

# الشحنة

## 11- نبذة تاريخية

### 2.1- الشحنة الكهربائية

### 2.1- تكميم الشحنة وحفاظها

### 2.1- بنية المادة

### 2.1- القوة الكهربائية

## 11 - نبذة تاريخية :

الكهرباء هي مجموعة الظواهر المتعلقة بالشحنات الكهربائية الساكنة أو المتحركة، ففي حالة الشحنات الساكنة تنشأ حقول كهربائية بوسعها أن تؤثر على الأجسام المجاورة، وفي حالة الشحنات المتحركة تتولد حقول مغناطيسية و تيارات كهربائية و عموماً فإن الكهرباء تنتشعب إلى عدة فروع نذكر منها:

- الكهرباء الساكنة (الكهروستاتيك أو الإليكتروستاتيك)، وتهتم بالأجسام المشحونة في غياب التيارات الكهربائية.
- الكهرباء المتحركة (الكهروحركية أو الإليكتروسينيتيك)، وتدرس التيارات الكهربائية بصفة عامة.
- الكهرباء التحريكية (الكهروديناميكية أو الإليكتروديناميك)، وتعالج بصفة خاصة التأثيرات الديناميكية بين التيارات الكهربائية.
- الكهرومغناطيسية (الكهرومطية)، وتعالج التأثيرات المتبادلة بين المغناطيسية وبين التيارات الكهربائية.
- الكهروكيميائية، وتهتم بتحويلات الطاقة الكهربائية إلى الطاقة الكيميائية أو العكس.
- الإليكترونيك، وتستغل البنية الجسيمية للكهرباء لتبادل المعلومات عن طريق هندسة العناصر و الدارات.

نشأ علم الكهرباء تدريجياً ابتداء من مشاهدات بسيطة للظواهر الطبيعية، حيث تعود المشاهدات الأولى إلى 600 سنة قبل الميلاد، حيث إن الظواهر الكهروستاتيكية للتجاذب والتنافر المترتبين عن ذلك العنبر أو بعض المواد الزجاجية بقطعة صوف أو حرير، قد عرفت منذ عصور فلاسفة الإغريق كطاليس (القرن 6 ق.م) وسقراط (القرن 3 والـ 4 ق.م)، إلا أن هذه المشاهدات لم تحظ بتحليل منهجي إلا في القرن الـ 16 م في مقالة نشرها لأول مرة الفيزيائي وليام جيلبرت، مقترحاً تسمية "الكهرباء" لوصف القوة المتولدة عن هذه الأجسام الزجاجية (الكهرباء من أصل إغريقي -  $\etaλεκτρον$  - و الذي يعني العنبر و هو مادة صمغية صلبة تفرزها بعض الأشجار). وقد بات اليوم معلوماً أن ذلك عود من العنبر أو الزجاج بخرقة، يقتلع من ذراتها إلكترونات ويحيلها إلى العود ليصبح مشحوناً بشحنة سالبة، تجعله قادراً على ممارسة قوة كهروستاتيكية على محيطه.

- عام 1672 . اختراع أول آلة تنتج شحنات بطريقة ميكانيكية (الفاندغراف).
- عام 1752 . تحقيق تجربة لالتقاط الشحنات الجوية المسؤولة عن البرق والصواعق، بواسطة طائرة ورقية.
- عام 1767 . التوصل إلى أن شحنة الناقل تحتل سطحه الخارجي، وأن التجاذب الكهربائي يخضع لنفس القانون الذي يحكم الجاذبية.

وكذلك المغناطيسية، فهي تعود إلى الحضارات القديمة التي قامت في آسيا الصغرى، وبالضبط في منطقة مغنيسيا بتركيا؛ حيث شوهدت صخور طبيعية تتجذب إليها برادة الحديد وتلتصق بها القطع الحديدية الصغيرة، ومنها اشتقت تسمية

فالمغناطيسية فرع من فروع الفيزياء يهتم بدراسة الأجسام الممغطة. تتلقى أغلب المواد تمغنطاً مؤقتاً تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي. يؤثر هذا الأخير على الجسيمات المشحونة المتحركة التي تشكل ذرات المادة. وعلى العكس، تملك بعض المواد تمغنطاً شديداً دائماً مثل الصخور المغناطيسية.

عرفت الظاهرة المغناطيسية قديماً منذ لاحظ القدماء من الإغريق والرومان والصين أن أكسيد الحديد (المغناطيس) له القدرة على جذب الأجسام التي تحتوي على الحديد. ولاحظوا كذلك أن قطعة الحديد تملك نفس الخاصية بملامستها للمغناطيس. وفي القرن الـ11 م استعمل العرب المغناطيسية في الملاحة باكتشافهم للبوصلة. لم تحظ المغناطيسية بدراسة علمية إلا بعد مقالة وليام جيلبرت التي أشار فيها إلى أن الأرض بدورها هي مغناطيس عملاق، وميز فيها بين التجاذب المغناطيسي والتجاذب الكهربائي، واكتشف أن الحديد يفقد الممغطة بعد تسخينه إلى درجة الاحمرار. وفي نهاية القرن الـ18 بأشركولوم أول دراسة كمية لقياس القوة بين شحنتين.

