

محاضرات مادة الفيزياء /1/  
لطلاب السنة الأولى  
(ميكاترونكس – معلوماتية)

الأستاذ الدكتور جبور نوفل جبور

2024 - 2023

جَامِعَة  
الْمَنَارَة  
MANARA UNIVERSITY

المحاضرة الثامنة  
الكهرباء (تيار ومقاومة)  
Electric (Current and Resistance)

- 1- مقدمة - Introduction
- 2- التيار الكهربائي – Electric Current
- 3- رؤية ميكروسكوبية (مجهرية) للتيار والسرعة الجرية – A Microscopic View:  
Current and Drift Speed
- 4- قياس التيار والجهد في دارات – Current and Voltage Measurements in Circuits
- 5- مقاومة، ومقاومة نوعية، وقانون أوم – Resistance, Resistivity, and Ohm's Law
- 6- تغير حرارة مقاومة – Temperature Variation of Resistance
- 7- الطاقة الكهربائية والاستطاعة – Electric Energy and Power
- 8- نواقل فائقة الناقلية – Superconductors

## 1- مقدمة - Introduction

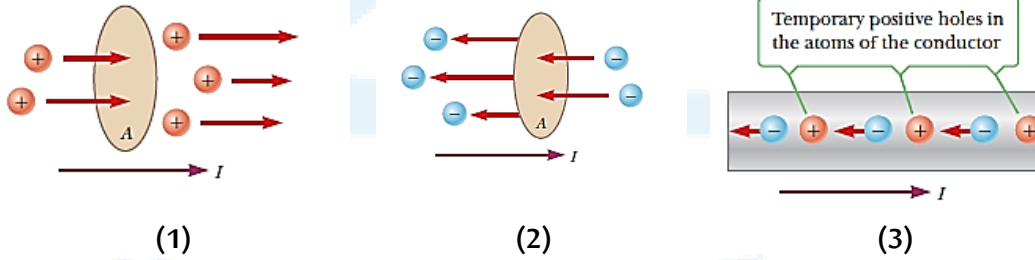
إن الكثير من التطبيقات والأجهزة يعتمد على مبادئ الكهرباء الساكنة، لكن الكهرباء أصبحت جزءاً من حياتنا اليومية عندما تعلم العلميين كيف يمكن توليد التدفق المستمر للشحنة وذلك من أجل فترة زمنية طويلة باستخدام البطارية.

في هذا الفصل ستتعرف التيار وتحدث عن العوامل التي تساهم في المقاومة وفي تدفق الشحنة في النواقل. سنتحدث أيضاً عن الطاقة المحولة لتيار كهربائي. هذه النقاط أو المواضيع ستكون أساسية إلى العمل المضاف في الدارات.

## 2- التيار الكهربائي – Electric Current

معدل تدفق شحنة عبر سطح  $A$  يمثل التيار الكهربائي  $I$ .  
القيمة الوسطية للتيار  $I_{av}$  تعرف بالعلاقة الآتية:

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1a)$$



معدل تدفق شحنة عبر سطح  $A$  يمثل التيار الكهربائي  $I$ . (1) اتجاه التيار له نفس اتجاه التدفق للشحنة الموجبة، (2) إن تدفق الشحنات السالبة باتجاه اليسار وهو يكافئ لكمية من الشحنات الموجبة تتدفق نحو اليمين، (3) في ناقل، الثقوب الموجبة تتشكل عند حركة (مغادرة) الإلكترونات للذرة باتجاه الكون. الإلكترونات السالبة تتحرك نحو اليسار وهي مكافئة لحركة الثقوب الموجبة نحو اليمين.

حيث  $\Delta Q$  الشحنة التي تنتقل عبر مقطع من ناقل خلال فترة زمنية قدرها  $\Delta t$ . إن وحدة التيار هي الأمبير (A - Ampere): حيث  $1 A = 1 C/S$ . اصطلاحاً، إن اتجاه التيار لها نفس اتجاه تدفق الشحنة الموجبة.

