

# فصل ۵

## الکتروسیسته ساکن

شماره صفحه	عنوان
۲۲۸	مفاهیم اولیه الکتروسیسته ساکن
۲۲۹	روش های باردار کردن اجسام
۲۳۱	الکتروسکوپ
۲۳۳	قانون کولن
۲۳۴	اصل برهم نهی نیروهای الکتروستاتیکی
۲۳۷	میدان الکتریکی
۲۳۹	برهم نهی میدان های الکتریکی
۲۴۱	خط های میدان الکتریکی
۲۴۲	انرژی پتانسیل الکتریکی
۲۴۶	اختلاف پتانسیل الکتریکی
۲۵۰	میدان الکتریکی در داخل رساناها
۲۵۱	مفاهیم مقدماتی خازن
۲۵۴	انرژی ذخیره شده در خازن
۲۵۵	پاسخنامه تست
۲۸۳	پاسخنامه صفر کلوین
۲۹۰	پاسخنامه آزمون ۱
۲۹۱	پاسخنامه آزمون ۲

کودکی که در شکل می بینید در حال سر خوردن روی یک سرسره پلاستیکی کوچک است. موهای این پسر بچه، در اثر مالش لباسش با سرسره، باردار شده است. ولتاژ بدن این کودک، در این حالت در حدود  $5000V$  است. اما سؤال مهم، این است که چرا این ولتاژ بسیار بالا، به کودک صدمه ای نمی زند؟ جواب این سؤال را در همین فصل خواهید خواند.

# مفاهیم اولیه الکتریسیته ساکن

## بار الکتریکی

در طبیعت دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. بنیامین فرانکلین این دو نوع بار الکتریکی را بار مثبت و بار منفی نام‌گذاری کرد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بارهای همنام یکدیگر را می‌رانند و بارهای ناهمنام یکدیگر را می‌ربایند. بار الکتریکی، یک کمیت نرده‌ای است که آن را با نماد  $q$  نمایش می‌دهیم و یکای آن در SI، کولن (C) نام دارد. یک کولن مقدار بار بزرگی است؛ به همین دلیل معمولاً از واحدهای میکروکولن ( $\mu\text{C}$ ) و نانوکولن (nC) استفاده می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم الکترون‌ها ( $e$ ) بار منفی و پروتون‌ها ( $p$ ) بار مثبت دارند. مقدار بار الکترون با مقدار بار پروتون برابر است. بار الکتریکی یک پروتون  $+1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و بار الکتریکی یک الکترون  $-1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$  است. این مقدار را «بار بنیادی (پایه)» می‌نامیم.



- ۱ همه مواد از اتم‌ها تشکیل شده‌اند و اتم‌ها نیز از الکترون، پروتون و نوترون درست شده‌اند.
- ۲ اگر تعداد الکترون‌های یک جسم بیشتر از تعداد پروتون‌هایش باشد، می‌گوییم بار جسم، منفی است.
- ۳ اگر تعداد پروتون‌های یک جسم بیشتر از تعداد الکترون‌هایش باشد، می‌گوییم بار جسم، مثبت است.
- ۴ اگر تعداد الکترون‌ها و پروتون‌های یک جسم برابر باشد، بار جسم صفر است و به اصطلاح می‌گوییم جسم، خنثی است.

## پایستگی بار الکتریکی

وقتی یک میله پلاستیکی را با یک پارچه پشمی مالش می‌دهیم، تعداد بسیار زیادی الکترون از پارچه پشمی به میله پلاستیکی منتقل می‌شود. بر اثر این کار، بار پارچه پشمی مثبت و بار میله پلاستیکی منفی می‌شود؛ یعنی پارچه پشمی بار الکتریکی از دست داده و میله پلاستیکی دقیقاً به همان اندازه بار الکتریکی به دست آورده است. بار الکتریکی نه خلق می‌شود و نه از بین می‌رود بلکه تنها از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این امر «پایستگی بار الکتریکی» گفته می‌شود.

## بار الکتریکی مثالی از یک کمیت کوانتومی

کمیت کوانتومی، کمیتی است که اندازه‌اش مضرب صحیحی از یک مقدار پایه است. به این مقدار پایه، «کوانتوم» می‌گوییم. بار الکتریکی، نمونه خوبی از یک کمیت کوانتومی است. بار الکتریکی یک جسم مضرب صحیحی از بار الکترون است. اگر از جسمی  $n$  الکترون بگیریم یا به آن جسم  $n$  الکترون بدهیم، بار الکتریکی جسم از رابطه زیر به دست می‌آید:

FORMULA

$$q = \pm ne$$

بار بنیادی (پایه)	تعداد الکترون	بار الکتریکی	شناسنامه فرمول
$e$	$n$	$q$	نماد
کولن (C)	-	کولن (C)	یکا

$e$  اندازه بار یک الکترون است ( $e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).



بار الکتریکی یک میله شیشه‌ای برابر  $5 \text{ nC}$  است. اگر این میله شیشه‌ای را با پارچه کتان مالش دهیم،  $5 \times 10^{10}$  الکترون از میله شیشه‌ای به پارچه کتان منتقل می‌شود. بار نهایی میله شیشه‌ای برحسب نانو کولن کدام است؟ ( $e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

۱) -۳      ۲) -۱۳      ۳) +۳      ۴) +۱۳

پاسخ: میله شیشه‌ای به اندازه  $5 \times 10^{10}$  الکترون از دست داده است.

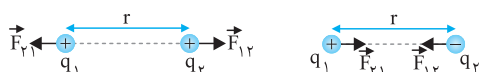
بار این تعداد الکترون را حساب می‌کنیم:  
 بار اولیه میله شیشه‌ای برابر  $5 \text{ nC}$  بوده است و حالا به اندازه  $-8 \text{ nC}$  از آن گرفته‌ایم؛ یعنی بار میله شیشه‌ای مثبت‌تر می‌شود و به  $+13 \text{ nC}$  می‌رسد.



