

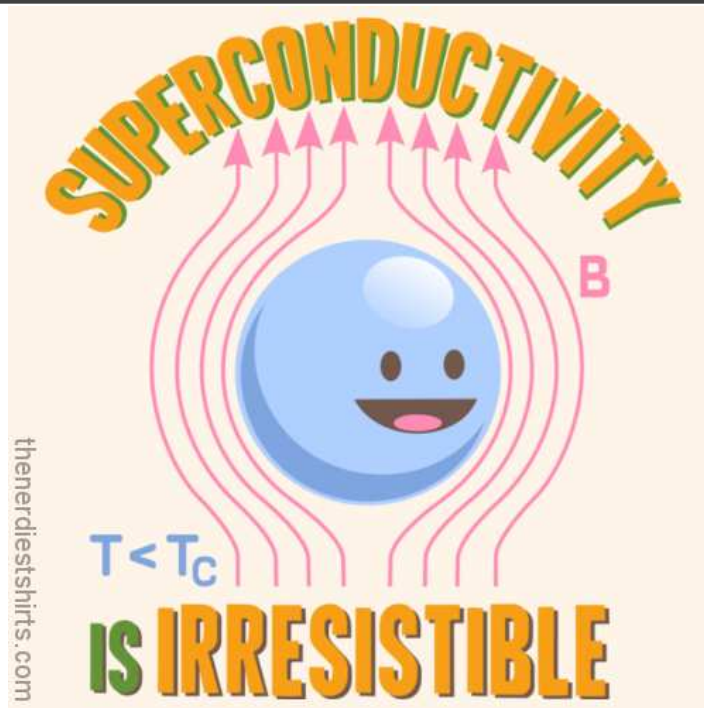
Odolanów, 3 VII 2025 r.

Wykład dla Państwa Licealistów (część 1)
przewodniki dobre, kiepskie oraz idealne

Tadeusz Domański

Instytut Fizyki UMCS

Wykład dla Państwa Licealistów (część 1) **przewodniki dobre, kiepskie oraz idealne**



