محاضرات مادة الفيزياء /1/

لطلاب السنة الأولى

(ميكاترونيكس – معلوماتية – عمارة)

الأستاذ الدكتور جبُّور نوفل جبُّور

2025 - 2024

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- نو اقل 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.

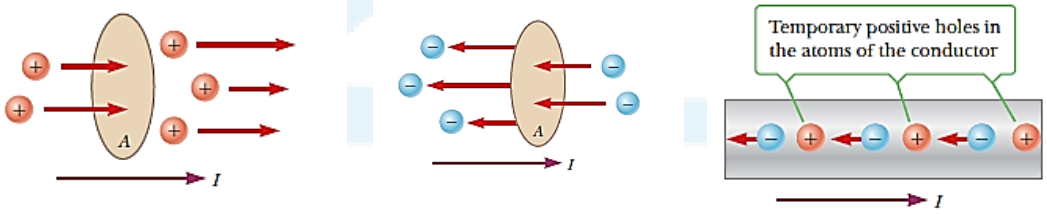
في هذا الفصل ستعرف التيار ونتحدث عن العوامل التي تساهم في المقاومة وفي تدفق الشحنة في النواقل. سنتحدث أيضاً عن الطاقة المحولة لتيار كهربائي. هذه النقاط أو المواضيع ستكون أساسية إلى العمل المضاف في الدارات.

2- التيار الكهربائي – Electric Current

معدل تدفق شحنة عبر سطح A يمثل التيار الكهربائي I.

القيمة الوسطية للتيار I_{av} تعرف بالعلاقة الآتية:

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



(1) (2) (3)

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 الكمون. الإكترونات السالبة تتحرك نحو اليسار وهي مكافئة لحركة الثقوب الموجبة نحو اليمين.

حيث ΔQ الشحنة التي تنتقل عبر مقطع من ناقل خلال فترة زمنية قدرها Δt. إن واحدة التيار هي الأمبير (Ampere - A)؛ 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:

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

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 $I_{av}.\Delta t$، أي أن:

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

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

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

(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 ΔU 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:

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

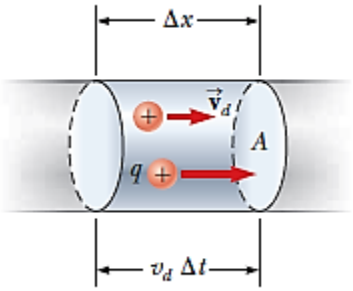
3- رؤية ميكروسكوبية (مجهرية) للتيار والسرعة الجرية – A Microscopic View: Current and Drift Speed

لنعتبر جسيمات متماثلة مشحونة تتحرك في ناقل سطح مقطعه A، كما هو موضح في الشكل المرفق. إن حجم عنصري من الناقل طوله Δx يساوي $A\Delta x$. إذا كان n يمثل عدد حوامل الشحنة $(number\ of\ carriers)$ في واحدة الحجم، وشحنة كل حامل $(cahrge\ per\ carrier)$ هي q، فعدد الحوامل في الحجم العنصري يكون $nA\Delta x$. ومنه فإن الشحنة المتحركة في هذا العنصر يساوي:

$$\Delta Q = (number\ of\ carriers) \times (cahrge\ per\ carrier) = (nAv_d\Delta t)q$$

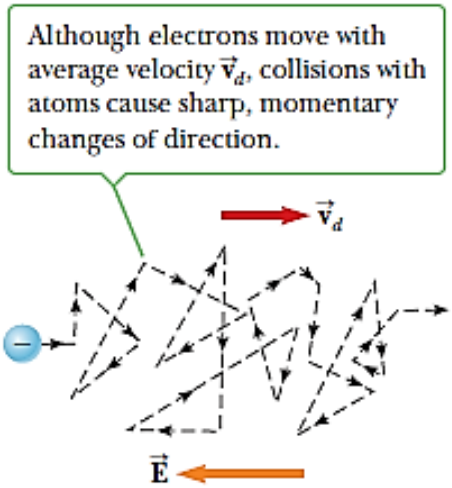
حيث q شحنة كل حامل من حوامل الشحنة. وبقسمة طرفي العلاقة على Δt وبأخذ نهاية الفترة الزمنية Δt للصفر، نرى أن التيار في الناقل يساوي:

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



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

والشكل التالي يوضح الحركة الزيغزاكية لحاملة شحنة في ناقل.



شكل يمثل الحركة الزيغزاكية (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 $(3{,}00 \times 10^{-6}\ m^2)$ يمر به تيار كهربائي $(10{,}0\ A)$.

