الفصل الثالث

الكهرباء الساكنة

محتويات الفصل

مقدمة
الشحنة الكهربائية
الأجسام المشحونة والأجسام المعتدلة
النواقل والعوازل
المواد الناقلة
المواد العازلة
المواد شبه الناقلة
شحن الأجسام
الشحن بالدلك
الشحن بالتأثير
الإلكتروسكوب
قانون كولوم
المجال الكهربائي
المجال الكهربائي لشحنة نقطية
الجهد الكهربائي
الجهد الكهربائي لشحنة نقطية
المكثفات وتخزين الطاقة
جمع المكثفات على التوالي
جمع المكثفات على التوازي
الطاقة المخزنة في المكثف
مسرع فان دي جراف
ملخص الفصل
أسئلة

3-1 مقدمة

عرف الإنسان الكهرباء من أيام قدماء اليونان عندما لاحظ أن دلك قطعة كهرمان (بلورة متحجرة من خشب الصنوبر) بالفرو يجعلها تلتقط ذرات الغبار وقصاصات الورق الصغيرة بسهولة فقال إنها مكهربة (نسبة للكهرمان)، واستخدم كلمة إلكترون (الكلمة اليونانية للكهرمان) للدلالة على الأجسام المكهربة. كما لوحظت ظواهر مماثلة عندما يدلك الزجاج بالحرير، أو عند تمشيط الشعر بمشط بلاستيكي جاف فيلتقط قصاصات الورق الصغيرة، كما في الشكل (3-1).

الشكل (3-1)

ولو تلامست قطعة كهرمان مكهربة مع كرة معدنية صغيرة معلقة بخيط حريري ثم قربت هذه الكرة من أخرى مماثلة مشحونة بنفس الطريقة لتنافرت الكرتان. ولكن لو قربت الكرة الأولى نحو كرة مشحونة بالتلامس مع زجاج لتجاذبت الكرتان في هذه الحالة. فدل ذلك إلى أن هناك نوعان من الشحنات اصطلح على اعتبار إحداهما سالبة (يحملها الكهرمان) والثانية موجبة (يحملها الزجاج).

وبينت تجارب إضافية أن الكهرمان المدلوك بالفرو يحمل شحنة سالبة بينما يحمل الفرو شحنة موجبة، أما الزجاج المدلوك بالحرير فيحمل شحنة موجبة بينما يحمل الحرير شحنة سالبة. وعموما فإن دلك أي جسمين ببعضهما يشحنهما بشحنتين متعاكستين، لذا فمن المنطقي أن تكون الأجسام العادية معتدلة وعندما تدلك تتبادل الكهرباء بين بعضها بعضا.

3-2 الشحنة الكهربائية

ماالمقصود بقولنا إن جسما ما مشحون ؟ هل له شكل أو حجم مختلف عن غيره ؟ ولو نظرنا له فهل يمكننا أن نتبين أنه مشحون من منظره فقط ؟ في الحقيقة إن كون الجسم مشحونا لاتتعلق بخواصه الفيزيائية والطريقة الوحيدة لمعرفة فيما إذا كان مشحونا هي أن نضعه قرب جسم آخر مشحون مسبقا فإذا دفعه أو جذبه عندها فقط نعرف أنه مشحون. فالشحنة خاصية للجسم تمكنه من دفع أو جذب أجسام مشحونة أخرى، مثل خاصية الكتلة التي تمكن جسم ما له كتلة من جذب الكتل الأخرى. من هذا المنطلق نستطيع إعطاء ***تعريف تأثيري للشحنة*** بأنها ***الخاصية التي يملكها جسم للتأثير على غيره من الأجسام التي تحمل نفس الخاصية***. فالشحنات تؤثر على بعضها بقوة كهربائية والكتل تؤثر على بعضها بقوة الجاذبية. بينما لايؤثر جسم مشحون (كالبروتون) بقوة كهربائية على جسم غير مشحون (كالنيوترون) بينما يؤثر عليه بقوة الجاذبية لأن لكل منهما كتلة، لكن لايؤثرعلى جسم عديم الكتلة والشحنة (كالضوء) بأي قوة.

ومن أصغر الشحنات المعروفة للإنسان الإلكترون والبروتون حيث اصطلح إعطاء الإلكترون شحنة سالبة مقدارها 1.6×10^{-19} كولوم، بينما أعطي البروتون نفس الشحنة ولكن بإشارة موجبة. و**الكولوم** هي وحدة الشحنة

الكهربائية المستخدمة في نظام الوحدات الدولي نسبة للفيزيائي الفرنسي تشـــارلز كولـــوم الذي اكتشف القوة الكهربائية بين جسمين مشحونين. وكثيرا ماتعطى شحنات الأجسام بأجزاء الكولوم كالميللي كولوم (10^{-3} C)، والمايكرو كولوم (10^{-6} C)، والنانو كولوم (10^{-9} C) وهكذا.

مثال (3–1)

كم إلكترون يوجد في كولوم واحد ؟

الحل:

لحساب عدد الإلكترونات في كولوم واحد نكتب شحنة الإلكترون:

$$1e = 1.6\times10^{-19}\,\text{C} \;\Rightarrow\; 1\text{C} = \frac{1e}{1.6\times10^{-19}} = 6.25\times10^{18}\,e$$

أي أن شحن جسم بكولوم واحد يتطلب تجريده من أكثر من ستة مليون مليون مليون إلكترون !

3–3 الأجسام المشحونة والأجسام المعتدلة

تتألف المادة في الطبيعة من ذرات تحوي إلكترونات سالبة الشحنة ونواة موجبة الشحنة تساوي وتعاكس شحنة الإلكترونات. ولهذا فالذرة العادية معتدلة، كأي مادة معدنية أو قطعة قماش ولوح خشبي وغيره. ولكن إذا فقدت المادة بعض الإلكترونات أو اكتسبت بعضا منها فإننا نقول إنها صارت مشحونة بشحنة موجبة أو سالبة، على الترتيب.

3-4 النواقل والعوازل

من المعروف أن المعادن تنقل الكهرباء بشكل ممتاز بينما يستخدم الخشب لحمايتنا منها. وهناك بعض العناصر التي يمكن أن تكون موصلة في شروط معينة. فتختلف المواد في ناقليتها للكهرباء، فهناك مواد ناقلة وأخرى عازلة وشبه ناقلة.

3-3 أ المواد الناقلة

يوجد في الطبيعة مواد، كالمعادن، تكون الإلكترونات في ذراتها غير مقيدة بها بل تستطيع الحركة بحرية داخلها. يطلق على هذه الإلكترونات اسم *إلكترونات حرة* (free electrons) وتسمى هذه المواد **نواقل**. فالمواد الناقلة *تحوي شحنات حرة وتسمح لها بالحركة*. لكن حركة الإلكترونات في هذه الأجسام عشوائية وفي كل الاتجاهات بحيث أن محصلة الحركة الكلية لها تساوي الصفر مما يفسر عدم تكهربنا عند لمس جسم معدني غير موصول بمولد كهربائي، وعدم وجود تيارات كهربائية فيه في الحالة الطبيعية.

