



# فصل ۱۷ بار الکتریکی

- (۱) مقدمه
- (۲) بار الکتریکی
- (۳) رساناها و نارساناها
- (۴) قانون کولن
- (۵) بار الکتریکی کوانتیده است
- (۶) بار الکتریکی پایسته است
- (۷) بازنگری و خلاصه درس

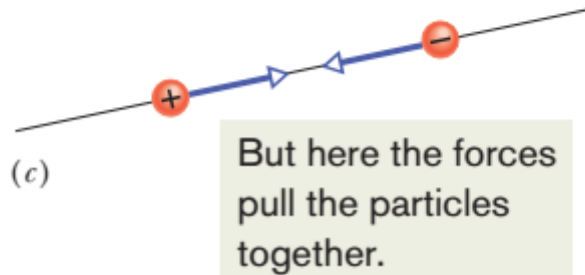
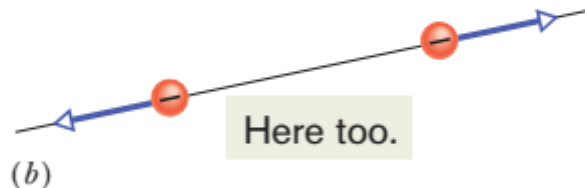
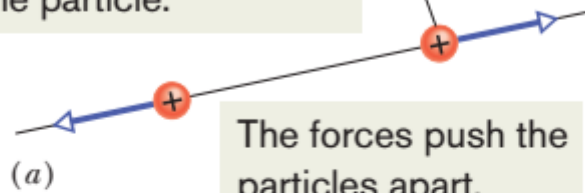
# قانون کولن

اگر دو ذره باردار به نزدیکی یکدیگر آورده شوند، هریک بر دیگری نیرویی وارد می‌کند. اگر علامت بارهای ذره‌ها یکسان باشند، یکدیگر را می‌رانند (شکل ۱۷-۷ الف و ب) یعنی نیروی وارد به هر ذره در جهت دور شدن از ذره دیگر است، و اگر ذره‌ها بتوانند حرکت کنند، از یکدیگر دور می‌شوند. ولی اگر علامت بارهای ذره‌ها یکسان نباشد، یکدیگر را می‌ربایند (شکل ۱۷-۷ پ)، و اگر برای حرکت آزاد باشند، به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

این نیروی رانشی یا ربایشی ناشی از خواص بار اجسام نیروی الکتروستاتیکی نامیده می‌شود. معادله‌ای که نیروی بین ذره‌ها را به دست می‌دهد به نام چارلز اگوستین کولن، قانون کولن نامیده می‌شود که در سال ۱۷۸۵/۱۱۶۴ با آزمایشی به آن دست یافت. برحسب ذره‌های شکل ۱۷-۸، اگر بار ذره ۱ برابر  $q_1$  و بار ذره ۲ برابر  $q_2$  باشد، نیروی وارد بر ذره ۱ عبارت است از

نیروی  
الکتروستاتیکی  
و قانون کولن؟

Always draw the force vector with the tail on the particle.



شکل ۱۷-۷ ذره‌های باردار یکدیگر را می‌رانند اگر علامت بار آنها یکسان باشد، (الف) هر دو مثبت، (ب) هر دو منفی باشد. (پ) اگر علامت بار آنها یکسان نباشد یکدیگر را می‌رانند.

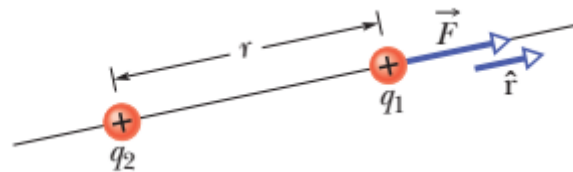
$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (\text{قانون کولن}) \quad (1-17)$$

که در آن  $\hat{r}$  بردار یکه در راستای محوری است که از دو ذره می‌گذرد،  $r$  فاصله بین آنها و  $k$  یک ثابت است. (مانند دیگر یکاهای برداری  $\hat{r}$  دارای بزرگی ۱ و بدون بعد یا یکا است؛ هدف آن نشان دادن جهت است). اگر علامت بارها یکسان باشند، نیروی وارد بر ذره ۱ در جهت  $\hat{r}$  و اگر علامت آنها مخالف باشد، نیرو در جهت مخالف  $\hat{r}$  است.

به طور شگفت‌انگیزی، شکل معادله ۱-۱۷ همان شکل معادله نیوتون (معادله ۱۳-۳ جلد اول) برای نیروی گرانشی میان دو ذره به جرمهای  $m_1$  و  $m_2$  است که به فاصله  $r$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (\text{قانون نیوتون}) \quad (2-17)$$

که در آن  $G$  ثابت گرانش است.



شکل ۱۷-۸ نیروی الکتروستاتیکی وارد بر ذره ۱ را می‌توان  
برحسب یک بردار یکه  $\hat{r}$  در راستای محوری که از آن دو ذره  
می‌گذرد توصیف کرد.

ثابت  $k$  در معادله ۱۷-۱ را می‌توان در قیاس با ثابت گرانش  $G$  در معادله ۱۷-۲، ثابت الکتروستاتیک نامید. هر دو معادله، قانونهای عکس مجذوری را توصیف می‌کنند که خاصیتی از ذره‌های برهم کنش کننده را در بر دارند- در یک حالت، جرم و در حالت دیگر، بار. تفاوت این دو قانون در این است که نیروهای گرانشی همواره ربایشی‌اند، ولی نیروهای الکتروستاتیکی بسته به علامتهای دو بار ممکن است ربایشی یا رانشی باشند. این تفاوت برآمده از این واقعیت است که، اگر چه فقط یک نوع جرم وجود دارد، ولی بارها دو نوع‌اند

تفاوت عمده  
نیروهای  
گرانشی و  
الکتروستاتیک  
ی و منشا این  
تفاوت

قانون کولن با همه آزمایشهای تجربی تأیید شده و هرگز هیچ استثنایی برای آن پیدا نشده است. این قانون حتی در داخل اتم هم برقرار است، و به درستی نیروی میان هسته باردار مثبت و الکترونهاى باردار منفی را توصیف می‌کند، در حالی که مکانیک کلاسیک نیوتونی در این حیطه شکست می‌خورد و باید مکانیک کوانتومی جایگزین آن شود. این قانون ساده همچنین به درستی نیروهایی که اتمها را برای تشکیل مولکولها به