۳ تشخیص رسانا یا نارسانا بودن یک جسم: برای تشخیص رسانا یا نارسانا بودن یک جسم، کافی است یک سر جسم مورد نظر را در دستمان (بدون دستکش) بگیریم و سر دیگر آن را به کلاهک الکتروسکوپ بردار تماس دهیم. اگر جسم مورد نظر رسانا باشد، برکه‌های الکتروسکوپ به هم می‌چسبند؛ زیرا بار الکتریکی از طریق جسم و بدن ما به زمین منتقل می‌شود و الکتروسکوپ خنثی می‌شود و اگر جسم مورد نظر نارسانا باشد، برکه‌های الکتروسکوپ حرکت نمی‌کنند.

دانش‌آموز عزیز، حالا می‌تونی تست شماره ۱۱۲۵ تا ۱۱۳۴ رو حل کنی.

## قانون کولن



در قسمت قبل، گفتیم که بارهای همنام به یکدیگر نیروی دافعه و بارهای ناهمنام به یکدیگر نیروی جاذبه وارد می‌کنند. این نیرو همواره در راستای خط واصل بین دو بار است.

نیروهایی که بارهای  $q_1$  و  $q_2$  به هم وارد می‌کنند، عمل و عکس‌العمل (کنش و واکنش) هستند؛ یعنی اندازه  $\vec{F}_{12}$  با اندازه  $\vec{F}_{21}$  برابر است؛ ولی در جهت مخالف یکدیگر هستند.

$\vec{F}_{21}$  نیرویی است که بار  $q_2$  به بار  $q_1$  وارد می‌کند و  $\vec{F}_{12}$  نیرویی است که بار  $q_1$  به بار  $q_2$  وارد می‌کند. به زبان ریاضی می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow |\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F$$

نیرویی که دو بار نقطه‌ای  $q_1$  و  $q_2$  به یکدیگر وارد می‌کنند، از رابطه زیر به دست می‌آید که به قانون کولن معروف است:

FORMULA

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

شناسنامه فرمول	نیرو	ثابت کولن	بار الکتریکی	فاصله دو بار
نماد	F	k	q	r
یکا	نیوتون (N)	$(N \cdot m^2 / C^2)$	کولن (C)	متر (m)

$$k \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

در این رابطه، k «ثابت الکتروستاتیکی» یا «ثابت کولن» نام دارد و برابر است با:



۱ ثابت کولن (k) را می‌توان برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی خلأ ( $\epsilon_0$ ) نوشت:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

۲ قانون کولن بیان می‌کند نیروی الکتریکی که دو بار نقطه‌ای  $q_1$  و  $q_2$  به یکدیگر وارد می‌کنند، با حاصل ضرب اندازه بارها ( $q_1 q_2$ ) رابطه مستقیم و با مجذور فاصله بارها از هم ( $r^2$ ) رابطه عکس دارد.

$$F \propto q_1 q_2 \quad \text{و} \quad F \propto \frac{1}{r^2}$$

۳ بنابراین می‌توانیم قانون کولن را به صورت  $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$  بنویسیم؛ ولی در استفاده از آن دقت کنید که علامت بارهای  $q_1$  و  $q_2$  وارد فرمول نمی‌شود.



۱ دو ذره باردار در فاصله r از هم قرار دارند و به هم نیروی F وارد می‌کنند. اندازه یکی از بارها را دو برابر و اندازه بار دیگر را چهار برابر می‌کنیم. نیروی الکتریکی بین دو ذره، چند برابر می‌شود؟

۲ اگر فاصله دو ذره  $q_1$  و  $q_2$  را سه برابر کنیم، نیروی بین آن‌ها چند برابر می‌شود؟

پاسخ

۱ می‌دانیم که F با  $q_1 \times q_2$  متناسب است؛ پس وقتی  $q_1$  را دو برابر و  $q_2$  را چهار برابر می‌کنیم، نیروی F هم  $2 \times 4$  برابر یعنی ۸ برابر می‌شود.

۲ نیروی F با  $r^2$  نسبت عکس دارد؛ پس نیرو،  $\frac{1}{3^2}$  برابر یعنی  $\frac{1}{9}$  برابر می‌شود.

## مفاهیم اولیه الکتریسیته ساکن

بار الکتریکی، یک کمیت کوانتومی است و به صورت  $q = ne$  نوشته می‌شود که  $n$  مضرب صحیحی از  $e$ ، بار الکترون است.

۱)  $A \rightarrow \leftarrow B$

۲)  $\leftarrow B \rightarrow C$

تحلیل گزینه‌ها

گفتیم در حالت کلی، اجسام باردار، اجسام رسانا و خنثی را جذب می‌کنند. همچنین دو جسم با بار ناهمنام نیز یکدیگر را می‌ریانند؛ پس با گزاره اول نمی‌توانیم باردار بودن یا نبودن و نوع بار  $A$  و  $B$  را تعیین کنیم؛ اما از گزاره دوم متوجه می‌شویم که  $B$  و  $C$  لزوماً دارای بارهای همنام هستند (رد ۲ و ۳). اگر  $A$  و  $C$  نیز همنام باشند؛ پس هر سه بار  $A$ ،  $B$  و  $C$  همنام می‌شوند و دیگر  $A$  و  $B$  نمی‌توانند یکدیگر را جذب کنند (رد ۱).

۱ شرط ۱  $\leftarrow B \rightarrow A$

۲ شرط ۲  $\leftarrow B \rightarrow C$

یا شرط ۱  $\leftarrow B \rightarrow A$

۲ شرط ۲  $\leftarrow B \rightarrow C$

۴  $A$  بدون بار،  $B$  باردار  
پس در ۴ هر دو شرط برقرار است.

۱۱۵۳ می‌دانیم یک کولن بار، مقدار زیادی است؛ ولی بار الکتریکی هر الکترون برابر  $1/6 \times 10^{-19}$  کولن است. در این صورت بار الکتریکی ۶ عدد الکترون، آنقدر کوچک است که نمی‌تواند روی یک کولن بار اثری بگذارد؛ بنابراین بار خالص، همان یک کولن است.

۱۱۵۴ بار الکتریکی، مضرب صحیحی از بار الکترون است و به صورت  $q = ne$  نوشته می‌شود. تنها گزینه‌ای که مضرب صحیحی از بار الکترون است، ۲ است.

۱۱۵۷ بار الکتریکی جسم از رابطه مقابل محاسبه می‌شود:  
دقت داشته باشید  $q$  برحسب کولن جایگزین می‌شود و هر نانوکولن برابر  $10^{-9}$  کولن است.

