۱۸ الکتروستاتیک: بار، میدان الکتریکی، و پتانسیل

از این پس با اصطلاحاتی جدید سروکار خواهیم داشت. می‌گوییم B (و اجسامی نظیر آن) بار مثبت دارد؛ A بار منفی. یا، B بار به اضافه دارد؛ A، بار منها. و خود ما هم، اگر به درستی بیندیشیم، در تجربه‌های روزمرهٔ خویش به اجسام بار مثبت یا منفی می‌دهیم.

بنیامین فرانکلین

۱۸ـ۱ مقدمه

واژهٔ الکتریسیته از نام یونانی $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho o\upsilon$ (الکترون)، به معنی «کهربا» اخذ شده است. چنان‌که از این ریشه‌شناسی بر می‌آید، یونانیهای قدیم با آثار الکتریسیته‌دارکردن اجسام با بار ساکن آشنا بوده‌اند. این آثار را به کمک تکه‌ای کهربا، که آن‌را با پوست یا پارچه پشمی مالش می‌دادند، نمایش می‌دادند. طی قرنهای مدید معلوم شد که به مواد دیگر هم، اگر آنها را با موادی مناسب مالش دهند، نیز می‌توان «الکتریسیته» داد. اما فقط در پایان قرن هفدهم بود که بررسی دقیق آثار الکتریکی آغاز شد. یکی از اکتشافات تعیین کننده در این زمینه به وسیلهٔ شارل فرانسوا دوسیسترنه دوفه[1] صورت گرفت. او در سال ۱۷۳۴ به چارلز، دوکِ ریچموند و لناکس، چنین نوشت:

> ... دست تصادف اصلی دیگر پیش پای من نهاده است ... که بر موضوع الکتریسیته پرتو جدیدی می‌تاباند. آن اصل عبارت از این است که دو نوع الکتریسیته وجود دارد، که خیلی هم با یکدیگر فرق دارند: یکی از آنها را

1) Charles Francois de Cisternay du Fay

الکتریسیتهٔ شیشه‌ای، و دیگری را الکتریسیتهٔ رزینی* می‌نامم. نوع اول،الکتریسیتهٔ شیشه، بلورهای داخل سنگ، سنگهای قیمتی، موی جانوران، پشم، و بسیاری از اجسام دیگر است[که آنها را مالش داده‌اند]. نوع دوم،الکتریسیتهٔ کهربا، سندروس بلوری، سقز، ابریشم، نخ، کاغذ، و بسیاری از اجسام دیگر است [که آنها را مالش داده‌اند].

مشخصهٔ این دو نوع الکتریسیته آن‌است که جسمی که، مثلاً، الکتریسیتهٔ شیشه‌ای داشته باشد، همهٔ اجسامی را که از همین نوع الکتریسیته دارند از خود می‌راند؛ و بر عکس همهٔ آنهایی را می‌رباید که، الکتریسیتهٔ رزینی دارند.

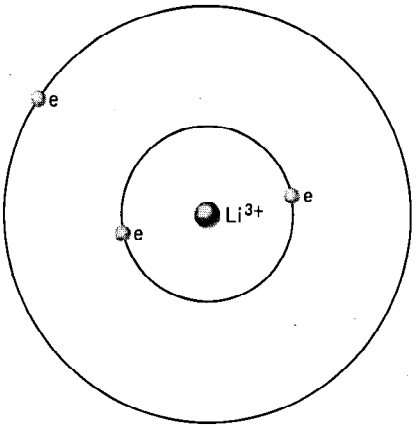
امروزه ما اصطلاحاتی دیگر به کار می‌بریم. اکنون می‌دانیم که آثاری که مشاهده می‌کنیم از بار اضافی روی شیشه یا کهربا به وجود می‌آیند؛ به جای «الکتریسیته» از بار سخن می‌گوییم، و به جای شیشه‌ای و رزینی از واژگان مثبت و منفی بهره می‌گیریم، اما مفاهیم اساسی تقریباً یکسانند.

۱۸ـ۲ منشأ بار الکتریکی

یکی از نخستین پرسشهایی که به ذهن آدمی می‌آید، این‌است: منشأ بار الکتریکی چیست؟ این پرسش تا زمانی نسبتاً طولانی پس از آغاز مطالعه در باب الکتریسیته، همچنان بی‌پاسخ ماند، گرچه دیوی، فارادی، و سایرین متقاعد شده بودند که بار با عناصر شیمیایی ارتباط دارد. تنها در پایان قرن نوزدهم و با کشف الکترون به وسیلهٔ ج.ج.تامسون و پس از آن با روشنتر شدن ساختمان اتم به وسیلهٔ رادرفورد و بور بود که هویت شئ با بار بنیادی عامل پدیده‌های الکتروستاتیکی، الکترودینامیکی و مغناطیسی، به وضوح تعیین شد. امروزه هر دانش‌آموز دبیرستان چیزهایی دربارهٔ الکترون، پروتون، نوترون، و هسته می‌آموزد، و شاید درک راه پرپیچ‌وخمی که ما را به دانش امروزی خود از پدیده‌های اتمی و هسته‌ای هدایت کرده است، دشوار باشد.

