

## الفصل السابع / قانون كولوم Coulomb's Law

### What is the Matter

### (1-7) ما هي المادة

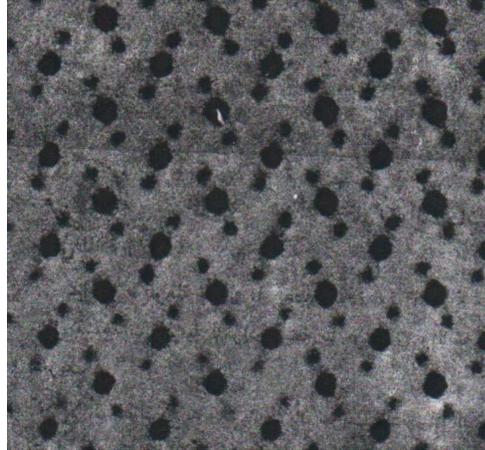
يميل المرء للوهلة الأولى إلى اعتبار المادة كل شيء متصل له كتلة ويشغل حيزاً من الفراغ. ولعل مشاهداتنا اليومية للمواد المحيطة بنا من مباني وأثاث وكذلك الزوارق وماء البحر تؤيد هذا الاعتقاد. إلا ان الطالب لابد وان يدرك بان تعريف المادة بهذه الصورة، وخاصة القول بان المادة هي شيء متصل هو تعريف غير دقيق. فلقد تسائل الإنسان منذ قرون عديدة عن تركيب المادة وحاول العثور على تعليل معقول لما يلاحظه من تغيرات تحدث للمادة نتيجة إخضاعها لظروف معينة، كتمدد المواد عند إخضاعها لقوى شد أو تسخين. ولعل مبعث هذا التساؤل هو صعوبة تصور أن مادة ما كقطعة من النحاس مثلاً يمكن تجزئتها بطريقة ميكانيكية إلى أجزاء اصغر فاصغر إلى ما لا نهاية، وعليه فقد افترض بان جميع المواد تتألف في النهاية من دقائق غاية في الصغر غير قابلة للانقسام سميت بالذرات \*Atoms.

ان الفكرة الذرية كأساس لتركيب المادة قد توسعت بشكل كبير وتم التحقق منها بحيث أصبحت في يومنا هذا الأساس الذي تبنى عليه كلاً من الكيمياء الحديثة والفيزياء الحديثة. ولقد اعتبرت المادة على أنها مكونة من دقائق صغيرة، إلى حد ما أساسية، تدعى الذرات. ان هذه الدقائق على عكس الأجسام العادية المألوفة، لا يمكن الإمساك بها أو قياسها (كقياس الشحنة الكهربائية والأبعاد مثلاً) بصورة مباشرة، على الرغم من الأدلة القاطعة على وجودها. كما ان عدداً لا يحصى من القياسات غير المباشرة لخواصها وأبعادها قد أجريت حتى الآن. والصورة في الشكل (1-7) دليلاً على ان المادة

---

\* ينسب تركيب هذه الصورة للتركيب الذري للمادة للفيلسوفين ديمقريطس وليوسيبيس Democritus & Leucippus في حوالي 400 سنة قبل الميلاد. إذ ان ديمقريطس كان يعتقد بان ليس هنالك من شيء في هذا الوجود سوى الذرات والفراغ وما عدا ذلك فهو مجرد تخمين.

ليست شيئاً متصلاً وإنما مكونة من وحدات بنائية صغيرة يفصلها مسافات ولها كتلة وتشغل حيزاً في الفراغ.



الشكل (1-7) : التركيب الذري لبلورة كبريتيد الحديد  $FeS_2$  أخذت بتقنية التصوير بالأشعة السينية وتظهر فيها الذرات مكبرة لـ 40 مليون مرة.

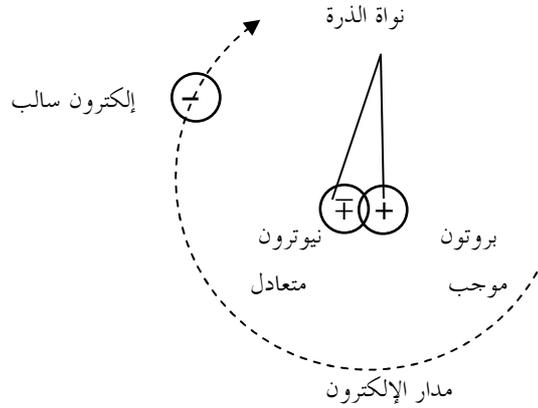
## Atomic Structure

## (2-7) تركيب الذرة

تتكون كل ذرة من نواة موجبة الشحنة تمثل جزءاً صغيراً جداً من حجمها ولكن تؤلف أكثر من 99.9% من كتلتها الكلية. تحتوي النواة على نوعين من الجسيمات المشحونة المتناهية الصغر تسمى بالنيوترونات والبروتونات. فالنيوترون متعادل الشحنة وكتلته  $1.6748 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ، أما البروتون فهو ببساطة نواة ذرة الهيدروجين وشحنته  $+e$  تساوي  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$  وكتلته  $1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . وتدور حول النواة بمدارات خارجية (دائرية أو على شكل قطع ناقص) يتراوح بعدها ما بين 1 و 2 أنجستروم جسيمات متناهية جداً في الصغر تسمى بالالكترونات وهي ذات كتلة صغيرة جداً مقارنة بكتلة النواة مقدارها  $9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$  وتحمل شحنة سالبة  $-e$  مساوية بالمقدار لشحنة البروتونات الموجبة\* كما موضح في الشكل (2-7).

\* من الضروري ان ننبه إلى ان هناك جسيمات أخرى تم اكتشافها في بدايات الثلث الثاني من القرن العشرين تقريباً مثل البوزترون ( وهو جسيم موجب الشحنة ويحمل نفس مقدار شحنة الإلكترون) والنيوترينو وغير ذلك من الجسيمات الأولية المستقرة وغير المستقرة التي اكتشفت في الأشعة الكونية وفي نواتج التفاعلات المتولدة في أجهزة المعجلات الذرية.

وهنا يمكن الإشارة إلى أن عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة هي التي تميز ذرة عنصر عن ذرة عنصر آخر. وكذلك نجد من خلال قيم كتل الجسيمات الأولية آفة



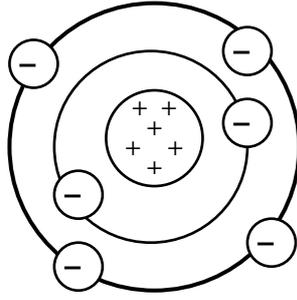
الشكل (2-7) : رسم تخطيطي لتركيب الذرة.

الذكر أن للبروتون كتلة تقريباً مساوية لكتلة النيوترون، وان كتلة الإلكترون الساكن هي اصغر بحوالي 1840 مرة من كتلة البروتون لذا فان كتلة الذرة تتركز في نواتها. فإذا تصورنا نواة الذرة بشكل كرة فان قطرها يتراوح ما بين  $1 \times 10^{-15} m$  للهيدروجين إلى حوالي  $7 \times 10^{-15} m$  للذرات الثقيلة التي تحتوي نواتها على عدد كبير من البروتونات كالبيورانيوم مثلاً، أما قطر الذرة فيتراوح ما بين  $1 \times 10^{-10} m$  إلى حوالي  $3 \times 10^{-10} m$  أي اكبر بحوالي  $10^5$  مرة قطر النواة.

ولعلك تذكر من مقررات الكيمياء أن الذرة متعادلة كهربائياً (غير متأينة) عندما يكون عدد الإلكترونات فيها مساوياً لعدد البروتونات تماماً كحالة ذرة الكربون الموضحة في الشكل (3-7) حيث تتوازن الشحنات السالبة للإلكترونات الست بالشحنة الموجبة للنواة، وهذا العدد المتوازن يسمى بالعدد الذري Atomic Number ويرمز له بالحرف  $Z$ . أما العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات داخل النواة فيسمى بالعدد الكتلي Mass Number ويرمز له بالحرف  $A$  وبهذا يكون:

$$A = Z + N \quad \dots\dots\dots(1-7)$$

إذ أن الحرف  $N$  يرمز إلى عدد النيوترونات داخل النواة.



الشكل (7-3) : تركيب ذرة الكربون.

