# 1 الشحنـــــة

1.1 – نبذة تاريخية
2.1 – الشحنة الكهربائية
3.1 – بنية المادة
4.1 – تكميم الشحنة وانحفاظها
5.1 – ظاهرة التكهرب
6.1 – القوة الكهربائية

## 1.1 - نبذة تاريخية :

الكهرباء هي مجموعة الظواهر المتعلقة بالشحنات الكهربائية الساكنة أو المتحركة. ففي حالة الشحنات الساكنة تنشأ حقول (أو مجالات) كهربائية بوسعها أن تؤثر على الأجسام المجاورة، وفي حالة الشحنات المتحركة تتولد حقول مغناطيسية.

تشكل دراسة الظواهر الكهربائية إحدى أهم القواعد لوصف الكون؛ فهذه الظواهر تعم كل مجال: فالقوى التي تؤثر على مستوى المادة بين الإلكترونات والنوى الذرية هي قوى كهربائية، والضوء هو موجة كهرطية (كهرمغناطيسية)...

تتشعب الكهرباء إلى عدة فروع:

- الكهرباء الساكنة (الكهراكدية)، وتهتم بالأجسام المشحونة في غياب التيارات الكهربائية.
- الكهرباء المتحركة (الكهرحركية)، وتدرس التيارات الكهربائية بصفة عامة.

- الكهرباء التحريكية (الكهرديناميكية)، وتعالج بصفة خاصة التأثيرات الديناميكية بين التيارات الكهربائية.
- الكهرمغناطيسية (الكهرطية)، وتعالج التأثيرات المتبادلة بين المغانط وبين التيارات الكهربائية.
- الكهركيميائية، وتهتم بتحولات الطاقة الكهربائية إلى الطاقة الكيميائية أو العكس.
- الإلكترونيات، وتستغل البنية الجسيمية للكهرباء لتبادل المعلومات.

نشأ علم الكهرباء والمغناطيسية تدريجيا ابتداء من مشاهدات بسيطة للظواهر الطبيعية، ولعل البوصلة هي أولى التطبيقات. وتعود المشاهدات الأولى إلى 600 سنة قبل الميلاد.

إن الظواهر الكهراكدية (الكهرساكنة) للتجاذب والتنافر المترتبين عن دلك العنبر أو بعض المواد الزجاجية، قد عرفت منذ عصور سحيقة، ذكرها على الخصوص فلاسفة الإغريق كطاليس (القرن الـــ6 ق.م) وسقراط (القرن الـــ3 والـــ4 ق.م)، ولم تحظ بتحليل منهجي إلا في القرن الـــ16 م في مقالة نشرها لأول مرة الفيزيائي وليام جلبرت، مقترحا تسمية "الكهرباء"[1] لوصف القوة المتولدة عن هذه الأجسام الزجاجية. وقد بات اليوم معلوما أن دلك عود من العنبر أو الزجاج بخرقة، يقتلع من ذراتها إلكترونات ويحيلها إلى العود ليصبح مشحونا بشحنة سالبة، تجعله قادرا على ممارسة قوة كهراكدية على محيطه.

- عام 1672 ــ اختراع أول آلة كهراكدية تنتج شحنات بطريقة ميكانيكية.

[1] الكهرباء من أصل إغريقي ( $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho o\nu$ ) يعني العنبر الذي هو مادة صمغية متحجرة تفرزها بعض الأشجار

- عام 1752 ــ تحقيق تجربة لالتقاط الشحنات الجوية المسؤولة عن البرق والصواعق، بواسطة طائرة ورقية.
- عام 1767 ــ 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 تنجذب إليها برادة الحديد وتلتصق بها القطع الحديدية الصغيرة، ومنها اشتقت تسمية "المغناطيسية".

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

عرفت الظاهرة المغناطيسية قديما مذ 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 الـــ11 م استعمل العرب المغناطيسية في الملاحة باكتشافهم للبوصلة. لم تحظ المغناطيسية بدراسة علمية إلا بعد مقالة وليام جلبرت التي أشار فيها إلى أن الأرض بدورها هي مغناطيس عملاق، وميز فيها بين التجاذب المغناطيسي والتجاذب الكهربائي، واكتشف أن الحديد يفقد المغنطة بعد تسخينه إلى درجة الاحمرار. وفي نهاية القرن الـــ18 باشر كولوم أول دراسة كمية لقياس القوة بين شحنتين.