يُعرف التيار اللحظي (Instantaneous Current) كنهاية القيمة الوسطية للتيار عند انتهاء المجال الزمني للصفر، أي أن:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_{av} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1b)$$

مثال: (تطبيق مفهوم التيار):

شحنة كهربائية مقدارها تمر في سلك مصباح كهربائي خلال فترة زمنية قدرها . المطلوب: (1) إيجاد التيار الوسطي المار في المصباح، (2) عدد الإلكترونات الذي يمر بسلك المصباح في ، (3) إذا كان جهد البطارية ، ما هي الطاقة الكلية المعطاة لسلك المصباح؟ ما هي قيمة الاستطاعة الوسطى؟

الحل:

(1) إيجاد التيار الوسطي المار في المصباح:

من أجل ذلك نطبق العلاقة (1) فنجد أن:

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1,67 C}{2,00 s} = 0,835 A$$

(2) عدد الإلكترونات الذي يمر بسلك المصباح في  $5,00 s$ :

إن عدد الإلكترونات الكلي  $N$  المار بالسلك مضروباً بشحنة الإلكترون التي تساوي

( $q = 1,60 \times 10^{-19} C$ ) يساوي إلى الشحنة الكلية  $I_{av} \cdot \Delta t$ ، أي أن:

$$Nq = I_{av} \cdot \Delta t$$

$$N(1,60 \times 10^{-19} C) = (0,835 A)(5,00 s)$$

$$N = \frac{(0,835 A)(5,00 s)}{(1,60 \times 10^{-19} C)} \cong 2,61 \times 10^{19} \text{ electrons}$$

(3) إذا كان جهد البطارية  $12 V$ ، ما هي الطاقة الكلية المعطاة لسلك المصباح؟ وما هي قيمة الاستطاعة الوسطى؟

إذا ضربنا فرق الكمون بالشحنة الكلية نحصل على الطاقة المنقولة  $\Delta U$  لسلك المصباح:

$$\Delta U = q\Delta V = (1,67 C)(12,0 V) = 20,0 J$$

وإذا قسمنا الطاقة على الزمن نحصل على الطاقة الوسطية:

$$P_{av} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{20,0 J}{2,00 s} = 10,0 W$$

3- رؤية ميكروسكوبية (مجهرية) للتيار والسرعة الجرية – A Microscopic View:

### Current and Drift Speed

لنعتبر جسيمات متماثلة مشحونة تتحرك في ناقل سطح مقطعه  $A$ ، كما هو موضح في الشكل

المرفق. إن حجم عنصري من الناقل طوله  $\Delta x$  يساوي  $A\Delta x$ . إذا كان  $n$  يمثل عدد حوامل الشحنة

(number of carriers) في واحدة الحجم، وشحنة كل حامل (charge per carrier)

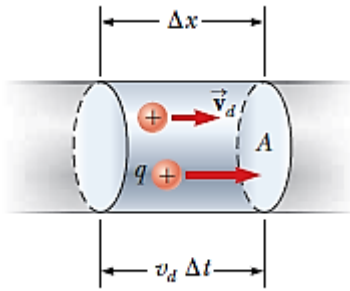
هي  $q$ ، فعدد الحوامل في الحجم العنصري يكون  $nA\Delta x$ . ومنه فإن الشحنة المتحركة في هذا العنصر

يساوي:

$$\Delta Q = (\text{number of carriers}) \times (\text{charge per carrier}) = (nAv_d \Delta t)q$$

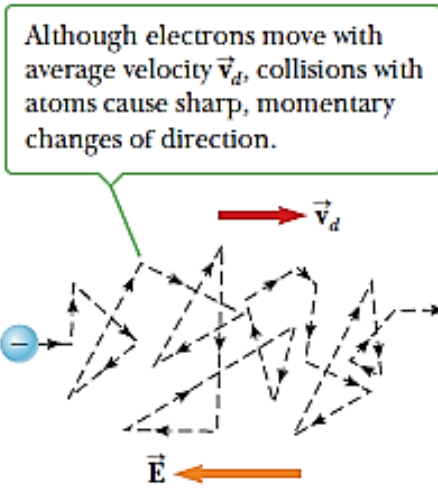
حيث  $q$  شحنة كل حامل من حوامل الشحنة. وبقسمة طرفي العلاقة على  $\Delta t$  وبأخذ نهاية الفترة الزمنية  $\Delta t$  للصفر، نرى أن التيار في الناقل يساوي:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_d A \quad (2)$$