إن نصف قطر مدار الإلكترون هو الذي يحدد حجم الذرة في أي تركيب بلوري، أما حجم النواة فيمكن قياسه عن طريق قذفها بجسيمات ذات طاقة عالية ولقد بينت هذه القياسات انه يمكن اعتبار النواة كرة بشيء من التقدير التقريبي نصف قطرها  $R$  معطى بالعلاقة الآتية :

$$R = 1.2 \times 10^{-15} A^{\frac{1}{3}} (m) \dots\dots\dots(2-7)$$

ومن المنطقي أن يتغير نصف القطر النووي مع  $A^{\frac{1}{3}}$  ذلك لان كتلة النواة تتناسب مع الكتلة الذرية للعنصر (العدد الكتلي). فإذا افترضنا ان نويات كافة العناصر لها نفس الكثافة  $\rho$  فان :

$$\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)\rho = \text{الكتلة} \propto A$$

ومن هنا نجد أن:

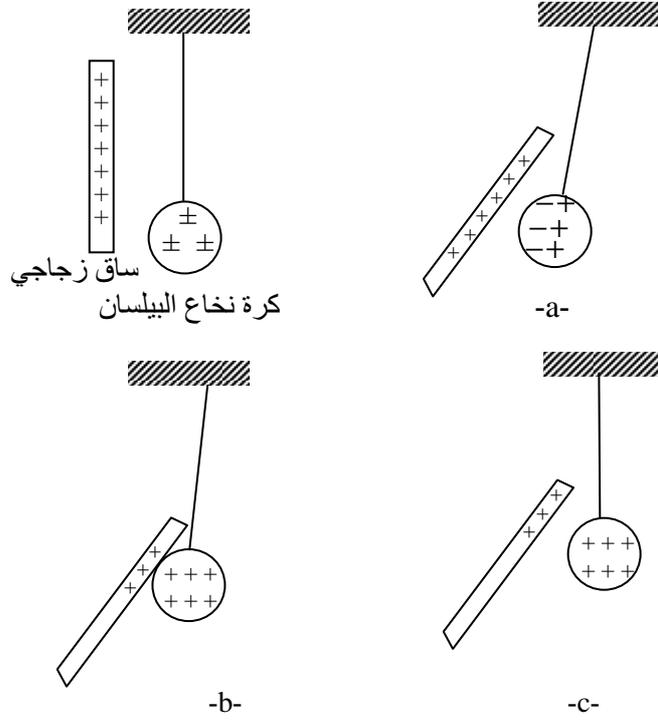
$$R \propto A$$

إن ذرات العناصر التي تختلف في عددها الكتلي  $A$  وتشابه في عددها الذري  $Z$  تسمى بالنظائر *Isotopes*. ومن الواضح أن هذه النظائر تتواجد فقط في المادة الواحدة حيث تختلف في عدد النيوترونات الموجودة في نوياتها. وتشابه النظائر في خواصها الكيميائية نظراً لاعتمادها على عدد الإلكترونات وتوزيعها خارج النواة، على حين تختلف في بعض خواصها الفيزيائية نتيجة اختلاف كتلتها بسبب اختلاف عدد نيوترونات نظائر العنصر الواحد كما أسلفنا.

تطرقنا في البند السابق إلى حقيقة أصبحت بديهية بالنسبة لمعرفتنا وهي ان ذرات المادة تكون متعادلة كهربائياً عندما نجد كمية الشحنات الموجبة على النواة تساوي تماماً مجموع شحنات الالكترونات حول النواة ونود هنا ان ننوه عن شيء لا يخلو من الفائدة مطروح للنقاش دائماً وهو ان الأرض من الناحية العملية يمكن اعتبارها متعادلة كهربائياً، رغم ما متوفر عليها من شحنات فائضة يقيّمها البعض بأنها نسبياً قليلة جداً والبعض الآخر ينفي وجودها. فالأغلبية الساحقة للشحنات على الأرض أو بداخلها تبقى مكونات للذرات، وحيث توجد شحنات طليقة سالبة أو موجبة فألها تعتبر منتزعة عن ذرات معينة وفي الحالة التي يختل فيها التوازن الطبيعي للشحنات كأن يكتسب الجسم الكترونات أو يفقد قسماً من الكترونات فإنه يصبح مشحوناً.

والسؤال الذي يطرح نفسه هو كيف نحصل على أجسام مشحونة؟ وكيف نعلل اكتساب الأجسام الشحنة الكهربائية؟ هناك طرق عدة استعملت لتغيير حالة التوازن الاعتيادي بين الشحنات الموجبة والشحنات السالبة في الذرة والحصول على أجسام مشحونة وأقدمها ظاهرة الشحن بالتماس. فعند ذلك ساق الزجاج بالحرير سيحدث انتقال سريع جداً للالكترونات فقط من ذرات الزجاج إلى الحرير، ومن الطبيعي فان الحرير الذي استلم الكترونات تصبح شحنته سالبة ويترك الآخر أي الزجاج بشحنة موجبة بعد ان يخسر جزءاً من شحناته السالبة. الآن إذا قرّبت كرة من نخاع البيلسان\* معلقة بحيط عازل من ساق الزجاج فألها ستجذب أو لا نحو ساق الزجاج، كما في الشكل (4a-7). ثم تبدأ الالكترونات بمغادرة بعض ذرات الكرة نحو ساق الزجاج وكنتيجه لهذا تكتسب كرة نخاع البيلسان شحنة موجبة مما يجعلها تنفر من ساق الزجاج حالاً كما في الشكل (4b,c-7). والآن لو قرّبت الكرة من قطعة الحرير سالبة الشحنة فألها ستجذب إليها بسهولة، ونترك إلى الطالب الإجابة على الشرط الثاني من السؤال، أي كيف يعلل اكتساب الأجسام الشحنة الكهربائية.

\* كرة نخاع البيلسان عبارة عن كرة خفيفة جداً مغطاة بدهان معدني ومن السهل شحنها باستعمال سيقان من الزجاج.

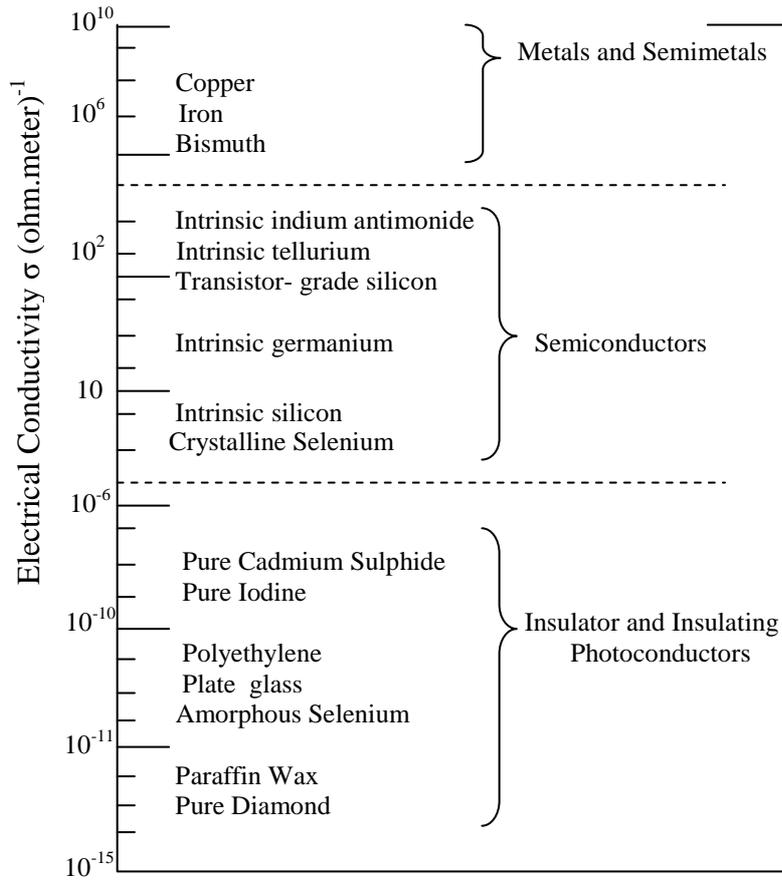


الشكل (4-7): انتقال الشحنات الكهربائية بسبب التماس وان التنافر يحصل بسبب الشحنات المتشابهة.

## 4-7 الموصلات والعوازل Conductors and Insulators

بالامكان تقسيم المواد تبعاً لسلوكها الكهربائي إلى مجموعتين رئيسيتين هما الموصلات والعوازل. وحيث المواد التي تقع في الوسط ما بين هاتين المجموعتين فأنها تسمى أشباه الموصلات Semiconductors. ولأهمية المواد شبه الموصلة في حقول المعرفة التطبيقية المتمثلة باستعمالاتها الواسعة في الأجهزة الالكترونية كالمقومات والترانزستورات والثرمستورات والخلايا الضوئية و..... الخ، نجد من الملائم تصنيفها مجموعة مستقلة. والشكل (5-7) يمثل تقسيماً طيفياً لبعض العناصر حسب قيم معاملات توصيلها الكهربائي  $\sigma$ ، إذ نجد:

- 1- مجموعة الفلزات مثل الفضة والنحاس والحديد والرصاص، حيث توصيلاتها الكهربائية  $\sigma$  عالية عند درجة حرارة الغرفة في المدى من  $10^5$  إلى  $10^8$  (اوم.متر)<sup>-1</sup>.
- 2- مجموعة أشباه الموصلات مثل الجرمانيوم والسليكون وكبريتيد الرصاص وكبريتيد الكاديوم، حيث قيم  $\sigma$  متوسطة عند درجة حرارة الغرفة في المدى من  $5 \times 10^5$  إلى  $5 \times 10^{-5}$  (اوم.متر)<sup>-1</sup>.
- 3- مجموعة العوازل مثل الزجاج والخزف والكوارتز والبورسلين والابونيت والكهرمان، حيث قيم  $\sigma$  قليلة جداً عند درجة حرارة الغرفة في المدى من  $10^{-6}$  إلى  $10^{-16}$  (اوم.متر)<sup>-1</sup>.



الشكل (5-7) : طيف لبعض العناصر حسب قيم توصيلها الكهربائي عند درجة حرارة الغرفة.