المطلوب: (1) بفرض أن هناك إلكترون حر واحد 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 $(20{,}0^oC)$، والتي نرمز لها بـ v_{rms} ("rms" root-mean-squar) والتي تساوي $v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m_e}}$، حيث m_e حيث كتلة الإلكترون التي تساوي $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ kg$ و k_B ثابت بولتزمان الذي يساوي $k_B = 1{,}38 \times 10^{-23}\ J/K$، علماً أن كثافة النحاس تساوي $(8{,}92\ g/cm^3)$، والكتلة الذرية للنحاس تساوي $(63{,}5\ u)$، حيث u واحدة الكتلة الذرية التي تساوي.

الحل:

(1) حساب السرعة الجرية:

إن المقادير في المعادلة (2) معروفة إلا قيمة المقدار n، أي عدد حوامل الشحنة الحرة بواحدة 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:

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

وبتحويل الحجم من الـ cm^3 إلى m^3 نجد أن:

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

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

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

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

$$v_d = \frac{I}{nqA}$$

$$= \frac{10{,}0\ C/s}{\left(8{,}46 \times 10^{28}\ \frac{electrons}{m^3}\right)(1{,}60 \times 10^{-19}\ C)(3{,}00 \times 10^{-6}\ m^3)}$$

$$= 2{,}46 \times 10^{-4}\ \text{m/s}$$

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

بتطبيق العلاقة المعطاة في المسألة نجد أن:

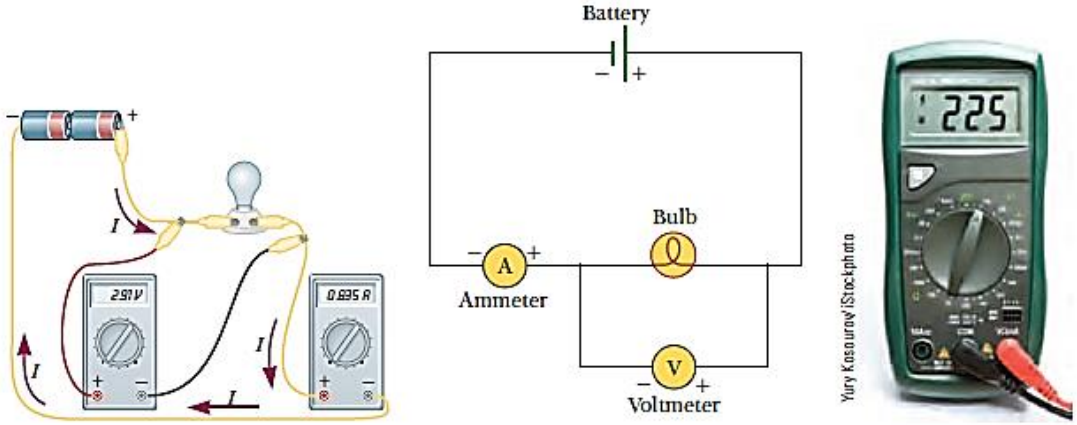
$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m_e}}$$

وبتحويل درجة الحرارة إلا الكلفين نجد:

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

4- قياس التياروالجهد 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"**.



(1) (2) (3)

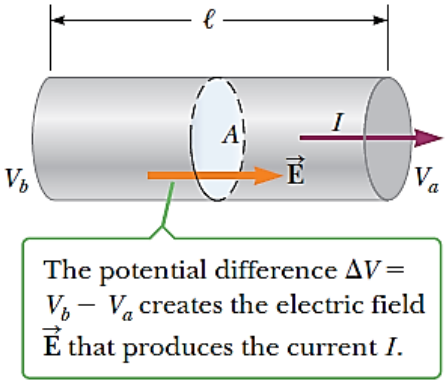
دارات توضيحية لقياس التياروفرق الكمون: (1) دارة تُستخدم لقياس التياروفرق الكمون عبر مصباح.
(2) الدارة المكافئة للمخطط في (1)، (3) مقياس رقمي لقياس كلاً من التياروفرق الكمون.
نشيرهنا إلى أن مقياس الأمبير (Ammeter) يوصل على التسلسل في الدارة، بينما مقياس الفولط (Voltmeter) يوصل على التفرع.