هر اتم از هسته‌ای بسیار کوچک، با جرم نسبتاً زیاد، و با بار مثبت، و یک یا چند الکترون بسیار سبکتر و با بار منفی تشکیل شده است. می‌توان فرض کرد که الکترونها ناحیه‌ای تقریباً کروی در اطراف هسته اشغال می‌کنند، همچنین گاهی آنها را به صورت اجسامی تجسم کرد که مانند گردیدن سیارات به دور خورشید، هسته را دور می‌زنند. تشبیه به منظومهٔ شمسی در مواردی یک مدل مفید به شمار می‌آید اما این شباهت چیزی جز یک مدل نیست؛ چنان که بعداً خواهیم دید، بین سیستم اتمی هسته و الکترونها و منظومهٔ شمسی تفاوتهای بنیادی مهمّی موجود است.

* کهربا رزینی است که به صورت سنگواره در آمده است.



شکل۱۸ـ۱ مدل اتم لیتیم. هسته سه پروتون دارد که اندازهٔ بار هر کدام با بار الکترون مساوی، اما علامت بار آنها مثبت است. هسته را سه الکترون با بار منفی احاطه کرده و کل سیستم، از نظر بار الکتریکی، خنثاست. دو تا از الکترونها در مدارهایی قرار دارند که خیلی به هسته نزدیک است؛ این الکترونها قویاً به هسته مقیدند و آنها را الکترونهای داخلی می‌نامند. الکترون سوم در مداری قرار دارد که میانگین شعاع آن بسیار بزرگتر است، قید این الکترون به هسته بسیار ضعیفتر است؛ آن‌را الکترون والانس می‌نامند.

بار مثبت هسته الکترونهای با بار منفی را می‌رباید و آنها را در مدارهایی پایدار نگه می‌دارد. الکترونهایی که خیلی به هسته نزدیکند قویاً مقیدند؛ یعنی، نمی‌توان آنها را به آسانی از هسته جدا کرد؛ آنها را که در مدارهای دورتر قرار دارند، آسانتر می‌شود از جای خود خارج کرد. در برخی مواد، مانند شیشه، می‌توان الکترونهای نزدیک به سطح را از طریق مالش مکانیکی، به ابریشم منتقل کرد. به همین ترتیب، الکترونهای اتمهای پوست جانوران یا پشم به ورود به کهربا یا ابونیت گرایش دارند. به این ترتیب، ابونیت بر اثر مالش با پوست جانوران، به علت این انتقال بار، بار منفی اضافه پیدا می‌کند، در حالی که میلهٔ شیشه‌ای بر اثر مالش با ابریشم الکترون از دست می‌دهد و بار مثبت پیدا می‌کند.

به کمک آزمایشهای متعدد چند ویژگی بنیادی بار تأیید شده است؛ بار کوانتیده است، بار پایسته است، و بار ناوردا است.

وقتی می‌گوییم بار کوانتیده است، منظورمان این‌است که بار فقط می‌تواند به صورت مضربهایی صحیح از واحدی بنیادی و تقسیم ناپذیر ظاهر شود. این واحد، بار الکترون، e، است. * وجود مقداری ماکروسکوپی از بار منفی نشان می‌دهد که به جسم حامل این بار منفی عده‌ای الکترون اضافی داده شده است؛ بر عکس، وجود یک بار مثبت خالص ایجاب می‌کند که تعدادی متناهی و صحیح الکترون از جسم خارج شوند.

* چند سال پیش موری گِل‌ـمان اظهار داشت که پروتون و نوترون از ذراتی زیر هسته‌ای ترکیب یافته‌اند که بار آنها $\frac{2}{3}$ و $\frac{1}{3}$ بار الکترون است. پس از آن جستجویی همه جانبه و شدید، اما ناموفق، برای یافتن این به اصطلاح کوارکها آغاز شد. شواهدی گرد آمده‌اند که چنین موجوداتی که بارشان کسری از بار الکترون است، در هسته وجود دارند؛ هر چند که به حالت آزاد یافت نمی‌شوند. وجود کوارکها مسئله کوانتیده بودن بار را نفی نمی‌کند؛ تنها نشان می‌دهد که ممکن است لازم باشد واحد بنیادی بار را به اندازهٔ یک ضریب۳ کاهش دهند.