يقصد بالموصلات الكهربائية تلك المواد التي تحوي على عدد كبير من ناقلات الشحنة الطليقة والتي تمر من خلالها بسهولة عند وجود مجال كهربائي خارجي مسط علىها، وتأتي المعادن في مقدمة هذه المواد ومنها النحاس والفضة والألمنيوم وبعض السوائل جيدة التوصيل للكهربائية مثل المحاليل الألكتروليتية.

إن حقيقة كون التكافؤ موجباً في المعادن، يشير إلى أن ذرات المعادن تشترك بسهولة واحداً أو أكثر من إلكتروناتها الخارجية في الموصل المعدني ويمكن توضيح هذه الحقيقة في المثال الآتي : لتأخذ غاز الصوديوم الذي يتكون من ذرات حرة تمتلك كل منها التوزيع الألكتروني  $Na = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ ، فعند اقتراب ذراته الحرة من بعضها البعض لتشكيل معدن الصوديوم فإن كل ذرتين متجاورتين تشابك قليلاً، وهذا يعني أن إلكترون التكافؤ الموجود في الحالة  $3s$  لذرة ما سوف يكون وفق الحالة الجديدة منتمياً في الوقت نفسه إلى كلا الأيونين المتجاورين  $Na^+$  وهذا الإلكترون لا يبقى ملتصقاً بنواة ذرته بل باستطاعته (والإلكترونات المشابهة) أن يتحرك بحرية وينتقل من أيون إلى آخر مجاور أولاً ثم إلى أيون آخر وهكذا. إن هذا الإلكترون الذي أطلق عليه إلكترون تكافؤ في ذرة حرة يصبح نفسه ما نسميه بالإلكترون التوصيل بعد عملية تكوين المعدن. وهكذا فجميع الإلكترونات التكافؤ لذرات الصوديوم الحرة تصبح إلكترونات التوصيل في معدن الصوديوم المتكون من تلك الذرات. ففي درجات الحرارة الاعتيادية تتميز الموصلات بامتلاكها أعداداً كبيرة من هذه الإلكترونات (الإلكترونات التوصيل) التي تستطيع الحركة بحرية\* ضمن المادة وفي اتجاهات مختلفة. وعندما تقع المادة تحت تأثير عامل خارجي كالمجال الكهربائي فإن إلكترونات المادة تنساق تحت تأثير المجال مولدة تياراً كهربائياً بينما تبقى نويات المادة الموجبة والإلكترونات الأخرى غير التكافؤية ثابتة في مواقعها غير قادرة على الحركة تقريباً.

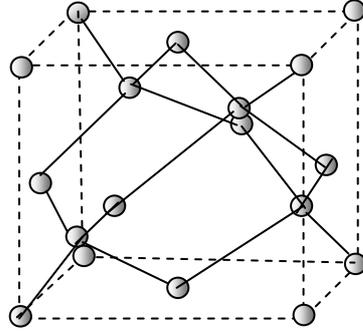
\* يجب أن ننبه إلى أن حرية الحركة للإلكترونات التوصيل داخل المعدن لا ترقى بالمفهوم الصحيح إلى المثالية لأسباب كثيرة منها تأثير الجهد الدوري.

ويقصد بها تلك المواد التي لا تمر خلالها الشحنات الكهربائية في الحال، فهي تتكون من ذرات فيها جميع الإلكترونات المدار الخارجي مشدودة بالنواة بأواصر ربط قوية جداً بحيث يصعب التغلب على طاقة الربط بها، وهذا يعني أنها لا تمتلك الإلكترونات طليقة بالأعداد التي تضمن حصول التوصيل الكهربائي أو الحراري فيها. ان المواد العازلة تكتسب وتخسر الإلكترونات عند نقاط تماس الجسمين فقط، ومن أمثلة المواد العازلة للكهرباء: المايكا والزجاج والخشب والورق والابوينت والشمع والكبريت والكاوتشوك والبلستيك والمطاط والغازات في الحالة العادية.

والسؤال الذي يتبادر إلى الأذهان هو هل بالامكان كسر قسم من أواصر الارتباط بين الذرات وتحرير بعض الإلكترونات في المواد العازلة كالخشب مثلاً وتصبح في تصرفها تشابه المواد شبه الموصلية أو الموصلية؟ والإجابة عن هذا السؤال تتلخص بما يأتي: يتخيل البعض انه عندما ترتفع درجة حرارة المادة فان الطاقة الحرارية تؤدي إلى اهتزاز الذرات وهذه الاهتزازات قد تسبب في كسر بعض الأواصر بين الذرات وتحرير قسم من الإلكترونات التي بإمكانها التجول داخل جسم المادة البلورية والقيام بمهمة نقل التيار الكهربائي تحت تأثير المجال الكهربائي المسلط على المادة\*. غير ان ذلك لا يكون صحيحاً في التساؤل المطروح لسبب بسيط وهو ان مادة الخشب (أو أي مادة عازلة) حتى إذا رفعت درجة حرارتها إلى درجة أعلى من الدرجة الاعتيادية فقد تصل إلى درجة الاتقاد الحراري قبل ان تتمكن الإلكترونات المدارات الخارجية فيها من اكتساب الطاقة الحرارية التي تؤهلها للانتقال إلى مستويات طاقة أعلى وتحقيق موصلية كهربائية عالية، إذ أن موصلية هذه المواد تقل عن  $10^{-12} s/m$  في كثير من الأحيان. ان حالة الاعتقاد السائد كما أسلفنا تعد صحيحة للمواد التي تصنف عوازل تحت درجات حرارة منخفضة قريبة

\* في حالة عدم وجود مصدر قوة دافعة كهربائية يربط بين طرفي المادة فان الإلكترونات المتحررة بفعل التأثير الحراري سوف تتجول داخل المادة بلا هدف، فتحكمها قوة التنافر المتبادلة بين الإلكترونات وقوة التجاذب بين الإلكترونات والايونات الموجبة (أي الذرات التي فقدت إلكترونات وأصبحت موجبة الشحنة).

من الصفر المطلق كما في عنصر الكربون الجرمانيوم والسليكون وجميع العناصر رباعية التكافؤ التي تمتلك تركيب الماس في الحالة المستقرة كما في الشكل (6-7). فإذا ما رفعت درجة حرارتها إلى درجة الغرفة الاعتيادية مثلاً فان الطاقة الحرارية التي ستكتسبها الالكترونات تكون كافية لكسر بعض الأواصر وتحرير قسم من الالكترونات، وبذلك يمكن عدّها من المواد شبه الموصلة.



الشكل (6-7): الترتيب الذري في الماس.

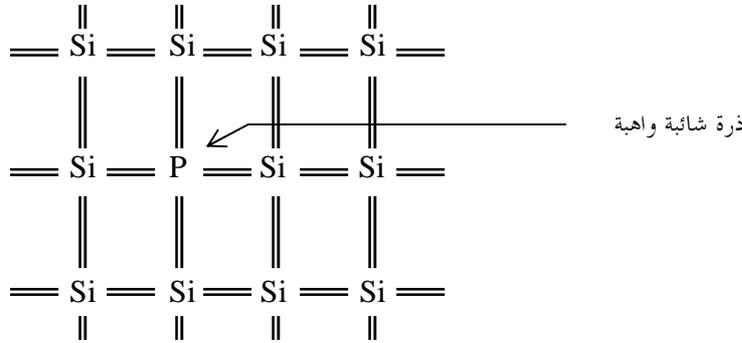
## Semiconductors

## (3-4-7) : أشباه الموصلات

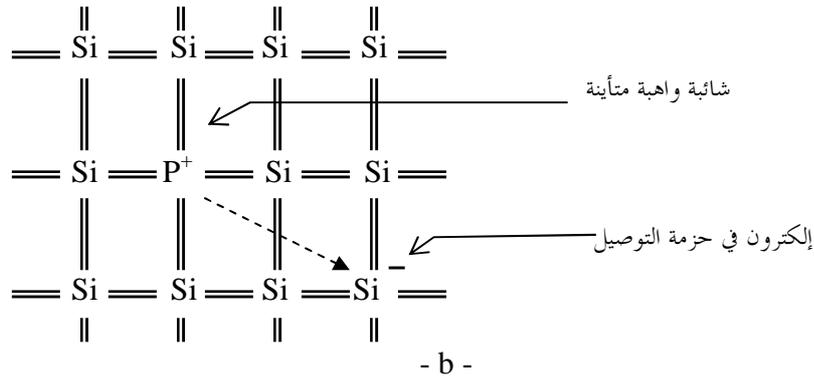
وهي مواد تتوسط في قدرة توصيلها الكهربائي ما بين الموصلات والعوازل. فهي تشمل عناصر ومركبات ضمن مجاميع موضحة في الجدول (1-7). وكما تم الإشارة إليه فان الكربون وبقية المواد البلورية النقية من المواد شبه الموصلة رباعية التكافؤ كالجرمانيوم والسليكون تعد عوازلاً قوية في درجات حرارة منخفضة قريبة من الصفر المطلق، إلا أنها بتأثير الإثارة الحرارية Thermal Aquitation تظهر خصائص أشباه الموصلات إضافة إلى فعل الشوائب في زيادة إظهار وتحسين هذه الخصائص. فبالامكان الحصول على قابلية توصيل كهربائي جيدة بإضافة كميات صغيرة من الشوائب إلى بلورة السليكون Si (أو الجرمانيوم Ge) مثل الفسفور P (أو أي عنصر خماسي التكافؤ) والبورون B (أو أي عنصر ثلاثي التكافؤ).