الأسلاك الكهربائية الناقلة للكهرباء

3-3 ب المواد العازلة

تكون غالبية الإلكترونات في بعض الأجسام، كالزجاج والخشب مثلا، مقيدة ومرتبطة بالذرة التابعة لها بشكل كبير بحيث لاتستطيع الانتقال من موضعها. كما أن هذه المواد لاتسمح لشحنات خارجية توضع عليها بالتحرك من مكانها، كأن ندلك زجاج بقطعة فرو إذ تبقى الشحنة الناتجة في موضع الدلك تماما. تسمى هذه المواد عوازل. فالمواد العازلة لاتحوي شحنات حرة ولاتسمح لها بالحركة.

تستخدم المواد العازلة في تركيب الأسلاك الكهربائية

3-3 ج المواد شبه الناقلة

هناك مواد متوسطة الناقلية كالجرمانيوم والسيليكون لاتحوي شحنات حرة كثيرة ولكن لو"طعمناها" بذرات يمكن أن "تتبرع" بإلكتروناتها فتزيد ناقليتها بشكل كبير ولذا يطلق عليها اسم *أشباه نواقل*.

3-4 شحن الأجسام

ذكرنا أعلاه أن المواد الطبيعية معتدلة كهربائيا ويكون عدد الشحنات السالبة (الإلكترونات) مساويا لعدد الشحنات الموجبة (الآيونات أو النوى).

ولكن إذا تم إضافة إلكترونات لجسم ما يصير مشحونا بشحنة سالبة، أما إذا نزعت منه بعض الإكترونات فإنه يصير مشحونا بشحنة موجبة.

ويتم عادة شحن الأجسام بعدة طرق منها:

3-4 أ الشحن بالدلك

الدلك هو إحدى وسائل شحن الأجسام عندما تتلامس وتحتك ببعضها فتنتقل الإلكترونات من جسم لآخر لينشحن الأول ايجابيا والثاني سلبيا. وسبب ذلك أن هناك ذرات لها إلكترونات مرتبطة بها بشكل ضعيف وأي احتكاك بمادة ثانية يؤدي لتحرير هذه الإلكترونات وانتقالها للأجسام الأخرى، مثل الزجاج والمطاط والفرو وغيرها.

الشكل (3-2): الشحن بالدلك

ويشعر الإنسان بظاهرة الشحن بالدلك بشكل متكـــرر في الحياة اليومية كأن نشعر بصعقة كهربائية خفيفة لحظة مسك باب سيارة أو باص عند نزولنا منه أو عندما نلمس المقبض المعدني لباب الغرفة بعد سيرنا على سجادة فيها. وتعليل ذلك أننا حصلنا بالدلك على شحنة كهربائية كافية من مقعد الباص أو السيارة أو من السجادة في الغرفة التي تنتقل للجسم الملموس بسرعة مسببة الصعقة الخفيفة التي شعرنا بها.

وقد نتساءل لماذا تحدث ظواهر الشحن بالدلك كالصعقات الكهربائية الخفيفة في الأيام الجافة بينما تكون نادرة في الأيام الرطبة؟ والجواب: لأن الشحنات

تتراكم في الأيام الجافة عند احتكاك الأجسام ببعضها، أما في الأيام الرطبة يكون الهواء مشبعا بالبخار فيشكل طبقة رقيقة غير مرئية من الماء على الأجسام لتصير ناقلة للكهرباء وتتسرب الشحنة منها باستمرار ولا تتجمع على الجسم بشكل كاف.

إشارات تحذير للحماية من الصواعق الكهربائية

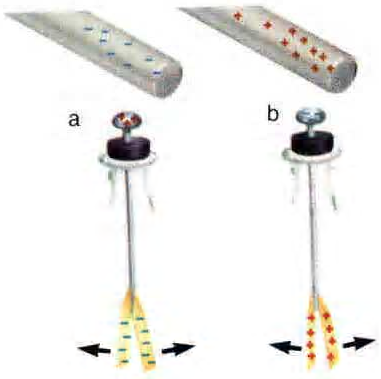
3-4 ب الشحن بالتأثير

في هذه الحالة نقرب جسما مشحونا بشحنة سالبة مثلا من كرتين معدنيتين متلامستين، كما في الشكل (3-3) حيث تقترب الشحنات الموجبة في الكرتين الجسم السالب بسبب قوة التجاذب بينهما أما الشحنات السالبة فتبتعد عنه. نقوم بعدها بإبعاد الكرتين عن بعضهما فتبقى الكرة الأولى مشحونة إيجابيا بينما تبقى الثانية مشحونة سلبيا.

الشكل (3–3): الشحن بالتأثير

3–4 ج الإلكتروسكوب

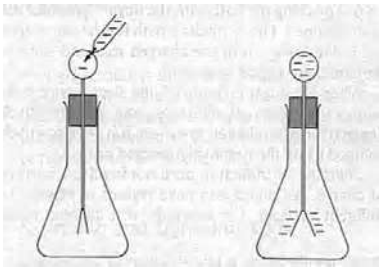
يستخدم الإلكتروسكوب للتحقق من شحن الأجسام بالدلك أو بالتأثير ويتألف من وعاء زجاجي مسدود الفتحة بكرة معدنية صغيرة تتصل بورقتين رقيقتين من الذهب بواسطة سلك معدني خفيف، كما في الشكل (3–4)، فعندما تنشحن الورقتان بنفس الشحنة تتباعدان عن بعضهما، وبذلك نتحقق من عملية الشحن.ففي الشحن بالتأثير يقرب جسم مشحون سلبيا مثلا من الكرة المعتدلة أصلا فتصير موجبة الورقتان سالبتين فتتباعدان عن بعضهما، كما في الشكل (3–5).



الشكل (3–5): الشحن بالتأثير

3-4 د الشحن بالتلامس

في الشحن بالتلامس يتلامس جسم مشحون مع الكرة التي تأخذ منه بعض الشحنة وتنقلها للورقتين اللتين تنشحنان أيضا بنفش الشحنة وتتباعدان عن بعضهما، كما في الشكل (3-6 أ و 3-6 ب).