ناقل ذات مقطع منتظم مساحته  $A$ . حوامل الشحنة تتحرك بسرعة  $v_d$ ، وتقطع بفترة زمنية قدرها  $\Delta t$  مسافة تساوي  $\Delta x = v_d \Delta t$ . إن عدد حوامل الشحنة في المقطع الذي طوله  $\Delta x$  يُعطى بالعلاقة  $nAv_d \Delta t$ . حيث  $n$  هو عدد حوامل الشحنة في وحدة الحجم.

والشكل التالي يوضح الحركة الزيفزائية لحاملة شحنة في ناقل.



شكل يمثل الحركة الزيفزائية (zigzag) لحاملة شحنة في ناقل. نشير هنا إلى أن اتجاه السرعة الجرية  $\vec{v}_d$  معاكس لاتجاه الحقل الكهربائي  $\vec{E}$ .

مثال: حساب السرعة الجرية للإلكترونات:

سلك من النحاس سطح مقطعه  $(3,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2)$  يمر به تيار كهربائي  $(10,0 \text{ A})$ . المطلوب: (1) بفرض أن هناك إلكترون حرواحد في المعدن، أوجد السرعة الجرية للإلكترونات في هذا السلك. (2) استخدم فكرة الغاز المثالي لمقارنة السرعة الجرية مع الجذر التربيعي لسرعة للإلكترون (في غاز إلكتروني) السرعة الحرة للإلكترون في درجة حرارة تساوي  $(20,0^\circ \text{ C})$ ، والتي نرمز لها بـ  $v_{rms}$  (root-mean-squar "rms") والتي تساوي  $v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}}$ ، حيث  $m_e$  حيث كتلة الإلكترون التي تساوي  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  و  $k_B$  ثابت بولتزمان الذي يساوي  $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ، علماً أن كثافة النحاس تساوي  $(8,92 \text{ g/cm}^3)$ ، والكتلة الذرية للنحاس تساوي  $(63,5 \text{ u})$ ، حيث وحدة الكتلة الذرية التي تساوي.

الحل:

(1) حساب السرعة الجرية:

إن المقادير في المعادلة (2) معروفة إلا قيمة المقدار  $n$ ، أي عدد حوامل الشحنة الحرة بوحدة الحجم. يمكننا إيجاد قيمة باستخدام عدد أفوكادرو (Avogadro's Number) الذي يساوي  $(n = 6,02 \times 10^{23})$  والذي يمثل عدد الذرات وكل ذرة تساهم بشحنة واحدة في المعدن. إن حجم مول واحد من النحاس يمكن إيجاده من مفهوم الكثافة والكتلة الذرية. إن الكتلة الذرية هي نفسها، عددياً، وهو عدد الغرامات في المول من المادة.

بحساب حجم مول واحد من النحاس من الكثافة والعدد الذري نجد أن:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{63,5 \text{ g}}{8,92 \text{ g/cm}^3} = 7,12 \text{ cm}^3$$

وبتحويل الحجم من الـ  $\text{cm}^3$  إلى  $\text{m}^3$  نجد أن:

$$7,12 \text{ cm}^3 \left( \frac{1 \text{ m}}{10^2 \text{ cm}} \right) = 7,12 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

وبقسمة عدد أفوكادرو (عدد الإلكترونات في مول واحد) بحجم المول نحصل على عدد الكثافة  $n$  أي على عدد الإلكترونات في الحجم:

$$n = \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ electrons/mole}}{7,12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mole}} = 8,46 \times 10^{28} \text{ electrons/m}^3$$

وبحل المعادلة رقم (2) التي تسمح بحساب السرعة الجرية نجد:

