اكتسب هذا المشط شحنة كهربائية ساكنة ناجْة إمّا بسبب مروره خلال الشعر، أو دلكه بقطعة قماش أو بمنديل ورقي. الشحنة الكهربائية على المشط تحثّ الاستقطاب (فصل الشحنات عن بعضها) في قصاصات من الورق "فتجذبها". يتناول تقديمنا للكهرباء في هذا الفصل الموصلات، والعوازل، وقانون كولوم الذي يوضع الثلاثة بين القوة بين شحنتين نقطيتين والمسافة الفاصلة بينهما. كما سنقدم المفهوم الفاعل للمجال الكهربائي.

الفصل 16

الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي

ربّما تستحضر كلمة "كهرباء" صورة للتقنية العصرية المعقدة؛ أضواء إنارة، ومحركات، وإلكترونيات وحواسيب. ومع هذا، فقد يكون للقوة الكهربائية دور أعمق من هذا في حياتنا. وبناءً على النظرية الذرية، فإنّ القوّة الكهربائية بين الذرات أو الجزيئات هي المسؤولة عن إبقائها معًا لتتكون عندئذ المواد السائلة والصلبة. كما ترتبط القوة الكهربائية أيضًا بالعمليات الأيضية التي تحدث داخل أجسامنا.وينتج كثير من القوى التي تعاملنا معها إلى الآن من قوى كهربائية تعمل على المستوى الذري مثل: القوى المرنة، والقوى العمودية، والاحتكاك، وقوى التلامس الأخرى (مثل الدفع والسحب). ومن جانبٍ آخر، تعدّ الجاذبية قوة مختلفة.*

وتعود الدراسات الأولى للكهرباء إلى الأزمان القديمة، ومع هذا لم تدرس بالتفصيل إلّا في القرنين السابقين. وسنناقش تطور الأفكار حول الكهرباء بما فيها الأجهزة العملية، وكذلك علاقتها بالمغناطيسية خلال الفصول السبعة القادمة.

* وكما ناقشنا في (البند 5 – 10) . فإن الفيزيائيين في القرن العشرين استطاعوا التعرف إلى أربع قوى أساسية في الطبيعة هي: (1) قوة الجاذبية. (2) القوة الكهرومغناطيسية (سنرى لاحقًا الترابط القوي بين الكهرباء والمغناطيسية). (3) القوة النووية القوية.(4) القوة النووية الضعيفة. وتعمل القوتان النوويتان القوية والضعيفة على مستوى نواة الذرة. وهناك نظرية حديثة جمعت بين القوتين الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة ليعدّ مصدرهما واحدًا يُعرفُ بالقوة الكهروضعيفة . وسنناقش هذه القوى في الفصول القادمة.

الشكل 16 – 1 (أ) ادلك مسطرة بلاستيكية. (ب) قربها من قصاصات صغيرة من الورق.

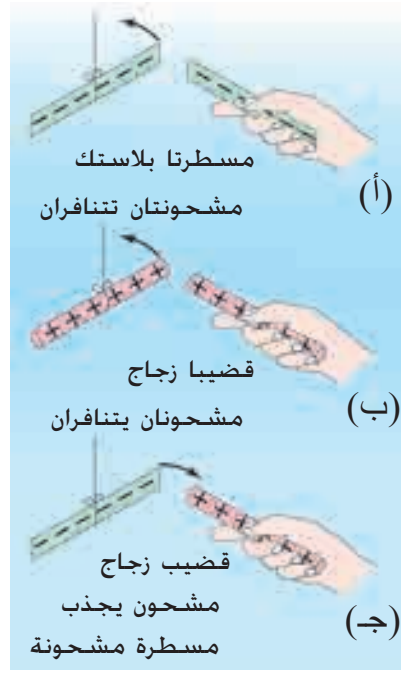
16-1 الكهرباء الساكنة والشحنة الكهربائية وحفظها

جاءت كلمة كهرباء من الكلمة اليونانية إلكترون التي تعني الكهرمان الذي هو صمغ شجري متحجر. وقد عرف القدماء أنّ دلك قطعة من الكهرمان بواسطة قطعة قماش يجعله قادرًا على جذب أجزاء صغيرة من الغبار أو أوراق الشجر. وكذلك عند دلك قطعة من المطاط الصلب، أو عمود من الزجاج، أو مسطرة بلاستيكية بقطعة قماش سيظهر "تأثير الكهرمان" أو **الكهرباء الساكنة** كما ندعوها في الوقت الحالي. وتستطيع أن تلتقط قصاصات صغيرة من الورق بواسطة مشط أو مسطرة بلاستيكية دلكتها للتو بشدّة بمنديل ورقي. انظر الصورة على الصفحة السابقة، و(الشكل 16 – 1) أيضًا. ربّما شعرت بالكهرباء الساكنة عند تمشيط شعرك، أو عندما تناولت قميصاً أو قطعة ملابس من آلة تجفيف الملابس. وربّما تكون قد شعرت بصعقة عند لمس مقبض الباب الفلزي بعد انزلاقك على مقعد السيارة، أو مشيك على سجادة تدخل مادة النايلون في تركيبها. وفي كل حالة، يصبح الجسم "مشحونًا" نتيجة للدلك. ويقال عندها أنه يمتلك شحنة **كهربائية صافية**.

هل الشحنات جميعها متماثلة؟ أم أنّ هناك أكثر من نوع من الشحنات؟ في الحقيقة هناك نوعان مختلفان من الشحنات الكهربائية كما تظهر التجربة البسيطة التالية. تعلق مسطرة بلاستيكية بعد دلكها بشدة بواسطة قطعة من الملابس لشحنها. وعند تقريب مسطرة أخرى شُحِنت بالطريقة نفسها من المسطرة الأولى، وُجد أنّ المسطرة الأولى تتنافر مع المسطرة الثانية . وهذا مبينٌ في (الشكل 16 – 2 أ). وبالمثل، فعند تقريب عمود زجاجي مشحون من عمود زجاجي آخر تمّ دلكه، فإن العمودين سيظهران قوة تنافر كما في (الشكل 16 – 2 ب). ولكن عند تقريب عمود الزجاج المشحون من المسطرة البلاستيكية المشحونة، وجد أنهما ينجذبان إلى بعضهما بعضا كما في (الشكل 16 – 2 جـ). وعليه، فإن الشحنة على الزجاج يجب أن تكون مختلفة عن تلك التي على البلاستيك. وبالفعل، فقد وُجد عمليًا أن الأجسام المشحونة جميعها تتبع أحد التصنيفين؛ فإمّا أنها تنجذب إلى الزجاج وتتنافر مع البلاستيك، أو أنها تتنافر مع الزجاج وتنجذب إلى البلاستيك. لذا، يبدو أنّ الشحنات الكهربائية تنقسم إلى نوعين فقط. وكل نوع من الشحنات يتنافر مع الشحنات المشابهة لنوعه، وينجذب إلى الشحنات المعاكسة لنوعه؛ أيْ أنّ **الشحنات المختلفة تتجاذب والشحنات المتشابهة تتنافر**.

أشار العالِم الفيلسوف الأمريكي فرانكلين (1706 – 1790) إلى هاتين الشحنتين بالموجبة والسالبة. وكان التمييز بين الموجب والسالب أمرًا اعتباطيًّا، فوقع اختيار فرانكلين على أن الشحنة على عمود الزجاج المدلوك موجبة وعليه، فإن الشحنة على المسطرة البلاستيكية المدلوكة (أو الكهرمان) هي السالبة. وما زال هذا التعريف متبعًا إلى يومنا هذا.

وجادل فرانكلن بأنّه عندما يتولد أي مقدار من الشحنة على جسم ما، فإنّ مقدارًا متساويًا من الشحنة المضادة سيتكون على الجسم الآخر. ويجب أن تعامل الشحنات الموجبة والسالبة جبريًّا؛ أيْ أنّ التغير الصافي في مقدار الشحنة المتولدة يساوي صفرًا. وعلى سبيل المثال، فعند دلك مسطرة بلاستيكية بمنديل ورقي سنجد أن البلاستيك سيكتسب شحنة سالبة، أمّا المنديل فسيكتسب شحنة موجبة مساوية لها. ومع أنّ الشحنات تنفصل عن بعضها بعضًا إلا أنّ مجموعها يبقى صفرًا.



الشكل 16 – 2 الشحنات المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب.

الشحنات المتشابهة تتنافر والشحنات المختلفة تتجاذب.

وهناك مثال على قانون أصبح مطوّرًا الآن بشكلٍ جيّدٍ هو **قانون حفظ الشحنة الكهربائية** الذي صيغ كالتالي:

الشحنة الكهربائية الصافية المتولدة في أيّ عملية تساوي صفرًا.

قانون حفظ الشحنة الكهربائية

كما يمكن صياغته بشكل آخر كما يلي :

لا يمكن لأي شحنة صافية أن تخلق أو تفنى.

وإذا اكتسب جسم ما (أو حيّز) شحنة موجبة، فإن مقدارًا مساويًا من شحنة سالبة سيتم العثور عليه في أجسام أو مناطق مجاورة. وحتى الآن، لم تخالف أي عملية هذا القانون فبقي صامدًا بصلابة تمامًا مثل قانون حفظ الطاقة والزخم.

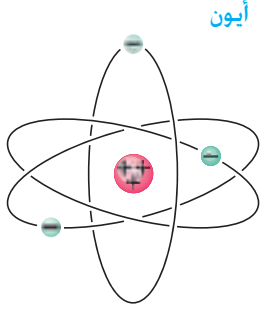
2-16 الشحنة الكهربائية في الذرة

لقد أصبح واضحًا خلال القرن الماضي فقط أن الفهم الصحيح للكهرباء يبدأ من داخل الذرة نفسها. وسنناقش التركيب الذري في الفصول القادمة إضافة إلى الأفكار التي أفضت إلى فهمنا الحالي ورؤيتنا للذرة بتفصيل أكبر.

يبين النموذج المبسط للذرة أنها تمتلك نواة صغيرة جدًّا. ومع هذا، فهي ثقيلة نسبيًّا ومشحونة بشحنة موجبة، ويحيط بها إلكترون أو أكثر مشحون بشحنة سالبة (الشكل 16 – 3). وتحتوي النواة على بروتونات مشحونة بشحنة موجبة، ونيوترونات متعادلة كهربائيًّا. وتمتلك البروتونات جميعها والإلكترونات كلّها مقدار الشحنة الكهربائية نفسه مع اختلاف في إشارتيهما. لذلك، فإن الذرات المتعادلة لا تملك شحنات صافية؛ لأنها تحتوي على عددٍ متساوٍ من البروتونات والإلكترونات. ويمكن لذرة في بعض الأحيان أن تفقد إلكترونًا أو أكثر، أو أن تكسب إلكترونات إضافية لتصبح لها شحنة صافية موجبة أو سالبة، وتدعى عندئذ الأيون.

الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات

أيون



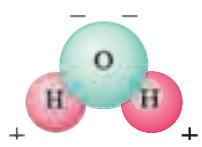
الشكل 16 – 3 نموذج مبسط للذرة.

وتميل الأنوية في المواد الصلبة إلى البقاء قرب مواضع ثابتة، في حين يمكن لبعض الإلكترونات التحرك بحرية. وعندما يكون الجسم متعادلًا كهربائيًّا، فإنّ شحناته السالبة تكون معادلة لشحناته الموجبة. ويمكن تفسير شحن جسم صلب عن طريق دلكه بانتقال الإلكترونات من أحد الجسمين إلى الآخر. فعندما تصبح المسطرة البلاستيكية مشحونة بشحنة سالبة نتيجة دلكها بمنديل ورقي، فإن انتقال الإلكترونات من المنديل إلى البلاستيك يترك المنديل مشحونًا بشحنة موجبة مقدارها يساوي مقدار الشحنة السالبة التي يكتسبها البلاستيك. وتستطيع الأنوية والأيونات في السوائل والغازات أن تتحرك تمامًا مثل الإلكترونات.

إنّ احتفاظ المواد المشحونة- بطريقة الدلك- بشحناتها لفترة محدودة لتعود بعدها إلى التعادل الكهربائي يعدّ أمرا طبيعيا. ويصبح السؤال هو: أين تذهب الشحنات؟ وعادة ما "تتسرب" هذه الشحنات على جزيئات الماء في الهواء لأنّ جزيئات الماء **قطبية** – أي أنه وعلى الرّغم من أنّ جزيئات الماء متعادلة كهربائياً إلا أن شحناتها غير موزعة بانتظام (الشكل 16 – 4). ولهذا، فإن الإلكترونات الزائدة - ولنقل على المسطرة البلاستيكية المشحونة - "ستتسرب" إلى الهواء نتيجة اجذابها إلى النهايات الموجبة لجزيئات الماء. إلى جانب أنّ الجسم المشحون بشحنة موجبة يمكن أن يصبح متعادلا كهربائيًّا عند انتقال الإلكترونات ضعيفة الارتباط بجزيئات الماء في الهواء إليه.

جزيء قطبي

الشكل 16 – 4 رسم لجزيء ماء. ويسمى بالجزيء القطبي نظراً لامتلاكه شحنات مختلفة الإشارة عند النهايات المختلفة.



ويمكن ملاحظة تأثير الكهرباء الساكنة في الأيام الجافة أكثر نظرًا لوجود عدد قليل من جزيئات الماء الموجودة في الهواء والتي تسمح بتسرب الشحنات. وأيضًا هناك صعوبة كبيرة خلال الأيام المطيرة أو ذات الرطوبة العالية في إرغام المواد بالاحتفاظ بشحنات صافية لفترة طويلة.

3-16 الموصلات والعوازل

لنفترض أنّ هناك كرتين فلزيتين إحداهما مشحونة بشحنة كبيرة، والأخرى متعادلة كهربائيا (الشكل 16 – 5 أ). إذا وضعنا جسمًا فلزيًّا مثل المسمار يلامس الكرتين معًا (الشكل 16 – 5 ب) فإنه سيعمل على شحن الكرة غير المشحونة بسرعة كبيرة. وفي المقابل، لو أننا وصلنا الكرتين السابقتين بعمود خشبي أو بقطعة من المطاط بدلاً من المسمار (الشكل 16 – 5 جـ) فإن الكرة غير المشحونة لن تصبح مشحونة بشكل واضح. وعليه، فإن المواد مثل المسمار يطلق عليها مصطلح **موصلات كهربائية**. أمّا المواد الأخرى مثل الخشب والمطاط فيطلق عليها مصطلح غير **موصلات أو عوازل**.

موصلات وعوازل

الشكل 16 – 5 (أ) كرة فلزية مشحونة وكرة فلزية أخرى متعادلة. (ب) الكرتان موصولتان بواسطة موصل (مسمار فلزي) يعمل على إيصال الشحنات من كرة إلى أخرى. (جـ) وُصِلَتِ الكرتان بواسطة عازل. لذا، لم تنتقل الشحنات.

الفلزات موصلات جيدة

تعدّ الفلزات - بشكل عام- موصلات جيّدة. إلّا أنّ معظم المواد الأخرى تعدّ عوازل (على الرغم من أن العوازل توصل الكهرباء ولكن بمقدار ضئيل جدًّا). إنّ معظم المواد تقريبًا تندرج ضمن أحد التصنيفين المميزين تماماً عن بعضهما بعضا. ومع هذا، فإنّ هناك عددًا قليلًا جدًّا من المواد ومن ضمنها (السيليكون والجرمانيوم) تصنف كنوع متوسط بين التصنيفين السابقين يسمى **أشباه الموصلات.**

ومن وجهة نظر ذرية، فإنّ ارتباط الإلكترونات بالنواة في المادة العازلة يكون قويا. وفي المقابل، فإن بعض الإلكترونات في الموصل الجيد تكون ضعيفة الارتباط، وتستطيع أن تتحرك بحرية خلال المادة (بالرغم من عدم قدرتها على مغادرة الجسم بسهولة) ويشار إليها عادةً بالإلكترونات الحرة أو إلكترونات التوصيل. وعندما يُقرب جسمٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ من موصلٍ أو عندما يلامسه، فإن الإلكترونات الحرّة في الموصل ستُجذب بواسطة هذا الجسم موجب الشحنة وتتحرك بسرعة باتجاهه. ومن ناحية أخرى، فإن الإلكترونات الحرّة ستتحرك بسرعةٍ هائلةٍ مبتعدةً عن جسم مشحون بشحنة سالبة عندما يقترب منها. وهناك عدد أقل بكثير من الإلكترونات الحرة في شبة الموصل، ويكاد هذا العدد أن يكون معدومًا في العازل.

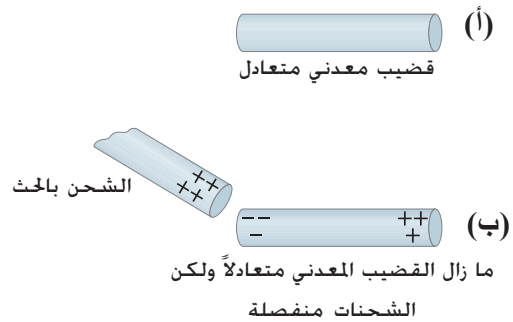
4-16 الشحنة المستحثة والمكشاف الكهربائي

لنفترض أن جسمًا فلزيًّا مشحونًا بشحنة موجبة قد قُرّب من جسم فلزي آخر غير مشحون. فإذا تلامس الجسمان، فإن الإلكترونات الحرة في الجسم المتعادل كهربائيًّا ستنجذب إلى الجسم المشحون بشحنة موجبة وتعبر إليه (الشكل 16 – 6).

وبما أن الجسم الآخر متعادل كهربائيًّا أصلا، فإن فقدانه لبعض إلكتروناته السالبة سيجعله يمتلك شحنة موجبة صافية. وتسمّى هذه العملية "الشحن عن طريق التوصيل" أو "التلامس". ويصبح بعدها الجسمان مشحونين بشحنتين متشابهتين.

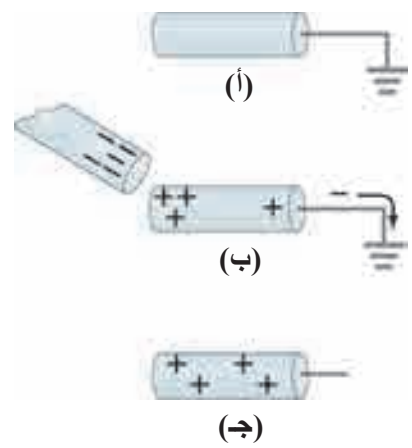
وافترض أن جسمًا مشحونًا بشحنة موجبة قد تم وضعه بالقرب من عمود فلزي متعادل كهربائيًّا دون أن يلامسه. فعلى الرغم من أن إلكترونات العمود المعني الحرة لن تغادره، إلا أنها ستتحرك داخل الفلز باتجاه الشحنة الخارجية الموجبة تاركة الشحنات الموجبة عند الطرف الآخر للعمود (الشكل 16 – 7). ويقال عندها بأن الشحنة تم حثها عند نهايتي العمود الفلزي. وعلى الرّغم من عدم توليد أي شحنات صافية في العمود، إلاّ أنّ الشحنات قد تم فصلها عن بعضها. ولا تزال الشحنات الصافية في العمود الفلزي تعادل صفرا. وبالرغم من ذلك، فلو انقسم الفلز إلى قسمين، فسنحصل على جسمين مشحونين أحدهما مشحون بشحنة موجبة والآخر بشحنة سالبة.

الشكل 16 – 6 عمود فلزي متعادل كهربائياً في (أ) سيكتسب شحنة موجبة عند وضعه ملامساً (ب) مع جسم فلزي مشحون بشحنة موجبة. (تتحرك الإلكترونات كما هو موضح بالسهم البرتقالي). ويسمى هذا شحنا بالتوصيل.



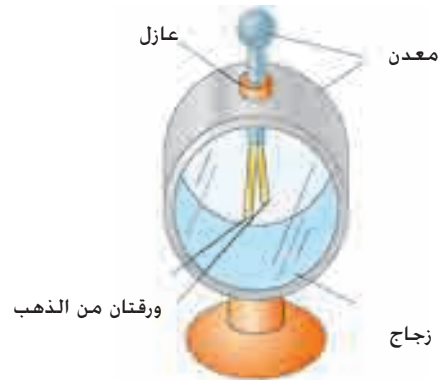
الشكل 16 – 7 الشحن عن طريق الحثّ

هناك طريقة أخرى لحثّ شحنة صافية على جسم فلزي من خلال توصيل الجسم بالأرض بواسطة سلك موصل (أو أنبوب فلزي ينتهي داخل الأرض) كما هو مبين في (الشكل 16 – 8 أ) (ويعني الرمز ⏚ الإيصال "بالأرض"). ويسمى الجسم عندها بأنه "أُرِّضَ" أو أُدِّم". ونظرًا لكبر حجم الأرض وقدرتها على التوصيل، فإنها قادرة على استيعاب عدد ما من الإلكترونات أو التخلي عنها؛ أي أنّها تتصرف وكأنها خزان كبير من الشحنات. وإذا وضع جسم مشحون بشحنة سالبة هذه المرة بالقرب من جسم فلزي، فإن الإلكترونات الحرة في الفلز ستطرد بعيدًا، وسينتقل عدد كبير منها خلال السلك إلى الأرض (الشكل 16 – 8 ب)، مما سيترك الفلز مشحونًا بشحنة موجبة. وإذا قطع السلك بعد ذلك، فإن الجسم الفلزي سيمتلك شحنة موجبة مستحثة عليه (الشكل 16 – 8 جـ). ولكن إذا قُطع السلك بعد إبعاد الجسم المشحون بشحنة سالبة، فإنّ الإلكترونات ستتحرك عائدة إلى الجسم الفلزي، ليصبح الجسم عندئذٍ متعادلًا كهربائيًّا.



الشكل 16 – 8 حثّ شحنة على جسم مُتصل بالأرض.

ويمكن فصل الشحنات أيضًا في غير الموصلات. وإذا وضعت جسمًا مشحونًا بشحنة موجبة بالقرب من جسم غير موصل ومتعادل كهربائيًّا كما هو مبين في (الشكل 16 – 9)، فلن يتحرّك أيُّ إلكترون (تقريبًا) بحرية خلال الجسم غير الموصل. ومع هذا، فيمكن لهذه الإلكترونات أن تتحرك قليلاً خلال ذراتها أو جزيئاتها. يمثّل كلّ شكلٍ بيضوي في (الشكل 16 – 9) جزيئاً (الأبعاد غير حقيقية). وتميل الإلكترونات سالبة الشحنة والمنجذبة إلى الشحنات الموجبة الخارجية إلى التحرك باتجاه الشحنات الموجبة وهي داخل جزيئاتها. وبسبب أنّ الشحنات السالبة في غير الموصل هي الأقرب إلى الشحنات الخارجية الموجبة، فإن غير الموصل سينجذب بمجمله إلى الشحنات الموجبة الخارجية (انظر الصورة في بداية هذا الفصل صفحة 439).



الشكل 16 – 10 المكشاف الكهربائي

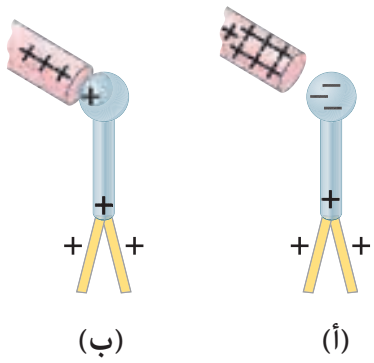
الشكل 16 – 9 يتسبب جسم مشحون وُضع بالقرب من عازل بفصل الشحنات عن بعضها داخل جزيئات العازل.

إنّ **المكشاف الكهربائي** جهاز يمكن استخدامه للكشف عن الشحنات. وكما هو مبين في (الشكل 16 – 10)، هناك ورقتان فلزيتان (غالباً من الذهب) قابلتان للتحرك داخل وعاء. (في بعض الأحيان تكون ورقة واحدة فقط منهما قابلة للحركة). وتكون الورقتان متصلتين بواسطة موصل إلى مقبض فلزي خارج الوعاء ومعزولتين عن جسمه. وعندما يقترب جسم مشحون بشحنة موجبة من المقبض الفلزي فإن هذا يحثّ على الفصل بين الشحنات: تُجذب الإلكترونات نحو الأعلى خلال المقبض لتترك الشحنات الموجبة خلفها (الشكل 16 – 11 أ). تتنافر الورقتان كما هو مبين في الشكل لأنهما مشحونتان بشحنتين موجبتين متشابهتين. أما إذا كان المقبض مشحونًا عن طريق التوصيل، فإن الجهاز ككل سيكتسب شحنة صافية كما هو مبين في (الشكل 16 – 11 ب). وفي الحالتين، كلما ازداد مقدار الشحنات ازدادت المسافة الفاصلة بين الورقتين.