Tadeusz Domański

Instytut Fizyki UMCS

Opór elektryczny

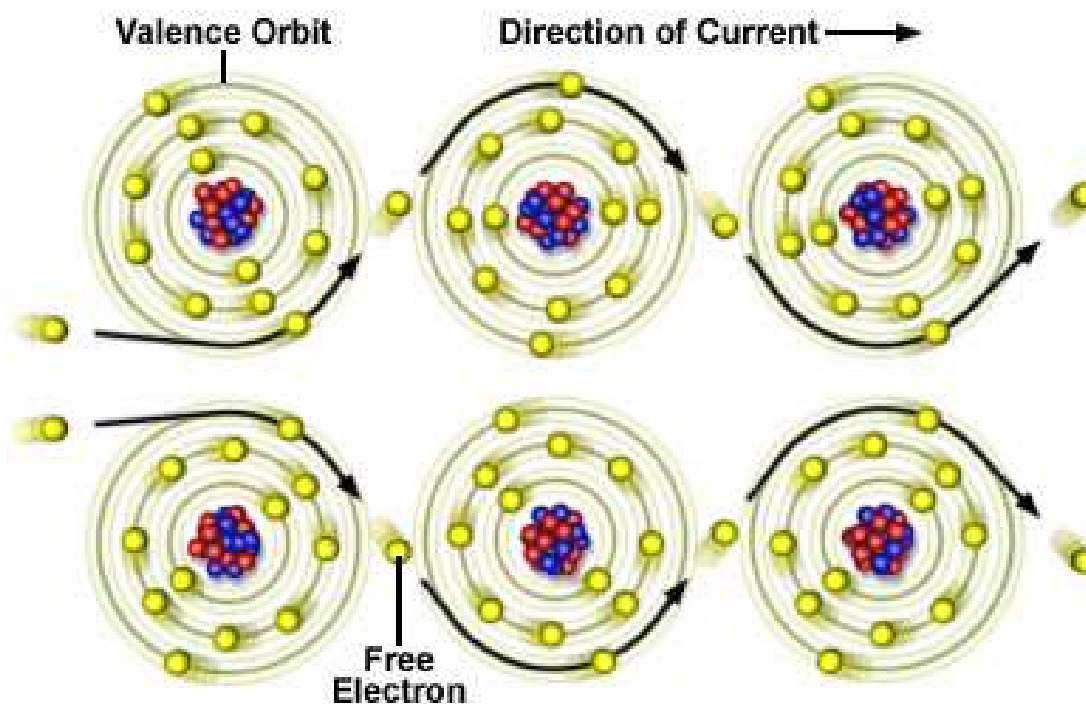
–

istota zjawiska

Opór elektryczny

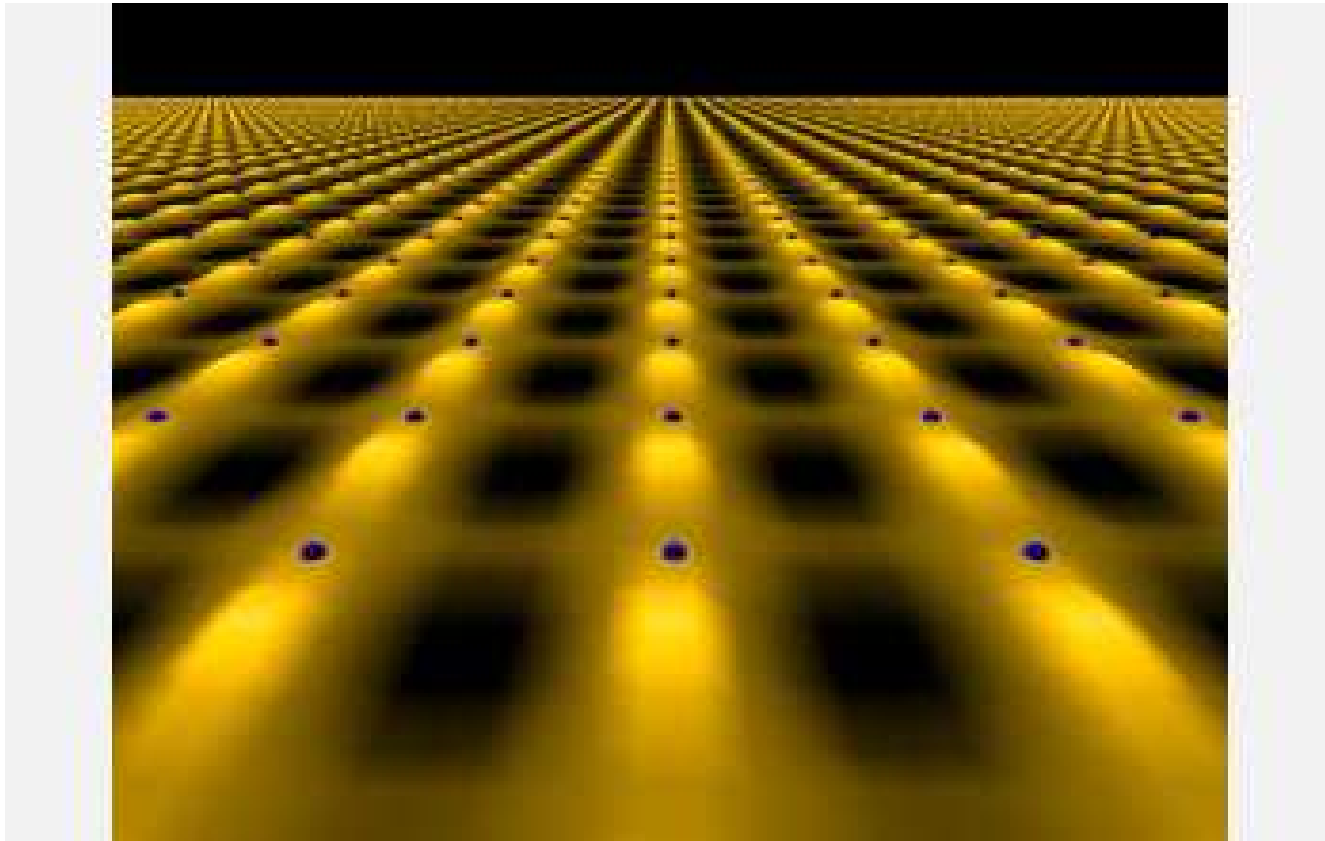
– istota zjawiska

Pod wpływem zewnętrznych pól (elektrycznego, magnetycznego, gradientu temperatur) elektrony walencyjne dryfują w przestrzeni, generując prąd.



Opór elektryczny – istota zjawiska

Ruch elektronów odbywa się w sieci jonów



ulegając procesom rozpraszania, co przejawia się jako opór

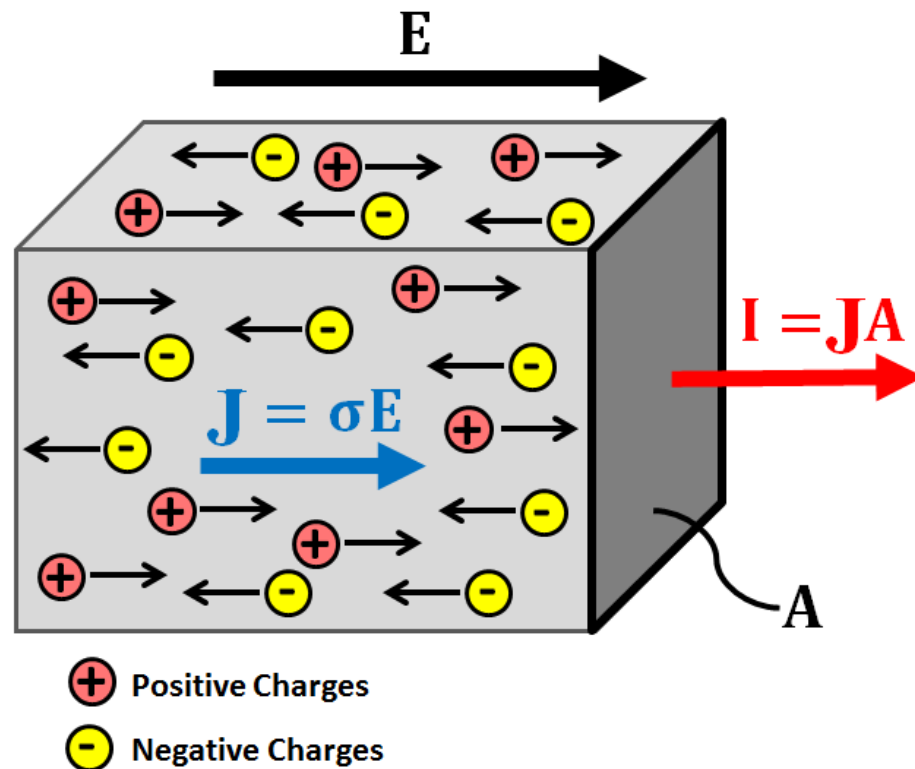
$$I = \frac{1}{R} U$$

prawo Ohma

Opór elektryczny

– istota zjawiska

Conductivity in Materials



Prawo Ohma można zapisać w równoważnej postaci

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

$\sigma \Leftarrow$ przewodnictwo właściwe

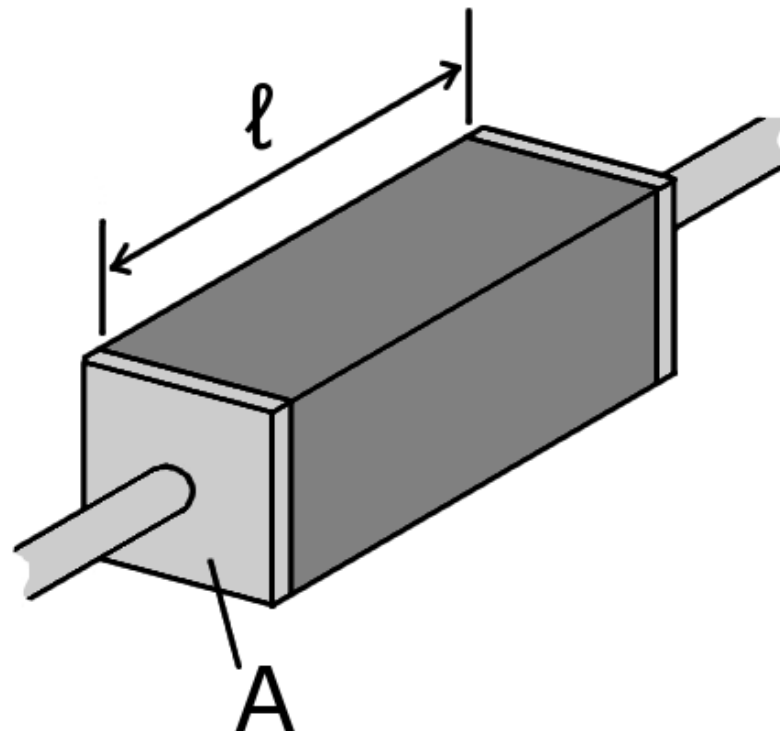
$\rho \equiv 1/\sigma \Leftarrow$ opór właściwy