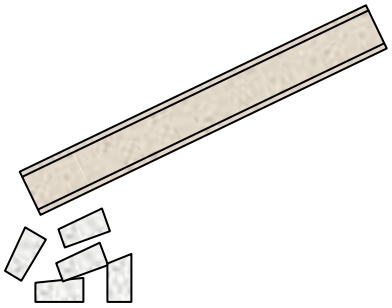
توالت البحوث في الكهرباء والمغناطيسية بصفة مستقلة إلى غاية 1820 م، العام الذي اكتشف فيه أورستد وجود علاقة وطيدة بينهما، بعدما لاحظ أن تيارا كهربائيا يتسبب في انحراف إبرة مغناطيسية (بوصلة)، أي أن مرور تيار كهربائي يولد حواليه حقلا مغناطيسيا. وكان هذا الاكتشاف بحق فتحا عظيما في الفيزياء سمح فيما بعد بدمج الكهرباء والمغناطيسية في فرع واحد هو "الكهرطية". تلقف آمبير هذه التجربة لدراسة تأثير التيارات الكهربائية على المغانط، وسمح ذلك بوضع أول نظرية رياضية للكهرطية عام 1822. وفي عام 1831 بين ميشال فاراداي بأن مرور تيار في وشيعة يمكن أن يحرض تيارا آخر في وشيعة مجاورة، مكتشفا 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 لـــ "قوانين نيوتن" في الميكانيك. كان لهذا الاكتشاف صدى سريعا 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 الـــ19 بفضل أعمال إدسون وتسلا. أما فرع الإلكترونيات ــ الذي هو أساس النظرية الحديثة للكهرباء ــ فقد تطور على امتداد القرن الـــ20، بدءا بأول قياس دقيق لشحنة الإلكترون قام بها مليكان عام 1909، ثم عرف بسرعة تطبيقات في ميادين الاتصالات والضوء (المجهر الإلكتروني) ومعالجة المعلومات.

## 2.1 ـ 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 يوضح الشكل(1.1). كما يمكن أيضا مشاهدة آثار الكهرباء عند مشط الشعر أو عند نزع الثياب المصنوعة من الألياف الاصطناعية. وكذلك نشعر أحيانا بصدمة خفيفة بمجرد لمس مقبض الباب بعد السير على بساط أو بعد الانسحاب على مقعد سيارة... هذه الظواهر وأشباهها 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.



الشكل(1.1)– انجذاب قصاصات ورق إلى مسطرة مدلوكة

من شأن هذه الخاصية (الكهرباء) أن تولد تأثيرا يختلف عن تأثير الجاذبية الأرضية يدعى **التأثير الكهربائي**. وقد بات مؤكدا أن التأثيرات المتبادلة بين الأجسام المكهربة هي إحدى أهم التفاعلات الجارية في الطبيعة؛ فهي التي تحدد مثلا البنية الداخلية لمختلف الأجسام، فضلا 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**. وهي تقوم 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 كهربائيا**".

يتحدد سلوك المادة كهربائيا 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 ناقلا جيدا كلما كثرت شحناته وسهلت حركتها. أما الأجسام التي لا تسمح بمثل هذه الحرية في الانتقال فتدعى "**العوازل**"، لأن الشحنات الفائضة فيها تراوح في محلها حيث وضعت من الجسم، كالزجاج والغازات في الشروط العادية واللدائن ...

تنضوي كل العناصر في الطبيعة تقريبا تحت أحد هذين الصنفين من الأجسام، باستثناء القليل منها كالجرمانيوم والسليسيوم والكربون التي تشكل صنفا وسيطيا ثالثا، لا يقل أهمية، هو "**أشباه النواقل**".