۱۱۵۸ بار الکتریکی یک جسم همواره مضرب صحیحی از بار پایه است و اندازه آن از رابطه  $q = \pm ne$  به دست می‌آید:

۱۱۵۹ می‌دانیم  $n$  در واقع همان تعداد الکترون‌های جابه‌جا شده است و یکا ندارد.  
اگر بار جسمی مثبت باشد، الکترون از دست داده است؛ یعنی جرمش کم می‌شود و اگر بار جسمی منفی باشد، الکترون اضافی دارد؛ یعنی جرمش زیاد شده است.

۱۱۶۰ از آنجا که بار کره مثبت است؛ پس الکترون از دست داده است. حالات تعداد آن‌ها را به دست می‌آوریم:

۱۱۶۱ بار  $q$  از فرمول  $q = ne$  به دست می‌آید که  $n$  تعداد الکترون‌ها است.

$q = ne \Rightarrow q = 10^9 \times 1/6 \times 10^{-19} = 1/6 \times 10^{-9}$  (بار به ازای هر سانتی‌متر)  
 $q = 8 \times 1/6 \times 10^{-9} = 12/8 \times 10^{-9} C$   
 $q = -12/8 \times 10^{-9} C$   
 $q_2 = 5q_1 \Rightarrow \Delta q = q_2 - q_1 = 4q_1$   
با گرفتن  $5 \times 10^{13}$  الکترون از جسم به اندازه  $\Delta q$  به بار مثبت جسم افزوده شده است. با محاسبه  $\Delta q$  بار اولیه جسم را محاسبه می‌کنیم:

۱۱۶۲ ابتدا بار دو میلیون الکترون را حساب می‌کنیم:  
از آنجا که الکترون‌ها از  $A$  به  $B$  می‌روند، بار  $A$  مثبت و بار  $B$  منفی است. دقت کنید که جسم  $A$  از ابتدا مقداری بار منفی دارد.

$q_A = -1/6 \times 10^{-13} + 3/2 \times 10^{-13} = +1/6 \times 10^{-13} C$        $q_B = -3/2 \times 10^{-13} C$

## روش‌های باردار کردن اجسام

انتقال بار الکتریکی از یک جسم به جسمی دیگر، به کمک الکترون‌ها انجام می‌شود.

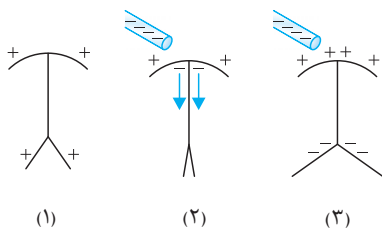
۱۱۶۳ می‌دانیم در این جدول، مواد پایین‌تر، الکترون‌خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون‌ها از ماده بالاتر جدول به ماده‌ای که پایین‌تر قرار دارد، منتقل می‌شوند. در مالش تفلون با نایلون، الکترون‌ها از نایلون به تفلون منتقل می‌شوند؛ بنابراین تعداد الکترون‌های میله افزایش می‌یابد. در مالش شیشه با ابریشم، الکترون‌ها از شیشه به ابریشم منتقل می‌شوند و تعداد الکترون‌های شیشه کاهش می‌یابد. همچنین در مالش شیشه با پشم و نیز مالش سرب با ابریشم، الکترون‌های میله کاهش می‌یابند.

۱۱۶۴ براساس جدول سری الکتریسیته مالشی در صورت سؤال، بار هر کدام از جسم‌ها پس از مالش قابل تشخیص است. در این سؤال، جسم  $A$  بار مثبت، جسم  $C$  بار منفی، جسم  $B$  بار مثبت و جسم  $D$  بار منفی خواهد داشت؛ بنابراین هر دو جسم که بار مخالف دارند، می‌توانند یکدیگر را جذب کنند. مانند اجسام  $C$ ،  $A$  و اجسام  $D$ ،  $B$  و اجسام  $A$ ،  $D$  و اجسام  $B$ ،  $C$ .

۱۱۶۷ می‌دانیم اندازه بار هر دو جسم با هم برابر است. ابتدا اندازه بار الکتریکی آن‌ها را به دست می‌آوریم:

سپس الکترون‌ها از میله شیشه‌ای به پارچه ابریشمی منتقل می‌شوند؛ پس بار میله شیشه‌ای مثبت و بار پارچه ابریشمی منفی است.





قبل از نزدیک شدن میله به الکتروسکوپ، تیغه‌های آن باز است؛ یعنی دارای بار هستند. در وضعیت (۱) وقتی میله منفی به کلاهک نزدیک می‌شود، تیغه‌ها بسته می‌شوند؛ یعنی تیغه‌ها بار مخالف میله (که همان بار مثبت است) داشته‌اند. پس با نزدیک شدن میله منفی الکترون‌ها از کلاهک به تیغه‌ها می‌آیند و بار تیغه‌ها را در وضعیت (۲) خنثی می‌کنند. با نزدیک‌تر بردن میله، رانش بارهای منفی به سمت تیغه‌ها ادامه می‌یابد و تیغه‌ها دوباره باز می‌شوند؛ پس در وضعیت (۳) بار تیغه‌ها منفی است.

## قانون کولن

با توجه به آنچه که در درس نامه آمده است، ۱ درست است. ۱۱۳۵

می‌دانیم  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  است؛ پس واحد  $k$  و  $\epsilon_0$  معکوس یکدیگرند و  $\epsilon_0$  برحسب یکای  $C^2 / N.m^2$  تعریف می‌شود. ۱۱۳۶

این شکل ترازوی پیچشی نام دارد که طرحی از آزمایش کولن را نشان می‌دهد. در این وسیله یک میله نارسنای سبک افقی که از وسط توسط یک رشته سیم کشسان و نازک آویخته شده است، قرار دارد. به یک سر میله، گوی باردار مثبت کوچک و به سر دیگر آن یک قرص متصل است. گوی دیگری با بار منفی از حفره‌ای به داخل استوانه شیشه‌ای که درجه‌هایی بر سطح آن حک شده است، وارد می‌کنند. به کمک درجه‌های حک شده بر سطح استوانه، زاویه چرخش میله و زاویه بین گوی‌ها اندازه‌گیری می‌شود که به کمک آن مقدار نیروی الکتریکی را محاسبه می‌کنند. ۱۱۳۷