Opór elektryczny

– istota zjawiska

Opór całkowity wynosi

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

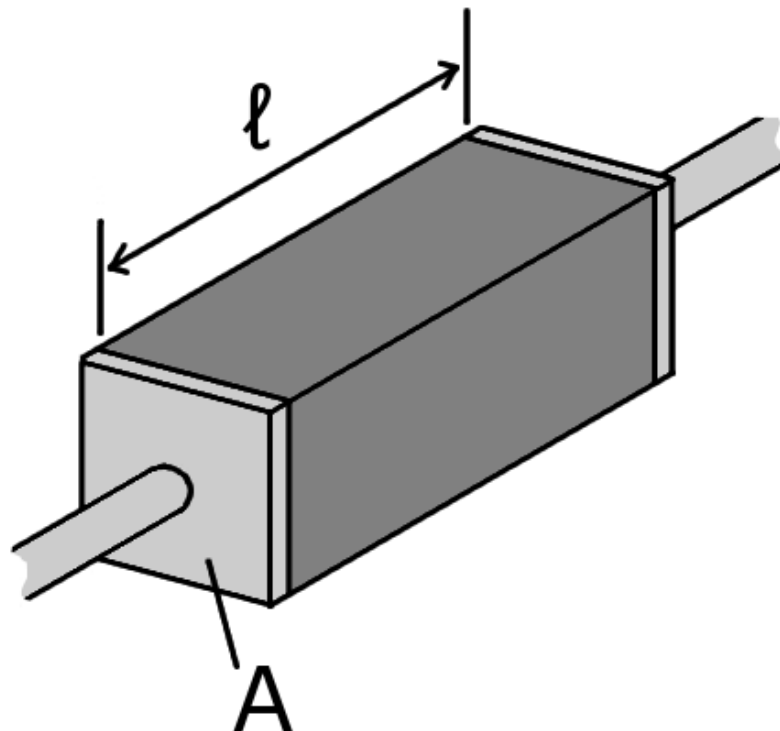


Opór elektryczny – istota zjawiska

Opór całkowity wynosi

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

gdzie opór właściwy ρ



Opór elektryczny – istota zjawiska

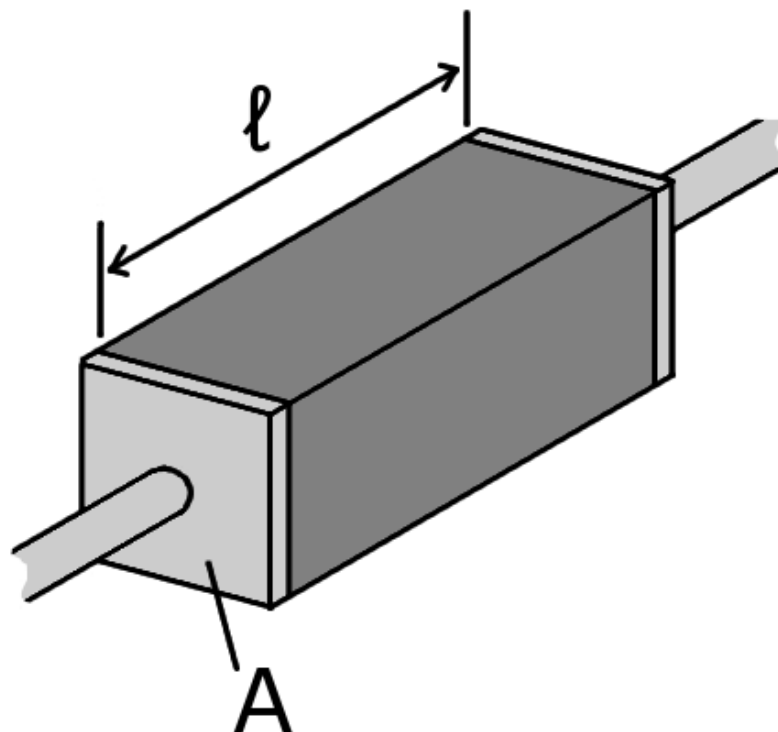
Opór całkowity wynosi

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

gdzie opór właściwy ρ

zależy od:

- rodzaju materiału,



Opór elektryczny – istota zjawiska

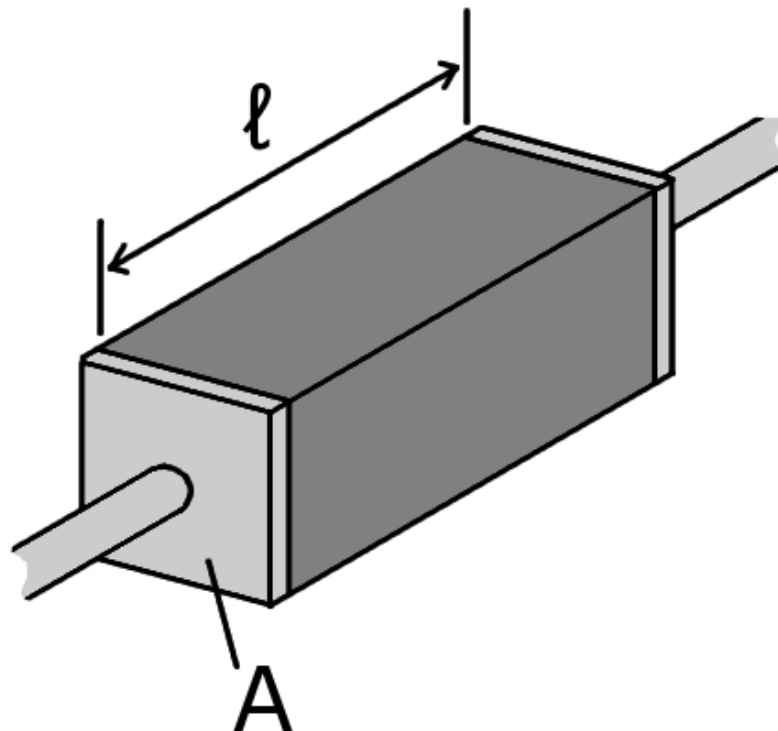
Opór całkowity wynosi

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

gdzie opór właściwy ρ

zależy od:

- rodzaju materiału,
- temperatury.