منظور از پایستگی بار این‌است که کل بار هر سیستم منزوی ثابت می‌ماند. این موضوع تعداد الکترونها یا بارهای مثبتی را که می‌توانند موجود باشند، محدود نمی‌کند؛ چنان که بعداً خواهیم دید این امکان وجود دارد که؛ با صرف مقدار انرژی کافی، ذرات باردار خلق کرد، و فرایند معکوس، نابود شدن ذرات باردار همراه با آزاد شدن انرژی، نیز عملی است. امّا، در هر فرایندی از این نوع، مقدار برابری بار مثبت و منفی باید آفریده یا نابود شوند، به طوری که مقدار کل، یا خالص، بار ثابت باقی بماند.

سرانجام، مفهوم ناوردایی به رفتار سیستمهای تحت شرایط نسبیتی، یعنی، در سرعتهای نزدیک به سرعت نور، $c = ۳/۰ \times ۱۰^۸ \,\mathrm{m/s}$، بر می‌گردد. چنان‌که در فصل ۲۷ خواهیم دید، جرم، طول، و زمان از لحاظ نسبیتی ناوردا نیستند. مثلاً، جرم لختی هر جسم به سرعت آن در دستگاه مرجعی بستگی دارد که جرم در آن اندازه‌گیری می‌شود. بر عکس، بار ناورداست؛ بار الکترون، پروتون یا هر ذرهٔ دیگر سرعتش هر چه باشد، یکسان است.

این سه خاصیت بنیادی بار ـ ماهیت کوانتیده، پایستگی، و ناوردایی آن ـ متضمن نتایج نظری بسیار فراگیری در فیزیک ذرات بنیادی به شمار می‌آیند.

در شرایط عادی چند الکترون از میلهٔ شیشه‌ای به پارچهٔ ابریشمی منتقل می‌شود؟ پاسخ به این پرسش به عواملی متعدد ، مانند تعداد دفعات مالش، فشار تماسی، و دما بستگی دارد؛ اما نوعاً در حدود $۱۰^۹$، یعنی یک میلیارد، الکترون در این انتقال سهیم‌اند. ممکن است این رقم، عظیم به‌نظر آید، اما اگر به خاطر بیاوریم که تعداد کل اتمها حتی در میله‌ای نسبتاً کوچک به جرم حدوداً $۱۰۰\,\mathrm{g}$ از مرتبهٔ $۱۰^{۲۴}$ است؛ می‌بینیم که این رقم در واقع بسیار کوچک است. $۱۰^{۲۴}$ تعداد بیرونیترین الکترونهای اتمی نیز هست، که از همه آسانتر جابه‌جا می‌شوند. بنابراین، تنها کسری بسیار کوچک، در حدود $\frac{۱}{۱۰^{۱۵}}$، از اتمها با کسری الکترون می‌مانند.

۱۸ـ۳ رسانا، نارسانا، و نیمرسانا

می‌دانیم که برخی مواد، مانند مس، آلومینیم، و فلزات دیگر، رسانای الکتریسیته‌اند، در حالی که از گروهی دیگر، مثل شیشه، لاستیک، و بیشتر پلاستیکها، به عنوان نارساناهای الکتریکی استفادهٔ وسیعی می‌شود.

چیزی که این دو نوع ماده را از نظر مشخصهٔ الکتریکی آنها از هم متمایز می‌کند، این نکته است که در رساناها بیرونیترین الکترونها، که آنها را الکترونهای والانس می‌نامند، می‌توانند نسبتاً آزادانه در سراسر ماده حرکت کنند، گر چه نمی‌توانند به آسانی از آن خارج شوند؛ بر عکس در نارسانا، حتی الکترونهای والانس قویاً به هسته‌های

خود مقیدند. توصیف دقیق الکترونها در مادهٔ جامد موضوعی دشوار است که مستلزم نظریهٔ کوانتومی و حل معادلات دیفرانسیل با روشهای پیشرفتهٔ ریاضی است. با همه اینها، تعمیم گسترده‌ای که در بالا ارائه کردیم، تقریبی قابل قبول از حالت واقعی است.

موادی از دستهٔ سوم هم وجود دارند، که عناصر ژرمانیم و سیلیسیم و نیز ترکیباتی متعدد نظیر ایندیم آنتیمونید و گالیم آرسنید را دربر می‌گیرد. این مواد نه رسانایند و نه نارسانا. در این مواد، تعداد الکترونهای «آزاد» فقط کسری کوچک از تعداد الکترونهای آزاد در فلزات است؛ به علاوه، این تعداد به دما و غلظت و نوع ناخالصیی بستگی دارد که می‌تواند در ماده وجود داشته باشد. این نیمرساناها الکتریسیته را هدایت می‌کنند، اما مقاومت آنها در برابر جریان بسیار بیشتر از فلزات، و البته بسیار کمتر از نارساناها، است. به علت همین توانایی ما برای کنترل خواص الکتریکی نیمرساناها، با تنظیم نوع و غلظت ناخالصی، است که این مواد در تکنولوژی اهمیتی عظیم دارند. این مواد زمینهٔ ساخت ترانزیستورها و نیز گروه بزرگ مدارهایی بسیار پیچیده و کوچک، به نام مدارهای مجتمع حالت جامد، را تأمین می‌کنند. امروزه عملاً در تمامی وسیله‌های الکترونیکی به جای لامپهای خلأ قدیمی از این عناصر استفاده می‌شود.