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{I}{nqA} \\ &= \frac{10,0 \text{ C/s}}{\left( 8,46 \times 10^{28} \frac{\text{electrons}}{\text{m}^3} \right) (1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3)} \\ &= 2,46 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

(2) حساب السرعة  $v_{rms}$  لغاز من الإلكترونات في الدرجة  $(20,0^\circ \text{C})$ :

بتطبيق العلاقة المعطاة في المسألة نجد أن:

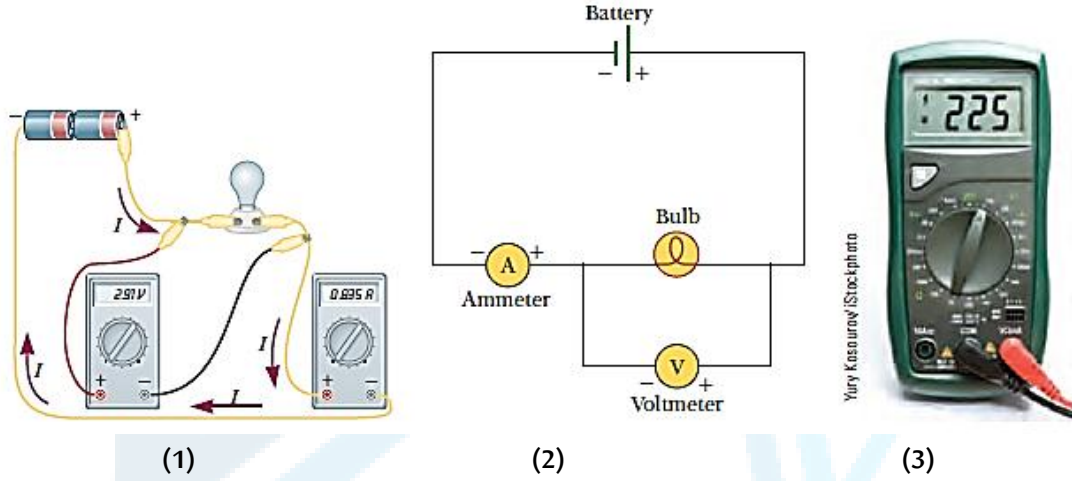
$$v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}}$$

وبتحويل درجة الحرارة إلا الكلفين نجد:

$$v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3 \left( 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \right) (273 + 20) \text{ K}}{m_e}} = 1,15 \times 10^5 \text{ m/s}$$

#### 4- قياس التيار والجهد في دارات – Current and Voltage Measurements in Circuits

لدراسة التيار الكهربائي في الدارات نحن بحاجة لفهم آلية قياس التيارات والجهود. إن الشكل المرفق يوضح مخطط لدارة ضرورية لقياس التيار وفرق الكمون، والدارة المكافئة لتلك المخطط. تتألف هذه الدارة من فقط من بطارية ومصباح. إن كلمة دارة تعني "حلقة مغلقة حيث يمر بها تيار".



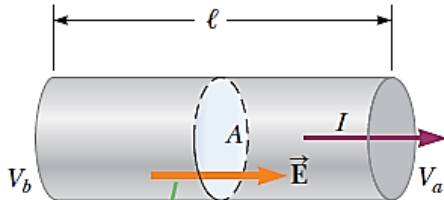
دارات توضيحية لقياس التيار وفرق الكمون: (1) دارة تُستخدم لقياس التيار وفرق الكمون عبر مصباح. (2) الدارة المكافئة للمخطط في (1)، (3) مقياس رقمي لقياس كلاً من التيار وفرق الكمون. نشير هنا إلى أن مقياس الأمبير (Ammeter) يوصل على التسلسل في الدارة، بينما مقياس الفولط (Voltmeter) يوصل على التفرع.