جدول (7-1): أشباه الموصلات من العناصر المنفردة والمركبة				
Element	IV - IV Compounds	III - V Compounds	II - VI Compounds	IV - VI Compounds
سيلكون Si	SiC (كاربيد السليكون)	AlAs أرسنيد الألمنيوم	CdS كبريتيد الكاديوم	كبريتيد الرصاص
جرمانيوم Ge		AlSb انتيمون الألمنيوم	CdSe سيلينيوم الكاديوم	pbS
كربون C		GaAs أرسنيد الكاليوم	CdTe تيلوريوم الكاديوم	تيلوريوم الرصاص
قصدير Sn		GaP فوسفيد الكاليوم	ZnS كبريتيد الزنك	pbTe
رصاص Pb		GaSb انتيمون الكاليوم	ZnSe سيلينيوم الزنك	سيلينيوم الرصاص
		InAs أرسنيد الانديوم	ZnTe تيلوريوم الزنك	pbSe
		InP فوسفيد الانديوم		
		InSb انتيمون الانديوم		

يمثل الشكل (7-7) رسماً تخطيطياً مسطحاً لبلورة السليكون وقد حلت ذرة P بدلاً من إحدى ذرات Si كذرة شائبة. إن أربعة الكترونات من مجموع خمسة موجودة في المدار الخارجي لذرة P ترتبط بأواصر ثنائية مع ذرة Si، أما الإلكترون الخامس فيبدو أن ارتباطه ضعيفاً جداً مع نواة ذرة P، بحيث يكفي لتحرره طاقة قدرها فقط  $0.05eV$  تقريباً أي أقل من الطاقة اللازمة لكسر آصرة  $Si = Si$  بعشرين ضعف. إن هذا القدر من الطاقة يتوفر بدرجات الحرارة الاعتيادية وحتى في درجات الحرارة الواطئة ( $-100^{\circ}C$ ) بعيداً عن الصفر المطلق (وهي الحالة الاعتيادية غير المتأينة لذرات الفسفور كما في شكل (7a-7)، وبسبب توفر الطاقة المشار إليها أعلاه نجد أن كافة ذرات P قد تأينت (فقدت إلكتروناتها الخماس) وتركت خلفها فسفور بشحنة موجبة  $p^+$  كما في الشكل (7b-7). إن هذه الذرات المتأينة تدعى بالذرات الواهبة Donor Atoms.



- a -



شكل (7-7): ذرة عنصر من المجموعة الخامسة (فسفور) في شبكة السليكون Si.

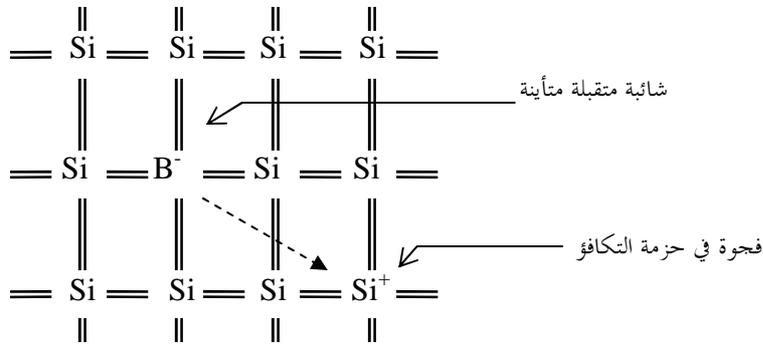
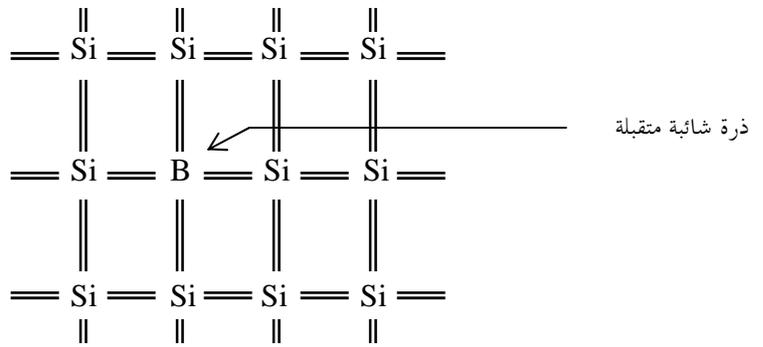
وبلغة نظرية الحزم نجد إن كل ذرة من هذه الذرات الشائبة (P) تكوّن مستوي موضعي Local Level يقع داخل فجوة الطاقة المحظورة Forbidden Energy Gap في موقع  $0.05eV$  تحت حافة حزمة التوصيل يدعى بالمستوي الواهب (المانح) Donor Level كما مبين في الشكل (7-8). فعند درجات حرارة منخفضة جداً نجد أن هذا المستوي مليئاً بالإلكترونات في حين نجده فارغاً عند درجات الحرارة الاعتيادية بسبب انتقال الإلكترون إلى حزمة التوصيل والقيام بمهمة التوصيل الكهربائي ولكن بدرجة اضعف مما هو عليه في المعادن.



الشكل (7-8): مخطط حزمة الطاقة لشبه موصل نوع سالب.

إن بلورة السليكون المشوبة بالفسفور تعد مادة شبه موصلة من النوع السالب Negative-Type Semiconductor نظراً لأن الإلكترونات هي المسؤولة عن نقل التيار الكهربائي. ولنرى الآن حالة إضافة كمية صغيرة من احد العناصر الثلاثية التكافؤ وهي البورون B إلى بلورة السليكون Si. يمثل الشكل (7-9) رسماً تخطيطياً مسطحاً لبلورة السليكون وقد حلت ذرة B بدلاً من إحدى ذرات Si كذرة شائبة. إن ذرات

مجموعة العناصر الثلاثية التكافؤ تمتلك فقط ثلاث إلكترونات تكافؤ، ولغرض تهيئة الإلكترون الرابع ليكتمل ارتباط ذرة B بذرات Si الأربع المجاورة فمن الضروري ان ينتزع إلكترون من ذرة Si لا على التعيين. إن انتقال إلكترون من الأصرة  $Si = Si$  إلى الأصرة  $B - Si$  يتطلب طاقة ليست عالية تقدر وفق الحسابات المتوفرة فقط  $0.05eV$  وهذا يعني إن ذرات B تبقى بحالتها الاعتيادية غير المتأينة عندما تكون البلورة تحت درجات حرارة منخفضة وهذا موضح في الشكل (7-9a). أما بدرجات الحرارة الاعتيادية أي درجة حرارة الغرفة صعوداً فإن ذرة B قادرة على انتزاع إلكترون من إحدى ذرات Si لتتحول إلى ايون سالب  $B^-$  بينما ينتج بسبب انتقال إلكترون ظهور فجوة كما في الشكل (7-9b). تدعى ذرات البورون بالذرات المتقبلة Acceptor .Atoms



الشكل (7-9) : ذرة عنصر من المجموعة الثالثة (بورون) في شبكة السليكون

وبلغة نظرية الحزم يمكن وصف هذه المشاهدات على وجهين. فعند درجات الحرارة المنخفضة جداً نجد إن مستوي ذرات B الشائبة يقع داخل فجوة الطاقة في موقع  $0.05eV$  فوق الحافة العليا لحزمة التكافؤ، ويوصف كمستوي فارغ من الالكترونات، ومع ارتفاع درجات الحرارة فان الالكترونات حزمة التكافؤ تبدأ بالتهيج والانتقال إلى هذه المستويات التي تصبح مشغولة بالالكترونات في درجات الحرارة الاعتيادية كما هو واضح في الشكل (7-10). إن هذه المستويات الشائبة تدعى بالمستويات المتقبلة. Acceptor Levels.



الشكل (7-10): مخطط حزمة الطاقة لشبه موصل نوع موجب



الشكل (7-11): احتمال آخر في تمثيل حزمة الطاقة لشبه موصل نوع موجب يظهر فيه مستويات الشوائب للفجوات.

ومن وجهة نظر أخرى يمكن ان تزعم بان هذه المستويات تمتلك فجوات عند درجات الحرارة المنخفضة، والتي بدرجات حرارة أعلى يمكن لهذه الفجوات ان تتحرر وتنتقل (إذا جاز التعبير) إلى حزمة التكافؤ كما ميبين في الشكل (7-11)، وفيه مُثلت المستويات الموضعية للفجوات بجهد رمزه  $\square$  على عكس المستويات في الشكل (7-10)، إذ مُثلت بجهد رمزه  $\square$ .

إن ظهور فجوة في حزمة التكافؤ يمكن أن يكون مصيدة للإلكترون يأتي من ذرة سليكون لا على التعيين وهذا الإلكترون الذي يملأ هذه الفجوة بدوره سيترك فجوة أخرى تكون مهياة لاستقبال إلكترون آخر، وبهذا يتكون ما يمكن عدّه نمطاً لنقل الشحنات الكهربائية نتعامل معها كشحنات مماثلة للالكترونات ولكنها تحمل شحنة موجبة تدعى بالفجوات. ان بلورة السليكون المشوبة بالبورون تعد مادة شبه موصلة من النوع الموجب Positive – Type Semiconductor.