ارجحیت  
قانون کولن  
بر مکانیک  
کلاسیک  
نیوتنی

یکدیگر پیوند می دهند، و نیروهایی که اتمها و مولکولها را برای تشکیل جامدها و مایعها به هم پیوند می دهند، توصیف می کند. یکای SI بار، کولن است. به دلایل عملی که به دقت اندازه گیریها مربوط می شود، یکای کولن از یکای SI/آمپر برای جریان الکتریکی  $i$  به دست آمده است. جریان، آهنگ  $dq/dt$  است که با آن بار از یک نقطه یا یک ناحیه می گذرد. در فصل ۲۲، جریان را به تفصیل بررسی خواهیم کرد. تا آن موقع از رابطه

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{جریان الکتریکی}) \quad (17-3)$$

استفاده می کنیم که در آن  $i$  جریان (برحسب آمپر) و  $dq$  (برحسب کولن) مقدار باری است که از یک نقطه یا یک ناحیه در زمان  $dt$  (برحسب ثانیه) می گذرد. با مرتب کردن معادله ۱۷-۳ خواهیم داشت

$$1C = (1A)(1s)$$



به دلایل تاریخی (و برای اینکه بسیاری از فرمولهای دیگر را بسیار ساده می‌کند)، ثابت الکتروستاتیک  $k$  در معادله ۱-۱۷ معمولاً به صورت  $1/4\pi\epsilon_0$  نوشته می‌شود. بنابراین، قانون کولن چنین می‌شود

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{قانون کولن}) \quad (4-17)$$

ثابتهای معادله‌های ۱-۱۷ و ۴-۱۷ مقدار زیر را دارد

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \quad (5-17)$$

کمیت  $\epsilon_0$  که ثابت گذردهی نامیده می‌شود، گاهی به طور جداگانه در معادله‌ها ظاهر می‌شود و مقدار آن برابر است با

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2 \quad (6-17)$$

باز هم تشابه دیگری میان نیروی گرانشی و نیروی الکتروستاتیکی وجود دارد و آن این است که هر دو از اصل برهم‌نهی پیروی می‌کنند. اگر  $n$  ذره باردار داشته باشیم، آنها به صورت جفت‌هایی

اصل برهم‌نهی  
نیروها در  
الکتروستاتیک

به طور مستقل بر هم کنش می کنند و نیروی وارد بر یکی از آنها، مثلاً ذره ۱، با جمع برداری زیر داده می شود

$$\vec{F}_{1,\text{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (7-17)$$

که در آن، برای مثال،  $\vec{F}_{14}$  نیروی وارد بر ذره ۱ ناشی از حضور ذره ۴ است. فرمول مشابهی برای نیروی گرانشی برقرار است. و آخر اینکه، قضیه پوسته که آن را در مطالعه گرانش بسیار سودمند یافتیم قیاسهایی در الکتروستاتیک دارد:

پوسته‌ای با بار یکنواخت، ذره‌ای باردار را که در خارج پوسته قرار دارد به گونه‌ای می‌رباید یا می‌رانند که گویی بار پوسته در مرکز آن متمرکز شده است.

قضایای پوسته  
ها در  
الکتروستاتیک  
و گرانش

اگر ذره بارداری در داخل پوسته‌ای با بار یکنواخت قرار داشته باشد، هیچ نیروی الکتروستاتیکی خالصی از پوسته بر ذره وارد نمی‌شود.

## رساناهای کروی

اگر بار اضافی روی پوسته‌ای کروی که از ماده‌ای رسانا ساخته شده است قرار گیرد، آن بار اضافی به طور یکنواخت روی سطح (خارجی) پخش می‌شود. مثلاً، اگر الکترونهاى اضافی را روی یک پوسته فلزی کروی قرار دهیم، آن الکترونها یکدیگر را می‌رانند و با دور شدن از هم، روی سطح کره آنقدر پخش می‌شوند تا اینکه به طور یکنواخت توزیع شوند. این نحوه توزیع بار، فاصله میان همه جفت الکترونهاى اضافی را بیشینه می‌کند. بنابر نخستین قضیه پوسته، پوسته یک بار خارجی را به گونه‌ای می‌رباید یا می‌راند که گویی همه بار اضافی روی پوسته در مرکز آن متمرکز شده است.

اگر بار منفی را از پوسته فلزی کروی برداریم، بار مثبت به جای مانده نیز به طور یکنواخت روی سطح پوسته پخش می‌شود. مثلاً اگر  $n$  الکترون را برداریم، آنگاه  $n$  جایگاه بار مثبت (جایگاه‌های نبود الکترون) به طور یکنواخت روی پوسته پخش

نحوه توزیع  
بارهای آزاد  
منفی و یا  
مثبت در  
سطح یک  
رسانای  
کروی؟

می شوند. بنابر نخستین قضیه پوسته، پوسته باردار یک بار خارجی را به گونه‌ای می‌رباید یا می‌راند که گویی همه بار اضافی پوسته در مرکز آن متمرکز شده است.

✓ نکته و ارسسی ۲ شکل، دو پروتون (با نماد  $p$ ) و یک الکترون (با نماد  $e$ ) را روی یک محور نشان می‌دهد. جهت (الف) نیروی الکتروستاتیکی وارد بر پروتون مرکزی ناشی از الکترون، (ب) نیروی الکتروستاتیکی وارد بر پروتون مرکزی ناشی از پروتون دیگر، و (پ) نیروی الکتروستاتیکی خالص وارد بر پروتون مرکزی چیست؟

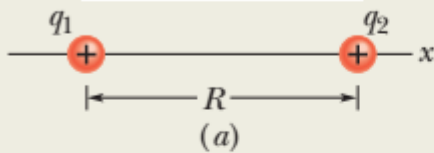


## مسئله نمونه ۱۷-۱ مهارت خود را تقویت کنید

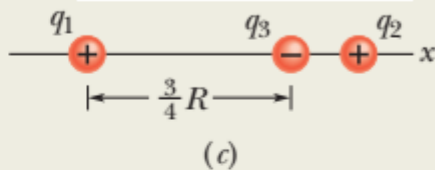
(الف) شکل ۱۷-۹ دو ذره باردار مثبت را نشان می‌دهد که در مکانی روی محور  $x$  ثابت شده‌اند. بارها عبارت‌اند از  $q_1 = 1/60 \times 10^{-19} \text{ C}$  و  $q_2 = 3/20 \times 10^{-19} \text{ C}$ ، و فاصله آنها  $R = 0/0200 \text{ m}$  است. بزرگی و جهت نیروی الکتروستاتیکی  $\vec{F}_{12}$  وارد بر ذره ۱ از طرف ذره ۲ چیست؟

