ذره های باردار است.

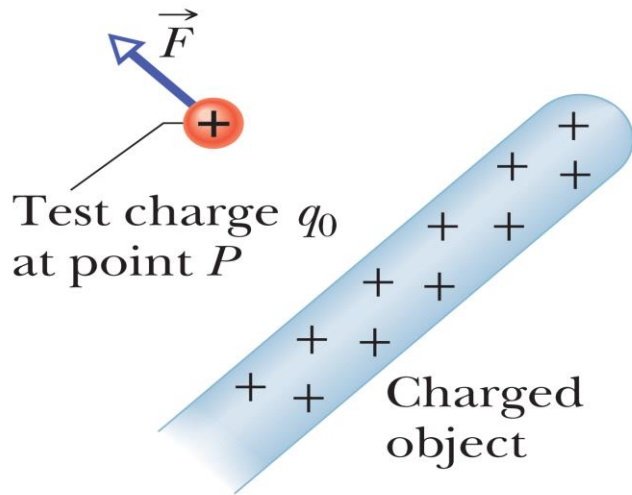
میدان الکتریکی

دما در هر نقطه‌ای از اتاق، مقدار معینی دارد. دمای هر نقطه یا مجموعه‌ای از نقطه‌های معین را می‌توان با قراردادن دماسنجی در آنجا اندازه گرفت. این توزیع حاصل از دماها را میدان دما می‌نامیم. تقریباً به همین روش می‌توان یک میدان فشار در جو زمین تصور کرد؛ این میدان شامل توزیع مقدارهای فشار هواست، که هر یک مربوط به نقطه‌ای در جو است. چون دما و فشار هوا کمیت‌هایی نرده‌ای‌اند، این دو مثال نمونه‌هایی از میدانهای نرده‌ای هستند.

میدان الکتریکی، یک میدان برداری است؛ این میدان شامل توزیعی از بردارهاست، که هر یک مربوط به نقطه‌ای در فضای پیرامون جسم باردار، مثلاً یک میله باردار، است. اصولاً میدان الکتریکی را می‌توانیم در هر نقطه‌ای نزدیک جسم باردار، مانند نقطه P در شکل ۱-۱۸ الف، چنین تعریف کنیم: ابتدا بار مثبت

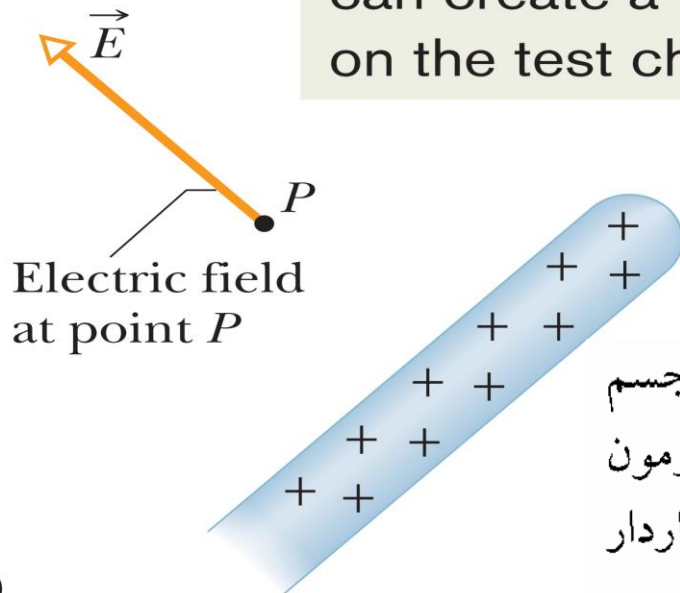
مفهوم
میدان دما،
فشار و
میدان
الکتریکی

تعریف
میدان
الکتریکی
بر اساس
شکل ۱-۱۸



(a)

The rod sets up an electric field, which can create a force on the test charge.



(b)

شکل ۱۸-۱ (الف) بار آزمون مثبت q_0 در نقطه P ، نزدیک یک جسم باردار قرار داده شده است. نیروی الکتروستاتیکی \vec{F} بر این بار آزمون اثر می‌کند. (ب) میدان الکتریکی \vec{E} در نقطه P توسط جسم باردار ایجاد شده است.

q ، به نام بار آزمون، را در نقطه مورد نظر قرار می‌دهیم. سپس نیروی الکتروستاتیکی \vec{F} را که بر آن بار آزمون اثر می‌کند اندازه می‌گیریم. سرانجام، میدان الکتریکی \vec{E} حاصل از جسم باردار را در نقطه P چنین تعریف می‌کنیم

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (\text{میدان الکتریکی}) \quad (1-18)$$

بنابراین، بزرگی میدان الکتریکی \vec{E} در نقطه P برابر با $E = F / q_0$ ، و جهت \vec{E} در همان جهت نیروی \vec{F} است که بر بار آزمون مثبت وارد می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱-۱۸ ب نشان داده شده است، میدان الکتریکی در نقطه P را با برداری که انتهای آن در P است نمایش می‌دهیم. برای تعیین میدان الکتریکی در داخل هر ناحیه، باید آن را به همین ترتیب برای کلیه نقطه‌های آن ناحیه معین کرد.