توالت البحوث في الكهرباء والمغناطيسية بصفة مستقلة إلى غاية 1820 م، العام الذي اكتشف فيه أورستد وجود علاقة وطيدة بينهما، بعدما لاحظ أن تياراً كهربائياً يتسبب في انحراف إبرة مغناطيسية (بوصلة)، أي أن مرور تيار كهربائي يولد حوله حقلاً مغناطيسياً. وكان هذا الاكتشاف بحق فتحاً عظيماً في الفيزياء سمح فيما بعد بدمج الكهرباء والمغناطيسية في فرع واحد هو "الكهرطية". تلقف أمبير هذه التجربة لدراسة تأثير التيارات الكهربائية على المغناط، وسمح ذلك بوضع أول نظرية رياضية للكهرطية عام 1822. وفي عام 1831 بين ميشال فاراداي بأن مرور تيار في وشيعة يمكن أن يحرض تياراً آخر في وشيعة مجاورة، مكتشفاً بذلك التحريض الكهرطي. وساهم كثير من العلماء في تطوير الكهرطية حتى وضعت قواعدها الأساسية على "معادلات ماكسويل" عام 1873، وهي معادلات أربع تقوم بدور مماثل لـ "قوانين نيوتن" في الميكانيك. كان لهذا الاكتشاف صدى سريعاً في ميدان الاتصالات:

- في عام 1887 أنتج الألماني هرتز الأمواج الكهرطية في الجو.
  - في عام 1896 أنهى المهندس الإيطالي ماركوني أول عدة لبث واستقبال أمواج الراديو.
- استغلت الكهرباء لأول مرة كمصدر للطاقة والعمل منذ القرن الـ19 بفضل أعمال إدسون وتسلا. أما فرع الإلكترونيات الذي هو أساس النظرية الحديثة للكهرباء فقد تطور على امتداد القرن الـ20، بدءاً بأول قياس دقيق لشحنة الإلكترون قام بها مليكان عام 1909، ثم عرف بسرعة تطبيقات في ميادين الاتصالات والضوء (المجهر الإلكتروني) ومعالجة المعلومات.

## 2.1 - الشحنة الكهربائية:

تكتسب الأجسام عقب دلكها خاصية جديدة إلى جانب كتلتها نسميها **الكهرباء**، فيصبح بوسعها التقاط الأجسام الخفيفة. فمن السهل التقاط قصاصات الورق بواسطة مسطرة من لدن إثر دلكها بشدة. كما يمكن أيضاً مشاهدة آثار الكهرباء عند مشط الشعر أو عند نزع الثياب المصنوعة من الألياف الاصطناعية، وكذلك نشعر أحياناً بصدمة خفيفة بمجرد لمس مقبض الباب بعد السير على بساط أو بعد الانسحاب على مقعد سيارة... هذه الظواهر وأشباهاها عبارة عن تفرغ كميات صغيرة من الكهرباء المتراكمة في صورة مستقرة. في حين أن الصواعق عبارة عن تفرغ كمية عالية من الكهرباء المتراكمة عادة على السحب.

من شأن هذه الخاصية (الكهرباء) أن تولد تأثيرا يختلف عن تأثير الجاذبية الأرضية يدعى **التأثير الكهربائي**، وقد بات مؤكداً أن التأثيرات المتبادلة بين الأجسام المكهربة هي إحدى أهم التفاعلات الجارية في الطبيعة؛ فهي التي تحدد مثلاً البنية الداخلية لمختلف الأجسام، فضلاً عن أنها تفسر الخواص الفيزيائية والكيميائية لمختلف المواد، بحكم أنها المسؤولة عن تماسك الذرات وعن التحولات الغذائية (الأيض) لدى الكائنات الحية...

يعزى هذا التأثير الكهربائي إلى وجود مقدار فيزيائي في الجسم المكهرب يدعى **الشحنة الكهربائية**.

الشحنة الكهربائية: هي خاصية لبعض الجسيمات دون الذرية تحدد التفاعلات الكهرومغناطيسية الخاصة بها. فالمادة المشحونة كهربياً تتأثر بالمجالات الكهرومغناطيسية وتنتجها.

كما تقوم الشحنة الكهربائية بدور مماثل للكتلة في التفاعلات الثقالية، ويوجد منها نوعان: **سالبة** و **موجبة**. فالأجسام التي تحمل نفس النوع من الشحنات تتنافر، على عكس الأجسام التي تحمل نوعين مختلفين فهي تتجاذب. أما الأجسام التي لا تتبادل فيما بينها التأثير الكهربائي فهي الأجسام "المتعادلة كهربائياً".

يتحدد سلوك المادة من الناحية الكهربائية بمدى قدرة الشحنات فيها على الحركة، وبناء على ذلك تصنف المواد إلى: نواقل - عوازل - أشباه نواقل.

فالأجسام التي يمكن فيها للشحنات الفائضة أن تنتقل بحرية لمسافات معتبرة أمام المسافات الفاصلة بين الذرات، تدعى "النواقل"، مثل الفلزات والمحاليل المائية والغازات المتشردة والأرض والكائنات الحية...، ويعد ناقلاً جيداً كلما كثرت شحناته وسهلت حركتها.