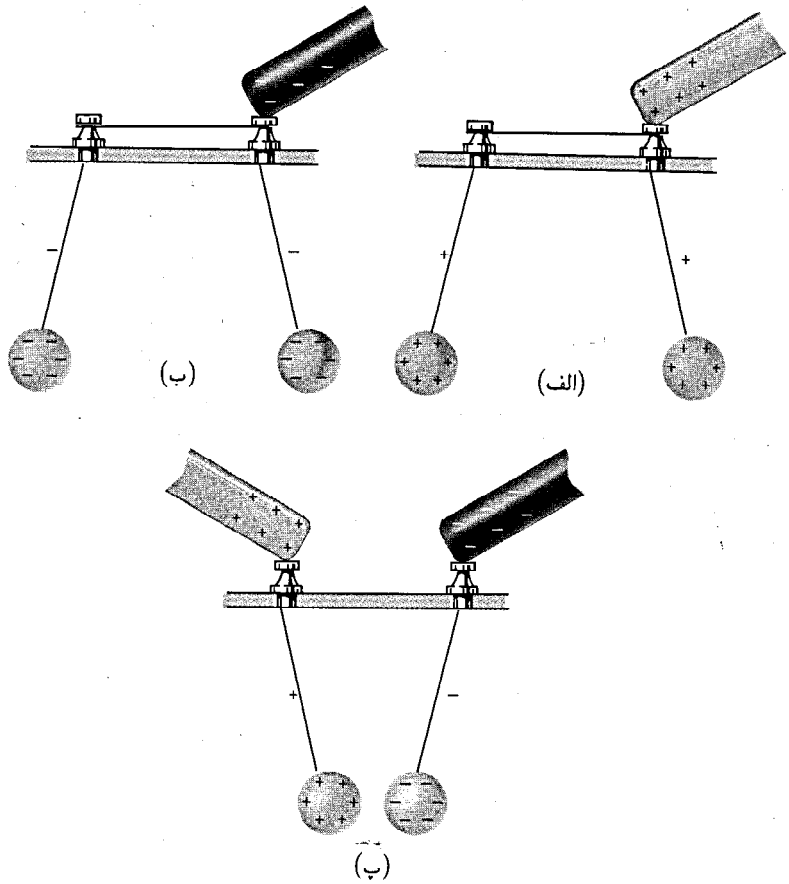
۱۸ـ۴ بر هم کنش بین بارها؛ قانون کولن

اگر میله‌ای از شیشه یا ابونیت را به کمک مالش باردار کنند، می‌توان قسمتی از این بار را با تماس فیزیکی به شیئی دیگر، مثلاً به یک گلولهٔ چوب‌پنبه‌ای، انتقال داد. بدینسان می‌توان با چند آزمایش ساده، که طرح آنها در شکل ۱۸ – ۲ آمده است، نشان داد که:

۱ـ بارهای همنام یکدیگر را می‌رانند.

۲ـ بارهای ناهمنام یکدیگر را می‌ربایند.

از این آزمایشها دو واقعیت اساسی روشن می‌شود. اولاً، برهم کنش الکتروستاتیکی به نحوه‌ای اساسی با تنها بر هم کنشِ از راه دور دیگری، که تابه حال بررسی کرده‌ایم یعنی، بر هم کنش گرانشی، تفاوت دارد؛ برهم کنش گرانشی همواره ربایشی است، اما بر هم کنش الکتروستاتیکی می‌تواند به صورت ربایشی یا رانشی باشد. همین معکوس علامت است که دومین تمایز مهم در پس آن نهفته است؛ برهم کنش الکتروستاتیکی در مقایسه با گرانشی بسیار عظیم است. این تفاوت بزرگ با توضیح زیر روشن می‌شود. اگر دو کرهٔ آلومینیمی به جرم ۱ kg را به فاصلهٔ ۱ m از هم قرار دهند، و اگر فقط یک الکترون از هر یک میلیارد اتم را از کره‌ای به کرهٔ دیگر انتقال دهند، نیروی ربایشی بین دو کره بیش از ۱۰۰۰۰۰ N یا متجاوز از ده هزار برابر وزن هر کره خواهد بود. عموماً از قدرت زیاد نیروی الکتروستاتیکی بی‌خبریم زیرا اشیایی که به آنها برخورد می‌کنیم،