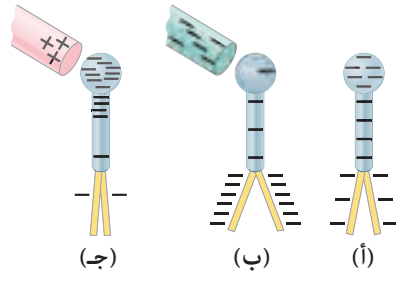
لاحظ أنّك لا تستطيع التمييز بين إشارات الشحنات باستخدام هذه الطريقة؛ لأنّ الشحنات السالبة ستعمل على تنافر الورقتين وابتعادهما عن بعضهما تماماً مثلما تعمل كمية مساوية من الشحنات الموجبة. وفي الحالتين ستتنافر الورقتان مع بعضهما بعضًا. ومع هذا، يمكن استخدام المكشاف الكهربائي لتحديد إشارة الشحنة إذا تمّ شحنه بداية عن طريق التوصيل، ولنقل بشحنة سالبة كما هو في (الشكل 16 – 12 أ). والآن، إذا تم تقريب جسم سالب كما في (الشكل 16 – 12 ب)، فإنّ عدداً أكبر من الإلكترونات ستحثّ لتتحرك نحو الأسفل إلى الورقتين لتبتعدا عن بعضهما أكثر وأكثر. أمّا إذا تمّ تقريب شحنة موجبة، فإن الإلكترونات ستستحثّ لتنساب نحو الأعلى لتترك الورقتين خلفها مشحونتين بشحنة سالبة أقل بالمقدار مقارنة مع ما كانت عليه لتقترب الورقتان من بعضهما، وليقل التنافر فيما بينهما (شكل 16 – 12 جـ).

لقد استخدم المكشاف الكهربائي كثيرا في بداية دراسة الكهرباء. واستخدم المبدأ نفسه بمساعدة بعض الدارات الإلكترونية في أجهزة **القياس الإلكترونية** الحساسة جدًّا والحديثة.

جهاز قياس إلكتروني



الشكل 16 – 11 شحن المكشاف الكهربائي عن طريق (أ) الحث. (ب) التوصيل.



الشكل 16 – 12 يمكن لجهاز مكشاف كهربائي مشحون مسبقاً أن يستخدم لتحديد نوع شحنة جسم مشحون.

5-16 قانون كولوم

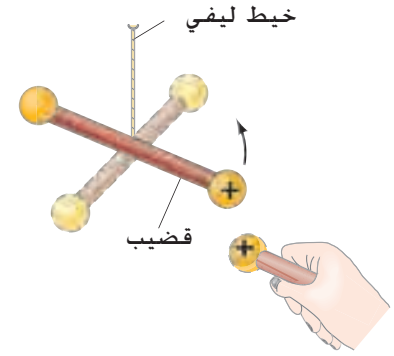
لقد رأينا أنّ الشحنة الكهربائية تؤثّر في قوّة تجاذب أو تنافر على الشحنات الكهربائية الأخرى. فما العوامل التي تؤثّر في قيمة هذه القوة؟ ولإيجاد الحلّ المناسب على هذا التساؤل؛ قام العالم الفرنسي كولوم (1736 – 1806) بالتحري عن القوى الكهربائية في ثمانينيات القرن الثامن عشر باستخدام الميزان الالتوائي (شكل 16 – 13)، كالذي استخدمه كافندش تماماً، خلال دراسته لقوة الجاذبية (الفصل الخامس).

إنّ الأجهزة الدقيقة لم تكن متوافرة لقياس الشحنات الكهربائية في الفترة الزمنية التي عاشها كولوم. ومع هذا فقد كان قادرًا على تحضير كرات صغيرة ذات كميات مختلفة من الشحنات، وعلى تحديد النسب بينها.* وعلى الرغم من مواجهته لبعض الصعوبات في التعامل مع الشحنات المستحثة، إلا أنه كان قادرًا على مناقشة أنّ القوة التي يؤثر بها جسم صغير مشحون في جسم صغير آخر مشحون تتناسب طرديًّا مع الشحنة على كل منهما. أي أنّه لو تضاعفت الشحنة على أيٍّ من الجسمين، فإن القوة ستتضاعف؛ كما لو أنّ الشحنة تضاعفت على كلا الجسمين، فإنّ القوة ستزداد إلى أربعة أضعاف قيمتها الأصلية. وهذه هي الحالة عندما تبقى المسافة الفاصلة بين الشحنتين ثابتة. ووجد كولوم أنه إذا سمح للمسافة الفاصلة بين الشحنتين بالإزدياد، فإن القوة ستتناقص مع مربع المسافة بين الشحنتين؛ أيْ لو أن المسافة تضاعفت، فإن القوة ستنخفض إلى ربع قيمتها الأصلية. وبناءً عليه استنتج كولوم أن القوة التي يؤثر بها جسم صغير مشحون في جسم آخر مشحون تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب قيمة الشحنة على أحدهما Q_1 في قيمة الشحنة على الآخر Q_2 وعكسيًّا مع مربع المسافة r الفاصلة بينهما (الشكل 16 – 14). وكمعادلة، يمكننا كتابة **قانون كولوم** كالتالي:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \qquad \textbf{[القيم] (1 – 16)}$$

وتمثل k ثابت التناسب.**

ويعطي قانون كولوم (المعادلة 16 – 1) قيمة القوة الكهربائية التي يؤثر بها أيّ من الجسمين في الآخر. ويكون اتجاه القوة الكهربائية دائما على امتداد الخط الواصل بين الجسمين. وإذا كان للشحنتين الإشارة نفسها، فإن القوة على كل منهما ستتجه مبتعدة عن الأخرى (تتنافر). وأما إذا كانت الشحنتان مختلفتين في الإشارة، فإن القوة على إحداهما ستتجه نحو الأخرى (ستتجاذبان). انظر (الشكل 16 – 15). لاحظ أن القوة التي تؤثر بها إحدى الشحنتين في الأخرى تعادل بالمقدار وتعاكس بالاتجاه القوة التي تؤثر بها الثانية في الأولى حسب قانون نيوتن الثالث.

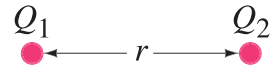


الشكل 16 – 13 مبدأ عمل آلة كولوم. تشبه هذه الآلةُ آلةَ كافندش التي استخدمت لقوة الجاذبية. وعندما تُقرب كرة خارجية مشحونة من الكرة المشحونة الأخرى الموجودة على العمود المعلق يبدأ العمود بالدوران الخفيف ويمانع الخيط الليفي الرفيع حركة الدوران هذه لتتناسب زاوية اللي مع القوة المؤثرة. وبحث كولوم كيفية تغير القوة الكهربائية بدلالة قيمة الشحنات والمسافة الفاصلة بينهما.

قانون كولوم

اتجاه القوة

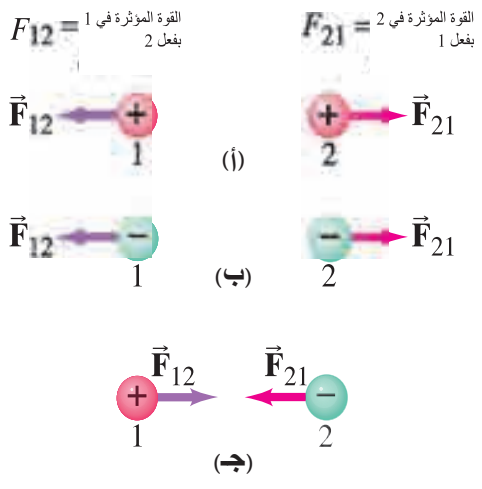
الشكل 16 – 14 يعطي قانون كولوم (المعادلة 16 - 1) القوة بين شحنتين Q_1 و Q_2 تفصل بينهما مسافة r.



* جادل كولوم أنه عند ملامسة كرة موصلة مشحونة لكرة مماثلة غير مشحونة، فإن الشحنة على الأولى ستتوزع بالتساوي على الكرتين بسبب تماثلهما. وهكذا وجد كولوم طريقة للحصول على شحنات مساوية لـ $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{4}$ ، وهكذا دواليك، من قيمة الشحنة الأصلية.

** وتعتمد صلاحية قانون كولوم في أيامنا هذه على القياسات الدقيقة والأكثر دقة بكثير من التجربة الأصلية التي قام بها. وأُثبت حالياً أنّ الأسّ 2 في قانونه دقيقٌ لدرجة جزء واحد لكل 10^{16} [أيْ أنه $2 \pm (1 \times 10^{-16})$].

الشكل 16 – 15 يعتمد اتجاه القوة على ما إذا كانت إشارة الشحنات متماثلة كما في (أ) و(ب) أو مختلفة كما في (جـ).



وحدة الشحنة: الكولوم

الوحدة الدولية للشحنة هي **الكولوم** (C).* ويُعطى التعريف الدقيق في الوقت الحاضر للكولوم بدلالة كلّ من التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي. وهذا ما سنناقشه لاحقا (البند 20 – 6). وتُعطى قيمة k حسب النظام الدولي (SI) كالتالي:

$$k = 8.988 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

أو عندما نحتاج إلى رقمين مميزين فقط:

$$k \approx 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

وعليه، فإنّ 1 C هي كمية الشحنة التي إنّ وضعت على جسمين نقطيين تفصلهما مسافة 1.0 m ستنتج قوة يؤثر بها كل جسم في الآخر مقدارها $(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(1.0\,\mathrm{C})(1.0\,\mathrm{C})/(1.0\,\mathrm{m})^2 = 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N}$ وهو مقدار هائل جدًّا من القوة يساوي وزناً يقارب المليون طن. ولا تُصادف غالبًا شحنات كبيرة بقدر الكولوم. وعادة ما تكون الشحنات المتولدة نتيجة الدلك الاعتيادي للأجسام (مثل المشط والمسطرة البلاستيكية) حوالي مايكروكولوم واحد $(1\ \mu\mathrm{C} = 10^{-6}\,\mathrm{C})$ أو أقلّ. والأجسام التي تحمل شحنة موجبة لديها عجز في الإلكترونات. أمّا الأجسام المشحونة بشحنة سالبة فيكون لديها فائض في عدد الإلكترونات. وتم تحديد الشحنة على إلكترون واحد لتعادل حوالي $1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$. وهي أصغر شحنة حُرَّة موجودة في الطبيعة.** وتمّ إعطاؤها الرمز e لأنها أساسية. ويشار إليها عادة بالشحنة الأولية:

الشحنة على الإلكترون (الشحنة الأولية)

$$e = 1.602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

لاحظ أنّ e تم تعريفها كرقم موجب. وعليه، فإنّ الشحنة الإلكترونية هي $-e$. (وأمّا الشحنة على البروتون من ناحية أخرى فهي $+e$). وبما أنّ الجسم غير قادر على اكتساب جزء من الإلكترون أو فقدانه، فإن الشحنة الصافية على أي جسم يجب أن تكون مضاعفات هذه الشحنة. ويقال عندئذٍ بأنّ الشحنة **مكميّة** (توجد فقط بمضاعفات محددة: $1e$ أو $2e$ أو $3e$، إلى آخره). ونتيجة لصغر e المتناهي، فإننا لا نلاحظ هذا التحديد على الشحنات الجاهرية (يتطلب 1μ C حوالي 10^{13} إلكترون) التي تظهر مستمرة.

الشحنة الكهربائية مكماة

قانون كولوم وقانون الجذب الكوني

ويبدو قانون كولوم مشابهًا كثيرًا لقانون الجذب الكوني $F = G m_1 m_2/r^2$ الذي يعبر عن قوة الجاذبية التي تؤثر بها كتلة m_1 في كتلة أخرى m_2 (المعادلة 5 – 4). وكلاهما يمثّل قانون تربيعٍ عكسي $(F \propto 1/r^2)$. كما أنّ كلاهما يتناسب مع صفة لكل جسم: الكتلة للجاذبية والشحنة الكهربائية للكهرباء. وكلاهما يؤثر عن بعد (أي أنّه لا حاجة إلى التلامس). والفرق الرئيس بين القانونين هو أن الجاذبية دائمًا قوة جذب. ولكن القوة الكهربائية يمكن لها أن تكون قوة جاذب أو قوة تنافر. وتأتي الشحنات الكهربائية على نوعين: موجبة وسالبة. أمّا كتلة الجاذبية فهي دائمًا موجبة. وعادة ما يكتب الثابت k في (المعادلة 16 – 1) بدلالة ثابت آخر ϵ_0 يسمى **سماحية الفراغ**. وعلاقته مع k هي $k = 1/4\pi\epsilon_0$. ويمكن كتابة قانون كولوم كالتالي:

قانون كولوم (بدلالة ϵ_0)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad \textbf{(2 – 16)}$$

حيث:

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

وتبدو (المعادلة 16 – 2) أكثر تعقيداً من (المعادلة 16 – 1). ومع هذا، فهناك معادلات أساسية أخرى لم نرها بعد إلى الآن تبدو أبسط بدلالة ϵ_0 مقارنة مع k. وليس مهمًّا أيّ شكل سنستخدم طالما أن (المعادلتين 16 – 1 و 16 – 2) متكافئتان. (أحدث وأدق قيمتين لكل من e و ϵ_0 موجودتان داخل الغلاف الأمامي لهذا الكتاب).

[وبتعريفنا للوحدات مثل $\mathrm{C^2/N\cdot m^2}$ للثابت ϵ_0 فإنّنا نعني أن $\mathrm{m^2}$ هي بالمقام. أي أنّ $\mathrm{C^2/N\cdot m^2}$ لا تعني $(\mathrm{C^2/N})\cdot\mathrm{m^2} = \mathrm{C^2\cdot m^2/N}$ (ولو كان هذا صحيحاً لكتبناها بهذه الطريقة)].

كتابة الوحدات

* حسب نظام الوحدات السغثية cgs (سم، غم، ث) الذي كان متداولاً في السابق، فإنّ قيمة k كانت تساوي 1، وكانت وحدة الشحنات الكهربائية تدعى وحدة الكهرباء الساكنة (esu) أو الكولوم الساكنة (stat coulomb). وتم تعريف 1 esu بالشحنة الموجودة على جسمين نقطيين يفصل بينهما 1سم، ويسببان قوة مقدارها 1 dyne.

** حسب النموذج الاعتيادي لفيزياء الأجسام الأولية، فإنّ هناك جسيمات تدخل في تركيب الجسيمات المكونة للنواة وتدعى الكواركات (Quarks أو Quorks، الفصل الثاني والثلاثين) وتتميز بشحنة أصغر من شحنة الإلكترون تعادل $\frac{1}{3}e$ أو $\frac{2}{3}e$. ولم يتمّ قياس الكواركات إلى الآن كأجسام معزولة. وتشير النظرية إلى أنه قد يكون من غير الممكن قياس كواركات حرة.

شحنة نقطية

تطبق (المعادلتان 16 – 1 و 16 – 2) على الأجسام ذات الأحجام الصغيرة جدًّا مقارنة مع المسافة الفاصلة بينها. والقانون دقيق **للشحنات النقطية** (التي يمكن إهمال أبعادها بالنسبة إلى المسافات الأخرى). أمّا بالنسبة إلى الأجسام ذات الأبعاد أو الأحجام الملموسة، فإنّه ليس واضحًا أيّ قيمة لـ r يمكن استخدامها، وخصوصًا لأنّ توزيع الشحنات على الجسم قد لا يكون منتظمًا. وإذا كان الجسمان كرتين، وكان معلومًا أنّ توزيع الشحنات على كلٍّ منهما منتظم فإنّ r هي المسافة الفاصلة بين مركزيهما.

ويصف قانون كولوم القوة بين شحنتين ساكنتين. وهناك قوى أخرى تظهر عندما تكون الشحنات متحركة. وهذا ما سنناقشه في الفصول اللاحقة. ولكن سنناقش في هذا الفصل الشحنات الساكنة فقط، التي يطلق عليها علم **الكهرباء الساكنة** (الكهروسكونية).

وعند حساب قانون كولوم، غالباً ما نهمل إشارات الشحنات، ونحدد اتجاه القوة بطريقة مستقلة معتمدين على ما إذا كانت القوة ناجمة من التجاذب أم التنافر.

توجيه لحلّ الأسئلة.

استعمل قيم في قانون كولوم. وحدّد اتجاه القوة من اشارات الشحنات.

المثال 16-1 **القوة الكهربائية على الإلكترون بواسطة البروتون.**

حدد قيمة القوة الكهربائية التي يؤثر بها البروتون الوحيد لذرة هيدروجين $(Q_2 = +e)$ أي نواة الذرة في إلكترونها الوحيد، وحدّد اتجاهها كذلك. افترض أنّ متوسط المسافة الفاصلة بين الإلكترون الدوار والبروتون هو $r = 0.53 \times 10^{-10}\,\text{m}$ (شكل 16 – 1).

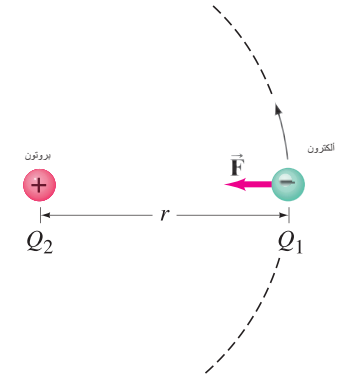
النهج: نستخدم قانون كولوم $F = kQ_1Q_2/r^2$ (معادلة 16 – 1) لإيجاد قيمة القوة علماً بأن $r = 0.53 \times 10^{-10}\,\text{m}$. ويمتلك الإلكترون والبروتون مقدار الشحنة e نفسه، حيث $Q_1 = Q_2 = 1.6 \times 10^{-19}\,\text{C}$.

الحل: تعطى قيمة القوة كالتالي:

$$F = k\frac{Q_1Q_2}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})}{(0.53 \times 10^{-10}\,\text{m})^2}$$

$$= 8.2 \times 10^{-8}\,\text{N}.$$

واتجاه القوة على الإلكترون هو نحو البروتون؛ لأنّ للشحنتين إشارتين مختلفتين، والقوّة هي قوّة تجاذب.



الشكل 16 – 16 (مثال 16 - 1)

المثال المفاهيمي 16-2 **ما هي الشحنة التي تؤثر بقوة أكبر**

تفصل مسافة l بين شحنتين نقطيتين موجبتين $Q_1 = 50\,\mu\text{C}$ و $Q_2 = 1\,\mu\text{C}$ (شكل 16 – 17). ما هي القوة الأكبر: القوة التي تؤثر بها Q_1 في Q_2 أم القوة التي تؤثّر بها Q_2 في Q_1؟

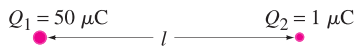
الإجابة: من قانون كولوم، القوّة التي تؤثّر بها Q_2 في Q_1 هي:

$$F_{12} = k\frac{Q_1Q_2}{l^2}$$

والقوّة التي تؤثّر بها Q_1 في Q_2 هي:

$$F_{21} = k\frac{Q_2Q_1}{l^2}$$

وهي نفس قيمة سابقتها تمامًا. وبما أنّ المعادلة متماثلة بالنسبة إلى الشحنتين، فإن $F_{21} = F_{12}$. ويخبرنا كذلك قانون نيوتن الثالث بأن لهاتين القوتين القيمة نفسها.



الشكل 16 – 17 (مثال 16 - 2)

التمرين أ: في (المثال 16 – 2)، كيف يرتبط اتجاه F_{12} مع اتجاه F_{21}؟

التمرين ب: ما قيمة F_{12} (و F_{21}) في (المثال 16 – 2) إذا كان $l = 30\,\text{cm}$؟

من الجدير بالاهتمام أن نتذكر دائمًا بأنّ قانون كولوم (معادلة 16 – 1 أو 16 – 2) يعطي القوّة على شحنة ما الناجّة من شحنة أخرى. أما إذا وُجِدت أكثر من شحنة (أو عدة شحنات)، فإنّ القوّة المحصلة على أيٍّ منها ستكون المحصلة المتجهة للقوة المؤثرة في هذه الشحنة من قِبل الشحنات الأخرى. ويعتمد **مبدأ التراكب (الجمع الموضعي)** هذا على التجارب. ويخبرنا أن متجهات القوى الكهربائية تجمع كما تجمع أي متجهات أخرى. وعلى سبيل المثال، فإن القوة المحصلة على الشحنة 1 في نظام يتكون من أربع شحنات هي مجموع القوى المؤثرة في الشحنة 1 من قِبل الشحنات 2 و 3 و 4. وتحدد قيمة هذه القوى الثلاث من قانون كولوم، ومن ثم يتم جمعها اتجاهياً.

مبدأ التراكب (الجمع الموضعي): تجمع القوى الكهربائية كمتجهات.

6-16 حل مسائل تتضمن قانون كولوم والمتجهات

تعدّ القوةُ الكهربائية بين الأجسام المشحونة الساكنة (يشار إليها في بعض الأحيان بأنّها القوّة **الكهربائية الساكنة أو قوة كولوم**) متجهاً كالقوى الأخرى؛ أيْ أن لها قيمة واتجاه. وعندما تعمل عدّة قوى على جسم ما (ولنسمها $\vec{\mathbf{F}}_1$ و $\vec{\mathbf{F}}_2$، الخ) فإنّ القوة المحصلة $\vec{\mathbf{F}}_{\text{net}}$ على هذا الجسم هي الجمع الاتجاهي لهذه القوى المؤثرة فيه:

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{net}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \cdots$$

وكما رأينا، فهذا هو مبدأ الجمع الموضعي للقوى. وقد درسنا في الفصل الثالث كيفية جمع المتجهات. في حين استخدمنا في الفصل الرابع القوانين لجمع المتجهات للحصول على القوة المحصّلة المؤثرة في الجسم عند جمع متجهات القوى المختلفة المؤثرة فيه. لذا، من المناسب الآن استعراض (البنود 3 – 2، و3 – 3، و3 – 4)، بالإضافة إلى (البند 4 – 9) والتي تتضمن طرقًا عامة لحل المسائل. وإليك الآن نظرة عامة ومختصرة للمتجهات.

مراجعة عامة لجمع المتجهات

افرض أنّ هناك قوتين متجهتين $\vec{\mathbf{F}}_1$ و $\vec{\mathbf{F}}_2$ تؤثران في جسم ما (شكل 16– 18أ). يمكن جمعهما باستخدام طريقة الذيل والرأس (شكل 16 – 18 ب)، أو باستخدام طريقة متوازي المستطيلات (شكل 16 – 18 جـ) كما تمت مناقشتها في (البند 3 – 2). تعدّ هاتان الطريقتان ضروريتين لفهم مسألة ما (للحصول على صورة ذهنية لما يحدث). ومع هذا، فإن طريقة الجمع باستخدام المركبات أكثر دقة من سابقتيها لتحديد الاتجاه وحساب قيمة محصّلة الجمع. ويظهر (الشكل 16– 18 د) القوتين $\vec{\mathbf{F}}_1$ و $\vec{\mathbf{F}}_2$ محللتين إلى مركبتيهما على امتداد المحورين السيني (x) والصادي (y) المختارين (انظر البند 3 – 4 لتفصيل أكثر). ومن تعريفات الدوال المثلثية (الشكلان 3 – 11 و 3 – 12) نحصل على:

$$F_{1x} = F_1 \cos\theta_1 \qquad F_{2x} = F_2 \cos\theta_2$$
$$F_{1y} = F_1 \sin\theta_1 \qquad F_{2y} = -F_2 \sin\theta_2$$

ونجمع المركبتين السينية والصادية:

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos\theta_1 + F_2 \cos\theta_2$$
$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \sin\theta_1 - F_2 \sin\theta_2$$

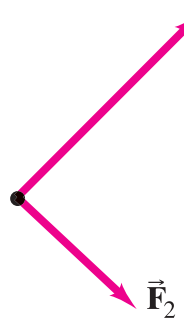
وقيمة القوة المحصلة $\vec{\mathbf{F}}$ هي:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

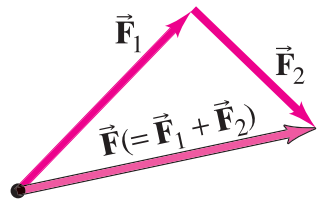
ويحدد اتجاه $\vec{\mathbf{F}}$ بواسطة الزاوية θ التي تصنعها $\vec{\mathbf{F}}$ مع المحور السيني x كالتالي:

$$\tan\theta = \frac{F_y}{F_x}$$

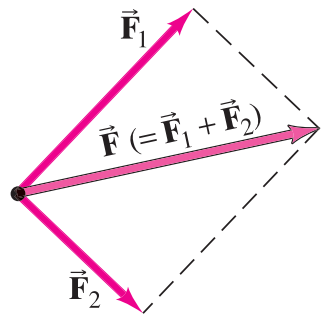
الشكل 16 – 18 مراجعة عامة لجمع المتجهات.