## Coulomb's Law

## (5-7) قانون كولوم

يعد العالم الفرنسي تشارلس أوغسطين دي كولوم (1736-1806) واحداً من الرواد الأوائل في القرن الثامن عشر في الكهرباء، فهو أول من قام بقياسات عملية للقوى العاملة بين الأجسام المشحونة. ومن حصيلة هذه القياسات استطاع صياغة قانونه الشهير عام 1785 الذي عرف بقانون كولوم وهو يركز على ثلاث نصوص :

- 1- تنافر الشحنات ذات الإشارة الواحدة وتجاذب الشحنات ذات الإشارة المختلفة.
  - 2- تؤثر شحنتان نقطيتان أحدهما على الأخرى بقوة تعمل على امتداد الخط المستقيم الذي يصل بين مركزيهما، ومقدار هذه القوة سواء كانت قوة تجاذب أو تنافر بين الشحنتين تتناسب طردياً مع حاصل ضرب الشحنتين.
  - 3- يتناسب مقدار قوة التجاذب أو التنافر بين شحنتين عكسياً مع مربع المسافة بينهما، ان هذا الاستنتاج يعد إشارة واضحة إلى ان كولوم اثبت ان قوة التجاذب أو التنافر بين جسمين مشحونين تتبع قانون التربيع العكسي.
- على ضوء ما تقدم يمكن صياغة نص قانون كولوم بالشكل الآتي : **القوة الكهروستاتيكية بين شحنتين نقطيتين في حالة سكون تتناسب طردياً مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسياً مع مربع المسافة بينهما.**
- ويمكن كتابة قانون كولوم بصيغة رياضية تشير إلى اتجاه القوة إضافة إلى مقدارها بالشكل الآتي :

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \dots\dots\dots(3-7)$$

وطبقاً لقانون نيوتن للفعل ورد الفعل فان القوة المؤثرة على إحدى الشحنتين لا بد ان تكون مطابقة في المقدار ومعاكسة في الاتجاه للقوة التي تؤثر على الشحنة الأخرى وكلاهما تعمل على الحد الفاصل بين الشحنتين. وعليه فان القوة  $F$  في المعادلة (3-7) تشير للقوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة  $q_2$  من قبل الشحنة  $q_1$  وهي نفس القوة المؤثرة على الشحنة  $q_1$  من قبل الشحنة  $q_2$  ولكن بعكس الاتجاه. تمثل  $r$  المسافة بين الشحنتين و  $k$  يمثل ثابت فيزيائي كوني يعرف بثابت قوة كولوم، إذ تعتمد قيمته على نظام الوحدات المستعملة وكذلك على نوع الوسط الفاصل. أما الرمز  $\hat{r}$  فهو وحدة المتجه Unit Vector ومقداره واحد واتجاهه من  $q_1$  إلى  $q_2$ .

يطبق قانون كولوم على الشحنتان النقطية Point Charges وهي الشحنتان التي تشغل حيزاً أبعاده صغيرة جداً مقارنة بالمسافات الفاصلة بينهما. ويطبق أيضاً في العوازل والموصلات إذا كانت  $F$  القوة المؤثرة بين  $q_1$  و  $q_2$  بغض النظر عن القوى الناجمة عن الشحنتان الأخرى ضمن الوسط.

يصح استعمال قانون كولوم في حالات التنافر الكهروستاتيكي بين القوى عند المدى الذي يزيد على  $10^{-14}$  من المتر، كما يمكن استعماله لشحنتان نقطية في الهواء ذلك إن تأثير الهواء في ظروف الضغط الجوي الاعتيادي لا يغير قيمة القوة عن قيمتها في الفراغ بأكثر من جزء واحد من كل ألفين.

**(6-7) أنظمة قياس الشحنة الكهربائية**  
**Systematic Measurement Electric Charge**

إن أول نظام للوحدات كانت توضع على أساسه معادلات الكهروستاتيكي هو نظام الوحدات الكهروستاتيكي (e.s.u.)، وحسب هذا النظام اختيرت وحدة الشحنة وفقاً لقانون كولوم الذي تعتبر فيه  $k$  تساوي واحداً في حالة وجود الشحنتان في الفراغ، وأطلق عليها اسم ستات كولوم Statcoulomb. فالستات كولوم تعرف بأنها تلك الشحنة التي إذا وضعت في الفراغ على بعد 1 سم من شحنة أخرى مماثلة لها في النوع

ومساوية لها في المقدار لتنافرت معها بقوة دايين واحد. إن القوة وفقاً لهذا التعريف كان قد عرّب عنها بالداين والمسافة بالسنتيمتر، غير إن المعادلات المتعلقة بظاهرة المغناطيسية كانت توضع على أسس نظام آخر نشأ مع تطور المغناطيسية دعيّ بنظام الوحدات الكهرومغناطيسية (e.m.u.) واستعملت على أساسه وحدة للشحنة وهي وحدة الكهرومغناطيسية.

إن وحدات هذين النظامين سالفى الذكر ليست متساوية لنفس الكمية، أضف إلى ذلك فإن مجموعة من الوحدات الكهربائية التي استعملت في القياسات العملية كالفولت والأمبير والاولم والمنري والفاراد تختلف في قيمتها عن تلك في النظامين المذكورين مما دعيّ إلى نشؤ نظام جديد للوحدات سميّ بالنظام العملي.

إن هذا الإرباك في تعدد أنظمة الوحدات أدى إلى التفكير باستحداث نظام آخر جديد، وضع أسسه الإيطالي جورجيو Giorgio في بداية القرن التاسع عشر سميّ بنظام متر-كيلوغرام-ثانية-أمبير ورمزه (MKSA) تبنته أقطار عديدة في العالم عام 1935. وأخيراً جاء النظام الدولي للوحدات SI System International وهو النظام الأمثل للوحدات ويشمل ست وحدات أساسية وهي المتر (وحدة أساسية للأطوال) والكيلوغرام (وحدة للكتلة) والثانية (وحدة للزمن) والأمبير (وحدة لقياس التيار) ودرجة الحرارة المطلقة - كلفن - (وحدة لدرجة الحرارة) والكاندلا (وحدة قياس الشمعة).

وفقاً للنظام الدولي SI تقاس القوة بالنيوتن والمسافة بالأمتار، أما وحدة كمية الشحنة فلا تعرّف بدلالة قانون كولوم بل بدلالة وحدة التيار (الأمبير) وتسمى الكولوم  $C$ ، وتعرف بأنها كمية الشحنة المارة خلال مقطع عرضي لسلك في ثانية واحدة إذا مرّ تيار ثابت مقداره واحد أمبير في هذا السلك. ولكون الكولوم كمية كبيرة نسبياً من الشحنة  $1 \text{ coulomb} = 2.99592 \times 10^9 \text{ statcoulomb}$ ، تستعمل وحدات اصغر منه وأكثر ملائمة هي الملي كولوم  $mC$  وميلي كولوم واحد يساوي  $10^{-3}$  كولوم، أو المايكرو كولوم  $\mu C$  ويساوي  $10^{-6}$  من الكولوم. وبمعرفة وحدات القوة  $F$  والمسافة  $r$  والشحنة  $q$  وفق النظام الدولي SI بشكل مستقل عن قانون كولوم يصبح من السهل استخراج القيمة العددية لثابت التناسب  $k$  عملياً، وقد وجد أن أحسن قيمة له في الفراغ هي  $8.98776 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2}$  وتقرّب إلى  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2}$ .

غالباً يستبدل الثابت  $k$  بالمقدار  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  حيث  $\epsilon_0$  سماحية الفراغ  
 Permittivity of Vacuum وقيمتها تساوي  $8.85 \times 10^{-12} N^{-1}m^{-2}C^2$ . وبذلك  
 يصبح قانون كولوم :

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r} \\ \text{or} \quad \vec{F} &= 9 \times 10^9 \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r} \end{aligned} \right\} \text{..... (4-7) (في الفراغ)}$$

في الحالات التي يكون فيها الوسط الفاصل بين الشحنتين ليست فراغاً فان القوى التي  
 تسببها الشحنتان الموجودة في المادة تقلل من القوة بين الشحنتين النقطيتين، وان قانون  
 كولوم سيأخذ الصيغة الآتية :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 K} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r} \text{ (في الوسط المادي) .....(5-7)}$$

وحيث  $K\epsilon_0 = \epsilon$  ، إذ  $\epsilon$  تسمى سماحية الوسط العازل Permittivity of the Medium، و  $K$  ثابت العازل Dielectric Constants يكون :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r} = \frac{k}{K} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r} \text{ .....(6-7)}$$

حيث  $K$  تساوي 1 للفراغ و 1.006 للهواء فيما تتراوح بين (1-10) لمعظم المواد  
 ويستثنى من ذلك بعض السوائل والغازات إذ تصل إلى مقدار أعلى من ذلك بكثير.  
 في حالة وجود عدد من الشحنتان النقطية  $q_1, q_2, q_3, \dots$  والمطلوب  
 حساب القوة التي تؤثر على الشحنة  $q_1$  مثلاً، فإننا نستعمل العلاقة الاتجاهية الآتية:

$$\vec{F}_{1x} = \vec{F}_{12x} + \vec{F}_{13x} + \vec{F}_{14x} + \dots \text{ .....(7-7)}$$

$$\vec{F}_{1y} = \vec{F}_{12y} + \vec{F}_{13y} + \vec{F}_{14y} + \dots$$

ومنها يحسب مقدار واتجاه القوة كالاتي :

$$F = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2} \quad , \quad \tan \theta = \frac{F_{1y}}{F_{1x}}$$

مثال (1-7)

احسب الشحنة الصافية على عينة من مادة مؤلفة من  $1-8 \times 10^{15}$  إلكترونات.  
 -2 مجموعة من  $8 \times 10^{15}$  إلكترونات و  $6 \times 10^{14}$  بروتونات .