#### 5- مقاومة ومقاومة نوعية، وقانون أوم – Resistance, Resistivity, and Ohm's Law

تُعرف مقاومة ناقل بأنها النسبة بين فرق الكمون المار بالناقل وبين التيار بالعلاقة الآتية:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

وفي جملة الواحدات الدولية (SI) فالمقاومة تقدر بالفولط على الأمبير، أو بالأوم حيث:  $1\Omega = 1 \text{ V/A}$



The potential difference  $\Delta V = V_b - V_a$  creates the electric field  $\vec{E}$  that produces the current  $I$ .

ناقل منتظم طوله  $l$  ومساحة مقطعه  $A$ . التيار يتناسب مع فرق الكمون  $\Delta V = V_b - V_a$ ، أو، بشكل مكافئ،  $\vec{E}$ ، للحقل الكهربائي وللطول  $l$ .

والشكل يبين أن فرق الكمون  $\Delta V$  يتناسب مع التيار  $I$ .

إن قانون أوم (Ohm's Law) يصف العديد من النواقل التي يُطبق عليها جهد، وهو عبارة عن تناسب مباشر للتيار الذي يسببه أو يولده. إن ثابت التناسب هو المقاومة:

$$\Delta V = IR \quad (4)$$

إذا كان طول الناقل  $l$  و سطح مقطعه  $A$ ، فإن مقاومته تساوي:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

حيث  $\rho$  خاصة ذاتية للناقل وتُسمى بالمقاومة النوعية الكهربائية. تُقدر المقاومة النوعية في الجملة الدولية بالـ "أوم متر" ( $\Omega \cdot m$ ).

## 6- تغير حرارة مقاومة – Temperature Variation of Resistance

وجد أنه ضمن مجال درجة حرارة معينة، أن المقاومة النوعية تتغير بتابعية درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

حيث  $\alpha$  عامل درجة الحرارة النوعية ويقدر بوحدة مقلوب درجة الحرارة ( $1/^\circ C$ )، و  $\rho_0$  المقاومة النوعية بدرجة حرارة مرجعية  $T_0$  (عادة تؤخذ مساوية للدرجة عشرين مئوية  $20^\circ C$ ). ومقاومة الناقل تتغير أيضاً مع درجة الحرارة بحسب العلاقة:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

يبين الجدول التالي قيم المقاومة النوعية وعامل درجة الحرارة النوعية لمجموعة من المواد في درجة الحرارة 20 مئوية ( $1/^\circ C$ ).

المقاومة النوعية وعامل درجة الحرارة النوعية لمجموعة من المواد في درجة الحرارة 20 مئوية.

Material	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Temperature Coefficient of Resistivity [( $^\circ C$ ) <sup>-1</sup> ]
Silver	$1.59 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-3}$
Copper	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Gold	$2.44 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-3}$
Aluminum	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5.6 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Iron	$10.0 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-3}$
Platinum	$11 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-3}$
Lead	$22 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Nichrome <sup>a</sup>	$150 \times 10^{-8}$	$0.4 \times 10^{-3}$
Carbon	$3.5 \times 10^{-5}$	$-0.5 \times 10^{-3}$
Germanium	0.46	$-48 \times 10^{-3}$
Silicon	640	$-75 \times 10^{-3}$
Glass	$10^{10}$ – $10^{14}$	
Hard rubber	$\approx 10^{13}$	
Sulfur	$10^{15}$	
Quartz (fused)	$75 \times 10^{16}$	

<sup>a</sup>A nickel-chromium alloy commonly used in heating elements.

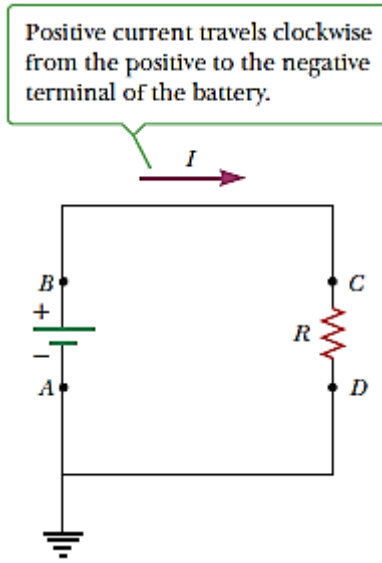


## 7- الطاقة الكهربائية والاستطاعة – Electric Energy and Power

إذا كان فرق الكمون  $\Delta V$  المار بعنصر كهربائي (بجهاز كهربائي)، فإن الاستطاعة  $P$ ، أو معدل الطاقة المقدمة للعنصر، تساوي:

$$P = I\Delta V \quad (8)$$

الشكل المرفق يبين دائرة مؤلفة من بطارية ومقاومة.