به کمک قانون کولن  $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$  به این نتیجه می‌رسیم که نیروی کولنی  $F$  با  $r$  رابطه خطی ندارد (رد ۲ و ۳) و با افزایش  $r$ ، نیروی کولنی  $F$  کاهش می‌یابد (رد ۳ و ۴)؛ بنابراین ۱ درست است. ۱۱۳۸

روش اول طبق قانون کولن می‌توانیم بنویسیم: ۱۱۳۹

$$F = k \frac{q_1q_2}{r^2} \rightarrow 18 = \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-6}}{r^2} \Rightarrow r^2 = 10^{-2} \Rightarrow r = 10^{-1} m = 10 \text{ cm}$$

$$F = k \frac{q_1q_2}{r^2} \rightarrow 18 = \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times 4}{r^2} \Rightarrow r = 10 \text{ cm}$$

روش دوم

اگر بار برحسب میکروکولن و فاصله برحسب سانتی‌متر باشد، می‌توانیم بدون تبدیل واحد، مقادیر را در قانون کولن جایگزین کنیم، در صورتی که مقدار  $k$  را  $90 \text{ N.cm}^2 / \mu\text{C}^2$  قرار دهیم. ۱۱۴۰

با نوشتن فرمول نیرو، اندازه  $q_1$  قابل محاسبه است: ۱۱۴۱

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \Rightarrow \frac{kq_1 \times 5q_1}{r^2} = 0.02 \Rightarrow \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times q_1^2}{3^2} = 2 \times 10^{-2} \Rightarrow q_1^2 = 4 \times 10^{-12} \Rightarrow q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ C} = 2 \mu\text{C}$$

$$F_{11} = F_{22} = \frac{kq^2}{r^2} \Rightarrow F = \frac{9 \times 10^9 \times 16 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-2}} = 4 \times 10^{-1} \text{ N}$$

ابتدا نیروی کولنی بین دو بار را به دست می‌آوریم: ۱۱۴۲

حالا از قانون دوم نیوتون، شتاب حرکت هر ذره را به دست می‌آوریم:  $F_{\text{خالص}} = ma \Rightarrow 4 \times 10^{-1} = 2 \times 10^{-2} a \Rightarrow a = 20 \text{ m/s}^2$  پس شتاب هر دو ذره نیز با هم برابر است. ۱۱۴۳

با توجه به فرمول  $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$  می‌دانیم، نیروی الکتریکی با ثابت ماندن اندازه بارها، با مجذور فاصله رابطه عکس دارد؛ پس: ۱۱۴۴

$$\frac{F}{F'} = \left(\frac{r'}{r}\right)^2 \xrightarrow{F'=2F} \left(\frac{r'}{r}\right)^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{r'}{r} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow r' = \frac{\sqrt{2}}{2} r$$

می‌دانیم نیروی کولنی با اندازه هر بار، رابطه مستقیم و با مجذور فاصله، رابطه عکس دارد؛ در نتیجه: ۱۱۴۵

$$\frac{F'}{F} = \frac{q'_1}{q_1} \times \frac{q'_2}{q_2} \times \left(\frac{r}{r'}\right)^2 \Rightarrow \frac{q'_1 = \frac{1}{2}q_1}{r' = \frac{1}{2}r} \rightarrow \frac{F'}{F} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{2}{1}\right)^2 \Rightarrow \frac{F'}{F} = 2$$

می‌دانیم پس از تماس دو گوی، بار هر دوی آن‌ها برابر میانگین بار آن‌ها در حالت اول می‌شود:  $q'_1 = q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2} = \frac{q_1 - 10q_1}{2} = -\frac{9}{2}q_1$  ۱۱۴۶

حالا به سادگی با استفاده از قانون کولن، نسبت نیروها را در دو حالت پیدا می‌کنیم:  $F = k \frac{q_1q_2}{r^2} \xrightarrow{r=r'=d} \frac{F'}{F} = \frac{|q'_1q'_2|}{|q_1q_2|} = \frac{\frac{9}{2}q_1 \times \frac{9}{2}q_1}{q_1 \times 10q_1} \Rightarrow \frac{F'}{F} = \frac{81}{40}$  ۱۱۴۷

رابطه نیروی کولن بین دو گلوله باردار در حالت اول را می‌نویسیم: ۱۱۴۸

$$F = \frac{k|q_1||q_2|}{r^2} \Rightarrow \frac{9 \times 10^9 \times |q_1||q_2|}{(e/3)^2} = 4 \Rightarrow |q_1||q_2| = 4 \mu\text{C} \Rightarrow q_1q_2 = -4 \mu\text{C}$$

چون دوبار همدیگر را جذب می‌کنند؛ پس ناهمنام‌اند. با توجه به گزینه‌ها، تنها در ۲ اندازه حاصل ضرب دو بار ۴۰ می‌شود؛ اما به حل سؤال ادامه می‌دهیم.



باتوجه به نمودار و از رابطه  $U = \frac{1}{2} CV^2 \Rightarrow 240 \times 10^{-6} = \frac{1}{2} C(4)^2 \Rightarrow C = 30 \times 10^{-6} F$  ظرفیت خازن را محاسبه می‌کنیم: ۱۳۶۵

حالا از رابطه  $U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$  بار الکتریکی ذخیره شده در ولتاژ  $V$  را محاسبه کنیم:

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \Rightarrow 6 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{30 \times 10^{-6}} \Rightarrow Q^2 = 36 \times 10^{-8} \Rightarrow Q = 6 \times 10^{-4} C = 60 \mu C$$

طبق رابطه  $E = \frac{V}{d}$  با دور شدن صفحه‌ها از هم و ثابت ماندن  $V$ ، مقدار  $E$  کاهش می‌یابد و داریم: ۱۳۶۶

$$\begin{cases} E_1 = \frac{V}{d_1} = \frac{15}{0.3 \times 10^{-2}} = 5 \times 10^4 V/m \\ E_2 = \frac{V}{d_2} = \frac{15}{0.5 \times 10^{-2}} = 3 \times 10^4 V/m \end{cases} \Rightarrow |E_2 - E_1| = |3 \times 10^4 - 5 \times 10^4| = 2 \times 10^4 V/m$$