یکای SI میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن (N/C) است. جدول ۱-۱۸ میدانهای الکتریکی مربوط به چند وضعیت فیزیکی را نشان می‌دهد.

تعیین
بزرگی و
جهت
میدان؟

جدول ۱-۱۸

چند میدان الکتریکی

مقدار (N/C)	مکان یا وضعیت میدان
3×10^{21}	در سطح هسته اورانیوم داخل اتم هیدروژن، در
5×10^{11}	شعاع $5/29 \times 10^{-11} \text{m}$ فروشکست الکتریکی که
3×10^6	در هوا رخ می دهد در نزدیکی غلتک باردار
10^5	دستگاه فتوکپی
10^3	نزدیک یک شانه باردار
10^2	در سطحهای پایینی جوزمین
10^{-2}	داخل سیم مسی مدارهای خانه

اگر چه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بارآزمون مثبت استفاده می‌شود، ولی وجود میدان مستقل از بارآزمون است. میدان الکتریکی در نقطه P در شکل ۱-۱۸ ب هم پیش از قراردادن بار آزمون شکل ۱-۱۸ ب و هم پس از آن وجود داشته است (فرض می‌کنیم که در روش تعریف ما، از میدان، حضور بار آزمون هیچ تأثیری بر توزیع بار روی جسم ندارد، و بنابراین، میدان الکتریکی تعریف شده ما را تغییر نمی‌دهد).

آیا وجود
میدان
ارتباطی با
بار آزمون
دارد؟

برای مطالعه نقش میدان الکتریکی در برهم‌کنش میان جسمهای باردار، باید دو کار انجام دهیم: (۱) محاسبه میدان الکتریکی ایجاد شده توسط یک توزیع معین بار، و (۲) محاسبه نیرویی که یک میدان معین بر باری که در آن قرار داده شده است، وارد می‌کند. کار اول را در بخشهای ۴-۱۸ تا ۷-۱۸ برای چندین توزیع بار و کار دوم را در بخشهای ۸-۱۸ و ۹-۱۸ با در نظر گرفتن یک بار نقطه‌ای و یک جفت بار نقطه‌ای در یک میدان الکتریکی انجام می‌دهیم. ولی، پیش از آن، درباره راهی برای تجسم میدانهای الکتریکی بحث می‌کنیم.

دو کار مهم
در مطالعه
نقش میدان
برهم‌کنش
بین
جسمهای
باردار؟

خطوط نیرو

مایکل فارادی^۱، کسی که اندیشه میدانهای الکتریکی را در قرن نوزدهم میلادی مطرح کرد، براین باور بود که فضای اطراف یک جسم باردار با خطهای نیرو پر شده است. اگر چه دیگر برای این خطها، که امروزه به نام میدان الکتریکی خوانده می‌شوند، واقعیت زیادی قائل نیستیم، ولی با این حال آنها هنوز هم روش مناسبی برای تجسم نقشها در میدانهای الکتریکی به شمار می‌آیند.