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

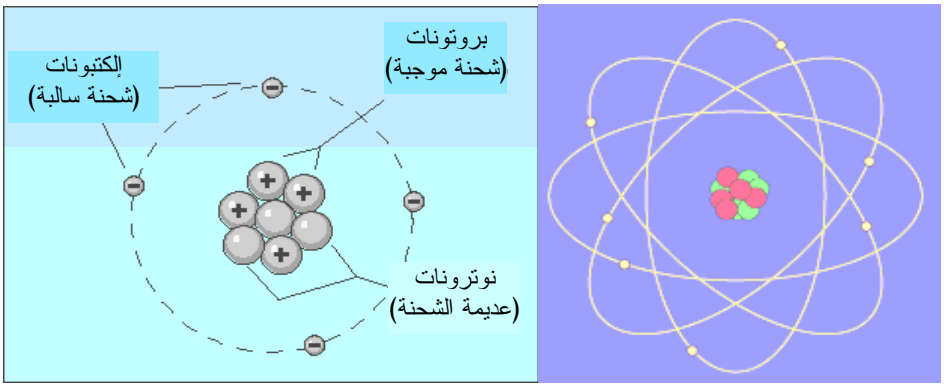
الفجوات التي تتخلل الذرات.

الكهرباء بمعناها الواسع هو تدفق مستمر للإلكترونات داخل الجسم.

- يشحن الجسم بتراكم **إلكترونات حرة** على بعض أجزائه بجلبها من أجزائه الأخرى. فيظهر في بعض النقاط فائض في الإلكترونات، وفي البعض الآخر نقص في الإلكترونات.
- عبارة "**الكمون**" المتداولة في المصطلح العلمي، ترتبط بظاهرة تراكم الإلكترونات على الجسم؛ وعبارة "**فرق الكمون**" ترتبط بتفاوت في هذه التراكمات؛ وإحداث التوازن بينها بكيفية ما يفضي إلى انسياق هذه الإلكترونات في اتجاه ما؛ وتشكل هذه الحالة الظاهرة العملية المعروفة **بالتيار الكهربائي**.
- هذا التيار ــ إن صح القول ــ 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**.

## 3.1 - بنية المادة:

توصف المادة ــ في الفيزياء الحديثة ــ بأنها مجاميع من **الذرات**. والذرات بدورها تتشكل من نواة ثقيلة تحمل معظم كتلة الذرة (اكتشاف رذرفورد عام 1911)، وتحوم حولها سحابة من **الإلكترونات** على مدارات (طبقات) متمركزة، تهمنا منها الطبقة الخارجية التي بفضلها نحصل على تيار كهربائي في النواقل.




الشكل(2.1) ــ بنية الذرة

تتنافر 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 (جدول ماندليف) بالرمز $^{A}_{Z}X$؛ 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 كهربائيا.

فعلى سبيل المثال؛ تتكون ذرة النحاس $^{29}_{63}Cu$ من 63 نكليون، منها 29 بروتون (وبالتالي 29 إلكترون) و34 نوترون.

قيم الشحنات والكتل للجسيمات المكونة للنواة في المنظومة الدولية هي:

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

وكما نلاحظ، فإن شحنة من رتبة 1 كولوم (وهي شحنة ضخمة نسبيا)، تكافئ $10^{18}$ إلكترونا، ولا تساهم إلا بكتلة من رتبة $10^{-12}$ كلغ، 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 ــ مع الإلكترونات ــ اللبنات الأولية للمادة. تشكل البروتونات مع النوترونات فئة تدعى "الباريونات".

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

## 4.1 ـ 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:

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

حيث $N$ عدد طبيعي، و $e \approx 1.6\,10^{-19}\,C$ 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 من الشحنات الأساسية. والجزيء أو الذرة التي هذا شأنها تدعى شاردة (أو أيونا).

تخضع الظواهر الكهربائية لقانون انحفاظ الشحنة، وهي فرضية مفادها أن الشحنة لا تفنى ولا تستحدث ولكنها تتحول من جسم إلى آخر فقط. فالجملة المعزولة تحتفظ بشحنتها، وما عملية التكهرب سوى إعادة لتوزيع الشحنات بين عناصر الجملة.