**نکته‌های کلیدی** چون هر دو ذره بار مثبت دارند، ذره ۱ توسط ذره ۲ با نیرویی که بزرگی آن با معادله ۱۷-۴ داده می‌شود، رانده می‌شود. بنابراین، جهت نیروی  $\vec{F}_{12}$  وارد بر ذره ۱ به سوی دور شدن از ذره ۲، در جهت منفی محور  $x$  است، آنچنان که در نمودار جسم-آزاد شکل ۱۷-۹ ب نشان داده است. دو ذره با استفاده از معادله ۱۷-۴ که در آن به جای  $r$  فاصله  $R$  گذاشته شده است، می‌توانیم بزرگی  $F_{12}$  این نیرو را چنین بنویسیم

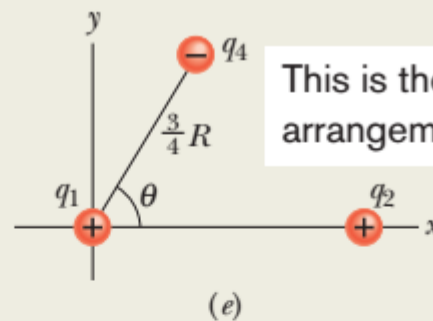
This is the first arrangement.



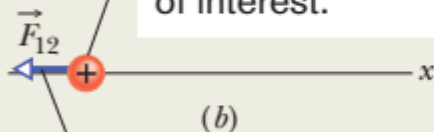
This is the second arrangement.



This is the third arrangement.

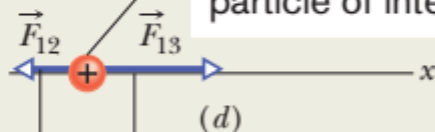


This is the particle of interest.



It is pushed away from particle 2.

This is still the particle of interest.



It is pulled toward particle 3.

It is pushed away from particle 2.

This is still the particle of interest.



It is pulled toward particle 4.

It is pushed away from particle 2.

شکل ۹-۱۷ الف و ب (الف) دو ذره باردار به بارهای  $q_1$  و  $q_2$  در مکانی روی محور  $x$  ثابت شده‌اند. (ب) نمودار جسم-آزاد ذره ۱، نیروی الکتروستاتیکی وارد بر آن از طرف ذره ۲ را نشان می‌دهد. (پ) ذره ۳ اضافه شده است. (ت) نمودار جسم-آزاد برای ذره ۱. (ث) ذره ۴ اضافه شده است. (ج) نمودار جسم-آزاد برای ذره ۱.

$$\begin{aligned}
 F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{R^2} \\
 &= (8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \\
 &\quad \times \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(3/20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0.0200 \text{ m})^2} \\
 &= 1/15 \times 10^{-24} \text{ N}
 \end{aligned}$$

بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{12}$  بزرگی و جهت (نسبت به سوی مثبت محور  $x$ )  
 زیر را دارد  
 (پاسخ)  $1/15 \times 10^{-24} \text{ N}$  و  $180^\circ$

همچنین می‌توانیم  $\vec{F}_{12}$  را بر حسب نمادگذاری بردار یکه چنین  
 بنویسیم  
 (پاسخ)  $\vec{F}_{12} = -(1/15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}$

(ب) شکل ۹-۱۷ پ همان شکل ۹-۱۷ الف است با این  
 تفاوت که اکنون ذره ۳ میان ذره‌های ۱ و ۲ روی محور  $x$  قرار  
 دارد. بار ذره ۳ برابر  $q_3 = -3/20 \times 10^{-19} \text{ C}$  و فاصله آن از ذره

۱ برابر با  $\frac{3}{4}R$  است. نیروی الکتروستاتیک خالص  $\vec{F}_{1,net}$  وارد بر ذره ۱ ناشی از ذره‌های ۲ و ۳ چقدر است؟

**نکته کلیدی** حضور ذره ۳، نیروی الکتروستاتیکی وارد بر ذره ۱ از سوی ذره ۲ را تغییر نمی‌دهد. بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{12}$  هنوز بر ذره ۱ اثر می‌کند. به همین ترتیب، نیروی  $\vec{F}_{13}$  که از سوی ذره ۳ بر ذره ۱ اثر می‌کند، تحت تأثیر حضور ذره ۲ قرار نمی‌گیرد. چون ذره‌های ۱ و ۳ بارهایی با علامت مخالف دارند، ذره ۱ به سوی ذره ۳ رپوده می‌شود. بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{13}$ ، همان گونه که در نمودار جسم-آزاد شکل ۱۷-۹ ت نشان داده شده است، به سوی ذره ۳ است.

سه ذره: برای یافتن بزرگی  $\vec{F}_{13}$ ، معادله ۱۷-۴ را می‌توانیم چنین بازنویسی کنیم



$$\begin{aligned}
 F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} \\
 &= (8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \\
 &\quad \times \frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(3.20 \times 10^{-19} \text{ C})}{\left(\frac{3}{4}\right)^2 (0.200 \text{ m})^2} \\
 &= 2.05 \times 10^{-24} \text{ N}
 \end{aligned}$$

همچنین می‌توانیم  $\vec{F}_{12}$  را برحسب نمادگذاری بردار یک‌ه بنویسیم

$$\vec{F}_{12} = (2.05 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}$$

نیروی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  وارد بر ذره ۱ برابر با جمع برداری  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{13}$  است؛ یعنی از معادله ۱۷-۷، می‌توانیم نیروی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  وارد بر ذره ۱ را برحسب نمادگذاری بردارهای یک‌ه چنین بنویسیم

$$\begin{aligned}\vec{F}_{1,\text{net}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\ &= -(1/15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (2/0.5 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} \\ &= (9/0.00 \times 10^{-25} \text{ N})\hat{i} \quad (\text{پاسخ})\end{aligned}$$

بنابراین،  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  بزرگی و جهت (نسبت به سوی مثبت محور  $x$ )  
زیر را دارد

$$9/0.00 \times 10^{-25} \text{ N} \text{ و } 0^\circ \quad (\text{پاسخ})$$

(پ) شکل ۱۷-۹ ج مشابه شکل ۱۷-۸ الف است با این تفاوت  
که اکنون ذره ۴ را نیز شامل می‌شود. بار این ذره  
 $q_4 = -3/20 \times 10^{-19} \text{ C}$  است و به فاصله  $\frac{3}{4}R$  از ذره ۱ روی  
خطی که با محور  $x$  زاویه  $\theta = 60^\circ$  می‌سازد، قرار دارد. نیروی  
الکتروستاتیکی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  که از سوی ذره‌های ۲ و ۴ بر ذره  
۱ وارد می‌شود، چقدر است؟