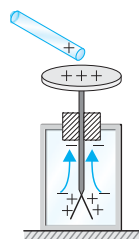
### تمرین کلیدی

می‌دانیم که بار الکتریکی مضرب صحیحی از بار الکترون است، یعنی باید به صورت  $q = ne$  نوشته شود. حالا اگر بار یک الکترون را به صورت  $e = 1/3 \times 10^{-19} C$  فرض کنیم بار هر سه قطره روغن، مضرب صحیحی از آن می‌شود. به محاسبات نگاه کنید:

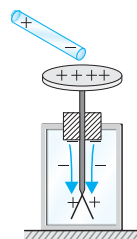
$$3/90 \times 10^{-19} C = 3 \times 1/3 \times 10^{-19} C \Rightarrow n = 3 \quad \text{و} \quad 6/50 \times 10^{-19} C = 5 \times 1/3 \times 10^{-19} C \Rightarrow n = 5$$

$$9/10 \times 10^{-19} C = 7 \times 1/3 \times 10^{-19} C \Rightarrow n = 7$$

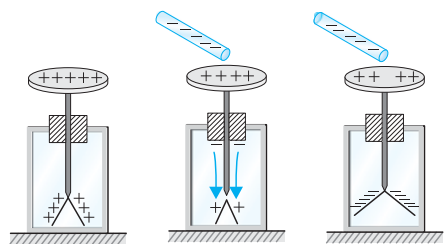
کره  $B$  در ابتدا باری ندارد و بار القایی  $-Q$  روی کره  $A$  و بار القایی  $+Q$  روی کره  $C$  القا می‌شود. وقتی کره  $B$  را با کره  $A$  تماس می‌دهیم، بار  $-Q$  بین آن‌ها نصف می‌شود و هر کدام بار  $-Q/2$  را پیدا می‌کنند. حالا اگر کره  $B$  را با کره  $C$  تماس دهیم، بار نهایی مجموع  $Q/2$  می‌شود.  $(Q + (-Q/2)) = Q/2$  و این بار  $Q/2$  هم بین کره‌های  $B$  و  $C$  تقسیم می‌شود؛ یعنی به هر کدام بار  $Q/4$  می‌رسد. ۱۳۶۸



۲) اگر بار میله مثبت باشد، مشخص است که با نزدیک شدن به کلاهک بارهای منفی را از تیغه‌ها جذب خود می‌کند، در نتیجه بار مثبت تیغه‌ها افزایش می‌یابد و تیغه‌ها بازتر می‌شوند.



۱) تحلیل گزینه‌ها: اگر میله بدون بار باشد بر اثر القا بارها مطابق شکل پخش می‌شوند، در نتیجه این توزیع بار، بار منفی میله که نزدیک کلاهک است باعث رانش الکترون‌ها به تیغه می‌شود و بار آن‌ها را می‌کاهد. ولی این رانش بار تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که بار تیغه‌ها خنثی شده و کاملاً بسته شود و تیغه‌ها همچنان بسته می‌مانند. ۱۳۶۹



۳) و ۴) تا اینجا مشخص شده که میله نه بدون بار است و نه بار آن مثبت است. پس بار میله منفی است. حالا برای مشخص شدن بار تیغه‌ها و کلاهک در پایان آزمایش گفته‌های سؤال را بررسی می‌کنیم. ابتدا بار کلاهک و تیغه‌ها مثبت است. با نزدیک شدن میله به کلاهک، بارهای منفی به سمت تیغه‌ها رانده شده و بار تیغه‌ها را خنثی می‌کند در نتیجه لحظه‌ای تیغه‌ها بسته می‌شوند رانش بار منفی ادامه می‌یابد و بار تیغه‌ها منفی خواهد شد؛ در نتیجه تیغه‌ها دوباره باز می‌شوند. پس در پایان آزمایش بار کلاهک همچنان مثبت و بار تیغه‌ها منفی خواهد بود.

$q_1$  و  $q_2$  بار دو گلوله در حالت اول و  $q_1'$  و  $q_2'$  بار دو گلوله در حالت دوم است. ابتدا، با نوشتن نیروی کولنی بین دو گلوله در حالت اول ۱۳۷۰

$$F = \frac{k|q_1 q_2|}{r^2} \Rightarrow 1/2 \times 10^{-6} = \frac{9 \times 10^9 \times |q_1 q_2|}{9 \times 10^{-2}} \Rightarrow |q_1 q_2| = 1/2 \times 10^{-17} = 12 \times 10^{-18} C = 12(nC)^2$$

به حاصل ضرب دو بار می‌رسیم؛ اما به حل سؤال ادامه می‌دهیم. می‌دانیم بار گلوله‌ها پس از تماس، میانگین بار آن‌ها قبل از تماس است. ۱۳۷۱

$$q_1' = q_2' = \frac{q_1 + q_2}{2} = 4 \Rightarrow q_1 + q_2 = 8 \Rightarrow q_2 = 8 - q_1$$

$$q_1(8 - q_1) = 12 \Rightarrow q_1^2 - 8q_1 = -12$$

حالا که به مجموع بارها رسیدیم، معادله درجه دو را تشکیل می‌دهیم:

$$\begin{cases} q_1 = 6nC \\ q_2 = 2nC \end{cases} \quad \text{یا} \quad \begin{cases} q_1 = 2nC \\ q_2 = 6nC \end{cases} \quad \text{با حل معادله درجه دو به این نتیجه می‌رسیم که بار اولیه گلوله‌ها است.}$$

پس از تماس دو کره، بار آن‌ها، برابر میانگین بار دو کره قبل از تماس است؛ پس: ۱۳۷۱

$$q_1 = -5nC, q_2 = +15nC \Rightarrow q_1' = q_2' = \frac{-5 + 15}{2} = +5nC \quad \text{و} \quad r = 3m, r' = 5m$$

حالا با به دست آوردن نسبت نیروها می‌توان درصد تغییر نیرو را محاسبه کرد:  $F' = \frac{1}{100} F$  ۲۸۳

مقدار نیروی  $F'$  برابر  $1/2$  نیروی  $F$  است که این نشان می‌دهد نیرو  $88\%$  کاهش یافته است که برحسب درصد برابر  $88\%$  است؛ اما می‌توانیم به روش محاسبه هم آن را به دست آوریم:

$$\frac{\Delta F}{F} \times 100 = \frac{F' - F}{F} \times 100 = \frac{\left(\frac{1}{2}F - F\right) \times 100}{F} = -88\%$$

یعنی نیرو  $88\%$  کاهش یافته است.

$$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2 = \Delta q_1$$

طبق قانون پایستگی بار، مجموع دو بار قبل و بعد از انتقال ثابت است.