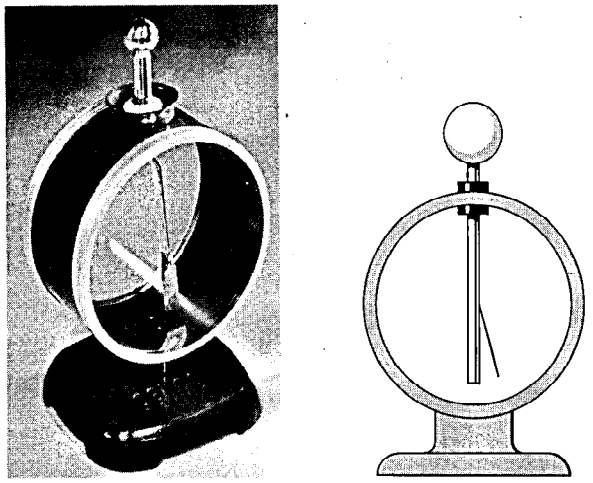


شکل۱۸ـ۲ دو گلولهٔ چوب‌پنبه‌ای، که آنها را با رنگ آلومینیمی رنگ کرده‌اند، با سیم فلزی‌از دو بست فلزی آویخته‌اند. این دو بست روی یک میلهٔ نارسانای افقی قرار دارند. در (الف) و (ب) سیمی فلزی دو بست را به هم متصل می‌کند. اگر (الف) میله‌ای شیشه‌ای با بار مثبت یا (ب) میله‌ای ابونیتی با بار منفی را بابست فلزی تماس دهند، بار روی دو گلوله پخش می‌شود. مشاهده می‌کنیم که در هر حالت گلوله‌ها یکدیگر را می‌رانند. (پ)، اگر اتصال فلزی بین دو بست را برداریم، به یکی بار مثبت و به دیگری بار منفی بدهیم، دو گلوله یکدیگر را می‌ربایند.

تقریباً از نظر الکتریکی خنثایند. این اشیاء می‌توانند حاوی تعداد بسیار زیادی بار الکتریکی باشند، اما نیمی از آنها مثبت و نیم دیگر هم با همان تعداد منفی‌اند. به این ترتیب، بار خالص صفر می‌شود. نابرابری در بارها را می‌توان به مقدارکم ایجاد و حفظ کرد. اگر این نابرابری بیش از حد فاحش شود، شئ به طور خود به خود، و اغلب باجرقه‌هایی بزرگ، بار خود را تخلیه می‌کند.

برای بررسی نیروهای الکتروستاتیکی و استنتاج روابط کمّی، به وسیله‌ای برای سنجش بار نیاز داریم. یکی از قدیمیترین وسیله‌ها برای این منظور، الکتروسکوپ برگهٔ طلا، شکل ۱۸ـ۳ است. این وسیله از استوانه‌ای تو خالی تشکیل می‌شود که در آن برگه‌ای نازک از طلا را از سر بالاییش به یک میلهٔ عمودی فلزی متصل کرده‌اند. میله از داخل مهره‌ای نارسانا می‌گذرد و از بالای استوانه خارج می‌شود؛ دو طرف استوانه از جنس شیشه‌اند، به طوری که تغییر مکان برگهٔ طلایی را می‌توان مشاهده کرد.

اگر، مثلاً، یک بار منفی روی کرهٔ برنجی کوچک بالای میله قرار دهیم، میلیونها الکترون اضافی همان جا باقی نمی‌مانند. آنها می‌توانند داخل و بر روی سطح فلز



(ب) (الف)

شکل۱۸ـ۳ (الف) الکتروسکوپ برگهٔ طلا از یک میلهٔ تخت فلزی تشکیل می‌شود که یک برگهٔ نازک طلایی به آن لحیم کرده‌اند. میله از داخل مهره‌ای نارسانا می‌گذرد و به خارج از محفظه می‌آید. معمولاً روی میله کرهٔ فلزی کوچکی قرار دارد. (ب) عکس یک الکتروسکوپ برگهٔ طلا.

حرکت کنند و، از آنجا که یکدیگر را می‌رانند، چنان پخش می‌شوند که حداکثر فاصلهٔ ممکن را از یکدیگر داشته باشند. بنابراین قسمتی از بار منفی روی برگهٔطلایی و میلهٔ فلزی می‌نشیند؛ و چون بارهای همنام یکدیگر را می‌رانند، برگهٔ انعطاف‌پذیر طلایی از میله دور می‌شود، و زاویهٔ بین میله و برگه به مقدار باری بستگی دارد که روی الکتروسکوپ قرار داده‌اند.