(ب) (أ)

الشكل (3-6): الشحن بالتلامس

3-5 قانون كولوم

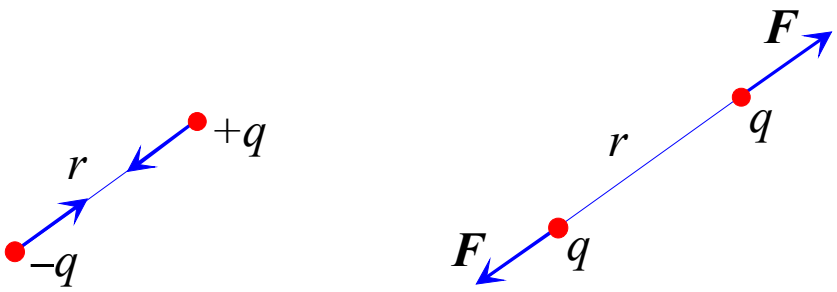
تبين من تجارب عديدة أن أي شحنتين صغيرتين قيمة الأولى q_1 والثانية q_2 بينهما مسافة r تتدافعان أو تتجذابان بقوتين متساويتين ومتعاكستين تعطى قيمة أي منهما بالعلاقة:

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \qquad (1-3)$$

حيث يدل k على ثابت القوة الكهربائية الذي يساوي $9\times10^9\ \mathrm{N.m^2/C^2}$. يطلق على هذه العلاقة اسم *قانون كولوم*.

أما اتجاه القوة المتبادلة بين الشحنتين فقد وجد أنهما تتنافران إذا كانت شحنتاهما من نفس الإشارة، وتتجاذبان إذا كانتا من إشارتين مختلفتين، كما في الشكل (3–7).

ويجدر التنويه إلى أن هذه العلاقة صحيحة لشحنتين نقطتيتين فقط أي أنهما صغيرتين لدرجة يستحيل معرفة أبعاد أي واحدة منهما من موقع الأخرى، لذا يقال عنهما **شحنات نقطية** *(point charges)*.



القوة بين شحنتين متماثلتين متعاكستين

القوة بين شحنتين

الشكل (3–7): القوة بين شحنتين نقطيتين

ونلاحظ التناظر الواضح بين قانون القوة الكهربائية وقوة الجاذبية بين كتلتين صغيرتين (نقطيتين):

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \qquad (2-3)$$

مما يدل على تشابه القوى الطبيعية، لكن ثابت قوة الجاذبية G أصغر بكثير من ثابت القوة الكهربائية k مما يعني أن الأخيرة أقوى بكثير من الجاذبية،

ولهذا فهي الغالبة بين الأجسام المشحونة الذرية كالإلكترونات والبروتونات وغيرها، حيث نهمل قوة الجاذبية بالمقارنة معها.

مثال (3–2):

كم تتفوق القوة الكهربائية على قوة الجاذبية؟ قارن بين القوة الكهربائية وقوة الجاذبية بين إلكترون وبروتون في ذرة الهيدروجين علما بأن لهما نفس الشحنة e وأن المسافة بينهما حوالي 0.5×10^{-10} m ومستخدما المعطيات التالية:

$e=1.9\times10^{-19}$ C و $m_p= 1.67\times10^{-27}$ kg و $m_e= 9.11\times10^{-31}$ kg

الحل:

نستخدم العلاقتين (3–1) و (3–2) لحساب القوة الكهربائية وقوة الجاذبية فنجد على الترتيب:

$$F_C = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{(9\times10^9\,\mathrm{N.m^2/C^2})(1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C})^2}{(0.5\times10^{-10}\,\mathrm{m})^2}$$
$$= 92.2\times10^{-9}\,\mathrm{N}$$

و

$$F_G = \frac{Gm_1m_2}{r^2} = \frac{(6.67\times10^{-11}\,\mathrm{N.m^2/kg^2})(9.1\times10^{-31}\,\mathrm{kg})(1.67\times10^{-27}\,\mathrm{kg})}{(0.5\times10^{-10}\,\mathrm{m})^2}$$
$$= 40.5\times10^{-49}\,\mathrm{N}$$

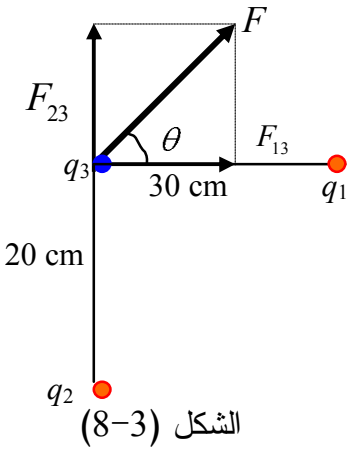
لذلك يكون:

$$\frac{F_G}{F_C} = \frac{40.5\times10^{-49}\,\mathrm{N}}{92.2\times10^{-9}\,\mathrm{N}}$$
$$= 0.4\times10^{-40}$$

فقوة الجاذبية بين بروتونين أصغر بـــ 10^{40} مرة تقريبا من القوة الكهربائية بينهما!

مثل (3-3):

ماالقوة الكهربائية المؤثرة على الشحنة q_3 في الشكل (2-8) جانبا نتيجة وجود الشحنتين q_1 و q_2 علما بأن $q_1 = 6\ \mu C$ و $q_2 = 10\ \mu C$ و $q_3 = -8\ \mu C$ ؟



الشكل (3-8)

الحل:

نحسب أولا القوة التي تؤثر بها q_1 على q_3 فنجد:

$$F_{13} = \frac{(9\times10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2})(6\times10^{-6}\ \mathrm{C})(+10\times10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0.3\mathrm{m^2})} = 6\mathrm{N}$$

$$F_{23} = \frac{(9\times10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2})(8\times10^{-6}\ \mathrm{C})(+10\times10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0.2\mathrm{m^2})} = 18\mathrm{N}$$

ثم نحسب قيمة المحصلة من قانون فيثاغورث:

$$F = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = \sqrt{36 + 324} = 19\,\mathrm{N}$$

أما اتجاهها فنجده من العلاقة:

$$\tan\theta = \frac{F_{23}}{F_{13}} = 3 \;\Rightarrow\; \theta = 72°$$

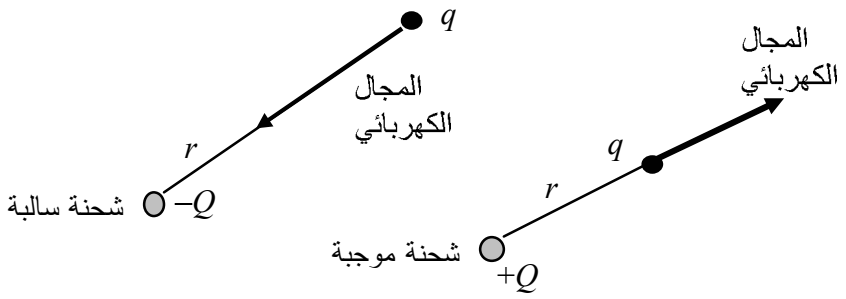
3-6 المجال الكهربائي

تماما كما تؤثر الأرض على المنطقة المحيطة بها بمجال الجاذبية الأرضية حيث يخضع أي جسم قريب من الأرض لقوة الجاذبية، فإن أي شحنة تؤثر على المنطقة المحيطة به أيضا بمجال كهربائي ينتج عنه قوة كهربائية يخضع لها أي جسم مشحون موجود هناك. ونعرف المجال الكهربائي الناتج عن شحنة ما عند نقطة بالفضاء المحيط بها بأنه القوة الكهربائية المؤثرة على واحدة الشحنات الكهربائية الموجبة الموجودة هناك.