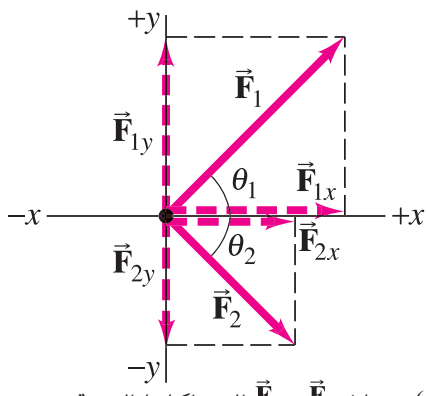
(أ) قوتان تؤثران في الجسم نفسه.



(ب) القوة الكلية أو المحصلة
$\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2$
من الذيل الى الرأس



(جـ) $\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2$
بطريقة اكمال متوازي الأضلاع



(د) بتحليل $\vec{\mathbf{F}}_1$ و $\vec{\mathbf{F}}_2$ الى مراكباتها السينية x و الصادية y

جمع القوى الكهربائية ومبدأ التراكب (الجمع الموضعي)

عند التعامل مع عدّة شحنات، فإنّ استخدام رموز سفلية زوجية لتصاحب القوى ذات العلاقة جميعها يعدّ من الأمور المساعدة. ويشير الرمز السفلي الأول إلى الجسم الذي تؤثر فيه القوّة، أمّا الرمز السفلي الثاني فيشير إلى الجسم الذي يسبب القوة. وعلى سبيل المثال، إذا كان النظام مكوناً من ثلاث شحنات، فإن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ تعني القوّة التي يُؤثّر بها الجسم الأول في الجسم الثالث.

وكما هو في حلول المسائل جميعها، فإنّه من المهمّ جدًّا أن ترسم مخططًا، وتحديدًا مخطط جسم – حر (الفصل 4) لكل جسم وإظهار القوى المؤثرة على الجسم جميعها. وعند تطبيق قانون كولوم، نستطيع التعامل مع مقادير الشحنات فقط (تاركين الإشارات السالبة) للحصول على قيمة كل قوة. ثُمّ نحدد اتجاه القوة بصورة منفصلة (على امتداد الخط الفاصل بين الجسمين: تتنافر الشحنات المتماثلة وتتجاذب الشحنات المختلفة) ومن ثَمّ نظهر هذه القوة على المخطط. وفي النهاية نجمع كلّ هذه القوى المؤثرة في الجسم كمتجهات للحصول على محصلة القوى المؤثرة فيه.

المثال 16-3 **ثلاث شحنات على استقامة واحدة.**

رتبت ثلاث شحنات في خط كما هو مبين في (الشكل 16 – 19 أ). احسب محصلة القوة الكهربائية الساكنة على الجسم 3 (شحنته $-4.0\,\mu C$ على اليمين) الناتجة من تأثير الشحنتين الباقيتين.

النهج: محصلة القوة على الجسم 3 هي الجمع الاتجاهي للقوّة $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ المؤثرة في 3 بواسطة 1، والقوة $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ المؤثرة في 3 بواسطة 2: $\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{F}}_{31} + \vec{\mathbf{F}}_{32}$.

الحل : يمكن الحصول على قيمة هاتين القوتين باستخدام قانون كولوم حسب (المعادلة 16 – 1):

$$F_{31} = k\frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} = \frac{(9.0\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(4.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(8.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.50\,\mathrm{m})^2} = 1.2\,\mathrm{N}$$

حيث $r_{31} = 0.50\,\mathrm{m}$ وهي المسافة من Q_3 إلى Q_1. وبالمثل:

$$F_{32} = k\frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = \frac{(9.0\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})(4.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(3.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.20\,\mathrm{m})^2} = 2.7\,\mathrm{N}$$

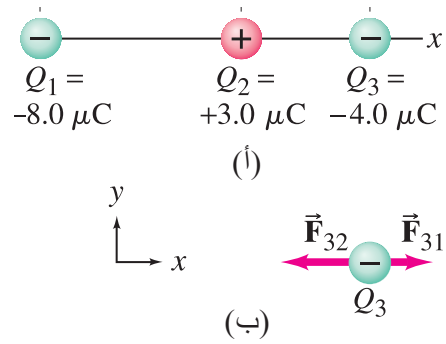
وبما أنّنا كنا نحسب قيم القوى، فقد أهملنا إشارات الشحنات. ومع هذا، يجب أن تبقى الإشارات في أذهاننا لكي نحدد اتجاه كلّ قوّة. ولندع الخط الذي يجمع هذه الأجسام المحور السيني (x) واتجاهه الموجب إلى اليمين. وبما أن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ هي قوة تنافر، في حين $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ هي قوة تجاذب واتجاههما مبين في (الشكل 16 – 19 ب)، فإنّ F_{31} تشير إلى الاتجاه الموجب للمحور السيني (x) أمّا F_{32} فتشير إلى الاتجاه السالب للمحور السيني (x). وتصبح محصلة القوتين على الجسم 3 كالتالي:

$$F = -F_{32} + F_{31} = -2.7\,\mathrm{N} + 1.2\,\mathrm{N} = -1.5\,\mathrm{N}$$

أي أن قيمة القوة المحصلة هي 1.5 N وتشير إلى اليسار.

ملحوظة : تؤثر الشحنة Q_1 في الشحنة Q_3 كما لو أنّ الشحنة Q_2 غير موجودة في موضعها (وهذا هو مبدأ التراكب). أي أن الشحنة Q_2 في المنتصف لا تحجب تأثير الشحنة Q_1 عن Q_3. ومن الطبيعي أن تؤثر Q_2 بقوتها الخاصة في Q_3.

التمرين جـ: حدد القوة المحصلة على Q_1 في (الشكل 16 – 19 أ).



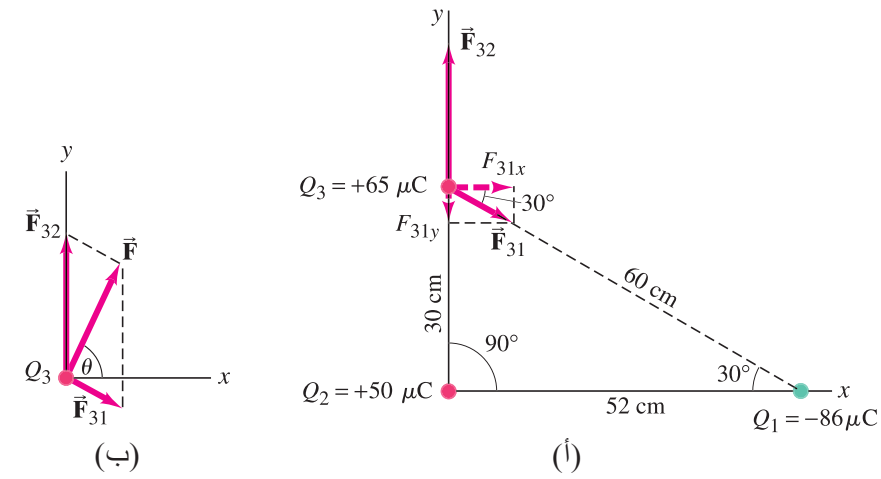
الشكل 16 – 19 (المثال 16 - 13)

تنويه:
تؤثر كل شحنة بقوتها الخاصة، ولا تحجب أي شحنة تأثير الشحنات الأخرى.

المثال 16-4 **القوة الكهربائية باستخدام المركبات.**

احسب محصلة القوى الكهربائية الساكنة على الشحنة Q_3 المبينة في (الشكل 16 – 20 أ) الناتجة من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج: نستخدم قانون كولوم لإيجاد قيم القوى كلًّا على حدة. ويكون اتجاه كلّ قوة على امتداد الخط الواصل بين Q_3 إلى Q_1 أو إلى Q_2. واتجاه كل من القوتين $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ مبين كما في (الشكل 16 – 20 أ)؛ لأنّ Q_1 تؤثر بقوة تجاذب في Q_3، في حين تؤثر Q_2 بقوة تنافر. وبما أن $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ لا تقعان على الخط نفسه، فيجب علينا أن نحلّل كلًّا منهما ($\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$) إلى مركبتين على امتداد المحورين x و y، ومن ثمّ نطبق الجمع الاتجاهي للحصول على القوة الناتجة على Q_3.



الشكل 16 – 20 تحديد القوى في (المثال 16 - 4). (أ) اتجاهات القوى المنفردة كما هي مبينة لأن $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ هي قوة تنافر (القوة على Q_3 هي باتجاه يبتعد عن Q_2 لأن كلاً من Q_2 وQ_3 موجب) أمّا $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ فهي قوة تجاذب (إشارة كلّ من Q_3 و Q_1 متعاكسة) وتشير $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ باتجاه Q_1. (ب) جمع $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ إلى $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ للحصول على القوة المحصلة $\vec{\mathbf{F}}$

الحل: نُحسب قيمتا $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ (مع إهمال إشارات الشحنات بعد معرفة الاتجاهات) كالتالي:

$$F_{31} = k\frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} = \frac{(9.0\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2})(6.5\times10^{-5}\ \mathrm{C})(8.6\times10^{-5}\ \mathrm{C})}{(0.60\ \mathrm{m})^2} = 140\ \mathrm{N},$$

$$F_{32} = k\frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = \frac{(9.0\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2})(6.5\times10^{-5}\ \mathrm{C})(5.0\times10^{-5}\ \mathrm{C})}{(0.30\ \mathrm{m})^2} = 330\ \mathrm{N}.$$

ونحلّل $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ إلى مركبتيها على امتداد المحورين السيني (x) والصادي (y) كما هو مبيّن في (الشكل 16 – 20 أ):

$$F_{31x} = F_{31}\cos 30^\circ = (140\ \mathrm{N})\cos 30^\circ = 120\ \mathrm{N},$$
$$F_{31y} = -F_{31}\sin 30^\circ = -(140\ \mathrm{N})\sin 30^\circ = -70\ \mathrm{N}.$$

أمّا القوّة $\vec{\mathbf{F}}_{32}$، فإنّ لها مركبة صادية (y) فقط. لذا، فإنّ مركبتي محصلة القوى $\vec{\mathbf{F}}$ المؤثرة في Q_3 تعطى كالتالي:

$$F_x = F_{31x} = 120\ \mathrm{N},$$
$$F_y = F_{32} + F_{31y} = 330\ \mathrm{N} - 70\ \mathrm{N} = 260\ \mathrm{N}.$$

وقيمة محصلة القوى هي:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(120\ \mathrm{N})^2 + (260\ \mathrm{N})^2} = 290\ \mathrm{N};$$

وتوثر بزاوية θ تعطى كالتالي (انظر الشكل 16 – 20 ب):

$$\tan\theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{260\ \mathrm{N}}{120\ \mathrm{N}} = 2.2,$$

أي أن: $\theta = \tan^{-1}(2.2) = 65^\circ$.

ملحوظة: لأنّ $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ ليستا على امتداد الخط نفسه، فإن قيمة $\vec{\mathbf{F}}_3$ لا تساوي المجموع (أو الفرق كما في المثال 16 – 3) للقيم المنفردة. أي أن F_3 لا تساوي $F_{31} + F_{32}$، كما أنها لا تساوي $F_{32} - F_{31}$ وبدلًا من ذلك كان علينا أن نجمع اتجاهياً.

المثال المفاهيمي 16-5 اجعل القوة على Q_3 صفرًا.

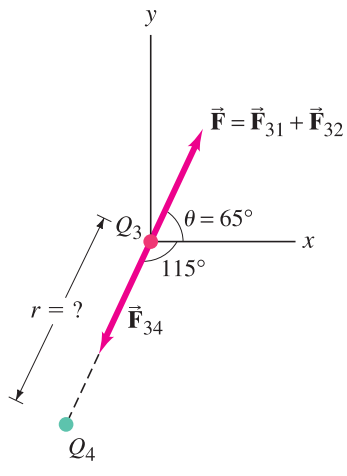
أين يمكن لك وضع شحنة رابعة $Q_4 = -50\ \mu C$ بحيث تكون القوة المحصلة على Q_3 صفرًا؟

الإجابة: حسب مبدأ التراكب، فإنّنا بحاجة إلى قوة في الاتجاه المعاكس تمامًا للمحصلة $\vec{\mathbf{F}}$ الناتجة من تأثير Q_1 وQ_2 التي حسبناها في (المثال 16 – 4). (شكل 16 – 20 ب). ويجب أن تكون قيمة القوة 290 N. كما يجب أن تشير إلى الأسفل وعلى يسار Q_3 في (الشكل 16 – 20 ب). وعليه، فإنّ Q_4 يجب أن تكون على امتداد هذا الخط. انظر (الشكل 16 – 21).

التمرين د: ما المسافة r التي يجب أن تفصل بين Q_4 و Q_3 في (المثال 16 – 5)؟

التمرين هـ: (أ) خذ شحنتين نقطيتين لهما القيمة نفسها، وإشارتاهما مختلفتان ($+Q$ و$-Q$) وتبتعدان مسافة ثابتة d عن بعضهما بعضًا. هل تستطيع إيجاد موقع تضع فيه شحنة موجبة ثالثة Q بحيث تكون محصلة القوى الكهربائية عليها مساوية للصفر؟ (ب) ماذا لو أنّ الشحنتين الأوليتين كانتا كلتاهما $+Q$ (موجبتين)؟

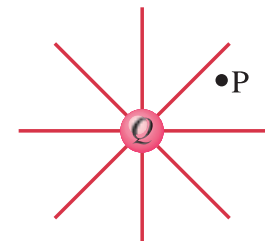
الشكل 16 – 21 (مثال 16 - 5) وتمرين د: تؤثر Q_4 بقوة ($\vec{\mathbf{F}}_{34}$) تجعل محصلة القوى على Q_3 صفرًا.



7-16 المجال الكهربائي

يُشار إلى كثيرٍ من القوى العامة "بقوى التلامس" ومثال ذلك دفع يديك عربة مشتريات أو سحبها، أو عندما يضرب مضرب التنس كرة التنس.

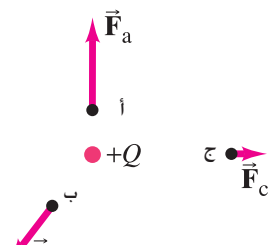
وعلى النقيض من ذلك، فإنّ كلاً من قوّة الجاذبيّة والقوّة الكهربائية تؤثران عن بعد؛ أي أنّ هناك قوة بين جسمين بالرغم من عدم ملامسة بعضهما بعضًا. وكانت فكرة القوة التي تعمل عن بعد فكرة صعبة القبول للمفكرين الأوائل. وشعر نيوتن بعدم الراحة في التعامل مع هذه الفكرة عندما نشر قانونه في الجاذبية الكونية. وكطريقة مساعدة للنظر إلى هذه الحالة؛ تستخدم فكرة **المجال** التي طورها العالم البريطاني مايكل فارادي (1791 – 1867). وبحسب فارادي في حالة الكهرباء، فإن المجال الكهربائي يمتد نحو الخارج من كل شحنة ليتخلل الفضاء كله (شكل 16 – 22). وإذا وضعت شحنة ثانية (سمّها Q_2) بالقرب من الشحنة الأولى فإنّها ستشعر بقوّةٍ يؤثّر بها المجال الكهربائي في ذلك الموضع ولنقل عند النقطة P في (الشكل 16 – 22). وافترض أن المجال الكهربائي عند النقطة P يتفاعل مباشرةً مع الشحنة Q_2 لينتج القوة على Q_2.



المجال

الشكل 16 – 22 يحيط المجال الكهربائي بكل نقطة. P هي نقطة اعتباطية.

ويمكن لنا من ناحية المبدأ أن ندرس المجال الكهربائي المحيط بشحنة أو بمجموعة من الشحنات عن طريق قياس القوة المؤثرة في **شحنة اختبار** صغيرة وموجبة. ونعني بشحنة الاختبار أنها شحنة صغيرة لدرجة كافية كي تجعل القوة التي تؤثر فيها ضئيلة جداً لتعدل توزيع الشحنات الأخرى المولدة للمجال أو تغيرها. وإذا وضعت شحنة اختبار موجبة وضئيلة جداً عند مواضع مختلفة بالقرب من شحنة موجبة وحيدة Q كما هو مبين في (الشكل 16 – 23) (النقاط أ، ب، جـ)، فإن القوة التي تتأثر بها q تتجه قطريًا نحو الخارج من Q. ويُعرف المجال الكهربائي بدلالة القوة المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة هذه. وعلى وجه الخصوص، فإن **المجال الكهربائي** $\vec{\mathbf{E}}$ عند أي نقطة في الفضاء يعرف على أنه القوة $\vec{\mathbf{F}}$ المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة الضئيلة عند تلك النقطة مقسوماً على قيمة شحنة الاختبار q هذه :



تعريف المجال الكهربائي

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{q}. \qquad \textbf{(3 – 16)}$$

وبالتحديد، فقد عرّفت $\vec{\mathbf{E}}$ على أنها نهاية $\vec{\mathbf{F}}/q$ عندما تصبح q أصغر وأصغر لتؤول إلى الصفر. أي أن q ضئيلة لدرجة أنها لا تؤثر بأيّ قوة على الشحنات الأخرى المكونة للمجال. ونستطيع أن نرى من هذا التعريف (معادلة 16 – 3) أنّ المجال الكهربائي عند أي نقطة في الفضاء هو متجه له اتجاه القوة المؤثرة نفسه في شحنة الاختبار الموجبة الضئيلة عند تلك النقطة، والذي قيمته القوة لكل وحدة شحنات. وعليه، فإن وحدة $\vec{\mathbf{E}}$ الدولية (SI) هي النيوتن لكل كولوم (N/C).

$\vec{\mathbf{E}}$ كمتجه

والسبب في تعريف $\vec{\mathbf{E}}$ على أنها $\vec{\mathbf{F}}/q$ (مع $q \to 0$) هو لكي لا تعتمد على قيمة شحنة الاختبار q. وهذا يعني أنّ $\vec{\mathbf{E}}$ ستصف فقط تأثير الشحنات التي تصنع المجال الكهربائي عند تلك النقطة.

ويمكن قياس المجال الكهربائي عند أي نقطة في الفضاء بناءً على هذا التعريف (معادلة 16 – 3). ويمكن لنا حساب $\vec{\mathbf{E}}$ للحالات البسيطة المتضمنة شحنة واحدة أو عدة شحنات. وعلى سبيل المثال، فإن قيمة المجال الكهربائي على بعد r من شحنة نقطية وحيدة Q هي :

المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية وحيدة.

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kqQ/r^2}{q}$$

$$E = k\frac{Q}{r^2} \qquad \text{[شحنة نقطية وحيدة]} \quad \textbf{(16 – 4 أ)}$$

أو بدلالة ϵ_0 كما في (المعادلة 16 – 2) ($k = 1/4\pi\epsilon_0$):

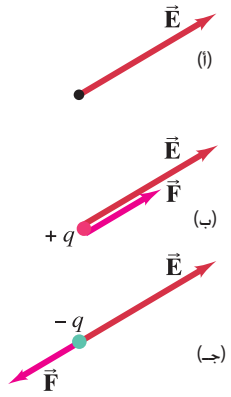
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}. \qquad \text{[شحنة نقطية وحيدة]} \quad \textbf{(16 – 4 ب)}$$

لاحظ أنّ E لا تعتمد على شحنة الاختبار q، بل إنّها تعتمد فقط على Q التي تولد المجال، وليس على قيمة شحنة الاختبار q. يشار إلى (المعادلتين 16 – 4) على أنهما نسخة المجال الكهربائي لقانون كولوم.

إذا أُعطينا المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ عند نقطة ما في الفضاء، فإنّنا سنستطيع حساب القوة $\vec{\mathbf{F}}$ المؤثرة في أي شحنة q موضوعة عند تلك النقطة عن طريقة كتابة (انظر المعادلة رقم 16 – 3) :

$$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{E}}. \qquad \textbf{(5 – 16)}$$

وهذا صحيح حتى عندما تكون q غير صغيرة طالما أن q لا تسبب تحرك الشحنات التي تولد $\vec{\mathbf{E}}$. وإذا كانت q موجبة، فإن $\vec{\mathbf{F}}$ و $\vec{\mathbf{E}}$ سيشيران إلى الاتجاه نفسه. أما إذا كانت q سالبة، فإن كلاًّ من $\vec{\mathbf{F}}$ و $\vec{\mathbf{E}}$ سيشير إلى عكس اتجاه الآخر. انظر (الشكل 16 – 24).



الشكل 16 – 24 (أ) المجال الكهربائي عند نقطة معينة في الفضاء. (ب) القوة على شحنة موجبة عند تلك النقطة. (جـ) القوة على شحنة سالبة عند تلك النقطة.

المثال 16-6 **آلة النسخ.**

تعمل آلة النسخ عن طريق ترتيب الشحنات الموجبة (في النمط المراد نسخه) على سطح أسطوانة، ثم رش جزيئات الحبر الجاف المشحونة بشحنات سالبة بلطف على الأسطوانة. تلتصق جزيئات الحبر بشكل مؤقت على النمط المرتب على الأسطوانة (شكل 16 – 25) وتُنقل لاحقاً على ورقة و"تُذوّبُ" لتُنتج النسخة. ولنفترض أن كتلة كل جزيء حبر $9.0 \times 10^{-16}\,\text{kg}$، وأنّه يحمل بالمتوسط 20 إلكتروناً إضافياً لتزوده بشحنته السالبة. ولنفترض أنّ القوة الكهربائية على جزيء الحبر يجب أن تزيد بمرتين على قيمة وزنه لكي يُضمن مقدارٌ كافٍ من الجذب. احسب شدة المجال الكهربائي الضرورية قرب سطح الأسطوانة.

النهج: القوة الكهربائية على جزيء حبر شحنته $q = 20e$ هي $F = qE$ حيث إنّ E المجالُ الكهربائي الضروري. وتحتاج هذه القوة إلى أن تكون مساوية لضعفي وزن الجزي (mg) على الأقل.

الحل: القيمة الدنيا للمجال الكهربائي تحقق العلاقة :

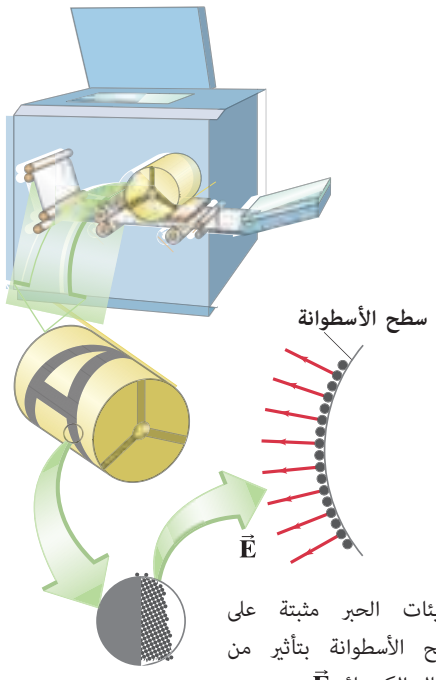
$$qE = 2mg$$

حيث $q = 20e$. وعليه :

$$E = \frac{2mg}{q} = \frac{2(9.0 \times 10^{-16}\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2)}{20(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})} = 5.5 \times 10^{3}\,\text{N/C}.$$

تطبيق الفيزياء

الناسخة الضوئية



جزيئات الحبر مثبتة على سطح الأسطوانة بتأثير من المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$

الشكل 16 – 25 (مثال 16 - 6).

