



# محاضرات فى الكهربية

## الفرقة الثانية تربية عام شعبة رياضيات

دكتور

عادل جادالكريم عبادى محمد  
قسم الفيزياء

التزم الأول

العام الجامعي 2023 - 2024 م

## المحتويات

### الفصل الاول

ملخص لبعض موضوعات الكهرباء التى تم دراستها

النظرية الذرية والكهرباء الساكنة وقانون كولوم .. 2.....

المجال الكهربى وكثافة الشحنة وخطوط القوى الكهربائية 8.....

### الفصل الثاني

10 حركة الجسيمات المشحونة بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية

تطبيقات على استخدامات المجالات الكهربائية والمغناطيسية

### الفصل الثالث

دوائر التيار المستمر ..... 63 .....

### الفصل الرابع

76 ..... المغناطيسية الكهربائية .....

## الفصل الاول

### النظرية الذرية والكهرباء الساكنة

#### (١-١) مقدمة

#### Introduction

عرفت الظواهر الطبيعية للكهرباء قبل القرن التاسع عشر مثل تكهرب الكهرمان (electrification of amber) والبرق (lightning) وصدمة ثعبان البحر (the shock of an electric eel). ففي عام ٦٠٠ قبل الميلاد اكتشفت ظاهرة جذب الكهرمان للأجسام الخفيفة كقطعة الورق بعد دلكها بقطعة من فرو الحيوانات. وبعد هذا الاكتشاف حتى ظهور كتاب العالم جلبرت (Sir W. Gilbert) عام ١٦٠٠م لم تكتشف ظواهر مهمة عن الكهرباء الساكنة حيث ثبت تجريبيا تكهرب معظم المواد بالاحتكاك وفي بداية القرن الثامن عشر توصل العلماء إلى صنع أجهزة لدراسة الظواهر الكهربائية مثل جهاز الإلكتروسكوب الورقي وميزان الالتواء (torsion balance) وفي هذا القرن أيضا تم فصل الكهرباء إلى قسمين أحدهما كهرباء ساكنة والأخرى كهرباء

---

تيارية لاختلافهما من حيث الاتجاه وطرق الحصول عليهما حيث تفسر الكهرباء الساكنة ظاهرة جذب الكهرمان بينما الكهرباء التيارية توضح طبيعة البرق والكهرباء الناتجة عن بعض الحيوانات .

وتفسير ظاهرة الكهرباء الساكنة يعود إلى التركيب الذري للمادة (atomic structure of matter) حيث تتألف المادة من جزيئات (molecules) وذرات (atoms) وكل ذرة تحتوي على نواة (nucleus) بها بروتونات (protons) ونيوترونات (neutrons) وتدور حول هذه النواة إلكترونات (electrons). أما نوع شحنات هذه الجسيمات، فالإلكترون يحمل شحنة سالبة (negative charge) ويرمز لها بالرمز (-e) والبروتون يحمل شحنة موجبة (positive charge) ويرمز لها بالرمز (+e) أما النيوترون فهو متعادل الشحنة (neutral charge). وذرة أي عنصر في حالتها الطبيعية متعادلة الشحنة ولذلك فإن عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة يكون مساويا لعدد البروتونات داخل النواة ويسمى هذا العدد بالعدد الذري (atomic number) أما العدد الكلي لمجموع البروتونات والنيوترونات فيسمى بالعدد الكتلي (mass number). وبالتالي فإن المادة لا تكون مشحونة ولكن الشحنة تظهر فقط عليها إذا تمكنا من فصل أحد نوعي الشحنة في ذرات هذه المادة عن النوع الآخر. ويتم هذا الفصل بواسطة الاحتكاك أو الدلك أو تعرض هذه المواد لطاقة ضوئية أو حرارية أو إشعاع ذري .

ولقد كان للاحتكاك الفضل الأول في كشف نوعي الشحنات فالكهرمان المدلوك بفرو الحيوان يكتسب إلكترونات من الفرو فتصبح شحنته سالبة بينما يفقد الفرو بعض إلكتروناته فتصبح شحنته موجبة، ومعنى هذا أن بعض الإلكترونات انتقلت بالدلك من الفرو إلى الكهرمان، وقد وجد أيضا أن الزجاج المدلوك بالحرير يكتسب شحنة موجبة بينما يكتسب الحرير شحنة سالبة، أي أن بعض الإلكترونات انتقلت بالاحتكاك من الزجاج إلى الحرير، ولقد أثبتت التجارب العملية وجود قوى تجاذب وتنافر بين الأجسام المشحونة فالشحنة الموجبة تتجاذب مع الشحنة السالبة وتتنافر مع الشحنة الموجبة. حيث تتجاذب الشحنات المختلفة في النوع وتتنافر الشحنات المتشابهة.

ومن الحقائق المهمة أن الشحنة الكهربائية تظهر على هيئة أعداد صحيحة للشحنات الإلكترونية وأن شحنة الإلكترون هي أصغر شحنة سالبة موجودة في الطبيعة وشحنة البروتون هي أصغر شحنة موجبة وقيمتها هي :

$$(-e) = (+e) = 1.6029 \times 10^{-19} \text{ C}$$

وتكون شحنات الجسيمات الأولية إما صفرا مثل النيوترونات أو أعدادا صحيحة لشحنة الإلكترون. كذلك فإن شحنات الأيونات (ions) أو النويات الذرية (atomic nuclei) عبارة عن أعداد صحيحة إما لشحنة الإلكترون أو البروتون.

والجدول (1-1) يوضح بعض الجسيمات الأولية والمكتشفة عمليا مع قيمة الشحنة وكذلك كتلة الجسيم. علما بأن كتلتي الإلكترون والبروتون هما :

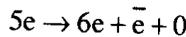
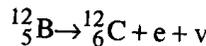
$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$M_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

ومن الحقائق المهمة أيضا أن الشحنات لا تبنى (destroyed) ولا تستحدث (created) وقد اتضح ذلك مما تقدم ذكره وهو أن الشحنة تظهر على الدالك والمدلوك نتيجة لانتقال الإلكترونات من جسم إلى آخر، ويعرف هذا بقانون بقاء الشحنة (law of charge conservation) والذي ينص على أن :

«القيم الابتدائية والنهائية لمجموع الشحنة الكهربائية الداخلة في التفاعل يجب أن تكون واحدة».

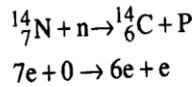
وهناك أمثلة أخرى منها  
أ - انحلال البورون غير المستقر (unstable boron decay) إلى كربون مستقر  
حسب المعادلة



جدول (1-1): أسماء بعض الجسيمات الأولية مع قيمة كتلتها وشحنتها

الكتلة	الشحنة	الرمز	Particle name	اسم الجسيم
$1.000 \times M_p$	e	P	Proton	بروتون
1.001 "	0	n	Neutron	نيوترون
0.000545 "	-e	$e^-$	Electron	إلكترون
0.000545 "	e	$e^+$	Positron	بوزترون
0.1126 "	-e, +e	$\mu^-, \mu^+$	Muon	ميون
0.1438 "	+e, -e, 0	$\pi^+, \pi^-, \pi^0$	Pi-meson	باي ميزون
0 "	0	$\gamma$	Photon	فوتون
0 "	0	$\bar{\nu}$	Neutrino	نيوترينو
0 "	0	$\nu$	Antineutrino	ضديد النيوترينو
1.189 "	0	$\Lambda^0$	Lambda	لامبدا
0.82 "	+e, 0, -e	$\rho^+, \rho^0, \rho^-$	Rho meson	رومبوزون
0.836 "	0	$\omega$	Omega meson	اوميغا ميزون

ب - الحصول على كربون 14 (carbon 14) نتيجة لتصادم نيوترون مع ذرة نيتروجين



ج - الانحلال الإشعاعي لتصادم نيوترون مع اليورانيوم  ${}^{235}_{92}\text{U}$  والذي ينتج عنه  ${}^{236}_{92}\text{U}$  الذي ينشط (split) إلى زينون  ${}^{140}_{54}\text{Xe}$  (xenon) وأسترونشيوم  ${}^{94}_{38}\text{Sr}$  (strontium) ونيوترونات وفوتونات.

### (٣-١) المجال الكهربائي

#### Electric Field

يُصاحَب أي جسم مشحون مجال كهربائي يحيط به ويؤثر على أية شحنة توضع عند أي نقطة قريبة منه بقوة تنافر أو قوة تجاذب حسب نوعية الشحنات. وهذا يشبه إلى حد كبير وجود جسم ما في مجال جاذبية الأرض حيث تجذبه إليها ما لم يخرج عن نطاق أو مجال جاذبية الأرض. ويمكن الكشف عن وجود مجال كهربائي عند نقطة ما بوضع جسم مشحون بشحنة  $q_0$ ، وتسمى شحنة اختبار (test charge)، فإذا تأثرت هذه الشحنة بقوة كهربائية فيعني هذا وجود مجال كهربائي عندها.

ولما كانت القوة كمية متجهة (أي ذات مقدار واتجاه) كان المجال الكهربائي كمية متجهة أيضا له مقدار واتجاه. فإن كان المجال الكهربائي ناتجا عن شحنة قدرها  $q$  فإنه يؤثر على شحنة اختبار  $q_0$ ، تبعد عنها مسافة  $r$ ، بقوة قدرها  $F$ . وتسمى القيمة  $\frac{F}{q_0}$  بشدة المجال الكهربائي  $E$  (intensity of electric field) أي أن:

### (٥-١) كثافة الشحنة

#### Charge Density

عرف من البنود السابقة أن الجسم المشحون يحمل شحنات هي مضاعفات صحيحة من شحنة الإلكترون فإذا اعتبر الجسم المشحون يحمل عددا كبيرا جدا من الشحنات فإنه يمكن النظر إلى الشحنة الكهربائية على أنها موزعة توزيعا مستمرا.

ويمكن بهذا تعريف ثلاثة أنواع من الكثافة الكهربائية:

#### (١-٥-١) الكثافة الحجمية Volume charge density

ويرمز لها بالرمز  $\rho$  وتساوي:

$$\rho = \frac{dq}{dV} \dots \dots \dots (١-٣٦)$$

حيث  $dq$  عنصر الشحنة المحصورة داخل الحجم  $dV$  الذي يحيط بالنقطة المراد تقدير  $\rho$  فيها ووحدة قياس الكثافة الحجمية هي  $C/m^3$ .

#### (٢-٥-١) الكثافة السطحية Surface charge density

ويرمز لها بالرمز  $\sigma$  وهي تعبر عن توزيع الشحنة على سطح/بحيث يمكن إهمال

سمكه بالنسبة للأبعاد الأخرى.

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \dots\dots\dots (1-37)$$

حيث  $dq$  الشحنة الموزعة على السطح  $dS$  المحيط بالنقطة المراد تقدير  $\sigma$  فيها ووحدة قياس الكثافة السطحية هي  $C/m^2$ .

### (3-5-1) الكثافة الطولية Linear charge density

ويرمز لها بالرمز  $\lambda$  وتمثل توزيع الشحنة على سلك مهمل المقطع بالقياس لأبعاده الأخرى.

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \dots\dots\dots (1-38)$$

حيث  $dq$  الشحنة الموزعة على الطول  $dl$  المحيط بالنقطة المراد قياس  $\lambda$  فيها ووحدة قياس الكثافة الطولية هي  $C/m$ .

### (6-1) المجال الناتج عن توزيع مستمر للشحنة الكهربائية

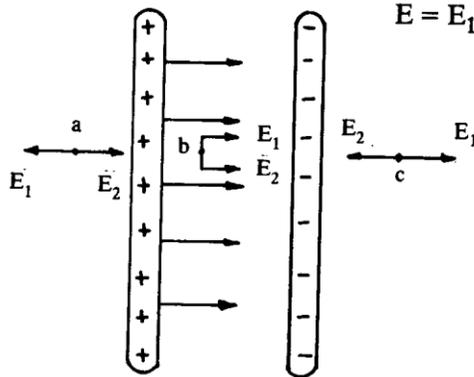
#### Field due to a Continuous Distribution of Charge

سبق أن دُرِسَ المجال الكهربائي لشحنات كهربائية ممثلة على هيئة نقطة أو نقط (point charges) ولدراسة المجال الناتج عن شحنات موزعة على أجسام ذات أحجام محدودة (finite size) فإن المعادلة (1-17) تصبح:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \vec{i}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \vec{r} \dots\dots (1-39)$$

ف عند النقطتين  $a, c$  مثلا تكون المركبتان  $E_1$  و  $E_2$  متساويتين في المقدار ومتضادين في الاتجاه أي عند كل نقطة من هذه النقط الخارجية يكون  $E = 0$ .

بينما عند نقطة ما بين الصفيحتين مثل  $b$  تكون المحصلة:



$$E = E_1 + E_2 \dots \dots \dots (1-56)$$

ولكن من المعادلة (1-55) نجد أن:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\therefore E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \dots \dots (1-57)$$

شكل (1-21): تابع للتطبيق (1-9-5)

أي أن شدة المجال الكهربائي عند أي نقطة بين الصفيحتين تعتمد على كثافة الشحنة  $\sigma$  فقط.

والمجال الكهربائي بين الصفيحتين هو مجال منتظم (uniform) ولذلك يعرف بأنه ذلك المجال الذي تكون فيه خطوط القوى الكهربائية متوازية وعلى أبعاد متساوية من بعضها، أي أن شدة المجال ثابتة في أي مكان داخل المجال مقدارا واتجاها.

### (1-9-6) المجال والشحنة داخل وخارج موصل

#### Field and charge within and without a conductor

إذا تعرضت الشحنات الحرة داخل موصل ما لمجال كهربائي فإنها ستتحرك وإذا استمر المجال الكهربائي بطريقة أو بأخرى داخل الموصل حدثت حركة مستمرة للشحنات الحرة (هذه الحركة تسمى تيارا) أما إذا لم يكن هناك مجال بداخل الموصل فلن تتحرك الشحنات الحرة وهذا يعني أنه إذا كانت الشحنات الحرة بداخل الموصل ساكنة، فإن المجال بداخل الموصل يجب أن يساوي صفرا.

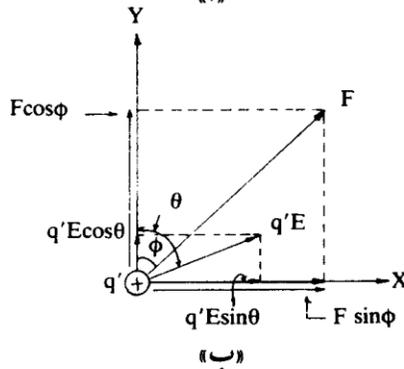
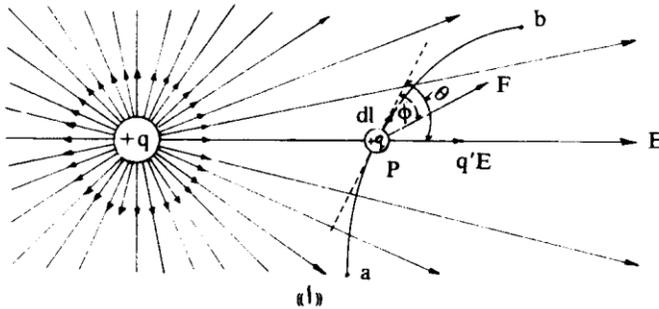
إذا وضعت شحنة موجبة قدرها  $+q$  في مجال كهربائي شدته  $E$ ، كما في شكل (٢-١)، فإنها سوف تتحرك في اتجاه المجال تحت تأثير قوة كهربائية قدرها  $q'E$  ولكن إذا أثر على الشحنة بقوة أخرى خارجية  $F$  «غير كهربائية» فإن الشحنة  $q'$  ستتحرك في اتجاه محصلة القوتين  $F$  و  $q'E$ . وحيث إن  $q'E$  تختلف من نقطة لأخرى فإن الشحنة ستتحرك المنحنى  $ab$  مسارا لها (مثلا). فإذا كانت الزاوية بين  $q'E$  والمماس لهذا المنحنى هي  $\theta$  والزاوية بين  $F$  والمماس لها هي  $\phi$  فإنه بتحليل هاتين القوتين في اتجاه عمودي وآخر مواز للمماس، كما هو موضح بشكل (٢-١)، يمكن الحصول على:

أ - المحصلة العمودية للقوى (resultant normal forces):

$$\Sigma F_n = F \sin \phi + q'E \sin \theta \quad \dots \dots (٢-١)$$

ب - ومحصلة القوى المماسية (resultant tangential forces)

$$\Sigma F_t = F \cos \phi + q'E \cos \theta \quad \dots \dots (٢-٢)$$



شكل (٢-١): أ -  $q'$  وقعت في مجال شدته  $E$  ناتج عن الشحنة  $+q$  فتأثرت بقوة قدرها  $q'E$  ثم خضعت الشحنة  $q'$  لقوة أخرى خارجية  $F$  فتحررت الشحنة في اتجاه محصلة القوتين فالتحقت المسار  $ab$ .  
ب - تحليل القوتين  $q'E$ ،  $F$  إلى مركباتها.

## الفصل الثاني

حركة الجسيمات المشحونة  
بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية  
وتطبيقات مختلفة عليها

## خصائص أشعة الكاثود

عام 1897 أراح الفيزيائي الإنجليزي تومسون J.J. Thomson الغموض عن الأشعة المهبطية، فاقترح أن تكون هذه الأشعة عبارة عن جسيمات صغيرة؛ أصغر من الذرة، وذات شحنة سالبة، وقد قام بتحديد الخصائص الآتية للأشعة المهبطية:

[1] تمتلك طاقة حركية.

[2] لها القدرة على تسخين الأجسام التي تصطدم بها وهذا يعني أن لها طبيعة جسيمية أو مادية.

[3] عند وضع حاجز في مسارها يتكون للحاجز ظل دلالة على سيرها في خطوط مستقيمة.

[4] إذا أثر عليها مجال كهربائي أو مغناطيسي فإنها تنحرف نحو المجال الموجب دلالة على كونها سالبة الشحنة.

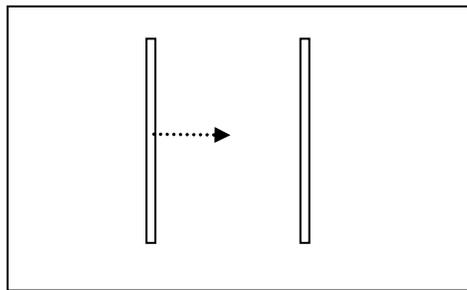
وفيما يلي نقدم بشيء من التفصيل حركة الإلكترون في المجالات الكهربائية والمغناطيسية وفيها نوضح كيفية تأثير تلك المجالات على تيار الكترونات ومن حيث طبيعية الحركة او الانحراف.

### حركة الإلكترون في المجالات الكهربائية الإستاتيكية

ندرس فيما يلي ان شاء الله حركة الإلكترون الحر في الفراغ بين أقطاب عليها جهود كهربية تسبب في مجالات كهربية. مثل هذه المجالات تستخدم في الأنابيب الإلكترونية لتنظيم حركة الإلكترونات إما لتغيير سرعتها وذلك باستخدام مجالات كهربية موازية للحركة الإلكترونية وإما لتغيير اتجاهها وذلك باستخدام مجالات كهربية عمودية علي اتجاه حركة الإلكترونات الحرة في الفراغ فيما يعرف بالعدسات المغناطيسية التي تستخدم في تجميع أو تفريق الأشعة الإلكترونية.

### 1-2-1 اتجاه حركة الإلكترونات موازيا لاتجاه المجال الكهربى المؤثر:

الحالة الأولى: مجال كهربى منتظم وسرعة الإلكترون الابتدائية تساوى صفراً.



الشكل السابق يوضح لوحين متوازيين بينهما المسافة (d) وفرق الجهد بينهما (V). هناك إلكترون عند القطب السالب شحنته (e) كولوم ويبدأ حركته تحت تأثير المجال من السكون أي أن سرعته الابتدائية تساوي صفراً. والمطلوب هو دراسة حركة هذا الإلكترون تحت تأثير المجال الكهربائي أي تعيين كل من:

- 1- عجلة الحركة للإلكترون.
- 2- المسافة التي يقطعها الإلكترون عند زمن (t).
- 3- سرعة الإلكترون عند زمن (t).
- 4- السرعة النهائية للإلكترون قبل اصطدامه باللوح الموجب.
- 5- زمن العبور (t<sub>d</sub>).

نتيجة لفرق الجهد بين اللوحين يتولد مجال كهربائي منتظم من العلاقة:

$$E = \frac{V}{d} \quad \text{volt / m} \quad (1)$$

وتحت تأثير قوة المجال (eE) سوف يتحرك الإلكترون في الاتجاه (X) مكتسباً عجلة مقدارها (a) تعطي من العلاقة الآتية

$$F = ma = eE$$

$$\therefore a = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \quad \text{m / sec}^2 \quad (2)$$

ولحساب سرعة الإلكترون بعد زمن (t) تستخدم العلاقة :

$$v = v_0 + at$$

$$\therefore v = at \quad (\text{where } v_0 = \text{zero})$$

$$\therefore v = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} t \quad (3)$$

ولحساب المسافة التي يقطعها الإلكترون بعد زمن (t)

$$X = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$\therefore X = \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{where } v_0 = \text{zero})$$

$$\therefore X = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} t^2 \quad (4)$$

ومن المعادلة ( 4 )

$$t^2 = \frac{2 \times md}{eV} \quad (5)$$

$$\therefore t = \sqrt{\frac{2 \times md}{eV}} \quad (6)$$

وبالتعويض من ( 6 ) في ( 3 )

$$\therefore v = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \sqrt{\frac{2 \times md}{eV}} \quad (7)$$

Or

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{m^2} \cdot \frac{V^2}{d^2} \cdot \frac{2 \times md}{eV}} \quad (8)$$

$$= \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \frac{V}{d} X} \quad (9)$$

وبالتعويض عن قيمة  $\frac{e}{m}$

$$\therefore v = 5.93 \times 10^5 \sqrt{\frac{V}{d} X} \quad m / sec \quad (10)$$

$$= 5.93 \times 10^5 \sqrt{E X} \quad (11)$$

ولحساب سرعة الإلكترون النهائية  $V_F$  قبل اصطدامه مباشرة باللوح الموجب أي بعد أن يقطع مسافة (d) يعوض عن (X) في المعادلة (10) بـ (d)

$$\therefore v_F = 5.93 \times 10^5 \sqrt{\frac{V}{d} d}$$

$$\therefore v_F = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V} \quad m / sec \quad (12)$$

وأخيراً لحساب زمن العبور ( $t_d$ ) وهو الزمن الذي يستغرقه الإلكترون ليقطع المسافة بين اللوحين تستخدم المعادلة التالية:

$$t_d = \frac{\text{المسافة التي يقطعها لوح ي ن}}{\text{السرعة المتوسطة}}$$

$$t_d = \frac{d}{\frac{v_0 + v_F}{2}} = \frac{2d}{v_F} \quad (13)$$

لأن السرعة الابتدائية للإلكترون تساوي صفراً.

## الحالة الثانية: المجال الكهربى منتظم والسرعة الابتدائية لا تساوى صفرا

التغيير الوحيد في هذه الحالة هو أننا نأخذ في الاعتبار قيمة  $v_0$  لسرعة الإلكترون الابتدائية، ومن ثم فإن حساب الكميات الفيزيائية السابقة يتم وفقاً للمعادلات التالية :

العجلة التي يتحرك بها الإلكترون هي :

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \text{ m/sec}^2 \quad (14)$$

سرعة الإلكترون عند أية لحظة (t) هي

$$v = v_0 + at$$
$$v = v_0 + \frac{e}{m} \frac{V}{d} t \quad \text{m / sec} \quad (15)$$

المسافة التي يقطعها الإلكترون عند زمن (t)

$$X = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$
$$X = v_0 t + \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{V}{d} t^2 \quad (16)$$

سرعة الإلكترون عند أي بعد (x) من اللوح السالب لتعطي من العلاقة .