**نکته کلیدی** نیروی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  جمع برداری  $\vec{F}_{12}$  و نیروی

جدید  $\vec{F}_{14}$  است که بر ذره ۱ از سوی ذره ۴ وارد می‌شود. چون ذره‌های ۱ و ۴ بارهایی با علامت مخالف دارند، ذره ۱ به سوی ذره ۴ ربوده می‌شود. بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{14}$  که بر ذره ۱ وارد می‌شود، همان گونه که در نمودار جسم-آزاد شکل ۱۷-۹ ج نشان داده شده، به سوی ذره ۴، با زاویه  $\theta = 60^\circ$  است. چهار ذره: معادله ۱۷-۴ را می‌توانیم چنین بازنویسی کنیم

$$\begin{aligned}
 F_{14} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_4|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} \\
 &= (8/99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \\
 &\quad \times \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(3/20 \times 10^{-19} \text{ C})}{\left(\frac{3}{4}\right)^2 (0/0200 \text{ m})^2} \\
 &= 2/05 \times 10^{-24} \text{ N}
 \end{aligned}$$

آنگاه از معادله ۷-۱۷ نیروی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  وارد بر ذره ۱ را می‌توانیم چنین بنویسیم

$$\vec{F}_{1,\text{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14}$$

چون نیروهای  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{14}$  در امتداد محور یکسانی نیستند، نمی‌توانیم آنها را به سادگی با افزودن بزرگی‌هایشان، با هم جمع کنیم. به جای این، باید آنها را با استفاده از یکی از این روشها به طور برداری جمع کنیم:

روش ۳. جمع کردن محور به محور مؤلفه‌ها. جمع مؤلفه‌های  $x$  چنین به دست می‌دهد

$$\begin{aligned} F_{1,\text{net},x} &= F_{12,x} + F_{14,x} = F_{12} + F_{14} \cos 60^\circ \\ &= -1/15 \times 10^{-24} \text{ N} + (2/05 \times 10^{-24} \text{ N})(\cos 60^\circ) \\ &= -1/25 \times 10^{-25} \text{ N} \end{aligned}$$

جمع مؤلفه‌های  $y$  چنین به دست می‌دهد

$$F_{1,\text{net},y} = F_{12,y} + F_{14,y} = 0 + F_{14} \sin 60^\circ$$

$$= (2/05 \times 10^{-24} \text{ N}) (\sin 60^\circ)$$

$$= 1/78 \times 10^{-24} \text{ N}$$

نیروی خالص  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  دارای بزرگی زیر است

$$F_{1,\text{net}} = \sqrt{F_{1,\text{net},x}^2 + F_{1,\text{net},y}^2} = 1/78 \times 10^{-24} \text{ N} \quad (\text{پاسخ})$$

برای یافتن جهت  $\vec{F}_{1,\text{net}}$ ، در نظر می‌گیریم

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_{1,\text{net},x}}{F_{1,\text{net},y}} = -86/0^\circ$$



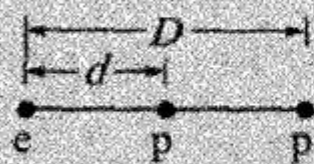
ولی، این نتیجه‌ای نامعقول است، زیرا جهت  $\vec{F}_{1,\text{net}}$  باید

میان جهتهای  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{14}$  باشد. برای تصحیح  $\theta$ ،  $180^\circ$  به آن

می‌افزاییم، به دست می‌آوریم

$$-86/0^\circ + 180^\circ = 94/0^\circ \quad (\text{پاسخ})$$

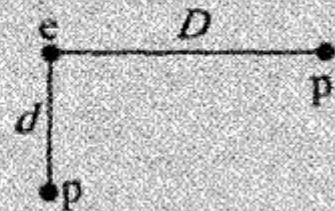
✓ نکته واریسی ۳ شکل، سه آرایش یک الکترون e و دو پروتون p را نشان می‌دهد. (الف) این آرایشها را بنا بر بزرگی نیروی الکتروستاتیک وارد بر الکترون از سوی پروتونها از بزرگ به کوچک مرتب کنید. (ب) در آرایش پ، آیا زاویه میان نیروی خالص وارد بر الکترون و خطی که با  $d$  نشان داده شده، کمتر از  $45^\circ$  است یا بیشتر از آن؟



(الف)