از آنجا که نیرو با حاصل ضرب دو بار نسبت مستقیم دارد، وقتی مجموع دو بار ثابت است، حاصل ضرب آن‌ها زمانی بیشینه است که دو بار با هم برابر باشند؛ یعنی:

$$q'_1 = q'_2 = \frac{\Delta}{2} q_1$$

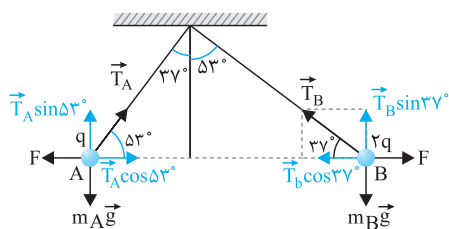
$$\frac{\Delta q_2}{q_2} \times 100 = \frac{q'_2 - q_2}{q_2} \times 100 = \frac{\left(\frac{\Delta}{2} - 4\right) q_1}{4 q_1} \times 100 = -\frac{3}{4} \times 100 = -37.5\%$$

حالا درصد تغییرات بار  $q_2$  را محاسبه می‌کنیم:

علامت منفی نشان می‌دهد بار  $q_2$  کاهش یافته است.

ابتدا شکل ساده‌ای از نیروهای وارد بر دژه‌های باردار رسم می‌کنیم:

حالا شرط تعادل هر بار را جداگانه می‌نویسیم. برای تعادل ذره باردار در نقطه A:



$$\left. \begin{aligned} T_A \sin 53^\circ &= m_A g \\ T_A \cos 53^\circ &= F \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tan 53^\circ = \frac{m_A g}{F} \Rightarrow F = \frac{m_A g}{\tan 53^\circ} \quad (1)$$

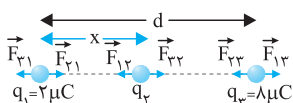
و اما شرط تعادل در نقطه B:

$$\left. \begin{aligned} T_B \sin 37^\circ &= m_B g \\ T_B \cos 37^\circ &= F \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tan 37^\circ = \frac{m_B g}{F} \Rightarrow F = \frac{m_B g}{\tan 37^\circ} \quad (2)$$

از آنجا که نیروی کولنی بین دوبار با هم برابر است؛ پس از مقایسه دو رابطه (1) و (2) می‌توانیم بنویسیم:

$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{m_A}{m_B} = \frac{\tan 53^\circ}{\tan 37^\circ} = \frac{4}{3} = \frac{16}{9}$$

برای اینکه برآیند نیروهای وارد بر هر بار صفر شود، باید  $q_2$  منفی باشد؛ پس نیروهای وارد بر بارها را رسم می‌کنیم:



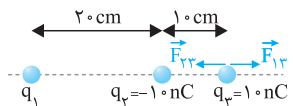
برآیند نیروهای وارد بر  $q_2$  صفر است؛ پس باید اندازه نیرویی که  $q_1$  به  $q_2$  وارد می‌کند برابر با اندازه نیرویی باشد که  $q_2$  به  $q_1$  وارد می‌کند:

$$F_{1r} = F_{2r} \Rightarrow \frac{kq_1 \times q_2}{x^2} = \frac{kq_2 \times q_1}{(d-x)^2} \Rightarrow 4x^2 = (d-x)^2 \Rightarrow 2x = d-x \Rightarrow 3x = d$$

همین طور برآیند نیروهای وارد بر  $q_1$  نیز صفر است؛ پس اندازه دو نیروی  $q_{11}$  و  $q_{12}$  را نیز با هم برابر قرار می‌دهیم:

$$F_{11} = F_{12} \Rightarrow \frac{kq_1 \times |q_2|}{x^2} = \frac{kq_1 \times \lambda}{d^2} \Rightarrow |q_2| = \lambda \frac{x^2}{d^2} \xrightarrow{d=3x} |q_2| = \lambda \frac{x^2}{9x^2} \Rightarrow |q_2| = \frac{\lambda}{9} \Rightarrow q_2 = -\frac{\lambda}{9} \mu C$$

در حالت اول برآیند نیروهای وارد بر  $q_2$  صفر است؛ یعنی:



$$\vec{F}_{1r} = \vec{F}_{1r} + \vec{F}_{2r} = 0 \Rightarrow \vec{F}_{1r} = -\vec{F}_{2r}$$

در حالت دوم که  $q_1$  دو برابر می‌شود، طبق فرمول  $F = \frac{k|q_1 q_2|}{r^2}$ ، نیرویی که به  $q_2$  وارد می‌کند نیز دو برابر می‌شود؛ پس:

$$\vec{F}'_{1r} = 2\vec{F}_{1r} \xrightarrow{\vec{F}_{1r} = -\vec{F}_{2r}} \vec{F}'_{1r} = -2\vec{F}_{2r}$$

$$\vec{F}'_{1r} = \vec{F}'_{1r} + \vec{F}_{2r} = -2\vec{F}_{2r} + \vec{F}_{2r} \Rightarrow \vec{F}'_{1r} = -\vec{F}_{2r}$$

حالا برآیند نیروهای وارد بر  $q_2$  را در حالت دوم به دست می‌آوریم:

از علامت منفی، متوجه می‌شویم برآیند نیروها در خلاف جهت  $F_{2r}$  یعنی به سمت راست است و اندازه آن را با استفاده از رابطه محاسبه می‌کنیم:

$$F'_{1r} = \frac{k|q_1 q_2|}{r^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 100 \times 10^{-18}}{10^{-2}} \Rightarrow (F'_{1r} = F_{2r} = 9 \times 10^{-5} \text{ N})$$

$$F_r = F_r \sin \alpha$$

برای  $F_1$  و  $F_2$  است؛ پس  $F_1$  و  $F_2$  همان مؤلفه‌های حاصل از تجزیه  $F_r$  بر روی اضلاع مثلث است.