فإذا كانت لدينا شحنة Q تؤثر بقوة $\mathbf{F}$ على شحنة q نفترض أنها صغيرة لدرجة لاتؤثر على غيرها من الشحنات (ولهذا يطلق عليها اسم شحنة تجريبية كما في الشكل (3-9 أ)، فإن المجال الكهربائي لـــ Q عند موقع q يعطى بالعلاقة:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \qquad (3-3)$$

ويتجه المجال الكهربائي للشحنة Q بعيدا عنها إذا كانت موجبة ونحـــوها إذا كانت سالبـــة، كما في الشكل (3-7).



(ب) (أ)

الشكل (3−9)

3−7 المجال الكهربائي لشحنة نقطية

إذا كان لدينا شحنة نقطية Q فإننا نستطيع إيجاد قيمة المجال الكهربائي الناتج عنها عند نقطة تبعد عنها مسافة r بسهولة. فنفترض أنه يوجد على بعد r شحنة تجريبية q ونحسب القوة الكهربائية المؤثرة عليها نتيجة وجود Q ، كما في الشكل (3−9)، ونكتب:

$$F = \frac{kQq}{r^2}$$

وبحسب العلاقة (3−3) نجد أن:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQ}{r^2} \qquad (4-3)$$

ومن الواضح أن وحدة المجال الكهربائي هي قوة لواحدة الشحنات، أي N/C.

ويمكن كتابة العلاقة (3−4) بالشكل:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \qquad (5-3)$$

حيث نلاحظ منها أن للقوة والمجال نفس الاتجاه إذا كانت q موجبة بينما لهما اتجاهين متعاكسين إذا كانت q سالبة.

مثال (3−4)

ماقيمة واتجاه المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية سالبة مقدارها $Q=1\times10^{-4}$ C عند نقطة تبعد عنها 50 cm؟ وما القوة الكهربائية المؤثرة على شحنة صغيرة قيمتها $+4\ \mu$C ؟

الحل:

نستفيد من العلاقة (3−4) لنجد قيمة المجال الكهربائي:

$$E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(1\times10^{-4}\ \text{C})}{(0.5\,\text{m})^2} = 3.6\times10^6\ \text{N/C}$$

وبما أن Q سالبة فإن المجال يتجه نحوها.

أما القوة الكهربائية المؤثرة على شحنة $q=+4\ \mu$C في ذلك الموضع فنجدها بكتابة:

$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow F = qE = (4\times10^{-6}\,\text{C})(3.6\times10^6\ \text{N/C}) = 14.4\,\text{N}$$

وتتجه هذه القوة بنفس اتجاه المجال الكهربائي، أي نحو Q لأن q موجبة، وهذا طبيعي لأن أي شحنتين متعاكستين تتجاذبان.

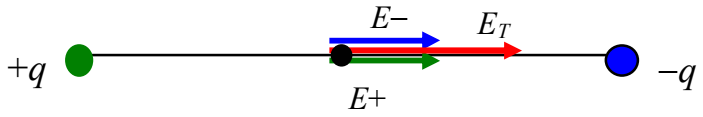
مثال (3-5)

ما المجال الكهربائي الكلي الناتج عند نقطة واقعة في منتصف المسافة بين شحنتين متساويتين بالقيمة ومتعاكستين بالإشارة؟

الحل:

لنفترض أن قيمة كل شحنة هو q وأن المسافة بينهما r ، كما في الشكل (3-10)، عندئذ نكتب قيمة المجال الناتج عن كل شحنة:

$$E_{\pm} = \frac{kq}{r^2}$$



الشكل (3-10)

ونلاحظ من الشكل أن المجال الناتج عن الشحنة الموجبة يتجه بعيدا عنها، بينما يتجه المجال الناتج عن الشحنة السالبة نحوها. لذلك تكون محصلة المجالين في هذه الحالة هي:

$$E_T = 2E_{\pm} = \frac{2kq}{r^2}$$

3-8 الجهد الكهربائي

كيف نستغل الأجسام المشحونة ونحصل على الطاقة الكهربائية منها لاستخداماتنا الحياتية؟ للوصول لإجابة شافية نحتاج أن نعرف **الجهد**

الكهربائي وهو كمية عددية سهلة الحساب ومفيدة للوصول للطاقة الكهربائية التي يحصل عليها جسم مشحون عند حركته في منطقة مجال كهربائي.
لفهم هذا نتذكر من دراسة الجاذبية أن أي جسم كتلته m موجود في مجال جاذبية g ويوضع على ارتفاع y من سطح الأرض يكتسب طاقة وضع تعطى بالعلاقة:

$$U_g = mgy \qquad (6-3)$$

ونلاحظ منها أن طاقة وضع الكتلة m عند موضع معين تعتمد على الكمية gy التي تنتج عن مجال الجاذبية. ولهذا نعيد كتابة العلاقة (3−6) بالشكل:

$$U_g = mV_g \qquad (7-3)$$

حيث يدعى V_g **جهد الجاذبية**. ونلاحظ من العلاقة (3−7) أننا حصلنا على طاقة الوضع بضرب جهد الجاذبية بخاصة الجسم الكتلية المرتبطة بها أي بكتلته m.
وبنفس الشكل نقول إن أي جسم شحنته q موجود في مجال كهربائي E سيكتسب طاقة وضع كهربائية نكتبها بالشكل:

$$U_{elec} = qV_{elec} \qquad (8-3)$$

حيث تدعى الكمية العددية V_{elec} **الجهد الكهربائي**.
فمعرفة الجهد الكهربائي في موضع ما يعطينا طاقة الوضع التي ستكسبها شحنة q عند وجودها هناك.

3-9 أ الجهد الكهربائي لشحنة نقطية

نعرف الجهد الكهربائي لشحنة نقطية q بالعلاقة:

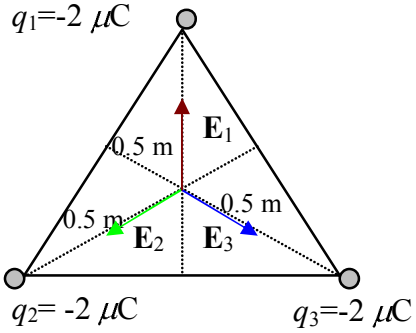
$$V = \frac{kQ}{r} \qquad (9-3)$$

حيث نلاحظ أنها كمية عددية (scalar) ووحدتها في نظام الوحدات الدولي الفولط.