أما الأجسام التي لا تسمح بمثل هذه الحرية في الانتقال فتدعى "العوازل"، لأن الشحنات الفائضة فيها تراوح في محلها، كالزجاج والغازات في الشروط العادية واللدائن...

تتضمن كل العناصر في الطبيعة تقريباً تحت أحد هذين الصنفين من الأجسام، باستثناء القليل منها كالجرمانيوم والسليسيوم... وغيرها والتي تشكل صنفاً وسيطياً ثالثاً، لا يقل أهمية، يسمى "أشباه النواقل".

إن الإلكترونات التي هي أجسام لطيفة في منتهى الخفة، والتي دأبها الدوران في الذرة حول النواة، هي جسيمات مشحونة؛ تبلغ سرعتها آلاف الكيلومترات في الثانية، وفي بعض المواد تبقى الإلكترونات **مقيدة** بالذرة التي تنتمي إليها، وفي البعض الآخر توجد إلكترونات حرة بوسعها أن تقطع مسافات كبيرة بين الفجوات التي تتخلل الذرات.

مما سبق يمكن التعميم أن الكهرباء بمعناها الواسع هو تدفق مستمر للإلكترونات داخل جسم ما أو مادة ما.

- يشحن الجسم بتراكم إلكترونات الحرة على بعض أجزائه بجلبها من أجزائه الأخرى. فيظهر في بعض النقاط فائض في الإلكترونات، وفي البعض الآخر نقص في الإلكترونات.
- عبارة "الكُمون" المتداولة في المصطلح العلمي، ترتبط بظاهرة تراكم الإلكترونات على الجسم؛ وعبارة "فرق الكُمون" ترتبط بتفاوت في هذه التراكُمات؛ وإحداث التوازن بينها بكيفية ما يفضي إلى انسياق هذه الإلكترونات في اتجاه ما؛ وتشكل هذه الحالة الظاهرة العملية المعروفة بالتيار الكهربائي.
- هذا التيار. إن صح القول. هو إثارة بالغة غير عادية للإلكترونات الهائجة.

- فمصدر الكهرباء هو فرق الكمون الذي يدعى في المصطلح الجاري "التوتر الكهربائي".
  - بتطبيق فرق الكمون، فإننا نوجه حركة بعض الإلكترونات "الرحالة" التي تتخذ مسارها بين الذرات. تشكل هذه الحركة الموجهة إلى جانب التصادمات الحادثة ما يعرف بالمفعول الكهربائي.
- ### 3.2 - تكميم الشحنة وانحفاظها:

ثبت بعد تجربة مليكان الشهيرة عام 1909 م، أن الشحنات الموجودة في الطبيعة عبارة عن مضاعفات (عدد صحيح) لشحنات أساسية، ألا وهي شحنة البروتون أو شحنة الإلكترون؛ أي:

$$Q = \pm Ne \quad (1.1)$$

حيث  $N$  عدد طبيعي، و  $|e| \approx 1.6 \cdot 10^{-19} C$  شحنة الإلكترون (أو البروتون بالقيمة المطلقة).

معنى هذا أنه عند شحن جسم ما إنما نقوم بنزع عدد  $N$  من الإلكترونات فيغدو موجب الشحنة، أو بإضافة عدد  $N$  من الإلكترونات فيغدو سالب الشحنة.

فالجسم المكهرب هو الذي به فائض/نقص من الشحنات الأساسية. والجزء أو الذرة التي حدث لها هذا تدعى شاردة (أو أيونا).

في الفيزياء تخضع الظواهر الكهربائية لقانون انحفاظ الشحنة (نفس مبدأ انحفاظ الكتلة و الطاقة..)، وهي فرضية مفادها أن الشحنة لا تفنى ولا تستحدث من العدم ولكنها تتحول من جسم إلى آخر فقط (ينتقل). فالجملة المعزولة تحتفظ بشحنتها (الإجمالية)، وما عملية التكهرب سوى إعادة لتوزيع الشحنات بين عناصر الجملة.

مثال (1.1):

أحسب كمية الشحنة الموجبة (أو السالبة) في  $1 \text{ mm}^3$  من النحاس، حيث يعطى عدد أفوغادرو:  $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ، الكتلة الحجمية:  $\rho = 8.9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$  الكتلة الجزيئية:  $A = 64 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$ ، العدد الذري:  $Z = 29$

الجواب: يتوقف الأمر هنا على إيجاد عدد الشحنات الأساسية في كتلة من النحاس  $m = \rho V$ ، ثم تقدير كمية شحنتها الإجمالية.

من المعلوم أن الكتلة الجزيئية  $A$  تحتوي على العدد  $N_A$  من الجزيئات (أو من الذرات في حالة الفلزات)، بينما تحتوي الكتلة  $m$  على العدد  $N$  من الذرات؛ أي أنه حسب القاعدة الثلاثية:

$$\left. \begin{array}{l} A \rightarrow N_A \\ m \rightarrow N \end{array} \right\} \Rightarrow N = \frac{m}{A} N_A \quad \text{نرة}$$

غير أن كل ذرة تحتوي على العدد  $Z$  من الإلكترونات (أو من البروتونات)؛ أي على الشحنة  $q = Ze$ . وبذلك تكون الشحنة الإجمالية في  $1 \text{ ملم}^3$  من النحاس هي:

$$Q = Nq = \frac{m}{A} N_A Ze = \frac{\rho V}{A} N_A Ze$$

$$Q = \frac{(8.9 \cdot 10^3)(10^{-9})}{(64 \cdot 10^{-4})} (6.02 \cdot 10^{23})(29)(1.6 \cdot 10^{-19}) = 388.6 C$$

مثال (2.1):

وزعت شحنة  $Q = 1.1 \cdot 10^{-6} C$  على مكعب من النحاس حجمه  $1 \text{ سم}^3$ .