دائرة مؤلفة من مقاومة  $R$  وبطارية. النقطة  $A$  تمثل نقطة التأريض.

وبما أن فرق الكمون الذي يمر بالمقاومة يساوي  $\Delta V = IR$ ، فالاستطاعة المقدمة للمقاومة يمكن التعبير عنها بالعلاقة الآتية:

$$P = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{R} \quad (9)$$

إن وحدة الطاقة المستخدمة في الشركات الكهرباء تُحسب بالنسبة للاستهلاك، وهي الكيلو واط ساعي (Kilowatt-hour)، الذي يعرف بأنها وحدة الاستطاعة بمقدار الزمن المقدم أو المصروف. إن واحد كيلو واط ساعي ( $kWh$ )، هو الطاقة المحولة أو المصروفة في ساعة واحدة بمعدل ثابت أي  $1 kW \cdot h$  وقيمه العديدية تساوي إلى:

$$1 kWh = (10^3 W)(3600s) = 3,60 \times 10^6 J \quad (10)$$

مثال: تطبيق لمفهوم الاستطاعة الكهربائية لحساب ثمن الاستطاعة المستخدمة بالكيلو واط ساعي:

دائرة تعطي تيار أعظمي مقداره  $20,0 A$  بجهد تشغيل قدره  $1,20 \times 10^2 V$ . المطلوب: (1) كم عدد المصابيح ذات الاستطاعة  $75 W$  يمكن أن تشتغل بجهد المنبع؟ (2) إذا كان سعر الكيلو واط ساعي يساوي \$ 0,120، ما هي تكلفة تشغيل المصابيح السابقة لمدة 8 ساعات؟

الحل:

(1) إيجاد عدد المصابيح التي يمكن إشعالها:

باستخدام العلاقة (8) نجد الاستطاعة الكلية:

$$P_{total} = I\Delta V = (20,0 A)(1,20 \times 10^2 V) = 2,40 \times 10^3 W$$

ويقسمة الاستطاعة الكلية  $P_{total}$  على استطاعة المصباح الواحد  $P_{bulb}$  نجد عدد المصابيح:

$$\text{عدد المصابيح} = \frac{P_{total}}{P_{bulb}} = \frac{2,40 \times 10^3 W}{75,0 W} = 32,0$$

(2) حساب سعر أو ثمن الكهرباء من أجل 8 ساعات يومياً:

إيجاد الطاقة من أجل كيلو واط ساعي:

$$Energy = Pt = (2,40 \times 10^3 W) \left( \frac{1,00 kW}{1,00 \times 10^3 W} \right) (8.00 h) = 19,2 kWh$$

وإذا ضربنا الطاقة بسعر الكيلو واط ساعي ندجد السعر أو ثمن الكهرباء:

$$\text{السعر} = (19,2 kWh)(0,12 \$/kWh) = 2,30 \$$$

## 8- نواقل فائقة الناقلية – Superconductors

ما هي الناقلية الفائقة؟ وما هي المواد التي تمتلك الناقلية الفائقة؟

في الفيزياء، هناك ظاهرة لبعض المواد حيث لوحظ أن مقاومتها الكهربائية تتناقص تدريجياً، حتى تصبح قريبة من الصفر، بمقدار ما تنخفض درجة حرارتها. إضافة لذلك فهي تطرد تبعد الحقل المغناطيسي (وهذا ما يُدعى بمفعول ميسنير – Meissner)، وتُدعى هذه المواد "بالمواد فائقة الناقلية"