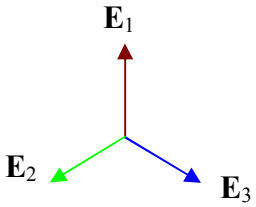
مثل (3-6)

ما الجهد الكهربائي الكلي الناتج عن الشحنات النقطية الثلاث المتوضعة على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع في مركزه الهندسي، كما في الشكل (3-11أ)؟

ماهو المجال الكهربائي الكلي هناك؟



الشكل (3-11أ)



الشكل (3-11ب)

الحل:

بما أن الجهد الكهربائي كمية عددية فليس له اتجاه. ومن ثم فالجهد الكلي عند المركز c هو مجموع الجهود الناتجة عن الشحنات الثلاث هناك، أي أن:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$
$$= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} + \frac{kQ_3}{r_3} = 3\frac{kQ}{r} = 3\frac{(9\times10^9\,\mathrm{N.C^2/m^2})(-2\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.5\,\mathrm{m})}$$

فالجهد الكهربائي الكلي هو:

$$V = 108\ k\mathrm{V}$$

أما المجال الكهربائي الكلي عند نقطة المركز فيساوي الصفر لأنه محصلة المتجهات الثلاث $\mathbf{E}_1$ و $\mathbf{E}_2$ و$\mathbf{E}_3$ كما في الشكل (3–11ب) (تحقق من ذلك).

3–10 الفرق بين المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

من المصطلحات التي تسبب لبعض الطلبة التباسا كبيرا مفهوم القوة والمجال وهما كميتان نقول إنهما متجهتنان، والجهد والطاقة وهما كميتان عدديتان. وأحيانا يعرف الإنسان مصطلحات لكميات فيزيائية لانراها ولانتحسسها مباشرة **كالزخم** أو **مجال الجاذبية** أو **المجال الكهربائي** أو**الجهد**، وغيرها. ويجدر التساؤل لماذا نعرف هذه الكميات وما الفائدة من ذلك؟ لاشك بأن لكل كمية استخدام مهم يؤدي للوصول لتطبيق حياتي معين. فنعرف المجال الكهربائي لأنه يقودنا إلى القوة الكهربائية المؤثرة على الأجسام الموجودة فيه. ذلك أنه عندما نعرف قيمة واتجاه مجال كهربائي ناتج عن توزع ما لشحنات كهربائية يمكننا عندئذ أن نجد القوة المؤثرة على أي جسم مشحون موجود في تلك المنطقة. ومن ثم نعرف كيف سيتحرك هذا الجسم وأي طريق سيتبعه وما إلى ذلك. لهذا تم إعطاء المجال الكهربائي التعريف

الرياضي الوارد في العلاقة (3–5) حتى نتمكن من معرفة القوة الكهربائية منه. ونلاحظ أن كلا الكميتين هي كمية متجهة ناتجة عن الثانية.

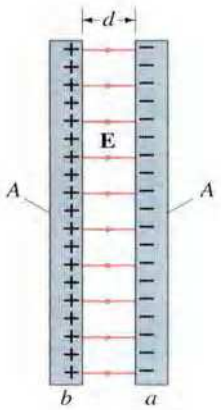
أما الجهد الكهربائي فنستخدمه لمعرفة الطاقة التي يكسبها جسم مشحون في موضع معين فيه جهد ما. لأن تحديد V يؤدي لمعرفة الطاقة التي يكتسبها الجسم عندئذ. ونلاحظ في هذه الحالة أن هاتين الكميتين هما عدديتان، بخلاف المجال والقوة.

فالمجال يفيد في معرفة القوة، والجهد يفيد في معرفة الطاقة. لهذا السبب نعرف هاتين الكميتين في الفيزياء ونتعب أنفسنا في حساب كل واحدة منهما.

3–11 المكثفات وتخزين الطاقة

يستخدم الإنسان أجهزة مختلفة لتخزين الطاقة الكهربائية لاستخدامها لاحقا في الكثير من التطبيقات الحياتية المهمة كالأجهزة الكهربائية والطب والإلكترونيات وغيرها.

ومن أشهر أجهزة التخزين الكهربائي **المكثف** (capacitor) الذي يتألف، في أبسط أشكاله، من صفيحتين معدنيتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين ومتعاكستين، كما هو موضح في الشكل (3–12).



الشكل (3–12): مكثف متوازي الوجهين

ويتميز المكثف بمقدار الشحنة التي يمكن أن يحملها كل طرف فيه (ويسمى لبوس أو لوح electrode) والتي تعتمد على تركيبه ومساحة الوجه الواحد وفرق الجهد المطبق عليه لشحنه، وذلك من العلاقة:

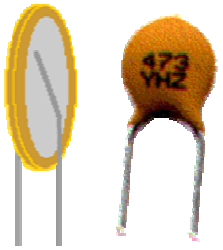
$$Q = CV \qquad (10-3)$$

حيث تدعى الكمية C **سعة المكثف** (capacitance) وتعتمد على الأبعاد الهندسية والوسط الموجود بين اللوحين.

وتعطى وحدة السعة في نظام الوحدات الدولي **بالفاراد**، نسبة للفيزيائي مايكل فاراداي، إلا أن هذه الوحدة كبيرة بالمقارنة مع سعات المكثفات العملية المستخدمة ولذلك تعطى السعات عـــادة بأجزاء من الفاراد كالمايكروفاراد (10^{-6}) والنانوفاراد (10^{-9}) والبيكوفاراد (10^{-12}) وهكذا.

ويتولد بين لوحي المكثف مجال كهربائي يمكن اعتباره منتظما (أي ثابت القيمة والاتجاه) داخل المكثف وبعيدا عن أطراف اللوحين، بفرض أن مساحة كل لوح A كبيرة بالمقارنة مع المسافة بينهما d، كما هو موضح بالشكل (3-12).

وهناك أنواع من المكثفات التي تصمم بحسب حاجة الأجهزة والأدوات الكهربائية كالتفاز والراديو وغيرها، كما في الصورة أدناه.



بعض أنواع المكثفات

وترتبط قيمة المجال المتولد بفرق الجهد بين اللوحين بعلاقة بسيطة يمكن استنتاجها لو تركنا شحنة اختبارية موجبة تتحرك من الطرف الموجب للطرف السالب فنلاحظ أنها تكسب طاقة نتيجة الشغل المبذول عليها من القوة الكهربائية بينهما، أي أن:

$$W = Fd = qEd$$

ولكن شغل القوة يساوي الفرق في طاقة وضع الشحنة بين الطرفين، أي:

$$W = U_1 - U_2 = qV_+ - qV_- = q\Delta V$$

ومن ثم نجد أن:

$$W = qEd = q\Delta V \Rightarrow E = \frac{\Delta V}{d}$$

أو:

$$E = \frac{V}{d} \qquad (11-3)$$

حيث تدل V على فرق الجهد بين لوحي المكثف ΔV، للسهولة في الكتابة. ولذلك نقول عادة إننا اشترينا بطارية من السوق جهدها 10 V أي أن فرق الجهد بين طرفيها 10 V.