(أ) ما هي نسبة الشوارد في المكعب؟ (الشاردة هنا هي ذرة فقدت إلكترونين:  $\text{Cu}^{++}$ ).

(ب) ما هي رتبة مقدار هذه النسبة للشوارد الواقعة على سطح المكعب؟

(استعن بالمعطيات الواردة في المثال السابق).

الجواب:

أ) كل شاردة تحمل الشحنة  $q = 2e = 3.5 \cdot 10^{-19} C$ . فعدد هذه الشوارد في المكعب هو:

$$N_1 = \frac{Q}{q} = \frac{1.1 \cdot 10^6}{3.2 \cdot 10^{-19}} = 3.5 \cdot 10^{12} !!$$

هذا العدد الهائل يبدو قليلا أمام الذرات المتعادلة التي لم تتشرد في المكعب؛ إذ أن عدد الذرات في  $1 \text{ سم}^3$  من النحاس هو:

$$n = \frac{N_2}{V} = \frac{1}{V} \left( \frac{m}{A} N_A \right) = \frac{m/V}{A} N_A = \frac{\rho}{A} N_A$$

$$n = \frac{8.9}{64} 6.02 \cdot 10^{23} = 8.3 \cdot 10^{22}$$

ونسبة الشوارد إذن:

$$\alpha = \frac{N_1}{n} = \frac{3.5 \cdot 10^{12}}{8.3 \cdot 10^{22}} = 4 \cdot 10^{-9} \%$$

وهي نسبة في غاية الضعف.

ب) تحتل الشوارد في الحقيقة سطح الناقل دائما. ويمكن تقدير عددها  $N_3$  بتوهم الذرة كمكعب حرفه  $a$ ، بحيث أن:

$$a = \left( \frac{1}{n} \right)^{-1/3} \text{ cm} \quad \text{أو} \quad na^3 = 1 \text{ cm}^3$$

عدد الذرات التي يحتويها الوجه الواحد يساوي النسبة بين مساحة الوجه ومساحة الذرة؛ أي:  $\frac{N_3}{6} = \frac{1 \text{ cm}^3}{a^2}$ . ومنه:

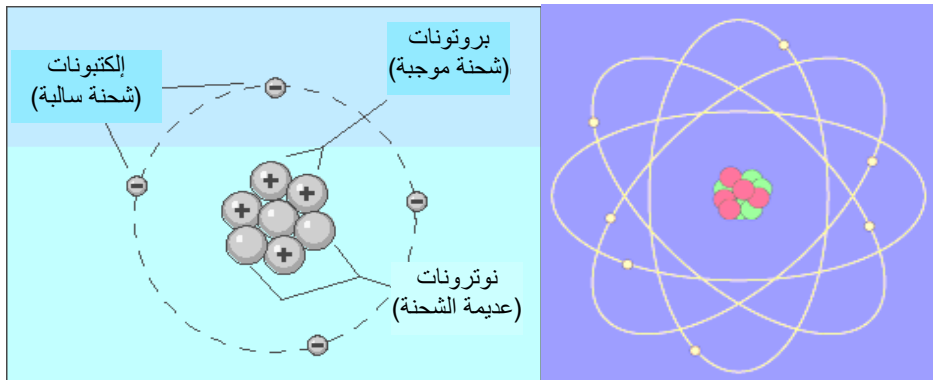
$$N_3 = \frac{6}{a^2} = 6n^{2/3} = 1.17 \cdot 10^{16} \text{ شاردة}$$

فنسبة الشوارد على سطح المكعب هي:

$$\beta = \frac{N_1}{N_3} = \frac{3.5 \cdot 10^{12}}{1.17 \cdot 10^{16}} = 3 \cdot 10^{-4} = 0.03 \%$$

## 4.1 - بنية المادة:

توصف المادة . في الفيزياء الحديثة . بأنها مجاميع من الذرات . والذرات بدورها تتشكل من نواة (اكتشاف رذرفورد عام 1911) تحمل معظم كتلة الذرة وتحوم حولها سحابة من الإلكترونات.