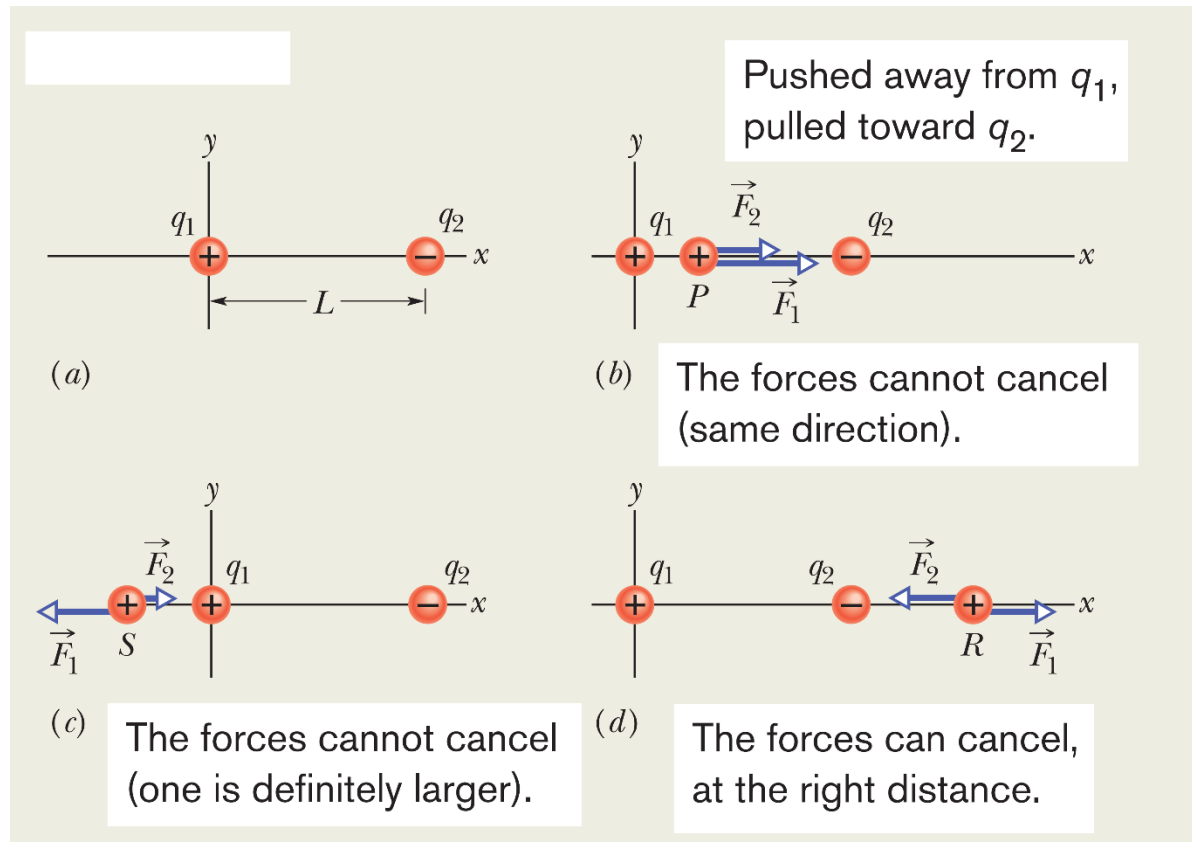


(ب)



(پ)

شکل ۱۷-۱۰ الف دو ذره را که در مکانی ثابت شده‌اند نشان می‌دهد: یک ذره با بار  $q_1 = +8q$  در مبدأ و ذره‌ای با بار  $q_2 = -2q$  در  $x = L$ . در چه نقطه‌ای (غیر از بینهایت دور) یک پروتون می‌تواند قرار داده شود به گونه‌ای که در تعادل باشد (یعنی نیروی خالص وارد بر آن صفر باشد)؟ آیا در تعادل پایدار است یا ناپایدار؟



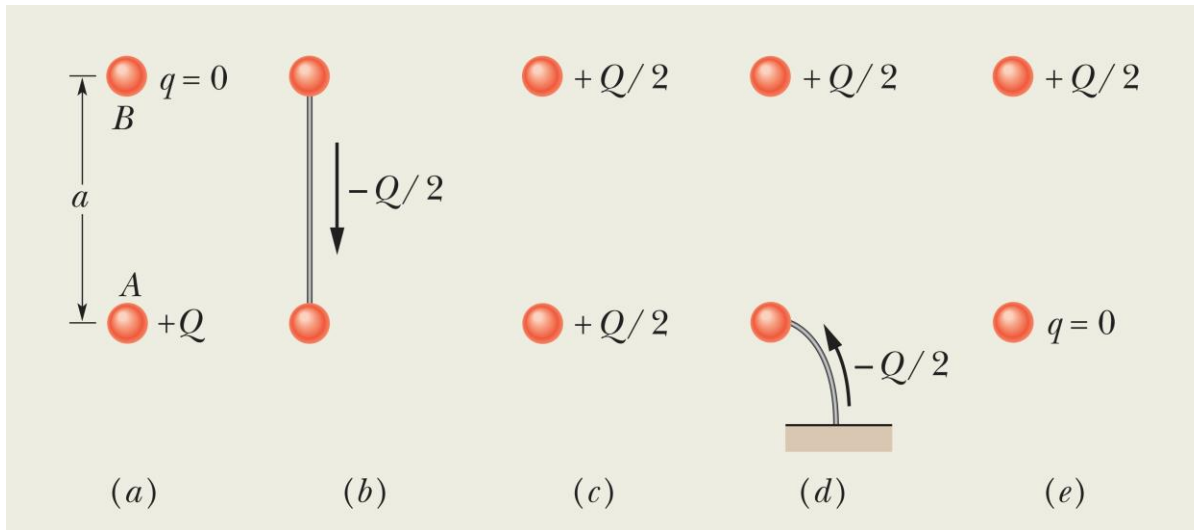
شکل ۱۷-۱۰ (الف) دو ذره باردار  $q_1$  و  $q_2$  در مکانی روی محور  $x$ ، به فاصله جدایی  $L$ ، ثابت شده‌اند. (ب) - (ت) سه مکان ممکن  $S$ ،  $P$  و  $R$  برای یک پروتون. در هر مکان،  $\vec{F}_1$  نیروی وارد بر پروتون از سوی ذره ۱ و  $\vec{F}_2$  نیروی وارد بر پروتون از سوی ذره ۲ است.



در شکل ۱۷-۱۱ الف، دو کره رسانای الکتریکی منزوی و یکسان  $A$  و  $B$  به فاصله (مرکز به مرکز)  $a$  از یکدیگر قرار دارند که در مقایسه با کرهها بزرگ است. کره  $A$  دارای بار  $+Q$ ، و کره  $B$  از لحاظ الکتریکی خنثی است. در ابتدا، هیچ نیروی الکتروستاتیکی بین کرهها وجود ندارد. (فرض کنید به دلیل فاصله زیاد میان کرهها، هیچ بار القا شده‌ای روی آنها وجود ندارد.)

(الف) فرض کنید که کرهها برای لحظه‌ای توسط یک سیم رسانا به هم متصل شوند. سیم به حد کافی نازک است، به گونه‌ای که هر بار خالصی روی آن قابل چشمپوشی است. پس از برداشتن سیم، نیروی الکتروستاتیکی بین کرهها چقدر است؟

(ب) حال فرض کنید کره  $A$  به طور لحظه‌ای به زمین وصل و سپس اتصال به زمین آن برداشته شود. اکنون نیروی الکتروستاتیکی بین کرهها چقدر است؟



شکل ۱۷-۱۱ دو کره رسانای کوچک  $A$  و  $B$ . (الف) در ابتدا به کره  $A$  بار مثبت داده می‌شود. (ب) بار منفی از طریق یک سیم رابط از  $B$  به  $A$  منتقل می‌شود. (پ) سپس هر دو کره دارای بار مثبت می‌شوند. (ت) بار منفی از طریق سیم متصل به زمین، به کره  $A$  منتقل می‌شود. (ث) در این حالت کره  $A$  خنثی است.