راهی برای
تجسم میدان
های
الکتریکی؟

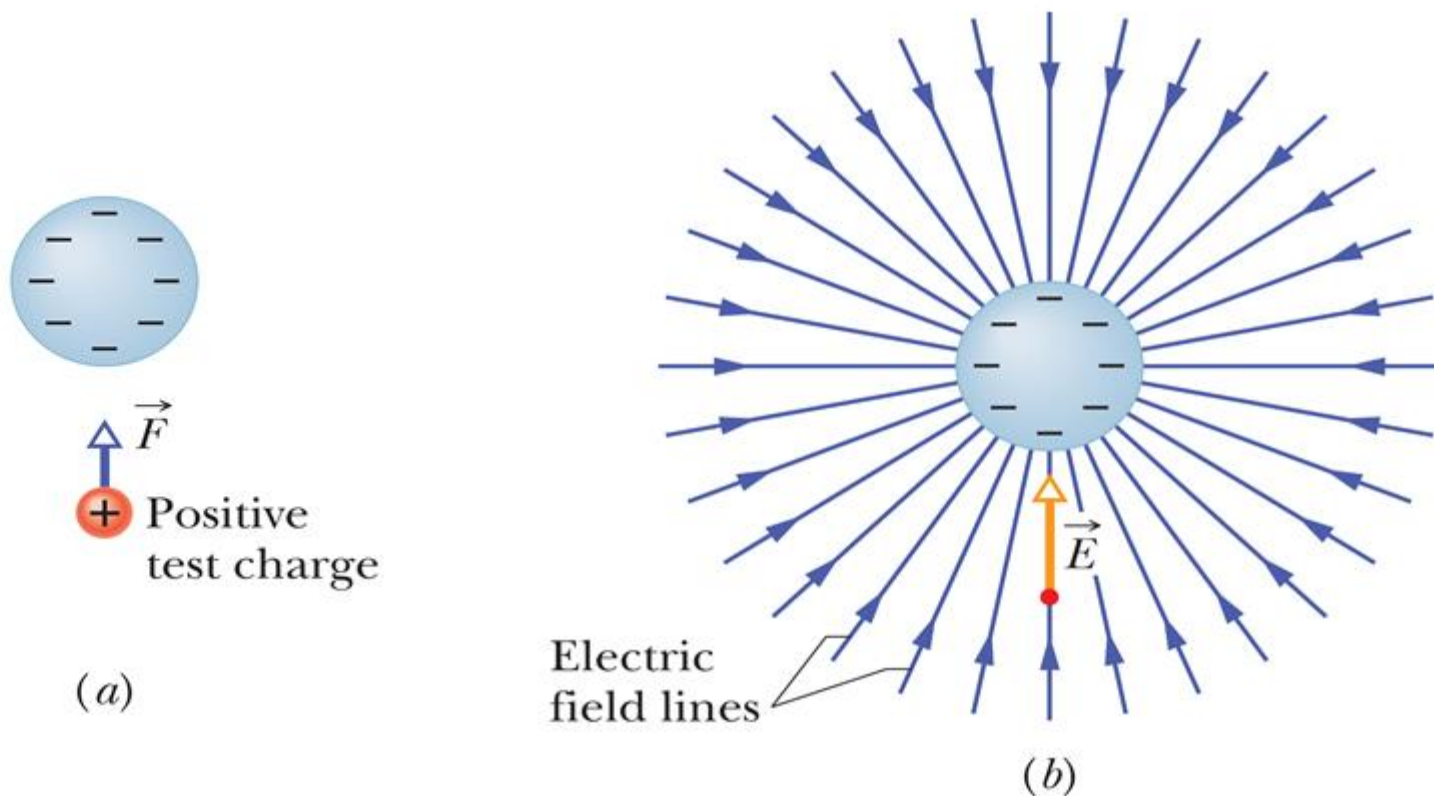
رابطه میان خطهای میدان و بردارهای میدان الکتریکی به این قرار است: (۱) در هر نقطه، جهت یک خط میدان مستقیم یا جهت مماس بر یک خط میدان خمیده، جهت \vec{E} را در آن نقطه به دست می‌دهد، و (۲) خطهای میدان به گونه‌ای رسم می‌شوند که تعداد خطها در واحد سطح، که در صفحه‌ای عمود بر این خطها اندازه‌گیری می‌شوند، با بزرگی \vec{E} متناسب‌اند. بنابراین، هر جایی که خطهای میدان به یکدیگر نزدیک باشند، E بزرگ و هر جایی که آنها از یکدیگر دورباشند، E کوچک است.

رابطه میان
خطهای
میدان و
بردارهای
میدان
الکتریکی؟

شکل ۱۸-۲ الف کره‌ای با بار منفی یکنواخت را نشان می‌دهد. اگر یک بار آزمون مثبت را در هر جایی نزدیک کره قرار دهیم، یک نیروی الکتروستاتیکی که جهت آن رو به سمت مرکز کره است، آن طور که در شکل نشان داده شده است، بر آن بار آزمون اثر می‌کند. به بیانی دیگر، بردارهای میدان الکتریکی در تمام نقطه‌های نزدیک به کره، به طور شعاعی به سوی مرکز کره‌اند. این نقش بردارها به سادگی با خطهای میدان شکل ۱۸-۲ ب نشان داده شده است، که در آن بردارهای نیرو و میدان در جهتهای یکسانی سمتگیری کرده‌اند. افزون بر این، باز شدن خطهای میدان الکتریکی با فاصله گرفتن از کره نشان می‌دهد که بزرگی میدان الکتریکی با فاصله گرفتن از کره کاهش می‌یابد.