المثال 16-7 **المجال الكهربائي لشحنة نقطية وحيدة.**

احسب قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند النقطة P التي تقع على بعد 30 cm نحو يمين شحنة نقطية $Q = -3.0 \times 10^{-6}\,\text{C}$.

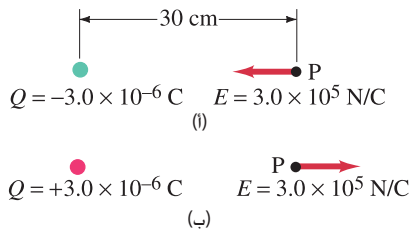
النهج : تعطى قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة نقطية وحيدة (بالمعادلة 16 – 4). وتستخدم إشارة الشحنة Q لإيجاد الاتجاه.

الحل : نحسب قيمة المجال الكهربائي:

$$E = k\frac{Q}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(3.0 \times 10^{-6}\,\text{C})}{(0.30\,\text{m})^2} = 3.0 \times 10^{5}\,\text{N/C}.$$

ويتجه المجال الكهربائي نحو الشحنة Q إلى اليسار كما هو مبين في (الشكل 16 – 26 أ). حيث عرّفنا الاتجاه على أنّه اتجاه القوة على شحنة اختبار موجبة وهي هنا قوة تجاذب. ولو كانت الشحنة Q موجبة، فإنّ المجال الكهربائي سيشير إلى الخارج مبتعداً كما هو في (الشكل 16 – 26 ب).

ملحوظة: لا توجد شحنة كهربائية عند النقطة P. ومع هذا، فهناك مجال كهربائي. والشحنة الحقيقية الوحيدة هي Q.



الشكل 16 – 26 (مثال 16 - 7). المجال الكهربائي عند النقطة P (أ) الناتج من شحنة سالبة Q. (ب) الناتج من شحنة موجبة Q تبتعد كل منهما 30 cm عن P.

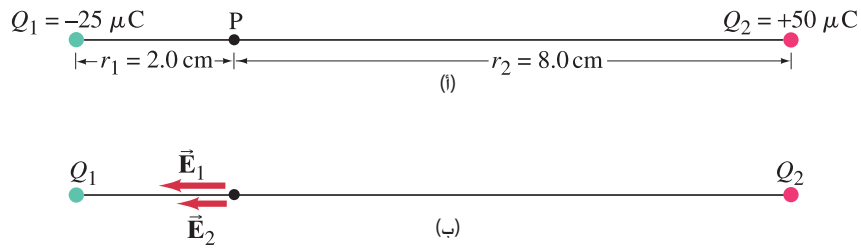
ويوضح هذا المثال نتيجة عامة: يشير المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ الناتج من شحنات نقطية موجبة بعيدًا عنها، في حين يشير $\vec{\mathbf{E}}$ الناتج من الشحنة النقطية السالبة باتجاه تلك الشحنة.

تمرين و: ما قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة $+2.5\,\mu\text{C}$ واتجاهه عند نقطة 50 cm أسفل الشحنة؟

إذا كان المجال الكهربائي عند نقطة ما في الفضاء ناجما عن أكثر من شحنة، فإن المجالات المنفردة (سمّهم $\vec{\mathbf{E}}_1$ و $\vec{\mathbf{E}}_2$ ...إلخ) الناتجة من كل شحنة ستجمع اتجاهيًّا للحصول على المجال الكلي عند تلك النقطة: $\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2 + \cdots$.

ولقد تم إثبات صحة **مبدأ التراكب** للمجالات الكهربائية بالتجربة.

مبدأ التراكب للمجالات الكهربائية.



الشكل 16 – 27 (مثال 16 - 8). لا نعرف أطوال $\vec{E}_1$ و$\vec{E}_2$ النسبية في (ب) ما لم نجر الحسابات.

المثال 16-8 E عند نقطة بين شحنتين.

تبتعد شحنتان نقطيتان مسافة 10.0 cm عن بعضهما بعضًا. مقدار إحدى الشحنتين $-25\ \mu C$ ومقدار الأخرى $+50\ \mu C$. (أ) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P بين الشحنتين والتي تبتعد مسافة 2.0 cm عن الشحنة السالبة (شكل 16 – 27 أ). (ب) إذا وُضِعَ إلكترونٌ (كتلته $= 9.11 \times 10^{-31}\ kg$) ساكنًا عند P، ثم تُرك حُرًّا، فما تسارعه الأولي (قيمة واتجاهًا)؟

النهج: المجال الكهربائي عند النقطة P هو الجمع الاتجاهي للمجالين المفردين الناجمين عن Q_1 و Q_2. ويشير المجال الناتج من الشحنة Q_1 السالبة باتجاه Q_1 ، في حين يشير المجال الناتج من الشحنة Q_2 الموجبة بعيدًا عن Q_2. وعليه، فإن المجالين يتجهان إلى اليسار كما هو مبين في (الشكل 27 – 16 ب). ونستطيع أن نجمع قيمتي المجالين جبرياً مع بعضهما مع إهمال إشارتي الشحنتين. ونستعمل في (ب) قانون نيوتن الثاني $(F = ma)$ لتحديد التسارع حيث $F = qE$ (معادلة 16 – 5).

الحل: (أ) المجال الناتج من شحنة نقطية يُعطى (بالمعادلة 16 – 4) $E = kQ/r^2$. والمجال الكلي هو:

$$E = k\frac{Q_1}{r_1^2} + k\frac{Q_2}{r_2^2} = k\left(\frac{Q_1}{r_1^2} + \frac{Q_2}{r_2^2}\right)$$
$$= (9.0 \times 10^9\ N\cdot m^2/C^2)\left(\frac{25 \times 10^{-6}\ C}{(2.0 \times 10^{-2}\ m)^2} + \frac{50 \times 10^{-6}\ C}{(8.0 \times 10^{-2}\ m)^2}\right)$$
$$= 6.3 \times 10^8\ N/C.$$

(ب) يشير المجال الكهربائي إلى اليسار. وعليه، فسيشعر الإلكترون بقوة جذب نحو اليمين لأنّ شحنته سالبة. لذلك فإن التسارع $a = F/m$ (قانون نيوتن الثاني) سيكون إلى اليمين. والقوة على شحنة q في مجال كهربائي E هي : $F = qE$ (معادلة 16 – 5). إذن، قيمة التسارع الابتدائي للإلكترون هي:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{(1.60 \times 10^{-19}\ C)(6.3 \times 10^8\ N/C)}{9.11 \times 10^{-31}\ kg} = 1.1 \times 10^{20}\ m/s^2$$

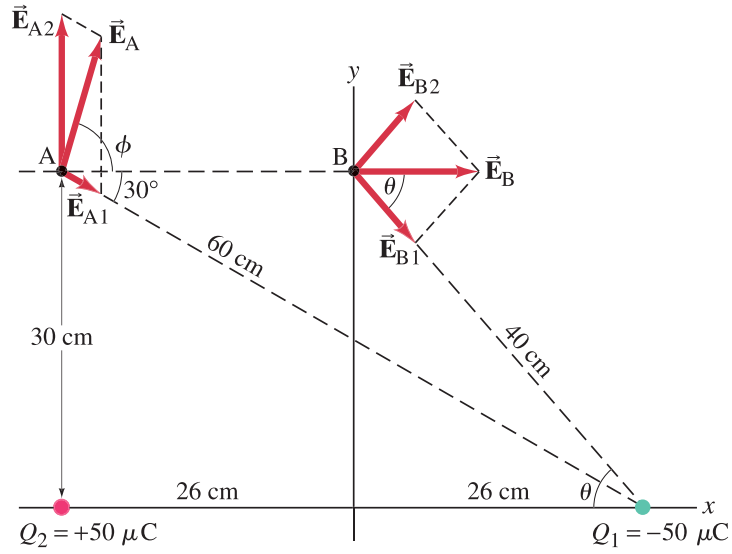
ملحوظة: من الممكن إجراء الحسابات بدقة وبطريقة صحيحة بعد التأكد من اتجاه كل مجال ($\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$) على حدة.

التمرين ز: حدد اتجاه كل مركبة من مركبات المجالين الكهربائيين $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$، وكذلك المجال الكهربائي الكلي للموضعين بمعرفة الشحنتين المتشابهتين Q_1 و Q_2 كما في (الشكل 16 – 27): (أ) عند نقطة تميل قليلاً إلى يسار Q_1. (ب) عند نقطة تميل قليلاً إلى يمين Q_2. (تلميح : تذكر المعامل $1/r^2$).

المثال 16-9 E فوق شحنتين نقطيتين.

احسب المجال الكهربائي الكلي عند النقطة: (أ) A. (ب) B في (الشكل 16 – 28) الناتج من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج: إنّ طريقة الحساب تشبه الطريقة المستخدمة في (المثال 16 – 4) إلا أننا نتعامل هنا مع المجالات الكهربائية بدلاً من القوة. والمجال الكهربائي عند النقطة A هو الجمع المتجه للمجال $\vec{E}_{A1}$ الناتج من Q_1، والمجال $\vec{E}_{A2}$ الناتج من Q_2. ونجد قيمة المجال الناتج من الشحنتين النقطيتين، ثم نجمع مركباتهما للحصول على المجال الكلي عند النقطة A. و من ثمّ نكرر ذلك للنقطة B.



الشكل 16 – 28 حساب المجال الكهربائي عند النقطتين A و B (للمثال 16 - 9).

الحل: (أ) المجال الكهربائي المولد عند النقطة A الناجم عن الشحنتين Q_1 و Q_2 يُعطى بالمعادلة $E = kQ/r^2$. أي:

$$E_{A1} = \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(50 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.60\ \text{m})^2} = 1.25 \times 10^6\ \text{N/C},$$

$$E_{A2} = \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(50 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.30\ \text{m})^2} = 5.0 \times 10^6\ \text{N/C}.$$

ويشير اتجاه E_{A1} من A إلى Q_1 (شحنة سالبة). في حين تشير E_{A2} من A مبتعدة عن Q_2 كما هو مبين. أي أنّ مركبات المجال الكهربائي الكلي عند A، $\vec{E}_A$ هي:

$$E_{Ax} = E_{A1}\cos 30° = 1.1 \times 10^6\ \text{N/C},$$

$$E_{Ay} = E_{A2} - E_{A1}\sin 30° = 4.4 \times 10^6\ \text{N/C}.$$

وأنّ قيمة $\vec{E}_A$ هي:

$$E_A = \sqrt{(1.1)^2 + (4.4)^2} \times 10^6\ \text{N/C} = 4.5 \times 10^6\ \text{N/C},$$

ويعطى اتجاهه ϕ بواسطة $\tan\phi = E_{Ay}/E_{Ax} = 4.4/1.1 = 4.0$. وعليه، فإن $\phi = 76°$.

(ب) بما أنّ B على بعد متساوٍ من الشحنتين المتساويتين (40 cm حسب نظرية فيثاغورس) فإن قيمتي E_{B1} و E_{B2} متساويتان. أي أنّ:

$$E_{B1} = E_{B2} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(50 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.40\ \text{m})^2}$$

$$= 2.8 \times 10^6\ \text{N/C}.$$

وأيضاً وبسبب التماثل، فإنّ المركبتين الصاديتين (y) متساويتان ومتعاكستان وتلغيان بعضهما. ويكون المجال الكلي E_B أفقيًّا ويساوي $E_{B1}\cos\theta + E_{B2}\cos\theta = 2E_{B1}\cos\theta$. ومن المخطط، فإنّ $\cos\theta = 26\ \text{cm}/40\ \text{cm} = 0.65$.

وعليه

$$E_B = 2E_{B1}\cos\theta = 2(2.8 \times 10^6\ \text{N/C})(0.65)$$

$$= 3.6 \times 10^6\ \text{N/C},$$

أمّا اتجاه $\vec{E}_B$ فهو على امتداد اتجاه $+x$.

ملحوظة: قد يحلّ الفرع (ب) بالطريقة نفسها المتبعة في الفرع (أ). ومع هذا، فإنّ التماثل سمح لنا بحل السؤال بطريقة أسهل وبمجهود أقلّ.

توجيه لحلّ الأسئلة.

اهمل إشارتي الشحنتين، وحدد الاتجاه مباشرة مظهراً الاتجاهات على المخطط.

توجيه لحلّ الأسئلة.

استخدم التماثل لاختصار خطوات الحل متى أمكن ذلك.

طريقة حل المسائل | القوى الكهربائية والمجالات الكهربائية

يتبع حلّ مسائل الكهرباء الساكنة إلى حدٍّ ما الإجراءات العامة لحلّ المسائل التي نوقشت في (البند 4 – 9). وسواء استخدمت المجال الكهربائي أو قوى الكهرباء الساكنة فإن الإجراءات متشابهة:

1. **ارسم** بعناية **مخططًا** وبالتحديد مخطّط جسم – حر لكلّ جسمٍ على حدة مظهرًا القوى المؤثرة على الجسم جميعها، أو مظهرًا المجال الكهربائي الناتج من الشحنات جميعها المؤثرة الموجودة عند كلّ نقطة. وحدّد **اتجاه** كل قوة أو مجال كهربائي فيزيائيًّا: الشحنات المتماثلة تتنافر مع بعضها، أمّا الشحنات المختلفة فتتجاذب، وتشير المجالات مبتعدة عن الشحنة الموجبة ومقتربة من الشحنة السالبة.
2. **طبّقْ قانون كولوم** لتحسب قيمة القوة التي تؤثر بها كلّ شحنة مساهمة في جسم مشحون أو قيمة المجال الكهربائي عند نقطة ما. وتعامل فقط مع قيم الشحنات (تاركًا الإشارات السالبة جانبًا) واحصل على قيمة كل قوة أو مجال كهربائي.
3. **اجمع اتجاهياً** القوى المؤثرة على الجسم جميعها أو المجالات المساهمة عند نقطة ما للحصول على المحصلة. واستخدم **التماثل** (ولنقل جبرياً) متى أمكن ذلك.

اظهر كلَّ متجه قوة أو مجالًا على المخطّط وضَعْ علامة عليه.

دعنا الآن نرى كيف يمكن تطبيق صندوق حل المسائل أو استخدامه على الفرع (ب) من (المثال 16 – 9).

المثال 16-9 معاد.

احسب المجال الكهربائي عند النقطة B في (الشكل 16 – 28) الناتج من الشحنتين Q_1 و Q_2.

النهج والحل:

1 - ارسم مخطّطًا دقيقًا. يظهر في (الشكل 16 – 28) **اتجاه** كل من المجالين الكهربائيين $\vec{\mathbf{E}}_{B1}$ و $\vec{\mathbf{E}}_{B2}$ وكذلك محصلة المجال $\vec{\mathbf{E}}_B$. ويشير $\vec{\mathbf{E}}_{B2}$ مبتعداً عن الشحنة Q_2 الموجبة. في حين يشير $\vec{\mathbf{E}}_{B1}$ مقترباً من الشحنة Q_1 السالبة.

2 - طبق قانون كولوم لتجد قيم المجالات الكهربائية المساهمة. وبما أن B متساوي الأبعاد (40 cm حسب نظرية فيثاغورس) من الشحنتين المتساويتين، فإن قيمة كل من E_{B1} و E_{B2} هي ذاتها. وتعطى كالتالي :

$$E_{B1} = E_{B2} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(50 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0.40\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 2.8 \times 10^6\ \mathrm{N/C}.$$

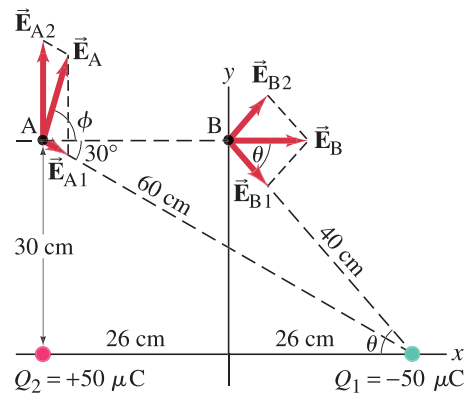
3- اجمع اتجاهيًّا واستخدم التماثل أينما أمكن. المركبتان الصاديتان (y) لكل من $\vec{\mathbf{E}}_{B1}$ و $\vec{\mathbf{E}}_{B2}$ متساويتان ومتعاكستان. وبسبب هذا التماثل، فإنّ المجال الكلي E_B أفقي ويساوي $E_{B1}\cos\theta + E_{B2}\cos\theta = 2\,E_{B1}\cos\theta$. ومن (الشكل 16 – 28):

$\cos\theta = 26\ \mathrm{cm}/40\ \mathrm{cm} = 0.65$. وعليه فإنّ:

$$E_B = 2E_{B1}\cos\theta = 2(2.8 \times 10^6\ \mathrm{N/C})(0.65)$$
$$= 3.6 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

واتجاه $\vec{\mathbf{E}}_B$ هو على امتداد اتجاه x الموجب.

ملحوظة : لا يُظهرُ الفرعُ (أ) من (المثال 16 – 9) أي تماثل مفيد.

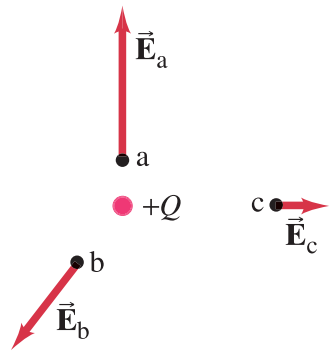


الشكل 16 – 28 (معاد) حساب المجال الكهربائي عند النقطتين A و B للمثال 16 - 9.

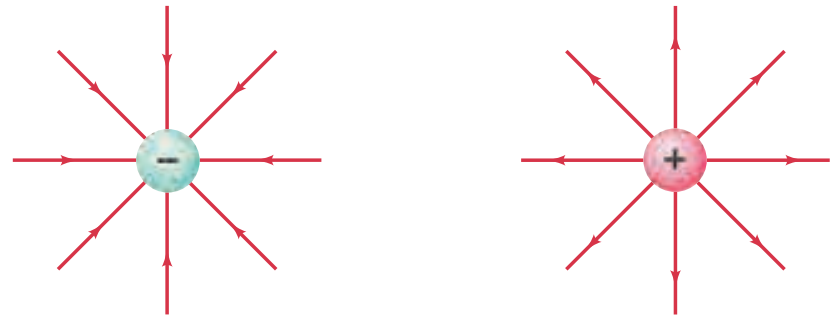
8-16 خطوط المجال

نظرًا لأنّ المجال الكهربائي متجه، فيشار إليه في بعض الأحيان بمتجه المجال. ويمكن أن نشير إلى المجال الكهربائي بأسهم عند النقاط المختلفة في وضعية ما مثل: أ، ب، جـ في (الشكل 16 – 29). واتجاهات كل من $\vec{\mathbf{E}}_a$، و $\vec{\mathbf{E}}_b$، و $\vec{\mathbf{E}}_c$ هي ذاتها اتجاهات القوى التي ظهرت سابقًا في (الشكل 16 – 23) بالرغم من أن الأطوال (القيم) مختلفة؛ لأننا نقسم F على q للحصول على E. ومع هذا، فإن الأطوال النسبية لـ $\vec{\mathbf{E}}_a$، و $\vec{\mathbf{E}}_b$، و $\vec{\mathbf{E}}_c$ هي ذاتها؛ لأننا نقسم في كل مرة على الشحنة q نفسها.

إنّ الإشارة إلى المجال الكهربائي بهذه الطريقة عند نقاط كثيرة ستظهر أسهما كثيرة تؤدي إلى اللبس سريعًا. ولكي نتفادى ذلك نستخدم طريقة أخرى هي طريقة خطوط المجال.



الشكل 16 – 29 متجه المجال الكهربائي مبيناً عند ثلاث نقاط والناتج من شحنة نقطية Q. (قارن مع الشكل 16 - 23).



الشكل 16 – 30 خطوط المجال الكهربائي (أ) بالقرب من شحنة نقطية موجبة وحيدة. (ب) بالقرب من شحنة نقطية سالبة وحيدة.

ولكي نتخيّل المجال الكهربائي؛ سنقوم برسم مجموعة من الخطوط لتشير إلى اتجاه المجال الكهربائي عند نقاط مختلفة في الفضاء. رُسمت **خطوط المجال الكهربائي** هذه (تدعى أحيانا خطوط القوة) بحيث تُشير إلى اتجاه القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة و الناتجة من مجال ما. ويبين (الشكل 16 – 30 أ) خطوط القوة الناتجة من شحنة اختبار موجبة معزولة ووحيدة. أمّا (الشكل 16 – 30 ب) فيظهر خطوط القوة الناتجة من شحنة سالبة معزولة ووحيدة. وتشير الخطوط في الفرع (أ) قطرياً من الشحنة نحو الخارج. وأما في الفرع (ب) فتشير الخطوط قطريًا إلى الداخل باتجاه الشحنة بسبب اتجاه القوة على شحنة الاختبار في كل حالة كما هو في (الشكل 16 – 26). ويظهر الشكل عدة خطوط فقط ممثلة للمجال. ولو أردنا، لأضفنا خطوطًا عديدة بينها لأن المجال الكهربائي يوجد هناك أيضاً. ونستطيع رسم الخطوط، سواء بدأت عند شحنة موجبة أو انتهت عند شحنة سالبة، بحيث يتناسب عددها طردياً مع قيمة الشحنة. لاحظ أنه بالقرب من الشحنة حيث يتعاظم المجال الكهربائي ($F \propto 1/r^2$) تقترب الخطوط أكثر من بعضها بعضا. وهذه خاصية عامة لخطوط المجال الكهربائي : كلما اقتربت الخطوط من بعضها، فإن المجال الكهربائي سيكون أقوى في تلك المنطقة. وفي الحقيقة، يمكن رسم خطوط المجال بحيث يتناسب عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة العمودية على $\vec{\mathbf{E}}$ مع قيمة المجال الكهربائي.