# آزمایش کاوندیش در تایید قانون کولن



In 1798, Englishman Henry Cavendish used equipment similar to the apparatus shown,

# بار الکتریکی کوانتیده است

در زمان بنیامین فرانکلین، بار الکتریکی به صورت یک شاره پیوسته تصور می‌شد - نظری که برای بسیاری موارد سودمند بود. ولی امروزه می‌دانیم که خود شاره‌ها، مانند هوا و آب، پیوسته نیستند بلکه از اتمها و مولکولها ساخته شده‌اند؛ ماده گسسته است. آزمایش نشان می‌دهد که «شاره الکتریکی» نیز پیوسته نیست، بلکه از مضربهایی از یک بار بنیادی معین تشکیل شده است. هر بار مثبت یا منفی  $q$  را که بشود آشکار سازی کرد می‌توان به صورت زیر نوشت

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (11-17)$$

که در آن  $e$ ، بار بنیادی است و مقدار تقریبی زیر را دارد

$$e = 1/602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (12-17)$$

بار بنیادی  $e$  یکی از مهمترین ثابتهای طبیعت است. هم الکترون و هم پروتون باری به بزرگی  $e$  دارند (جدول ۱۷-۱). (کوارکها، ذره‌های سازنده پروتونها و نوترونها، بارهای  $\pm e/3$  یا  $\pm 2e/3$  دارند، ولی ظاهراً آنها را نمی‌توان به صورت منفرد آشکار سازی کرد. به همین دلیل و به دلایل تاریخی، بار آنها را بار بنیادی در نظر نمی‌گیرند.)

وقتی یک کمیت فیزیکی از قبیل بار بتواند فقط مقادیرهای گسسته‌ای را به جای هر مقدار دارا باشد، می‌گوییم آن کمیت کوانتیده است. برای مثال، ممکن است ذره‌ای را پیدا کرد که هیچ باری نداشته باشد یا بار آن  $+10e$  یا  $-6e$  باشد، ولی هیچ ذره‌ای با بار، مثلاً،  $3/57e$  یافت نمی‌شود.

مفهوم کمیت  
کوانتیده با  
ذکر مثال

### جدول ۱۷-۱

بارهای سه ذره

سه ذره زیر  
اتمی مشهور  
موجود در  
ساختار اتم

Particle	Symbol	Charge
Electron	$e$ or $e^{-}$	$-e$
Proton	$p$	$+e$
Neutron	$n$	$0$

کوانتوم بار کوچک است. برای مثال در یک لامپ  $100\text{ W}$  معمولی، حدود  $10^{19}$  ذره بنیادی در هر ثانیه وارد لامپ می‌شوند و درست به همین مقدار، آن را ترک می‌کنند. البته ذره‌ای بودن الکتریسته را نمی‌توان در چنین پدیده‌های بزرگ-مقیاسی مشاهده کرد. (لامپ به ازای هر الکترون سوسو نمی‌زند)، درست همان‌طور که نمی‌توانید مولکولهای مجزای آب را با دست خود حس کنید.

✓ نکته واریسی ۴ در ابتدا، کره  $A$  دارای باری برابر با  $-50e$  و کره  $B$  دارای باری برابر با  $+20e$  است. کره‌ها از ماده رسانایی ساخته شده‌اند و انداره آنها یکسان است. اگر کره‌ها را با هم تماس دهیم، بار نهایی روی کره  $A$  چقدر می‌شود؟

## مسئله نمونه ۱۷-۴

هسته اتم آهن با شعاع تقریبی  $m \times 10^{-15} \times 4/0$  دارای ۲۶ پروتون است.

(الف) بزرگی نیروی دافعه الکتروستاتیکی میان دو پروتون به فاصله  $m \times 10^{-15} \times 4/0$  چقدر است؟

**نکته کلیدی** پروتونها را می توان به صورت ذره های باردار در

نظر گرفت، به گونه ای که بزرگی نیروی الکتروستاتیکی وارد بر یکی از طرف دیگری با قانون کولن داده می شود.

محاسبه: جدول ۱-۱۷ نشان می دهد که بار یک پروتون برابر با  $e$  است؛ بنابراین، معادله ۴-۱۷ چنین به دست می دهد

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \\ &= \frac{(8/99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1/602 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(4/0 \times 10^{-15} \text{ m})^2} \\ &= 14 \text{ N} \end{aligned}$$

(پاسخ)

انواع نیروهای  
موجود در  
طبیعت

منفجر نمی‌شود: این نیرو برای تأثیر بر یک جسم ماکروسکوپی مانند طالبی، کوچک است ولی برای تأثیر بر یک پروتون، مقدار بسیار بزرگی است. چنین نیروهایی باید هسته هر عنصری به جز هیدروژن را (که فقط یک پروتون در هسته دارد) از هم بپاشند. ولی حتی هسته‌هایی با تعداد بسیار زیادی پروتون نیز از هم نمی‌پاشند. بنابراین، برای مقابله با این نیروی دافعه الکتروستاتیکی بسیار بزرگ، باید نیروی جاذبه بسیار بزرگی وجود داشته باشد.

(ب) بزرگی نیروی گرانشی میان همین دو پروتون چقدر است؟

---

**نکته کلیدی** چون پروتونها، ذره هستند بزرگی نیروی گرانشی وارد بر یکی از طرف دیگری با قانون نیوتون برای نیروی گرانشی (معادله ۱۷-۲) داده می‌شود.



محاسبه: به ازای  $m_p (= 1/67 \times 10^{-27} \text{ kg})$  که جرم یک پروتون را نشان می‌دهد، معادله ۱۷-۲ چنین به دست می‌دهد

$$F = G \frac{m_p^2}{r^2}$$

$$= \frac{(6/67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) (1/67 \times 10^{-27} \text{ kg})^2}{(4/0 \times 10^{-15} \text{ m})^2}$$

$$= 1/2 \times 10^{-35} \text{ N} \quad (\text{پاسخ})$$

**ضعیف در مقابل قوی:** این نتیجه حاکی از آن است که نیروی (جاذبه) گرانشی بسیار ضعیفتر از آن است که با نیروهای دافعه الکتروستاتیکی میان پروتونها در یک هسته مقابله کند. به جای این، پروتونها با نیرویی بسیار بزرگ به یکدیگر مقید شده‌اند که نیروی هسته‌ای قوی نامیده می‌شود- نیرویی که بین پروتونها (و نوترونها) هنگامی که در نزدیکی یکدیگر، مثلاً در یک هسته، قرار دارند عمل می‌کند.