مثال(1.1):

**أحسب كمية الشحنة الموجبة (أو السالبة) في 1ملم$^3$ من النحاس.**

**المعطيات العددية:**

**عدد أفوغادرو:** $N_A = 6.02\,10^{23}\,mol^{-1}$ ، **الكتلة الحجمية:** $\rho = 8.9\,10^3\,kg.m^{-3}$

**الكتلة الجزيئية:** $A = 64\,10^{-3}\,kg.mol^{-1}$ ، **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:**

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

**غير أن كل ذرة تحتوي على العدد** $Z$ **من الإلكترونات (أو من البروتونات)؛ أي على الشحنة** $q = Ze$ . **وبذلك تكون الشحنة الإجمالية في1ملم$^3$ من النحاس هي:**

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

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

مثال(2.1):

**وزعت شحنة** $Q = 1.1\,10^{-6}\,C$ **على مكعب من النحاس حجمه1سم$^3$.**

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

**ب) ما هي رتبة مقدار هذه النسبة للشوارد الواقعة على سطح المكعب؟ (استعن بالمعطيات الواردة في المثال السابق).**

**الجواب:**

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

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

**هذا العدد الهائل يبدو قليلا أمام الذرات المتعادلة التي لم تتشرد في المكعب؛ إذ أن عدد الذرات في1سم$^3$ من النحاس هو:**

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

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

**ونسبة الشوارد إذن:**

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

**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:**

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

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

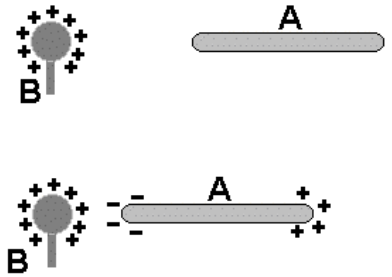
$$N_3 = \frac{6}{a^2} = 6n^{2/3} = 1.17\,10^{16}\ \text{شاردة}$$

**فنسبة الشوارد على سطح المكعب هي:**

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

## 5.1 ـ ظاهرة التكهرب:

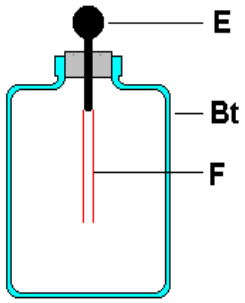
عند دلك جسم عازل بجسم آخر عازل، تتعرض ذراته السطحية للاحتكاك فتقتلع بعض إلكتروناتها وتتحرر من مداراتها، ليختل تعادل هذه الذرات ويصبح بها فائض من الشحنات الموجبة. وبالمقابل نجد الإلكترونات المنتزعة قد انفلتت إلى سطح الجسم الثاني ليصبح بدوره مشحونا سلبا. الشحنتان متماثلتان نظريا، ولكن ــ عمليا ــ نجد الهواء عازلا غير مثالي لا سيما إذا كان رطبا، الأمر الذي يسمح لبعض الإلكترونات بالانفلات من الجسم المكهرب سلبا، بينما تنجذب إلكترونات تائهة إلى الشحنات الموجبة للجسم الآخر. نصادف ظاهرة التكهرب في الطبيعة في حالة العواصف أو كتل الهواء الضخمة المتحركة، إذ تتكهرب وتثخن بشحنات عالية قادرة على إحداث وميض شديد (برق).



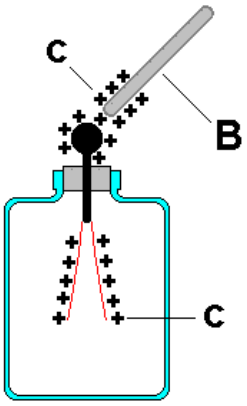

يحدث التكهرب عادة بالدلك أو بالتأثير أو باللمس مع جسم آخر مكهرب. فعند ملامسة جسم ناقل متعادل لجسم آخر مكهرب (مشحون)، ينتقل جزء من شحنة هذا الأخير إلى الجسم المتعادل، وهذا هو التكهرب باللمس. وبالمثل يمكن للجسم أن يتكهرب بالتأثير؛ فعند اقتراب جسم مشحون B من جسم متعادل A يستثار هذا الأخير، فتظهر على طرفيه شحنات متعاكسة ومتساوية كما يوضح الشكل(3.1).