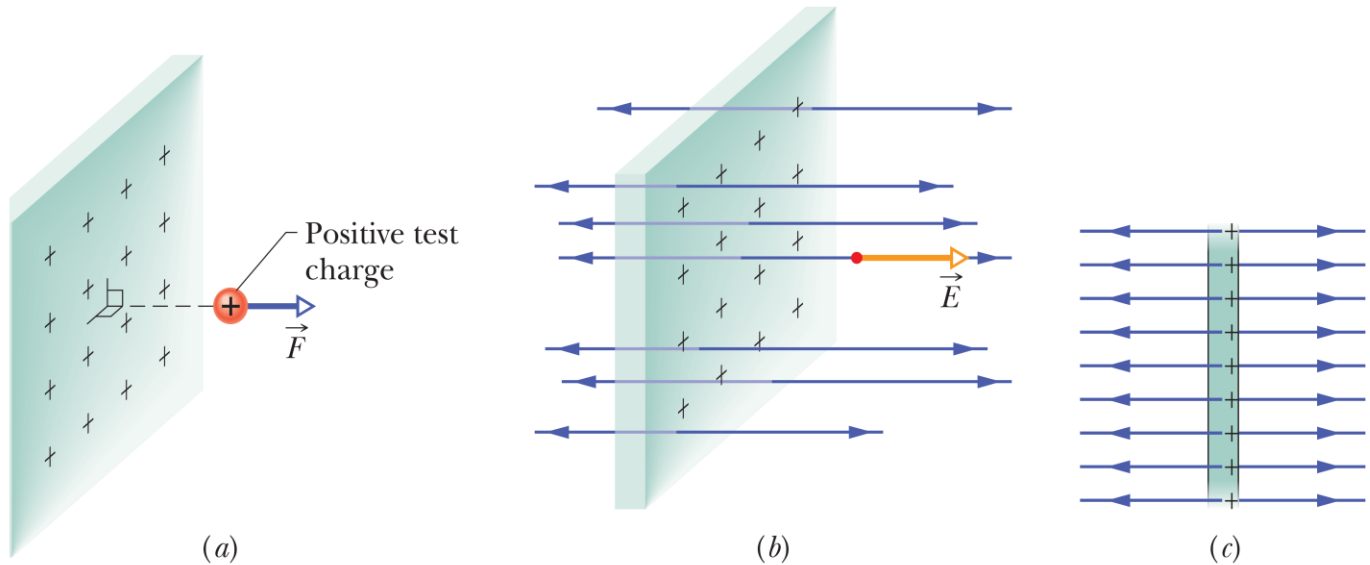
توضیح
خطوط
میدان با
استفاده از
شکل ۱۸-۲

نمایش خطوط نیرو



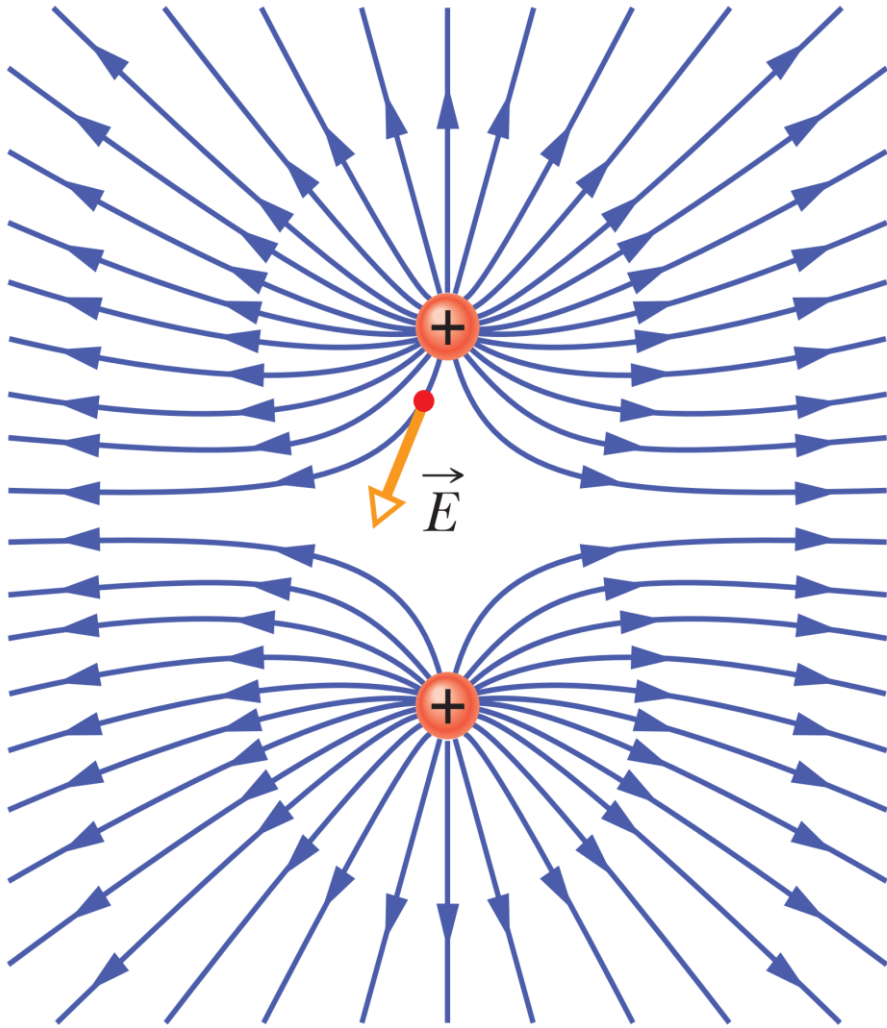
شکل ۱۸-۲ (الف) نیروی الکترواستاتیکی \vec{F} وارد بر یک بار آزمون مثبت واقع در نزدیکی کره‌ای با بار منفی یکنواخت. (ب) بردار میدان الکتریکی \vec{E} در محل بار آزمون، خطهای میدان الکتریکی در فضای نزدیک کره. امتداد خطهای میدان روبه سمت کره باردار منفی است. (آنها از بارهای مثبت دور، سرچشمه می‌گیرند.)