الشكل (2.1) - بنية الذرة

تتألف الإلكترونات فيما بينها (شحنة سالبة) ومع ذلك تبقى مشدودة إلى النواة التي تحتوي على بروتونات (شحنة موجبة)، وما كان للنواة أن تستقر لولا وجود نوترونات (جسيمات عديمة الشحنة) إلى جانب البروتونات (اكتشاف شادويك عام 1932)

يمثل كل عنصر كيميائي  $X$  في الجدول الدوري (ماندليف) بالرمز  ${}_Z^AX$  حيث يمثل  $A$  العدد الكتلي (عدد النكليونات؛ وهو مجموع البروتونات والنوترونات)، و  $Z$  العدد الذري (عدد البروتونات). فالشحنة الكلية في النواة هي  $Q = +Ze$  وشحنة السحابة الإلكترونية هي  $Q = -Ze$ ، مما يضمن تعادل الذرة كهربائياً. فعلى سبيل المثال؛ تتكون ذرة النحاس  ${}_{63}^{29}\text{Cu}$  من 63 نكليون، منها 29 بروتون (وبالتالي 29 إلكترون) و 34 نوترون. قيم الشحنات والكتل للجسيمات المكونة للنواة في المنظومة الدولية هي:

الجسيم	شحنته	كتلته
الإلكترون	$q_e = -e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
البروتون	$q_p = +e = +1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$m_p = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
النوترون	$q_n = 0$	$m_n = 1.674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

وكما نلاحظ، فإن شحنة مقدارها 1 كولوم (وهي شحنة ضخمة)، تكافئ  $10^{18}$  إلكترونات، ولا تساهم إلا بكتلة من رتبة  $10^{-12}$  كغ، وهي بالفعل لا تدرك بالحواس.

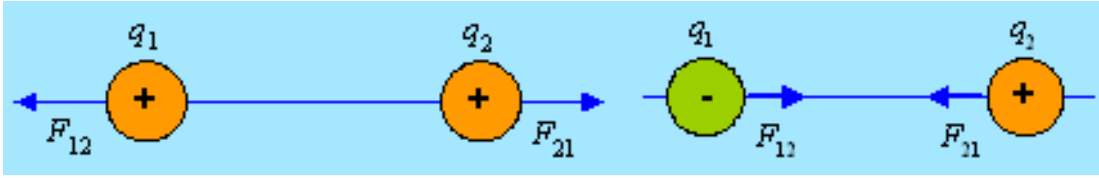
إذا كانت الإلكترونات هي جسيمات شبه نقطية، فإن النوترونات والبروتونات على العكس ذات أبعاد غير معدومة (أقل من  $10^{-15}$  م). وقد تأكد أنها تتكون بدورها من الكواركات (التي تشكل اليوم مع الإلكترونات، اللبتات الأولية للمادة، كما تشكل البروتونات مع النوترونات فئة أخرى تدعى "الباريونات").

بناءً على ما سبق ذكره، تبدو المادة وكأنها مشكلة من الفراغ!! فلو تخيلنا ذرة نصف قطر نواتها 5 م لبلغ نصف قطر الذرة 500 كلم.

## 5.1 - القوة الكهربائية:

تعود بداية الدراسة الكمية للظواهر الكهربائية إلى نهاية القرن الـ18م، حين توصل (شارل كولوم) إثر تجاربه إلى قانون التأثير المتبادل بين الشحنات، والذي أضحي يحمل اسم "قانون كولوم".

نبتدى دراسة التفاعلات الكهربائية للأجسام المشحونة بدراسة حالة بسيطة، وهي حالة "الشحنات النقطية" التي تقوم في الكهرباء بنفس الدور الذي تقوم به "النقطة المادية" في الميكانيك، فالشحنة النقطية بالتعريف عبارة عن جسم مشحون، أبعاده الخطية مهمة بالمقارنة مع المسافات التي تفصله عن باقي المؤثرات. أما في حالة الشحنات التي لا يمكن اعتبارها نقطية، فينبغي تجزئتها ذهنيا إلى عناصر في غاية الصغر، بحيث يمكن اعتبار كل من هذه العناصر شحنة نقطة.



الشكل (3.1) - قوى التجاذب والتنافر بين شحنتين

لقد تبين من تجارب كولوم على الشحنات النقطية الساكنة، أن قوة التأثير الكهربائي  $F$  المتبادل بين شحنتين  $q_1$  و  $q_2$  تتناسب طردا مع كل منهما وعكسا مع مربع البعد  $d$  بينهما، وحامل القوة هو المستقيم الواصل بين موضعى الشحنتين  $q_1$  و  $q_2$  ولقد عبر عنها بالعلاقة الرياضية الشهيرة التي تحمل إسمه كما يلي :

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (3.1)$$

حيث  $k$  ثابت التناسب، ويدعى "الثابت الكهربائي"، وهو يتعلق بالوسط المادي حول الشحنتين. ففي حالة الفراغ نجد أن:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2} \quad (4.1)$$

حيث  $\epsilon_0$  هي "سماحية الفراغ"، وتدعى أيضا "ثابت العازلية"، وتساوي في المنظومة الدولية:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ SI} \quad (5.1)$$

ويرمز  $c$  لسرعة الضوء ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).