يُظهر (الشكل 16 – 31 أ) خطوط المجال الكهربائي الناتج من شحنتين متساويتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة، وهو **الجمع** الذي يعرف **بالثنائقطبي الكهربائي**. وتنحني خطوط المجال الكهربائي في هذه الحالة متجهة من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة. واتجاه المجال الكهربائي عند أي نقطة هو اتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة كما هو مبين بسهم المتجه $\vec{\mathbf{E}}$ عند النقطة P. ولتقنع نفسك أن هذا هو النمط الصحيح لخطوط المجال الكهربائي؛ فإنك تستطيع القيام بعدة حسابات كتلك التي أُجريت في (المثال 16 – 9) خصوصاً لهذه الحالة (انظر الشكل 16 – 28). ويظهر (الشكل 16 – 31 ب) خطوط المجال الكهربائي لشحنتين موجبتين متساويتين. أما (الشكل 16 – 31 جـ) فيظهر ذلك لشحنتين غير متساويتين $-Q$ و $+2Q$. لاحظ أنّ عدد خطوط المجال التي تغادر $+2Q$ هي ضعف الخطوط التي تدخل $-Q$ (يتناسب عدد الخطوط مع قيمة Q). ونرى أخيراً في (الشكل 16 – 31 د) المجال بين لوحين متوازيين يحملان شحنتين متساويتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة. لاحظ أنّ خطوط المجال الكهربائي بين اللوحين تبدأ عمودية على سطحي اللوحين الفلزيين (وسنرى لماذا يكون هذا صحيحًا في البند التالي) وتذهب مباشرة من لوح إلى آخر كما كنّا نتوقع؛ لأنّه إذا وُضِعت شحنة اختبار بين اللوحين، فستشعر شحنة الاختبار بتنافر شديد مع اللوح الموجب، وانجذاب شديد نحو اللوح السالب. وتكون خطوط المجال الكهربائي بين لوحين قريبين جدًّا من بعضهما متوازية ومتساوية البعد عن بعضها بعضا في المنطقة الوسطى بين اللوحين، وتتهدب نحو الخارج قرب الحواف. وعليه، فإنّ قيمة المجال الكهربائي ستكون نفسها عند النقاط جميعها في المنطقة الوسطى بين اللوحين. ونستطيع أن نكتب:

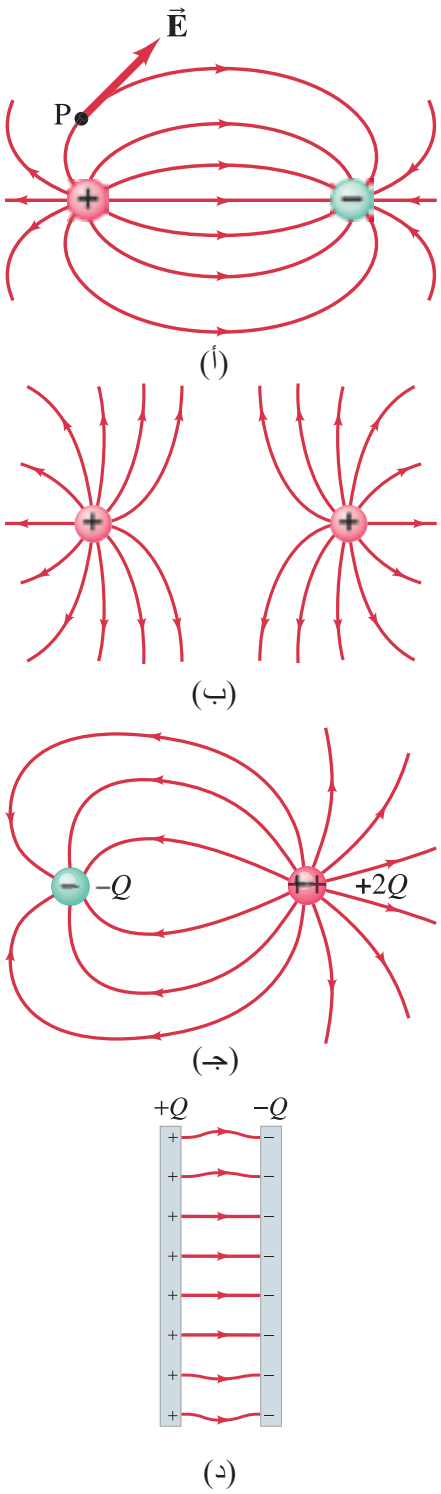
$$\text{مقدار ثابت} \quad E = \left[\begin{array}{l}\text{بين لوحين متوازيين قريبين من بعضهما بعضا} \\ \text{ومشحونين بشحنتين متساويتين ومختلفتين بالإشارة}\end{array}\right] \qquad \textbf{(6 – 16)}$$

وغالباً ما يمكن إهمال تهدُّب المجال قرب الحواف خصوصًا عندما تكون المسافة الفاصلة بين اللوحين صغيرة مقارنة مع أبعاد اللوحين.*

* تعطى قيمة المجال الكهربائي الثابت بين لوحين متوازيين كالتالي: $E = Q/\epsilon_0 A$، حيث تمثل Q قيمة الشحنة على كل لوح، أما A فتمثل مساحة أحد اللوحين. وسنرى هذا في (البند الاختياري 16 – 10) لقانون غاوس.

خطوط المجال الكهربائي

الشكل 16 – 31 خطوط المجال الكهربائي لأربعة توزيعات للشحنات.



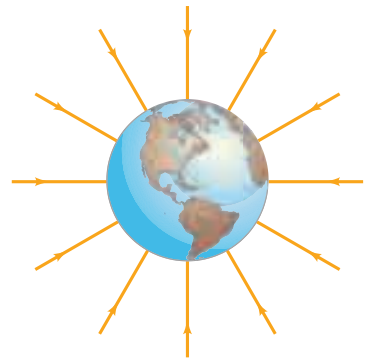
ونلخّص خواصَّ خطوط المجال كالتالي:

1. تشير خطوط المجال الكهربائي إلى اتجاه المجال الكهربائي الذي يتجه باتجاه مماسي لخط المجال عند أي نقطة.

2. ترسم الخطوط بحيث تتناسب قيمة المجال الكهربائي E مع عدد الخطوط التي تخترق وحدة مساحة عمودية على الخطوط. وكلما اقتربت الخطوط من بعضها كان المجال أشد.

3. تبدأ خطوط المجال الكهربائي عند الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة، ويتناسب العدد مع مقدار الشحنة.

لاحظ أيضاً أنّ خطوط المجال لا تتقاطع أبداً. لِمَ لا تتقاطع؟ يعزى السبب في ذلك إلى أنه عندما يتقاطع أي خطين مع بعضهما بعضا، فإنّ المجال سيبدو وكأنّ له اتجاهين عند تلك النقطة؛ وهذا غير منطقي.



الشكل 16 – 32 يتجه مجال جاذبية الأرض عند أي نقطة باتجاه مركز الأرض (تشير القوة على أي كتلة باتجاه مركز الأرض).

مجال الجاذبية

يمكن تطبيق مبدأ المجال على قوة الجاذبية. وعندها نستطيع القول بأنّ هناك جاذبية لكلِّ جسمٍ ذي كتلة. ويستطيع جسم ما أن يجذب جسماً آخر إليه بواسطة **مجال الجاذبية**. قد يقال على سبيل المثال بأن الأرض تمتلك مجال جاذبية (شكل 16 – 32) وهو المسؤول عن قوة الجذب بين الأجسام. ويعرف مجال الجاذبية على أنه القوة لكل وحدة كتلة. وعليه، فإن قيمة مجال جاذبية الأرض فوق سطح الأرض (GM_E/r^2)، حيث تمثل M_E كتلة الأرض، في حين تمثل r بعد نقطة القياس عن مركز الأرض، أما G فثابت الجذب (الفصل 5).

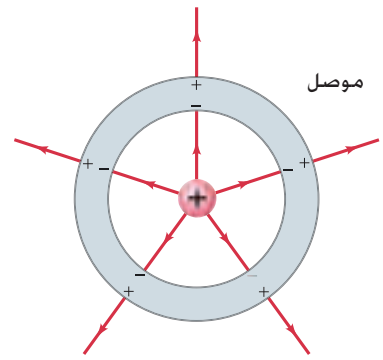
ولكن عند سطح الأرض، فإنّ r نصف قطر الأرض، ومجال الجاذبية يساوي g . التسارع الناتج من الجاذبية . ويمكن أن يتم حساب مجال الجاذبية خارج نطاق الأرض عند أي نقطة كمجموع حدود ناتجة من الأرض والشمس والقمر ، وكذلك الأجسام ذات المساهمات المميزة جميعها.

9-16 المجالات الكهربائية والموصلات

سنناقش الآن بعض خصائص الموصلات. أولًا، يكون المجال الكهربائي صفرًا في الحالة الساكنة؛ أي عندما تكون الشحنات ساكنة. وإذا كان هناك مجال كهربائي داخل الموصل، فستتولد قوة على الإلكترونات الحرة داخله، مما سيجعلها تبدأ بالتحرك إلى أن تصل إلى مواقع ينعدم عندها المجال الكهربائي لتؤول القوة الكهربائية عليها بعد ذلك إلى الصفر.

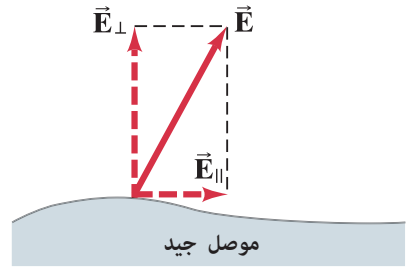
ويترتب على هذا المنطق بعض النتائج المثيرة. إحدى هذه النتائج هي توزيع الشحنات الزائدة على سطح الموصل. ويمكنك أن تتخيل تنافر الشحنات السالبة مع بعضها داخل الموصل المشحون بشحنة سالبة، وتسارعها باتجاه السطح لتصل إلى أبعد مسافة ممكنة تفصلها عن بعضها بعضًا. وهناك نتيجة أخرى سنستعرضها الآن. افرض أن هناك شحنة موجبة Q محاطة بموصل فلزي غير مشحون ومعزول، ويأخذ شكل قشرة كروية (شكل 16–33). وبسبب عدم إمكانية وجود مجال كهربائي داخل الفلز، فإن خطوط المجال التي ستغادر الشحنة الموجبة يجب أن تنتهي عند الشحنات السالبة على السطح الداخلي للفلز؛ أيْ أنّ مقدارًا متساويًا من الشحنات السالبة $Q-$ سيستحث على السطح الداخلي للقشرة الكروية. وبما أن القشرة متعادلة كهربائياً فهذا يعني ضرورة وجود شحنة موجبة على السطح الخارجي للقشرة مقدارها $Q+$. وبالرغم من عدم وجود أي مجال كهربائي داخل الفلز، فإن هناك مجالًا كهربائيًا خارجه كما هو مبين في (الشكل 16 – 33) كما لو أن الفلز غير موجود أصلاً هناك.

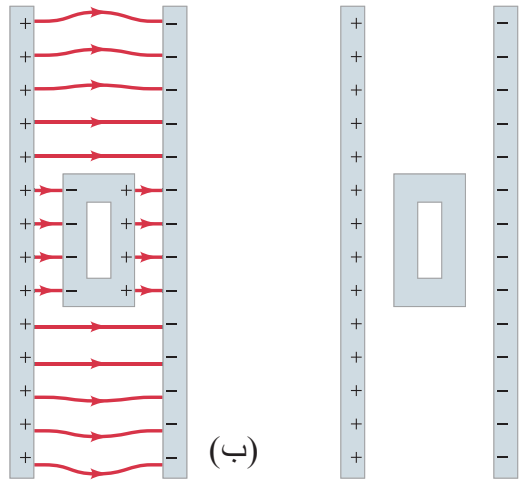
وإحدى الصفات التي تجمع المجالات الكهربائية الساكنة والموصلات هي أنّ المجال الكهربائي يكون دائمًا عموديًّا على سطح الموصل الخارجي. وإذا وُجدت مركبة للمجال الكهربائي $\vec{E}$ موازية للسطح (شكل 16 – 34) فإنها ستؤثر بقوة على الإلكترونات الحرّة الموجودة على السطح، مسبِّبةً حركة الإلكترونات على امتداد السطح إلى أن تصل الإلكترونات إلى مواقع تختفي عندها القوة المؤثرة فيها بالاتجاه الموازي للسطح؛ أيْ إلى أن يصبح المجال الكهربائي عموديًّا على السطح. وتنطبق هذه الصفات فقط على الموصلات. أما داخل غير الموصلات حيث لا يوجد أي إلكترونات حرة، فيمكن لمجال كهربائي ساكن أن يوجد. وهذا ما سنتناوله في الفصل القادم. وبالإضافة إلى ذلك، فليس من الضروري للمجال الكهربائي خارج غير الموصل (العازل) أن يصنع زاوية $90°$ مع السطح.



الشكل 16 – 33 تحث شحنة داخل قشرة فلزية كروية شحنة على سطحها. ومع أن المجال الكهربائي موجود خارج القشرة، إلا أنه ينعدم داخل الموصل نفسه.

الشكل 16 – 34 إذا كانت هناك مركبة للمجال الكهربائي $\vec{E}$ موازية لسطح الموصل $\vec{E}_{||}$ فإنها ستعمل على تسريع الإلكترونات. وأما في الحالة الساكنة، فإن $\vec{E}_{||}$ تعادل الصفر حتماً ويكون المجال الكهربائي عمودياً على سطح الموصل : $\vec{E} = \vec{E}_{\perp}$





الشكل 16 - 35
(المثال 16 - 10).

المثال المفاهيمي 16-10 **الحجب (الحماية) والأمان خلال العاصفة.**

وضع صندوق فلزي متعادل كهربائيًّا ومفرغ من الداخل بين لوحين متوازيين ومشحونين كما هو مبين في (الشكل 16 – 35 أ). ما طبيعة المجال داخل الصندوق؟

الإجابة: إذا كان الصندوق الفلزي صلباً وغير مفرغ، فإن الإلكترونات الحرة داخل الصندوق ستعيد ترتيب نفسها على امتداد السطح إلى أن تلغي المجالات الفردية جميعها لهذه الإلكترونات بعضَها بعضًا داخل الصندوق. وبذلك يصبح المجال الكهربائي داخل الصندوق صفرًا. ولكن إذا كان الصندوق مفرغا، فإن المجال الخارجي المرتبط به لن يتغير لأن الإلكترونات الحرّة داخل الفلز ستبقى قادرة على الحركة بحرية وتتجه نحو السطح. لذا، فإن المجال داخل الصندوق الفلزي المفرغ أيضًا سيكون مساويًا للصفر، وتكون خطوط المجال مشابهة لتلك المبينة في (الشكل 16 – 35 ب). ويكون الصندوق الموصل المستخدم بهذه الطريقة أداة فاعلة لحماية الأجهزة الحساسة والدارات الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية غير المرغوب بها. ونستطيع أن نرى أيضًا بأنّ داخل سيارة محاطة بالفلزات يعدّ مكانًا آمنًا نسبيًّا للبقاء فيه خلال العاصفة المصحوبة بالبرق. انظر أيضًا إلى (الشكل 16 – 36) حيث يحمي "قفص" مفرغ من الداخل شخصاً يجلس داخله خلال تفريغ كهربائي هائل.

* 16-10 قانون غاوس

يعدّ قانون غاوس الذي طوره الرياضي العبقري غاوس (1777 – 1855) من العلاقات المهمة في الكهرباء، حيث يربط بين الشحنة الكهربائية والمجال الكهربائي. كما يعدّ نسخة أكثر أناقة من قانون كولوم وأكثر عمومية. ويتضمن هذا القانون مفهوم **التدفق الكهربائي** الذي يشير إلى المجال الكهربائي المار خلال مساحة ما. ويُعرّف التدفق الكهربائي Φ_E لمجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ يمر خلال مساحة A كما هو مبين في (الشكل 16 – 37 أ) كالتالي:

$$\Phi_E = EA\cos\theta$$

حيث تمثل θ الزاوية بين اتجاه المجال الكهربائي والخط المرسوم العمودي على المساحة. ويمكن للتدفق أن يكتب بطريقة مكافئة:

$$\Phi_E = E_\perp A = EA_\perp \qquad \textbf{(7 – 16)}$$

حيث تمثل $E_\perp = E\cos\theta$ مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على المساحة (شكل 16 – 37 ب). وبالمثل، فإن $A_\perp = A\cos\theta$ تمثل مسقط المساحة A عموديًّا على المجال $\vec{\mathbf{E}}$ (شكل 16 – 37 جـ).

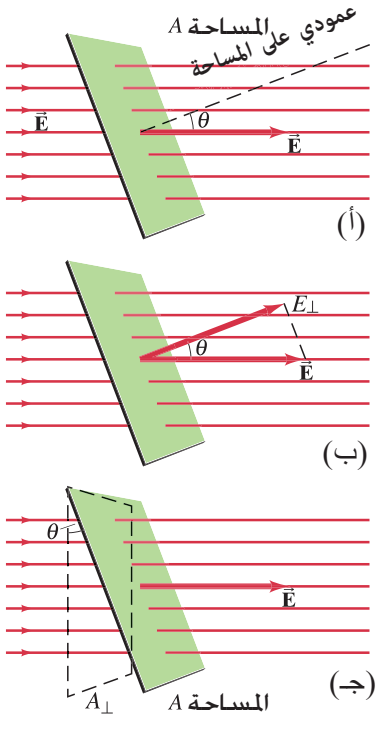
ويتميز التدفق الكهربائي بتفسير سهل بديهي بدلالة خطوط المجال. وقد ذكرنا في (البند 16 – 8) أنّ خطوط المجال يمكن رسمها دائمًا بحيث يكون عددها (N) المار خلال وحدة مساحة عمودية على المجال $(A_\perp)$ يتناسب مع قيمة المجال (E)؛ أيْ أن $E \propto N/A_\perp$. وعليه.

$$N \propto EA_\perp = \Phi_E \qquad \textbf{(8 – 16)}$$

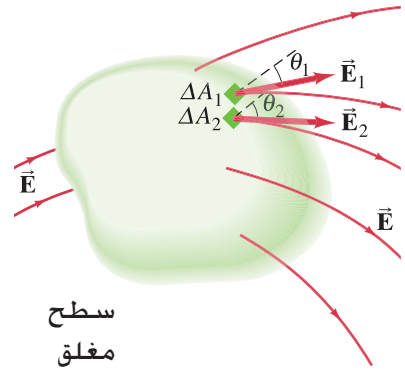
لذا، فإنّ التدفّق خلال مساحة ما يتناسب مع عدد الخطوط المارة خلال تلك المساحة.

الشكل 16 – 36 يوجد مجال كهربائي قوي بجوار "قفص فارادي" هذا. وهو قوي لدرجة أنّ الإلكترونات المتناثرة في الغلاف الجوي تُسرَّعُ إلى الطاقة الحركية الضرورية لطرد الإلكترونات خارج ذرات الهواء، مسببة انهياراً للشحنات التي تنساب إلى القفص الفلزي أو منه. ومع هذا، فإن الشخص داخل القفص لن يتأثر أو يشعر بها.

تطبيق الفيزياء
الحجب الكهربائي



الشكل 16 – 37 (أ) مجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ يمر خلال مساحة مسطحة A. (ب) $E_\perp = E\cos\theta$ هي مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على سطح مساحته A. (جـ) $A_\perp = A\cos\theta$ هي مسقط المساحة A (المتقطعة) عمودياً على المجال $\vec{\mathbf{E}}$.



الشكل 16 – 38 تمر خطوط المجال الكهربائي خلال سطح مغلق. ويقسم السطح إلى مساحات صغيرة وكثيرة العدد؛ $\Delta A_1, \Delta A_2, \cdots$ وهكذا دواليك. تظهر الصورة اثنتين منهما فقط.

قانون غاوس

يتضمّن قانون غاوس التدفّق الكلّي خلال سطح مغلق – وهو سطح لأيّ شكل – يحجز داخله حجمًا من الفضاء. ولأي سطح مماثل كما هو مبين في (الشكل 16 – 38). فإنّنا نقسم السطح إلى مساحات ضئيلة جدًّا وعديدة؛ ΔA_1 و ΔA_2 و ΔA_3.... وهكذا دواليك. ونقسم السطح بحيث تكون كل ΔA صغيرة كفاية لدرجة يمكن عندها اعتبارها مسطحة. وعند ذلك، يمكن اعتبار المجال الكهربائي ثابتًا خلال كل ΔA. وأنّ التدفق الكلّي خلال السطح كلّه هو مجموع التدفقات الفردية جميعها خلال كل مساحة من هذه المساحات الضئيلة:

$$\Phi_E = E_1\,\Delta A_1 \cos\theta_1 + E_2\,\Delta A_2 \cos\theta_2 + \cdots$$
$$= \sum E\,\Delta A \cos\theta = \sum E_\perp\,\Delta A,$$

ويعني الرمز Σ "مجموع". رأينا في (البند 16 – 8) أنّ عدد خطوط المجال البادئة عند شحنة موجبة ما ومنتهية عند شحنة سالبة ما تتناسب مع مقدار الشحنة. وعدد الخطوط المحصلة N المشيرة نحو خارج أي سطح مغلق (عدد الخطوط المشيرة نحو خارج أي سطح مغلق مطروحًا منه عدد الخطوط المشيرة نحو داخله) يجب أن يتناسب مع الشحنات الصافية المحتواة داخل السطح Q_{encl}. ولكن من (المعادلة 16– 8) نجد أن محصلة عدد الخطوط N تتناسب مع التدفق الكلي Φ_E:

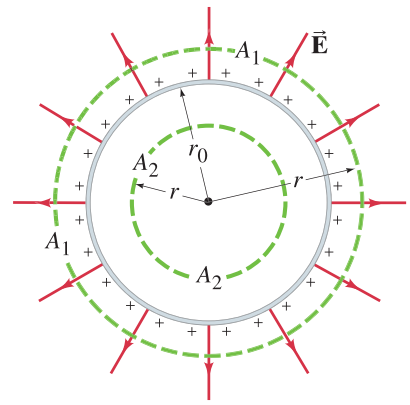
$$\Phi_E = \sum_{\text{مغلق سطح}} E_\perp\,\Delta A \propto Q_{\text{encl}}$$

وثابت التناسب هو $1/\epsilon_0$، وهو متطابق مع قانون كولوم. إذن،

$$\sum_{\text{مغلق سطح}} E_\perp\,\Delta A = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \qquad \textbf{(9 – 16)}$$

حيث إنّ الجمع (Σ) يشمل أي سطح مغلق، وتمثل Q_{encl} الشحنات الصافية المحتواة داخل السطح؛ وهذا هو **قانون غاوس**.

يمكن استخدام قانوني **كولوم وغاوس** لتحديد المجال الكهربائي الناتج من أي توزيع للشحنات (الساكنة). ويعدّ قانون غاوس مفيدًا عندما يكون توزيع الشحنات بسيطًا ومتماثلا. ومع هذا، فيجب علينا أن نختار السطح "الغاوسي" بعناية فائقة بحيث نستطيع تحديد $\vec{\mathbf{E}}$. وعادةً ما نختار سطحًا ما يُظهر التماثل الضروري بحيث تكون E ثابتة على السطح كلّه، أو أجزاء منه.



الشكل 16 – 39 رسم مقطع عرضي لقشرة كروية رقيقة نصف قطرها r_0 تحمل شحنة صافية Q موزعة بانتظام. A_1 وA_2 يمثلان سطحين غاوسيين نستخدمهما لتحديد $\vec{\mathbf{E}}$. (مثال 16 - 11).

المثال 16-11 **قشرة كروية مشحونة.**

تمتلك قشرةٌ كرويّةٌ رقيقة نصف قطرها r_0 شحنة صافية Q، موزعة بانتظام عليها (شكل 16 – 39). حدّد المجال الكهربائي عند نقطتين (أ) خارج القشرة . (ب) داخل القشرة.

النهج: بما أن الشحنة موزعة بالتماثل، فيجب أن يكون المجال الكهربائي متماثلا. وعليه، فإن المجال خارج القشرة يجب أن يتوجّه قطريًّا صوب الخارج (صوب الداخل إذا كانت $Q < 0$) ويجب أن يعتمد على r فقط.

الحل: (أ) سيمتلك المجال الكهربائي القيمة نفسها عند النقاط جميعها التي على سطح غاوسي تخيلي عند اختيارنا للسطح على شكل كرة نصف قطرها $(r > r_0)$ ولها مركز القشرة نفسه كما هو مبين في (الشكل 16 – 39) (الدائرة المتقطعة A_1 (dashed circle)). وبما أن $\vec{\mathbf{E}}$ عمودية على هذا السطح، فإن قانون غاوس (مع $Q_{\text{encl}} = Q$ في المعادلة 16 – 9):

$$\sum E_\perp\,\Delta A = E\sum \Delta A = E(4\pi r^2) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

وتمثل $4\pi r^2$ المساحة السطحية للكرة (سطح غاوس) ونصف قطرها r. أي:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2} \qquad [r > r_0]$$

لذلك، فإنّ المجال خارج قشرة كروية مشحونة بشحنة موزّعة بانتظام هو نفسه كما لو أنّ الشحنة كانت مجمّعة عند المركز كشحنةٍ نقطيّةٍ

(ب) وكذلك يجب أن يكون المجال داخل القشرة متماثلا. وعليه، فإنّ E يجب أن تمتلك مرة أخرى القيمة نفسها عند النقاط جميعها التي على السطح الغاوسي الكروي (A_2 في الشكل 16 – 39) ذي المركز المتطابق مع القشرة. لذا، فإنّ E يمكن أن تؤخذ خارج المجموع كعامل مشترك. وبما أنّ $Q_{\text{encl}} = 0$ لعدم وجود شحنة داخل السطح، فإنّ:

$$\sum E_\perp \, \Delta A = E \sum \Delta A = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} = 0$$

وعليه فإن:

$$E = 0 \qquad [r < r_0]$$

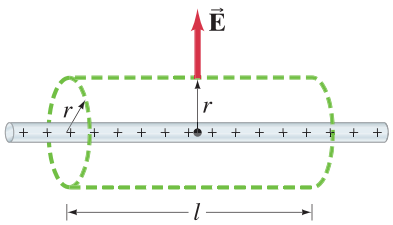
داخل قشرة كروية منتظمة الشحنة.