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$
$$v^2 = v_0^2 + 2 \frac{e}{m} \frac{V}{d} x \quad (17)$$

وبالتعويض عن (x) بالمقدار (d) وأخذ جذري الطرفين نحصل علي سرعة الإلكترون النهائية قبل اصطدامه باللوح الموجب

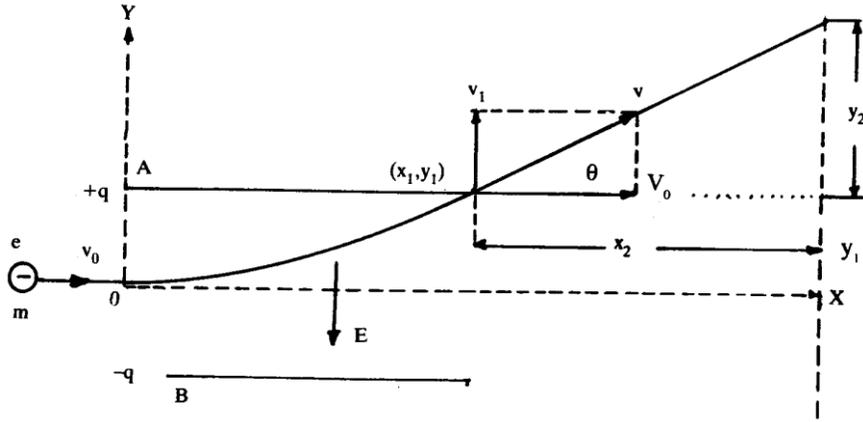
$$v_f = \sqrt{v_0^2 + \frac{2e}{m} V} \quad (18)$$

زمن العبور بين اللوحين ( $t_d$ ) ليعطى من العلاقة

$$t_d = \frac{d}{\frac{v_0 + v_f}{2}} = \frac{2d}{v_0 + v_f} \quad (19)$$

## 1-2-2 حركة الإلكترون في اتجاه عمودي على مجال كهربائي منتظم:

الشكل التالي يبين مجال كهربائي (E) ينشأ نتيجة لوجود فرق في الجهد بين لوحين متوازيين المسافة بينهما (d) وطول كل منهما (L). وبفرض أن هناك إلكترون يتحرك بسرعة ابتدائية مقدارها ( $v_0$ ) في اتجاه عمودي على اتجاه المجال. والمجال الكهربائي الناشئ عن وجود فرق الجهد يتعين من المعادلة:



شكل (١-٢٦): حزمة من الإلكترونات تسقط في مجال منتظم عمودي على اتجاه الحزمة



$$E = \frac{V}{d}$$

وفي اتجاه المحور الرأس Y وهذا المجال يؤثر على حركة الإلكترون بقوة عمودية تسبب إزاحته عن مساره في الاتجاه الأفقي (X) إلى الاتجاه الراسي (Y) وتكون العجلة التي يكتسبها الإلكترون في اتجاه المحور الراسي تعطي من المعادلة:

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{e \cdot E}{m} = \frac{e \cdot V}{m \cdot d} \quad (20)$$

وتسبب إزاحته في الاتجاه (Y) بالمسافة (y) وكذلك تعطيه سرعة مقدارها يمكن حسابه وفقاً للمعادلة التالية:

$$v_y = v_{oy} + a_y t = a_y t \quad (21)$$

حيث سرعة الإلكترون الابتدائية في الاتجاه الراسي = صفراً.

اما الإزاحة في الاتجاه الراسي تعطي وفقا للمعادلة التالية:

$$y = v_{oy} + \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (22)$$

هذا عن حركة الإلكترون في الاتجاه Y أما عن حركته في الاتجاه X فهي ثابتة أي أن سرعته الابتدائية في الاتجاه X لا تتغير لعدم وجود قوي كهربائية في هذا الاتجاه. ومن ثم فإن الإزاحة في الاتجاه X في زمن معين تعطي من العلاقة :

$$x = v_{ox} t \quad (23)$$

$$\therefore t = \frac{x}{v_{ox}} \quad (24)$$

وبالتعويض عن قيمة (t) من المعادلة (24) في المعادلة (22) نحصل على:

$$y = \frac{1}{2} a_y \left( \frac{x^2}{v_{ox}^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{a_y}{v_{ox}^2} x^2 \quad (25)$$

وهذه معادلة قطع مكافئ أي أن مسار الإلكترون بين اللوحين نتيجة للتأثير عليه بمجال كهربى عمودي على اتجاه حركته يأخذ شكل القطع المكافئ. والزاوية ( $\theta$ ) والتي ينحرف بها تيار الإلكترونات عن مساره تعطي من تفاضل طرفي المعادلة (25) بالنسبة لـ (x)

$$\begin{aligned} \therefore \tan \theta &= \frac{dy}{dx} \\ &= \frac{a_y}{2v_{ox}^2} \cdot 2x \\ &= \frac{e V}{2 m d} \cdot \frac{2x}{2v_{ox}^2} \end{aligned} \quad (26)$$

$$= \frac{2 y}{x} \quad (26)$$

والزاوية  $\theta_\ell$  التي ينحرف بها تيار الإلكترونات عن مساره لحظة خروجه من تأثير المجال الكهربى أي بعد أن يقطع المسافة (L) تعطي بالتعويض عن (x) بالمقدار (L) في المعادلة (26) أي

$$\therefore \tan \theta_\ell = \frac{e V}{2 m d} \cdot \frac{2L}{2v_{ox}^2} = \frac{2 y}{L} \quad (27)$$

## حركة الإلكترون في المجالات المغناطيسية

نفرض أن هناك تيار من الإلكترونات يتحرك بسرعة ( $v$ ) في اتجاه معين تحت تأثير مجال مغناطيسي ( $B$ ) والزمن الذي يمضي بين تتابع إلكترون وآخر في هذا الاتجاه هو ( $dt$ ).

$$\therefore ds = v dt \quad (1)$$

وحيث أن التيار الكهربائي ( $I$ ) في اتجاه الحركة (اتجاه المحور الأفقي  $X$ ) يمكن أن يعطي من العلاقة :

$$I = \frac{e}{dt} \quad (2)$$

وطبقاً لقاعدة "لابلاس" نجد أن القوة المؤثرة على التيار ( $F$ ) الذي يمر في عنصر طول من السلك ( $ds$ ) يعطي من المعادلة

$$F = I \cdot B \cdot ds \sin \theta \quad (3)$$

حيث ( $\theta$ ) هي الزاوية المحصورة بين اتجاه المجال واتجاه التيار. وبالتعويض عن  $I$  ،  $dt$  من المعادلتين (1) ، (2)

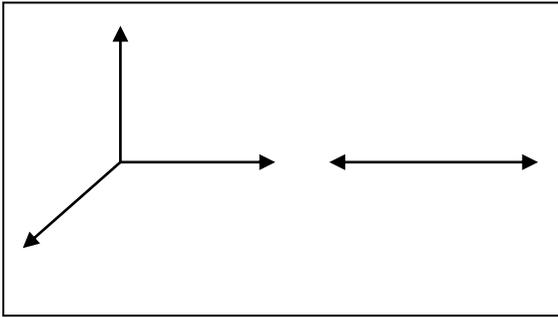
$$\therefore F = evB \sin \theta \quad (4)$$

**أولاً:** إذا كان الإلكترون متحركاً في مجال مغناطيسي عمودي على مستوى الصفحة فإن اتجاه القوة المؤثرة عليه يكون في مستوى الصفحة عمودياً على كل من  $B$  ،  $v$  كما في الشكلين التاليين.

ويكون مقدار هذه القوة في هذه الحالة

$$F = evB$$

(لأن جيب الزاوية  $90^\circ = 1$ ).



وتحت تأثير كتلة الإلكترون والقوة المغناطيسية المؤثرة عليه ينحرف الإلكترون في مسار منحنى نصف

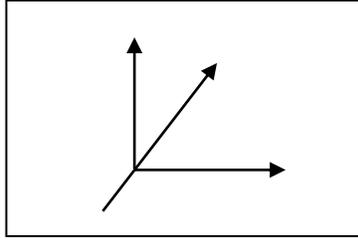
قطره ( $r$ ) بحيث يكون تحت تأثير القوة ( $F$ ) والقوة الطاردة المركزية  $\frac{mv^2}{r}$  أي أن:

$$e v B = \frac{m v^2}{r} \quad (5)$$

$$\therefore r = \frac{m}{e} \cdot \frac{v}{B} \quad (6)$$

وإذا كانت السرعة التي يتحرك بها الإلكترون ثابتة فإن المسار الذي يرسمه الإلكترون يكون دائرياً في مستوى عمودي علي المجال المغناطيسي (B)

**ثانياً: في حالة ما يكون اتجاه السرعة يعمل** زاوية  $\theta$  مع المجال فإنه يمكن تحليل هذه السرعة لمركبتين إحداها في اتجاه المجال والأخرى موازية له كما بالشكل التالي:



أ- بالنسبة للمركبة الأولى للسرعة والتي في اتجاه المجال ( $v_2$  كما بالشكل) فإنها لا تعاني من أي تغيير لأنه لا توجد قوة تؤثر علي الإلكترون في هذا المجال حيث أن  $\theta$  تساوي صفراً وبالتالي  $\sin \theta$  يساوي صفراً أيضاً، ومن المعادلة (4) تصبح القوة في هذا الاتجاه تساوي أيضاً صفراً. وهذا يعني فيزيائياً أن الإلكترون يقطع في هذا الاتجاه (اتجاه المجال) مسافات متساوية في أزمنة متساوية.

ب- أما المركبة الثانية للسرعة العمودية علي اتجاه المجال ( $v_1$  كما بالشكل) فإنها سوف تتأثر بالقوة (F) وتغير اتجاهها بالتالي لتسير في مسار منحنى كما سبق الإشارة إليه المعادلة (6) والذي سيصبح دائري في حالة ثبات ( $v$ ).

ومعني هذا أن الإلكترون يتحرك في مسار بريمي محوره يوازي اتجاه المجال الشكل التالي. وإذا كانت  $\theta$  هي الزاوية بين اتجاه المجال (B) واتجاه حركة الإلكترون فإن:

$$e v B \sin \theta = \frac{m v^2}{r} \quad (7)$$

$$\therefore r = \frac{m v}{e B \sin \theta} \quad (8)$$

وإذا كان كل من  $(v)$  ،  $(B)$  ثابتة فإن الخط البريمي الذي يمثل حركة الإلكترون يكون نصف قطر مسقطه العمودي علي اتجاه المجال  $(B)$  ممثلاً بالمعادلة

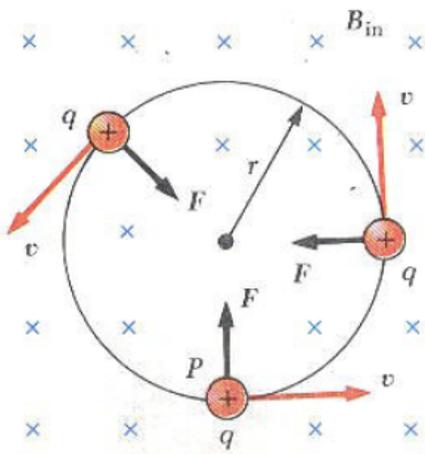
$$r \sin \theta = r \sin^2 \theta \quad (9)$$

$$r \sin \theta = \frac{mv^2 \sin^2 \theta}{eB \sin \theta} = \frac{mv \sin \theta}{eB} \quad (10)$$

وإذا لم يكن المجال نفسه منتظماً فإن مسار الإلكترون في هذه الحالة يكون علي شكل خط "بريمي" متغير الأتساع محوره يوازي اتجاه المجال.

### تأثير المجال المغناطيسي على حركة جسيم مشحون

#### The Effect of magnetic field on moving charged particle



درسنا في المحاضرة الأولى ان القوة المغناطيسية المؤثرة على جسم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي تكون دائماً عمودية على سرعة الجسم. وهذا يعني أن الشغل المبدول بواسطة القوة المغناطيسية يساوي صفر وبالتالي فإن تأثير المجال المغناطيسي على حركة جسم مشحون هو تغير اتجاهه بحيث يسلك الجسم المشحون في مجال مغناطيسي مساراً دائرياً يكون مستوى هذا المسار الدائري عمودياً على المجال المغناطيسي.

بتطبيق قانون نيوتن لجسم يتحرك في مسار دائري لإيجاد القوة المؤثرة ومساواتها بالقوة المغناطيسية نجد أن نصف قطر المسار يعطى بالعلاقة التالية:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

وهذا يعني ان نصف قطر المسار الذي يسلكه الجسم المشحون في مجال مغناطيسي يتناسب طردياً مع كتلة

وسرعة الجسم وعكسيا مع الشحنة وقيمة المجال المغناطيسي.

وتعطى قيمة التردد الزاوي **Angular frequency** والزمن الدوري **Period** للجسم المشحون بـ

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

يعرف التردد الزاوي في العديد من التطبيقات بـ **Cyclotron frequency**.

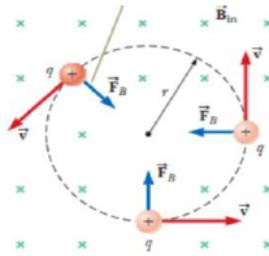
أي أن التردد الزاوي **Angular frequency** والزمن الدوري **Period** للجسم المشحون لا يعتمدان على السرعة أو نصف القطر.

### 8 - حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي **Motion of a charged particle in a magnetic field**

إذا وضع جسيم مشحون بشحنة موجبة  $+q$  في مجال مغناطيسي منتظم وكانت سرعته  $\vec{v}$  في اتجاه عمودي على المجال، فإنه سيتأثر بقوة مقدارها :

$$F = qV\sin\theta \quad (1)$$

ويكون اتجاهها الى اعلى طبقا لقاعدة اليد اليمنى. ولما كانت القوة عمودية على السرعة فإنها لا تغير من مقدار هذه السرعة ولكنها تغير من اتجاهها فيتغير موضع الجسيم واتجاه القوة المؤثرة عليه بينما تظل مقادير الكميات  $q$  ،  $v$  ،  $B$  ثابتة.



الشكل يوضح مسار جسيم مشحون في مجال مغناطيسي  $B$  منتظم من الرسم يتبين انه عندما تكون سرعة الجسيم  $\vec{v}$  عمودية على المجال المغناطيسي

المنتظم فان الجسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي على  $B$

المنتظم فان الجسم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي على B

هكذا فان الجسم يتحرك بتأثير قوة ثابتة المقدار مقدارها  $qvB$  وتتجه دائما في الاتجاه العمودي على  $\vec{v}$ . ولذا فان مسار هذا الجسم يكون على شكل دائرة نصف قطرها  $r$  كما في الشكل اعلاه ( اذا كان الجسم موجب  $q$  ) فان اتجاه الدوران يكون باتجاه معاكس لعقارب الساعة كما في الحالة اعلاه وفي حالة الشحنة السالبة-  $q$  ) فان الدوران سيكون باتجاه عقارب الساعة. ونتيجة لهذه

الحركة الدورانية تخضع الشحنة  $q$  لقوتين متعاكستين احدهما القوة المغناطيسية  $F_B$  متجهه الى مركز الدوران، والاخرى قوة طرد مركزية  $F$  مقدارها حسب قانون نيوتن الثاني:

$$F = ma = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

وتبقى الشحنة متحركة في مسارها الدائري اذا تساوت  $F_B$  و  $F$  ولذلك يُحصل من المعادلتين اعلاه على

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

وهذا يعني ان نصف قطر المسار الذي يسلكه الجسم المشحون في مجال مغناطيسي يتناسب طرديا مع كتلة وسرعة الجسم وعكسيا مع الشحنة وقيمة المجال المغناطيسي.

اما السرعة الزاوية (speed Angular) للجسيم فتعطى كالتالي:

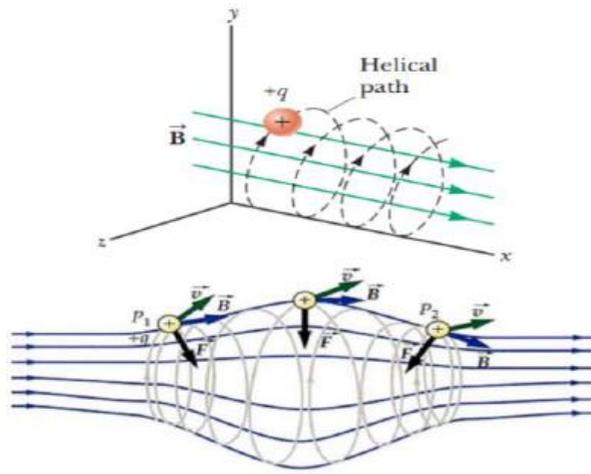
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (4)$$

حيث  $m$  كتلة الجسم و  $\omega$  سرعته الزاوية، في بعض الاحيان تسمى السرعة الزاوية بتردد السيكلوترون (frequency Cyclotron) لان الجسم المشحون يدور عند هذا التردد الزاوي بتأثير نوع من المعجلات يسمى بالسيكلوترون. وبمعرفة السرعة الزاوية يمكن حساب تردد الجسم  $f$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (5)$$

ومن المعادلتين الاخيره نستنتج ان السرعة الزاوية والتردد للجسيم ال يعتمدان على السرعة أو نصف القطر  
 اما اذا كان اتجاه السرعه غير متعامد على اتجاه المجال  $B$  يصنع زاوية  $\Phi$  فهذا سيؤدي الى دوران الشحنة  
 في مسار حلزوني (Helical path) محوره متفق مع اتجاه المجال، كما في الشكل ادناه وفيه يكون اتجاه  
 المجال  $B$  باتجاه الـ  $x$  حيث لا توجد مركبة للقوه، ولهذا لا توجد مركبة للتعجيل موازية للمجال  $B$   
 ومركبة السرعة الموازية للمجال تبقى ثابتة، وفي كل الاحوال تبقى القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم  
 عمودية على اتجاه المجال ويكون نصف قطر المقطع الحلزون:

$$r = \frac{mv}{qB} \sin\Phi \quad (6)$$



الشكل يوضح جسيم مشحون يمتلك متجه سرعة لها مركبة موازية للمجال المغناطيسي المنتظم وتتحرك في  
 مسار حلزوني

# تطبيقات على استخدامات المجالات الكهربائية والمغناطيسية

## كيف تعمل الأجهزة المعتمدة على حركة جسيمات مشحونة في مجال كهربائي ومغناطيسي

تلعب قوانين الكهرباء والمغناطيسية دورا أساسيا في تشغيل معظم الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا مثل أجهزة التلفزيون والمسجل والفيديو والكمبيوتر والجوال ومعجلات الطاقة الضخمة والكثير من الأجهزة الإلكترونية المختلفة. كما ان القوى المتبادلة بين الذرات والجزيئات المسؤولة عن تشكل المواد الصلبة والسائلة والغازية هي قوى كهربائية في الأساس.

الأدلة التي وجدت في بعض الوثائق الصينية تقترح ان المغناطيسية اكتشفت مبكرا جدا وقدرت في 2000 قبل الميلاد. ولاحظ اليونانيون بعض الظواهر الكهربائية والمغناطيسية منذ 700 سنة قبل الميلاد. عرف اليونانيون القوى المغناطيسية من الحجر الطبيعي الذي عرف باسم المغنتيت أي أكسيد الحديد الأسود ( $Fe_3O_4$ ) يجذب نحو الحديد. (كلمة كهربية electric جاءت من كلمة الكترون electron وهي الترجمة اليونانية لكلمة امبر amber. وكلمة مغناطيسية magnetic جاءت من ماغنيسيا Magnesia وهو اسم المنطقة التي اكتشف فيها الحجر المغناطيسي في اليونان).

لم يعرف العلماء ان الكهربائية والمغناطيسية هما عبارة عن ظاهرتين مرتبطتين معا حتى مطلع القرن التاسع عشر. في العام 1819 تمكن العالم هانس اورستد Hans Oersted من اكتشاف ان ابرة البوصلة المغناطيسية تنحرف عندما توضع بجوار دائرة يمر بها تيارا كهربيا. في العام 1831 اكتشف كلا من العالم مايكل فارادي Michael Faraday وفي نفس الوقت أيضا العالم جوزيف هنري Joseph Henry ان سلك يتحرك بالقرب من مغناطيس او عندما يتحرك مغناطيس بجوار سلك فان تيارا كهربيا يتولد في السلك. **سوف نتعرف على اهم التطبيقات المعتمدة على حركة جسيمات مشحونة في مجال مغناطيسي وهي (1) مرشح السرعة Velocity Selector و(2) مطياف الكتلة Mass Spectrometer و(3) المعجل الدوراني السيكلترون Cyclotron**

### اساسيات هامة قبل ان نبدأ

عندما شحنة تتحرك بسرعة  $v$  في وجود كلا من مجال كهربائي  $E$  ومجال مغناطيسي  $B$  تتعرض لقوة كهربائية  $qE$  وقوة مغناطيسية  $qv \times B$ . القوة الكلية (تعرف باسم قوة لورنتز Lorentz force) المؤثرة على الشحنة هي

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

لاحظ ان الرموز المكتوبة بحرف سميكة **Bold** تعبر عن كميات متجهة <

### الفروقات الأساسية بين القوة الكهربائية والمغناطيسية

1. متجه القوة الكهربائية يكون في اتجاه خطوط المجال الكهربائي، بينما متجه القوة المغناطيسية يكون عموديا على المجال المغناطيسي.

2. تؤثر القوة الكهربائية على الجسيم المشحون بغض النظر اذا كان الجسيم ساكنا او متحركا، بينما القوة المغناطيسية تؤثر على الجسيم المشحون فقط عندما يكون متحركا.

3. تبذل القوة الكهربائية شغلا في إزاحة الجسيم المشحون، بينما القوة المغناطيسية المرتبطة مع مجال مغناطيسي مستقر لا تبذل شغلا عندما يتحرك الجسيم لان القوة المغناطيسية عمودية على اتجاه الازاحة.

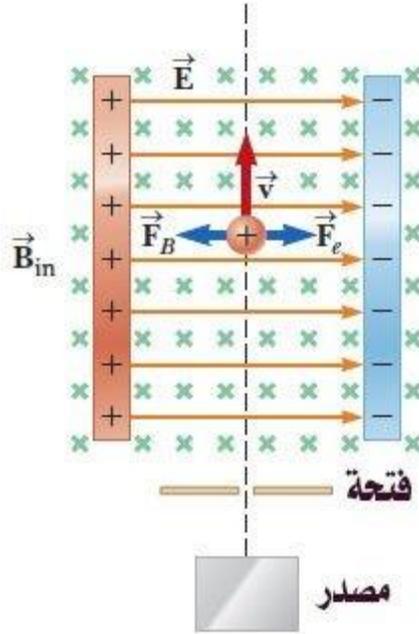
من الجملة الأخيرة ومن نظرية الطاقة الحركية والشغل، نستنتج ان الطاقة الحركية للجسيم المشحون المتحرك خلال مجالا مغناطيسيا لا يمكن ان يتغير بواسطة المجال المغناطيسي فقط. يغير المجال اتجاه متجه السرعة ولكن لا يغير سرعة او طاقة حركة الجسيم.

ومن هذه المبادئ الأساسية يمكننا ان نبدأ في توضيح بعض التطبيقات العملية الهامة وهي على النحو التالي:

## (1) مرشح السرعة Velocity Selector

في العديد من التجارب التي تشتمل على حركة جسيمات مشحونة، فإنه من المهم ان تكون هذه الجسيمات تمتلك نفس السرعة، هذا يمكن ان يتحقق بتطبيق مجال كهربائي ومجال مغناطيسي في الاتجاهات الموضحة في الشكل 1. يوجه مجال كهربائي منتظم إلى اليمين كما هو موضح في الشكل 1)، وتطبيق مجال مغناطيسي منتظم في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي (داخل على الصفحة في الشكل 1). اذا كانت  $q$  موجبة والسرعة  $v$  إلى الأعلى، فإن اتجاه القوة المغناطيسية  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  سوف يكون إلى اليسار واتجاه القوة الكهربائية  $q\mathbf{E}$  سيكون إلى اليمين. عندما يتم اختيار كلا من مقدار المجال الكهربائي ومقدار المجال المغناطيسي بحيث يجعل كلا من القوة الكهربائية مساوية للقوة المغناطيسية أي ان  $qE = qvB$ ، فإنه يمكن اعتبار ان الجسيم المشحون كجسيم في حالة اتزان ويتحرك في خط رأسي مستقيم خلال منطقة المجالين. من الصيغة  $qE = qvB$ ، ومنها نحصل على

$$v = \frac{E}{B} \quad (1)$$



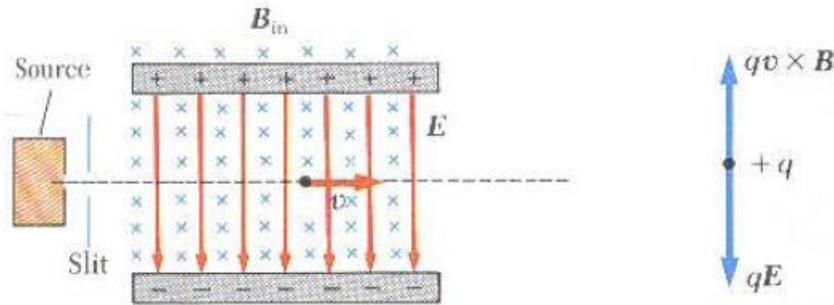
الشكل 1 مرشح السرعة. يتحرك جسيم موجب الشحنة بسرعة  $v$  في وجود مجال مغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ومجال كهربائي متجهها إلى اليمين، فإنه يتعرض إلى قوة كهربائية  $qE$  إلى اليمين وقوة مغناطيسية  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  متجهها إلى اليسار.