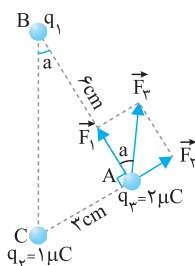
از آنجا که نیروی  $F_r$  موازی خط واصل  $q_1$  و  $q_2$  است؛ بنابراین دو زاویه  $\alpha$  مشخص شده در شکل با هم برابرند.

$\sin \alpha$  را پیدا می‌کنیم:

$$\sin \alpha = \frac{AC}{BC} = \frac{3}{\sqrt{3^2 + 6^2}} = \frac{3}{3\sqrt{5}} = \frac{\sqrt{5}}{5}$$

$$F_r = F_r \times \frac{\sqrt{5}}{5} \Rightarrow \frac{kq_1 q_2}{(AC)^2} = F_r \times \frac{\sqrt{5}}{5} \Rightarrow \frac{9 \times 10^9 \times 100 \times 10^{-18}}{(3 \times 10^{-2})^2} = F_r \times \frac{\sqrt{5}}{5}$$

$$\Rightarrow F_r = 2 \times \frac{5}{\sqrt{5}} \times 10 = 2\sqrt{5} \text{ N}$$



انرژی ذخیره شده در خازن همان گرمای منتقل شده به آب است که باعث افزایش دمای آب می شود. می دانیم هر  $cm^3$  آب جرمی معادل ۱g دارد؛ بنابراین می توانیم بنویسیم:

$$U = Q \Rightarrow \frac{1}{2} CV^2 = mc\Delta\theta \Rightarrow \frac{1}{2} \times 200 \times 10^{-6} \times 12^2 = 1 \times 10^{-3} \times 4200 \times \Delta\theta \Rightarrow \Delta\theta = 3/4 \times 10^{-3} K \approx 3/4 mK$$

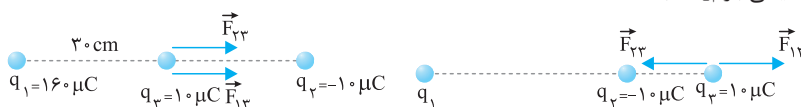
## آزمون ۱

می دانیم بار الکتریکی، مضرب صحیحی از بار الکترون است.

$$q = ne \Rightarrow 8 \times 10^{-6} = n \times 1/6 \times 10^{-19} \Rightarrow n = 5 \times 10^{13} \text{ الکترون}$$

اگر بار میله مثبت باشد، با نزدیک کردن میله به کلاهک الکتروسکوپ، بارهای منفی روی ورقه ها به طرف کلاهک حرکت می کنند و ورقه های الکتروسکوپ به هم نزدیک می شوند اگر میله خنثی هم باشد، همین اتفاق می افتد.

نیروی خالص وارد بر  $q_3$  صفر است؛ یعنی  $F_{13}$  و  $F_{23}$  همدیگر را خنثی می کنند. ابتدا،  $q_1$  را به دست می آوریم. دقت داشته باشید با توجه به شکل که نیروی  $F_{13}$  دافعه است؛ یعنی بار  $q_1$  مثبت است.



$$F_{13} = F_{23} \Rightarrow k \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} = k \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} \Rightarrow q_1 = 160 \mu C$$

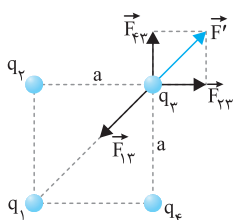
حالا جای  $q_2$  و  $q_3$  را عوض می کنیم و برابری نیروهای وارد بر  $q_3$  را به دست می آوریم:

$$F_{13} = k \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{160 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-6}}{(10 \times 10^{-2})^2} = 90 N \quad \text{و} \quad F_{23} = k \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{160 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-6}}{(30 \times 10^{-2})^2} = 160 N$$

در این مرحله نیروی خالص وارد بر  $q_3$  را به دست می آوریم:

$$F_T = 90 + 160 = 250 N$$

وقتی بار  $q_3$  در تعادل است؛ یعنی برابری دو نیروی  $F_{13}$  و  $F_{23}$  که در شکل زیر بردار  $\vec{F}'$  نامگذاری شده است؛ بردار نیروی  $\vec{F}_{13}$  را خنثی می کند. بنابراین ابتدا  $F_{13}$  و  $F_{23}$  و برابری این دو نیرو، یعنی  $F'$  را به دست می آوریم:



$$F_{13} = k \frac{q_1 q_3}{a^2} = \sqrt{2} \frac{kq^2}{a^2} \Rightarrow F' = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = 2 \frac{kq^2}{a^2}$$

$$F_{23} = k \frac{q_2 q_3}{a^2} = \sqrt{2} \frac{kq^2}{a^2}$$

$$F_{13} = F' \Rightarrow k \frac{q_1 q_3}{(a\sqrt{2})^2} = 2 \frac{kq^2}{a^2} \Rightarrow q_1 = 4q$$

حالا  $F_{13}$  را با  $F'$  مساوی قرار می دهیم؛ چون برابری نیروهای وارد بر  $q_3$  صفر است:

دقت کنید که علامت  $q_1$  باید منفی باشد تا  $F_{13}$  و  $F'$  در خلاف جهت هم باشند.

کافی است از فرمول  $E = k \frac{q}{r^2}$  در دو حالت استفاده کنیم و رابطه ها را بر هم تقسیم کنیم:

$$\begin{cases} r_1 = 2m \\ r_2 = 3m \end{cases} \Rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Rightarrow \frac{E_1 - 250}{E_1} = \left(\frac{2}{3}\right)^2 \Rightarrow E_1 = 450 N/C$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Rightarrow \frac{4E}{9E} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{2}{3}$$

برای حل این سؤال، از نسبت  $\frac{E_2}{E_1}$  کمک می گیریم:

برای حل این سؤال، از قضیه کار و انرژی جنبشی استفاده می کنیم:

$$W_{\text{نیروی میدان الکتریکی}} = \Delta K \Rightarrow W_E = K_B - K_A \Rightarrow E |q| d \cos\theta = \frac{1}{2} m v_B^2 - 0$$

$$8 \times 10^2 \times 1/6 \times 10^{-19} \times 10^{-1} \times \cos 0^\circ = \frac{1}{2} \times 9 \times 10^{-31} \times v_B^2 \Rightarrow v_B = \frac{16}{3} \times 10^6 m/s$$





از قضیه کار و انرژی جنبشی استفاده می‌کنیم. تنها نیروی وارد بر بار، همان نیروی میدان الکتریکی است.