خطوط میدان الکتریکی در مجاورت یک ورقه نارسانای خیلی بزرگ

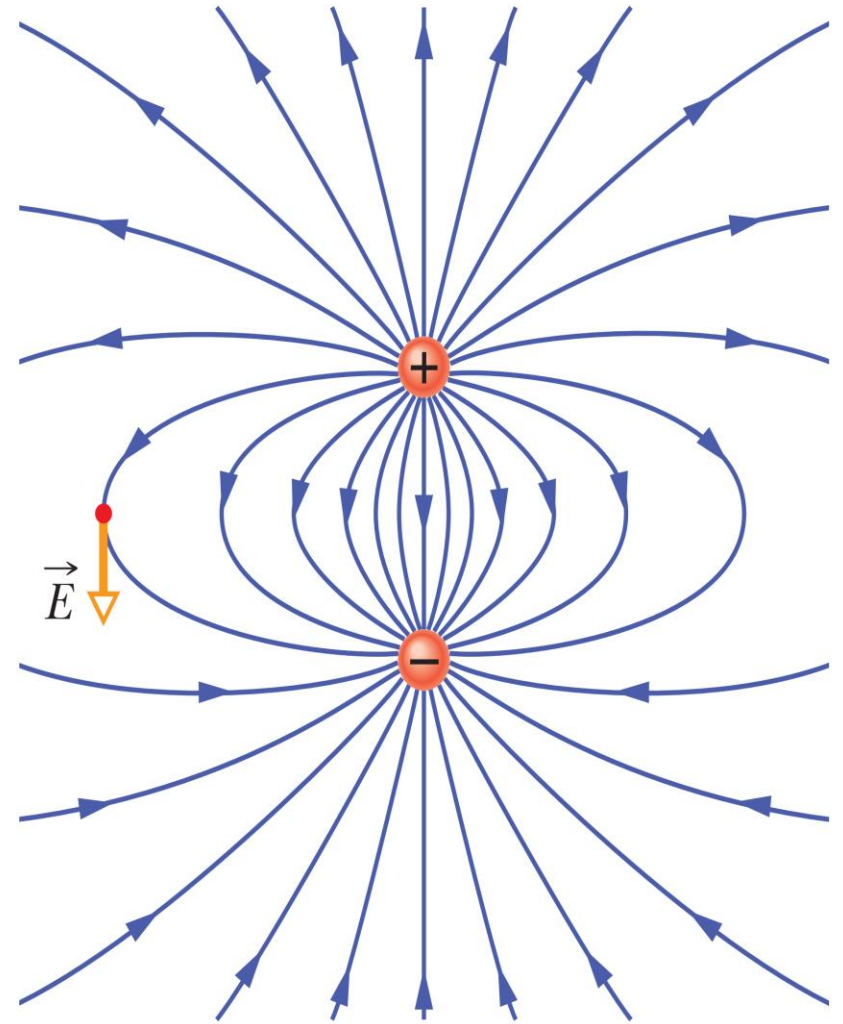


شکل ۱۸-۳ (الف) نیروی الکتروستاتیکی \vec{F} وارد بر بار آزمون مثبت در نزدیکی یک ورقه نارسانای بسیار بزرگ با توزیع یکنواخت بار مثبت در یک طرف آن. (ب) بردار میدان الکتریکی \vec{E} در محل بار آزمون، و خطهای میدان الکتریکی در فضای نزدیک ورقه. خطهای میدان از ورقه با بار مثبت دور می‌شوند. (پ) نمای جانبی شکل (ب).