ويمكن تطبيق النتائج المفيدة (للمثال 16 – 11) أيضًا على موصل كروي صلب منتظم مشحون نتيجة وجود الشحنة كلها في طبقة رقيقة على السطح (بند 16 – 9).

التمرين ح: يمتلك سلك مستقيم طويل جدًّا شحنة منتظمة لكل وحدة طول Q/L. أثبت أن المجال الكهربائي عند نقاط قريبة (ولكن للخارج) من السلك وبعيدة عن الحواف يعطى كالتالي:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r}\frac{Q}{L}$$

باستخدام السطح الأسطواني الغاوسي (المتقطع dashed) المبين في (الشكل 16 – 40).
[تلميح: لا يوجد تدفق كهربائي خلال النهايتين المسطحتين للأسطوانة].



الشكل 16 – 40 حساب $\vec{\mathbf{E}}$ الناتج من خط طويل جداً من الشحنات، وتمرين هـ عندما كانت الأسطوانة (المنقطة) هي السطح الغاوسي

المثال 16-12 E عند سطح موصل.

أثبت أن المجال الكهربائي خارج سطح أي موصل جيد مهما كان شكله، يعطى كالتالي:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

حيث تمثل σ كثافة الشحنة السطحية (Q/A) على الموصل عند تلك النقطة.

النهج: نختار صندوقًا أسطوانيًّا صغيرًا كسطح غاوسي، ارتفاعه صغير لدرجة أنّ إحدى نهايتيه الدائريتين تكاد تقع فوق الموصل (شكل 16 – 41)، في حين تقع نهايته الأخرى أسفل سطح الموصل، وجوانبه عمودية عليه.

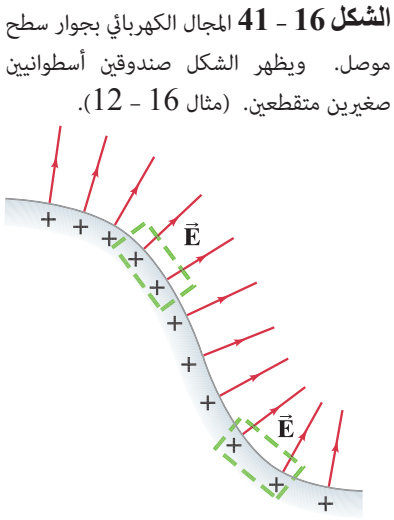
الحل : لا يوجد مجال كهربائي داخل الموصل، وهو عمودي على السطح خارج الموصل مباشرة (بند 16 – 9). لذا، فإنّ التدفّق الكهربائي يمرّ فقط خلال الطرف الخارجي للصندوق الأسطواني، في حين لا يمر أي تدفق خلال الجوانب القصيرة أو الطرف الداخلي. ونختار المساحة A (للطرف الأسطواني المسطح فوق سطح الموصل) صغيرة كفاية بحيث نضمن أن تكون E منتظمة فوقها. وعندها يعطي قانون غاوس:

$$\sum E_\perp \, \Delta A = EA = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

وعليه فإنّ:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \qquad [\text{عند سطح الموصل}]$$

وتنطبق هذه النتيجة على أي موصل مشحون بانتظام مهما اختلف شكله. ومن ضمنها الصفحة المسطحة: وسيكون المجال الكهربائي ثابتًا ومساويًا لـ σ/ϵ_0.



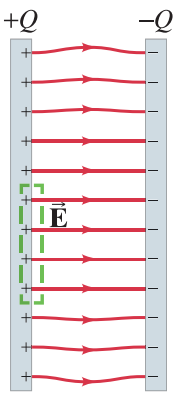
الشكل 16 - 41 المجال الكهربائي بجوار سطح موصل. ويظهر الشكل صندوقين أسطوانيين صغيرين متقطعين. (مثال 16 - 12).

ويعطي هذا المثال الأخير المجال بين لوحين متوازيين نوقشا من قبل في (الشكل 16 – 31 د). وإذا كان اللوحان كبيرين مقارنة بالمسافة الفاصلة بينهما، فإن خطوط المجال ستكون عمودية على اللوحين ومتوازية مع بعضها بعضًا، ما عدا القريبة من الحواف. وعليه، فإن المجال الكهربائي (انظر شكل 16 – 42 الذي يُظهر السطح الغاوسي نفسه كما في شكل 16 – 41) هو أيضًا:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q/A}{\epsilon_0} \qquad \text{(10 – 16)}$$

[بين لوحين من مواسع/مكثف متوازي اللوحين المشحونين بشحنتين مختلفتين]

حيث $Q = \sigma A$ وهي الشحنة على أحد اللوحين.



المجال الكهربائي عند سطح موصل مشحون

لوحان متوازيان مشحونان بشحنتين مختلفتين.

الشكل 16 - 42 المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين منتظم ويساوي $E = \sigma/\epsilon_0$

11-16 القوى الكهربائية في العلوم الحياتية الجزيئية تركيب DNA وتناسخه *

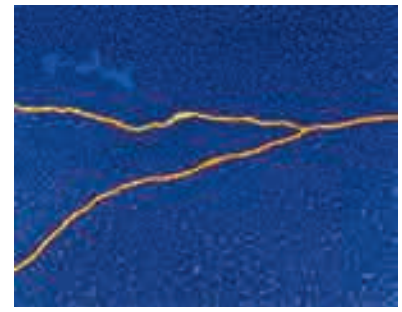
تُعرف دراسة تركيب الخلايا الحيّة على المستوى الجزيئي ووظائفها بالعلوم الحياتية الجزيئية. وهو موضوع مهم للتطبيقات الفيزيائية. وبما أنّ معظم الخلية من الداخل ماء، فيمكن لنا أن نتخيلها كبحر هائل من الخلايا دائمة الحركة (كما في النظرية الحركية، الفصل 13) يصدم بعضها بعضا بطاقات حركية ذات مقادير مختلفة. وتتفاعل هذه الجزيئات مع بعضها بطرق مختلفة – تفاعلات كيميائية (بناء وهدم الروابط بين الذرات) وتفاعلات سريعة، أو اصطدامات ناجمة عن تجاذب كهربائي ساكن بين الجزيئات. إنّ العمليات الكثيرة في الوقت الحالي والتي تحدث داخل الخلية ناتجة من الحركة الجزيئية العشوائية "الحرارية" إضافة إلى أثر ترتيب القوة الكهربائية الساكنة. وتُستخدم هذه الأفكار حاليًّا لتحليل بعض العمليات الخلوية الأساسية المتضمنة جزيئات الجاهرية (جزيئات كبيرة). إن الصورة التي نعرضها هنا غير مرئية في الواقع. ومع هذا، فهي نموذج لما يحدث بناءً على النظريات المقبولة فيزيائيًا في الوقت الحالي أو النتائج العملية.

إن المعلومات الجينية التي تنتقل من جيل إلى آخر محتواة في الكروموسومات التي تتكوّن من جينات. ويحتوي كل جين على المعلومات اللازمة لانتاج نوع معين من جزيء بروتيني. وتُبنى المعلومات الجينية المحتواة في الجين داخل الجزيء الرئيس للكروموسوم DNA (الحمض النووي deoxyribonucleic) من جزيئات صغيرة تُعرف بقواعد نيوكليوتايد. وهي تنقسم إلى أربعة أنواع هي: أدانين (A)، وسايتوسين (C)، وجوانين (G)، وثايمين (T).

ويتكون DNA الكروموسوم بشكل عام من جديلتي DNA (حبلين) طويلتين تلتفان حول بعضهما على شكل "لولب ثنائي". كما أن المعلومات الجينية محتواة في الترتيب المحدد للقواعد الأربع (A، و C، و G، و T) وعلى امتداد كل حبل. وكما هو مبين في (الشكل 16 – 44)، فإنّ كلًّا من الحبلين يجذب الآخر إليه بقوى كهربائية ساكنة؛ أي بواسطة جذب الشحنات الموجبة للشحنات المخالفة لها بالإشارة (الشحنات السالبة). ونرى في (الشكل 16 – 44 أ) أنّ A (أدانين) على أحد الحبلين يكون مواجهًا لـ T على الحبل الآخر دائمًا.

تطبيق الفيزياء

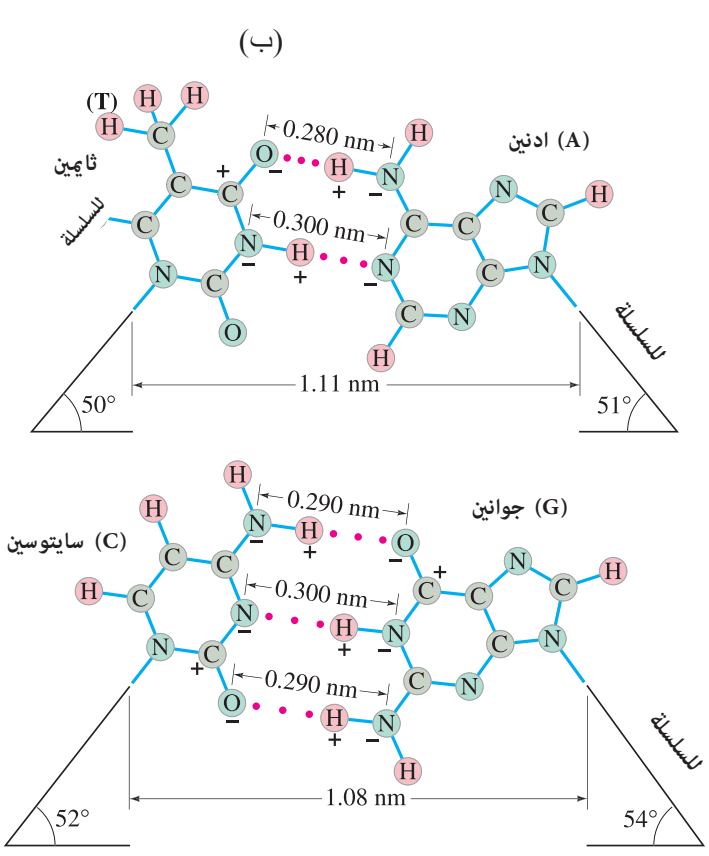
داخل الخلية:
النظرية الحركية بالإضافة إلى القوة الكهروسكونية.



الشكل 16 - 43 انقسام DNA في خلية HeLa البشرية السرطانية .وهذه صورة ذات ألوان زائفة أخذت بواسطة مجهر إلكتروني نفاذي (TEM تم مناقشته في الفصل 27).

تطبيق الفيزياء

بنيان DNA.



الشكل 16 - 44

(أ) مقطع من DNA الثنائي اللولبي. (ب) ("صورة مقربة" للولب تظهر كيفية جذب كل من A وT لبعضهما، وكيفية جذب كل من G و C لبعضهما بواسطة القوى الكهربائية الساكنة. وتمثل الإشارتان + و – الظاهرتان على بعض الذرات شحنات صافية، وعادة جزء من *e*، نتيجة الحصص غير المتساوية للإلكترونات. وتعني النقاط الحمراء تجاذباً كهربائياً ساكناً (عادة ما يدعى "رابطة ضعيفة" أو "رابطة هيدروجينية"). ولاحظ أن هناك رابطتين ضعيفتين بين A و T، وثلاث روابط بين C و G.

ملحوظة: *microscopic* تعني مجهري في علوم الأحياء. أما في الفيزياء فمن الأفضل استعمال مصطلح "دون المجهري" لأن الفيزياء تتعامل مع عينات أصغر بكثير من العينات البيولوجية

وبالمثل، فإنّ G تقع دائمًا مقابل C. ويحدث هذا التأثير المرتب بسبب أشكال A و T و C و G حيث لا يمكن لـ T إلّا أنّ تكون قريبة من A فقط وكذلك G بالنسبة إلى C. وهذه هي الحالة الوحيدة الممكنة كنتيجة لهذا التقارب بين الأجزاء المشحونة، حيث يمكن للقوّة الكهربائية الساكنة أن تعدَّ كبيرة كفاية لإمساكهم معًا ولفترة زمنية قصيرة (شكل 16 – 44 ب) مشكلة ما يعرف بـ "الروابط الضعيفة". وتوجد القوة الكهربائية الساكنة بين A وT، وكذلك بين C و G بسبب وجود أجزاء مشحونة لهذه الجزيئات. وهذه الشحنات ناتجة من قضاء بعض الإلكترونات في كل من هذه الجزيئات لفترة زمنية أطول، وهي تدور حول ذرة ما مقارنة بالفترة الزمنية التي تقضيها وهي تدور حول الذرة الأخرى. وعلى سبيل المثال، فإن الإلكترون الذي يرتبط عادةً بذرة الهيدروجين في أدانين (A) (الجزء العلوي للشكل 16 – 44 ب) يقضي بعضًا من وقته يدور حول ذرة N المجاورة (انظر الفصل التاسع والعشرين لمعرفة المزيد). وعليه، فإنّ N سيصبح لها شحنة سالبة صافية و لـ H شحنة موجبة صافية. لتنجذب ذرة H^+ من أدانين* إلى ذرة O^- من ثيامين. وقيمة هاتين الشحنتين الصافيتين + و – عادة هي جزء من e (الشحنة على الإلكترون) مثل $0.2e$ أو $0.4e$.

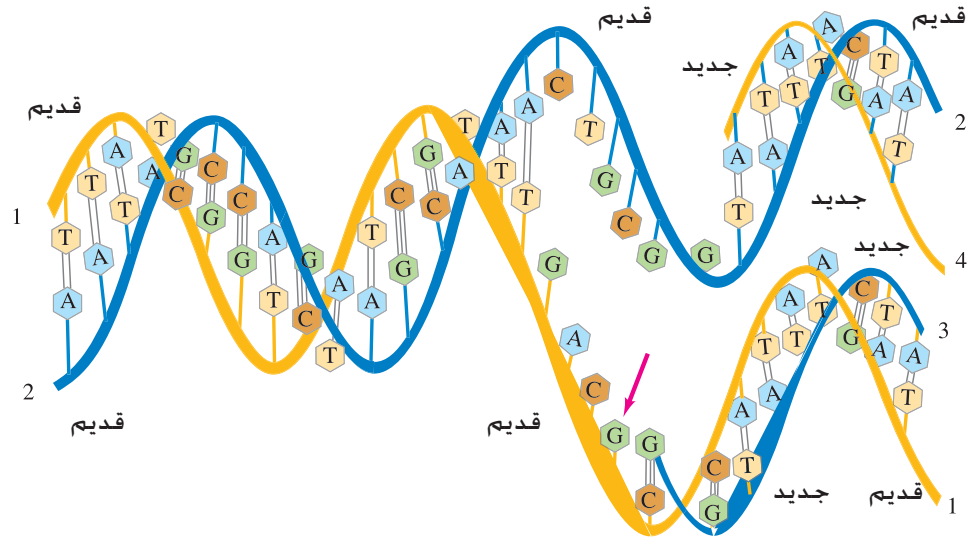
كيف حصل هذا الترتيب المبين في (الشكل 16 – 44)؟ حصل هذا الترتيب عندما نسخ الـ DNA (ضاعف) نفسه مباشرة قبل انقسام الخلية. في الواقع، إنّ ترتيبَ A مقابل T وترتيب G مقابل C أمرٌ حاسمٌ لضمان انتقال المعلومات الجينية بدقة إلى الجيل التالي. عملية النسخ مبينة بصورة مبسطة في (الشكل 16 – 45). ينفصل حبلان من DNA (بمساعدة الإنزيمات التي تعمل أيضًا خلال القوة الكهربائية الساكنة) تاركة الأجزاء المشحونة للقواعد مكشوفة. وما أن يبدأ النسخ، نستطيع عندئذ متابعة كيفية الترتيب الصحيح للقواعد عن طريق تركيز نظرنا على جزيء G المشار إليه بالسهم على الحبل السفلي في (الشكل 16– 45). وهناك قواعد من النيوكليوتايد كثيرة تتحرك جيئةً وذهابًا في السائل الخلوي وغير مربوطة مع الأنواع الأربعة. وأما القاعدة الوحيدة من القواعد الأربعة التي ستشعر بالانجذاب إلى G إذا ارتدت بالقرب منها فهي C. ولا تترتب الشحنات على القواعد الثلاث الأخرى بحيث إنها تستطيع الاقتراب من G. ومع هذا، فلن يكون هناك أي قوة تجاذب ملموسة تؤثر فيها. وتذكر أن القوة تتناقص بسرعة مع المسافة $(\propto 1/r^2)$. ولأن G لا تجذب A أو T أو G كفايةً، فإن A و T و G ستطرد بعيدًا بالتصادمات مع الجزيئات الأخرى قبل أن تستطيع الأنزيمات من إلصاقها بالسلسلة المتنامية (رقم 3). ومع هذا، فإن القوة الكهربائية الساكنة غالبًا ما تمسك C في مواجهة G لفترة طويلة كافية، فيستطيع الأنزيم إلصاق C بنهاية السلسلة الجديدة المتنامية.

واستنادًا إلى هذا، نرى أنّ القوى الكهربائية الساكنة هي المسؤولة عن اختيار القواعد في الترتيب المناسب خلال النسخ بحيث تمرر المعلومات الجينية بدقة إلى الجيل التالي. لاحظ في (شكل 16 – 45) أن الحبل الجديد 4 له ترتيب القواعد نفسه كالحبل القديم 1 ، والحبل الجديد 3 كالحبل القديم 2. وعليه فإنّ اللولبين الجديدين الثنائيين 1 – 3 و 2 – 4 يتشابهان مع اللولب الأصلي 1 – 2.

* وعندما تكون H^+ مشاركة، فإنّ الرابطة الضعيفة التي تصنعها مع شحنة سالبة مجاورة مثل O^- هي نسبيًّا قوية بين الروابط الضعيفة (جزئياً بسبب أن H^+ صغيرة جدا) ويشار إليها بالرابطة الهيدروجينية (البند 3 – 29).

تطبيق الفيزياء

نسخ DNA



الشكل 16 - 45 نسخ DNA.

وتُقدم عملية نسخ DNA هذه كما لو أنّها حدثت بطريقة دقيقة، وكأنّ كلَّ جُزيءٍ يعرف دوره فيذهب إلى مكانه المحدّد كالنحل في خليته. ولكن ليس هذا ما يحدث فعلا. فقوى التجاذب بين الشحنات الكهربائية للجزيئات هي نوعاً ما ضعيفة، وتصبح ذات قيمة فقط عندما تقترب من بعضها لتتكون عدة "روابط ضعيفة". وبالفعل، إذا لم تكن الأشكال كما يجب، فلن يكون هناك أي جذب كهربائي ساكن. وهذا هو سبب وجود بعض الأخطاء. وعليه، فإنّ القوّة الكهربائيّة الساكنة تعمل على جلب الترتيب من الفوضى من الحركة العشوائية للجزيئات.

وهنالك نتيجة أخرى لسرعات الجزيئات العشوائية (الحرارية) في الخلية (النظرية الحركية) تنجم عن الاستنساخ (*cloning*). وحتى على مستوى بكتيريا إي كولي، فعندما تنقسم الخلية، فإن DNA لخليتي البكتيريا الجديدتين يكون متماثلًا تقريبًا. وحتى لو كان DNA متماثلًا تمامًا، فإنّ خليتي البكتيريا لن تتصرفا بالطريقة نفسها. ولا تكون الخلايا متماثلة؛ لأنّ جزيئات البروتين الطويلة (بناءً على النظرية الحركية)، وDNA، وRNA تصطدم بأشكال مختلفة ليكون تعبير الجينات عندها مختلفًا. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للأجزاء ضعيفة الارتباط بالجزيئات الكبيرة مثل مجموعة الميثيل (CH_3) أن تُطرد بواسطة تصادم معين قوي مع جزيء آخر من المائع الخلوي . لذا، فإنّ الكائنات الحية المنسوخة غير متشابهة حتى وإن كانت حموضها النووية (DNA) متماثلة. وبالفعل، لا يمكن فصل واختيار صفات جينية بحد ذاتها.

12-16 * آلات نسخ ضوئي وطابعات حاسوبية تستخدم الكهرباء الساكنة

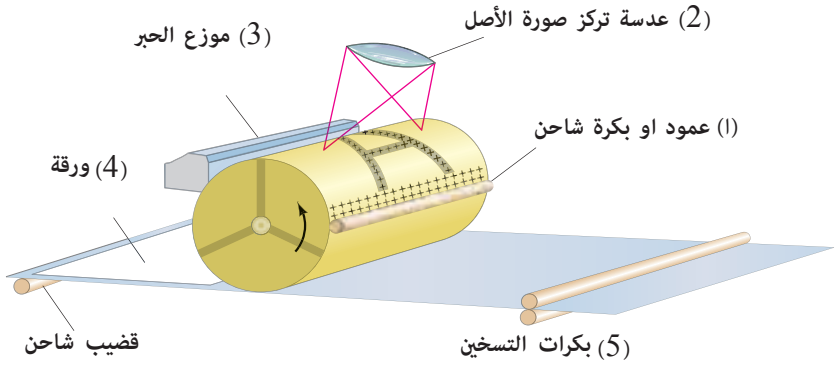
تطبيق الفيزياء
آلات النسخ الضوئي

تستخدم آلة النسخ الضوئي وطابعات الليزر التجاذبَ الكهربائي الساكن لطباعة صورة عن الأصل. وتستخدم كلّ منهما طريقة مختلفة لإسقاط الصورة على أسطوانة خاصّة. ففي الناسخة الضوئية، تركز العدسات والمرايا صورة الورقة الأصلية على الأسطوانة تمامًا، كما تركز عدسة الكاميرا* الصّورة على الغشاء. وعادة ما تصنع الأسطوانة من موصل جيد كالألمنيوم المطلي سطحه بطبقة رقيقة من السيلينيوم الذي يظهر صفة مثيرة (تدعى "الموصلية الضوئية") وهي عدم القدرة على التوصيل الكهربائي في الظلام لتصبح موصلاً فقط عند تعرضها للضوء.

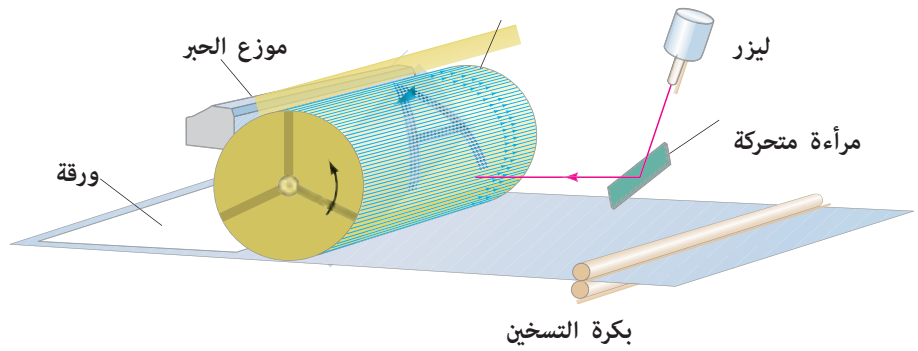
الخطوة الأولى في النسخ الضوئي هي وضع شحنة موجبة منتظمة على طبقة السيلينيوم على الأسطوانة بواسطة دوّار أو عمود مشحون. ويتم عمل هذا في الظلام. وفي الخطوة الثانية، تسقط الصورة المراد نسخها أو طباعتها على الأسطوانة. ولتبسيط الأمور؛ دعنا نفترض أنّ الصورة هي الحرف الداكن A على خلفية بيضاء (كصفحة كتاب) كما هو مبين في (الشكل 16 – 46) ليكون الحرف A على الأسطوانة داكنًا وماحوله فاتح كله. وعند هذه المناطق المضيئة جميعها تصبح طبقة السيلينيوم موصلة لتنساب إليها الإلكترونات من الألمنيوم أسفلها لتعادل كهربائياً هذه المناطق الموجبة.