### "Superconductors"

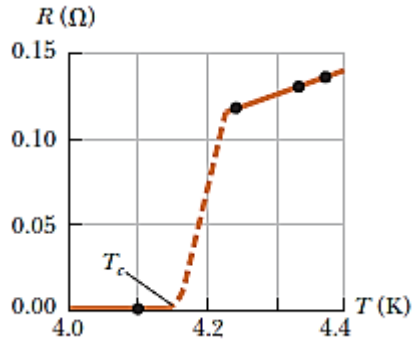
بتعبير آخر، تتصف مادة فائقة الناقلية بأنه في درجات الحرارة المنخفضة تكتسب القدرة على النقل التام للتيار الكهربائي، أي أن مقاومتها الكهربائي تصبح معدومة، إذاً دون ضياع في الطاقة.

من بين النواقل الكلاسيكية فائقة الناقلية، والأكثر استخداماً في أيامنا هي الخليطة من الـ "نيوبيوم والتيتان" "Niobium and Titane" تحت درجة حرارة قدرها (9 kelvin) أي ما يعادل تقريباً  $(-273 + 9 = -264^{\circ}C)$ ، يُقدر بـ (15 teslas)، والأكثر جودة وثنماً هو خليط من الـ "نيوبيوم والقصدير" "Niobium and Etain" الذي نرمز له بـ Nb3Sn.

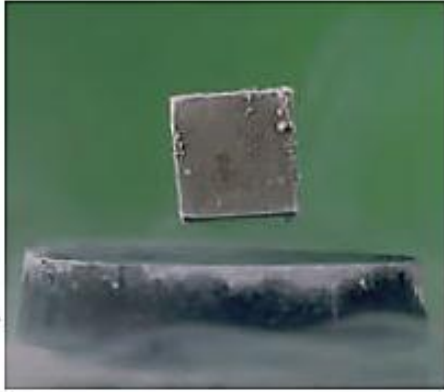
وبفضل خاصية الناقلية الفائقة، في الواقع، يمكن نقل التيار الكهربائي، أي الطاقة، دون ضياع. وأيضاً يصبح من الممكن توليد حقول مغناطيسية ذات شدة عالية جداً.

ونشير هنا إلى أنه لكي يكون لدينا مادة فائقة الناقلية يجب أن تتصف بخاصتين: (1) قدرة على رد طرد بشكل كامل الحقل المغناطيسي المحيط بها، وهذا يتمثل بمفعول الرفع المغناطيسي، و (2) نقل التيار بشكل تام دون مقاومة ولا ضياع في الطاقة.

وجد أن هناك مقاومة بعض المعادن تنتهي إلى الصفر بشكل افتراضي عند درجة حرارة يُطلق عليها درجة الحرارة الحرجة ( $T_c$  - Critical Temperature). هذه المواد تُعرف باسم مواد أو نواقل فائقة الناقلية. إن الشكل المرفق يوضح تغير المقاومة بتابعة درجة الحرارة. وكما واضح نرى أن المقاومة تنخفض وتصبح مساوية للصفر عند الدرجة الحرجة  $T_c$ .



تغير المقاومة بتابعة درجة الحرارة من أجل عنصر الزئبق ( $Hg$ ). إن الرسم البياني يتبع المعدن العادي من أجل الحرارة الأكبر من درجة حرارة حرجة ( $T_c$  - Critical Temperature). تهبط المقاومة إلى القيمة صفر عند درجة الحرارة الحرجة، والتي تساوي ( $4, 2 K$ ) من أجل الزئبق، وتبقى مساوية للصفر من أجل درجات الحرارة المنخفضة.



مغناطيس دائم المغنطة يطفو بشكل حرق قطع من السيراميك فائقة الناقلية موضوعة في الأوت البارد (Nitrogen-Cooled). هذه المادة الفائقة الناقلية مقاومتها تساوي الصفر، ولا يصدر أو ينفث أي حقل مغناطيسي من المادة فوق الناقلية وذلك بتوليد خيال للأقطاب مغناطيسية ذات مغناطيسية مستمرة.

عرض فيديو يتعلق بالمواد فائقة الناقلية