عادة ما يستعمل كشّاف كهربائي لتجسيد عملية التكهرب. يتألف الكشاف

من قطب E علّقت بنهايته وَريقتان خفيفتا من ذهب F محميتان داخل قارورة Bt كما يوضح الشكل(4.1).




الشكل(4.1) ــ أ ــ حالة الكشاف وهو معزول




الشكل(4.1) ــ ب ــ الكشاف عند اقتراب جسم مكهرب

تمرين(1.1):

**دلكت قطعة حرير بزجاج، فتحرر عدد $1040^{12}$ إلكترونا وانتقل مــن الزجاج إلى الحرير، وكانت الجملة قبل العملية متعادلة كهربائيا.**

**ما هي كمية الشحنة الفائضة بعد الدلك في كل من الحرير والزجاج؟**

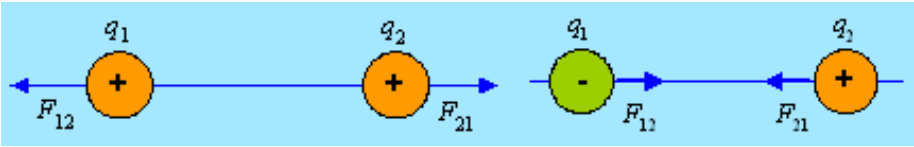
**[الجواب: $+6.408\mu C$ على الزجاج و $-6.408\mu C$ على الحرير]**

## 5.2 ـ القانون الأساسي للكهرباء:

تعود بداية الدراسة الكمية للظواهر الكهربائية إلى نهاية القرن الـــ18م، حين توصل (شارل كولوم) إثر تجاربه إلى قانون التأثير المتبادل بين الشحنات، والذي أضحى يحمل اسم "**قانون كولوم**".

نبتدئ 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 مهملة 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.

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 موضعي الشحنتين.




الشكل(5.1) ــ قوى التجاذب والتنافر بين شحنتين

نعبر عن ذلك بالعلاقة:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2} \qquad (2.1)$$

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

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 9\,10^9\, N.m^2.C^{-2} \qquad (3.1)$$

حيث $\varepsilon_0$ هي "**سماحية الفراغ**"، وتدعى أيضا "**ثابت العازليةّ** "، وتساوي في المنظومة الدولية:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \approx 8.85\,10^{-12}\, SI \qquad (4.1)$$

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

نلاحظ من العلاقة(2.1) أن قانون كولوم يحاكي في الشكل قانون نيوتن في "**الجذب العام**" بين الكتل؛ حيث نجد:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2} \qquad (5.1)$$

حيث $G$ ثابت الجذب العام، ويساوي تقريبا:

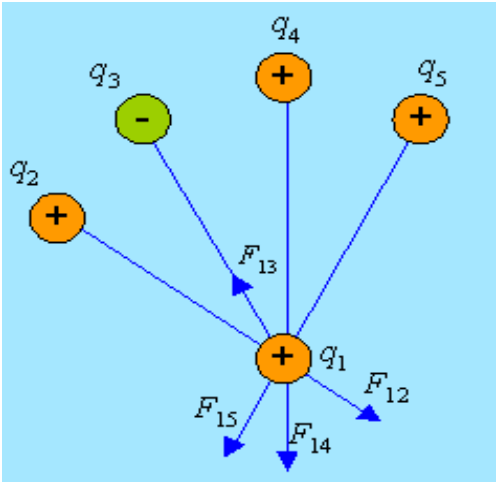
$$G \approx 6.67\,10^{-11}\, N.m^2.kg^{-2} \qquad (6.1)$$

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 الكهرباء الساكنة.

في حالة التعامل مع أكثر من شحنتين، يوضح الشكل(6.1) كيف أن القوة المحصلة $\vec{F}_1$ هي الجمع الشعاعي للقوى المؤثرة على الشحنة $q_1$:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15}$$

لا توجد بعد دلائل تجريبية تؤكد أو تفند قانون كولوم في مجال المسافات من رتبة الأبعاد الفلكية، ولا في مجال المسافات المجهرية من رتبة $10^{-14}$م أو أقل.