وأمّا في الخطوة الثالثة فيُعطي مسحوق داكن ناعم يسمى حبرًا شحنة سالبة، ويمسح على الأسطوانة خلال دورانها. وتُجذب جسيمات الحبر سالبة الشحنة إلى المناطق الموجبة للأسطوانة (وهي A في هذه الحالة) لتلتصق هناك فقط. وفي الخطوة الرابعة عندما تستمر الأسطوانة بالدوران، فإنها تضغط وهي تدور على قصاصة ورقية مشحونة بشحنة موجبة أقوى من الشحنات على السيلينيوم، لتنتقل جزيئات الحبر إلى الورقة وتتشكل الصورة النهائية. وفي الخطوة الخامسة الأخيرة، تسخن الورقة لتمكن جزئيات الحبر من الالتصاق الوثيق بالورقة. وتعاد هذه العملية في الناسخات الملونة (أو الطابعات) لكل لون: الأسود، والأزرق المخضر (أزرق) والأحمر الأرجواني (أحمر) والأصفر، ودمج هذه الألوان الأربعة بنسب متفاوتة يولد الألوان الأخرى المرغوب بها جميعها.

* تمّ مناقشة آلات التصوير (الكاميرات) في (البند 25 – 1). أمّا الصّور الناجمة من العدسات والمرايا فستناقش في (الفصل 23).



الشكل 16 - 46 داخل آلة النسخ الضوئي: (1) أُعطيت أسطوانة السيلينيوم شحنة +. (2) تركز العدسة الصورة على الأسطوانة؛ لتبقى فوق النقاط الداكنة مشحونة. (3) تنجذب جسيمات الحبر (المشحونة سالباً) إلى المناطق الموجبة على الأسطوانة. (4) تنقل الصورة إلى الورقة. (5) تربط الحرارة الصورة بالصفحة.



الشكل 16 - 47 داخل طابعة ليزر: تمسحُ مرآةٌ متحركةٌ شعاعَ ليزرٍ في خطوطٍ أفقيةٍ على امتداد الأسطوانة.

تطبيق الفيزياء

طابعة ليزرية

وفي المقابل، فإنّ طابعة الليزر لا تستخدم "نسخة" ورقيّة كأصل. وبدلًا من ذلك تقبل بمخرجات الحاسوب التي تعمل على التحكم بشدة شعاع الليزر. وهذه العملية مماثلة لما يحدث في الناسخة الضوئية المحتوية على مسحوق حبر وأسطوانة مطلية بمادة السيلينيوم، مع الاختلاف في طريقة تشكّل الصورة على الأسطوانة. يُركّز الشعاع الضوئي الرفيع الناتج من الليزر بواسطة العدسات في نقطة دقيقة. وبمساعدة مرآة متحركة، يمسح الليزر الأسطوانة من إحدى الجهتين إلى الجهة المقابلة في سلسلة خطوط أفقية متتابعة. وخلال مسح الشعاع على امتداد الأسطوانة تتغير شدة الشعاع (بواسطة مخرجات الحاسوب) لتكون شديدة للنقاط البيضاء أو الفاتحة، وضعيفة أو منعدمة للنقاط المراد لها أن تظهر بلون داكن. وبعد المسح لمرة واحدة، فإنّ الأسطوانة تدور بمقدار ضئيل جداً لتبدأ عملية مسح أفقي جديدة أخرى وهكذا (شكل 16 – 47).

وعند دوران الأسطوانة، تتشكّل صورة كاملة عليها. وتصبح الأجزاء المضيئة من السيلينيوم موصلة، وتفقد شحناتها الكهربائية ويلتصق الحبر بالمساحات الداكنة المشحونة كهربائيًا فقط. ومن ثمّ تنقل الأسطوانة الصورة إلى الورقة كما في الناسخة الضوئية.

تطبيق الفيزياء

طابعة حبر نافثة.

أما طابعة نفاث الحبر فلا تستخدم أسطوانة. وبدلًا من ذلك تنفث فوهاتٌ قطراتٍ صغيرة من الحبر مباشرةً على الورقة. وتمسح الفوهات على امتداد الورقة، ويكون كلّ مسح فوق سابقهِ مباشرة كنتيجة لتحرك الورقة إلى الأسفل. وتتكون النقاط على الورقة في كل مسح ما عدا المناطق التي لا يرغب بوجود حبر فوقها مثلما يملي الحاسوب. وتتكون الصورة من عددٍ هائلٍ من النقاط الصغيرة جدًّا .

وتُحَدّدُ نوعية الطابعة أو درجة وضوحها غالباً بدلالة النقاط لكل بوصة (dpi) في كل اتجاه (خطي).

ملخص

هناك نوعان من **الشحنات الكهربائية**: موجبة وسالبة. ويجب أن تُؤخذ هذه التسميات جبريًا فأي شحنة هي زائد أو ناقص مقدار ما من الكولوم (C) بالوحدات الدولية (SI).

الشحنة الكهربائية **محفوظة**: فإذا تولدت كمية ما من الشحنة خلال عملية ما، فإن مقداراً مساوياً من الشحنة المخالفة سيتولد. وتكون الشحنة الصافية المتولدة مساوية للصفر.

واستنادا إلى النظرية الذرية، فإن الكهرباء تنشأ في الذرة التي تتكون من نواة مشحونة بشحنة موجبة محاطة بإلكترونات مشحونة بشحنات سالبة. ويمتلك كل إلكترون شحنة:

$$-e = -1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$$

الموصلات الكهربائية مواد تحتوي على إلكترونات حرّةٍ الحركة نسبيًّا، أما **العوازل** الكهربائية فهي مواد تحتوي على عدد قليل من الإلكترونات الحرة.

ويعدّ الجسم مشحونًا بشحنة سالبة عندما يمتلك عددًا زائدًا من الإلكترونات. ومشحونًا بشحنة موجبة عندما يكون عدد إلكتروناته أقل من العدد اللازم لاتزانه كهربائيًّا. وتُساوي الشحنة الصافية على أي جسم صفرًا أو عددًا صحيحًا مضروبًا في $+e$ أو $-e$؛ أي أن الشحنة **مكميّة** أو **مكماة**.

ويمكن لجسم ما أن يُشحن بالدلك (لتنتقل الإلكترونات خلال هذه العملية من مادة إلى أخرى) أو بواسطة التوصيل (انتقال الشحنات من جسم مشحون إلى آخر باللمس)، أو الحثّ (فصل الشحنات داخل الجسم بسبب اقتراب جسم مشحون آخر مع عدم حدوث أيّ تلامس).

تؤثر الشحنات بقوة في بعضها بعضًا. وإذا كانت الشحنتان مختلفتين: إحداهما موجبة والأخرى سالبة، فإنهما ستؤثران في بعضهما بقوة تجاذب. أمّا إذا كانت الشحنتان متشابهتين فستتنافران مع بعضهما. وتتناسب قيمة القوة التي تؤثر بها شحنة نقطية في أخرى طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad \textbf{(1 – 16)}$$

وهذا هو **قانون كولوم**. وتُكتبُ k عادة بدلالة الوحدات الدولية (SI) كالتالي: $1/4\pi\varepsilon_0$

ونعتقد بوجود **مجال كهربائي** في الفضاء حول أي شحنة أو مجموعة من الشحنات. ويُقال عندها بأنّ القوة المؤثرة في جسمٍ آخر مشحون هي نتيجة لوجود مجال كهربائي في موضع الجسم المشحون.

ويُعرف **المجال الكهربائي** $\vec{\mathbf{E}}$ عند أي نقطة في الفضاء الناتج عن شحنة أو عن عدّة شحناتٍ بالقوّة لكلِّ وحدة شحنات، والتي قد تؤثر في شحنة اختبار موجبة q وضعت عند تلك النقطة :

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{q} \qquad \textbf{(3 – 16)}$$

تُعطى قيمة المجال الكهربائي على بعد r من شحنة نقطية Q كالتالي:

$$E = k\frac{Q}{r^2} \qquad \textbf{(4 – 16)}$$

ويساوي المجال الكهربائي الكلّي عند نقطة ما في الفضاء الجمع الاتجاهي للمجالات المنفردة الناتجة من كل شحنة مساهمة **(مبدأ التراكب)**.

وتمثّل المجالات الكهربائية بواسطة **خطوط المجال الكهربائي** التي تبدأ عند الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة. ويُشير اتجاهها إلى اتجاه القوة التي كانت ستؤثر في شحنة اختبار موجبة لو وضعت عند نقطة ما. ويمكن رسم خطوط المجال بحيث يكون عددها لكل وحدة مساحة متناسبًا مع قيمة E.

ينعدم المجال الكهربائي الساكن داخل موصل جيد وتكون خطوط المجال الكهربائي خارج موصل مشحون بالقرب منه مباشرةً عموديةً على سطحه.

[* ويعطى **التدفق الكهربائي** خلال مساحة صغيرة A لمجال كهربائي منتظم $\vec{\mathbf{E}}$ كالتالي:

$$\Phi_E = E_\perp A \qquad \textbf{(7 – 16)}$$

حيث تمثل $E_\perp$ مركبة $\vec{\mathbf{E}}$ العمودية على السطح. ويتناسب التدفق خلال سطح ما طرديًّا مع عدد خطوط المجال المارة خلاله].

[* يخبرنا **قانون غاوس** بأن التدفق الكلي المجمع فوق أي سطح مغلق (لأنه مكون من عدد كبير من المساحات الصغيرة ΔA) يساوي الشحنة الصافية Q_{encl} المحصورة بهذا السطح مقسومةً على ϵ_0:

$$\sum_{\text{سطح مغلق}} E_\perp \, \Delta A = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \qquad \textbf{(9 – 16)}$$

يمكن استخدام قانون غاوس لتحديد المجال الكهربائي الناتج من توزيع شحني ما ومع هذا، ففائدته محدودة وتنحصر بالحالات التي تظهر توزيع شحنات عالي التماثل. وتكمن الأهمية الحقيقية لقانون غاوس في كونه صيغة عامة وأنيقة عن علاقة الشحنة الكهربائية بالمجال الكهربائي].

[* تؤدي القوة الكهربائية الساكنة خلال تناسخ DNA دورًا أساسيًّا حاسمًا في عملية اختيار الجزيئات المناسبة لانتقال المعلومات الجينية بدقة من جيل إلى آخر].

أسئلة

1. إذا شحنت مشطًا بدلكه بشالٍ حريري، فكيف يمكنك تحديد ما إذا كان المشط قد شحن بشحنة سالبة أم موجبة؟

2. لماذا تلتصق الملابس بأجسامنا في بعض الأوقات بعد إخراجها مباشرةً من آلات تجفيف الملابس؟

3. فسّر لماذا تميل قطرات المطر أو الضباب للتشكل حول الأيونات أو الإلكترونات في الهواء.

4. قُرّبَ عمودٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ من قصاصاتٍ ورقيةٍ متعادلةٍ فجذبها إليه. ارسم مخططًا، مظهرًا انفصال الشحنات. وفسّر سبب حدوث التجاذب.

5. فسّر لماذا تستطيع مسطرة بلاستيكية دُلكت بقطعة قماشٍ التقاط قصاصات ورق صغيرة؟ ولماذا يصعب حدوث هذا في الأيام عالية الرطوبة؟

6. قارن بين الشحنة الصافية على موصل مع "الشحنات الحرة" داخله؟

7. يبين (الشكلان 16 – 7 و 16 – 8) كيف يمكن لعمود مشحون موضوع بالقرب من جسم فلزي غير مشحون جذب الإلكترونات أو طردها. وبالرغم من وجود عدد كبير من الإلكترونات في الفلز، إلا أن عدداً قليلاً منها يتحرك كما هو مبين. لماذا لا تتحرك جميعها؟

8. عندما يشحن المكشاف الكهربائي تتنافر ورقتاه عن بعضهما وتصنعان زاوية بينهما. ماالذي يوازن قوة التنافر الكهربائية بحيث لا تبتعد الورقتان عن بعضهما أكثر من ذلك؟

9. يشبه شكل قانون كولوم إلى حد كبير قانون نيوتن للجذب الكوني. ما الفروقات بين هاتين القوتين؟ ثم قارن بين كتلة الجاذبية والشحنة الكهربائية.

10. لا نشعر عادةً بقوة الجاذبية أو القوة الكهربائية المتبادلة بين جسمين عاديين. ما السبب في كل حالة؟ أعط مثالين نستطيع التمييز عندهما، وفسّر سبب قدرتنا على ذلك.

11. هل القوة الكهربائية محافظة؟ علل في حالتي الإيجاب أو النفي. (انظر الفصل السادس).

12. عندما تجذب مسطرة مشحونة قصاصات ورق صغيرة بسرعة فقد تقفز قصاصة منها مبتعدة أحياناً بعد ملامستها للمسطرة . فسّر ذلك.

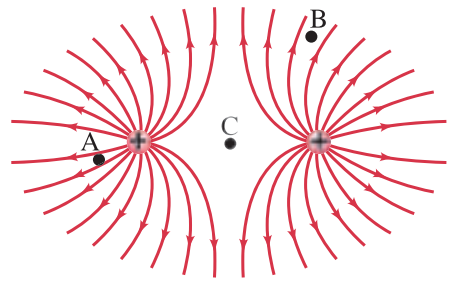
13. فسّر لماذا يجب أن تكون شحنات الاختبار صغيرة عند قياس المجالات الكهربائية.

14. عندما نقيس المجال الكهربائي، هل من الضرورة استخدام شحنة اختبار موجبة، أم من الممكن استخدام شحنة اختبار سالبة؟ فسّر.

15. ارسم خطوط المجال الكهربائي المحيطة بشحنتين كهربائيتين سالبتين تبتعدان مسافة l عن بعضهما.

16. افترض أنّ الشحنتين مختلفتي الإشارة في (الشكل 16 – 31أ) تفصلهما مسافة 12.0 cm. افترض قيمة المجال الكهربائي على بعد 2.5 cmمن الشحنة الموجبة . على أي جانب من هذه الشحنة (أعلاها، أم أسفلها، أم على يسارها، أم على يمينها) يُوجد أشدُّ مجال كهربائي وأضعف مجال كهربائي ؟ فسّر.

17. افترض المجال الكهربائي عند النقاط A و B و C في (الشكل 16 – 48). أولًا، ارسم سهمًا عند كلّ نقطة يشير إلى اتجاه محصلة القوى التي ستشعر بها شحنة اختبار موجبة إذا وضعت عند تلك النقطة ثمّ رتب النقاط بدلالة تناقص شدة المجال (الأقوى أولا).



الشكل 16 - 48
(السؤال 17).

18. لماذا لا تتقاطع خطوط المجال الكهربائي نهائيًّا؟

19. بين باستخدام النظم الثلاثة لخطوط المجال المعطاة في (البند 16 – 8) أنّ خطوط المجال الكهربائي المبتدئة أو المنتهية عند شحنة نقطية وحيدة يجب أن تتوزع بتماثل حول الشحنة.

20. هل هناك نقطة ما بين الشحنتين Q و$2Q$ (تفصلهما مسافة l) على امتداد الخط الفاصل بينهما حيث $E = 0$ عندما تكون إشارتاهما: (أ) مختلفة. (ب) متشابهة؟ إذا كانت الحل نعم، فأين تقع هذه النقطة بالتقريب؟

21. افترض أنّ شحنة اختبار موجبة صغيرة وُضعت على خط مجال كهربائي عند نقطة ما مثل النقطة P في (الشكل 16 – 13 أ). هل سيكون اتجاه سرعة الشحنة وتسارعها على امتداد هذا الخط؟ فسّر.

22. ارسم خطوط المجال الكهربائي لخط منتظم من الشحنات لانهائي الطول. [تلميح: استخدم التماثل]. هل المجال منتظم في الشدة؟

***23.** إذا كان التدفق الكهربائي خلال سطح مغلق صفرًا، فهل من الضروري أن يكون المجال الكهربائي صفرًا عند النقاط جميعها على السطح؟ فسّر. ماذا لو انعكس الأمر : لو أن $\vec{\mathbf{E}} = 0$ عند النقاط جميعها على السطح، فهل سيكون التدفق خلال السطح صفراً؟

***24.** يحيط سطح غاوس كروي نصف قطره r بشحنة نقطية. فهل Φ_E ستصبح أكبر أم أصغر، أم ستبقى كما هي لو استعملنا مكعبًا طول ضلعه r بدلاً من الكرة؟ فسّر.

مسائل

16 – 5 و 16 – 6 قانون كولوم

$[1\ \text{mC} = 10^{-3}\ \text{C},\ 1\ \mu\text{C} = 10^{-6}\ \text{C},\ 1\ \text{nC} = 10^{-9}\ \text{C}.]$

1. (I) احسب قيمة القوة بين شحنتين نقطيتين $3.60\ \mu\text{C}$ يفصل بينهما 9.3 cm؟

2. (I) كم إلكترونًا مسؤولًا عن الشحنة $-30.0\ \mu\text{C}$؟

3. (I) كم قيمة قوة التجاذب الكهربائية بين نواة الحديد $(q = +26e)$ وإلكترونها الداخلي إذا كانت المسافة الفاصلة بينهما $1.5 \times 10^{-12}\ \text{m}$ ؟

4. (I) كم قوّة التنافر الكهربائية بين بروتونين تفصلهما مسافة $5.0 \times 10^{-15}\ \text{m}$ داخل نواة ذرية؟

5. (I) كم القيمة التي تُؤثر بها شحنة $+25\ \mu\text{C}$ في شحنة أخرى $+3.0\ \text{mC}$ على بعد 35 cm منها؟

6. (II) يؤثّر جسيمًا غبار بقوة $3.2 \times 10^{-2}\ \text{N}$ في بعضهما بعضًا. كم ستصبح القوة بينهما عندما يقتربان من بعضهما إلى ثُمُنِ المسافة الأصلية الفاصل بينهما؟

7. (II) تبتعد كرتان مشحونتان مسافة 8.45 cm عن بعضهما. فإذا أصبحت القوة المتبادلة بينهما ثلاثة أضعاف ما كانت عليه، فكم المسافة الجديدة الفاصلة بينهما الآن؟

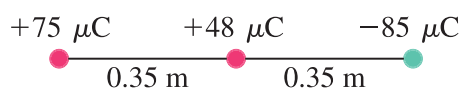
8. (II) يجُرُّ شخصٌ قدميه على سجادة صوفية في يوم جاف، فتتجمع شحنة صافية عليه مقدارها $-42\ \mu\text{C}$. فكم عدد الإلكترونات المسؤولة عن هذه الشحنة؟ وكم مقدار الزيادة في وزنه؟

9. (II) ما الشحنة الكلية للإلكترونات جميعها الموجودة في 1.0 kg من الماء (H_2O)؟

10. (II) قارن بين القوة الكهربائية التي تربط الإلكترون في فلكه $(r = 0.53 \times 10^{-10}\ \text{m})$ حول نواة ذرة الهيدروجين المكونة من بروتون واحد مع قوة التجاذب بين الإلكترون والبروتون نفسيهما . وما النسبة بين هاتين القوتين؟

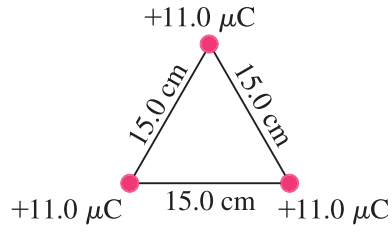
11. (II) ثُبِّتت شحنتان نقطيتان موجبتان على بعد ما من بعضهما. ومجموع شحنتيهما Q_T. ما شحنة كل منهما لجعل القوة الكهربائية بينهما: (أ) أكبر ما يمكن. (ب) أصغر ما يمكن؟

12. وضعت الشحنات $+75$، و $+48$، و $-85\ \mu\text{C}$ على خط واحد (شكل 16 – 49). وتبتعد الوسطى مسافة 0.35 m عن كل منهما. احسب محصلة القوى الناجّة على كل شحنة من الشحنتين الأخريين.



الشكل 16 - 49
(مسألة 12).

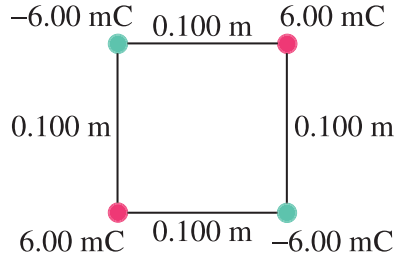
13. (II) وُضع ثلاثة أجسام متساوية الشحنات الموجبة $+11.0\ \mu\text{C}$ عند رؤوس زاويا مثلث متساوي الأضلاع (طول ضلعه 15.0 cm) (شكل 16 – 50). احسب قيمة محصلة القوى على كل جسم واتجاهها.



الشكل 16 - 50
(مسألة 13).

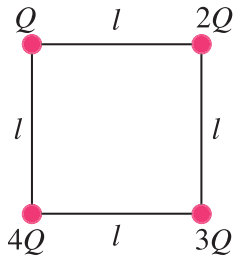
14. (II) وُضِعت شحنة 6.00 mC على الأركان الأربعة جميعها لمربع طول ضلعه 0.100 m. حدّد قيمة القوة على كل شحنة واتجاهها.

15. (II) أعد حل (مسألة 14) بعد وضع شحنتين سالبتين لهما القيمة السابقة نفسها مكان شحنتين موجبتين على ركنين متقابلين (شكل 16 – 51).



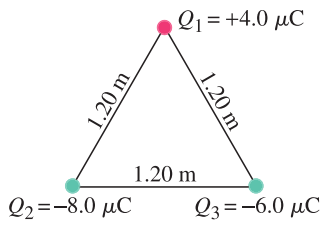
الشكل 16 - 51
(مسألة 15).

16. (II) وُضِعت الشحنات: Q، و$2Q$، و $3Q$، و $4Q$ على الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه l. (شكل 16 – 52). حدد القوة الناتجة من الشحنات الثلاث الباقية على : (أ) الشحنة $2Q$. (ب) الشحنة $3Q$.



الشكل **16 - 52**
(مسألة 16)

17. (II) وُضِعت ثلاثةُ أجسامٍ مشحونةٍ عند رؤوس زاويا مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه 1.20 m (شكل 16 – 35). الشحنات هي: $+4.0\,\mu C$ و $-8.0\,\mu C$ و$-6.0\,\mu C$. احسب قيمة محصلة القوى الناتجة من الشحنتين الأخريين على كل شحنة واتجاهها.



الشكل **16 - 53**
(مسألة 17)

18. (III) تملك شحنتان نقطيتان شحنة كلية مقدارها $560\,\mu C$. إذا كانت القوة التي تؤثر بها كل منهما في الأخرى هي 22.8 N عندما تبتعدان عن بعضهما مسافة 1.10 m . فما شحنة كل منهما؟.

19. (III) شحنتان $-3Q_0$ و $-Q_0$ تفصلهما مسافة l. ويمكن لهاتين الشحنتين التحرك من موضعيهما. ومع هذا فهما لا تتحركان لوجود شحنة ثالثة في الجوار. فما قيمة الشحنة الثالثة؟ وما هو موضعها لتصبح الشحنتان السابقتان في وضع متزن؟

20. (III) وُضعت الشحنتان $+4.75\,\mu C$ و $-3.55\,\mu C$ على بعد 18.5 cm من بعضهما بعضا. أين يمكن وضع شحنة ثالثة بحيث لا تشعر بمحصلة القوى؟

21. (III) تمتلك كرتان صغيرتان غير موصلتين شحنة كلية مقدارها $90.0\,\mu C$. (أ) عندما تبتعدان مسافة 1.06 m عن بعضهما بعضا تصبح قوة التنافر التي تؤثر بها كل منهما في الأخرى 12.0 N . فما شحنة كل منهما؟ (ب) ماذا يتغير لو أن القوة هي قوة تجاذب؟

22. (III) انتقلت شحنة Q من كرة بلاستيكية غير مشحونة أصلاً إلى كرة أخرى مشابهة تبعد عنها مسافة 12 cm. فأصبحت قوة التجاذب بينهما 17 mN. كم عدد الإلكترونات التي انتقلت من الكرة الأولى إلى الأخرى؟

16 – 7 و 16 – 8 المجال الكهربائي وخطوط المجال

23. (I) ما قيمة القوة الكهربائية واتجاهها على إلكترون في مجال منتظم شدته 2360 N/C يُشير باتجاه الشرق؟

24. (I) تُرِك بروتونٌ في مجال كهربائي منتظم. فشعر بقوة كهربائية مقدارها 3.75×10^{-14} N باتجاه الجنوب. فما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه ؟

25. (I) تؤثر قوة مقدارها 8.4 N للأسفل في شحنة مقدارها $-8.8\,\mu C$ فما قيمة المجال واتجاهه عند هذه النقطة؟

26. (I) ما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند نقطة 20.0 cm مباشرةً فوق شحنة معزولة مقدارها 33.0×10^{-6} C؟

27. (II) احسب تسارع الإلكترون الناتج من وضعه في مجال كهربائي شدته 750 N/C؟ كيف يعتمد اتجاه التسارع على اتجاه المجال عند تلك النقطة؟

28. (II) ما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند نقطة في منتصف المسافة بين شحنتين $-8.0\,\mu C$ و $+7.0\,\mu C$ تفصلهما مسافة 8.0 cm؟ افترض عدم وجود أي شحنات أخرى في الجوار.