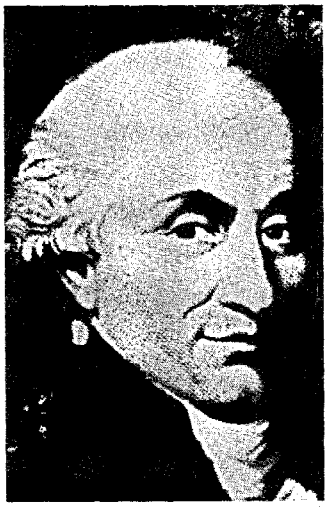
هر چند که این وسیله‌ها بار را با دقت اندازه‌گیری نمی‌کنند، و ابزارهای دقیق سنجش الکترونیکی جای آنها را گرفته‌اند، هنوز هم در کلاسهای درس از آنها برای مقاصد نمایشی استفاده می‌کنند.

رابطه ریاضی حاکم بر برهم کنش بین بارهای همنام و ناهمنام را شارل کولن در سال ۱۷۸۵ بیان کرد. کولن اندازهٔ نیروی الکتریکی را به صورت تابعی از فاصلهٔ بین بارها و اندازهٔ آنها اندازه گرفت. او برای این منظور از یک ترازوی پیچشی ظریف، از نوعی که کاوندیش به کار برد (بخش ۸ – ۴)، استفاده کرد. کولن نتیجه گرفت که اندازهٔ نیروی بین دو بار در هوا، با حاصل‌ضرب دو بار، q_1 و q_2، متناسب است و با مجذور فاصلهٔ بین آنها تناسب عکس دارد. یعنی،

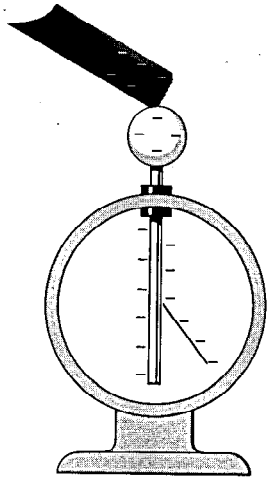
$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (۱\text{ـ}۱۸)$$

که در آن k کمیتی ثابت است. راستای نیروی وارد بر بارها در امتداد خطی است که آنها را به هم وصل می‌کند. باید توجه داشت که نیروی مثبت در معادلهٔ (۱۸ – ۱) نمایانگر رانش، و نیروی منفی نمایانگر ربایش است. از آنجا که نیرو کمیتی برداری است، صفات مثبت و منفی جز آنچه بیان شد، معنایی ندارند.

ثابت تناسب قانون کولن، ضریب k در معادلهٔ (۱۸ – ۱)، به واحدهایی که به کار



شکل۱۸ـ۴ شارل اوگوستین دو کولن (۱۷۳۶ – ۱۸۰۶).



شکل۱۸ـ۵ روی کرهٔ بالایی الکتروسکوپ بار منفی نشانده‌اند. بار روی تمام سطح فلزی که به کرهٔ متصل است پخش شده است. در نتیجه، بارهای همنام یکدیگر را می‌رانند و برگهٔ طلایی منحرف می‌شود.

می‌بریم بستگی دارد؛ حال باید مجموعه‌ای سازگار از واحدهای نیرو، بار، و طول تعیین کنیم. *

واحد SI بار، کولن (C) است. این واحد از واحد جریان، یعنی آمپر، استنتاج می‌شود که به نوبهٔ خود بر حسب نیروی بین دو رسانای حامل جریان در خلأ تعریف می‌شود (فصل ۲۱). در دستگاه SI، ثابت k در معادلهٔ (۱۸–۱) عبارت است از

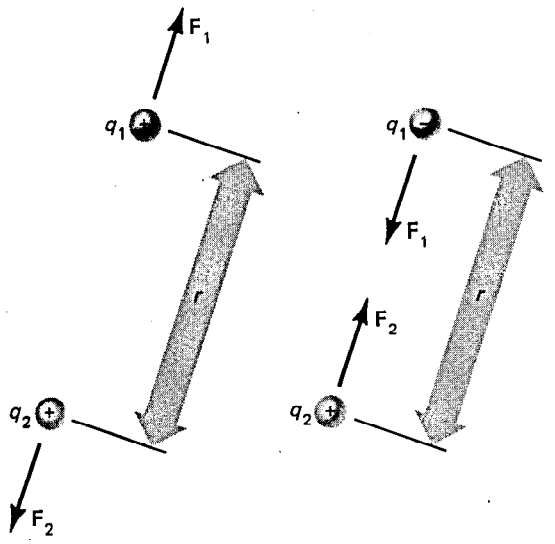
$$k = ۸/۹۸۷۴ \times ۱۰^{۹}\,\mathrm{N.m^{۲}/C^{۲}} \approx ۹/۰ \times ۱۰^{۹}\,\mathrm{N.m^{۲}/C^{۲}} \quad (۲\text{ـ}۱۸)$$