خطوط میدان الکتریکی در مجاورت دو بار نقطه ای



دو بار نقطه ای مثبت



دو بار نقطه ای مثبت و منفی

آشکارسازی وجود میدانهای الکتریکی اطراف اجسام باردار

محاسبه میدان الکتریکی ناشی از بار نقطه ای

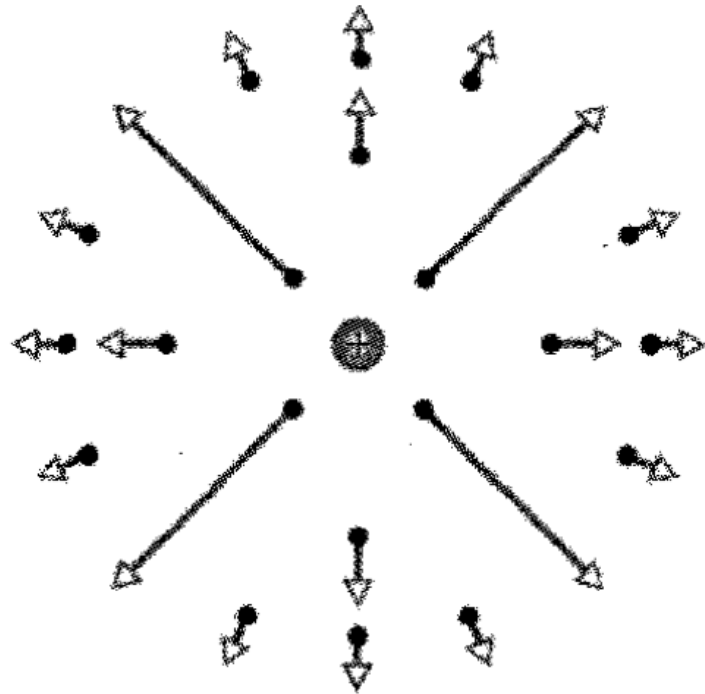
برای یافتن میدان الکتریکی ناشی از بار نقطه‌ای q (یا ذره باردار) در هر نقطه به فاصله r از بار نقطه‌ای، یک بار آزمون مثبت q_0 را در آن نقطه قرار می‌دهیم. از قانون کولن بزرگی نیروی الکتروستاتیکی وارد بر بار q_0 چنین است

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{r} \quad (18-2)$$

اگر q مثبت باشد، جهت \vec{F} مستقیماً در جهت دور شدن از بار نقطه‌ای، و اگر q منفی باشد، جهت \vec{F} مستقیماً در جهت نزدیک شدن به بار نقطه‌ای است. بزرگی بردار میدان الکتریکی با استفاده از معادله ۱۸-۱، چنین است

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (\text{بار نقطه‌ای}) \quad (3-18)$$

جهت \vec{E} در همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون مثبت است: یعنی مستقیماً در جهت دور شدن از بار نقطه‌ای اگر q مثبت باشد، و مستقیماً در جهت نزدیک شدن به آن، اگر q منفی باشد. چون نقطه‌ای که برای q_0 انتخاب می‌کنیم هیچ ویژگی خاصی ندارد، معادله ۳-۱۸ بزرگی میدان در هر نقطه‌ای پیرامون بار نقطه‌ای q را به دست می‌دهد. میدان یک بار نقطه‌ای در شکل ۶-۱۸ به صورت برداری (و نه به صورت خطهای میدان) نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۶ بردارهای میدان الکتریکی در چند نقطهٔ مختلف پیرامون یک بار نقطه‌ای مثبت.

میدان الکتریکی ناشی از بیش از یک بار نقطه ای

میدان الکتریکی خالص، یا برابند، حاصل از بیش از یک بار را می‌توانیم بی‌درنگ به دست آوریم. اگر یک آزمون مثبت q_0 را نزدیک به n بار نقطه‌ای q_1 ، q_2 ، ...، q_n قرار دهیم، آنگاه از معادله ۱۷-۷، نیروی خالص \vec{F}_0 ناشی از n بار نقطه‌ای که بر بار آزمون اثر می‌کند چنین می‌شود

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_{01} + \vec{F}_{02} + \dots + \vec{F}_{0n}$$

در نتیجه، با استفاده از معادله ۱۸-۱، میدان الکتریکی خالص در مکان بار آزمون عبارت است از

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \frac{\vec{F}_{01}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{02}}{q_0} + \dots + \frac{\vec{F}_{0n}}{q_0}$$