مثال (3-7)

ماسعة مكثف متوازي الوجهين إذا شحناه بفرق جهد 20 V فصارت شحنته 5 μC ؟

الحل:

نستخدم العلاقة (3–10) لنكتب:

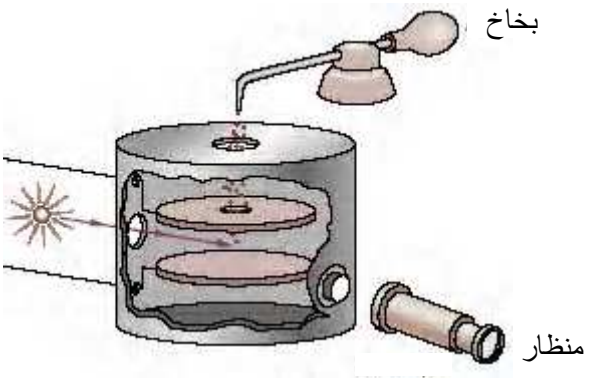
$$Q = CV \Rightarrow C = \frac{Q}{V}$$

ومن ثم نجد أن:

$$C = \frac{5\,\mu\text{C}}{20\,\text{V}} = 2.5\times10^{-7}\,\text{F}=0.25\,\mu\text{F}$$

3–12 قياس شحنة الإلكترون وتجربة قطرة الزيت لميليكان

من أهم تطبيقات المجال الكهربائي بين لوحي مكثف متوازي الوجهين هو تحديد شحنة الإلكترون من خلال تجربة بسيطة قام بها الفيزيائي ميليكان.



الشكل (3–13): تجربة قطرة الزيت

كما هو موضح بالشكل (3–13)، يتم بخ رذاذ من الزيت بين لوحي مكثف فتتشحن قطرات الزيت نتيجة احتكاكها بفتحة البخاخ الضيقة، وتصير كل قطرة سالبة الشحنة. فإذا لم يطبق أي فرق جهد بين لوحي المكثف تسقط

القطرات تحت تأثير وزنها (بإهمال قوة الاحتكاك عليها من الهواء بالمقارنة مع القوة الكهربائية). لكن بتطبيق فرق جهد معاكس لشحنة القطرات يمكن أن تتزن القطرة عند تساوي وزنها مع القوة الكهربائية المؤثرة عليها، أي عندما يصير:

$$F_{elec} = w \Rightarrow qE = mg \Rightarrow q(V/d) = mg$$

أي أن:

$$q = \frac{mgd}{V} \qquad (12-3)$$

حيث V فرق الجهد بين اللوحين و d المسافة بينهما.

وقد وجد ميليكان بتكرار التجربة وشحن القطرات مرة إيجابيا ومرة سلبيا أن شحنة أي قطرة تساوي عددا صحيحا من 1.6×10^{-19} C. فاستنتج أن كل قطرة تتشحن نتيجة فقد أو اكتساب عدد من الإلكترونات بحيث أن شحنة كل إلكترون منها 1.6×10^{-19} C .

13-3 جمع المكثفات

كثيرا ما نحتاج في التطبيقات العملية لمكثف له سعة معينة لايتوفر في المختبر وغير جاهز عمليا. في هذه الحالة نقوم بربط عدد من المكثفات بشكل مناسب للحصول على السعة المطلوبة.

ويتم ربط المكثفات عادة بإحدى طريقتين:

13-3 أ جمع المكثفات على التوالي

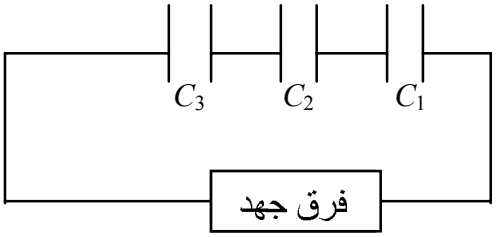
حيث يربط اللوح الموجب لمكثف أول باللوح السالب للثاني وموجب الثاني بسالب ثالث وهكذا، في حين يوصل اللوح الموجب للأول والسالب للأخير

بمزود فرق جهد يشحن المنظومة كلها، كما في الشكل (3–14). ومن الواضح أنه في هذه الحالة فستنشحن المثفات كلها بنفس الشحنة ولكن بفروق جهد مختلفة بحسب سعة كل واحدة.

ويمكن البرهان أن سعة مجموعة المكثفات هذه تساوي سعة مكثف مكافئ معطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots \qquad (12-3)$$

ونلاحظ من هذه النتيجة أن السعة الكلية أصغر من أصغر سعة أصلية. ولهذا تربط المكثفات على التوالي للحصول على سعة صغيرة عادة. ونلاحظ هنا أن فرق الجهد بين طرفي المكثف المكافئ يساوي مجموع فروق الجهد بين أطراف المكثفات الموصولة، أما شحنته فتساوي شحنة أي واحدة منهما فقط.

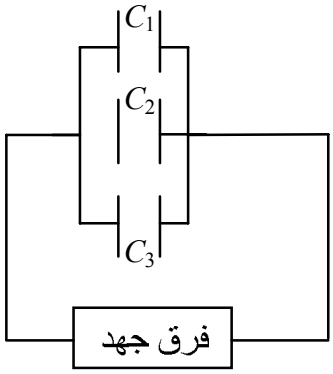


الشكل (3–14)

3–13 ب **جمع المكثفات على التوازي**

في جمع المكثفات على التوازي توصل ألواح المكثفات كلها من جهة واحدة بالقطب الموجب لمزود الجهد والألواح المقابلة بالقطب السالب، كما في الشكل (2–15)، وتعطى سعة المنظومة عندئذ بالعلاقة:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots \qquad (13-3)$$



الشكل (3-15)

ونلاحظ أيضا من هذه النتيجة أن السعة الجديدة أكبر من أكبر سعة. ولهذا تربط المكثفات على التوازي للحصول على سعات كبيرة عادة. كما نلاحظ أن شحنة المكثف المكافئ يساوي مجموع شحنات المكثفات الموصولة، بينما يكون فرق الجهد واحدا بين أطراف كل مكثف.

3-14 الطاقة الكهربائية المخزنة في مكثف

يتم شحن المكثف عادة بواسطة مصدر فرق جهد كالبطارية أو مولد كهربائي. حيث يتم نقل الشحنة من أحد اللوحين إلى الآخر وهذا يتطلب طاقة من المصدر المستخدم. وبالطبع لاتضيع هذه الطاقة بل تتخزن في المكثف. فإذا استخدمنا مصدرا له فرق جهد معين V لشحن مكثف سعته C بحيث تصير شحنته النهائية Q عندئذ يمكن البرهان أن الطاقة التي يختزنها تصير:

$$U = \tfrac{1}{2}QV = \tfrac{1}{2}CV^2 = \tfrac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \qquad (14-3)$$

وتعطى وحدة الطاقة في نظام الوحدات الدولي بالجول طبعا.