یکی از عیبهای دستگاه SI این است که کولن در آن واحدی است بسیار بزرگ. این موضوع از آنجا آشکار می‌شود که نیرویی که بار ۱ C بر بار مساوی آن در فاصلهٔ ۱ m وارد می‌آورد عبارت است از ۹×۱۰^{۹} N که، تقریباً با نیروی گرانشی وارد بر جرم $۱۰^{۹}$ kg در سطح زمین برابر است! در هنگام وقوع صاعقه کامل، باری از مرتبهٔ ۱۰ تا ۱۰۰ کولن بین زمین و ابر باردار مبادله می‌شود، اما بارهایی که نوعاً در آزمایشگاه تولید می‌کنند در محدودهٔ پیکوکولن ($۱۰^{-۱۲}$ C) و میلی‌کولن ($۱۰^{-۳}$ C) قرار دارند.

واحدی طبیعی برای بار وجود دارد و آن بار پروتون، هستهٔ اتم هیدروژن است. این بار مثبت است و از نظر مقدار با بار الکترون برابر است. آن را با e نشان می‌دهند و مقدارش عبارت است از

* روشی که در مراحل ابتدایی مطالعات مبحث الکتروستاتیک پذیرفته شده بود، به این قرار بود که ثابت k را واحد قرار دهند. در این روش واحد بار را به این صورت تعریف می‌کنند که دو بار واحد یکسان به فاصلهٔ واحد طول نیرویی برابر واحد نیرو به یکدیگر وارد می‌آورند. وقتی این طرح پذیرفته شده بود، دستگاه واحدهایی که در مجامع علمی به کار می‌رفت بر اساس سانتیمتر، گرم، و ثانیه، و واحدهای فرعی نیرو (دین)، انرژی (ارگ)، و غیره استوار بود. واحد بار را که به این ترتیب تعریف می‌شود، واحد الکتروستاتیک (esu) بار، یا استات کولن، می‌نامند.

این طرح برای مدتی به خوبی از عهدهٔ بیان مفاهیم الکتروستاتیکی برآمد. آن گاه در قرن نوزدهم، فارادی، و دیگران به رابطهٔ تنگاتنگ بین جریان الکتریکی و پدیده‌های مغناطیسی پی بردند؛ از دستگاه واحدهای دیگری بهره گرفتند که در آن، واحد جریان بر حسب برهم‌کنش مغناطیسی تعریف می‌شود. تمام این رویدادها پیش از زمانی بود که جیمز کلرک ماکسول پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را با هم ترکیب کند. در نتیجه پی‌بردند که دو دستگاه واحد، الکتروستاتیک (esu) و الکترومغناطیس (emu)، از هم مستقل نیستند. در نیمهٔ اول این قرن، هنوز هم فیزیکدانان واحدهای esu و emu را بر اساس علاقهٔ شخصی و نیز بر معنای اینکه مسئله مورد نظر در کدام دستگاه آسانتر بیان می‌شود، فراوان به کار می‌بردند. چیزی که موضوع را برای دانشجوی بداقبال آن دوره بدتر می‌کرد این بود که معلوم شد واحدهای عملی مانند ولت و آمپر، که با ضرایب تبدیلی گوناگون با معادلهای esu و emu خود تفاوت داشتند، بسیار کارآمدتر از استات ولت (esu ولت) یا آب آمپر (emu آمپر)اند، به طوری که این واحدها نیز از نوشتارهای علمی حذف شدند. واحدهای SI بهبودی عظیم است که به وضعیت آشفته و نابسامان واحدهای الکتریسیته و مغناطیس، که تا همین اواخر ادامه داشت، پایان می‌دهد.



شکل۱۸ـ۶ دو بار همنام یکدیگر را می‌رانند و دو بار ناهمنام یکدیگر را می‌ربایند. نیروی بین بارها، بنابر قانون کولن، معادلهٔ (۱۸–۱)، به اندازهٔ بارها، q_1 و q_2 ، و فاصلهٔ بین آنها r، بستگی دارد.

$$e = (۱٫۶۰۲۱۸۹۲ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۲۹) \times ۱۰^{-۱۹}\,\mathrm{C} \approx ۱٫۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\,\mathrm{C} \quad (۳\text{ـ}۱۸)$$

برای توصیف رویدادهای الکتروستاتیکی ماکروسکوپی، این واحد همانقدر کوچک است که کولن بزرگ است. اما، برای محاسبات رویدادهای اتمی، e همانقدر طبیعی است که انتخابی مناسب از کار در می‌آید.

مثال ۱۸ـ۱ به بار Q در حالتی که بار $+۵٫۰\,\mu\mathrm{C}$ در فاصلهٔ ۳۰ cm در شرق آن واقع است، نیروی ۶٫۰ N به طرف شرق وارد می‌آید. مقدار Q را تعیین کنید.