اگر چه نیروی گرانشی به مراتب ضعیفتر از نیروی الکتروستاتیکی است، ولی در وضعیتهای بزرگ - مقیاس مهم تر است، زیرا همواره به صورت جاذبه است. یعنی، این نیرو می تواند بسیاری از اجسام کوچک را به صورت اجسام بزرگ با جرمهای بزرگ، از قبیل سیاره ها و ستاره ها، که نیروهای گرانشی بزرگی اعمال می کنند، گرد هم آورد. از طرف دیگر، نیروی الکتروستاتیکی برای بارهای هم علامت دافعه است و در نتیجه نمی تواند بارهای مثبت یا بارهای منفی را به صورتی متمرکز کند که بتوانند به هم نیروی الکتروستاتیکی بزرگی وارد کنند.

اهمیت نیروی  
گرانشی در  
مقیاسهای  
بزرگ

# بار الکتریکی پایسته است

اگر یک میله شیشه‌ای را با ابریشم مالش دهید، بار مثبتی در میله ظاهر می‌شود. اندازه‌گیریها نشان می‌دهد که در ابریشم نیز باری منفی به همان بزرگی ظاهر می‌شود. این اشاره بر آن دارد که مالش باری ایجاد نمی‌کند، بلکه فقط آن را از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌کند و بدین ترتیب خنثی بودن الکتریکی جسم را در حین این فرایند برهم می‌زند. این فرضیه پایستگی بار که نخستین بار توسط بنیامین فرانکلین پیشنهاد شد، هم برای اجسام باردار بزرگ - مقیاس و هم برای اتمها، هسته‌ها، و ذره‌های بنیادی با بررسیهای دقیقی مورد تأیید قرار گرفته و هیچ استثنایی تاکنون یافت نشده است. بنابراین، بار الکتریکی را نیز به فهرست کمیت‌هایی که از قانون پایستگی پیروی می‌کنند - شامل انرژی و اندازه حرکت‌های خطی و زاویه‌ای - می‌افزاییم.

انتقال بار بین  
میله شیشه  
ای و پارچه  
پشمی

سایر  
پایستگی‌ها  
در فیزیک

مثالهای مهم پایستگی بار در واپاشی پرتوزای هسته‌ها بروز می‌کند، که در آن یک هسته تبدیل به نوع دیگری از هسته می‌شود. برای مثال، هسته اورانیوم- $^{238}\text{U}$  با گسیل یک ذره  $\alpha$  به توریوم- $^{234}\text{Th}$  تبدیل می‌شود. چون ساختار این ذره گسیل شده همان ساختار هسته هلیوم- $^4$  است، به صورت  $^4\text{He}$  نمایش داده می‌شود. عددی که در نام هسته‌ها و به صورت یک شاخص بالا در نماد هسته استفاده می‌شود، عدد جرمی نام دارد و برابر با عدد کل پروتونها و نوترونها در هسته است. برای مثال، عدد کل در  $^{238}\text{U}$  برابر با ۲۳۸ است. تعداد پروتونها در یک هسته عدد اتمی  $Z$  است که برای تمام عنصرها در پیوست ج فهرست شده است. از آن فهرست در می‌یابیم که در واپاشی



هسته مادر  $^{238}\text{U}$  شامل ۹۲ پروتون (با بار  $+92e$ )، هسته دختر  $^{234}\text{Th}$  شامل ۹۰ پروتون (با بار  $+90e$ )، و ذره آلفای گسیل

پایستگی بار  
در واپاشی  
پرتوزای  
هسته اتم  
اورانیوم

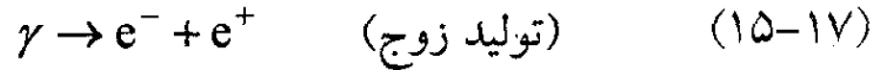
شده  ${}^4\text{He}$  شامل ۲ پروتون (با بار  $+2e$ ) است. چنانچه ملاحظه می‌شود بار کل، پیش و پس از واپاشی برابر با  $+92e$  است؛ بنابراین بار پایسته است. (عدد کل پروتونها و نوترونها نیز پایسته است:  $238$  پیش از واپاشی و  $234 + 4 = 238$  پس از واپاشی.)

مثال دیگری از پایستگی بار هنگامی رخ می‌دهد که یک الکترون  $e^-$  (که بار آن  $-e$  است) و پاد ذره آن، پوزیترون  $e^+$  (که بار آن  $+e$  است)، دستخوش یک فرایند نابودی می‌گردند که در آن دو ذره به دو پرتوگاما (نور پر انرژی) تبدیل می‌شوند

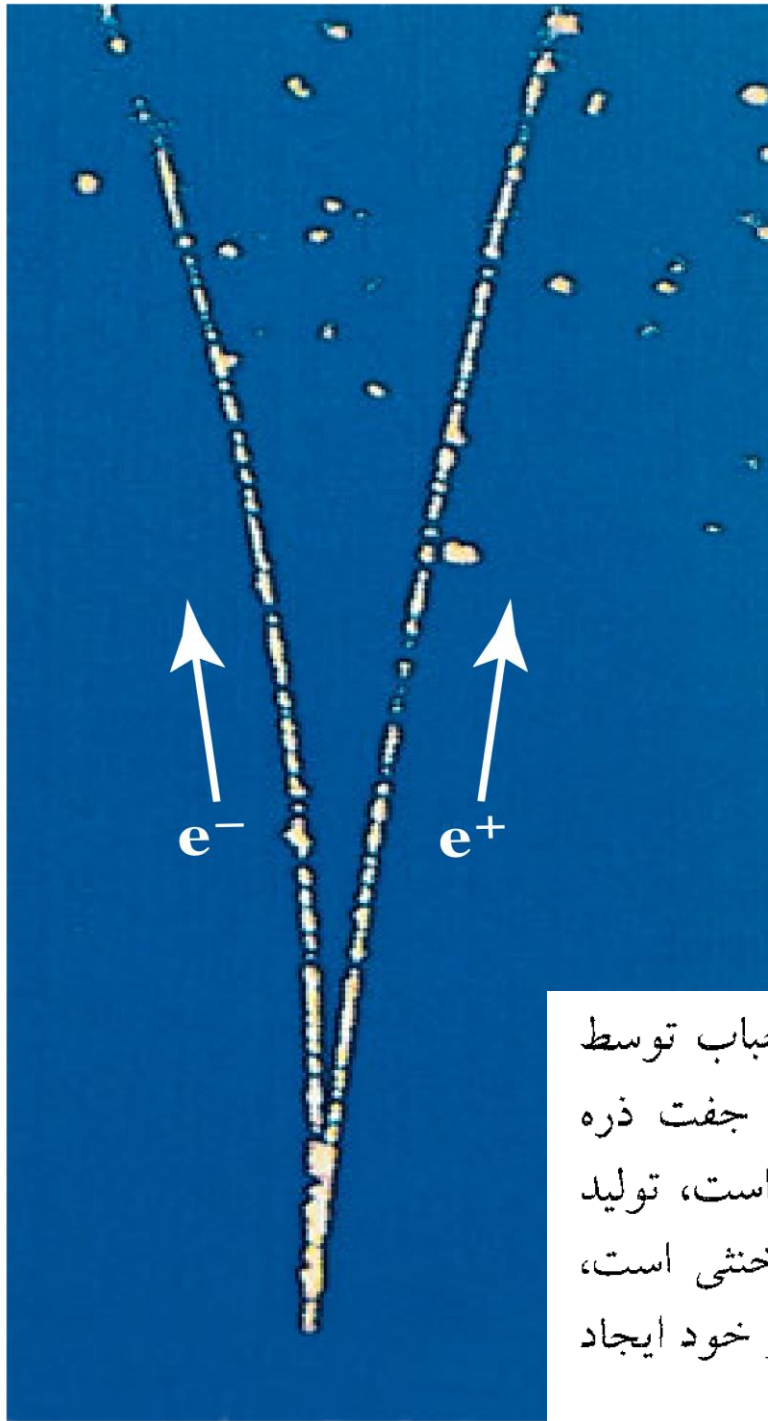
$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (\text{نابودی}) \quad (14-17)$$