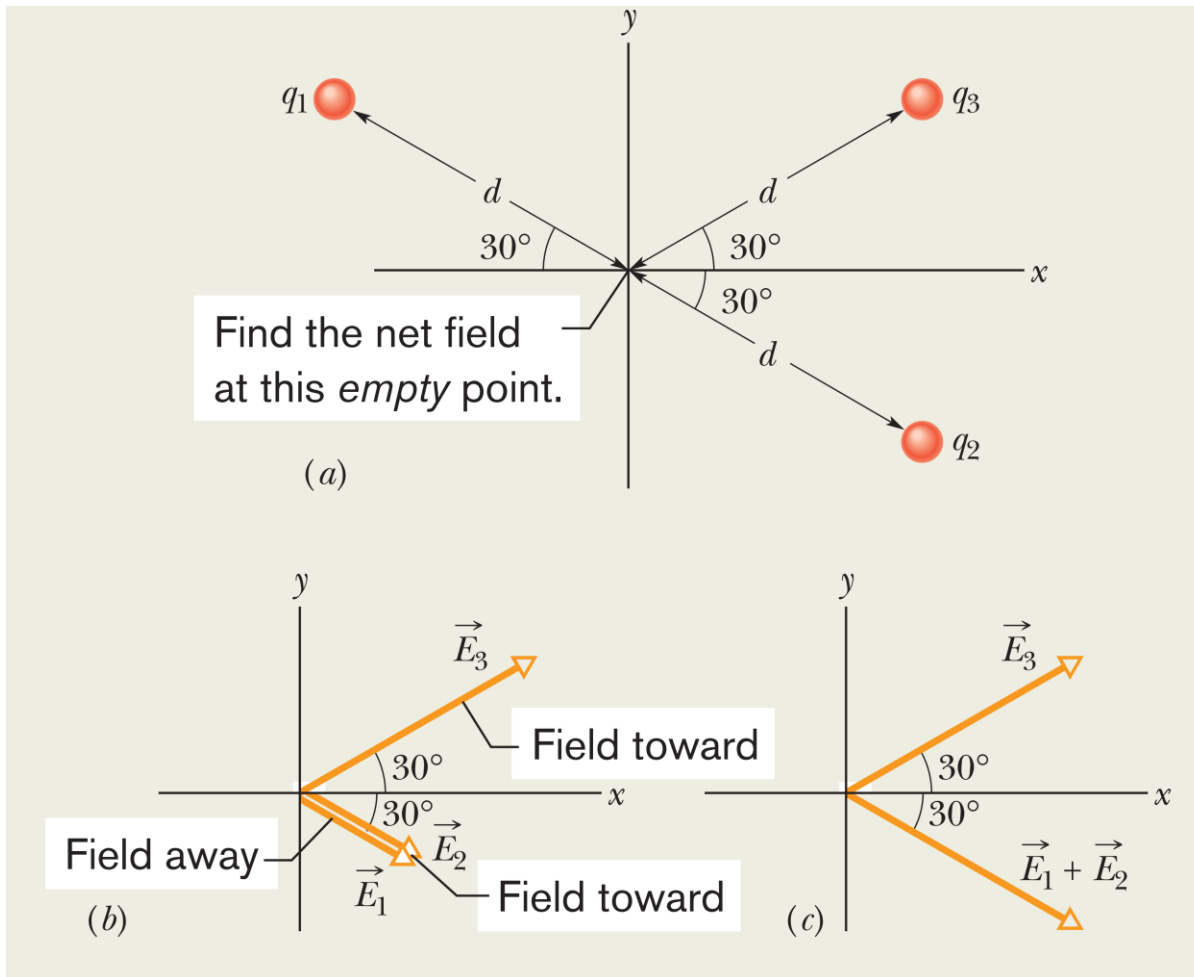
$$= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (4-18)$$

در اینجا \vec{E}_i میدان الکتریکی حاصل از بار نقطه‌ای i است که به تنهایی اثر می‌کند. معادله ۱۸-۴ نشان می‌دهد که اصل برهم‌نهی علاوه بر نیروهای الکتروستاتیک برای میدانهای الکتریکی نیز برقرار است.

✓ نکته واریسی ۱ شکل زیر، پروتون P و الکترون e را روی محور x نشان می‌دهد. جهت میدان الکتریکی حاصل از الکترون در (الف) نقطه S و (ب) نقطه R چگونه است؟ جهت میدان الکتریکی خالص در (پ) نقطه R و (ت) نقطه S چگونه است؟



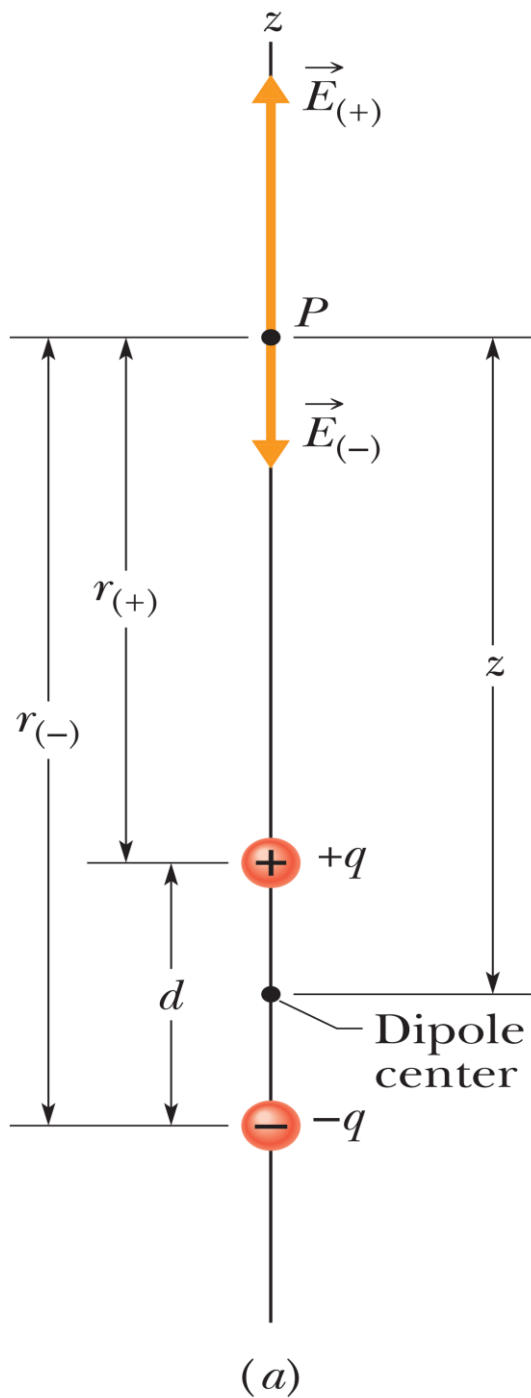
شکل ۱۸-۷ الف، سه ذره باردار با بارهای $q_1 = +2Q$ ، $q_2 = -2Q$ و $q_3 = -4Q$ ، هر یک به فاصله d از مبدأ را نشان می دهد. میدان الکتریکی خالص \vec{E} ایجاد شده در مبدأ چیست؟