۱۴۱۱

$$W_{\text{نیروی میدان الکتریکی}} = \Delta K \Rightarrow |q| E d \cos \theta = 0 - \frac{1}{2} m v^2$$

$$\Rightarrow 1/6 \times 10^{-19} \times 2000 \times d \times \cos 180^\circ = -\frac{1}{2} \times 1/6 \times 10^{-27} \times (10^5)^2 \Rightarrow d = 0.025 \text{ m} = 25 \text{ mm}$$

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{1 - (-1)}{4 \times 10^{-2}} = 400 \text{ V/m}$$

ابتدا، میدان الکتریکی بین دو صفحه را به دست می‌آوریم:

۱۴۱۲

$$E = \frac{V_A - V_{\text{صفحه منفی}}}{x} \Rightarrow 400 = \frac{-4 - (-1)}{x} \Rightarrow x = \frac{1}{100} \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

حالا فاصله نقطه A تا صفحه منفی را x می‌نامیم و آن را به دست می‌آوریم:

تراکم میدان در B بیشتر است، پس  $E_B > E_A$  است. باتوجه به فرمول  $F = Eq$  می‌فهمیم که  $F_B$  هم از  $F_A$  بزرگ‌تر است. از طرفی هرچقدر در جهت خطوط میدان حرکت کنیم، پتانسیل کاهش می‌یابد و این یعنی  $V_B < V_A$  است.

۱۴۱۳

با توجه به اینکه در فلزات همه بار در سطح خارجی فلز توزیع می‌شود تنها گزینه ممکن (۳) است.

۱۴۱۴

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \Rightarrow \frac{C_r}{C_1} = \frac{\kappa_r}{\kappa_1} \times \frac{A_r}{A_1} \times \frac{d_1}{d_r} \Rightarrow \frac{C_r}{C_1} = 4/5 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{2}{15}$$

ظرفیت خازن را در دو حالت با هم مقایسه می‌کنیم:

۱۴۱۵

$$\Delta V = V_r - V_1 = 22 - 15 = 7 \text{ V}$$

به محاسبه مقابل به دقت توجه کنید:

۱۴۱۶

حالا ظرفیت خازن به سادگی محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} Q_1 = CV_1 \\ Q_2 = CV_2 \end{cases} \Rightarrow Q_2 - Q_1 = C(V_2 - V_1) \Rightarrow \Delta Q = C \Delta V \Rightarrow C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{140}{7} = 20 \mu\text{F}$$

وقتی خازنی را از مولد جدا می‌کنیم، Q ثابت می‌ماند یعنی  $Q_1 = Q_2$ . از طرفی باتوجه به فرمول  $C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}$  به سادگی به دست می‌آوریم

۱۴۱۷

که  $C_2 = \frac{5}{4} C_1$  می‌شود. حالا به محاسبه زیر نگاه کنید:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow C_1 V_1 = C_2 V_2 \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{4}{5} = 0.8$$

$$\frac{\Delta V}{V_1} \times 100 = \frac{0.4 V_1 - V_1}{V_1} \times 100 = -0.6 \times 100 = -60\%$$

یعنی  $V_2$  برابر است با چهل درصد  $V_1$  و این یعنی ۶۰ درصد کاهش ولتاژ.

میدان الکتریکی در داخل یک جسم رسانای منزوی باردار، به سرعت صفر می‌شود.

۱۴۱۸

## آزمون ۲

بر اثر این مالش،  $32 \text{ nC}$  بار الکتریکی، جابه‌جا شده است.  $q = ne \Rightarrow 32 \times 10^{-9} = n \times 1/6 \times 10^{-19} \Rightarrow n = 2 \times 10^{11}$

۱۴۱۹

اگر بار جسم، موافق بار الکتروسکوپ باشد، با نزدیک کردن جسم به کلاهک الکتروسکوپ، بار الکتروسکوپ از کلاهک به سمت ورقه‌ها حرکت می‌کند و ورقه‌ها از هم دور می‌شوند.

۱۴۲۰

نیروی الکتریکی  $\vec{F}$  بر ایند نیروهایی است که از طرف  $q_1$  و  $q_2$  بر  $q_A$  وارد می‌شود؛ یعنی  $\vec{F}$  بر ایند  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  است. اگر بار  $q_r$  را حذف کنیم،

۱۴۲۱

فقط  $q_1$  باقی می‌ماند و تنها نیروی مؤثر بر  $q_A$  همان  $\vec{F}_1$  است. یعنی  $\frac{\vec{F}}{4}$  را می‌توانیم  $\vec{F}_1$  فرض کنیم. از این مقایسه به سادگی می‌فهمیم که  $\vec{F}_2$  هم باید  $\frac{3}{4} \vec{F}$  باشد؛

چون  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}$  است.

$$\begin{cases} F_1 = k \frac{q_1 q_A}{d^2} \\ F_2 = k \frac{q_2 q_A}{4d^2} \end{cases} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{q_1}{q_2} \times 4 \Rightarrow \frac{1}{3} = \frac{q_1}{q_2} \times 4 \Rightarrow \frac{q_1}{q_2} = \frac{1}{12}$$

از آنجا که  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  هم جهت هستند؛ پس  $q_1$  و  $q_2$  هم علامت و نسبت آن‌ها مثبت است.

به گلوله بالایی توجه می‌کنیم که در حال تعادل است. به این گلوله دو نیروی  $F$  و  $mg$  وارد می‌شود که همدیگر را خنثی می‌کنند.

۱۴۲۲

$$F = mg \Rightarrow k \frac{qq}{r^2} = mg \Rightarrow 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-6}}{r^2} = 20 \times 10^{-3} \times 10 \Rightarrow r^2 = 0.18 \Rightarrow r = \sqrt{0.18} = 0.3 \sqrt{2} = 0.42 \text{ m} = 42 \text{ cm}$$