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:

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

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



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 ΔV 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 وسطح مقطعه A، فإن مقاومته تساوي:

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

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

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 α عامل درجة الحرارة النوعية ويقدر بواحدة مقلوب درجة الحرارة $(1/\ ^0C)$، و ρ_0 المقاومة النوعية بدرجة حرارة مرجعية T_0 (عادة تؤخذ مساوية للدرجة عشرين مئوية $20\ ^oC$).

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 $(1/\ ^0C)$.

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

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

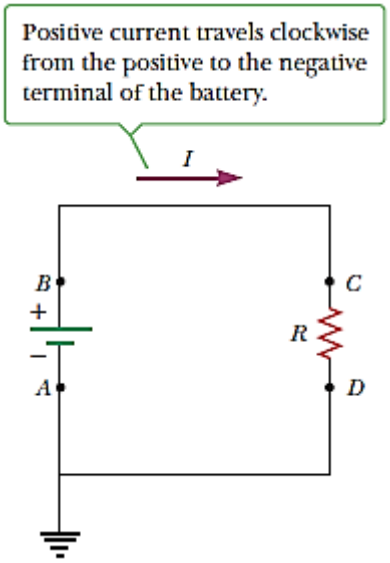
[a]A nickel-chromium alloy commonly used in heating elements.

7- الطاقة الكهربائية والاستطاعة – Electric Energy and Power

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

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

الشكل المرفق يبين دارة مؤلفة من بطارية ومقاومة.



دارة 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:

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

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

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

<u>مثال: تطبيق لمفهوم الاستطاعة الكهربائية لحساب ثمن الاستطاعة المستخدمة بالكيلو واط ساعي:</u>

دارة 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؟

<u>الحل:</u>

(1) إيجاد عدد المصابيح التي يمكن إشعالها:

باستخدام العلاقة (8) نجد الاستطاعة الكلية:

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

وبقسمة 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:

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

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

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

8- نو اقل 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 تُبعد 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 $(-273 + 9 = -264^oC)$، يُقدر بـ $(15\ teslas)$، والأكثر جودة وثمناً هو خليط من الـ "نيوبيوم والقصدير" "Niobium and Etain" الذي نرمز له بـ Nb3Sn.

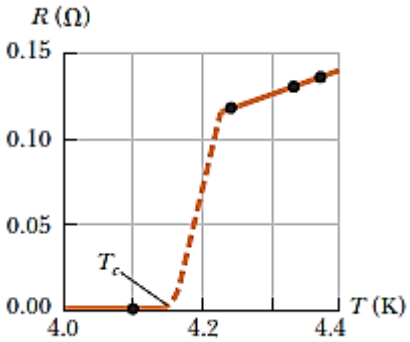
وبفضل خاصية الناقلية الفائقة، في الواقع، يمكن نقل التيار الكهربائي، أي الطاقة، دون ضياع. وأيضاً يصبح من الممكن توليد حقول مغناطيسية ذات شدات عالية جداً.

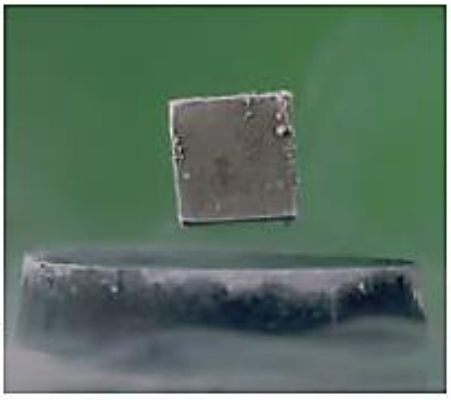
ونشير هنا إلى أنه لكي يكون لدينا مادة فائقة الناقلية يجب أن تتصف بخاصتين: (1) قادرة على رد طرد بشكل كامل الحقل المغناطيسي المحيط بها، وهذا يتمثل بمفعول الرفع المغناطيسي، و (2) نقل التيار بشكل تام دون مقاومة ولا ضياع في الطاقة.

وجد أن هناك مقاومة بعض المعادن تتناهى إلى الصفر بشكل افتراضي عند درجة حرارة يُطلق عليها درجة الحرارة الحرجة **(Critical Temperature - T_c)**. هذه المواد تُعرف باسم مواد أو نواقل فائقة الناقلية.

إن الشـكل المرفق يوضـح تغير المقاومة بتابعية درجة الحرارة. وكما واضـح نرى أن المقاومة تنخفض وتصـبح مساوية للصفر عند الدرجة الحرجة T_c.

تغير المقاومة بتابعية 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 الصفر من أجل درجات الحرارة المنخفضة.





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

عرض فيديو يتعلق بالمواد فائقة الناقلية