الشكل(6.1) ــ الجمع الشعاعي للقوى

في الوقت الراهن تهيمن على الكون أربع قوى أساسية:

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 الكهرطية: وهي المسؤولة على تماسك النواة (إلكترونات–نكليونات)، مجالها ما لانهاية.

4) القوة الثقالية: 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 نـــصف أنغشتروم** $\left(r_0 \approx 0.5\,10^{-10}\,m = \frac{1}{2}\overset{0}{A}\right)$

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

**نلاحظ أن القوى الميكانيكية(الثقالية $F_g$) تبدو مهملة أمام القوى الكهربائية($F_e$) في نفس المجال، مما يرشح 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 نـــواة مـــا تسعى دائما إلى تفجيرها لولا وجود قوة ثالثة بالمرصاد؛ ألا وهـــي القـــوة النووية.**

مثال(4.1):

**تطبيق: قدر عدد الإلكترونات التي تنتزعها (أو تضيفها) عقب دلك 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، فتتكهرب 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 $d \approx 1\,cm$ تقريبا؛ أي:

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

ومنه:

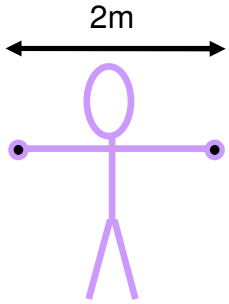
$$q = d\sqrt{\frac{mg}{k}} = 10^{-2}\sqrt{\frac{(9\,10^{-6})10}{9\,10^9}} = 1\,nC$$

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

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

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

مثال(5.1):




يستطيع شخص أن يباعد بين يديه بقوة 450 نيوتن. كم كيلوغراما من الإلكترونات يمكن نقلها من يده اليمنى إلى اليسرى؟

**الجواب:** بناء على قانون كولوم، نجد أن الشحنة المقابلة لهذه القوة:

$$Q = r\sqrt{\frac{F}{k}} = 2\sqrt{\frac{450}{9\,10^9}} = 4.47\,10^{-4}\,C$$

**هذه الشحنة تكافئ عددا من الإلكترونات يساوي:**

$$4.47\,10^{-4}C\times\frac{1e}{1.610^{-19}C}=2.810^{15}e$$

**وهو ما يعادل كتلة تساوي:**

$$2.810^{15}e\times\frac{9.110^{-31}kg}{e}=2.5410^{-15}kg$$

**وهي أقل من كتلة إحدى خلايا جسمه !!**

تمرين(2.1):

**يقول أحد الفيزيائيين: إذا كنت على مسافة ذراع واحد من شخص آخر، وكان كلاكما يملك فائضا من الإلكترونات زيادة على البروتونات بنسبة 1% فقط، فإن قوة التنافر بينكما تغدو مذهلة، لدرجة يمكن أن تزحزح (أو ترفع) ثقلا يعادل الكرة الأرضية !!**

**تأكد من هذه المقولة بحساب تقريبي، علما أن الإنسان يحتوي على $10^{28}$ ذرة تقريبا، معظمها كاربون وهيدروجين وآزوت وأكسجين، وأن كتلة الأرض تقدر بحوالي $6\,10^{24}$ كلغ.**

تمرين(3.1):

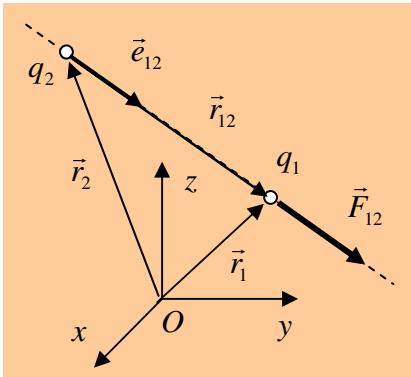
**يحمل جسم شحنة قيمتها 5 ميكروكولوم، ويتأثر بقوة تنافر شدتها 10 نيوتن، مع جسم آخر مشحون على بعد 15 سم.**