حل: از معادلهٔ(۱۸–۱)، Q_1 را با دانستن Q_2 و F محاسبه می‌کنیم:

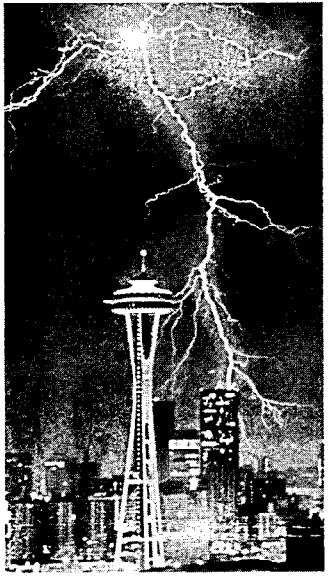
$$Q_1 = \frac{Fr^2}{kQ_2} = \frac{(۶٫۰\ \mathrm{N})(۰٫۳۰\ \mathrm{m})^2}{(۹٫۰ \times ۱۰^۹\ \mathrm{N.m^2/C^2})(۵٫۰ \times ۱۰^{-۶}\ \mathrm{C})} = ۱٫۲ \times ۱۰^{-۵}\,\mathrm{C}$$

حال باید تعیین کنیم که Q_1 مثبت است یا منفی. چون نیروی وارد بر بار به طرف بار مثبت $۵٫۰\,\mu\mathrm{C}$ است، بارها یکدیگر را می‌ربایند. پس می‌توان نتیجه گرفت که بار مجهول عبارت است از $Q = -۱۲\,\mu\mathrm{C}$.

مثال ۱۸ـ۲ دو کرهٔ کوچک مجموعاً $۲۰\,\mu\mathrm{C}$ باردارند. وقتی که این دو به فاصلهٔ ۳۰ cm از یکدیگر واقع شوند، نیروی بین آنها رباینده و اندازهٔ آن ۱۶ N است. هر کره چه‌قدر بار دارد؟

حل: فرض کنید که بار دو کره Q_1 و Q_2 باشد. چون نیروی بر هم کنش رباینده است، علامت بارها باید مخالف باشند. مجموع بارها $۲۰\,\mu\mathrm{C}$ است. پس

$$Q_1 + Q_2 = ۲۰\,\mu\mathrm{C}$$



شکل ۱۸ـ۷ تخلیهٔ الکتریکی هنگام وقوع صاعقه.

معادلهٔ (۱۸ـ۱) را باز نویسی می‌کنیم، می‌رسیم به

$$Q_1 Q_2 = \frac{Fr^2}{k} = \frac{-(16\ \mathrm{N})(0{,}30\ \mathrm{m})^2}{9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N.m^2/C^2}} = -16 \times 10^{-11}\ \mathrm{C^2}$$

علت ظهور علامت‌منفی در این رابطه آن‌است‌که می‌دانیم علامت Q_1 و Q_2 مخالف‌اند.
حال می‌نویسیم $Q_2 = -16 \times 10^{-11}/Q_1\ \mathrm{C}$ و آن‌را در معادلهٔ اول قرار می‌دهیم

$$Q_1 - \frac{16 \times 10^{-11}}{Q_1} = 20 \times 10^{-6}$$

دو طرف را در Q_1 ضرب و جمله‌ها را بازآرایی می‌کنیم

$$Q_1^2 - 20 \times 10^{-6} Q_1 - 16 \times 10^{-11} = 0$$

این معادلهٔ درجهٔ دوم دو جواب دارد

$$Q_1 = \frac{20 \times 10^{-6} \pm \sqrt{400 \times 10^{-12} + 64 \times 10^{-11}}}{2}$$

$$= \frac{(20 \pm 32{,}2) \times 10^{-6}}{2} = 10 \pm 16{,}1 \mu\mathrm{C}$$

بدینسان $Q_1 = 26{,}1\mu\mathrm{C}$ یا $-6{,}1\mu\mathrm{C}$

اگر جواب اول را انتخاب کنیم، داریم

$$Q_2 = \frac{-16 \times 10^{-11}}{26{,}1 \times 10^{-6}} = -6{,}1 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}$$

واضح است‌که اگر دومین جواب را انتخاب‌کنیم، به دست می‌آید: $Q_2 = 26{,}1\mu\mathrm{C}$.
نتیجه درست همان است که باید باشد؛ با اطلاعاتی که داریم نمی‌توان تعیین کرد که کدام‌یک از دو کره بار مثبت دارد. تنها می‌دانیم که بار یک کره $26{,}1\mu\mathrm{C}$ و بار دیگری $-6{,}1\mu\mathrm{C}$ است.