نلاحظ من العلاقة (3.1) أن قانون كولوم يحاكي في الشكل قانون نيوتن في "الجذب العام" بين الكتل؛ حيث نجد قانون نيوتن يعطى بالعلاقة الرياضية التالية :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (6.1)$$

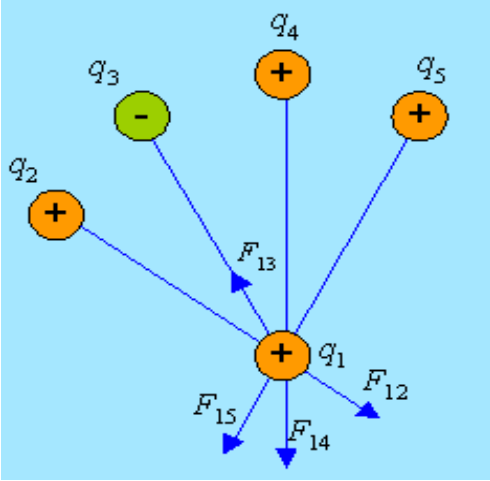
حيث  $G$  ثابت الجذب العام، ويساوي تقريبا:

$$G \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2} \quad (7.1)$$

إن المحتوى الفيزيائي الرئيسي لقانون كولوم هو الادعاء حول التناسب

العكسي للقوة مع مربع المسافة (قانون التربيع العكسي)، وكذلك عدم تعلق القوة بين شحنتين بوجود أو غياب شحنة ثالثة مجاورة (مبدأ التراكب)، لهذا بوسع هذا القانون أن يفسر كل مسائل الكهرباء الساكنة و التفاعلات بين الشحنات النقطية الساكنة.

إلا أنه في حالة التعامل مع أكثر من شحنتين، كما يوضح الشكل المقابل فإن القوة المحصلة  $\vec{F}_1$  هي الجمع الشعاعي للقوى المؤثرة على الشحنة  $q_1$ :  $\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15}$  (مبدأ التراكب أو الجمع)



ملاحظة : قانون كولوم قانون أساسي و لا توجد بعد دلائل تجريبية

تؤكد أو تفند صحة قانون كولوم في مجال المسافات من رتبة الأبعاد الفلكية (المتناهيات في الكبر)، ولا في مجال المسافات المجهرية من رتبة  $10^{-14}$  م أو أقل (المتناهيات في الصغر أو النانومترية).

في علم الفيزياء توجد أربع قوى أساسية تحكم المادة:

- (1) القوة النووية العالية: وهي المسؤولة على تماسك النواة (بروتونات-نوترونات)، مجالها  $10^{-15}$  م.
- (2) القوة النووية الضعيفة: وهي المسؤولة على تماسك الباريونات (كواركات-كواركات)، مجالها دون  $10^{-18}$  م.
- (3) القوة الكهرومغناطيسية: وهي المسؤولة على تماسك النواة (إلكترونات-نكليونات)، مجالها ما لانهاية.
- (4) القوة الثقالية (قوة نيوتن): وهي المسؤولة على بنية الكون على نطاق واسع (تماسك الأجسام الفيزيائية الفلكية، تماسك منظومات الكواكب والمجرات ونحوها...)، مجالها ما لانهاية.

مثال (3.1): المقارنة بين القوة الكهربائية والقوة الثقالية

ذرة الهيدروجين = 1 بروتون + 1 نوترون على بعد متوسطه نصف أنغشتروم ( $r_0 \approx 0.5 \cdot 10^{-10} m = \frac{1}{2} \text{Å}$ )

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r_0^2} = 4 \cdot 10^{-47} N \ll F_e = k \frac{q_e q_p}{r_0^2} = 8 \cdot 10^{-8} N$$

نلاحظ أن القوى الميكانيكية (الثقالية  $F_g$ ) تبدو مهملة أمام القوى الكهربائية ( $F_e$ ) في نفس المجال، مما يشرح هذه الأخيرة أن تهيمن عمليا على معظم جوانب الحياة (تأمل كيف حلت الآلات والمعدات الكهربائية حاليا محل نظيراتها الميكانيكية التي كانت سائدة في الماضي).  
نلاحظ أيضا أن قوة التنافر الكهربائي بين البروتونات في نواة ما تسعى دائما إلى تفجيرها لولا وجود قوة ثالثة بالمرصاد؛ ألا وهي القوة النووية.

مثال (4.1):

تطبيق: قدر عدد الإلكترونات التي تنتزعها (أو تضيفها) عقب ذلك رأسك بطرف قلم.  
الجواب: من المعلوم أن الأجسام تتكهرب بالدلك أو باللمس أو بالتأثير، ومن المعلوم أيضا أن كمية الشحنة في جملة معزولة (الرأس والقلم) محفوظة قبل دلكهما وبعده. بناء على ذلك يمكن تقدير كمية شحنة الرأس بتقدير شحنة القلم؛ أي دون إخضاع الرأس للقياس !!



من أجل ذلك نقرب طرف القلم المدلوك جيدا من قصاصة ورق صغيرة (جسم خفيف) تقدر كتلتها بحوالي 9 ملغ، فتكهرب هذه الأخيرة بالتأثير مكتسبة شحنة تساوي شحنة القلم تقريبا وتعاكسها بالإشارة؛ أي:  $|q_1| \approx |q_2| = q$ . تظهر بينهما قوة تجاذب كهربائي  $F$  تزداد شدتها كلما قلت المسافة بينهما، إلى أن تصبح القصاصة في حالة توازن بين القوة الكهربائية وقوة ثقلها من أجل مسافة  $d \approx 1 \text{ cm}$  تقريبا؛ أي:

$$\vec{F} + m\vec{g} = \vec{0} \Leftrightarrow k \frac{q^2}{d^2} = mg$$

$$q = d \sqrt{\frac{mg}{k}} = 10^{-2} \sqrt{\frac{(9 \cdot 10^{-6}) 10}{9 \cdot 10^9}} = 1 \text{ nC} \quad \text{ومنه:}$$

وبما أن الشحنة مكعبة؛ أي:  $q = Ne$ ، فإن عدد الإلكترونات المنتزعة من الرأس (أو المضافة إليه) هو:

$$N = \frac{q}{e} = \frac{10^{-9}}{1.6 \cdot 10^{-19}} \approx 6 \cdot 10^9 \text{ إلكترونات}$$

وهكذا بدلكة بسيطة تكون قد انتزعت من رأسك (أو أضفت إليه) ستة ملايين من الإلكترونات !!