نلاحظ هنا ان الجسيمات التي تمتلك هذه السرعة فقط هي التي تمر بدون انحراف من خلال المجالين المتعامدين الكهربائي والمغناطيسي. القوة المغناطيسية المبدولة على جسيمات متحركة بسرعات اعلى من ذلك تكون اعلى من القوة الكهربائية، والجسيمات في هذه الحالة تنحرف إلى اليسار. اما الجسيمات المتحركة بسرعة اقل من تلك السرعة تنحرف إلى اليمين. وبهذه الطريقة نحصل على شعاع من الجسيمات التي تتحرك بسرعة واحدة هي  $v$  ويمكن تغيير قيمة هذه السرعة بالتحكم في شدة المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي.

المشحونة ذات سرعة محددة. وذلك لأنه كما نعلم ان الجسيمات المنبعثة عند اية درجة حرارة لها توزيع احصائي على نطاق واسع من السرعات ولاختيار سرعة محددة نستخدم جهاز مرشح السرعة **Velocity selector**.

### فكرة العمل

يتكون جهاز مرشح السرعة من مصدر للجسيمات المشحونة **Source** تنطلق الجسيمات من المصدر بسرعات مختلفة لتمر من الشريحة التي تحدد حزمة من هذه الجسيمات لتمر في منطقة مجال كهربائي متعامد مع مجال مغناطيسي كما في الشكل التالي:



تتأثر الجسيمات المشحونة بالمجالين الكهربائي والمغناطيسي بحيث يكون اتجاه القوة الكهربائية للأسفل واتجاه القوة المغناطيسية للأعلى. وهذا سيؤدي إلى ان الجسيمات المتحركة بسرعة معينة هي التي ستتحرك في خط مستقيم لأن عند تلك السرعة تتساوى القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية بينما الجسيمات المتحركة بسرعات أخرى ستتحرف عن المسار المستقيم لتتصادم بحائل يمنع مرورها من الفتحة الموجودة على محور الجهاز. ولإيجاد هذه السرعة نستخدم قانون لورنتز.

$$q E = q v \times B$$

$$v = E/B$$

أي ان بتغيير قيمة احد المجالين يمكن اختيار الجسيمات المشحونة بالسرعة المطلوبة ولهذا يسمى الجهاز بمرشح السرعة.

# The Mass Spectrometer

جهاز مطياف الكتلة Mass spectrometer هو جهاز يستخدم لفصل الثرات أو الجزيئات أو الأيونات بناءً على نسبة كتلتها إلى شحنتها.

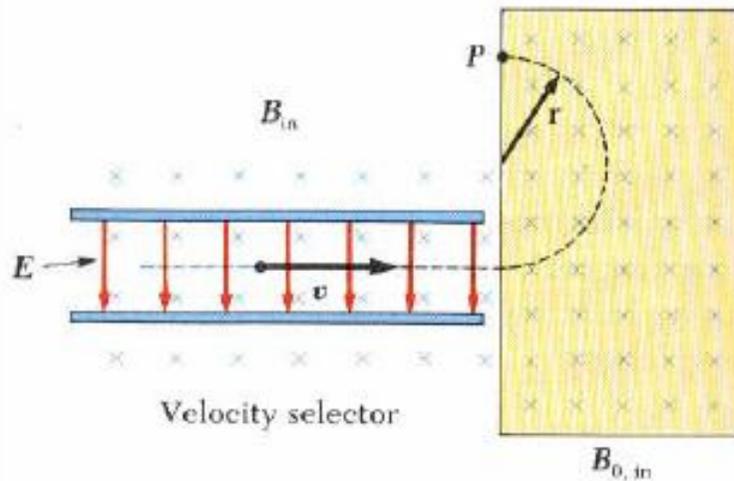
## فكرة العمل

نعتمد فترة عمل مطياف الكتلة أساساً على استخدام جهاز مرشح السرعة لاختيار وتحديد سرعة الأجسام المختلفة المراد فصلها.

يوضح الشكل أدناه فترة عمل الجهاز حيث يمر شعاع من الأيونات في مرشح السرعة لتخرج جسيمات ذات سرعة تساوي  $E/B$ . تمر هذه الأيونات إلى مطياف الكتلة المكون من مجال مغناطيسي منتظم  $B_0$  تسلك الجسيمات خلال المجال المغناطيسي مساراً دائرياً نصف قطره  $r$  لتصل إلى شاشة فوتوغرافية تعطي ومضة تشير إلى موقع اصطدام الأيون مع الشاشة نتيجةً لتأثير المجال المغناطيسي المطبق في جهاز مطياف الكتلة.

من المحاضرة السابقة وجدنا أن  $r$  تعطي بالعلاقة التالية:

$$r = \frac{mv}{qB}$$



إذا النسبة بين الكتلة إلى الشحنة تكون

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

بالتعويض عن السرعة  $v$  بمعادلته مرشح السرعة نجد أن

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

وبهذه الطريقة يمكن إيجاد النسبة بين الكتلة إلى الشحنة عن طريق قياس نصف قطر دوران الجسم المشحون في مطياف الكتلة. وفيه المجال الكهربائي والمغناطيسي لمرشح السرعة والمجال المغناطيسي المستخدم في المطياف.

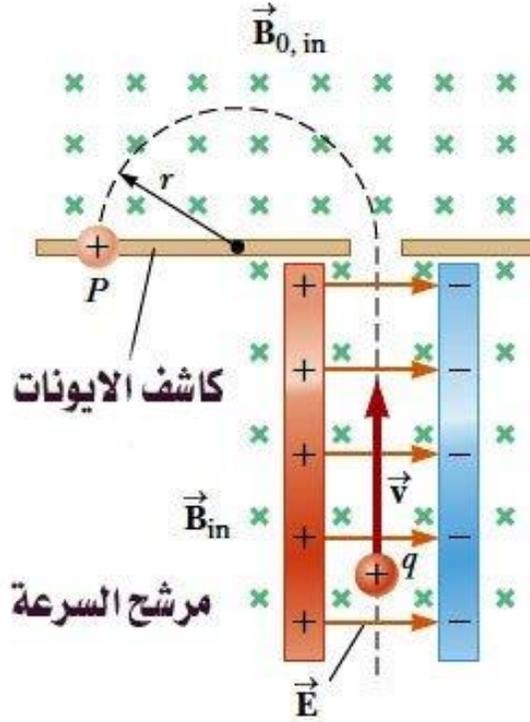
يعمل مطياف الكتلة على فصل الايونات حسب نسبة كتلتها إلى شحنتها. في جهاز مطياف الكتلة يمر شعاع من الايونات من مرشح السرعة أولاً لنحصل على جسيمات لها نفس السرعة  $v$  ومن ثم تدخل هذه الجسيمات في مجال مغناطيسي منتظم  $B_0$  له نفس اتجاه المجال المغناطيسي في مرشح السرعة كما هو موضح في الشكل 2. مع دخول المجال المغناطيسي الثاني، تتحرك الايونات في نصف دائرة نصف قطرها  $r$  قبل ان تصل إلى كاشف عند  $P$ . إذا كانت الايونات موجبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليسار كما هو موضح في الشكل 2. اما اذا كانت الايونات سالبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليمين. من المعادلة 3.1 يمكن ان نعبر عن النسبة  $m/q$  على النحو التالي:

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

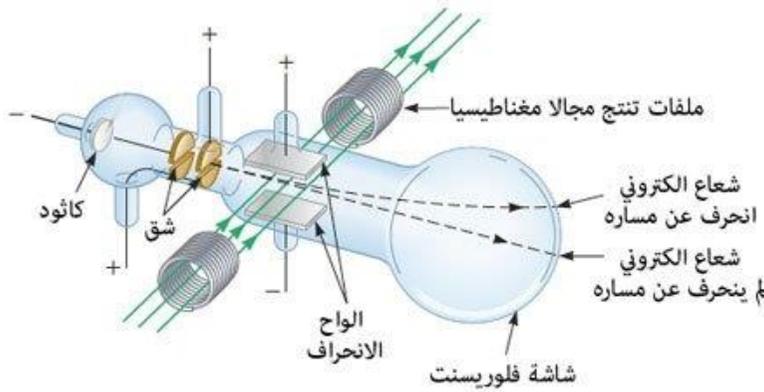
باستخدام المعادلة 1 نحصل على

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

لهذا، يمكن حساب النسبة  $m/q$  بقياس نصف قطر التحذب وبمعرفة كلا من  $B$  و  $B_0$  و  $E$ . عمليا يتم قياس الكتل للعديد من نظائر الايونات، بايونات تحمل نفس الشحنة  $q$ . بهذه الطريقة يمكن تحديد نسب الكتل حتى لو كانت  $q$  مجهولة. قام العالم طومسون (1856 – 1940) (Thomson) في العام 1897 لقياس نسبة  $e/m_e$  للالكترونات. يوضح الشكل 3 a الأدوات التي استخدمها طومسون. تعجل الالكترونات من الكاثود وتمر خلال شقين. تنحرف الالكترونات في منطقة يكون فيها المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي متعامدين. يتم في البداية ضبط مقدار المجالين للحصول على شعاع غير منحرف يسجل على شاشة فلوريسنت. من حجم الانحراف والقيم المقاسة  $E$  و  $B$ ، يمكن تحديد نسبة الشحنة إلى الكتلة. النتائج التي تم الحصول عليها من هذه التجربة تمثل اكتشاف الالكترتون كجسيم أولي.



الشكل 2 مطياف الكتلة. ترسل جسيمات مشحونة بشحنة موجبة في البداية من خلال مرشح السرعة ومن ثم تدخل منطقة يتسبب فيها مجال مغناطيسي  $B_0$  إلى حركة الجسيمات في مسار نصف دائري وتصطدم بالكاشف عند النقطة  $P$ .



## مطياف الكتلة Mass spectrometry

مطياف الكتلة هو جهاز اخترعه فرانسيس أستون ويعتمد مبدأ عمله على أن الجسيمات المشحونة عندما تدخل مجالا مغناطيسيا منتظما، بحيث يعامد

اتجاهه اتجاه حركتها، فإنها تأخذ مسارات دائرية تتناسب أنصاف أقطارها مع كتلة الجسيم المشحون. ويمكن بواسطة هذا الجهاز قياس نسبة الكتلة للشحنة وفصل الجسيمات المختلفة بهذا المقدار عن بعضها سواء كانت ذرات أو أيونات أو جزيئات. و هو يسمح بقياس  $q/m$  لذرة متأينة (حيث  $m$  كتلة الايون و  $q$  شحنته) وتحديد كتلة الذرة، وقد لعبت المطيافية دورا كبيرا في دراسة النظائر.

يتكون المطياف من :

1. منبع أيونات Ion source
2. محلل الكتلة Mass Analyzer
3. كاشف Detector



حيث منبع الأيونات يشطر جزيئات العينة إلى أيونات. وجهاز التحليل يفرز الأيونات بحسب كتلتها عن طريق تطبيق حقول كهرومغناطيسية. ومكشاف لقياس قيمة مؤشر الكمية وبذلك تعطي بيانات لحساب وفرة الأيونات الملتقطة.

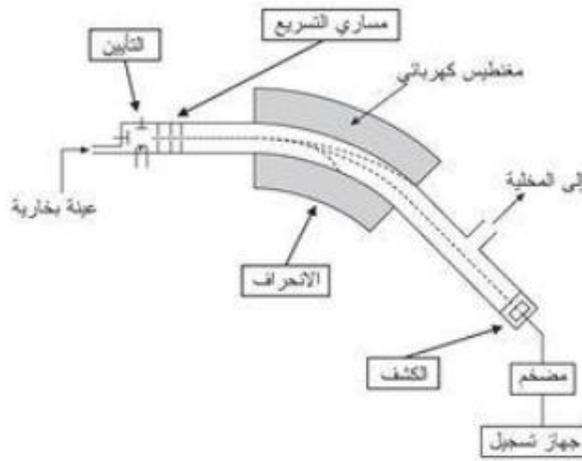
ولمطياف الكتلة استخدامات كمية ونوعية، تشمل تحديد هوية المركبات المجهولة، وتحديد التركيب النظائري للعناصر في الجزيء، وتحديد بنية المركب بمراقبة شظاياه. كما يستخدم في تحديد كمية مركب ما في العينة أو لدراسة كيمياء الأيونات في الطور الغازي (كيمياء الأيونات والجسيمات الحيدانية في الفراغ). يستخدم مطياف الكتلة حالياً في مخبر التحليل التي تدرس الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لطيف واسع من المركبات.

ويعتمد عمل مطياف الكتلة على قذف للمركب العضوي في حالته الغازية أو البخارية بسيل من الالكترونات السريعة والعالية الطاقة ( طاقتها في حدود 70 الكترون فولت ) تحت هذه الظروف يؤدي اصطدام الجزيئات بهذه الالكترونات السريعة إلى انفصال إلكترون أو أكثر من الجزيء .. أي تحدث عملية تأين للجزيء Ionization وتتكون ايونات موجبة الشحنة أو بالأصح جذر كاتيوني radical cation M بالإضافة إلى ذلك تؤدي الطاقة العالية إلى تكسير رابطة ضعيفة أو أكثر في الجزيء مما يؤدي إلى تكوين ايونات صغيرة أو حطيمات مشحونة أو متعادلة .. وبذلك يحتوي المخلوط الناتج من معاملة المركب بهذه الطريقة على مجموعة من الايونات الموجبة التي تختلف في الكتلة و الشحنة .. ويتم فصل هذه الايونات الموجبة بناءً على اختلافها في نسبة الكتلة إلى الشحنة  $m/e$  باستخدام مجال كهربائي ومجال مغناطيسي .. ويتم تسجيل نتائج التحليل في صورة طيف كتلة mass spectrum يوضح كتلة هذه الايونات ووفرتها النسبية.

## مبدأ عمل المطياف الكتلي :

يعتمد مبدأ عمل المطياف الكتلي على توليد أيونات للمادة المدروسة في حيز خالٍ من الهواء، وإخضاعها لحقول كهربائية ومغناطيسية حتى ترسم في نهاية المطاف الجسيمات المختلفة في الكتلة مسارات متباينة.

وقد تختلف الترتيبات المستخدمة لهذا الغرض من جهاز لآخر، ويظهر في الشكل التالي أحدها وهو الأكثر استخداماً، وهو يتألف من أربعة أجزاء هي:



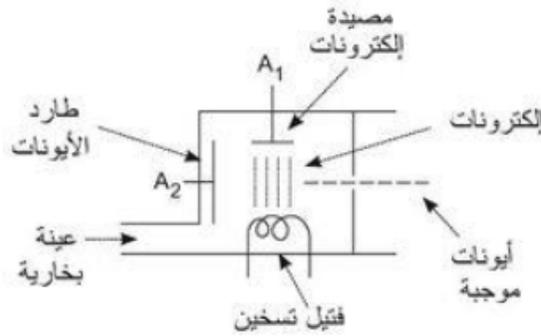
مخطط رمزي لمطياف كتلي

### 1- حجرة التأين ionization chamber

وهنا تُنتزع الإلكترونات من ذرات العينة موضوع الدراسة، فتتحول إلى أيونات موجبة تمتلك جميعها كتلة متقاربة  $m$ ، وهي تحمل شحنات كهربائية موجبة  $q = ne$  مساوية شحنة الإلكترون  $e$  أو مضاعفاتها  $n$  بالقيمة المطلقة. ويمكن الحصول على هذه الأيونات على سبيل المثال بإخضاع ذرات المادة وهي في

حالة بخار تحت ضغط منخفض لسيل من الإلكترونات صادر عن فتيل ساخن.

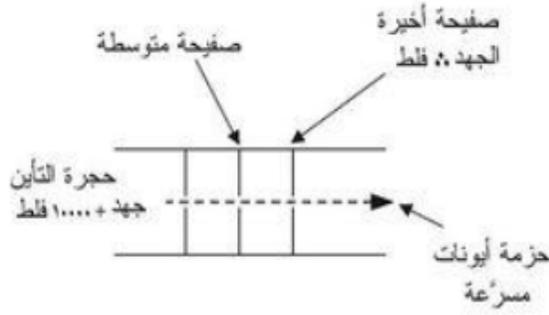
ويبين الشكل التالي وسيلة تحقيق ذلك. إذ تُدخَل العيّنة وهي بحالة بخار إلى حجرة صغيرة فيها فتيل يمر فيه تيار كهربائي، توضع مقابله صفيحة موجبة  $A_1$  فتنجذب الإلكترونات إليها. وباصطدام الإلكترونات المسرّعة هذه مع ذرات البخار تغدو الذرات متأينة مرة أو أكثر، وتقوم الصفيحة  $A_2$  التي يطبق عليها جهد (كمون) كهربائي موجب بطرد الأيونات بعيداً عنها فتخرج الأيونات من فتحة في حجرة التأين.



حجرة التأين في المطياف الكتلي

## 2- اقطاب التعجيل acceleration electrodes

يطبق على حجرة التأين جهد كهربائي موجب من رتبة 10000 فولت، وتمر الأيونات الخارجة من فتحة حجرة التأين فتدُ على مجموعة مسارٍ كهربائية تطبق عليها جهود كهربائية متناقصة حتى الصفر فولت، كما هو ظاهر في الشكل التالي، فتكتسب الأيونات سرعة عالية.



اقطاب تعجيل الأيونات

ويمكن التعبير عن طاقتها الحركية بدلالة الجهد الكهربائي المعجل  $V$  بالعلاقة:

$$\frac{1}{2} mv^2 = neV$$

وذلك بفرض  $m$  كتلة الأيون و  $v$  سرعته و  $ne$  الشحنة الكهربائية التي يحملها. ومنها يكون:

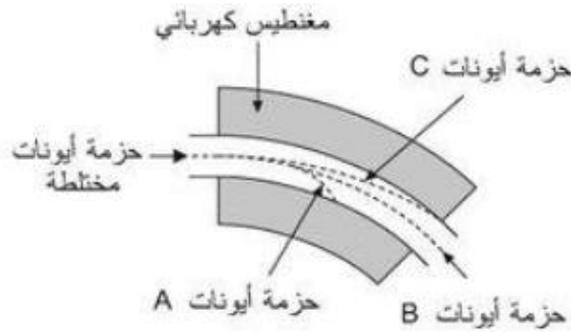
$$v = \sqrt{\frac{2neV}{m}}$$

### 3- حجرة الانحراف deflection chamber

تخضع الأيونات ذات السرعة  $v$  المعطاة بالعلاقة السابقة لدى دخولها منطقة الحقل المغنطيسي  $B$  العمودي على مسارها لقوة تجعلها ترسم مساراً بشكل قوس دائرة نصف قطرها  $R$  يعطى بالعلاقة:

$$R = \frac{mv}{neB} = \frac{1}{B} \sqrt{2v \frac{m}{ne}}$$

فالأيونات ذات الكتلة الصغيرة ترسم أقواساً (A) أنصاف أقطارها صغيرة، في حين ترسم الأيونات ذات الكتلة الكبيرة أقواساً (C) أنصاف أقطارها كبيرة كما يظهر في الشكل التالي. كما تقوم الشحنة التي يحملها الأيون بدور في تحديد نصف قطر الدائرة التي يرسمها وهذا واضح من العلاقة السابقة.

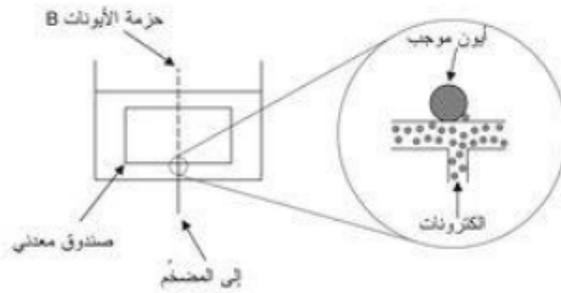


انحراف الأيونات في الحقل المغناطيسي

#### 4- حجرة الكشف detection chamber

تُرد الأيونات بعد خروجها من منطقة الحقل المغناطيسي إلى حجرة الكشف التي تعلوها فتحة. فإذا تمكّن أيون من دخول الحجرة والارتطام بقعرها فإنه يكتسب من جدارها الإلكترون اللازم لاعتداله، فإذا وُصلت الحجرة بمقياس يسجل شدة التيار عن طريق مضخم أمكن مراقبة عدد الأيونات الأخرى أو

الأثقل. يجري التحكم بشدة الحقل المغنطيسي B، لكشف كل أنواع الأيونات الموجودة في العينة المدروسة.



حجرة الكشف

● من مزايا مطياف الكتلة :

إننا نستطيع الحصول على طيف الكتلة لجميع المركبات العضوية الصلبة والسائلة و الغازية باستخدام كمية ضئيلة جداً من المادة.

● أما من أهم عيوب هذه الطريقة :

فتكمن في عدم قدرتنا على استرجاع المادة بعد التجربة لأنها تتكسر ..

كما أن هذه الأجهزة غالية الثمن لاتتوفر في كثير من المختبرات

يسمح المطياف الكتلي mass spectrograph أو راسم الطيف الكتلي بفصل الذرات بحسب كتلتها، شأنه في ذلك شأن المطياف الضوئي الذي يسمح بفصل الضوء بحسب الأطوال الموجية التي يتركب منها. فمن المعلوم أن بالإمكان استخدام المطياف الضوئي لقياس الأطوال الموجية الصادرة عن منبع ضوئي، إضافة إلى قياس الشدات النسبية للأضواء وحيدة اللون التي يتركب منها. وبالمثل يمكن استخدام المطياف الكتلي جهاز تحليل للكشف عن

الكتل الذرية المختلفة التي تتألف منها عينة ما، وكذلك تقدير الوفرة النسبية لكل منها. كما يمكن استخدامه وسيلة لفصل الذرات المتماثلة في الكتلة.

### تاريخه

يعود الفضل إلى ف. و. أستون F.W.Aston في ابتكار أول مطياف كتلوي عام 1920، الذي عمل على تطوير جهاز ابتكره ج.ج. طومسون J.J.Thomson لفصل النظائر isotopes لأول مرة، وهي عناصر لا يمكن تمييزها بعضها عن بعض كيميائياً، إلا أنها تختلف في الكتلة، وباستطاعة المطياف الكتلي تمييزها بسهولة.

### (3) المعجل الدوراني السيكلترون The Cyclotron

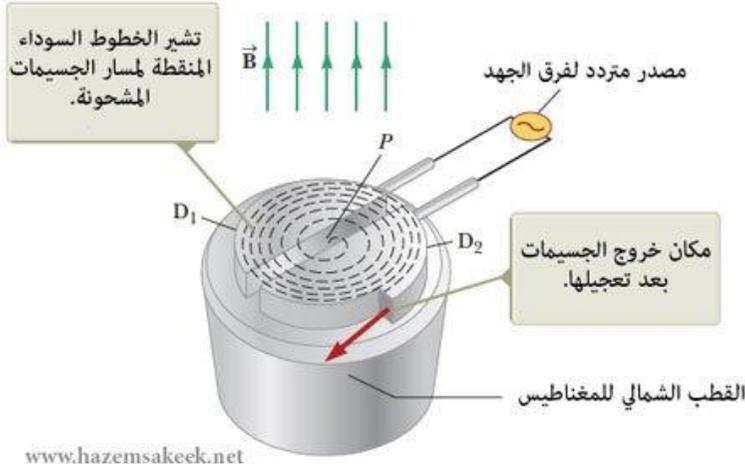
المعجل الدوراني او السيكلترون هو عبارة عن جهاز يعمل على تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات عالية جداً. تستخدم الجسيمات المعجلة الناتجة في التصادم مع انوية الذرات لاحداث تفاعلات نووية هامة للمجال البحثي. كما تستخدم العديد من المستشفيات أجهزة السيكلترون في انتاج مواد مشعة للتشخيص والعلاج.