Opór elektryczny – istota zjawiska

Opór całkowity wynosi

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

gdzie opór właściwy ρ

zależy od:

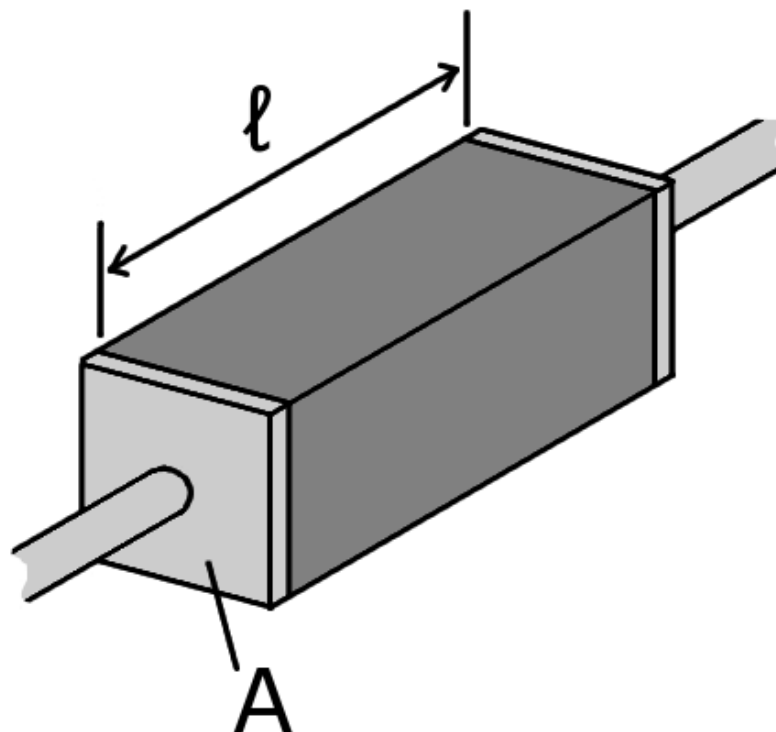
- rodzaju materiału,
- temperatury.

$$1/\rho = \frac{nq^2\tau}{m}$$

(model P. Drude'go)

$$\sigma \equiv 1/\rho$$

n – koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa

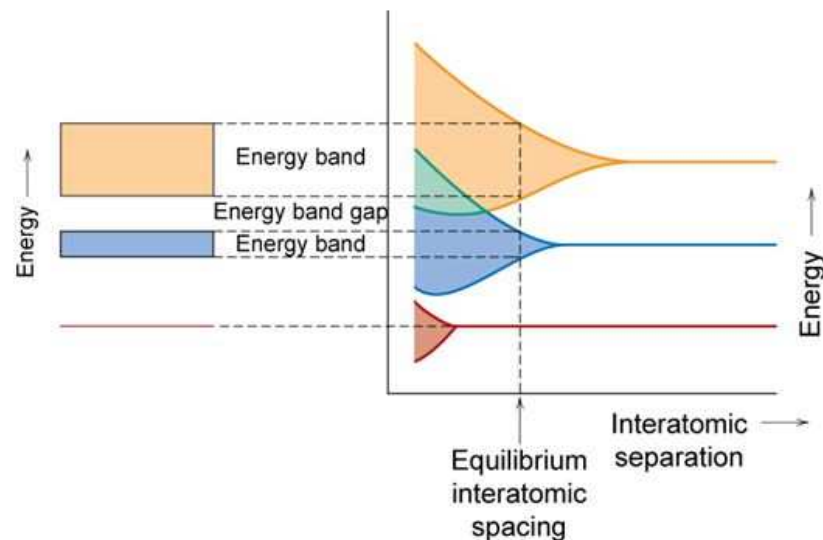
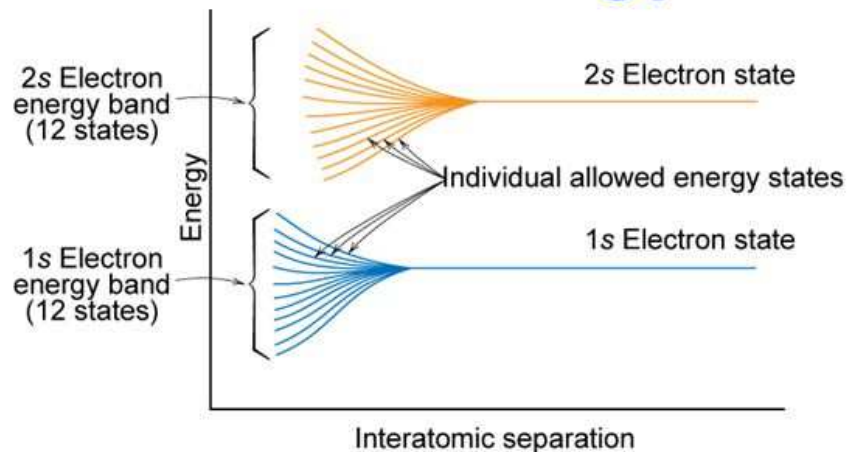