لنرجع الآن إلى العلاقة (3.2) لنصوغها صياغة شعاعية تتضمن شدة القوة واتجاهها. فإذا اخترنا على حامل الشحنتين شعاع الوحدة  $\vec{e}_{12}$  الذي ينتجه من  $q_2$  إلى  $q_1$  كما يوضح الشكل (4.2)، أمكن كتابة القوة الكهربائية التي تمارسها الشحنة  $q_2$  على  $q_1$  بالصورة:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (8.1)$$

$$\text{أو أيضا، باعتبار } \vec{e}_{12} = \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \quad (9.1)$$

يمكن تعميم العلاقة (9.1) على جملة  $n$  من الشحنات النقطية  $q_i$  التي تحتل المواضع  $M_i$  ( $\vec{OM}_i = \vec{r}_i$ )، والمؤثرة على الشحنة  $q$  التي تحتل الموضع  $M$  ( $\vec{OM} = \vec{r}$ )، فنكتب:

$$\vec{F}(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (10.1)$$

مثال (5.1):

اعتبر شحنتين  $q_1 = 310^{-4} \text{ C}$  و  $q_2 = -10^{-4} \text{ C}$  عند الموضعين:  $M_1(1,2,3)$  و  $M_2(2,0,5)$  من الفراغ على الترتيب. أحسب القوتين  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{21}$ . ماذا تلاحظ؟  
الجواب: نطبق مباشرة العلاقة (9.1)، ونحسب أولا:

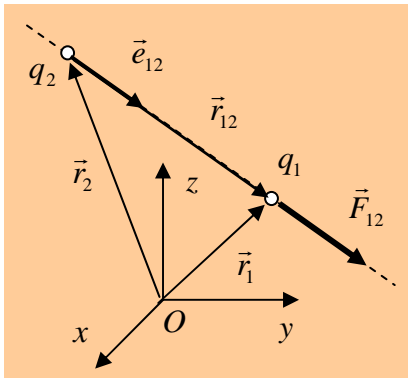
$$\vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3 = [(-1)^2 + (2)^2 + (-2)^2]^{3/2} = 3^3 = 27$$

ومنهما نجد:

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{(-\vec{e}_x + 2\vec{e}_y - 2\vec{e}_z)}{27} = 10 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} = -\vec{F}_{21}$$

فالشحنتان تستجيبان لقانون "الفعل ورد الفعل".



الشكل (4.2) - مخطط القوة في الفضاء

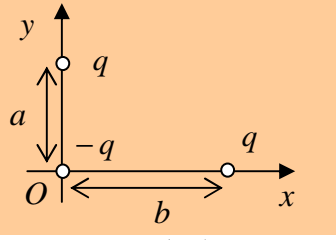
يمكن أيضا أن نعتد على العلاقة (8.2) فنحصل على الصورة:

$$\vec{F}_{12} = -30 \left[ \frac{(-\vec{e}_x + 2\vec{e}_y - 2\vec{e}_z)}{3} \right] = -30 \vec{e}_{12}$$

أي أن القوة التي تمارسها  $q_2$  على  $q_1$  تتجه نحو  $q_2$  (قوة تجاذب)، وشدتها 30 نيوتن.

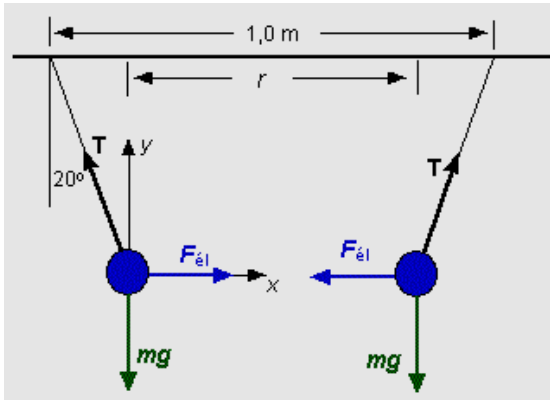
تمرين (4.1):

مثل على الشكل المقابل مخطط القوى المؤثرة على الشحنة المركزية ( $-q$ )، ثم أحسب حاصلتها مرة بطريقة هندسية ومرة بطريقة تحليلية.