يقوم المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي بدور هام في فكرة عمل السيكلترون. يوضح الشكل a 4 مخطط يشرح فكرة عمل السيكلترون. تتحرك الشحنات في داخل حاويتين نصف دائريتين لها شكل حرف D ولهذا يطلق عليها اسم D<sub>1</sub> لنصف الدائرة الأولى واسم D<sub>2</sub> لنصف الدائرة الثانية. يطبق فرق جهد ذو تردد عالي على نصفي الدائرتين D<sub>1</sub> و D<sub>2</sub> في وجود مجال مغناطيسي منتظم عمودي عليهما. عند وجود ايون عند النقطة P بالقرب من مركز المغناطيس في احد نصفي الدائرتين وليكن عند D<sub>1</sub> فان الايون يتحرك في مسار نصف دائري والموضح بالخط الأسود المنقط في الشكل a 4، وعندما يصل الايون إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين يكون قد استغرق فترة زمنية مقدارها T/2 حيث ان T هو الفترة الزمنية اللازمة لعمل دورة كاملة حول نصفي الدائرتين والتي تعطى بالمعادلة (2)

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad (2)$$

يتم ضبط تردد فرق الجهد بحيث ان قطبية نصفي الدائرتين تكون معكوسة في خلال الفترة الزمنية التي ينتقل فيها الايون من احد نصفي الدائرتين إلى الأخرى. اذا تم ضبط تردد فرق الجهد بحيث يكون D<sub>1</sub> عند جهد كهربائي اقل من D<sub>2</sub> بمقدار V، فان الايون يتسارع عبر الفراغ إلى D<sub>2</sub> وتزداد طاقة حركته بمقدار qV. بعد ذلك يتحرك الايون حول D<sub>1</sub> في مسار نصف دائري نصف قطره اكبر لان سرعة الايون قد ازدادت. بعد مرور فترة زمنية قدرها T/2 فان الايون يصل مرة أخرى إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين. لحظة انقضاء هذه الفترة الزمنية تعكس القطبية على نصفي الدائرتين مرة أخرى وينتقل الايون تعجيل اخر خلال الفراغ بينهما. تستمر الحركة بحيث انه في كل نصف دائرة يكتسب الايون طاقة حركية إضافية تساوي qV. عندما

يصبح نصف قطر المسار مساويا تقريبا لنصف قطر الوعاء نصف الدائري فان الايونات المعجلة تترك النظام وتخرج من خلال فتحة الخروج.



www.hazemsakeek.net

a

b

الشكل 4 (a) يحتوي السيكلترون على مصدر ايني عند النقطة P، وقطعتين على شكل حرف D هما D<sub>1</sub> و D<sub>2</sub> مطبق عليهما فرق جهد متناوب، ومجال مغناطيسي منتظم. (b) اول سيكلترون تم اختراعه بواسطة كلا من لورنس E. O. Lawrence وليفينغستون M.S. Livingston في العام 1934.

تعتمد فكرة عمل السيكلترون على الفترة الزمنية T المستقلة عن سرعة الايون ونصف قطر المسار الدائري كما هو موضح في المعادلة (2).

يمكننا الحصول على صيغة رياضية لطاقة الحركة التي يكتسبها الايون عندما يخرج من السيكلترون بدلالة نصف قطر الوعاء نصف دائري R. من المعادلة نعلم ان  $v = qBR/m$  وعليه فان طاقة الحركة تكون على النحو التالي:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

عندما تزيد طاقة الايونات في السيكلترون عن 20 MeV تقريبا فان سرعتها تصبح قريبة من الضوء وتظهر الخصائص النسبية عليها (سوف نقوم بشرح ظواهر الفيزياء النسبية في كتاب منفصل مع الفيزياء الحديثة). اثبتت الملاحظات العلمية ان T تزداد وحركة الايونات لا تبقى في نفس الطور مع فرق الجهد المطبق. بعض المعجلات تتغلب على هذه المشكلة من خلال تعديل الفترة الزمنية لفرق الجهد المطبق حتى تبقى الايونات مع فرق الجهد المطبق في نفس الطور.

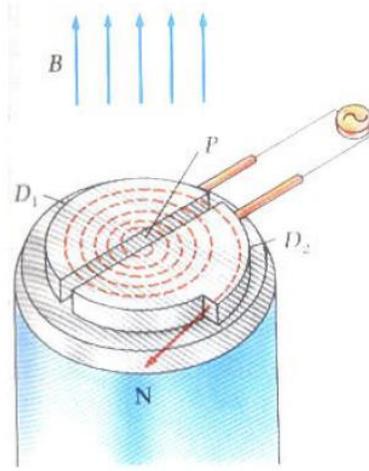
**ملاحظة:** لا يعتبر معجل السيكلترون من المعجلات المتطورة. يعد السيكلترون من المعجلات الهامة من الناحية التاريخية لانه اول معجل جسيمات تم استخدامه للحصول على جسيمات تتحرك بسرعات كبيرة. لا يزال السيكلترون مستخدما في المستشفيات للتطبيقات الطبية ولكن معظم المعجلات المستخدمة في البحوث العلمية لا تعتمد فكرة عملها على السيكلترون. المعجلات الحديثة تعمل من خلال مبدأ مختلف وتعرف عامة باسم المعجل الدرواني التزامني او السينكروترون synchrotrons.

# The Cyclotron

جهاز السنكلترون يعد جهاز حديث تم تصميمه في 1934 ويستخدم في تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات هائلة تستخدم في تجارب التصادمات النووية. وهنا ايضا يستخدم كلا من المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي لهذا الغرض.

## فكرة العمل

يتون السنكلترون من وعائين منفصلين على شكل الحرف الالجليزي **D** مفرغين من الهواء لتقليل احتكاك الجسيمات المعجلة مع جزيئات الهواء. يطبق فرق جهد متردد على طرفي الوعائين ويطبق مجال مغناطيسي عمودي على الوعائين كما هو موضح في الشكل



يتم اطلاق الجسيمات المراد تعجيلها في وسط المنطقة الفاصلة بين الوعائين لتأخذ مسار دائري وتعود إلى الوسط الفاصل في فترة زمنية قدرها  $T/2$  حيث  $T$  هو الزمن الدوري.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وبضبط تردد فرق الجهد المطبق بين الوعائين لقلب قطبيتها ليتوافق مع وصول الجسم المشحون للمنطقة الفاصلة حيث يكون مجالاً كهربائياً يكسب الشحنة دفعة لتزيد من سرعته وبالتالي يزداد نصف قطر الدوران للجسم المشحون تدريجياً حتى يصل إلى نصف قطر الوعاء وعندها يخرج الجسم المشحون من المعجل (السنكلترون) بسرعة كبيرة تعتمد على المعادلة

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$v = qBr/m$$

فإذا فرضنا أن هذه الجسيمات انبعثت من مصدرها في الوقت الذي كانت فيه الحجرة D1 موجبة الشحنة، عندئذ فإن كل جسيم سوف يتعجل عبر الفسحة بين الحجرتين بواسطة قوة كهربائية تؤثر عليه بسبب المجال الكهربائي المتولد في الفسحة بين قطبي مصدر الفولتية المتناوبة داخل الحجرة D2 سالبة الشحنة بسرعة معينة، وبما أن المجال المغناطيسي المسلط على الجهاز هو بمستوى سطح الحجرة ، لذا فإن دخول الجسيم إلى D2 سيكون عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي، وستؤثر عليه قوة مغناطيسية تجعله ينجر في دائرة ويخرج من الغرفة D2 في نفس اللحظة تماما التي تنعكس فيها الفولتية فينجذب الى الغرفة D1 دائرة ويخرج من الغرفة D2 بسرعة أكبر ويدور في دائرة أكبر. وهكذا تتكرر هذه العملية عدة مرات وفي كل مره يُعجل الجسيم المشحون إلى سرعات أكبر فأكبر وكذلك نصف قطر دائرة دورانه. وفي النهاية تُحرف الجسيمات عن محيط السيكلوترون بواسطة مجال مغناطيسي اخر لتخرج ح على هيئة حزمة ذات طاقة عالية نحو الخارج من خلال المنفذ بهدف استعمالها في قصف هدف محدد، ومن المعادلة (3) نجد ان :

$$v = \frac{qBR}{m}$$

وبما أن أقصى مسار دائري يمكن أن تسلكه الجسيمات المشحونة يعادل نصف قطر السيكلوترون R لذا فإن أقصى سرعة يمكن الحصول عليها للجسيمات هي:

$$v_{max} = \frac{qBR}{m}$$

حيث R في هذه الحالة تساوي نصف قطر D1 ، ولكن أقصى طاقة حركية لايون تعطى بالعلاقة:

$$E_K = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

بالتعويض من المعادلة عن قيمة  $V_{max}$  ينتج ان أقصى طاقة حركية تكتسبها هذه الجسيمات هي:

$$E_K = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

ولكن هذه الطاقة الحركية يمكن معادلتها بالطاقة المكتسبة لايون الموجب نتيجة لعملية التعجيل:

$$E_K = qV$$

$$V = \frac{1}{2} \frac{q}{m} B^2 R^2$$

حيث ان V تمثل فرق الجهد المتناوب .

### مثال (١-٩)

في أنبوب راسم الذبذبات الكاثودي كان المجال الكهربائي  $1.2 \times 10^4 \text{ N/C}$  فأوجد المسافة التي سينحرف بها الإلكترون عقب خروجه من المجال مباشرة. علما بأن

الإلكترون يدخل المجال الجارف بطاقة حركة قدرها  $2000 \text{ electron Volt (eV)}$  وذلك في اتجاه عمودي على المجال. وأن طول اللوح الجارف  $1.5 \text{ cm}$ .

### الحل

حل هذه المسألة نطبق المعادلة (١-٧٢) وهي :

$$y_1 = \frac{eE}{2mv_0^2} x_1^2$$

وحيث إن طاقة الحركة تعطى بالمعادلة :  $KE = \frac{1}{2}mv_0^2 = 2000 \text{ eV}$

$$\therefore y_1 = \frac{eE}{4\left(\frac{1}{2}mv_0^2\right)} \cdot x_1^2 = \frac{eE}{4 \cdot KE} x_1^2$$

حيث KE طاقة الحركة .

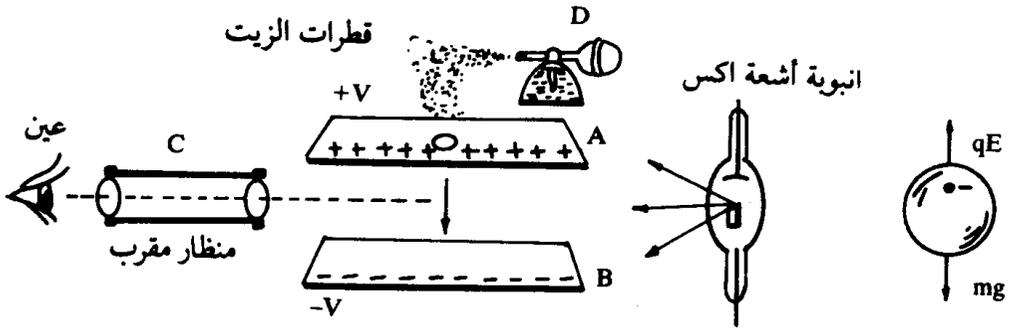
$$\therefore y_1 = \frac{(1.6 \times 10^{-19}) \times (1.2 \times 10^4)}{4(2000 \times 1.6 \times 10^{-19})} \times (0.015)^2 = 3.38 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### (١٢-١) قياس شحنة الإلكترون بطريقة ميليكان (تجربة نقطة الزيت)

#### Measurement of Charge of Electron with Milikan Oil Drop Experiment

استخدم ميليكان عام ١٩٠٩ م مجالا كهربيا منتظما في تعيين شحنة الإلكترون (e) وذلك لأول مرة وهي التجربة المعروفة باسم تجربة قطرة الزيت .

ويتركب جهاز ميليكان [شكل (١-٢٧)] من لوحين معدنيين متوازيين A و B وتوجد في اللوح العلوي منها فتحة صغيرة تسمح بمرور قطرات دقيقة جدا من الزيت والتي يُحصل عليها باستخدام رذاذ خاص (atomizer). يُمرر شعاع ضوئي بين اللوحين المتوازيين ويُستخدم منظار مقرب في اتجاه عمودي على اتجاه الشعاع الضوئي بحيث يمكن رؤية قطرات الزيت الدقيقة وهي تتساقط بين اللوحين تحت تأثير الجاذبية الأرضية. وتظهر قطرات الزيت هذه في مجال رؤية المنظار على شكل نقاط صغيرة مضيئة .



شكل (٢٧-١): جهاز ميليكان المكون من لوحين متوازيين A و B وتلسكوب C ورذاذ D. وتكتسب قطرات الزيت الإلكترونات عن طريق أشعة أكس

تلتقط قطرات الزيت أثناء تساقطها بعض الإلكترونات الحرة الموجودة في الحيز بين اللوحين A و B ويمكن زيادة عدد هذه الإلكترونات بإمرار أشعة سينية (X-ray) في الوسط المادي بين اللوحين، إذ تؤدي الأشعة إلى تأين الهواء، فتزداد كثافة الإلكترونات الحرة التي يمكن أن تلتقطها قطرة الزيت وبذلك تصبح مشحونة بشحنة سالبة ولتكن (-q).

فإذا سُلط بعد ذلك مجال كهربائي منتظم على الحيز الواقع بين اللوحين، بشحن اللوح العلوي بشحنة موجبة واللوح السفلي بشحنة سالبة، فسوف تكون القطرة المشحونة تحت تأثير ثلاثة قوى هي:

١ - القوة الكهروستاتيكية وتعمل إلى أعلى ومقدارها:

$$F_1 = qE \dots\dots\dots (١-٧٨)$$

٢ - الوزن ويعمل رأسياً إلى أسفل ومقداره:

$$F_2 = mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \cdot g \dots\dots (١-٧٩)$$

٣ - الدفع إلى أعلى، وهو يمثل دفع الهواء للقطرة إلى أعلى أثناء السقوط وطبقاً لقاعدة أرشميدس يكون دفع الهواء للقطرة مساوياً لوزن حجم من الهواء حجمه يساوي حجم القطرة أي أن:

$$F_3 = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho' \cdot g \quad \dots\dots (1-80)$$

حيث  $m$  كتلة قطرة الزيت،  $\rho$  كثافة الزيت،  $\rho'$  كثافة الهواء،  $g$  عجلة الجاذبية و  $a$  نصف قطر القطرة.

من المعادلتين (1-79) و(1-80) تكون القوة الفعلية المؤثرة إلى أسفل هي :

$$F_4 = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \rho' g$$

$$= \frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho - \rho') \quad \dots\dots\dots (1-81)$$

ويمكن عن طريق التحكم في شدة المجال الكهربائي  $E$  تغيير القوة المؤثرة على قطرة الزيت المشحونة بحيث يكون اتجاه حركتها إلى أعلى في حالة  $F_1 > F_4$  أو إلى أسفل في حالة  $F_4 > F_1$  وعندما تتساوى القوتان  $F_4, F_1$  تظل هذه القطرة بين اللوحين في حالة اتزان بين القوتين أي أن :

$$F_1 = F_4$$

$$\therefore qE = \frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho - \rho') \quad \dots\dots\dots (1-82)$$

ولما كان نصف القطر  $a$  صغيرا جدا بحيث يصعب قياسه عمليا، استخدم ميليكان لتعيينه طريقة ستوك لقياس اللزوجة والتي تنص على أن :

«الجسم الساقط في وسط لزج يكتسب سرعة نهائية منتظمة (terminal velocity) عندما تكون القوة الفعلية المؤثرة على الجسم إلى أسفل مساوية تماما قوة اللزوجة» .  
أي أن :

$$\frac{4}{3} \pi a^3 (\rho - \rho') = 6\pi\eta va \quad \dots\dots\dots (1-83)$$

حيث  $\eta$  معامل لزوجة الوسط و  $v$  سرعة الجسم

ولقياس سرعة السقوط الحر  $v$  للقطرة في الهواء بعد إزالة المجال الكهربائي يستخدم خطان دقيقان متوازيان في مجال رؤية المنظار يحددان مسافة سقوط معلوم وبتسجيل زمن سقوط القطرة خلال هذه المسافة يمكن إيجاد سرعة السقوط الحر.

وبمعرفة كثافة الهواء ( $\rho'$ ) ومعامل لزوجته ( $\eta$ ) وكثافة قطرة الزيت ( $\rho$ ) يمكن حساب نصف القطر ( $a$ ) للقطرة التي تحت التجربة وبالتالي يمكن حساب مقدار الشحنة  $q$  باستخدام المعادلة (٨٢-١) بعد معرفة شدة المجال الكهربائي ( $E$ ).

وقد وجد ميليكان أن الشحنة على القطرة  $q$  تكون دائما مضاعفا صغيرا لكمية شحنة ثابتة  $e$  وهي شحنة الإلكترون.

مثال (١٠ - ١)

تحرك إلكترون في مجال كهربائي شدته  $10^4 \text{ N/C}$  واتجاهه الى أعلى مسافة قدرها  $1 \text{ cm}$  من حالة السكون. احسب السرعة وطاقة الحركة التي اكتسبها وكذلك الزمن اللازم لقطع هذه المسافة.

**الحل**

بما أن القوة التي تؤثر على الإلكترون ثابتة فالتسارع (العجلة) ثابت ويساوي:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{(1.6 \times 10^{-19}) \times 10^4}{9.1 \times 10^{-31}} = 1.8 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$$

$$v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \times (1.8 \times 10^{15}) \times 10^{-2}} = 6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

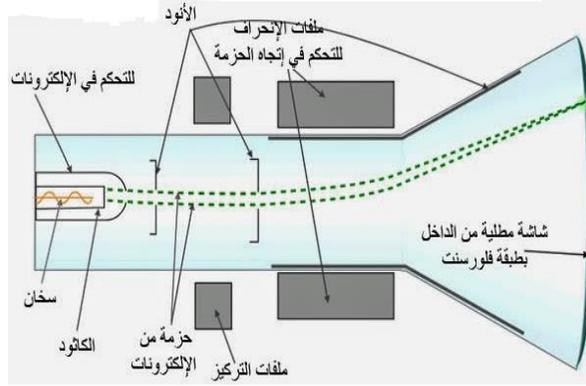
$$KE = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times (9.1 \times 10^{-31}) \times (6.0 \times 10^6)^2 \approx 16 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$t = \frac{v}{a} = \frac{6.0 \times 10^6}{1.8 \times 10^{15}} = 3.3 \times 10^{-9} \text{ s}$$

## أنبوبة أشعة الكاثود

بالاستفادة مما سبق ذكره فقد تم تصميم أنبوبة أشعة الكاثود التي استخدمت في كثير من الشاشات لأجهزة الكمبيوتر والتلفزيون وغيرهما من أجهزة عرض الفيديو قبل ظهور الشاشات الحديثة الآن مثل (CRT , LCD , LED).

يوضح الشكل التالي تركيب أنبوبة أشعة الكاثود:



حيث تتركب من إنتفاخ زجاجي مفرغ من الهواء على شكل مخروطي قاعدته تمثل الشاشة التي تظهر عليها الصورة وهي عبارة لوح زجاجي سميك تغطي من الداخل بطبقة فسفورية له القدرة على إشعاع ضوء وذلك عند إصطدام الشعاع الإلكتروني بهذه الطبقة.

ينتهي المخروط الزجاجي بعنق رفيع ويحتوي على قاذفة الكترونية وهي المسؤولة عن توليد الشعاع الإلكتروني وتزويده بالسرعة اللازمة للاصطدام بالشاشة فيجعل الشاشة تضيئ وتتكون هذه القاذفة من مجموعة مكونات وهي:

**الفتيلة** : وهي تقوم بتوليد طاقة حرارية عند مرور التيار الكهربى بها.

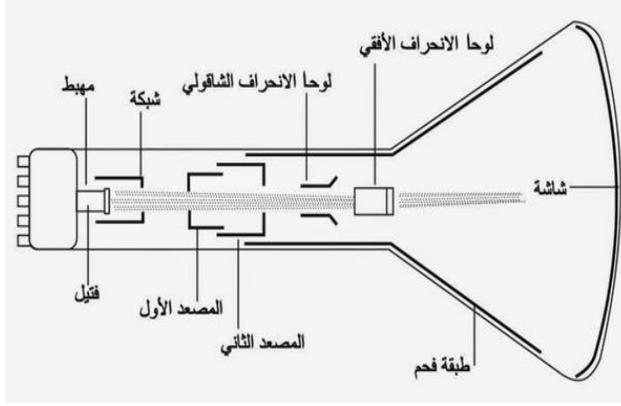
**الكاثود** : ويصنع من مادة مشعة من الاكترونيات والذي يتم تسخينها بواسطة الفتيلة فتنتطلق منه عدد كبير من الاكترونات والتي تشكل الشعاع الإلكتروني.

**الشبكة الحاكمة** : وهي على شكل إسطواني بها ثقب صغير جدا تمر منه الاكترونات المنطلقة من الكاثود على شكل حزمة الكترونية ويتم التحكم فى كمية الاكترونات من خلالها وذلك بالتحكم فى الجهد السالب المار بها.

**أقطاب التعجيل** : وتتكون من مصعدين وهما مسؤلان عن زيادة سرعة الشعاع الإلكتروني كما يعملان على تركيز الشعاع الإلكتروني.

**مفلات الانحراف** : وهي تنقسم الى مجموعتان مفلات إنحراف رأسية ومفلات إنحراف أفقية واللتان تقومان بتمديد الشعاع الإلكتروني أفقيا ورأسيا فيتمدد من نقطة ليملاً الشاشة كاملة.

طريقة عمل تعتمد على ما سبق ذكره من حركة الاكترون داخل المجالات الكهربائية والمغناطيسية ويمكن ان نتخلص كالتالي:



عند توصيل الانبوبة بالتيار الكهربى يمر التيار أولاً عبر الفتيلة والتي تسخن عند مرور التيار بها مما يؤدي الى تسخين الكاثود والذي يقوم بدورة بإشعاع الالكترونات ولكن تتحرك بأسلوب غير منتظم فتمر عبر الشبكة الحاكمة والتي تنظم الالكترونات على شكل حزمة الكترونية رقيقة.

بعد ذلك يمر الشعاع من خلال أقطاب التعجيل والتي تقوم بزيادة سرعة الشعاع بشكل كبير فيسقط الشعاع على الشاشة مكون نقطة بيضاء وهنا يأتي دور ملفات الانحراف والتي تقوم بمسح هذه النقطة وتمديدها أفقياً ورأسياً وبذلك تضيء الشاشة بكاملها مع العلم أن عملية المسح تتم بشكل سريع يصعب على العين أن تستوعبها.

كما يتم التحكم في معالم الصورة وذلك من خلال التحكم في شدة الشعاع الالكتروني فكلما زادت شدته زادت شدة الضوء المنبعث من الحبيبات الفسفورية.

والسؤال هنا هو كيف يتم رسم أشكال وصور مختلفة على الشاشة ؟

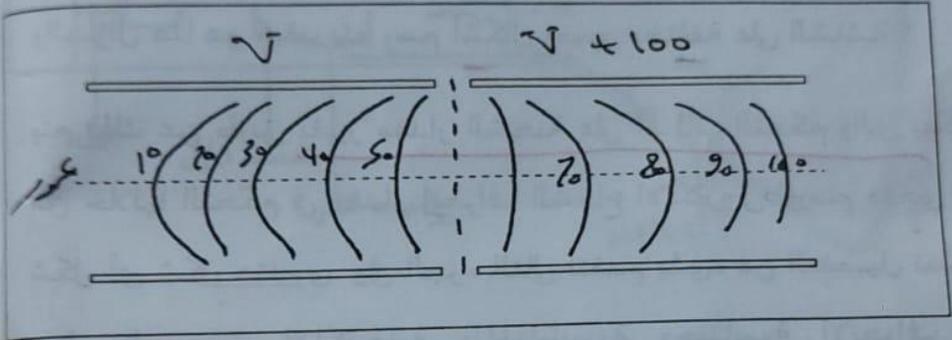
يتم ذلك عن طريق تغيير مقدار الشحنة على أقطاب التحكم والتي يمكن من خلالها التحكم في مقدار انحراف الشعاع الالكتروني ليرسم منحنى أو شكل أى شكل هندسى.