هنگام به کار بردن اصل پایستگی بار باید بارها را به طور جبری و با در نظر گرفتن علامتهای آنها با هم جمع کنیم. بنابراین، در فرایند نابودی معادله  $14-17$ ، بار خالص دستگاه پیش و پس از فرایند برابر با صفر است. بار پایسته است.

در فرایند تولید زوج که وارون فرایند نابودی است نیز بار پایسته است. در این فرایند پرتو گاما به یک الکترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود



شکل ۱۷-۱۲ یک چنین فرایند تولید زوجی را که در یک اتاقک حباب رخ داده است، نشان می‌دهد. پرتو گاما از پایین وارد اتاقک شده و در نقطه‌ای به یک الکترون و یک پوزیترون تبدیل شده است. چون این ذره‌های جدید، باردار و در حال حرکت هستند، هر کدام ردی از حبابهای کوچک را بر جای گذاشته‌اند. (دنباله‌ها از این رو خمیده شده‌اند که یک میدان مغناطیسی در اتاقک برقرار است.) پرتو گاما، که از لحاظ الکتریکی خنثی است، هیچ ردی از خود به جای نگذاشته است. با این حال شما به دقت می‌توانید مکانی را که تولید زوج رخ داده است تعیین کنید- این مکان در نوک V خمیده، یعنی جایی است که ردهای الکترون و پوزیترون شروع می‌شوند.



شکل ۱۷-۱۲ عکسی از رد حبابهایی که در یک اتاقک حباب توسط یک الکترون و یک پوزیترون بر جای مانده است. این جفت ذره توسط پرتو گامایی که مستقیماً از پایین وارد اتاقک شده است، تولید شده‌اند. با توجه به اینکه پرتو گاما از لحاظ الکتریکی خنثی است، مانند الکترون یا پوزیترون ردی از حبابها را در امتداد مسیر خود ایجاد نکرده است.

## بازنگری و خلاصه درس

بار الکتریکی قدرت بر هم کنش الکتریکی یک ذره با اجسام اطراف آن به بار الکتریکی ذره بستگی دارد که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بارهای هم‌علامت، یکدیگر را دفع و بارهای با علامت مخالف، یکدیگر را می‌ربایند. جسمی با مقدارهای مساوی از این دو نوع بار، از لحاظ الکتریکی خنثی است، و در صورت عدم توازن این دو نوع بار، از لحاظ الکتریکی باردار است.

رساناها موادی هستند که در آنها تعداد قابل توجهی از ذره‌های باردار (الکترونها درون فلزها) آزادانه حرکت می‌کنند. ذره‌های باردار در نیمرساناها یا عایقها آزادانه حرکت نمی‌کنند.

کولن و آمپر یکای SI بار، کولن (C) است. این یکا برحسب یکای جریان، آمپر (A) تعریف شده است، که عبارت از باری است که از یک نقطه معین در ۱ ثانیه به هنگام عبور جریان ۱ آمپر از آن نقطه، می‌گذرد:

$$1 C = (1 A)(1 s)$$



این بر اساس رابطه میان جریان  $i$  و آهنگ  $dq/dt$  است که با آن بار از یک نقطه می‌گذرد

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{جریان الکتریکی}) \quad (3-17)$$

**قانون کولن** قانون کولن، نیروی الکتروستاتیکی میان بارهای الکتریکی کوچک (نقطه‌ای)  $q_1$  و  $q_2$  را که به حالت سکون (یا تقریباً ساکن) و به فاصله  $r$  از هم قرار گرفته‌اند، توصیف می‌کند

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{قانون کولن}) \quad (4-17)$$

که در اینجا  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$  ثابت گذردهی، و  $1/4\pi\epsilon_0 = k = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$  است.

نیروی جاذبه یا دافعه میان بارهای نقطه‌ای در حال سکون، در امتداد خط واصل دو بار اثر می‌کند. اگر بیش از دو بار وجود داشته باشد، معادله 4-17 برای هر جفت بار برقرار است. آنگاه نیروی خالص وارد بر هر بار، با استفاده از اصل برهم نهی به

دست می‌آید که جمع برداری نیروهای وارد بر آن بار توسط نیروهای دیگر است.

دو قضیهٔ پوستهٔ الکتروستاتیک عبارت‌اند از پوسته‌ای با بار یکنواخت، ذره‌ای باردار را که در خارج پوسته قرار دارد به گونه‌ای جذب یا دفع می‌کند که گویی بار پوسته در مرکز آن متمرکز شده است. اگر ذرهٔ بارداری در داخل پوسته‌ای با بار یکنواخت قرار داشته باشد، هیچ نیروی الکتروستاتیکی خالصی از پوسته به ذره وارد نمی‌شود.

**بار بنیادی** بار الکتریکی کوانتیده است: هر باری را می‌توان به صورت  $ne$  نوشت، که در آن  $n$  یک ثابت مثبت یا منفی و  $e$  یک ثابت طبیعت به نام **بار بنیادی** ( $C \approx 1/602 \times 10^{-19}$ ) است. بار الکتریکی پایسته است: بار خالص هر دستگاه منزوی نمی‌تواند تغییر کند.