مثال (3–8)

يوصل مثكف سعته $5\ \mu\text{F}$ ببطارية قوتها 15 V لينشحن تماما ثم يفصل عنها ويوصل على التوازي مع مكثف آخر سعته $10\ \mu\text{F}$ غير مشحون. ما السعة المكافئة لهما وما الطاقة الكهربائية الضائعة في هذه العملية ؟

الحل:

نحسب أولا الشحنة الناتجة على المكثف الأول فنكتب:

$$Q = CV = (5\times10^{-6}\ \text{F})(15\,\text{V}) = 75\,\mu\text{C}$$

وطاقته الكهربائية المخزنة فيه:

$$U = \tfrac{1}{2}QV = \tfrac{1}{2}(75\,\mu\text{C})(15\,\text{V}) = 562.5\,\mu\text{J}$$

الآن: عند وصل المكثفين على التوازي تصير سعتهما المكافئة بحسب العلاقة (3–13):

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 15\,\mu\text{F}$$

وبما أن المكثف الجديد غير مشحون لذا تكون شحنة المنظومة كلها مساوية لشحنة المكثف الأول، أي أن:

$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2 = 75\mu\text{C}$$

لذا نجد طاقة المكثف المكافئ بعد الربط مساوية إلى:

$$U' = \tfrac{1}{2}\frac{Q^2}{C_{eq}} = \tfrac{1}{2}\frac{(75\,\mu\text{C})^2}{15\,\mu\text{F}} = 187.5\,\mu\text{J}$$

أي أن الطاقة الضائعة:

$$U - U' = 562.5 - 187.5 = 375\,\mu\text{J}$$

وهذه طاقة كبيرة تضيع لإعادة توزيع الشحنات على المكثفين.

وحدة الإلكترون فولت eV

من المفيد في الفيزياء الذرية والنووية تحديد طاقة إلكترون أو بروتون أو أي جسم ذري آخر بوحدة مناسبة عندما يسرع خلال فرق جهد V مقدر بالفولت. فإذا افترضنا أن بروتونا مثلا تسارع بين صفيحتي مكثف فرق الجهد بينهما 20 V عندئذ يكتسب طاقة تساوي:

$$KE = qV = (1.6\times10^{-19}\,\text{C})(20\,\text{V}) = 3.2\times10^{-19}\,\text{J}$$

لكن هذه الطاقة صغيرة جدا بسبب صغر شحنة البروتون، لذا من المناسب أن نعبر عنها بوحدة أخرى بأن نبقي شحنة البروتون e بدلا من التعويض عنها بدلالة وحدة الكولوم الكبيرة جدا أصلا، فنكتب:

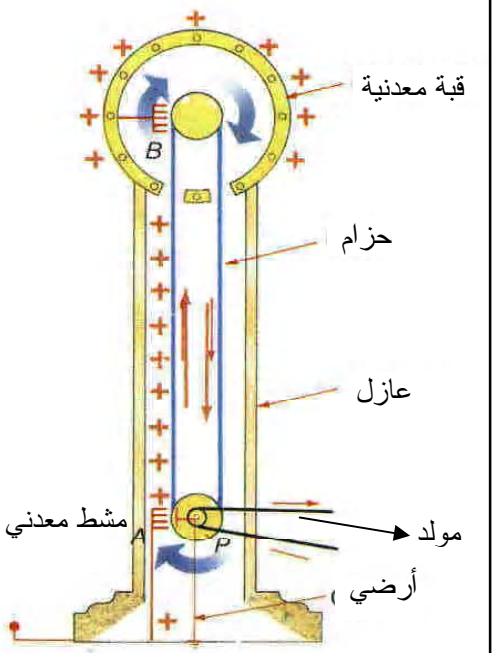
$$KE = qV = e(20\,\text{V}) = 20\ \text{eV}$$

وهذا ماهو متعارف عليه في الفيزياء الذرية والنووية. كما أنه من السهولة تحويل هذه الوحدة للجول، إن شئنا، بملاحظة أن قيمة شحنة البروتون أو الإلكترون e تساوي 1.6×10^{-19} C ولذا نضرب أي طاقة معطاة بالـــ eV بهذا الرقم فنحولها إلى جول. فمثلا لو اعطينا طاقة إلكترون 7.5 eV ونريد إيجادها بالجول نكتب مباشرة:

$$E = 7.5\,\text{eV} = (7.5\text{eV})(1.6\times10^{-19}\,\text{J/eV}) = 12\times10^{-19}\,\text{J}$$

15-3 مسرع فان دي جراف

من أبسط وأشهر الأجهزة الكهربائية التي تخزن الطاقة ونستفيد منها لتسريع البروتونات وغيرها من الأجسام المشحونة الصغيرة مسرع فان دي جراف نسبة لمصممه الفيزيائي فان دي جراف.



الشكل (3-15): مسرع فان دي جراف

ويوضح الشكل (3-15) نموذجا مبسطا لهذا المسرع حيث يقوم مولد ميكانيكي بتوليد شحنات كهربائية (بالحك) ورشها على أسنان المشط المعدني قريبا من الحزام المتحرك الذي ينقلها للسطح الداخلي للكرة المعدنية. وبما أن الشحنات من نفس النوع فإنها تتباعد عن بعضها وتتوزع على السطح الخارجي للكرة ليصير السطح الداخلي فارغا فيستقبل من

الحزام شحنات قادمة جديدة، وتستمر هذه العملية حتى يصل جهد الكرة لملايين الفولتات يستفاد منها لتسريع بروتونات أو جسيمات ألفا وغيرها لطاقات هائلة تمكنها من اختراق النواة لسبر أغوارها ودراسة تركيبها وطبيعتها.

ملخص الفصل

الشحنة الكهربائية: الخاصة الأساسية المرتبطة بالقوة الكهربائية.

قانون الشحنات الكهربائية: الشحنات المتماثلة تتنافر والشحنات المختلفة تتجاذب.

قانون كولوم: العلاقة التي تعطي القوة بين شحنتين نقطيتين $F = kq_1q_2 / r^2$.

الناقل: جسم يحوي شحنات حرة (إلكترونات) ويسمح لها بالحركة.

العازل: جسم لايحوي شحنات حرة ولايسمح لها بالحركة.

شبه الناقل: جسم لايحوي شحنات حرة لكن يسمح لشحنات توضع عليه بالحركة.

حفظ الشحنة: مجموع شحنة الكون تساوي الصفر.