**هناك العديد من التطبيقات التي تعتمد على التأثير الفيزيائي للمجالات الكهربائية والمغناطيسية على الأجسام والمشحونة وسوف نستعرض فيما يلي بعضاً من تلك التطبيقات:-**

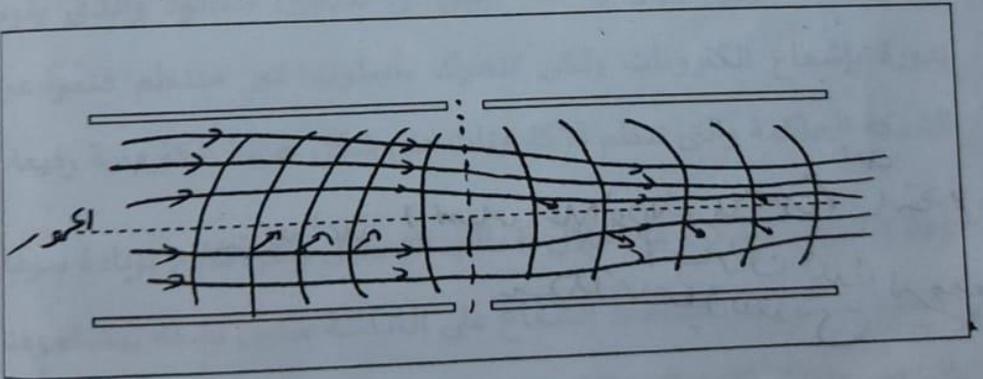
**العدسات الكهروستاتيكية**

## العدسة الإلكترونية

في الشكل التالي يوضح نظام كهروستاتيكي مجمع للإلكترونات يتكون من أسطوانتين موضوعين تحت جهد كهربي غير متساوي بحيث تكون الأسطوانة الأولى تحت جهد كهربي أقل أما الأسطوانة الثانية تحت جهد كهربي أعلى وتحتوي هاتين الأسطوانتين علي خطوط تساوي الجهد وفيما يلي شرح لكيفية عمله:



شكل يوضح خطوط تساوي الجهد داخل النظام الكهروستاتيكي

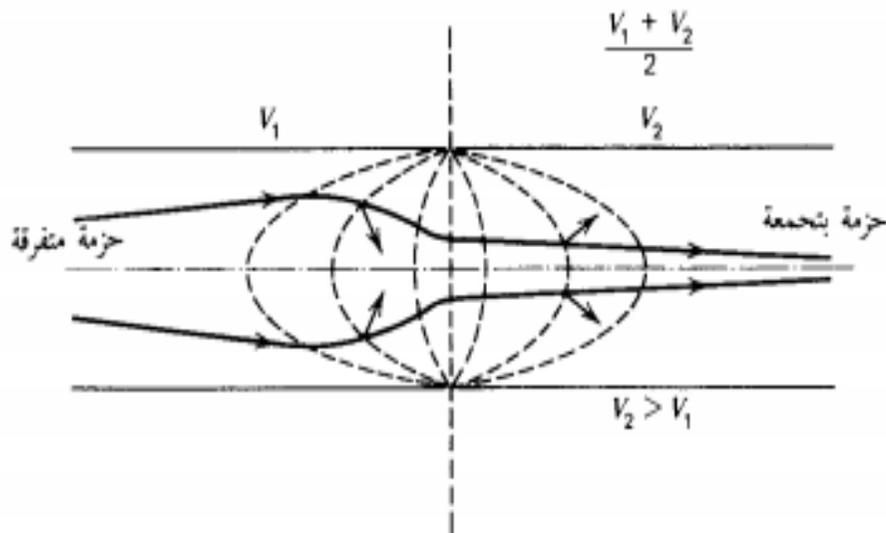


شكل يوضح مسار للحزمة اشعة الالكترونات داخل النظام الكهروستاتيكي

## يبين الشكل التالي عدسة

كهروستاتيكية وهي مكونة من إسطوانتين متساويتي القطر ومتركتين في المحور ومفصولتين عن بعضهما بحيز فاصل ، وجهد الإسطوانة الأولى  $V_1$  في حين أن جهد الإسطوانة الثانية  $V_2$  . وتبين الخطوط المتقطعة أسطح تساوي الجهد . ويظهر على الشكل حزمة متفرقة من الأشعة الإلكترونية تدخل العدسة (من اليسار) . وكما هو معلوم تكون القوة المؤثرة على الإلكترون في إنجاء زيادة الجهد وعمودية على أسطح تساوي الجهد . وبذلك فإنه حتى منطقة الحيز الفاصل تكون القوة المؤثرة على الإلكترونات قوة مجمعة (أي تؤدي الى تجميع الإلكترونات في إنجاء محور الإسطوانة) . أما في المنطقة اليمنى أي بعد عبور الإلكترونات للحيز الفاصل يصبح إنجاء القوة مفرقاً من

جديد . وعلى الرغم من أن المجال متناظر تماماً حول الحيز الفاصل إلا أن شدة التفرق بعد عبور الحيز تكون أقل من شدة التجميع قبل عبور الحيز حيث أن سرعة الإلكترونات بعد عبور الحيز تكون أكبر . وبالإضافة الى ذلك فإن القوة المؤثرة على الإلكترون وهو بعيد عن المحور تكون أكبر بكثير من القوة المؤثرة عليه وهو قريب من المحور حيث أن هذه القوة تزيد بزيادة المسافة عن محور الإسطوانة . وعلى ذلك فإن هذه المجموعة تعمل كعدسة مجمعة للأشعة الإلكترونية ويمكن التحكم في قيمة بعدها البؤري وذلك عن طريق التحكم في فرق الجهد بين الإسطوانتين . ويتم أحياناً بناء مثل هذه العدسات الكهروستاتيكية من أسطوانتين مختلفتي القطر .



وعند دخول حزمة إلكترونية متفرقة من مصدر بسرعة ابتدائية (u) فإنه يؤثر عليها من النصف الأول من المجال قوي عمودية علي خطوط تساوي الجهد يمكن تحليلها إلى:

- (أ) المركبة الأفقية وهي اتجاه حركة الإلكترون إلى داخل المجال .  
(ب) المركبة الرأسية وهي في اتجاه عمودي علي اتجاه حركة الإلكترون مقربة من المحور. وإذا ما انتقلنا من النصف الأول للمجال إلى النصف الثاني تؤول هذه المركبات إلى المحور.  
(ج) المركبة الأفقية وهي في اتجاه حركة الإلكترونات إلى خارج المجال (أي نفس اتجاه المركبة أ).

(د) المركبة الرأسية وهي في اتجاه عمودي علي اتجاه حركة الإلكترونات تبعد عن المحور أي عكس اتجاه المركبة (ب).

ويجب ألا يغيب عن أذهاننا أن الإلكترون في النصف الثاني من المجال يتحرك بسرعة أكبر من تلك التي تحرك بها في النصف الأول وذلك نتيجة لتسجيله داخل المجال وعلي ذلك فإن تأثير المجال علي حركة الإلكترون في النصف الثاني منه بذلك فإن المركبتين (ب) ، (د) لا يلاقي كل منهما الآخر. بل ينسرف الإلكترون في النهاية بمحصلة المركبتين بهذه الطريقة يتحرك الإلكترونات عند خروجها من المجال الإلكتروني في مسارات متجمعة وللتشابه الكبير بين عمل المجال في تجميع الإلكترونات وعمل العدسة

الضوئية في تجميع أشعة الضوء من التوزيع للمجال بالعدسة الإلكترونية كما هو موضح في الشكل السابق.

وفيما يلي نوضح تعبيراً رياضياً لإثبات أن النظام الإلكتروني يشبه في عمل العدسة الضوئية:

بالاستعانة بالشكل التالي حيث نفرض مجالين متتاليين جهدهما علي الترتيب  $V_1$  ،  $V_2$  ويفصل بينهما مسافة قدرها  $d$  وأن الشعاع الإلكتروني يسير في المجال  $V_1$  بسرعة  $u_1$  ويسقط بزاوية  $\theta_1$  مع الخط العمودي علي السطح الفاصل وعندما يدخل الإلكترون الفجوة (المسافة الفاصلة بين المجالين)  $d$  فإن مركبة السرعة العمودية علي السطح الفاصل تزيد نتيجة لتأثيرها بقوة نتيجة هذا المجال وهي  $( e \cdot \frac{V_2 - V_1}{d} )$  بينما لا تتأثر المركبة الثانية حيث لا توجد قوة مناسبة وعلية فإن الإلكترون ينتقل إلي الوسط بسرعة  $u_2$  صانعاً زاوية  $\theta_2$  مع الخط العمودي علي السطح الفاصل.

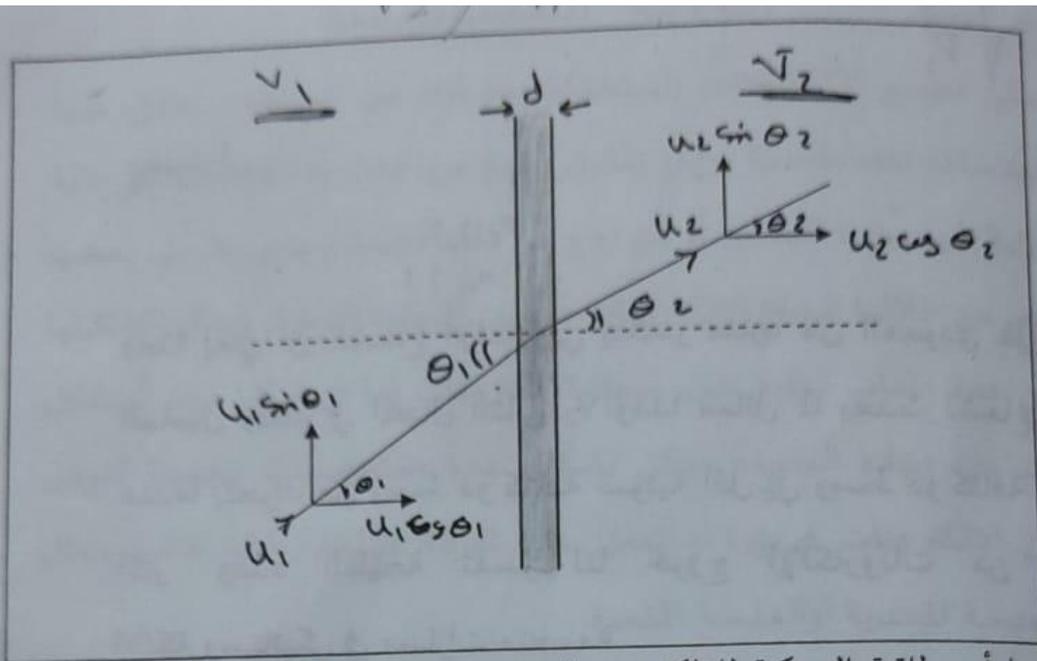
ونتيجة لما سبق فإن:

$$V_2 \cos \theta_2 > V_1 \cos \theta_1$$

$$V_2 \sin \theta_2 > V_1 \sin \theta_1$$

$$\therefore \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_2}{V_1} = n_{12}$$

حيث  $(n_{12})$  معامل الانكسار من الوسط الأول إلي الوسط الثاني.



وبما أن طاقة الحركة للإلكترون الذي يتحرك في المجال ( $V_1$ ) تعطي من

$$F = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad F = e E \quad \text{المعادلة: } e v_1 = \frac{1}{2} m u_1^2$$

$$\frac{1}{2} m u_1^2 = e V_1$$

$$\therefore u_1 = \sqrt{\frac{2e V_1}{m}}$$

وكذلك طاقة الحركة للإلكترون في المجال الثاني  $V_2$  تعطي من المعادلة :-

$$\frac{1}{2} m u_2^2 = e V_2$$

$$\therefore u_2 = \sqrt{\frac{2e V_2}{m}}$$

إذن بالتعويض عن قيم السرعات  $u_1, u_2$  في معادلة معامل الانكسار

السابقة ينتج ان:

$$u_2 \cos \theta_2 > u_1 \cos \theta_1$$

$$n_{12} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}$$

وحيث أن

$$V_2 > V_1$$

$$\therefore n_{12} > 1$$

وهذا يعني أن الشعاع الإلكتروني ينكسر مقترباً من العمودي على الحافصل وذلك في المجال الثاني  $V_2$  وهذا مماثل لما يحدث لشعاع ضوئي عندما يتحرك من وسط ذو كثافة ضوئية أقل إلى وسط ذو كثافة ضوئية أكبر. وهذه النتيجة تفسر لنا خروج الإلكترونات من المجال الألكتروستاتيكي في مسارات متجمعة.

## Electron microscope

**مقدمة:** بداية نحتاج الى ان نتعرف على معامل مهم في عملية التكبير هو قوة التمييز (Resolution power) أو قوة التبيين (التحليل) (Resolving power) وهي أصغر مسافة بين أصغر جسمين متقاربين يمكن أن نراهما بوضوح تام مفصولين تماماً عن بعضهما من غير أي تداخل.

وحيث ان قوة التبيين لا يحددها نوع العدسة المستخدم في عملية الفحص وإنما يحددها الطول الموجي ( $\lambda$ ) للموجه الساقطة على العينة حيث ان العلاقة عكسية بين قوة التبيين والطول الموجي بمعنى انه كلما قل الطول الموجي تزداد قوة التبيين. وعليه فان قوة التبيين للميكروسكوب الضوئي لها حد معين ذا قيمة محددة مرتبطة بالطول الموجي لموجه الضوء وهو ثابت. وفيما يلي نستعرض ذلك بصورة تاريخية بسيطة من خلال تجارب بعض العلماء في هذا الصدد:

البداية: افترض العالم Ernst Abbe ان القدرة التحليلية لأي ميكروسكوب تعتمد على الطول الموجي للضوء المستخدم وبالتالي فان الميكروسكوبات التقليدية المعتمدة على الضوء المرئي سوف يكون لها حد أقصى للقدرة التحليلية لا يمكن أن تتجاوزه بأي حال من الأحوال ولهذا طور العالم Koehler جهاز ميكروسكوب يعمل بالأشعة فوق بنفسجية وبالرغم من أن

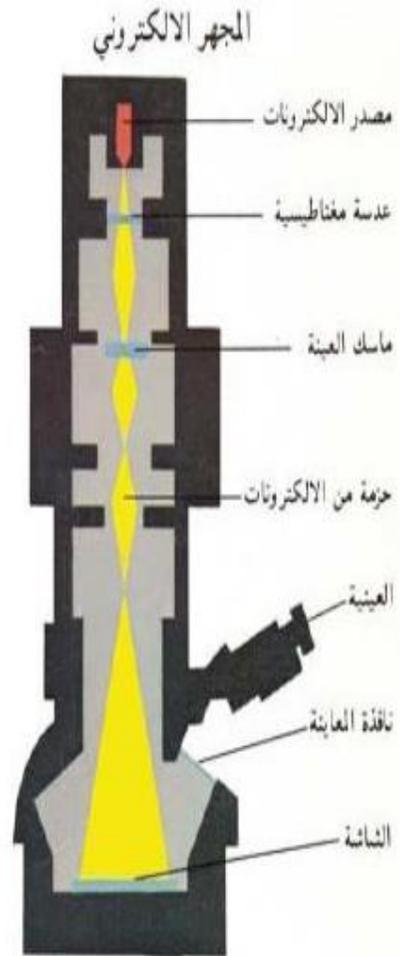
ذلك زاد القدرة التحليلية إلا أن اعتماد هذا الميكروسكوب على استخدام بصريات مصنعة من الكوارتز، لان الزجاج العادي يمتص الأشعة فوق البنفسجية، جعل سعره مرتفعا جدا. عند هذه المرحلة أصبح واضحا لدى العلماء أن الحصول على صور دقيقة بحجم أجزاء من الميكرون مستحيلا نظرا لقيود الطول الموجي للضوء المستخدم.

مع المزيد من الاكتشافات التي بدأت في العام 1858 بواسطة العالم Plücker الذي استطاع التحكم في أشعة الكاثود (وهي حزمة من الالكترونات ولكن لم يكن ذلك معروفا إلا بعد تجارب العالم ج ج طومسون) بواسطة المجالات المغناطيسية. تمكن العالم Riecke في العام 1891 من تبئير أشعة الكاثود بواسطة المجالات المغناطيسية مما يعني انه استطاع تصميم عدسة مغناطيسية بسيطة.

في العام 1928 في الجامعة التكنولوجية في برلين قام العالم Max Knoll برئاسة فريق بحثي بتطوير عدسات للتحكم في أشعة الكاثود لاستخدامها في الحصول على صور مكبرة. وبعد ثلاثة أعوام من الأبحاث والتجارب تمكن العالم Max Knoll وفريقه من الحصول على أول صورة مكبرة لشبكة وضعت فوق فتحة الانود وكان هذا في العام 1931. في نفس العام تمكن العالم Reinhold Rudenberg في شركة سيمينز Siemens company من الحصول على براءة اختراع للعدسة الكهروستاتيكية في الميكروسكوب الالكتروني.

في ذلك الوقت كان السلوك المزدوج للإلكترونات معروفا من خلال الفرضية التي وضعها العالم دي برولي De Broglie hypothesis وهي أن كل جسيم له سلوك موجي وبالتالي وجد أن الإلكترون يسلك سلوك موجي بالإضافة إلى سلوكه الجسيمي مثله مثل الضوء تماما وبالرغم من أن فرضية دبرولي وضعت في العام 1927 إلا أن الفريق البحثي المكلف بتطوير قدرة الميكروسكوب لم يكن يعلم بهذه الفرضية حتى العام 1932 وبمجرد أن وصلتهم تلك الفرضية والتجارب التي أكدت صحتها لاحظ العلماء انه بالإمكان استخدام الموجة المصاحبة للإلكترون في عملية التكبير في الميكروسكوبات لان هذه الموجة اصغر كثيرا من الطول الموجي للضوء المرئي (الطول الموجي المتوسط للضوء 5000 انجستروم في حين إن الطول الموجي المصاحب للإلكترون في حدود 1 انجستروم) وبالتالي يمكن تطوير أجهزة تكبير الأشياء على المستوى الذري. في العام 1933 تم الحصول على أول نجاح للحصول على صور مكبرة لعينة من ألياف القطن قبل أن تصاب العينة بالضرر نتيجة لاصطدام الالكترونات بها.

بعد هذا النجاح ازداد الاهتمام بالميكروسكوب الالكتروني من قبل العديد من المجموعات البحثية لتطويره واستمر التطوير ايضا في شركة سيمينز للحصول على صور لعينات بيولوجية وفي العام 1938 تم بناء أول جهاز TEM وهو الميكروسكوب الالكتروني النافذ. والصورة التالية توضح شكل عام لميكروسكوب الكتروني:



وفي الميكروسكوب الإلكتروني تمر

الإلكترونات من خلال سلسلة من المجالات المغناطيسية تشبه في عملها نظام العدسات في المجهر الضوئي وبذلك فالإلكترونات التي تنعكس عن العينة والتي تنفذ من خلالها تبعاً لكثافة التراكيب في العينة المفحوصة يمكن استقبالها على لوحات حساسة أو مشاهدتها على شاشات خاصة مفسفرة تسمح برؤية الصورة لامعة.

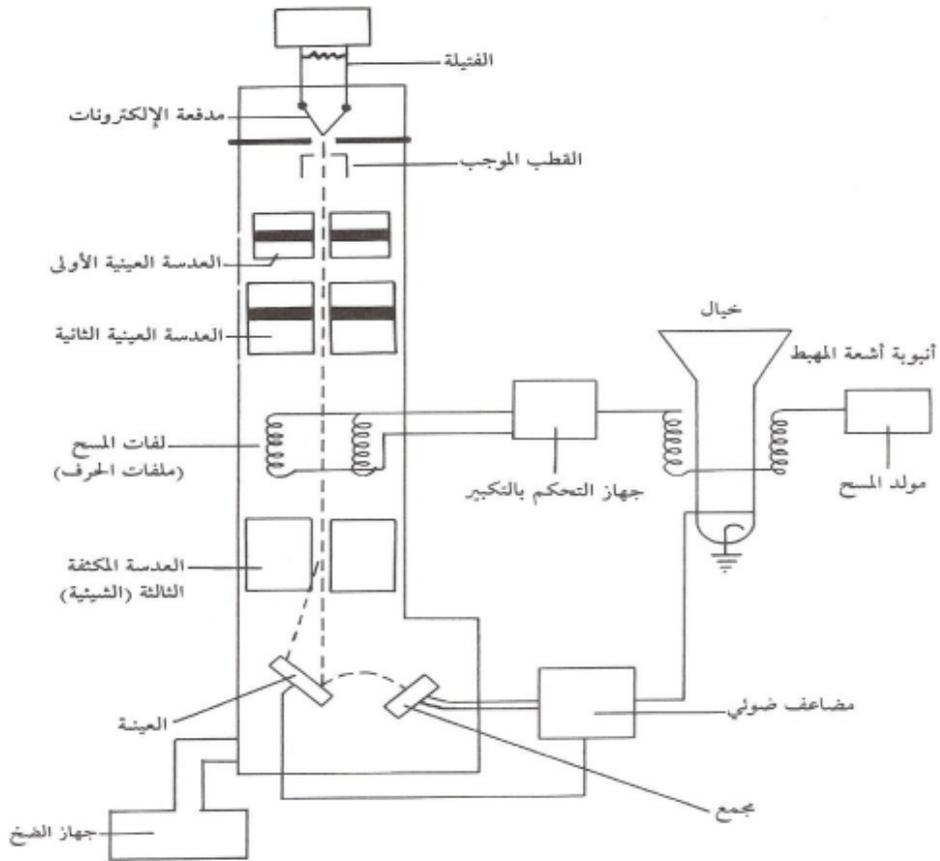
ومما هو جدير بالذكر أن الفحص الميكروسكوب الإلكتروني يحتاج إلى معاملات خاصة سواء في تحضير العينة أو في إعداد المجهر للفحص. من أنواع الميكروسكوب الإلكتروني :

المجهر الإلكتروني الماسح: (SEM) Scanning electron microscope

تقوم كمية قليلة من الإشعاع الإلكتروني بمسح العينة فتتجمع الإلكترونات المنبعثة من العينة لتكون الصورة المنبعثة على أنبوبة أشعة المهبط. والشكل التالي يوضح تركيبه بصورة مبسطة

توضع العينة المراد فحصها داخل العمود المفرغ من الهواء في المجهر الإلكتروني من خلال مدخل أو سداة محكمة الاغلاق .

وبعدما يفرغ العمود تمامًا من الهواء يطلق المدفع الإلكتروني حزمة شعاعية ذات طاقة عالية من الإلكترونات، ينطلق هذا الشعاع الإلكتروني متجهًا إلى الأسفل عبر سلسلة من العدسات المغناطيسية التي صممت لتقوم بتركيز وتجميع الإلكترونات في موضع محدد و دقيق.



بالقرب من نهاية العمود المفرغ السفلية توجد مجموعة من الملفات المغناطيسية الماسحة، والتي تقوم بدورها بتحريك الشعاع المركز من الإلكترونات فوق العينة المراد فحصها ذهاباً وإياباً و صفّاً تلو الآخر حتى يتم تغطية العينة كلها.

وعند ملامسة الشعاع الإلكتروني لسطح العينة تتحرر بعض الإلكترونات الثانوية من سطح العينة، ويتم الكشف عن هذه الإلكترونات المحررة عبر كاشف خاص يقوم أيضا بحصرها وإرسال إشارة خاصة لجهاز مكبر الإشارات الإلكتروني.

تتكون الصورة النهائية تبعا لعدد الإلكترونات المحررة من كل نقطة على سطح العينة، وبذلك تنشأ الصورة محاكية تماما للعينة و مطابقة لها .