Opór elektryczny

–

znaczenie struktury pasmowej

Electron Energy Band Structures

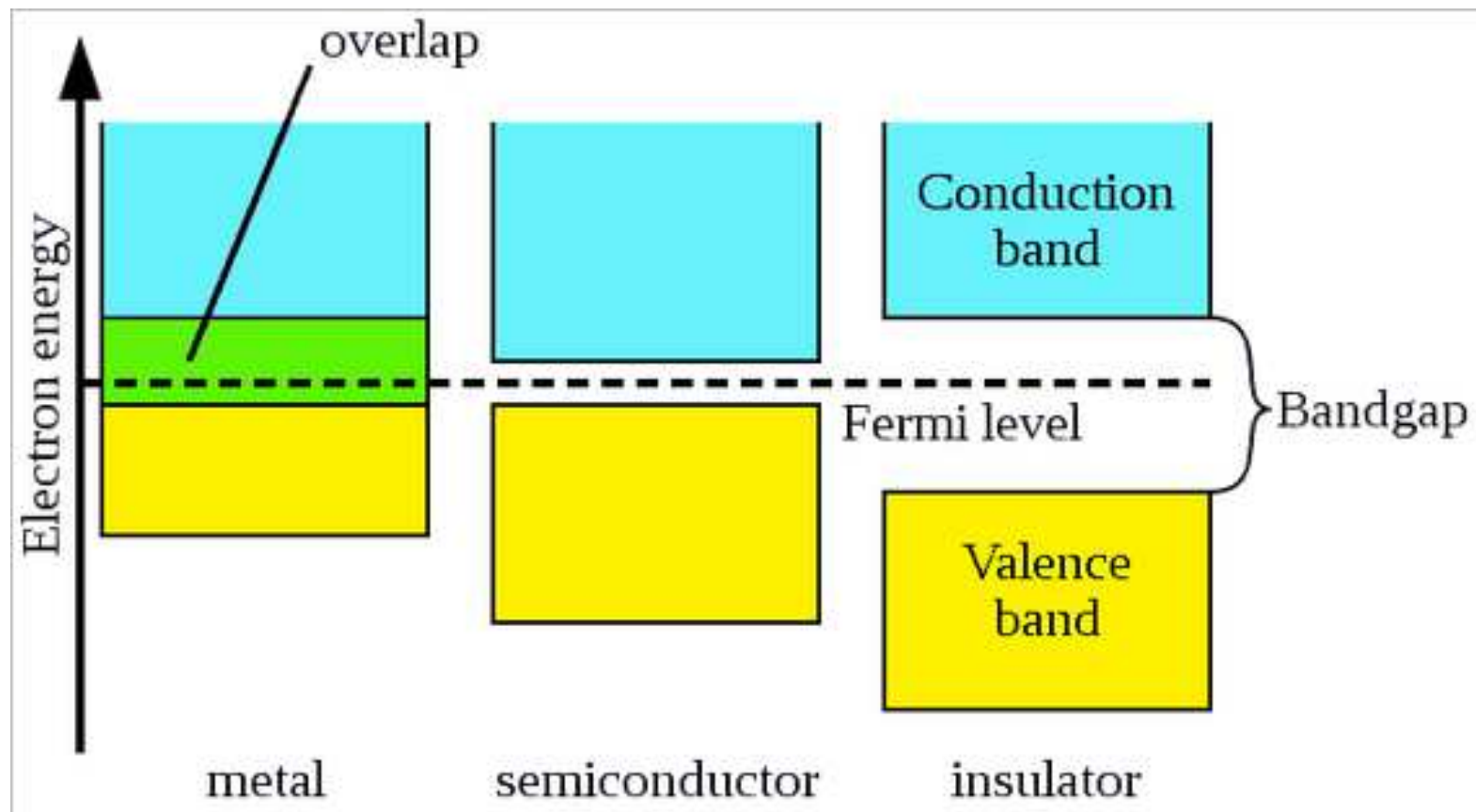


- **Pauli Exclusion Principle:** no two e^- in an interacting system can have exactly same energy
- When N atoms are far apart, they do not interact, so electrons in a given shell in different atoms have same energy
- As atoms come closer together, they do interact, perturbing electron energy levels
- Electrons from each atom then have slightly different energies, producing a “band” of allowed energies

Opór elektryczny

–

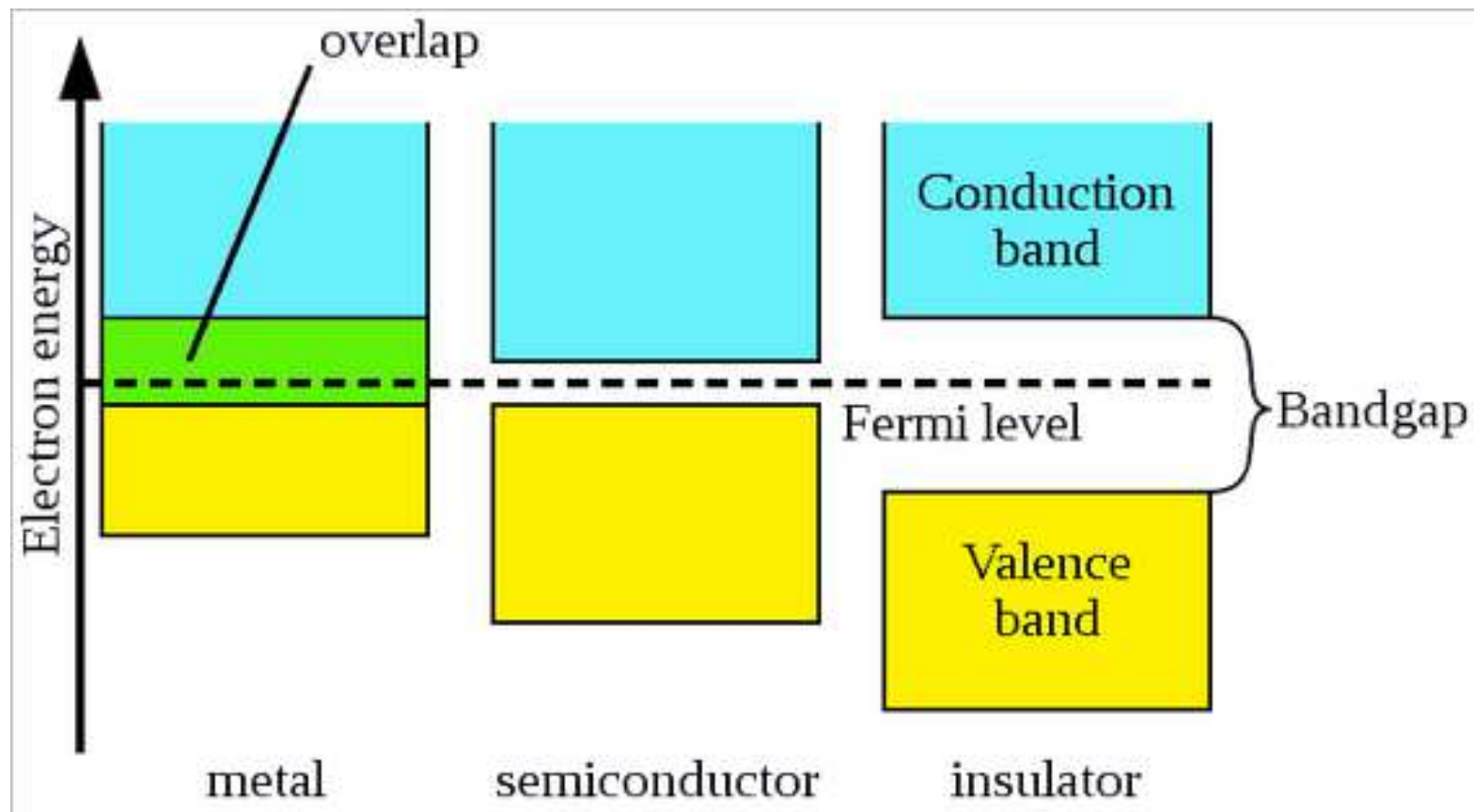
znaczenie struktury pasmowej



Opór elektryczny

–

znaczenie struktury pasmowej



Temperatura wpływa na wartość n w półprzewodnikach i izolatorach.