الحل :

1- إن أية شحنة موجودة في الطبيعة مهما كان أصلها مساوية إلى  $q=ne$  حيث  $n$  تمثل أي عدد صحيح و  $e$  شحنة الإلكترون وهي سالبة  
 $\therefore q = 8 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} = -12.8 \times 10^{-4} C = -1.28mC$

-2

$$\begin{aligned} q &= ne \\ &= (8 \times 10^{15} - 6 \times 10^{14}) 1.6 \times 10^{-19} \\ &= 74 \times 10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19} \\ &= 118 \times 10^{-5} C = 1.18mC \end{aligned}$$

مثال (2-7)

احسب قوة التنافر بين نواتي أركون عندما يكون البعد بينهما  $1 \times 10^{-3} \mu m$   
 علماً بان نواة الأركون تحتوي على 18 بروتوناً.

الحل :

لكل نواة أركون شحنة مقدارها  $+18e$  أي  $18 \times 1.6 \times 10^{-19} C$  وتساوي  $28.8 \times 10^{-19} C$ . إذن قوة التنافر عندما تكون المسافة الفاصلة  $1 \times 10^{-3} \mu m$  أي  $1 \times 10^{-9} m$  هي:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \frac{(28.8 \times 10^{-19})^2}{(1 \times 10^{-9})^2} = 7.4 \times 10^{-8} N$$

مثال (3-7)

ما هي المسافة الفاصلة بين إلكترونين في الفراغ إذا علمت أن القوة الكهروستاتيكية بينهما تساوي قوة جذب الأرض للإلكترون.

الحل :

من قانون كولوم تكون القوة الكهروستاتيكية بين إلكترونين في الفراغ هي:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

وقوة جذب الأرض للإلكترون هي :

$$F_g = mg$$

ومن الفرض فان :

$$F_e = F_g$$

$$\therefore \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = mg$$

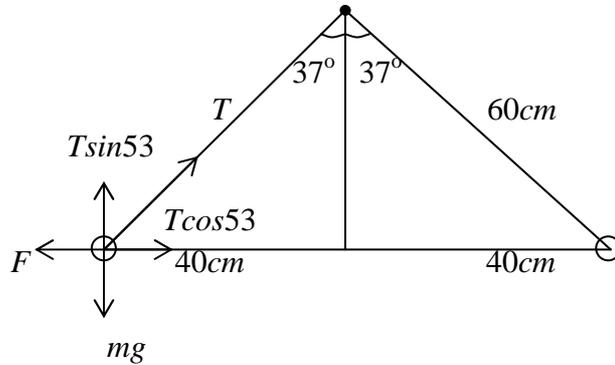
$$9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{r^2} = 9.1 \times 10^{-31} \times 9.8$$

$$\therefore r^2 = 0.258 \times 10^2 m = 25.8m \quad \text{or} \quad r = 5.1m$$

مثال (4-7)

كرتان متماثلتان كما مبين في الشكل (7-12)، كتلة كل منهما  $0.3gm$  علقتا بواسطة خيطين متساويين طول كل منهما  $60cm$ ، استقرت الكرتان عند الاتزان بحيث صنعت زاوية  $37^\circ$  مع العمود المقام على منتصف المسافة الفاصلة بينهما. فإذا كانت الكرتان تحملان شحنتان متماثلتان، احسب الشحنة على كل منهما.

الحل :



الشكل (7-12)

الكرة الموجودة على اليسار، تكون في وضع إتران تحت تأثير ثلاث قوى.

الأولى : قوة الشد  $T$

الثانية : قوة الجاذبية  $mg$  وهي:  $mg = 3 \times 10^{-4} \times 9.8 = 29.4 \times 10^{-4} N$

الثالثة : قوة التنافر لكولوم  $F$  التي نعزوها إلى الشحنة على كل من الكرتين وهي ؛

مجموع القوى باتجاه  $x$  :

$$T \cos 53 - F = 0$$

$$\therefore T 0.6 - F = 0$$

ومجموع القوى باتجاه  $y$  :

$$T \sin 53 - mg = 0$$

$$T 0.798 - 29.4 \times 10^{-4} = 0$$

$$\therefore T = \frac{29.4 \times 10^{-4}}{0.798} = 36.84 \times 10^{-4} N$$

نستعمل هذه النتيجة في إيجاد قوة كولوم  $F$

$$36.84 \times 10^{-4} \times 0.6 - F = 0$$

$$\therefore F = 22.1 \times 10^{-4} N$$

وبتطبيق قانون كولوم نجد شحنة كل من الكرتين :

$$F = 9 \times 10^9 \frac{q^2}{r^2} \Rightarrow q^2 = \frac{Fr^2}{9 \times 10^9} = \frac{22.1 \times 10^{-4} \times (0.8)^2}{9 \times 10^9} = 1.57 \times 10^{-13} C^2$$

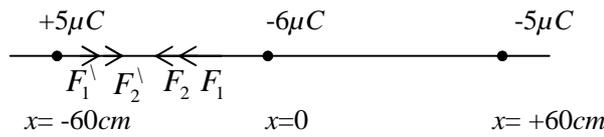
$$\therefore q = 0.396 \times 10^{-6} C = 0.396 \mu C$$

مثال (5-7)

وضعت الشحنات النقطية الثلاث  $+5\mu C$  و  $-6\mu C$  و  $-5\mu C$  عند

$x = 0$  و  $x = -60cm$  و  $x = +60cm$  على الترتيب كما في الشكل (7-13).

أوجد القوة المؤثرة على 1- الشحنة  $-6\mu C$  و 2- الشحنة  $+5\mu C$ .



الحل :

1- القوة  $F_1$  بين الشحنتين  $-5\mu C$  و  $-6\mu C$  هي قوة تنافر باتجاه  $-x$  والقوة  $F_2$  بين الشحنتين  $+5\mu C$  و  $-6\mu C$  هي قوة تجاذب باتجاه  $-x$  أيضاً،  
وحسب قانون كولوم نحسب مقدار كل من هاتين القوتين :

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(0.6)^2} = 0.75 N$$

$$F_2 = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(0.6)^2} = 0.75 N$$

إذن محصلة القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة  $-6\mu C$  هي المجموع  
ألا اتجاهي لكلتا القوتين أي:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

ولكونهما باتجاه المحور  $-x$  لذا فان مقدار محصلتها  $F$  تكون:

$$F = F_1 + F_2 = 0.75 + 0.75 = 1.5 N$$

2- بنفس الأسلوب فان القوة  $F_1^{\setminus}$  بين الشحنتين  $-5\mu C$  و  $+5\mu C$  هي قوة  
تجاذب باتجاه  $+x$  والقوة  $F_2^{\setminus}$  بين الشحنتين  $-6\mu C$  و  $+5\mu C$  هي قوة  
تجاذب أيضاً باتجاه  $+x$  وعليه :

$$F_1^{\setminus} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-6}}{(1.2)^2} = 0.156 N$$

$$F_2^{\setminus} = 9 \times 10^9 \frac{6 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-6}}{(0.6)^2} = 0.75 N$$

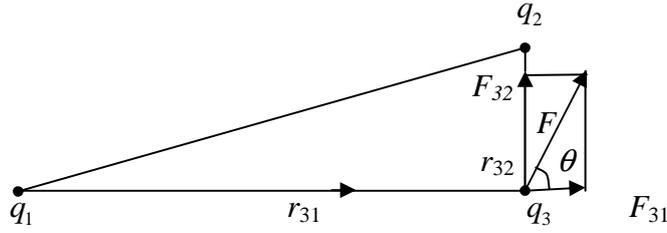
$$\vec{F} = \vec{F}_1^{\setminus} + \vec{F}_2^{\setminus}$$

$$\therefore F = 0.156 + 0.75 = 0.906 N$$

مثال (6-7)

يبين الشكل (7-14) ثلاث شحنات نقطية  $q_1$  و  $q_2$  و  $q_3$ . احسب القوة  
الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة  $q_3$  وعيّن اتجاهها علماً بأن  
 $q_1 = +1.5 \times 10^{-3} C$  و  $q_2 = -0.5 \times 10^{-3} C$  و  $q_3 = 0.2 \times 10^{-3} C$  و  $r_{31} = 1.2 m$   
و  $r_{32} = 0.5 m$ .

الحل :



الشكل (7-14)

القوة  $F_{31}$  بين الشحنتين  $q_3$  و  $q_1$  هي قوة تنافر، بينما القوة  $F_{32}$  بين الشحنتين  $q_2$  و  $q_3$  هي قوة تجاذب كما مبين في الشكل (7-14).