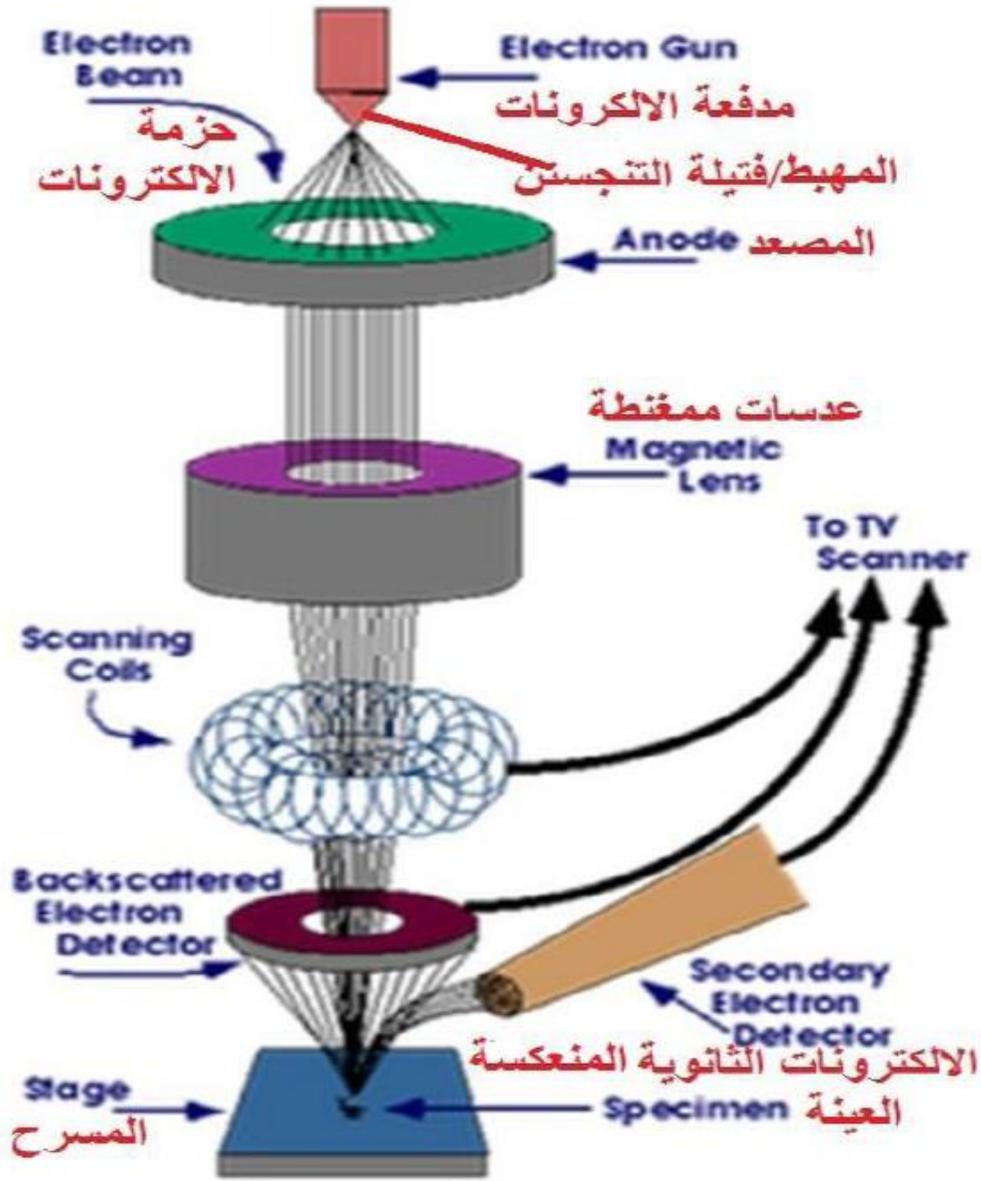
### الميكروسكوب الإلكتروني النافذ

#### Transmission electron microscope (TEM)

في حالة الميكروسكوب النافذ تتعرض العينة كلية للإشعاع الإلكتروني الذي ينفذ أو يمر من العينة ليكون الصورة على شاشة العرض ويأتي التباين في الصورة من الاختلافات في الكثافة الإلكترونية للعينة , أو من كمية الإلكترونات التي تمر من خلال العينة..

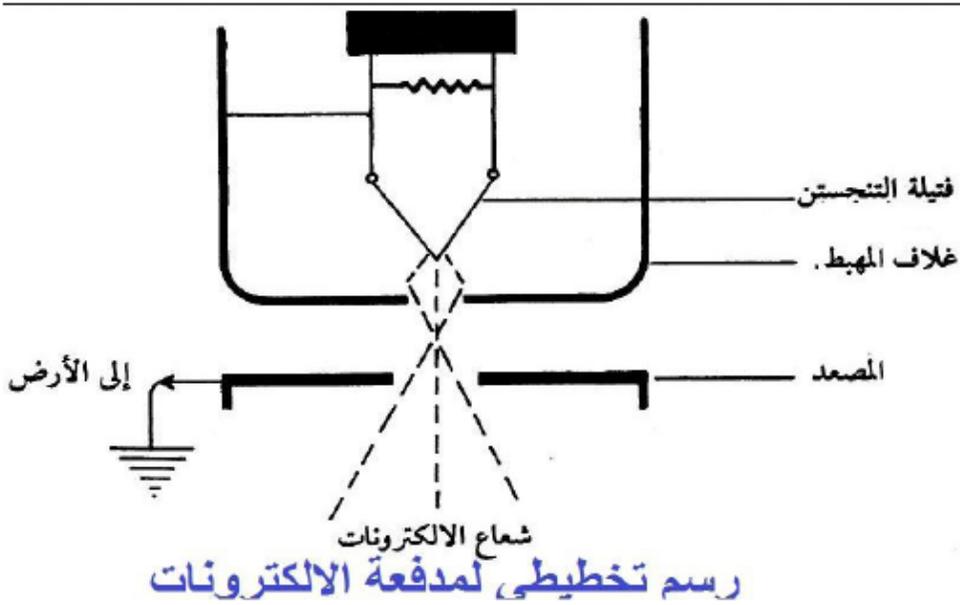
إن الميكروسكوبات الإلكترونية النافذة لها دقة أعلى بكثير من الميكروسكوبات الضوئية نتيجة الموجة المادية الصغيرة للإلكترونات، مما يمكن المستخدم من فحص تفاصيل العينة بشكل دقيق إلى درجة صف من الذرات وذلك بشكل يبلغ عشرة آلاف مرة قدرة تكبير مقارنة مع الضوئي. يمثل الميكروسكوب الإلكتروني النافذ TEM وسيلة تحليل أساسية في العديد من فروع العلوم الطبيعية مثل علم المواد وأبحاث أشباه الموصلات بالإضافة إلى العلوم الحيوية مثل علم دراسة الفيروسات وأبحاث السرطان. وهو أيضا لفحص العينات حيه لانه لايتطلب مقاطع .

والشكل التالي يوضح التركيب الأساسي للمجهر الإلكتروني النافذ



وفي اي ميكروسكوب الالكتروني الشئ الاساسى هو اصدار الاشعة الالكترونية المستخدمة في فحص العينات ومن هذا المنطلق لابد ان نستعرض سريعا تركيب المدفع الالكتروني **Electron Gun** والذى تتكون بصورة اساسية من الفتيلة و المصعد حيث ان:

الفتيلة عبارة عن سلك من التنجستن صغير على هيئة مخروط يعرف أيضا بالمهبط ويغلف المهبط صفيحة سالبة الشحنة تعرف بغلاف المهبط تساعد في ابتعاد الالكترونات عن منطقة المهبط ودفعها الى ثقب المصعد. اما المصعد فهو عبارة عن قطعة معدنية دائرية الشكل في مركزها ثقب.



اما مسار الاشعة الالكترونية داخل الميكروسكوب والتحكم فيها واسقاطها على العينة فقد تم شرحه في الاجزاء السابقة عن الحديث عن حركة الالكترونات في المجالات الكهربائية والمغناطيسية وايضا شرح العدسات الالكترونية والمغناطيسية.

والشكل التالي يلخص اوجه التشابه بين الميكروسكوب الضوئي والميكروسكوب الالكتروني:

# مجهر إلكتروني

مهيبط  
مصعد



إلكترونات

مغناطيسية

مغناطيسية

مغناطيسية

لوحة حساسة

منبع ضوئي

عدسات مكثفة

حامل العينة

جسمية

عدسات الإسقاط

خيال

# مجهر ضوئي

مصباح



ضوء

زجاج

زجاج

زجاج

عينية

مقاطع فيديو على اليوتيوب توضح فكرة عمل جهاز الميكروسكوب الالكتروني  
الماسح.



<http://www.youtube.com/watch?v=sFSFpXdAiAM>



<http://www.youtube.com/watch?v=fToTFjwUc5M>



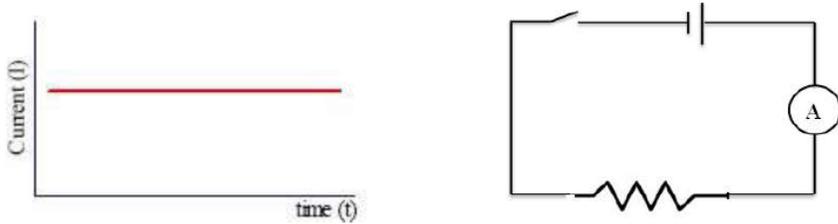
<http://www.youtube.com/watch?v=lrXMIghANbg>

## الفصل الثالث

### دوائر التيار المستمر

#### 1. دائرة تحتوي على مقاومة اومية

كما بالشكل التالي اذا وصلت دائرة كهربية تحتوي على مقاومة اومية (R) بمصدر للجهد الكهربي (بطارية مثلا قوتها الدافعة الكهربية E) فان التيار الذى يمر فى هذه الدائرة يصل الى قيمة المستقرة وهي  $\frac{E}{R}$  لحظيا حيث ان المقاومة الاومية ليست من عناصر تخزين للطاقة الكهربية والشكل البياني المقابل يوضح ان للتيار قيمة ثابتة لا تعتمد على الزمن.

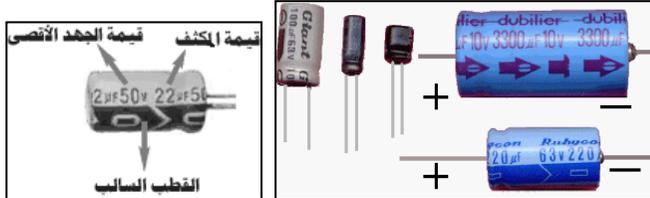


#### 2. دائرة تحتوي على مقاومة اومية و مكثف

يتكون المكثف الكهربي من لوحين من مادة موصلة بينهما مادة عازلة، ويتحدد نوع المكثف على حسب المادة العازلة المستخدمة في صناعته، فإذا ما كانت المادة العازلة الموجودة بين لوحى المكثف هي الهواء فيطلق على المكثف في هذه الحالة اسم المكثف الهوائي، وإذا آنت مصنوعة من مادة البلاستيك سمي مكثف بلاستيك، وإذا آنت المادة العازلة من السيراميك أطلق على المكثف اسم المكثف السيراميك، أما إذا استخدم محلول أيماوي أمادة عازلة بين لوحى المكثف أطلق على المكثف اسم المكثف الكيماوي أو الالكترولتى. تعرف قدرة المكثف على تخزين الشحنة الكهربية بالسعة الكهربية أو السعة ووحدة قياسها الفاراد، وتحسب قيمة سعة المكثف كالآتي:

$$\text{سعة المكثف} = \frac{\text{الشحنة المخزونة في المكثف } Q \text{ بالكولوم}}{\text{فرق الجهد بين لوحين المكثف } V \text{ بالفولت}}$$

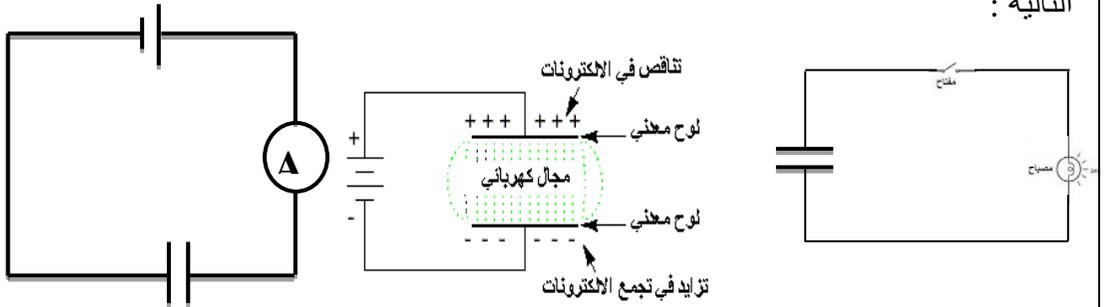
نستنتج من هذا القانون أن اختيار قيمة المكثف في الدائرة الإلكترونية تتحدد بعاملين أساسيين هما سعة المكثف، وقيمة فرق الجهد المطبق على طرفيه، ووحدة قياس السعة الفاراد يمكن تقسيمها إلى وحدات أصغر هي الميكرو فاراد والبيكوفاراد.



## العوامل المؤثرة على سعة المكثف:

يوجد ثلاثة عوامل أساسية تؤثر على سعة المكثف بصورة مباشرة وهذه العوامل هي:

- المساحة السطحية للألواح المكثف (a): إن سعة المكثف تتناسب طردياً مع المساحة السطحية للألواح، فإذا زادت مساحة سطح اللوح زادت سعة المكثف وذلك لزيادة استيعابه للشحنات الكهربائية، وبالعكس تقل سعة المكثف كلما قلت هذه المساحة.
- المسافة بين الألواح (d): تقل السعة عندما تزداد المسافة بين الألواح وتزداد كلما قلت تلك المسافة أي أنه يوجد تناسب عكسي بين سعة المكثف والمسافة بين ألواحه.
- الوسط العازل (المادة العازلة)  $\epsilon$ : تتغير سعة المكثف بتغير المادة العازلة بين الألواح ويعتبر الهواء الوحدة الأساسية لمقارنة قابلية عزل المواد الأخرى المستعملة في صناعة المكثفات. يوجد لكل مادة ثابت عزل يطلق عليه  $\epsilon$ . لكي نفهم فكرة عمل المكثف، سوف نقوم بتوصيل مكثف مع مصدر جهد مستمر DC كما في الدائرة التالية:



عندما يكون المفتاح في حالة open فإن الدائرة الكهربائية تكون مفتوحة ولا يسري التيار في الدائرة، فلا تعمل الدائرة، ولكن عند غلق المفتاح، فإن فرق الجهد للبطارية سوف يعمل على مرور الإلكترونات وترسيبها على أحد لوحين المكثف وهو اللوح القريب للقطب السالب (أي مرور تيار كهربائي) وعليه فإن اللوح الآخر تتكون عليه شحنة موجبة بالتأثير وتلك العملية سوف تؤدي إلى تكون فرق جهد بين لوح المكثف يعاكس جهد البطارية. تستمر عملية ترحيل الإلكترونات هذه، وبالتالي فرق الجهد بين لوح المكثف يزيد شيئاً فشيئاً حتى يصل فرق الجهد بين طرفي المكثف إلى نفس جهد البطارية، وبالتالي يتوقف مرور الإلكترونات (أي يصبح التيار صفراً) ولذا نقول بأن توصيل المكثف على التوالي يمنع مرور الإشارة للجهد المستمر DC، ولكن هذا يحدث بعد زمن شحن المكثف، وسوف نتحدث عن هذا الزمن فيما بعد.

إذا المكثف يعمل على تخزين شحنة كهربائية Q بداخله وبالتالي ينشأ بين طرفيه فرق جهد معين، فلو أخذنا المكثف السابق بعد شحنه، ووصلناه في الدائرة التالية مثلاً:

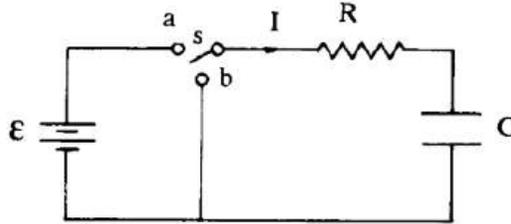
فإنه عند التوصيل سنجد أن المصباح يضيء، أي أن المكثف أصبح كالبطارية المشحونة، ولكن سيظل المصباح يضيء لفترة ثم تبدأ شدة الإضاءة في النقصان، حتى يطفئ المصباح تماماً، وتفسير هذا أنه في

بداية التوصيل كان المكثف كامل الشحن وبدأ المكثف يمد المصباح بالشحنات الكهربائية التي بداخله كي يضيء وبالتالي فإن الشحنات في حالة نقصان بإستمرار ، مما يعني أن فرق الجهد بين طرفيه أيضا في حالة نقصان مستمر ، حتى يفرغ المكثف كامل الشحنة التي بداخله ، فيتوقف المصباح عن العمل. وفيما يلي ندرس دائرة تحتوي مكثف سعته  $C$  ومقاومية مقدارها  $R$  متصلة على التوالي من خلال مفتاح  $S$  ببطارية قوتها الدافعة الكهربائية ثابتة ومقدارها  $E$  كما بالشكل التالي :

عند غلق الدائرة ( اتصال المفتاح  $S$  بالنقطة  $a$  ) وهي حالة يكون المكثف في حالة شحن فبعد انقضاء زمن قدره  $t$  تكون قيمة شدة التيار المار في المقاومة  $I$  مثلا وقيمة الشحنة على المكثف  $q$  وعندئذ تصبح قيمة الجهد بين طرفي المقاومة وطرفي المكثف كالتالي:

$$V_R = IR \quad , \quad V_C = \frac{q}{C}$$

ومعادلة توزيع الجهد للدائرة تكتب على الصورة التالية:



$$(1) E = V_R + V_C = IR + \frac{q}{C}$$

بضرب طرفي المعادلة في  $Idt$  ينتج ان:

$$(2) EIdt = RI^2dt + \frac{q}{C}Idt$$

بما ان  $I = \frac{dq}{dt}$  تصبح المعادلة السابقة على الصورة:

$$(3) EIdt = RI^2dt + \frac{q}{C}dq$$

بالنظر الى هذه المعادلة حيث يمثل المقدار  $EIdt$  الطاقة المستمدة من البطارية بعد زمن قدرة  $dt$  ويمثل المقدار  $RI^2dt$  الطاقة المبددة على شكل طاقة حرارية في الدائرة اما المقدار  $\frac{q}{C}dq$  فيمثل الطاقة المستخدمة في تخزين الشحنات على المكثف.

ويستمر شحن المكثف حتى ياخذ شحنته العظمي،  $q_0$  بعد انقضاء زمن معين تعتمد قيمته على قيمتي السعة  $C$  والمقاومة  $R$  عندها يقف التيار تماما وتؤول قيمته الى الصفر وعليه تؤول المعادلة (1) الى الصورة التالية:

$$(4) E = \frac{q_0}{C}$$

ولمعرفة قيمة الشحنة على المكثف عند اي لحظة  $t$  خلال فترة شحن المكثف يتبع ما يلي:.

$$(5) E = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$$

وبضرب اطراف المعادلة في  $C$  وإعادة كتابتها على الصورة:

$$(6) Rc \frac{dq}{dt} = Ec - q$$

بوضع  $y = Ec - q$  وعليه يكون  $\frac{dy}{dt} = -\frac{dq}{dt}$  وبالتعويض في المعادلة (5) يكون:

$$(7) -Rc \frac{dy}{dt} = y$$

بفصل المتغيرات واجراء التكامل كالتالى:

$$(8) \frac{dy}{y} = -\frac{1}{Rc} dt$$

$$\therefore \ln y = -\frac{1}{Rc} t + const.$$

وبالتعويض عن قيمة  $y$  تصبح المعادلة السابقة كالتالى:

$$(9) \therefore \ln(Ec - q) = -\frac{1}{Rc} t + const.$$

يمكن تعيين قيمة ثابت التكامل باستخدام الشروط الابتدائية وهى عند بداية الشحن اى  $t=0$  تكون قيم الشحنة تساوى الصفر اى  $q=0$  وبالتالى الثابت يساوى  $\ln Ec$  وعليه المعادلة (7) تصبح على الصورة:

$$(10) \therefore \ln(Ec - q) = -\frac{1}{Rc} t + \ln Ec$$

ويمكننا كتابة المعادلة (8) على الصورة التالية :

$$(11) q = Ec \left(1 - e^{-\frac{t}{Rc}}\right)$$

وعندما يتم الشحن سوف يمتنع سريان التيار وتصبح النهاية العظمى للشحنة  $q_0$  وبالتعويض عن  $Ec$  من المعادلة (4) تصبح المعادلة (11) على الصورة التالية:

$$(12) q = q_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{Rc}}\right)$$

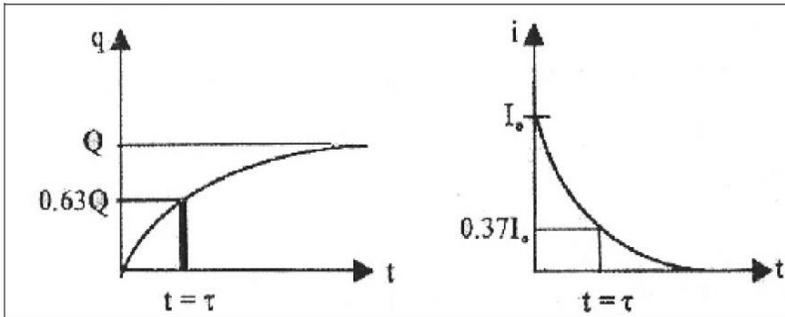
وبتفاضل المعادلة (12) يمكننا كتابتها بدلالة التيار اى :

$$(13) I = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{Rc}} = I_0 e^{-\frac{t}{Rc}}$$

حيث  $I_0$  هى القيمة العظمى للتيار التى يتم الحصول عليها عند لحظة غلق الدائرة.

والمقدار  $RC$  يسمى ثابت الزمن لان له وحدات الزمن (اثبت ذلك).

وبالنظر الى المعادلتين (12) و(13) نلاحظ ان الشحنة والتيار يسلكان طريقين متعاكسين حيث تتزايد الشحنة من الصفر الى قيمة عظمى بينما يتناقص التيار من قيمة عظمى الى الصفر. والشكل البياني التالى يوضح ذلك.



بوضع  $t=Rc$  فى المعادلة (12) يكون:

$$q = q_0(1 - e^{-1}) = q_0(1 - 0.37) = 0.63q_0$$

اى ان الثابت الزمن هو الزمن اللازم لنمو الشحنة على المكثف من الصفر الى 0.63 من قيمتها العظمي.

اما بوضع  $t=Rc$  فى المعادلة (13) يكون:

$$I = I_0e^{-1} = 0.37I_0$$

وهذه الصورة تعطي تعريف آخر لثابت الزمن بانه الزمن اللازم لكي يصل تيار الشحن الى 0.37 من قيمة العظمي.

✘ اما فى حالة تفريغ المكثف اى بتوصيل المفتاح S بالطرف b فان المكثف الذى سعته c وشحنته الابتدائية  $q_0$  سوف يبدأ فى تفريغ شحنته خلال المقاومة R وبفرض انه بعد مرور زمن t من بدء التفريغ أصبحت الشحنة على المكثف q وتيار التفريغ I وحيث ان الدائرة لا تحتوى على بطارية فان المعادلة (1) تكتب على الصورة التالية:

$$(14) 0 = IR + \frac{q}{c}$$

$$\therefore R \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{c}$$

بفصل المتغيرات والتكامل ومراعاة حدود التكامل وهى عن  $t=0$  تكون  $q=q_0$  وعند زمن t تكون الشحنة تساوى q.

$$\int_{q_0}^q \frac{dq}{q} = \int_0^t -\frac{1}{Rc} dt$$

$$\therefore \ln q - \ln q_0 = -\frac{1}{Rc} t$$

$$(15) \therefore q = q_0 e^{-\frac{t}{Rc}}$$

ولكتابة المعادلة (15) بدلالة التيار نفاضل المعادلة بالنسبة للزمن والاستعانة بالمعادلة (4) تصبح المعادلة على الصورة التالية:

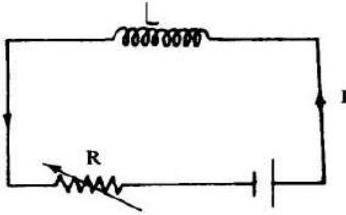
$$(16) \therefore I = -I_0 e^{-\frac{t}{Rc}}$$

والاشارة السالبة والتي لاتظهر فى المعادلة (13) تدل على ان تيار التفريغ ضد تيار الشحن. تمرين: اشتق تعريف لثابت الزمن فى حالة التفريغ بالنسبة للشحنة او للتيار وقارن بينه وبين حالة الشحن؟ ووضح اجابتك بمخطط بياني؟

وتطبيق عملي لهذه الدائرة يمكننا استخدامها فى المعمل والاستعانة بالمعادلات التى تم اشتقاقها حساب المقامات عالية القيمة وذلك عند تفريغ وشحن المكثف خلال المقاومة ومن امثلة هذه التجارب تسرب شحنة بالميكرو وايضا تسرب شحنة بالجلفانومتر.

#### 4- دائرة تحتوي علي ملف حثي

يمر تيار شدته  $I$  في ملف عدد لفاته  $N$  لفة . فإذا كان التيار ثابتا ثم تغيرت شدته بواسطة مقاومة متغيرة، شكل (٦-٨)، فإن هذا التغير في التيار يؤدي إلى تغير الفيض المغناطيسي  $\Phi$  داخل هذا الملف نفسه وهذا تتولد في الملف ذاته قوة دافعة تأثيرية عكسية ذاتية  $\mathcal{E}$  تقاوم التغير المسبب لها طبقا لقاعدة لنز، فإذا زاد التيار الأصلي  $I$  فإن  $\mathcal{E}$  الذاتية تتولد في اتجاه مضاد له وإذا نقص التيار الأصلي فإن  $\mathcal{E}$  الذاتية تتولد في اتجاهه نفسه .