الشكل (5.2)

مثال (6.1):



يبين الشكل كرتين معلقتين بواسطة حبلين متماثلين، طول الواحد منهما 60 سم، وكتلة كل كرة 1 غ وتفصلهما في البداية مسافة 1 م. وبعد شحن الكرتين انفرج الحبلان عن الشاقول بزاوية  $20^\circ$ . إذا بلغت الشحنة الكلية على الكرتين 0.5 ميكرو كولوم، فما هي شحنة كل منهما؟

الجواب:

نعلم أن:

$$q_1 + q_2 = 0.5 \mu C$$

بإيجاد طويلة شعاع القوة الكهربائية، يمكن أن نحصل على جداء الشحنتين كمعادلة ثانية. من أجل ذلك نطبق المبدأ الأساسي للتحريك على إحدى الكرتين، فنحصل على:

$$\sum F_x = F_{el} - T \sin 20^\circ = 0$$

$$\sum F_y = T \cos 20^\circ - mg = 0$$

بحذف التوتر من المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$F_{el} = mg \tan 20^\circ = 0.003567 \text{ N}$$

لكن عبارة القوة الكهربائية:

$$0.003567 = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

حيث  $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$ ، والثابت الكهربائي، و  $r = 1 - 2(0.6 \sin 20^\circ) = 0.5896 \text{ m}$  المسافة الفاصلة بين الكرتين

المشحونتين كما هو مبين بالشكل؛ وهذا ما يفضي إلى:

$$q_1 q_2 = -1.378 \times 10^{-13} \text{ C}^2 \quad (2)$$

جداء الشحنتين سالب لأنهما في حالة تجاذب كما يوضح الشكل. بمراعاة المعادلتين (1) و (2) يمكن استخراج أحد

المجهولين من (1) وتعويض قيمته في (2) فنحصل على المعادلة التالية:

$$q_1^2 - (0.5 \times 10^{-6}) q_1 - (1.378 \times 10^{-13}) = 0 \quad (3)$$

التي جذورها:

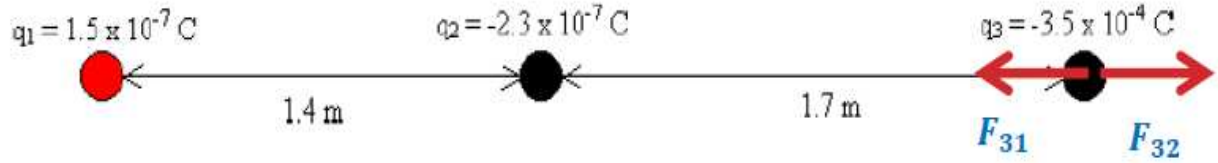
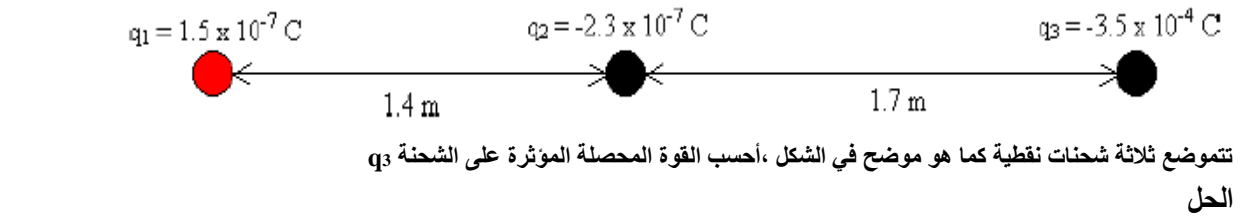
$$\begin{cases} q_1 = +0.698 \mu C \\ q_2 = -0.198 \mu C \end{cases} \text{ أو } \begin{cases} q_1 = -0.198 \mu C \\ q_2 = +0.698 \mu C \end{cases}$$

والحلان مقبولان معا.

## تمرين (5.1):

- تحتل ثلاث شحنات متماثلة قيمتها  $12 \mu C$  ، أركان مربع طول ضلعه 10 سم، بينما تحتل الركن الرابع شحنة  $-10 \mu C$  .  
 (أ) أحسب شدة القوة المحصلة المؤثرة على هذه الأخيرة.  
 (ب) عين اتجاهها أيضا.  
 [الجواب: (أ) 206.7 نيوتن (ب) نحو الداخل على امتداد قطر المربع]

## تمرين



الخطوة 1 حساب القوة  $F_{31}$  التي بها الشحنة  $q_1$  على  $q_3$

$$F_{31} = k \frac{q_1 q_3}{r^2} \vec{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(1,5 \cdot 10^{-7})(-2,3 \cdot 10^{-7})}{(1,4 + 1,7)^2} \vec{i} = -4,9 \cdot 10^{-2} \vec{i} \text{ (N)}$$

الخطوة 2 حساب القوة  $F_{32}$  التي بها الشحنة  $q_2$  على  $q_3$

$$F_{32} = k \frac{q_2 q_3}{r^2} \vec{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(-2,3 \cdot 10^{-7})(-2,3 \cdot 10^{-7})}{(1,7)^2} \vec{i} = 2,5 \cdot 10^{-1} \vec{i} \text{ (N)}$$

الخطوة 3 حساب القوة  $F$  التي تؤثر بها الشحنة  $q_1$  و  $q_2$  معا على  $q_3$

$$F = F_{31} + F_{32} = -4,9 \cdot 10^{-2} \vec{i} + 2,5 \cdot 10^{-1} \vec{i} = -2,01 \cdot 10^{-1} \vec{i} \text{ (N)}$$