29. (II) ارسم بالتقريب خطوط المجال الكهربائي حول شحنتين نقطيتين $+Q$ و $-3Q$ تفصلهما مسافة l.

30. (II) ما شدة المجال الكهربائي عند نقطة في الفضاء يشعر عندها بروتون $(m = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg})$ بتسارع مقداره 1 مليون "g's"؟

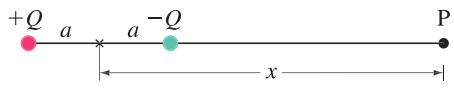
31. (II) ترك إلكترون ليتسارع من السكون باتجاه الشمال بمعدّل $115\ \text{m/s}^2$ في مجال كهربائي منتظم. فما قيمة المجال الكهربائي واتجاهه ؟

32. (II) مقدار المجال الكهربائي في منتصف المسافة بين شحنتين متساويتين بالمقدار متعاكستين في الإشارة هو 745 N/C عندما تكون المسافة بينهما 16.0 cm. فما مقدار الشحنة على كل منهما؟

33. (II) احسب مقدار المجال الكهربائي عند مركز مربع طول ضلعه 52.5 cm عندما تحتل شحنة مقدارها $+45.0\,\mu C$ إحدى زواياه الأربع. في حين تحتل ثلاث شحنات أخرى قيمة كل منها $-27.0\,\mu C$ الزوايا الثلاث الأخرى.

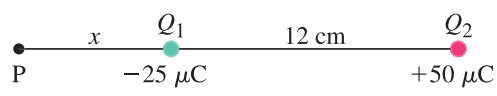
34. (II) احسب مقدار المجال الكهربائي عند إحدى زوايا مربع طول ضلعه 1.00 m إذا احتلت كل زاوية من زواياه الثلاث المتبقية شحنة مقدارها 2.25×10^{-6} C.

35. (II) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P في (الشكل 16 – 54). تفصل المسافة $2a$ الشحنتين عن بعضهما. وتبتعد النقطة P مسافة x عن منتصف المسافة بين الشحنتين. عبر عن إجابتك بدلالة كل من: a ، x، Q و k.



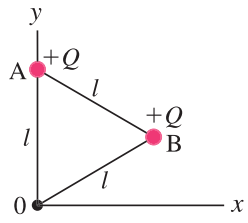
الشكل **16 - 54** (مسألة 35).

36. (II) تبتعد شحنتان $Q_1 = -25\,\mu C$ و $Q_2 = +50\,\mu C$ مسافة 12 cm عن بعضهما. فما بعد Q_1 عن P إذا كان المجال الكهربائي عند النقطة P (شكل 16 – 55) مساويًا للصفر.



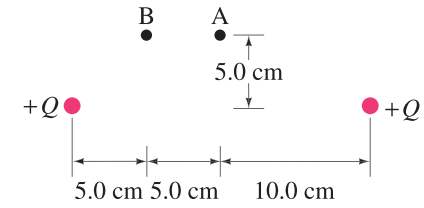
الشكل **16 - 55** (مسألة 36).

37. (II) (أ) حدّد المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ عند نقطة الأصل 0 في (الشكل 16–56) الناتج عن الشحنتين A و B. (ب) أعد حل مسألة بعد عكس إشارة الشحنة عن النقطة B.



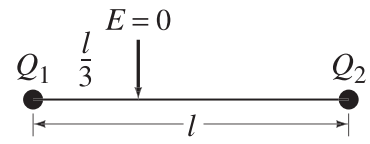
الشكل **16 - 56**
(مسألة 37).

38. (II) استخدم قانون كولوم لتحديد قيمة المجال الكهربائي واتجاهه عند النقطتين A و B في (الشكل 16 – 57) والناتج من الشحنتين الموجبتين ($Q = 7.0\,\mu C$) المبينتين. هل تتفق النتائج مع (الشكل 16 – 31 ب)؟



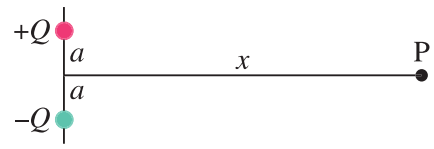
الشكل **16 - 57** (مسألة 38).

39. (II) إذا أُعطيتَ شحنتين نقطيتين مجهولتين Q_1 و Q_2، وكان المجال الكهربائي مساوياً للصفر على امتداد الخط الفاصل بينهما عند ثلث المسافة المتجهة من Q_1 إلى Q_2 (الشكل 16 – 58). فما هي النسبة Q_2/Q_1؟



الشكل **16 - 58** (مسألة 39).

40. (III) حدد اتجاه المجال الكهربائي وقيمته عند النقطة P المبينة في (الشكل 16 – 59). تبتعد الشحنتان مسافة $2a$ عن بعضهما. تقع النقطة P على الخط المتعامد والمنصف للخط الواصل بين الشحنتين على مسافة x من منتصف المسافة بينهما. عبّر عن إجابتك بدلالة كل من a، x، Q، و k.

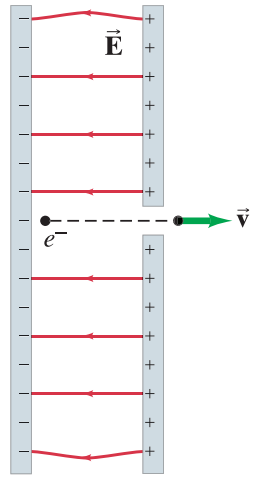


الشكل **16 - 59** (مسألة 40).

41. (III) تسارع إلكترون (كتلته $m = 9.11 \times 10^{-31}\,kg$) في مجال منتظم ($E = 1.45 \times 10^4\,N/C$) $\vec{E}$ بين لوحين متوازيين مشحونين. المسافة الفاصلة بينهما 1.10 cm. إذا تسارع الإلكترون من السكون من قرب اللوح السالب الشحنة، ومرّ من خلال ثقب صغير في اللوح الموجب (الشكل 16– 60)

(أ) ما سرعة مروره؟

(ب) أثبت إمكانية إهمال قوة الجاذبية.



الشكل **16 - 60** (مسألة 41)

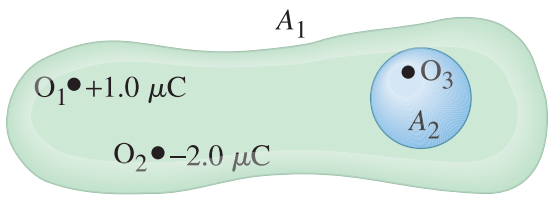
42. (III) يدخل إلكترون يتحرك إلى اليمين بسرعة 1.0% من سرعة الضوء مجالًا كهربائيًّا منتظمًا موازيًا لاتجاه حَرَك الإلكترون. فإذا توقف الإلكترون عن الحركة خلال مسافة 4.0 cm. (أ) ما هو اتجاه المجال الكهربائي؟ (ب) ما شدة المجال؟

*16 – 10 قانون غاوس

***43.** (I) ما الشحنة المحتواة في صندوق مكعب طول أحد أطرافه 28.0 cm إذا كان التدفق الكهربائي الكلّي الخارج منه $1.45 \times 10^3\,N \cdot m^2/C$؟

***44.** (II) وُضعت دائرة مسطحة نصف قطرها 18 cm في مجال كهربائي منتظم قيمته $5.8 \times 10^2\,N/C$. ما التدفق الكهربائي خلال الدائرة عندما يكون سطحها (أ) عمودياً على خطوط المجال. (ب) يصنع 45° مع خطوط المجال . (جـ) موازياً لخطوط المجال.

***45.** (II) يمتلك جسمان O_1 و O_2 في (الشكل 16 – 61) شحنتين $+1.0\,\mu C$ و $-2.0\,\mu C$ على الترتيب. أما الجسم الثالث O_3 فهو متعادل كهربائياً. (أ) ما التدفق الكهربائي خلال السطح A_1 المحتوي على الأجسام الثلاثة؟ (ب) ما التدفق الكهربائي خلال السطح A_2 المحتوي على الجسم الثالث بمفرده؟



الشكل **16 - 61** (مسألة 45).

***46.** (II) وُضع مكعب طول ضلعه l في مجال منتظم $E = 6.50 \times 10^3\,N/C$ وحوافه موازية لخطوط المجال. (أ) ما محصلة التدفق خلال المكعب ككل؟ (ب) ما التدفق خلال كل وجه من وجوهه الستة؟

***47.** (II) المجال الكهربائي بين لوحين فلزيين مربعين 130 N/C. فإذا كان طول ضلع كل لوح 1.0 m، والمسافة الفاصلة بينهما 3.0 cm، فما هي الشحنة على كل لوح (على افتراض أنهما متساويان ومتعاكسان)؟ أهمل تأثير الحواف.

***48.** (II) ما هي الشحنة المستقرة على كرة فلزية نصف قطرها 3.50-cm إذا كان المجال الكهربائي خارجها مباشرة $2.75 \times 10^2\,N/C$؟

***49.** (II) تحمل كرة فلزية صلبة نصف قطرها 3.00 m شحنة كلية $-3.50\,\mu C$. ما قيمة المجال الكهربائي على بعد من منتصف الكرة مقداره: (أ) 0.15 m؟ (ب) 2.90 m؟ (جـ) 3.10 m؟ (د) 6.00 m؟ (هـ) كيف ستختلف الإجابات إذا أصبحت الكرة قشرة رقيقة؟

***50.** (III) تركد شحنة نقطية Q في مركز قشرة كروية موصلة وغير مشحونة (انظر شكل 16 – 33). ما المجال الكهربائي E بدلالة r: (أ) عندما تكون r أصغر من نصف القطر الداخلي للقشرة؟ (ب) داخل القشرة؟ (جـ) خارج القشرة؟ (د) هل تؤثر القشرة في المجال الناتج من Q بمفردها؟ هل تؤثر الشحنة Q في القشرة؟

*DNA 11 – 16

***51.** (III) يتماسك النوعان لولبيًّا الشكل لجزيء DNA بواسطة قوى كهربائية ساكنة كما هو مبين في (الشكل 16 – 44). افترض أنّ متوسط الشحنة الصافية (الناتجة من المشاركة الإلكترونية) المشار إليها على ذرتي H و N هي $0.2e$ والمشار إليها على ذرتي C وO هي $0.4e$. افترض أيضاً أن المسافة الفاصلة بين ذرتي كل جزيء هي $1.0 \times 10^{-10}\,m$. حدد القوى المحصلة بين: (أ) ثاليمين و دينين. (ب) سايتوسين وجوانين. اعتبر لكل رابطة (نقطة حمراء) فقط ثلاث ذرات على خط (ذرتان على جزيء وذرة على الجزيء الآخر). (جـ) قدر القوة الكلية لجزيء DNA يحتوي على 10^5 زوج من هذه الجزيئات.

مسائل عامة

52. ما المسافة الفاصلة بين إلكترونين إذا كانت القوة الكهربائية بينهما تساوي وزن أحدهما عند سطح الأرض؟

53. الشحنة الموجبة لفلس نحاسي كتلته 3.0-g هي $38\ \mu C$. ما نسبة إلكتروناته التي فقدها؟

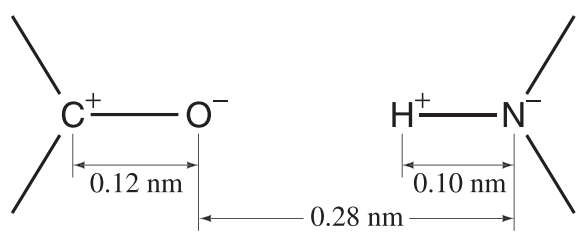
54. عُلقَ بروتونٌ $(m = 1.67 \times 10^{-27}\ kg)$ ساكن في مجال كهربائي منتظم $\vec{E}$. خذ بالحسبان الجاذبية عند سطح الأرض وحدد $\vec{E}$. توحي القياسات بأن هناك مجالا كهربائيًّا يحيط بالأرض، تقارب قيمته $150\ N/C$ عند سطح الأرض، ويشير إلى الداخل باتجاه مركز الأرض.

55. ما قيمة الشحنة الكهربائية على الأرض؟ وهل هي موجبة أم سالبة؟ [تلميح: المجال الكهربائي خارج كرة مشحونة بشحنة منتظمة هي نفسها كما لو أنّ الشحنة موجودة في المركز].

56. (أ) إذا كان المجال الكهربائي الموضعي هو $150\ N/C$، فما التسارع الذي سيشعر به إلكترون قرب سطح الأرض؟ (ب) ما التسارع الذي سيشعر به بروتون قرب سطح الأرض؟ (جـ) احسب نسبة كل تسارع مقارنة بـ $g = 9.8\ m/s^2$.

57. تبقى قطرة ماء نصف قطرها $0.018\ mm$ ساكنة في الهواء. وإذا كان المجال الكهربائي الموضعي للأرض والمتجه نحو الأسفل هو $150\ N/C$، فكم عدد الشحنات الإلكترونية الزائدة المحتواة في قطرة الماء؟

58. قدّر محصلة القوى بين مجموعتي CO و HN المبينتين في (الشكل 16 –62) شحنتا C و O تساوي $\pm 0.40e$. وشحنتا H و N تساوي $\pm 0.20e$ حيث $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$. [تلميح: لا تضمَّ القوى "الداخلية" بين C و O أو بين H و N].



الشكل 16 - 62. (مسألة 58).

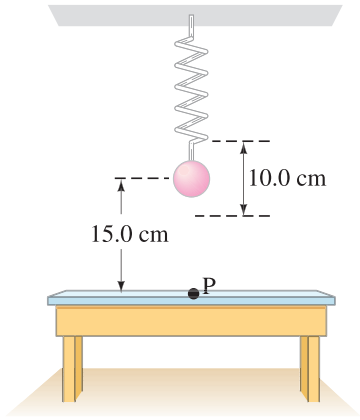
59. يدور إلكترون في مدار دائري حول بروتون بسرعة $1.1 \times 10^6\ m/s$ في النموذج البسيط لذرة الهيدروجين. حدد نصف قطر مدار الإلكترون . [تلميح : انظر الفصل الخامس عن الحركة الدائرة].

60. يافترض أن التجاذب الكهربائي، وليس الجاذبية، هو المسؤول عن بقاء القمر في مداره حول الأرض. إذا وضعت شحنتان متساويتان بالمقدار ومتعاكستان بالإشارة على الأرض والقمر، فما مقدار Q الضروري للإبقاء على المدار الحالي؟ استخدم القراءات التالية : كتلة الأرض $= 5.98 \times 10^{24}\ kg$، وكتلة القمر $= 7.35 \times 10^{22}\ kg$، ونصف قطر المدار $= 3.84 \times 10^8\ m$. تعامل مع الأرض والقمر وكأنهما جسمان نقطيان.

61. تحرك إلكترون بسرعة $v_0 = 21.5 \times 10^6\ m/s$ موازياً لمجال كهربائي قيمته $E = 11.4 \times 10^3\ N/C$. (أ) ما المسافة التي سيقطعها الإلكترون قبل أن يتوقف؟ (ب) ما الزمن المستغرق قبل أن يعود إلى نقطة البداية؟

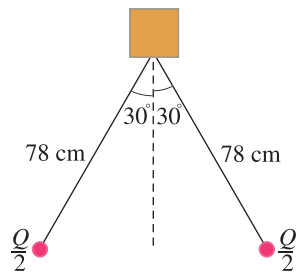
62. ثُبّتت شحنة موجبة نقطية $Q_1 = 2.5 \times 10^{-5}\ C$ عند نقطة المرجع للمحاور، وثُبتت شحنة سالبة $Q_2 = -5.0 \times 10^{-6}\ C$ على المحور السيني (x) عند $x = +2.0\ m$. أوجد مكان (أو أماكن) انعدام المجال الكهربائي على المحور السيني (x) الناتج من هاتين الشحنتين.

63. وُضعت كرة رصاصية صغيرة داخل عازل بلاستيكي وعلقت رأسيًّا من زمبرك مثل $(k = 126\ N/m)$ فوق طاولة مختبر (شكل 16 – 63). الكتلة الكلية للكرة المطلية هو $0.800\ kg$. ويقع مركزها على ارتفاع $15.0\ cm$ فوق سطح الطاولة وهي في وضعية الاتزان. سُحبت الكرة نحو الأسفل $5.00\ cm$ أسفل وضعية الاتزان ثم رُسّبت عليها شحنة كهربائية $Q = -3.00 \times 10^{-6}\ C$ ثم تُركت. باستخدام ما تعرفه عن الاهتزاز التوافقي، اكتب معادلة لشدة المجال الكهربائي بدلالة الزمن يمكن قياسها عند نقطة (P) فوق سطح الطاولة أسفل الكرة مباشرةً.



الشكل 16 - 63
(مسألة 63).

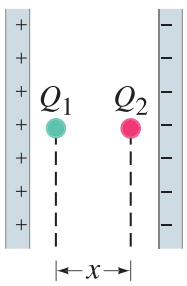
64. صُنع مكشاف كهربائي كبير باستخدام ورقتين طول كل منهما $78\ cm$ وربطت في نهايتيهما كرتان صغيرتان كتلة كلّ منهما $24\ g$ لتستقر معظم الشحنات على الكرتين في حالة شحن المكشاف. إذا صنعت كل ورقة زاوية مقدارها $30°$ مع الرأسي، فما الشحنة الكلية Q التي تأثر بها المكشاف الكهربائي؟ أهمل كتلة الورقتين.



الشكل 16 - 64
(مسألة 64).

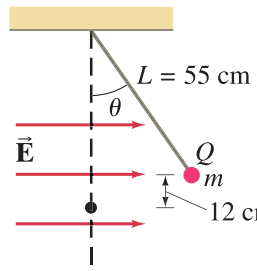
65. سينهار الهواء الجاف ويولد شرارة عندما يزداد المجال الكهربائي عن حوالي $3 \times 10^6\ N/C$. ما مقدار الشحنة التي يمكن أن تتراكم على حبة بازلاء خضراء (قطرها $0.75\ cm$) قبل أن تفرغ شحناتها تلقائياً؟ [تلميح: تصلح (المعادلتان 16 – 4 أ ، ب) خارج كرة عند قياس r من مركزها].

65. توضع شحنتان نقطيتان $Q_1 = -6.7\ \mu C$ و $Q_2 = 1.8\ \mu C$ بين لوحين متوازيين مشحونين بشحنتين مختلفتين كما هو مبين في (الشكل 16 – 65). ويفصل بين الشحنتين مسافة $x = 0.34\ m$. افرض أن المجال الكهربائي المولد بواسطة اللوحين منتظم ويساوي $E = 73{,}000\ N/C$. احسب محصلة القوى الكهربائية الساكنة على Q_1، وحدّد اتجاهها.



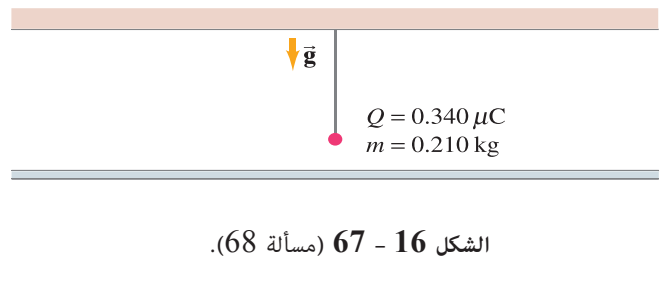
الشكل 16 - 65
(مسألة 66).

67. تمّ ملاحظة أنّ الشحنة النقطية ($m = 1.0\,\text{g}$) الموجودة عند نهاية حبل عازل طوله 55 cm تكون في وضع الاتزان في مجال كهربائي منتظم مقداره 12,000 N/C عندما يكون موضع البندول كما هو مبيّن في (الشكل 16 – 66). وعندما تكون الشحنة على ارتفاع 12 cm فوق أخفض موضع (رأسيًّا). حدّدْ قيمة الشحنة النقطية وإشارتها عندما يشير المجال إلى اليمين في (الشكل 16 – 66).



الشكل **16 - 66** (مسألة 67).

68. تعلق شحنة نقطية كتلتها 0.210 kg، ومحصلة شحنتها $+0.340\,\mu\text{C}$ ساكنة عند نهاية حبل عازل فوق ورقة كبيرة مشحونة. وتصنع الورقة الأفقية المشحونة بانتظام مجالًا كهربائيًّا رأسيًّا منتظمًا في جوار الشحنة النقطية. وقيس الشدّ في الحبل فوجد أنه 5.67 N. وقد وجد أن الشدّ في الحبل يساوي 5.67 N. احسب قيمة المجال الكهربائي الناتج من شحنة الورقة واتجاهه (شكل 16 – 67).



الشكل **16 - 67** (مسألة 68).

69. ما الشحنة الكلية للإلكترونات جميعها في عمود ألمنيوم كتلته 15 kg؟ وما الشحنة الكلية للعمود؟ (هناك 13 إلكترونًا في كلّ ذرّةٍ ألمنيوم ذات وزن ذري 27 u).

70. تفصل مسافة R بين كرتين صغيرتين موصولتين ومتشابهتين A و B، وتحمل كلّ منهما شحنة صغيرة Q. (أ) ما القوة التي تؤثر بها الكرة B في الكرة A؟ (ب) إذا لامست كرة مشابهة وغير مشحونة C الكرة B ثم أزيحت بعد ذلك إلى مكان بعيد، فما محصلة القوة التي ستؤثر الآن في الكرة A؟ (جـ) إذا لامست الكرة C الآن الكرة A ثم أزيحت إلى مكان بعيد، فما القوة التي ستؤثر في الكرة A في هذه الحالة ؟

71. إذا أعطيت الشحنتين المبينتين في (الشكل 16 – 68)، فما الموضع (المواضع) x الذي سيجعل المجال الكهربائي صفراً؟ هل يمكن للمجال أن يكون صفراً عند أي نقطة (أو نقاط) أخرى ليست على المحور السيني (x)؟

الشكل **16 - 68**. (مسألة 71).

72. وُضعت شحنتان $+Q$ و $-Q$ كتلة كل منهما m عند نهايتي عمود مهمل الكتلة طوله L، ومثبّت من منتصفه بواسطة دبوس فوق سطح طاولة. أوجد محصلة عزم القوى على النظام المكون من العمود والشحنات عندما يتأثر النظام بمجال كهربائي منتظم موازٍ للطاولة وعمودي على العمود.

73. وُضعت أربع شحنات نقطية موجبة ومتساوية، مقدار كلٍّ منها $8.0\,\mu\text{C}$ على الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه 9.2 cm. ما الشحنة اللازم وضعها في مركز المربع لتصبح الشحنات جميعها في وضع الاتزان؟ هل هذا الاتزان مستقر أم غير مستقر (بند 9 – 4)؟

إجابات التمارين

أ: العكس.

ب: 5 N.

جـ: 1.2 N إلى اليمين.

د : 0.32 m.

هـ : (أ) لا. (ب) نعم، في منتصف المسافة بينهما.

و : $9.0 \times 10^4\,\text{N/C}$ رأسياً نحو الأسفل.

ز : (أ) $\vec{\mathbf{E}}_1$ يمين ، و $\vec{\mathbf{E}}_2$ يسار، $\vec{\mathbf{E}}$ يمين.
(ب) $\vec{\mathbf{E}}_1$ يسار ، و$\vec{\mathbf{E}}_2$ يمين، $\vec{\mathbf{E}}$ يمين.

ح : $$\sum E_\perp \Delta A = E \sum \Delta A = E(2\pi r L) = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$

وعليه، فإن $E = \dfrac{1}{2\pi\epsilon_0 r}\dfrac{Q}{L}$.