شكل (٦-٨): مرور تيار في ملف عدد لفاته  $N$ ، أما  $R$  فهي عبارة عن مقاومة متغيرة «ريوستات» وضعت لتغيير قيمة التيار.

ويتوقف عدد خطوط الحث المتصلة بالدائرة والناجمة عن التيار المار بهذه الدائرة على الخواص الهندسية للدائرة، أي على شكلها ومساحتها وعدد لفاتها... الخ، ولكن بصرف النظر عن هندسة الدائرة فإن كثافة التدفق عند أي نقطة تتناسب طرديا مع التيار الذي ينتجه، ولذا فإن التدفق أيضا يتناسب مع التيار.

$$\Phi \propto I$$

$$\therefore \Phi = KI$$

حيث  $K$  ثابت يتوقف على العوامل الهندسية للدائرة إذا كانت  $N$  عدد لفات الملف فإن القوة الدافعة التأثيرية تعطى بالعلاقة التالية المعروفة بقانون فاراداي :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dI} \cdot \frac{dI}{dt} = -NK \frac{dI}{dt}$$

فإذا رمز لحاصل الضرب  $NK$  برمز واحد وليكن  $L$  فإن

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$

ويسمى الثابت  $L$  معامل الحث الذاتي (coefficient of self inductance) أو باختصار الحث الذاتي (self inductance).

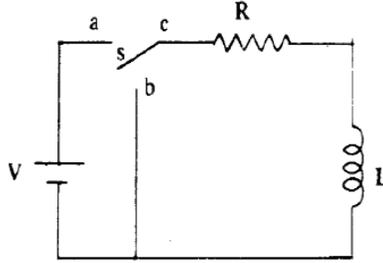
ويعرف الحث الذاتي أنه «القوة الدافعة التأثيرية الذاتية المتولدة في ملف عندما تتغير شدة التيار في الملف نفسه بمعدل وحدة شدة التيار في الثانية»

يتضح أن الوحدات في النظام العالمي (S.I.) للحث الذاتي هي  $(L = V/(A/s))$

أو ما يسمى بالهنري (Henry)

## 1. دائرة تحتوى على مقاومة اومية وملف

عند توصيل مصدر جهد ثابت مقداره  $V$  الى دائرة كهربية تحتوى على مقاومة اومية  $R$  وملف حثه الذاتي  $L$  كما بالشكل التالي:



☒ فى حالة نمو التيار

فعند قفل الدائرة فان المجال المغناطيسي الذى ينشأ فى الملف ينمو مع التيار وتولد قوة دافعة كهربية مضادة تتوقف قيمتها على معامل الحث الذاتي للملف  $L$  ومعدل نمو التيار  $\frac{dI}{dt}$  حيث  $I$  شدة التيار المار فى الدائرة عند اللحظة  $t$  اعتبارا من بداية قفل الدائرة. وطبقا لهذه الحالة فان للجهد مركبتين إحدهما للتغلب على هبوط الجهد فى المقاومة  $IR$  والاخرى لموازنة القوة الدافعة الكهربية المضادة  $L \frac{dI}{dt}$  ومن ثم فان معادلة توزيع الجهد تكون على الصورة:

$$(17) V = IR + L \frac{dI}{dt}$$

وبضرب المعادلة فى  $I dt$  يمكن الحصول على:

$$(18) VI dt = I^2 R dt + LI dt \frac{dI}{dt}$$

والمعنى الفيزيائي لهذه المعادلة يكون بتفسير او توضيح معنى كل مقدار فيها وهو كالتالي:

المقدار  $VI dt$  هو يمثل كمية الطاقة الكهربية التى تاخذها الدائرة من المصدر فى الزمن  $dt$ .

اما المقدار  $I^2 R dt$  فيمثل الطاقة التى تتبدد فى الدائرة على شكل طاقة حرارية فى المقاومة  $R$ .

والمقدار  $LI dt \frac{dI}{dt}$  فهو يمثل الطاقة التى تستخدم فى بناء المجال المغناطيسي فى الزمن  $dt$  وتخزن فيه. وتظل الامور تسير على هذا النحو من بداية قفل الدائرة حتى يبلغ التيار قيمة النهائية فيقف نموه عند قيمة ثابتة  $I_0$  وتصبح قيمة  $\frac{dI}{dt}$  مساوية للصفر عندئذ يقف نمو المجال المغناطيسي وتصبح الطاقة التى يعطيها المصدر الكهربي للدائرة كلها مساوية للطاقة الحرارية التى تتبدد فى المقاومة وبالتالي تخضع الدائرة لقانون اوم اى ان:

$$V = I_0 R$$

$$VI_0 dt = I_0^2 R dt$$

ويمكن الحصول على قيمة التيار  $I$  عند أى لحظة  $t$  خلال فترة نموه بعد قفل الدائرة أى اتصال  $s$  بـ  $a$  كما بالشكل السابق من خلال حل المعادلة التفاضلية (17) ويتم ذلك على النحو التالي:  
يمكننا كتابة المعادلة (17) بعد قسمة جميع حدودها على  $R$  وإعادة ترتيبها على الصورة:

$$(19) \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} + \left( I - \frac{V}{R} \right) = 0$$

وبوضع المقدار  $\left( I - \frac{V}{R} \right) = y$  ومنها  $\frac{dI}{dt} = \frac{dy}{dt}$  والتعويض فى المعادلة (19) يكون:

$$\frac{L}{R} \frac{dy}{dt} + y = 0$$

$$\therefore \frac{dy}{y} = -\frac{R}{L} dt$$

وبتكامل هذه المعادلة نحصل على :

$$\ln y = -\frac{R}{L} t + const.$$

$$\ln \left( I - \frac{V}{R} \right) = -\frac{R}{L} t + const.$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية أى عند  $t=0$  فإن  $I=0$  نحصل على قيمة ثابت التكامل والذى يساوى  $\ln \left( -\frac{V}{R} \right)$  وبالتعويض فى المعادلة السابقة عن قيمة الثابت هذه يكون:

$$(20) \ln \left( I - \frac{V}{R} \right) = -\frac{R}{L} t + \ln \left( -\frac{V}{R} \right)$$

وبترتيب المعادلة على النحو التالي:

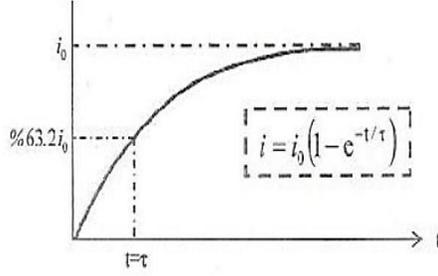
$$\ln \left( \frac{I - \frac{V}{R}}{-\frac{V}{R}} \right) = -\frac{R}{L} t$$

وبأخذ اللوغاريتم  $e$  للطرفين وترتيب المعادلة ينتج ان :

$$I - \frac{V}{R} = -\frac{V}{R} e^{-\frac{R}{L} t}$$

$$(21) \therefore I = I_0 (1 - e^{-\frac{R}{L} t})$$

حيث  $I_0$  هى القيمة النهائية الثابتة للتيار الذى يمر فى الدائرة.  
الشكل البياني يوضح تغيير التيار  $I$  بالنسبة للزمن  $t$  حسب العلاقة (21).



✘ في حالة اضمحلال التيار

في هذه الحالة نوصل المفتاح s بالنقطة b اى ان القوى الدافعة V للبطارية تساوي صفرا لان البطارية اصبحت مستبعدة وبذلك تكتب المعادلة (17) الي:

$$(22) 0 = IR + L \frac{dI}{dt}$$

وبترتيب المعادلة وفصل المتغيرات وإجراء التكامل كالتالي:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$$

$$\therefore \ln I = -\frac{R}{L}t + const.$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية اى عند  $t=0$  فان  $I = I_0$  وذلك عند لحظة انقطاع التيار نحصل على قيمة ثابت التكامل والذي يساوى  $\ln I_0$  وبالتعويض فى المعادلة السابقة عن قيمة الثابت هذه وترتيب المعادلة وبالتالي نحصل على المعادلة التى تعبر عن اضمحلال التيار والتي تكون على الصورة:

$$(23) \therefore I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

تمرين: ارسم شكلا بيانيا يعبر عن هذه المعادلة.

والمقدار  $\frac{L}{R}$  يسمى أيضا ثابت الزمن لان له وحدات الزمن (اثبت ذلك).

بوضع  $t = \frac{L}{R}$  فى المعادلة (21) نحصل على التالي:

$$\therefore I = I_0(1 - e^{-1}) = 0.63I_0$$

وفى هذه الحالة يمكننا تعرف الثابت الزمني بانه الزمن الذى يستغرقه التيار لكي يصل الى 0.63 من قيمته النهائية الثابتة.

بوضع  $t = \frac{L}{R}$  فى المعادلة (23) نحصل على التالي:

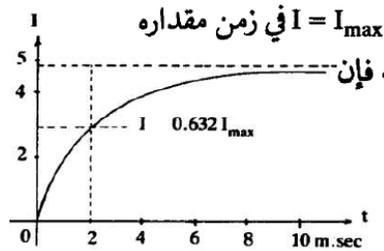
$$\therefore I = I_0 e^{-1} = 0.37 I_0$$

وفى هذه الحالة يمكننا تعرف الثابت الزمني بانه الزمن اللازم لوصول التيار الى 0.37 من قيمته الاصلية.

وبضرب المعادلة (22) فى  $Idt$  نحصل على معادلة الطاقة بالصورة التالية:

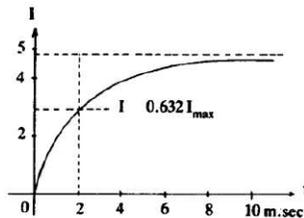
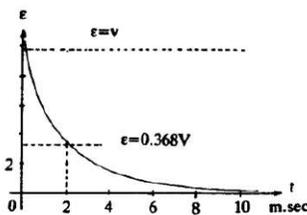
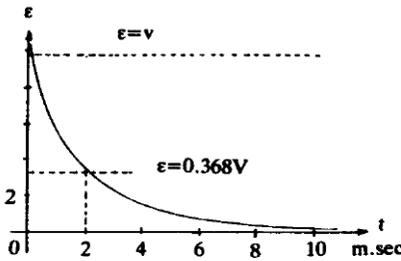
$$0 = I^2 R dt + L I dt \frac{dI}{dt}$$

ويتضح من هذه المعادلة ان الطاقة التى تتبدد المقاومة على شكل طاقة حرارية مستمدة من الطاقة من الطاقة المخزنة فى المجال المغناطيسي، ولذلك فان الطاقة المخزنة فى المجال المغناطيسي تكون قد استنفذت عن آخرها وتصبح قيمتها صفرا عندما تصبح قيمة التيار صفرا.



$$\mathcal{E} = V e^{-\frac{R}{L} t}$$

حيث  $\mathcal{E}$  القوة الدافعة المستحدثة



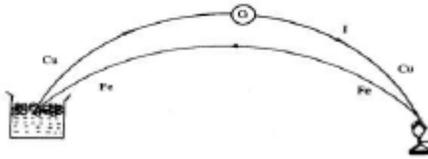
التأثيرات الكهروحرارية Thermoelectric effect

هو تحويل مباشر لاختلافات درجات الحرارة إلى **جهد كهربائي** والعكس.

إن تحويل الحرارة مباشرة إلى طاقة كهربائية تحويلاً عكسياً يتم بثلاث ظواهر هي: أثر سيبيك وأثر بلتييه وأثر طومسون.

أثر سيبيك

يتعلق بتولد قوة دافعة كهربائية (ق.د.ك) في دائرة كهربائية مكونة من ناقلين مختلفين جُعلت وُصلتاها في درجتَي حرارة مختلفتين.



حيث وجد أنه عند توصيل معدنين مختلفين على التوالي بجللفانومتر حساس كما في شكل (٢٧-٤) فإن تياراً يمر في الجللفانومتر بدون وجود قوة دافعة كهربائية خارجية في الدائرة ويحتاج الأمر فقط لرفع درجة حرارة أحد موضعي الاتصال عن درجة حرارة موضع الاتصال الأخر. ويسمى هذا التيار الناتج عن اختلاف درجة الحرارة بالتيار الكهربائي الحراري (thermoelectric current) والقوة الدافعة التي نشأ عنها هذا التيار بالقوة الكهربائية الحرارية (thermoelectric force) وتتوقف القوة الدافعة الكهربائية الحرارية على:

١- نوعي المعدنين .

ب - درجة حرارة طرفي اتصال المعدنين .

وتستخدم ظاهرة سيبيك لقياس درجة الحرارة، حيث يترك أحد موضعي الاتصال معرضاً للجو أو يوضع في جليد نقي آخذ في الانصهار (درجة الصفر المئوي) أو في سائل النيتروجين بحيث تظل درجة حرارته ثابتة وتسمى بدرجة حرارة الاسناد (reference temperature) في حين يعرض موضع الاتصال الآخر للنشء المراد قياس درجة حرارته وبقياس التيار الناتج يمكن الاستدلال على درجة الحرارة المجهولة.

## ظاهرة (تأثير) بلتير The Peltier effect

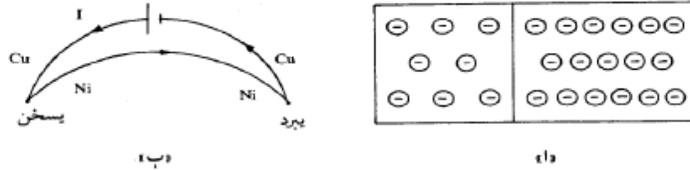
عند إمرار تيار كهربائي مستمر في وُصلة مكونة من سلكين معدنيين مختلفين تنخفض درجة حرارة الوصلة أو ترتفع تبعاً لاتجاه التيار فيها.

وقد استُعملت في دراسة الظاهرة أزواج مختلفة من المعادن (حديد - نحاس) و(بزموت - نحاس)، ودلت التجارب على أن قوةً كهربائيةً تتولد عن الوصلة وجهتها من البزموت إلى النحاس وسُميت هذه القوة قوة بلتير.

يعرّف معامل بلتير بأنه كمية الطاقة الحرارية المتولدة أو الممتصة في وصلة المادتين من جراء مرور شحنة كهربائية في الوصلة مقدارها كولوم واحد.

وقد استُفيد من الظاهرة في التبريد الكهحراري الذي طُبق منذ عام 1960 باستعمال أنصاف النواقل semiconductors التي اكتشف فيها هذا الأثر، وبخاصة في المادة بزموت - تيلوريد - bismuth telluride التي تتميز بناقلية حرارية ضعيفة مقارنة بالمعادن، وبقيمة معامل بلتير الكبيرة التي تبلغ 120 ملي فولت، في حين أنها 3 ملي فولت في وصلة «حديد - نحاس»، و 21 ملي فولت في وصلة «بزموت - نحاس». وسبب هذه القوة الدافعة الكهربائية هو انتشار (diffusion)

الإلكترونات الحرة من أحد الموصلين إلى الموصل الآخر طالما كان ضغط الغاز الإلكتروني (electron gas) أكثر تركيزاً في أحد الموصلين عن الآخر كما في شكل (١٢٩ - ٤).



وإذا عُدت مقاومة الموصلين مهملة فإن الطاقة الحرارية الممتصة (heat absorbed) والمتحررة (heat liberated) عند أي من الموضعين نتيجة لمرور التيار I في زمن قدره t هي:

$$H' = \pi It$$

حيث  $\pi$  هو معامل بلتير (Peltier coefficient) أو ما يسمى بقوة دافعة بلتير ووحدتها الفولت.

أما إذا كان للموصلين مقاومة قدرها R فإنه نتيجة لمرور التيار خلال المقاومة ستولد طاقة حرارية تتسبب في ارتفاع درجة الحرارة عند كل من موضعي الاتصال. ولكن نتيجة لوجود القوة الدافعة البليترية يحدث انخفاض في درجة حرارة أحد الموضعين وارتفاع في درجة حرارة الموضع الآخر وفي هذه الحالة تعطى كمية الحرارة في

$$JH = I^2 R t \pm \pi I t$$

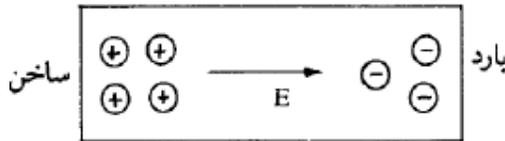
زمن: قدره t بالمعادلة :

حيث J ثابت جول (المكافئ الميكانيك لجول)

ويلاحظ أن ظاهرة بليتر ظاهرة انعكاسية أي إذا عكس اتجاه التيار يصبح موضع الاتصال البارد ساخن والعكس بالعكس مقارنة بالموضع الأول السابق ذكره. كما أن قيمة القوة الدافعة البليترية لا تزيد عن عدة مللي فولت mV. واكتشفت ظاهرة بليتر عام ١٨٣٤ م.

#### ظاهرة وتأثير طومسون Thomson effect

أثبت العالم وليام طومسون (S. W. Thomson) بالتجربة أنه إذا كانت هناك نقطتان على قضيب معدني تختلف درجتا حرارتهما، بحيث يكون الفرق بينهما dT، تنشأ قوة دافعة كهربية بينها تتناسب مع الفرق في درجة الحرارة dT.



إذا سخن أحد طرفي قضيب معدني ويرد الطرف الآخر كما في شكل (٤-٣٠) بحيث يتسوفر في القضيب تدرج حراري معين فإنه ينشأ في القضيب مجال كهربائي E نتيجة لتراكم الإلكترونات الحرة في أحد طرفي القضيب وهو الطرف البارد وقلت كشافتها عند الطرف الساخن. وفي هذه الحالة يصبح جهد الطرف البارد سالبا وجهد الطرف الساخن موجبا.

شكل (٤-٣٠): التدرج الحراري لموصل سخن أحد طرفيه بينما الطرف الآخر بارد.

وقد وجد أن هذا المجال يتناسب طردياً مع التدرج الحراري (temperature gradient) «معدل تغير درجة الحرارة  $dT$  بالنسبة للمسافة  $dx$  على طول القضيب المعدني» أي أن:

$$E \propto \frac{dT}{dx} \quad \therefore E = \sigma \frac{dT}{dx}$$

$$E = \frac{d\varepsilon}{dx}$$

$$\therefore d\varepsilon = \sigma dT$$

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \sigma dT$$

حيث  $T_1$  و  $T_2$  درجتا الحرارة عند طرفي الموصل، وتسمى  $\sigma$  بمعامل طومسون (Thomson coefficient)، بينما تسمى القوة الدافعة الكهربائية الحرارية بالقوة الدافعة الطومسونية (Thomson E.M.F.) ومن الملاحظ أن القوة الدافعة الكهربائية الحرارية لطومسون لا تبلغ قيماً كبيرة بل إن قيمتها لا تزيد على بعض كسور الألف من الفولت.

# الفصل الرابع

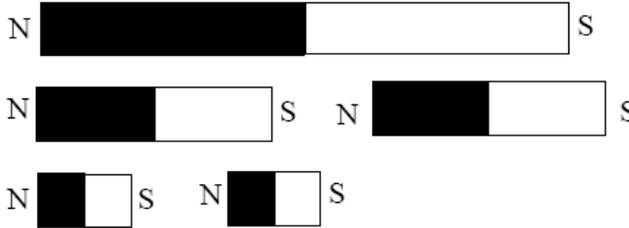
## المغناطيسية الكهربائية

### مقدمة:

الكهرومغناطيسية (المغناطيسية الكهربائية) وهي العلاقة بين المغناطيس والكهرباء أو بتعبير آخر الكهرومغناطيسية هي فيزياء الحقل (المجال) الكهرومغناطيسي أي إنها فرع الفيزياء الذي يدرس الحقل الكهرومغناطيسي الذي يتألف بدوره من حقل كهربائي و حقل مغناطيسي. ينشأ الحقل الكهربائي عن الشحن الكهربائية الساكنة التي تسبب القوى الكهربائية المسؤولة عن الكهرباء الساكنة و المحددة بقانون كولوم. تقود هذه الحقول الكهربائية أيضاً إلى جريان التيار الكهربائي في الموصلات الكهربائية. أما الحقل المغناطيسي فهو ينتج عن المغناطيس المختلفة إضافة للشحن الكهربائية المتحركة ، فعندما تسير شحنة الكهربائية ضمن تيار كهربائي ينشأ عنها حقل مغناطيسي محيطة بها . لذلك يصعب فصل هذين الحقلين عن بعضهما البعض في الكثير من الحالات .

### المغناطيس الطبيعي:

إذا كسرنا قضيباً مغناطيسياً نتج لدينا مغناطيسان لكل منهما قطب شمالي و قطب جنوبي، و يمكن عن طريق التكسير المتتالي تقسيم المغناطيس إلى أي عدد كبير من المغناطيسيات الشكل (٩ - ١). و يمكن أن نتصور استمرار هذه العملية حتى أصغر جسيم، و هو الذرة، لنصل إلى افتراض أن الذرة أيضاً مغناطيس له قطب شمالي و قطب جنوبي. و على ذلك فإن المغناطيس يتكون من عدد كبير من المغناطيسيات المفردة الصغيرة، و هي ما تسمى بالمغناطيسيات الذرية أو المغناطيسيات الجزيئية.

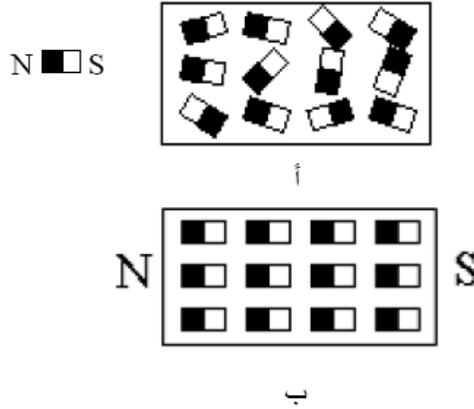


الشكل (٩-١) تقسيم المغناطيسات

تتألف جميع المواد من ذرات بها نواة موجبة الشحنة تدور حولها إلكترونات سالبة الشحنة فحركة هذه الشحنات السالبة تكون تيارات كهربائية صغيرة مما يتسبب في إحداث مجال مغناطيسي ذري له عزم مغناطيسي ذري.

وفي حالة عدم وجود أي مجال مغناطيسي خارجي تكون التيارات الصغيرة في اتجاهات مختلفة عشوائية كما في الشكل ( ٩ - ٢ ) مما يسبب في إحداث مجالات مغناطيسية ذرية محادة في حجم الذرة و محصلة التيارات و العزوم المغناطيسية في المادة تلغي بعضها بعضاً و بذلك لا يظهر أي أثر للمجال المغناطيسي. و يشذ عن هذه الحالة المغناطيس الدائم.

أما إذا وضعت المادة في مجال مغناطيسي خارجي، حثه  $B$  ، فإن القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنات المتحركة تغير من اتجاه مدار الإلكترونات في الذرات و مسار التيار للإلكترونات الحرة في المعادن و لذلك يتولد مجال مغناطيسي يكون اتجاهه مع اتجاه المجال الخارجي كما في حال المواد البارامغناطيسية كما في الشكل ( ٩ - ٢ ب ) أو عكس اتجاه المجال الخارجي كما في حالة المواد الدايمغناطيسية.



الشكل (٩ - ٢)

أ- العزوم المغناطيسية في اتجاهات مختلفة عشوائية و ذلك قبل وضعها في المجال المغناطيسي الخارجي.

ب- العزوم بعد وضعها في المجال الخارجي.

## المغناطيس الكهربائي :

المغناطيس الكهربائي عبارة عن مغناطيس تتولد فيه المغناطيسية فقط بسبب تدفق تيار كهربائي خلال سلك ما. وعادة ما تُصنع المغناطيسات الكهربائية من ملف من السلك بعدد لفات كبيرة لزيادة التأثير المغناطيسي. ويُمكن زيادة المجال المغناطيسي الذي ينتجه الملف بوضع مادة مغناطيسية، كقضيب حديدي، داخل الملف. ويتسبب التيار المار خلال الملف في تحول الحديد إلى مغناطيس مؤقت.