**أ) ما هي شحنة هذا الأخير؟**

**ب) على أي بعد ينبغي وضع الجسم الأول كي تصبح قوة التنافر 2.5 نيوتن؟**

**[الجواب:أ) $5\mu C$  ب)30 سم]**

لنرجع الآن إلى العلاقة(2.1) لنصوغها صياغة شعاعية تتضمن شدة القوة واتجاهها. فإذا اخترنا على حامل الشحنيتن شعاع الوحدة $\vec{e}_{12}$ الذي يتجه من $q_2$ إلى $q_1$ كما يوضح الشكل(8.1)، أمكن كتابة القوة الكهربائية التي تمارسها الشحنة $q_2$ على $q_1$ بالصورة:




الشكل(8.1) ــ مخطط القوة في الفضاء

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\vec{e}_{12} = -\vec{F}_{21} \qquad (7.1)$$

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

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} \qquad (8.1)$$

يمكن تعميم العلاقة(8.1) على جملة $n$ من الشحنات النقطية $q_i$ التي تحتل المواضع $M_i\left(\overrightarrow{OM_i} = \vec{r}_i\right)$، والمؤثرة على الشحنة $q$ التي تحتل الموضع $M\left(\overrightarrow{OM} = \vec{r}\right)$، فنكتب:

$$\vec{F}(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i(\vec{r}-\vec{r}_i)}{|\vec{r}i-\vec{r}_i|^3} \qquad (9.1)$$

مثال(6.1):

**اعتبر شحنتين $q_1 = 310^{-4}C$ و $q_2 = -10^{-4}C$ 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(9.2)، ونحسب أولا:**

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

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

**ومنهما نجد:**

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(-\vec{e}_x + 2\vec{e}_y - 2\vec{e}_z)}{27} = 10\begin{pmatrix}1\\-2\\2\end{pmatrix} = -\vec{F}_{21}$$

**فالشحنتان تستجيبان لقانون "الفعل ورد الفعل".**

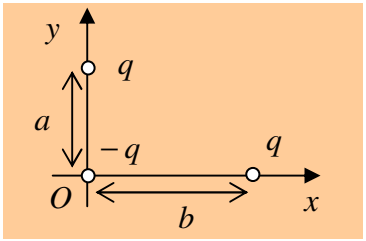
**يمكن أيضا أن نعتمد على العلاقة(8.2) فنحصل على الصورة:**

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

**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**

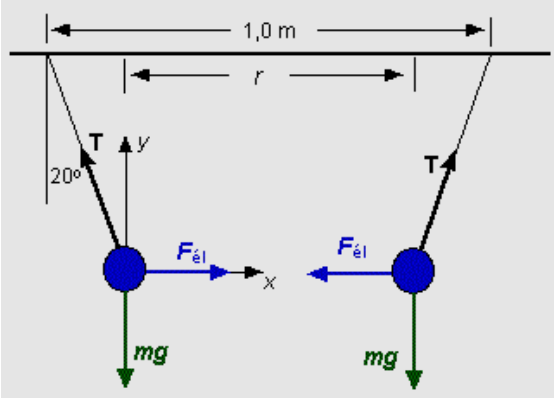



الشكل(6.2)

محصلتها مرة بطريقة هندسية ومرة بطريقة تحليلية.

مثال(7.1):

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°. إذا بلغت الشحنة الكلية على الكرتين 0.5 ميكرو كولوم، فما هي شحنة كل منهما؟




الجواب: نعلم أن:

$$q_1 + q_2 = 0.5\mu C \qquad (1)$$

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:

$$\sum F_x = F_{él} - T\sin 20^\circ = 0$$
$$\sum F_y = T\cos 20^\circ - mg = 0$$

بحذف التوتر من المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$F_{él} = mg\ tg20^\circ = 0.003567 \quad N$$

لكن عبارة القوة الكهربائية:

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

**حيث** $k = 9\,10^9\ N.m^2.C^{-2}$ **الثابت الكهربائي، و** $r = 1 - 2(0.6\sin 20^\circ) = 0.5896\ m$ **المسافة الفاصلة بين الكرتين المشحونتين كما هو مبين بالشكل؛ وهذا ما يفضي إلى:**

$$q_1 q_2 = -1.378\,10^{-13}\ C^2 \qquad (2)$$

**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:**

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

**التي جذورها:**

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

**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]**