الشحن الكهربائي: إعادة توزيع الشحنات في جسم معتدل عند تقريب أو تلامس جسم مشحون به.

المجال الكهربائي: تأثير أي جسم مشحون على المنطقة المحيطة به. ويمثل المجال عند نقطة ما القوة الكهربائية الناتجة عن هذا الجسم على واحدة الشحنات الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة ويساوي في حالة شحنة نقطية $E = kQ / r^2$ ويتجه بعيدا عن الشحنة إذا كانت موجبة ونحوها إذا كانت سالبة.

الجهد الكهربائي: معدل الطاقة الكهربائية الكامنة في واحدة الشحنات الموجبة في موضع معين ويساوي في حالة شحنة نقطية: $V = kQ / r$.

المكثف الكهربائي: جهاز يستخدم لتخزين الشحنات الكهربائية.

سعة المكثف: كمية تحدد الشحنة التي يمكن أن يستوعبها من فرق جهد معين بحيث أن: $Q = CV$.

جمع المكثفات: تجمع المكثفات على التوالي فتكون سعتها الكلية عندئذ: $\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots$ كما تجمع المكثفات على التوازي لتصير السعة الكلية: $C=C_1+C_2+\cdots$

طاقة المكثف: مقدار الطاقة التي يخزنها مكثف من فرق جهد معين وتساوي: $U=\frac{1}{2}CV^2$.

أسئلة

3–1 كم إلكترونا نحتاج لنشحن جسما ما بشحنة تساوي واحد كولوم ؟ كم بروتونا نحتاج لنفس الغرض ؟

3–2 أين يمكن وضع إلكترون بين شحنتين سالبتين متساويتين قيمة الواحدة $1\mu C$ بحيث يبقى متزنا تماما ؟ هل تتغير الإجابة لو وضعنا بروتون في مكانه ؟ علل إجابتك.

3–3 توضع شحنة سالبة عند طرف مسطرة مترية وأخرى مساوية لها بالقيمة ولكن موجبة عند الطرف الآخر. هل يوجد على المسطرة موضع يتزن عنده بروتون أو إلكترون ؟ علل إجابتك.

3–4 وجدنا بداية هذا الفصل أن القوة الكهربائية أكبر بكثير من قوة الجاذبية ومع ذلك فإننا نشعر بالأخيرة في حياتنا اليومية عند حمل ورفع الأشياء المختلفة. لماذا لانشعر بالقوة الكهربائية مع أن هناك إلكترونات وبروتونات في كل ذرات المادة ؟

3–5 هناك شحنة كهربائية موجبة Q وشحنة سالبة q بينهما مسافة r. كيف تقارن القوة الكهربائية المؤثرة على واحدة منهما بالقوة المؤثرة على الأخرى؟ هل تخضع هذه المقارنة لقانون فيزيائي في تخصص مختلف عن الكهرباء؟ إذا كانت الإجابة نعم فماهو هذا القانون ؟

3–6 كيف تتغير القوة الكهربائية المؤثرة على إلكترون نتيجة شحنة كهربائية Q إذا تضاعف بعده عنها ؟

3–7 تتنافر شحنتان متماثلتان بقوة 4.0×10^{-5} N عندما تكون المسافة بينهما 3 cm . ماقيمة القوة التي ستتنافران بها إذا صارت المسافة بينهما 6 cm ؟

3–8 تتنافر كرتان صغيرتان مشحونتان بشحنتين متماثلتين بقوة كهربائية قيمتها2.5×10^{-4} N عندما تكون المسافة بينهما 2 cm. احسب قيمة القوة بينهما إذا تضاعفت شحنة إحدى الكرتين وزادت المسافة بينهما إلى 4 cm .

3–9 ماالقوة الكهربائية بين كرتين متماثلتين مشحونتين بشحنتين $q_1=+20$ μC و $q_2=-6$ μC إذا كانت المسافة بينهما 10 cm ؟

3–10 كم تصير قيمة القوة الكهربائية بين الكرتين المذكورتين إذا تلامستا ثم أعيدتا لوضعهما السابق ؟

3–11 تتأثر شحنة سالبة قيمتها 2×10^{-8} C بقوة كهربائية تتجه لليمين قيمتها 0.06 N . ماقيمة واتجاه المجال الكهربائي المؤثر على الشحنة ؟

3–12 تتنافر كرتان متماثلتان بقوة كهربائية قيمتها 64×10^{-9} N عندما تكون المسافة بينهما 3×10^{-3} m. ماقيمة كل شحنة ؟

3–13 ماهو فرق الجهد بين لوحي مكثف متوازي الوجهين إذا كان المجال الكهربائي بينهما 625×10^{3} N/C والمسافة بينهما 10 mm ؟ وما الشغل المبذول لنقل إلكترون من الطرف الموجب للطرف السالب ؟

3–14 تتزن قطرة زيت وزنها 1.9×10^{-14} N في مجال كهربائي شدته 4×10^{4} N/C. ماشحنة القطرة وماعدد الإلكترونات عليها ؟

3–15 **المكثف الكروي:** يمكن اعتبار كرة معدنية مكثفا مؤلفا من لوحين كرويين لهما نفس المركز لكن نصف قطر الخارجي لانهائي فيبقى الداخلي لوحده. لإيجاد سعة هذا المكثف نشحن الكرة ونقيس فرق الجهد بينها وبين الأرض (التي نعتبر جهدها مساويا للصفر دوما) ثم نأخذ نسبة فرق الجهد

للشحنة لنجد السعة. في تجربة من هذا النوع وجد أن فرق الجهد بين كرة معدنية والأرض 60 V عندما تكون شحنتها 12 nC. ماسعة هذا المكثف وما الطاقة المخزنة فيه ؟

3–16 يشحن مكثف سعته 2 μF فيصير فرق الجهد بين طرفيه 6 V. كم يجب زيادة شحنة المكثف ليرتفع فرق الجهد إلى 15 V ؟

3–17 ما المجال الكهربائي الناتج بين لوحي مكثف المسافة بينهما 5 cm إذا كان فرق الجهد بينهما 15 V ؟

3–18 كم تتغير الطاقة الكهربائية المخزنة في مكثف إذا تناقصت سعته إلى النصف (بسبب تغيير المادة بين اللوحين) مع بقاء فرق الجهد نفسه ؟

3–19 يشحن مكثفان بنفس فرق الجهد فوجد أن طاقة الأول ضعف طاقة الثاني. مانسبة سعة الأول للثاني ؟

3–20 توصل ثلاث مكثفات متماثلة على التوالي أولا بفرق جهد 15 V ثم توصل على التوالي معا بنفس فرق الجهد. مانسبة الطاقة المخزنة في الحالة الأولى للثانية ؟

AHMAD AL-HADIDY
JORDAN –ZARQA
TEL – 0777409465
HADIDY_66@YAHOO.COM