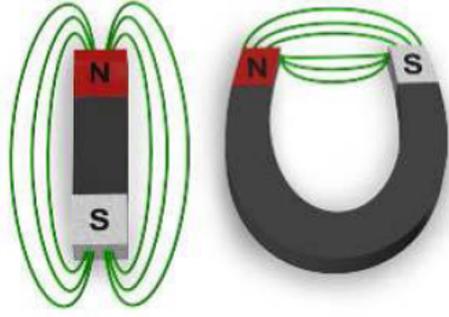
## توليد مجال كهرومغناطيسي :

عندما يمر تيار كهربائي خلال جزء من السلك فإنه يتولد مجال مغناطيسي حوله. وعند لف السلك حول قطعة من المعدن، مع ترك القطبين الشمالي والجنوبي مكشوفين يتمنط المعدن، بحيث يصبح مغناطيساً كهربائياً. وعادة ما يستخدم تجار الحديد الخردة مغناطيسات كهربائية ضخمة لالتقاط السيارات القديمة، وعند فصل التيار الكهربائي عن المغناطيس فإنه يفقد قوته ويمكن إسقاط السيارة في مكان آخر.

## المجال المغناطيسي :

المجال (الحقل) المغناطيسي هي قوة مغناطيسية تنشأ في الحيز المحيط بالجسم المغناطيسي أو الموصل الذي يمر به تيار كهربائي؛ أو بتعبير أبسط يمكن وصفها بأنها المنطقة المحيطة بالمغناطيس ويظهر فيها أثره (على مواد معينة). فإذا وضعت إبرة بوصلة في المجال المغناطيسي ذو قوة ما فإنها توجه نفسها في اتجاه معين في كل جزء من المجال، والخطوط المرسومة في اتجاه الإبرة عند النقاط المختلفة تحدد الوضع العام للخطوط التي هي عليها القوة المغناطيسية في المجال.

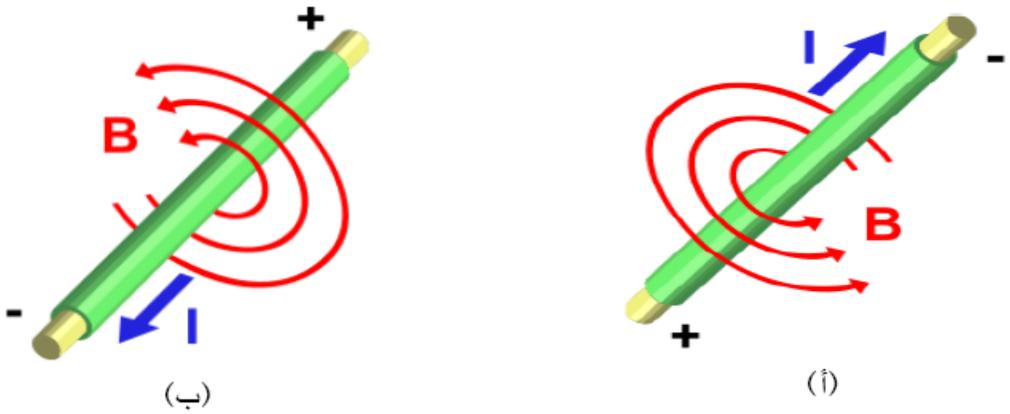
ويمكن تمثيل المجال المغناطيسي بخطوط القوى المغناطيسية الشكل (٩ - ٣) بحيث تكون كثافة الخطوط لكل وحدة مساحات من عنصر مساحة عمودية على اتجاه خطوط القوى وهي مقدار المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه المماس لخط القوى عند أية نقطة عليه معطياً اتجاه المجال المغناطيسي  $B$  عند تلك النقطة.



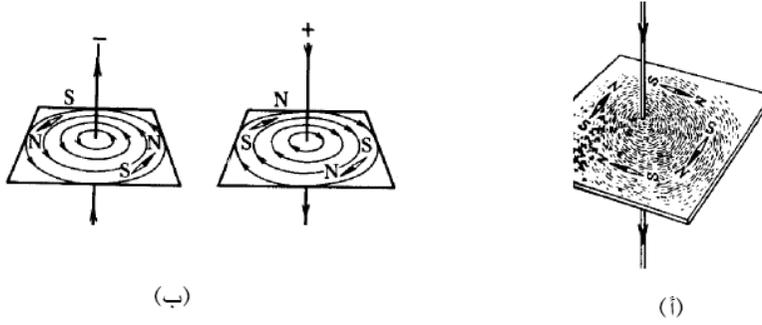
الشكل (٩- ٣)

### المجال المغناطيسي الناتج عن موصل مستقيم يحمل تياراً مستمراً ( قاعدة اليد اليمنى ):

عند وضع قطعة مغناطيس صغيرة بالقرب من سلك يحمل تياراً نرى أن المغناطيس يصبح تحت تأثير قوة شبيهة بالقوة التي تظهر بين قطبين مغناطيسيين. وبهذا فإن السلك الحامل للتيار يسلك سلوك قطب مغناطيسي و يؤثر في قطعة المغناطيس المجاورة له. فنقول عن قطعة المغناطيس بأنها واقعة في المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في السلك و نمثل المجال المغناطيسي الذي يولده التيار بخطوط دائرية مركزها السلك و يكون الاتجاه المحدد على الخطوط هو اتجاه القوة المؤثرة في قطب شمالي مجاور للسلك و كما هو موضح في الشكل (٩- ٤أ) و ينعكس اتجاه خطوط المجال عند عكس اتجاه التيار الشكل (٩- ٤ب).



ويمكن مشاهدة توزيع المجال المغناطيسي بنشر برادة حديد على ورقة موضوعة على قضيب مغناطيسي الشكل (٩ - ١٥) أو ورقة يمر خلالها سلك يمر به تيار كهربائي الشكل (٩ - ٥).  
 الشكل (٩ - ١٥) أو ورقة يمر خلالها سلك يمر به تيار كهربائي الشكل (٩ - ٥).



الشكل (٩ - ٥)

تتمثل القوة أو شدة المجال المغناطيسي بكثافة الخطوط التي تقطع مساحة متر مربع متعامدة معها. فكلما اقتربنا من السلك ازدادت القوة أو شدة المجال و بذلك ازدادت كثافة الخطوط وأصبحت الدوائر متقاربة. في حين أن المسافة تزداد بين الدوائر وتقل كثافة الخطوط عند الابتعاد عن السلك.

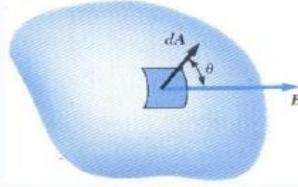
### الفيض ( التدفق ) المغناطيسي:

الفيض المغناطيسي وكما عرف بالفيض الكهربائي سابقاً يمكن تعريفه الفيض المغناطيسي على أنه عدد الخطوط المغناطيسية التي تعبر وحدة المساحات العمودية. افترض أن  $dA$  عبارة عن عنصر مساحة من سطح غير منتظم كما في الشكل (٩ - ٦) ، فالفيض المغناطيسي يعبر عنه بشدة المجال المغناطيسي  $B$  مضروب في المساحة العمودية  $dA$ . ويرمز للفيض المغناطيسي بالرمز  $\Phi_m$ .

$$\Phi_m = \int B \cdot dA$$

(9-1)

$$\Phi_m = BA \cos \theta$$



الشكل (٦-٩)

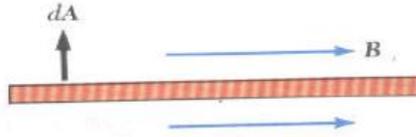
إذ يمثل  $A$  المساحة التي يقطعها الفيض  $\Phi$  . و تقاس  $\Phi$  بوحدة الويبر (Weber)  $Wb$  . أما  $B$  فإنها تقاس بالتسلا ويرمز لها بالرمز  $T$

$$\frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb} \cdot \frac{\text{meter}}{\text{Second}}} = \frac{\text{Newton}}{\text{Ampere} \cdot \text{meter}} = \text{Tesla} \equiv \text{Weber} / \text{m}^2$$

ووحدة Tesla هي وحدة كبيرة ويمكن استخدام وحدة الجاوس في نظام جاوس للوحدات حيث إن

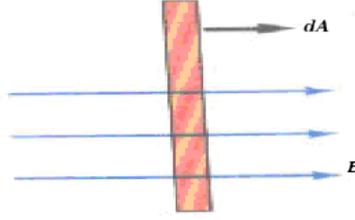
$$\text{Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$$

حيث إن  $dA$  هو متجه المساحة وقيمه تعطى مقدار المساحة واتجاهه يكون دائماً عمودياً على المساحة.



الشكل (٧ -٩)

في الشكل (٧ -٩) الفيض المغناطيسي يساوي صفرأ لأن المتجه  $dA$  عمودي على متجه المجال  $B$  .



الشكل (٨-٩)

في حالة الشكل (٩- ٨) الفيض المغناطيسي يساوي  $BA$  لأن المتجه  $dA$  في نفس اتجاه على متجه المجال  $B$  والزاوية المحصورة تساوي صفرًا.

**شدة المجال الناتج عن موصل مستقيم يحمل تياراً مستمراً:**

ترتبط خطوط القوى المغناطيسية باتجاه التيار الذي ولدها حسب قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل (٩- ١٤) نص هذه القاعدة على أنه عند القبض على السلك الحامل للتيار باليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار، فإن أطراف باقي الأصابع تشير إلى اتجاه المجال. ويعطى الحث المغناطيسي الناتج عن التيار  $I$  المار في سلك مستقيم طویل بالمعادلة

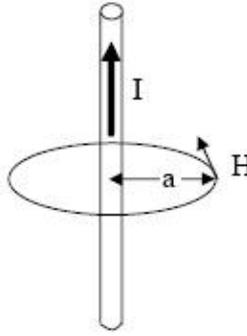
$$B = \frac{\mu I}{2\pi a} \quad (9-7)$$

حيث  $a$  هي المسافة بين النقطة التي نحسب عندها الحث والمسقط العمودي لهذه النقطة على محور السلك، كما هو موضح في الشكل (٩- ١٥).

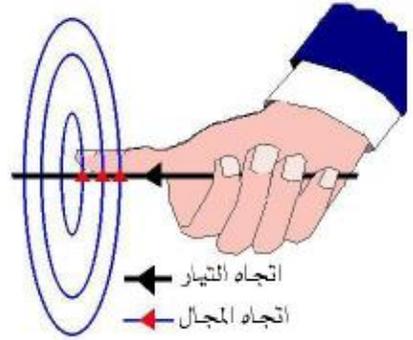
و باستعمال القانون (6-9) نجد أن شدة المجال الناشئ عن هذا التيار هي

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (9-8)$$

من هذه العلاقة نفهم اختيار وحدة  $A/m$  لشدة المجال، ونلاحظ أن شدة المجال لاتعتمد على نفاذية الوسط كما أشرنا إلى ذلك في نهاية الفصل السابق.



الشكل (٩- ١٥) المغناطيس الناتج عن مرور تيار في سلك مستقيم طويل



الشكل (٩- ١٤) قاعدة اليد اليمنى

مثال (٩- ٤):

يمر تيار كهربائي شدته 15A في سلك مستقيم طويل موضوع في الفراغ. احسب قيمة الحث المغناطيسي وشدة المجال الناتجين على بعد 4cm من السلك.

**الحل:**

نطبق المعادلتين (9-5) و(9-6) علماً أن في الفراغ  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$$B = \frac{\mu I}{2\pi a} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 15}{2\pi \times 4 \times 10^{-2}} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$H = \frac{I}{2\pi a} = \frac{15}{2\pi \times 4 \times 10^{-2}} = 59.7 \text{ A/m}$$

**القوة الميكانيكية المؤثرة على موصل يحمل تياراً مستمراً في مجال مغناطيسي:**

يحدد اتجاه القوة  $F$  التي تظهر على سلك حامل لتيار كهربائي  $I$  عند وضعه في مجال مغناطيسي كثافة فيضه  $B$  باستخدام قاعدة فليمنج لليد اليسرى الموضحة في الشكل (٩- ١٦) التي تنص على ما يلي: إذا أشارت السبابة إلى اتجاه المجال، وأشارت الوسطى إلى اتجاه التيار فإن الإبهام سيشير إلى اتجاه القوة.

أما قيمة هذه القوة فهي:

$$F = I B \ell \sin \theta \quad (9-9)$$

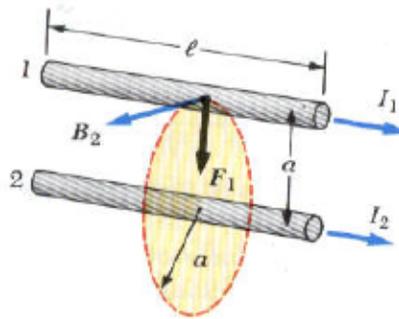
حيث  $\ell$  هو طول السلك و  $\theta$  هي الزاوية بين اتجاه التيار وخطوط المجال. ونستنتج أن القوة تصل إلى قيمتها القصوى  $I B \ell$  عندما يكون السلك عمودياً على المجال أي عندما  $\theta = 90^\circ$ . أما إذا كان السلك موازياً للمجال أي  $\theta = 0^\circ$  فإن القوة تنعدم.



الشكل (٩-٦) قاعدة فليمنج لليد اليسرى

### القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين يمر بهما تيار كهربائي:

تعلمنا من المحاضرات السابقة أن كل سلك موصل يمر به تيار ينشأ حوله مجال مغناطيسي وأن لكل مجال مغناطيسي قوة مغناطيسية تؤثر على سلك يمر به تيار ولهذا إذا وجد سلكان موصلان كما في الشكل (٩-١٧) ويمر بكل منهما تيار كهربائي  $I_1$  و  $I_2$  فإن المجال المغناطيسي  $B_2$  الناشئ عن التيار الثاني يؤثر بقوة مقدارها  $F_1$ , يمكن التعبير عن القوة التي يؤثر بها موصل على آخر كما في الخطوات التالية:



الشكل (٩-١٧)

لنعتبر المجال المغناطيسي الناشئ عن السلك 2 والتي تعطى قيمته بالمعادلة التالية:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \quad (9-10)$$

يقع السلك الثاني في المجال المغناطيسي للسلك الثاني والذي يبعد عنه مسافة  $a$  كما في الشكل (9-17)

وبالتالي لأن قوة مغناطيسية  $F_1$  تعطى بالمعادلة التالية:

$$F_1 = I_1 \ell B_2 = I_1 \ell \left( \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right) = \frac{\ell \mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (9-11)$$

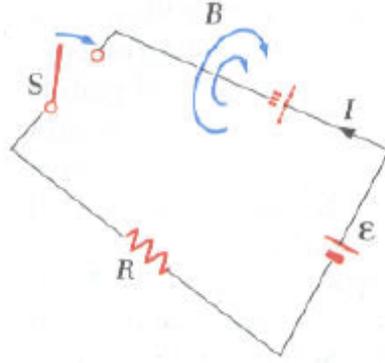
والقوة لكل وحدة أطوال تعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{F_1}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (9-12)$$

و بالمثل نحصل على القوة المؤثرة على كل وحدة طول من السلك 2،  $F_2$ ، وهي تساوي القوة  $F_1$  في القيمة وتعاكسها في الاتجاه. أما اتجاه القوتين فإنه يعتمد على اتجاه التيارين، فإذا كان التياران في نفس الاتجاه يتجاذب السلكان، ويتنافران في الحالة الأخرى.

### الحث الذاتي والحث المتبادل:

تعلمنا فيما سبق أن التيار ينشأ في الدائرة الكهربائية عندما يتغير الفيض المغناطيسي خلال الدائرة مع الزمن. وفي هذه المحاضرة سندرس الحث الذاتي **Self Inductance** الذي ينشأ في الدائرة نفسها عند مرور تيار كهربائي فيها أو بمعنى أدق عند غلق أو فتح الدائرة الكهربائية. وهذا التأثير (الحث الذاتي) يلعب دوراً أساسياً في دوائر التيار المتردد حيث إن التيار يتغير باستمرار مع الزمن.



الشكل (٩- ١٨)

اعتبر دائرة كهربية مكونة من بطارية ومقاومة ومفتاح كهربي كما في الشكل (٩- ١٨)، عند غلقها فإن التيار المار في الدائرة لن يصل إلى قيمته العظمى فور غلق المفتاح إنما سوف يستغرق بعضاً من الوقت نتيجة لقانون فارادي .كيف ذلك؟

عند غلق المفتاح في الدائرة الكهربية يحدث ما يلي:

١. يزداد التيار المار في الدائرة مع الزمن.
٢. يزداد الفيض المغناطيسي خلال الدائرة نتيجة لزيادة التيار.
٣. الفيض المتزايد يؤدي إلى توليد قوة دافعة كهربية في الدائرة ليعاكس الزيادة في الفيض

#### المغناطيسي Lenz's Law .

هذه القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الدائرة تعمل في اتجاه معاكس التيار الأصلي وهذا نتج عن الزيادة في الفيض المغناطيسي نتيجة لزيادة التيار عند غلق المفتاح... هذا التأثير في الدائرة يعرف باسم التأثير الحثي الذاتي. Self Induction.

من قانون فارادي يمكننا إيجاد صيغة رياضية للتعبير عن الحث الذاتي .حيث ان الفيض المغناطيسي يتناسب مع المجال المغناطيسي والأخير يتناسب مع التيار في الدائرة لذا فإن القوة الدافعة الكهربية للحث الذاتي تتناسب مع التغيير في التيار الكهربي.

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (9-13)$$

الحث الذاتي  $L$  في المغناطيسية يناظر السعة الكهربائية  $C$  ويمكن التعبير عن الحث الذاتي  $L$  بالأبعاد الهندسية للدائرة. فإذا افترضنا ملفاً عدد لفاته  $N$  فإن  $L$  تعطى بالعلاقة التالية:

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} \quad (9-14)$$

كما يمكن التعبير عن الحث الذاتي بالمعادلة التالية:

$$L = - \frac{\mathcal{E}}{dI/dt} \quad (9-15)$$

وهذه المعادلة تعطي قيمة الحث الذاتي للدائرة بغض النظر عن أبعادها الهندسية وإنما تعتمد على قياس الكميات الفيزيائية مثل القوة الدافعة الكهربائية والتغيير في التيار. وتكون وحدة الحث الذاتي هي الهنري Henry.

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} \quad (9-16)$$

#### إيجاد الحث الذاتي من خلال قياس الأبعاد الهندسية:

اعتبر ملفاً عدد لفاته  $N$  وطوله  $l$  أكبر بكثير من نصف قطر الملف. ينشأ عنه مجال مغناطيسي يعطى بالعلاقة التالية:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad (9-17)$$

أما الفيض الكهربي فيعطى بالعلاقة التالية :

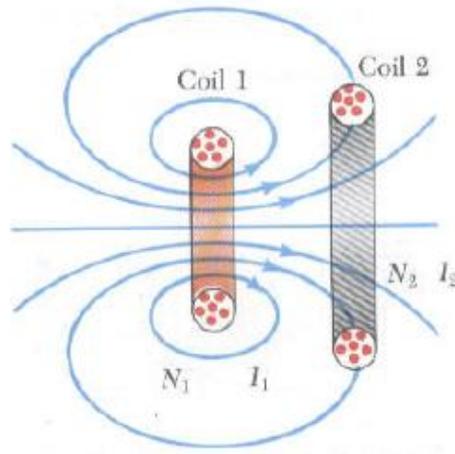
$$\Phi_m = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I \quad (9-18)$$

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (9-19)$$

$$L = \mu_0 \frac{(n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A \ell = \mu_0 n^2 (\text{volume}) \quad (9-20)$$

ومن هذا يتضح أن الحث الذاتي للملف يعتمد على خواصه الهندسية (الطول والمساحة وعدد اللفات)

### الحث المتبادل Mutual Inductance



الشكل (٩ - ١٩)

نتيجة للتغير في التيار الكهربي في دائرة يؤدي ذلك إلى تغيير في الفيض المغناطيسي في دائرة كهربية مجاورة. وهذا بالتأكيد يولد قوة دافعة كهربية في تلك الدائرة ويسمى هذا التأثير بالتأثير الحثي المتبادل **Mutual Inductance** لأنه نتج من تأثير دائرة كهربية على أخرى.

في الشكل (٩- ١٩) توضيح للتأثير الحثي المتبادل حيث يوجد ملفان متجاوران يمر في الملف الأول وعدد لفاته  $N_1$  تيار كهربي قيمته  $I_1$  ينشئ مجالاً مغناطيسياً يؤثر على الملف الثاني وعدد لفاته  $N_2$  بفيض مغناطيسي  $\Phi_{21}$  يؤدي إلى تيار حثي في الملف الثاني وقيمته  $I_2$ .

يعرف التأثير الحثي المتبادل  $M_{21}$  في الملف الثاني من خلال المعادلة التالية:

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} \quad (9-21)$$

$$\Phi_{21} = \frac{M_{21}}{N_2} I_1 \quad (9-22)$$

إذا كان التيار  $I_1$  في الملف الأول متغيراً مع الزمن فإنه من قانون فارادي تكون القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف الثاني نتيجة للملف الأول هي:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (9-23)$$

وبنفس الفكرة إذا كان التيار  $I_2$  في الملف الثاني متغيراً مع الزمن فإن من قانون فارادي تكون القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف الأول نتيجة للملف الثاني هي:

$$\mathcal{E}_1 = -M_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (9-24)$$

أي إن القوة الدافعة الكهربية المتولدة في ملف تتناسب طردياً مع معدل التغير في التيار الكهربي في الملف الآخر.

**حالة خاصة:**

في حالة ما يكون معدل التغير في التيار  $(dI_1/dt) = (dI_2/dt)$  فإن القوة الدافعة الكهربية

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 \quad (9-25)$$

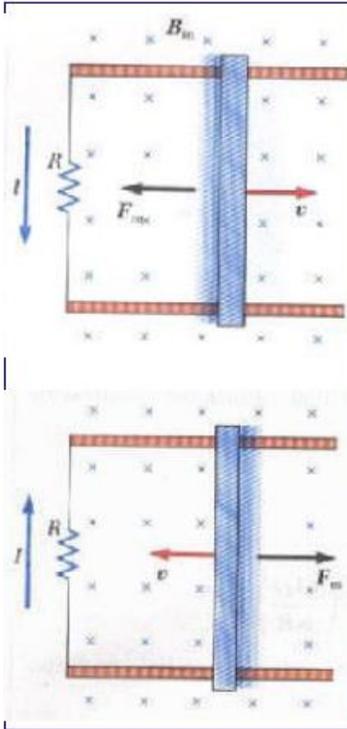
وهذا يعني أن

$$M_{21} = M_{12} = M \quad (9-26)$$

وتكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية في الملفين تعطي بـ

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad \mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (9-27)$$

وتكون وحدة الحث المتبادل هي الهنري Henry



نفترض مجالاً مغناطيسياً خارجياً في اتجاه الصفحة للداخل كما هو موضح في الشكل بعلامة  $\times$ . عند تحريك الساق المعدنية إلى اليمين يزداد الفيض المغناطيسي داخل الدائرة مع الزمن لأن المساحة تزداد. من قانون لينز ينشأ تيار حثي بحيث ينشأ قوة تقاوم حركة الساق إلى اليمين لتمنع الزيادة في الفيض المغناطيسي في الدائرة وعليه يكون اتجاه التيار الحثي عكس عقارب الساعة. لهذا التيار الحثي مجال مغناطيسي (في اتجاه خارج من الصفحة عكس المجال الخارجي) ليقاوم الزيادة في الفيض المغناطيسي.

إذا تحركت الساق المعدنية في المثال السابق إلى اليسار بحيث يقل الفيض المغناطيسي مع الزمن فإن التيار الحثي الناتج يكون مع عقارب الساعة بحيث يكون المجال المغناطيسي الناشئ عنه في اتجاه داخل على الصفحة (مع المجال المغناطيسي الخارجي) وذلك ليقاوم النقصان في الفيض المغناطيسي.

## المراجع

- 1- أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة رأفت كامل واصف دار النشر للجامعات ، 2005 - مصر
- 2- الكهربائية والمغناطيسية أ د محمد بن على احمد آل عيسى قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة الملك سعود .السعودية
- 3- مذكرة الكهرباء والتيار المتردد د عماد على احمد قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة جنوب الوادى - مصر
- 4- المغناطيسية والتيار المتردد د. حازم فلاح سكيك جامعة الأزهر - غزة
- 5- دوائر التيار المتردد لمهنة الالكترونيات والاتصالات - وزارة التربية - سوريا - 2013
- 6- نظرية الدارات الكهربائية د عبدالوهاب ترجمان
- 7- اسس الهندسة الكهربائية د محمد على عثمان و د سميح الجابى
- 8- **by R.A. Seaway Physics for scientists and engineering physics**
- 9- د /اسعد عبدالخالق محاضرات فى الكهرومغناطيسية جامعة الملك سعود
- 10- الميكروسكوب الالىكترونى د حازم سكيك جامعة الازهر - غزة
- 11- مواضيع متفرقة من شبكة الانترنت