حسب قانون كولوم نحسب مقدار كل من هاتين القوتين:

$$F_{31} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{r_{31}^2} = 9 \times 10^9 \frac{1.5 \times 10^{-3} \times 0.2 \times 10^{-3}}{(1.2)^2} = 1.9 \times 10^3 N$$

$$F_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_3}{r_{32}^2} = 9 \times 10^9 \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 0.2 \times 10^{-3}}{(0.5)^2} = 3.6 \times 10^3 N$$

إذن محصلة القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة  $q_3$  هي المجموع الأتجاهي لكنتا القوتين ، أي:

$$\vec{F} = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}$$

و لكونهما متعامدتين نحسب مقدار محصلتهما  $F$  وفق قاعدة فيثاغورس الرياضية :

$$\therefore F = \sqrt{F_{31}^2 + F_{32}^2} = \sqrt{(1.9 \times 10^3)^2 + (3.6 \times 10^3)^2} = 4.1 \times 10^3 N$$

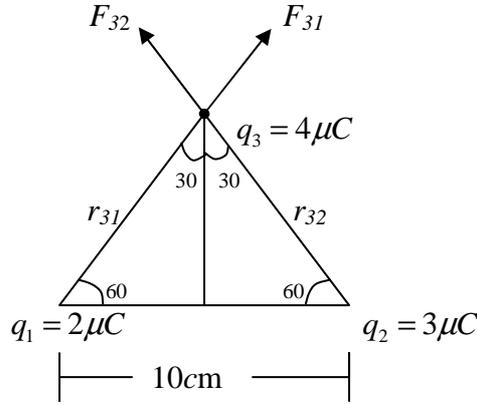
ولتعيين اتجاه  $F$  نحسب الزاوية  $\theta$  من الشكل كالآتي:

$$\tan \theta = \frac{F_{32}}{F_{31}} = \frac{3.6 \times 10^3}{1.9 \times 10^3} = 1.9$$

$$\therefore \theta = 62^\circ$$

وضعت ثلاث شحنات نقطية موجبة مقاديرها  $2, 3, 4 \mu C$  عند الأركان الثلاثة لمتثل متساوي الأضلاع طول ضلعه  $10 \text{ cm}$ . أوجد القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على الشحنة  $4 \mu C$  وعين اتجاهها.

الحل :



الشكل (7-15)

من ملاحظة إشارات الشحنات بالامكان تحديد اتجاه القوتين  $F_{31}$  و  $F_{32}$  المؤثرتان على  $q_3$  من قبل الشحنتين  $q_1$  و  $q_2$  على الترتيب كما مبين في الشكل (7-15). وباستعمال قانون كولوم يمكن حساب مقادير هذه القوى:

$$F_{31} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{r_{31}^2} = 9 \times 10^9 \frac{2 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-6}}{(0.1)^2} = 7.2 \text{ N}$$

$$F_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_3}{r_{32}^2} = 9 \times 10^9 \frac{3 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-6}}{(0.1)^2} = 10.8 \text{ N}$$

أما محصلة هاتين القوتين فتساوي المجموع الأتجاهي لهما ، أي :

$$\vec{F} = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}$$

ولحساب مقدار المحصلة نجد أولاً مجموع المركبات الأفقية  $F_x$  للقوتين:

$$F_x = F_{31} \sin 30 - F_{32} \sin 30 = 7.2 \times 0.5 - 10.8 \times 0.5 = -1.8 \text{ N}$$

ثم نجد مجموع المركبات العمودية  $F_y$  للقوتين:

$$F_y = F_{31} \cos 30 + F_{32} \cos 30 = 7.2 \times 0.866 + 10.8 \times 0.866 = 15.59 N$$

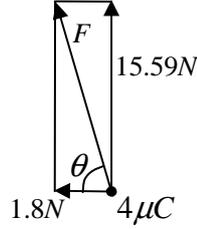
إن الإشارة السالبة تعني إن اتجاه  $F_x$  نحو اليسار أي بالاتجاه السالب لمحور  $x$ ، والإشارة الموجبة تعني إن اتجاه  $F_y$  نحو الأعلى أي بالاتجاه الموجب لمحور  $y$ .

$$\therefore F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(-1.8)^2 + (-15.59)^2} = 15.7 N$$

ولتعيين اتجاه القوة المحصلة تحسب الزاوية التي تعملها  $F$  مع محور  $x$  كما موضح في الشكل أدناه.

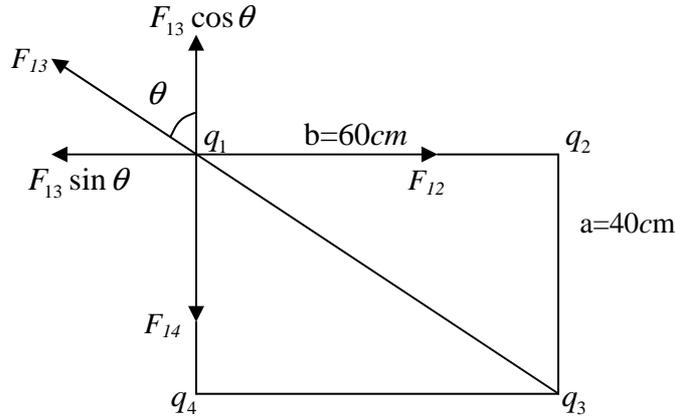
$$\tan \theta = \frac{15.59}{1.8} = 8.66$$

$$\therefore \theta = +83.41^\circ$$



مثال (8-7)

الشحنات النقطية الأربع المبينة في الشكل (16-7) قيمها  $q_1 = q_3 = +5 \mu C$  و  $q_2 = q_4 = -6 \mu C$ . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة  $q_1$  من قبل الشحنات الثلاث الأخرى.



الحل :

الشكل (16-7)

من ملاحظة إشارات الشحنات يمكن تحديد اتجاه القوى  $F_{12}$  و  $F_{13}$  و  $F_{14}$  المؤثرة على  $q_1$  من قبل الشحنات  $q_2$  و  $q_3$  و  $q_4$  على الترتيب.  
باستعمال قانون كولوم تحسب مقادير هذه القوى:

$$F_{12} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(0.6)^2} = 0.75 N$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \frac{(5 \times 10^{-6})^2}{(0.721)^2} = 0.4328 N$$

$$F_{14} = 9 \times 10^9 \frac{5 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(0.4)^2} = 1.687 N$$

لحساب مقدار محصلة القوى الكهروستاتيكية المؤثرة على  $q_1$  نجد مجموع المركبات الأفقية  $F_x$  والمركبات العمودية  $F_y$  كما يأتي :

$$F_x = F_{12} - F_{13} \sin \theta = 0.75 - 0.4328 \times \sin \frac{0.6}{\sqrt{(0.6)^2 + (0.4)^2}}$$

$$= 0.75 - 0.4328 \times 0.3069 = 0.617 N$$

$$F_y = F_{13} \cos \theta - F_{14} = 0.4328 \cos \frac{0.4}{\sqrt{(0.6)^2 + (0.4)^2}} - 1.687$$

$$= 0.4328 \times 0.9784 - 1.687 = -1.2635 N$$

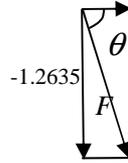
من إشارات قيم المركبات  $F_x$  و  $F_y$  يتبين إن اتجاه  $F_x$  يمين المحور  $x$  في الربع الموجب و  $F_y$  أسفل المحور  $y$  في الربع السالب .

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(0.617)^2 + (-1.2635)^2} = 1.406 N$$

ولتعيين اتجاه القوة المحصلة تحسب الزاوية  $\theta$  التي تعملها محصلة القوة  $F$  مع محور  $x$  الموجب كما موضح في الشكل أدناه .

$$\tan \theta = \frac{-1.2635}{0.617} = -2.0478$$

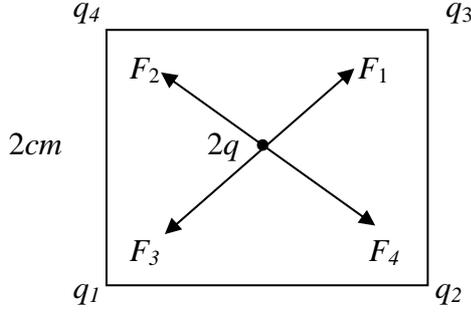
$$\therefore \theta = -63.97^\circ$$



مثال (7-9)

أربع شحنات نقطية مقدار كل منها  $q$  كولوم موضوعة عند أركان مربع طول ضلعه  $2\text{cm}$  كما في الشكل (7-17). 1- أوجد القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على شحنة نقطية قدرها  $2q$  موضوعة عند مركز المربع، 2- كم يصبح مقدار القوة إذا أزيلت إحدى الشحنات الأربع؟

الحل :



الشكل (7-17)

$$F=0$$

-1

وذلك لان القوة الناتجة عن تأثير الشحنة  $q_1$  تساوي القوة الناتجة عن تأثير الشحنة  $q_3$  لأنهما بعكس الاتجاه. وكذلك بالنسبة للقوتين الناتجتين عن الشحنتين  $q_2$  و  $q_4$ .