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

Opór elektryczny – przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{m}$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot m$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot m$

diament $\sim 10^{12} \Omega \cdot m$

guma $\sim 10^{13} \Omega \cdot m$

teflon $\sim 10^{23} \Omega \cdot m$

Opór elektryczny – przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{m}$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot \text{m}$

diamant $\sim 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$

guma $\sim 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$

teflon $\sim 10^{23} \Omega \cdot \text{m}$

Wartości oporu różnią się o ponad 30 rzędów wielkości !

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

⇐ przewodniki

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot m$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot m$

diamant $\sim 10^{12} \Omega \cdot m$

guma $\sim 10^{13} \Omega \cdot m$

teflon $\sim 10^{23} \Omega \cdot m$

Wartości oporu różnią się o ponad 30 rzędów wielkości !

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot m$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot m$

diamant $\sim 10^{12} \Omega \cdot m$

guma $\sim 10^{13} \Omega \cdot m$

teflon $\sim 10^{23} \Omega \cdot m$

⇐ przewodniki

⇐ półprzewodniki

Wartości oporu różnią się o ponad 30 rzędów wielkości !

Opór elektryczny

– przykłady w temperaturze 20°C

miedź $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

aluminium $2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

żelazo $1,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

grafit $2,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

german $4,6 \times 10^{-1} \Omega \cdot m$

krzem $6,4 \times 10^2 \Omega \cdot m$

diamant $\sim 10^{12} \Omega \cdot m$

guma $\sim 10^{13} \Omega \cdot m$

teflon $\sim 10^{23} \Omega \cdot m$

⇐ przewodniki

⇐ półprzewodniki

⇐ izolatory

Wartości oporu różnią się o ponad 30 rzędów wielkości !

Nadprzewodniki

— dlaczego o tym opowiadam ?

Nadprzewodniki — dlaczego o tym opowiadam ?

⇒ **Aspekty poznawcze:**

za badanie nadprzewodnictwa 5-krotnie przyznawano
Nagrody Nobla z fizyki (w sumie dla 10 osób)

Nadprzewodniki — dlaczego o tym opowiadam ?

⇒ **Aspekty poznawcze:**

za badanie nadprzewodnictwa 5-krotnie przyznawano
Nagrody Nobla z fizyki (w sumie dla 10 osób)

⇒ **Aspekty technologiczne:**

w energetyce, medycynie, informatyce kwantowej

Nadprzewodniki — dlaczego o tym opowiadam ?

⇒ **Aspekty poznawcze:**

za badanie nadprzewodnictwa 5-krotnie przyznawano Nagrody Nobla z fizyki (w sumie dla 10 osób)

⇒ **Aspekty technologiczne:**

w energetyce, medycynie, informatyce kwantowej

⇒ **Aktualne wyzwania:**

efekty topologiczne, kwazicząstki Majorany...

Odkrycie nadprzewodnictwa

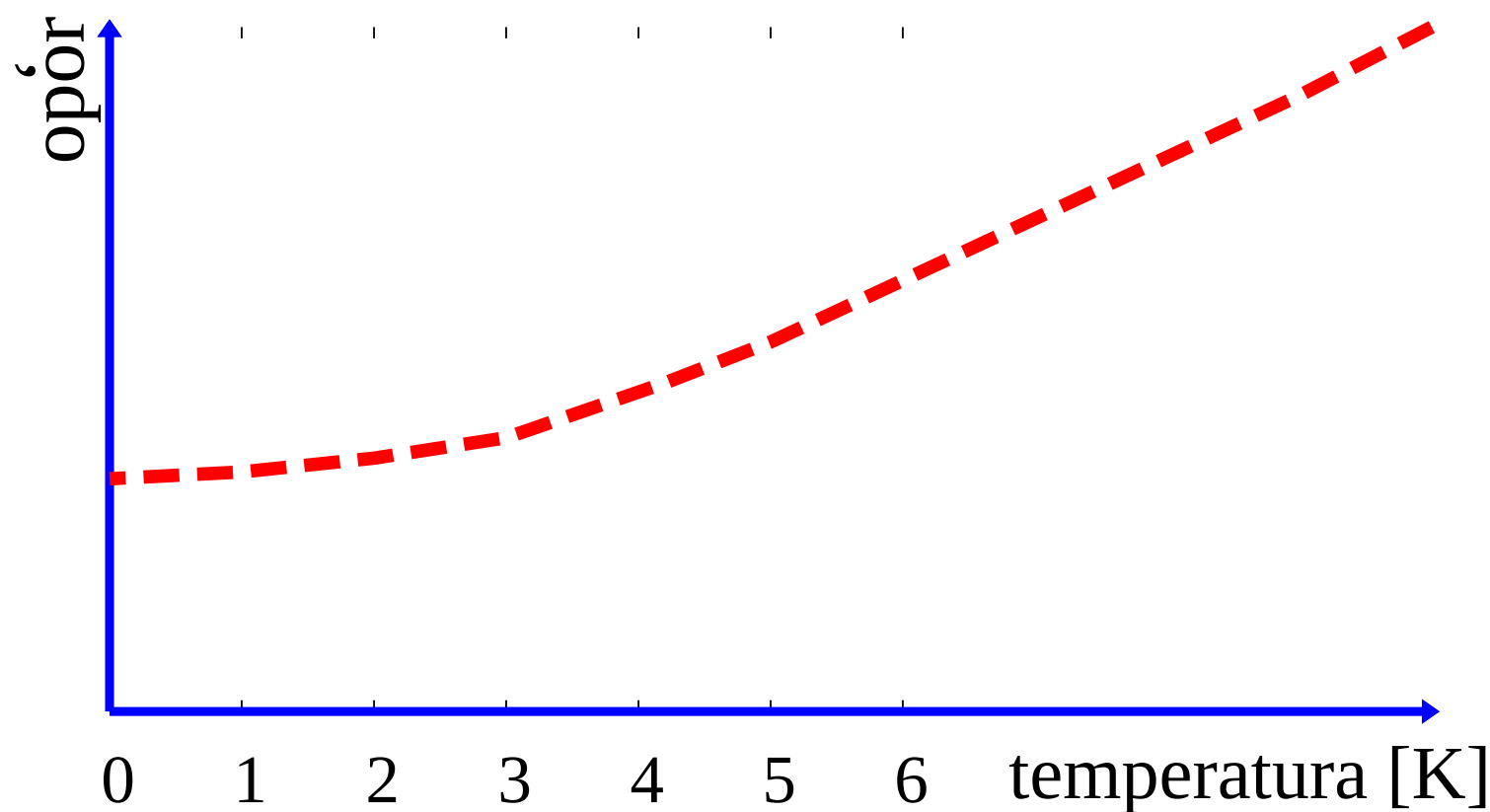
– 8 kwietnia 1911 r.

Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli $-269 \text{ }^{\circ}\text{C}$) opór całkowicie zanika.

Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

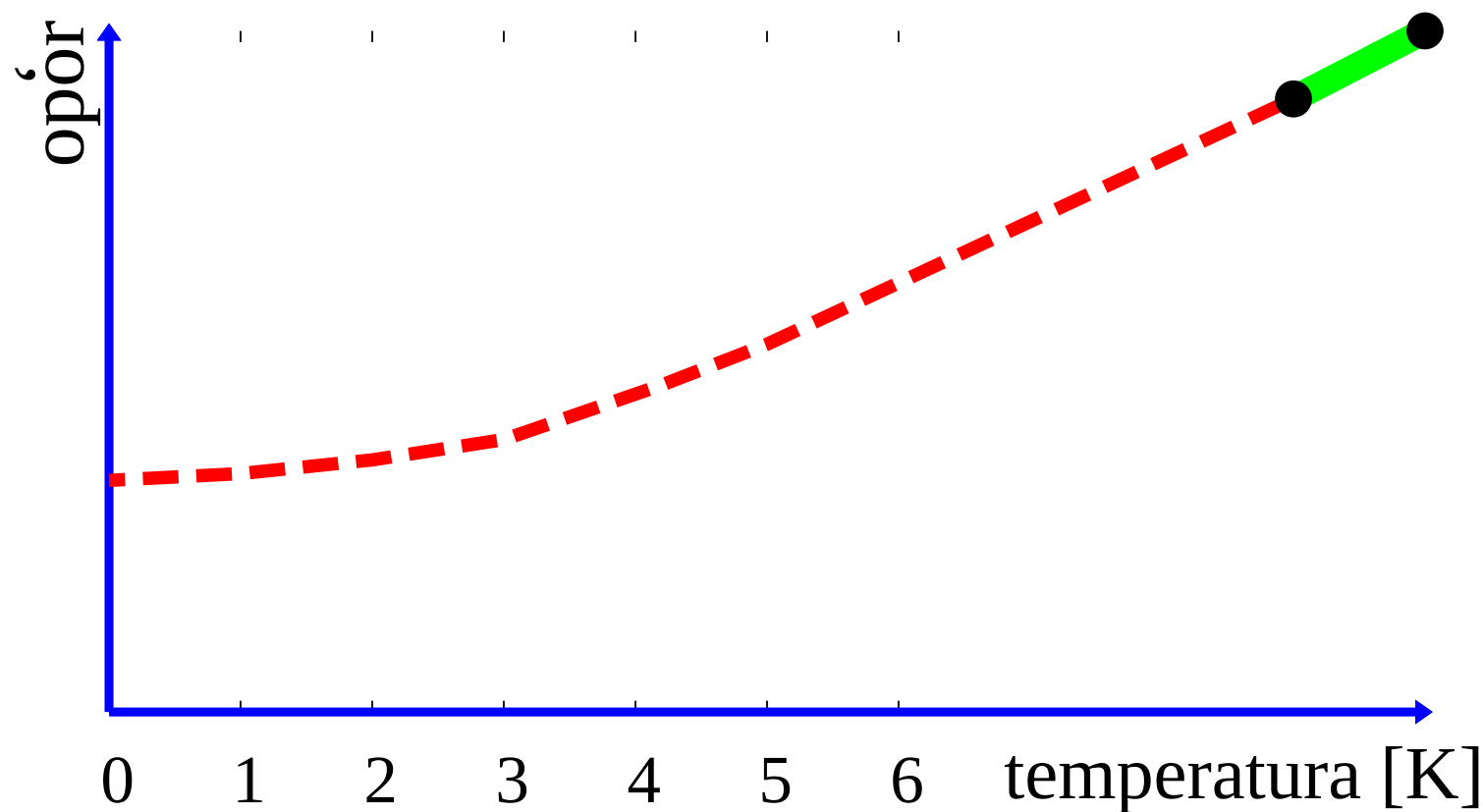
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