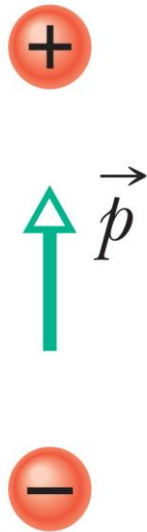
شکل ۱۸-۷ (الف) سه ذره با بارهای الکتریکی q_1 ، q_2 و q_3 در فاصله یکسان d از مبدأ قرار دارند. (ب) بردارهای میدان الکتریکی \vec{E}_1 ، \vec{E}_2 و \vec{E}_3 در مبدأ، حاصل از آن سه ذره. (پ) بردار میدان الکتریکی $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$ در مبدأ.

مثال ۱: میدان الکتریکی ناشی از یک دوقطبی الکتریکی

شکل ۱۸-۸ الف، دو ذره باردار به بزرگی q ولی با علامت مخالف را نشان می‌دهد که به فاصله d از هم قرار گرفته‌اند. آرایش را دوقطبی الکتریکی می‌نامیم. می‌خواهیم میدان الکتریکی ناشی از دوقطبی شکل ۱۸-۸ الف را در نقطه P به فاصله z از وسط دوقطبی و روی محوری که از ذره‌ها می‌گذرد، موسوم به محور دوقطبی، بیابیم.



شکل ۱۸-۸ (الف) یک دو قطبی الکتریکی. بردارهای میدان الکتریکی $\vec{E}_{(-)}$ و $\vec{E}_{(+)}$ در نقطه P واقع بر محور دو قطبی ناشی از دو بار دو قطبی اند. نقطه P در فاصله‌های $r(+)$ و $r(-)$ از بارهایی است که دو قطبی را ساخته‌اند. (ب) جهت گشتاور دو قطبی \vec{p} ، از بار منفی به سوی بار مثبت است.



نظر به تقارن، میدان الکتریکی \vec{E} در نقطه P و نیز میدانهای $\vec{E}_{(+)}$ و $\vec{E}_{(-)}$ ناشی از هریک از بارها که دو قطبی را می سازند، باید روی محور دوقطبی قرار گیرند که آن را محور z در نظر گرفته ایم. با به کار بردن اصل برهم نهی برای میدانهای الکتریکی، در می یابیم که بزرگی E میدان الکتریکی در نقطه P برابر است با

$$\begin{aligned}
 E &= E_{(+)} - E_{(-)} \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(+)}^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(-)}^2} \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(z - \frac{1}{2}d\right)^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(z + \frac{1}{2}d\right)^2} \quad (5-18)
 \end{aligned}$$

پس از کمی عملیات جبری، این معادله را می توانیم به صورت زیر بنویسیم

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{d}{2z}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{d}{2z}\right)^2} \right) \quad (6-18)$$

پس از مخرج مشترک گرفتن و ضرب جمله‌های آن خواهیم داشت

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \frac{2d/z}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 z^3} \frac{d}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2} \quad (7-18)$$

معمولاً به اثر الکتریکی یک دو قطبی فقط در فاصله‌هایی که در مقایسه با ابعاد دو قطبی بزرگ‌اند - یعنی، در فاصله‌هایی که $z \gg d$ است - علاقه‌مندیم. در چنین فاصله‌های بزرگی، در معادله 7-18 داریم $d/2z \ll 1$. در این صورت، با تقریب خود، می‌توانیم از $d/2z$ در مخرج چشمپوشی کنیم که به دست می‌دهد

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3} \quad (۸-۱۸)$$

حاصلضرب qd که شامل دو ویژگی ذاتی q و d در دو قطبی است، برابر بزرگی p است که یک کمیت برداری است و گشتاور دو قطبی الکتریکی \vec{p} دو قطبی نامیده می شود. (یکای \vec{p} کولن - متر است). بنابراین، معادله ۸-۱۸ را می توان چنین نوشت

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3} \quad (۹-۱۸) \quad (\text{دو قطبی الکتریکی})$$

همان گونه در شکل ۸-۱۸ ب نشان داده شده است، جهت \vec{p} از سر منفی دو قطبی به سوی سر مثبت آن در نظر گرفته می شود. از جهت \vec{p} می توانیم برای تعیین سمتگیری یک دو قطبی استفاده کنیم.