2- عند إزالة الشحنة  $q_4$  مثلاً تصبح محصلة تأثير القوتين  $F_1$  و  $F_3$  تساوي صفراً لأهما بعكس الاتجاه، ويبقى تأثير  $q_2$  المتمثل بالقوة  $F_2$  أي أن:

$$F = F_2 = 9 \times 10^9 \frac{2q^2}{2 \times 10^{-2}} = 9 \times 10^{11} q^2 N$$

مثال (7-10)

كرتان صغيرتان متماثلتان من نخاع البيلسان تفصلهما مسافة قدرها  $30\text{mm}$  في الهواء. فإذا شحنت الكرة الأولى بشحنة موجبة قدرها  $3 \times 10^{-3} \mu\text{C}$ ، والثانية بشحنة سالبة قدرها  $12 \times 10^{-3} \mu\text{C}$ . احسب قوة التجاذب بينهما. والآن إذا تلامست الكرتان ثم فصلتا على البعد نفسه، فكم تصبح القوة بينهما؟ وهل هي قوة تنافر أم تجاذب؟

الحل :

$$F = 9 \times 10^9 \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(3 \times 10^{-9})(12 \times 10^{-9})}{(3 \times 10^{-2})^2} = 3.6 \times 10^{-4} N$$

عند تلامس الكرتان المتماثلتان سوف تأخذ الشحنة الموجبة مقدار من الشحنة السالبة حتى تتعادل وما تبقى من الشحنة السالبة يتوزع بالتساوي بينهما فيكون المتبقي من الشحنة السالبة هو:

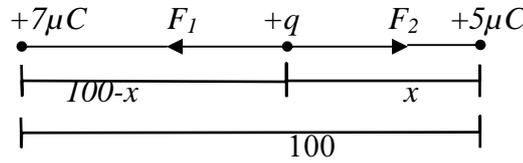
$$12 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3} = 9 \times 10^{-3} \mu C$$

وبهذا تصبح شحنة كلتا الكرتين  $4.5 \times 10^{-3} \mu C$  ، وتكون القوة الكهروستاتيكية بينهما قوة تنافر ومقدارها:

$$F = 9 \times 10^9 \frac{(4.5 \times 10^{-9})^2}{(3 \times 10^{-2})^2} = 9 \times 10^9 \frac{20.25 \times 10^{-18}}{2 \times 10^{-4}} = 2.025 \times 10^{-4} N$$

### مثال (7-11)

شحنتان نقطيتان وضعتا في الفراغ كما في (الشكل 7-18). الأولى  $+5 \mu C$  عند  $x=0$  تماماً والثانية  $+7 \mu C$  عند  $x=100cm$  ، أين توضع شحنة ثالثة  $+q$  بحيث تكون القوة المحصلة المؤثرة عليها من الشحنتين الأخرين تساوي صفراً؟



الحل :

الشكل (7-18)

بالتأكيد تقع الشحنة الثالثة بين الشحنتين لان القوتين  $F_1$  و  $F_2$  المؤثرتين على  $+q$  يكونان باتجاهين متعاكسين. هذا من ناحية، ومن ناحية أخرى يجب ان يكون بُعد الموقع عن الشحنة  $+5 \mu C$  اقل من بعده عن الشحنة  $+7 \mu C$  لكي يمكن ان يتم التعادل بين القوتين المؤثرتين على الشحنة  $+q$  طبقاً لقانون كولوم.

لنفرض أن الشحنة  $+q$  تقع على مسافة  $x$  من الشحنة  $+5\mu C$  و  $(100-x)$  من الشحنة  $+7\mu C$ . وبتطبيق قانون كولوم نجد القوتين  $F_1$  و  $F_2$

$$F_1 = k \frac{5 \times 10^{-6} q}{x^2}$$

$$F_2 = k \frac{7 \times 10^{-6} q}{(100 \times 10^{-2} - x)^2}$$

من الشكل (7-18) نجد إن القوة المحصلة المؤثرة على الشحنة  $+q$  تصبح صفراً عندما  $F_1 = F_2$ .

إذن:

$$k \frac{5 \times 10^{-6} q}{x^2} = k \frac{7 \times 10^{-6} q}{(100 \times 10^{-2} - x)^2}$$

$$\frac{5}{x^2} = \frac{7}{(1-x)^2}$$

$$5(1-x)^2 = 7x^2$$

$$\sqrt{5}(1-x) = \sqrt{7}x$$

$$2.236(1-x) = 2.645x$$

$$x = 0.46m \quad \text{or} \quad x = 46cm$$

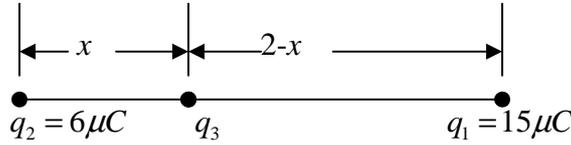
## Exercices التمارين

(1-7) : احسب القوة الكهروستاتيكية المؤثرة بين إلكترونين موضوعين في الفراغ تفصل بينهما مسافة  $3.5 \times 10^{-14} m$ .

(2-7) : جد قوة التنافر بين نواتي الهليوم والنيون بينهما مسافة  $3 \times 10^{-9} m$ . الشحنة على نواة الهليوم  $+2e$  و نواة النيون  $+10e$ ، وإن المجموعة موجودة في الفراغ.

(3-7) : في نموذج بوهر لذرة الهيدروجين، إذا كان نصف قطر مدارها الذري يساوي  $5.3 \times 10^{-11} m$  أوجد : 1- قوة جذب بروتون ذرة الهيدروجين لإلكترونها الوحيد. 2- التعجيل المركزي للإلكترون. 3- سرعة الإلكترون.

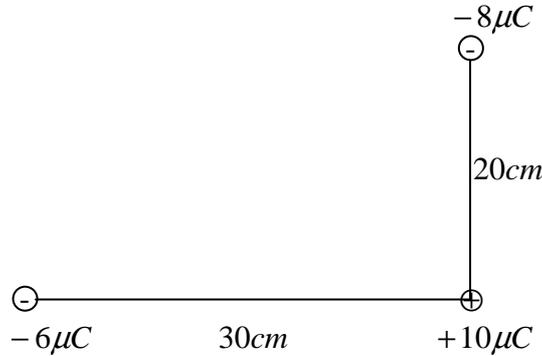
(4-7) : في الشكل (7-19)، على أي مسافة نضع  $q_3$  بين الشحنتين  $q_1$  و  $q_2$  بحيث تكون محصلة القوى المؤثرة عليها من قبل الشحنتين الأخرتين تساوي صفراً.



الشكل (7-19).

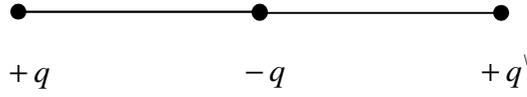
(5-7) : أربع شحنات نقطية متساوية في المقدار ( $3\mu C$ ) موضوعة عند أركان مربع طول ضلعه  $40cm$ . اثنتان موجبتان في وضع متقابل عند طرفي احد القطرين، والاثنان الأخرتان سالبتان. احسب القوة المؤثرة على كل شحنة سالبة .

(6-7) : أوجد القوة المحصلة المؤثرة على الشحنة  $+10\mu C$  كما في شكل (7-20).



الشكل (7-20)

(7-7): وضعت ثلاث شحنات نقطية على مسافات متساوية كما في الشكل (7-21)، ما مقدار الشحنة  $+q$  لكي تكون محصلة القوى على الشحنة  $q$  صفراً.



الشكل (7-21)

(8-7): كرتان موصلتان متماثلتان، شحنتنا بشحنتين مقدارهما  $5 \times 10^{-18} C$  و  $6 \times 10^{-18} C$  ووضعنا بحيث كانت المسافة بينهما  $0.2m$ . فإذا غيرت هذه المسافة إلى  $0.5m$  فما هي النسبة بين قيمة القوة الكهربائية المؤثرة بين الكرتين في الموضع الأول إلى قيمتها في الموضع الثاني.

(9-7): كرتان معدنيتان صغيرتان متماثلتان شحنتهما  $+3nC$  و  $-12nC$  وتفصلهما مسافة  $3m$ ، احسب قوة التجاذب بينهما. والآن إذا تلامست الكرتان ثم فصلتا إلى المسافة نفسها، فكم تصبح القوة بينهما؟

(10-7): كرة معدنية صغيرة تحمل شحنة مقدارها  $+2C$  وضعت على بعد  $20cm$  من كرة مائلة تحمل شحنة مقدارها  $-1C$  ففي أية نقطة على استقامة الخط الواصل بين الشحنتين يجب وضع كرة أخرى موجبة الشحنة، بحيث تكون القوة المؤثرة عليها صفراً.

(11-7): تؤثر شحنتان نقطيتان  $q_1$  و  $q_2$  تفصلهما مسافة  $1m$  بقوة مقدارها  $0.09N$  على أحدهما الأخرى، والمجموع الجبري للشحنتين  $q_1 + q_2 = 70 \mu C$ . أوجد مقدار كل من الشحنتين  $q_1$  و  $q_2$ . هل القوة تنافرية أم تجاذبية؟

(12-7): كرتان متماثلتان كتلة كل منهما  $240gm$  وقطر كل منهما  $2cm$  تفصلهما مسافة  $6cm$  وتحمل كل منهما شحنة منتظمة مقدارها  $7 \mu C$ ، قد أطلقت إحدى الكرتين. أوجد التعجيل الذي تتحرك به الكرة (يمكنك إهمال الجاذبية).

(7-13) : كرتان متماثلتان على هيئة نقطية وكتلة كل منهما مسافة  $240\text{cm}$ ،  
وتحملان شحنات متشابهة  $q$  من حيث المقدار ومختلفة في الإشارة. ما مقدار  
الشحنة  $q$  التي من شأنها جعل قوى التجاذب الكهروستاتيكية والتجاذب  
ألتثاقلي متساوية.