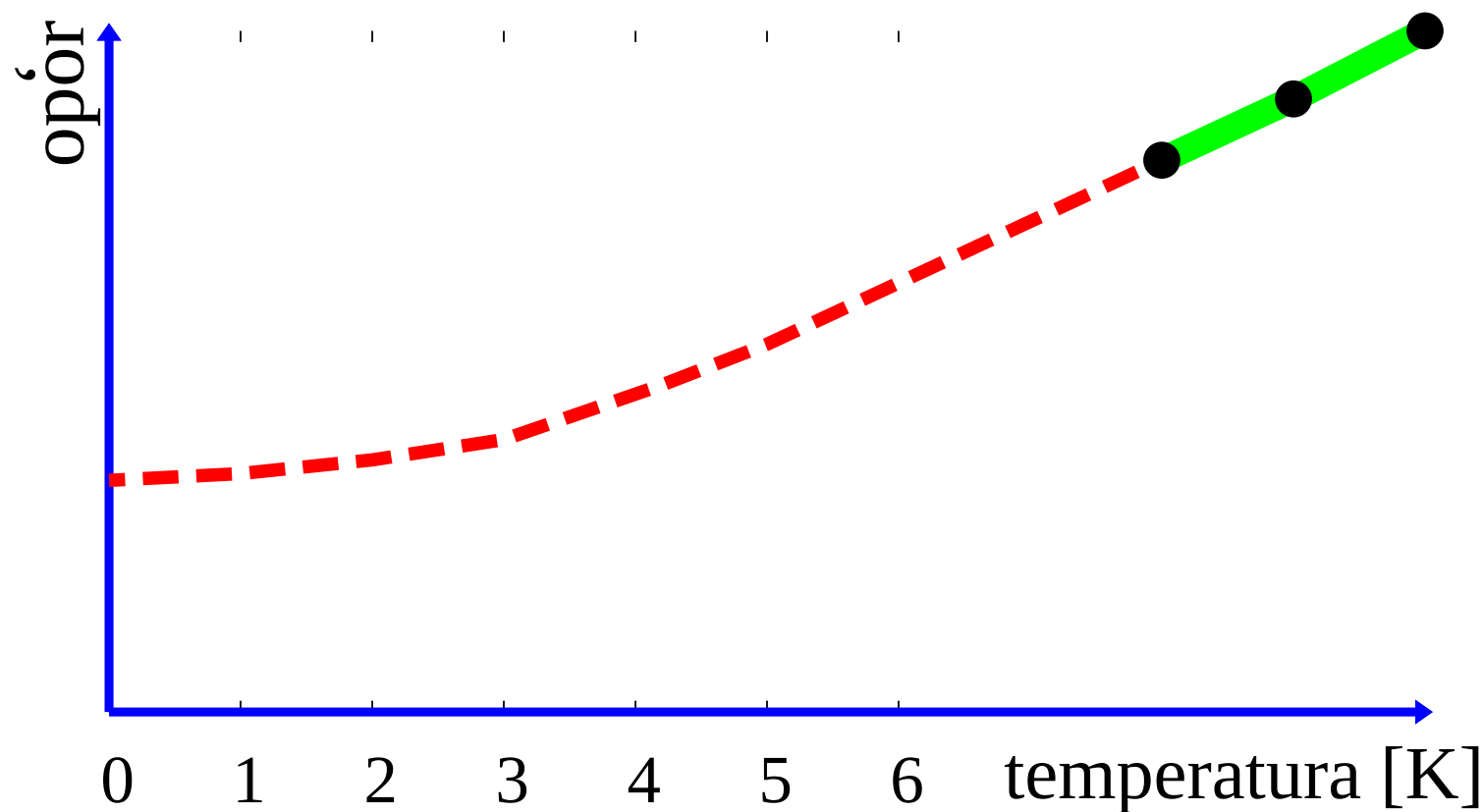
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

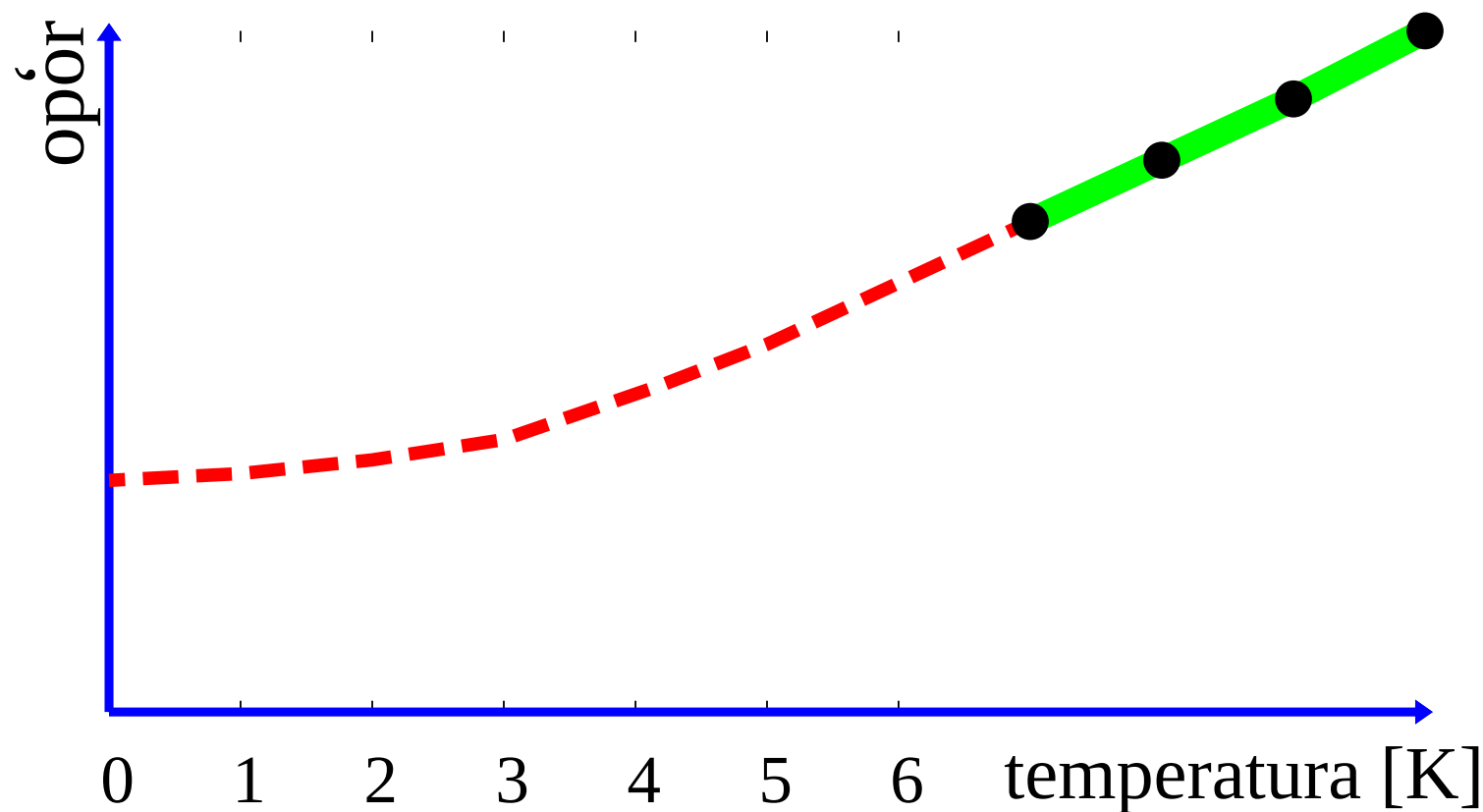
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

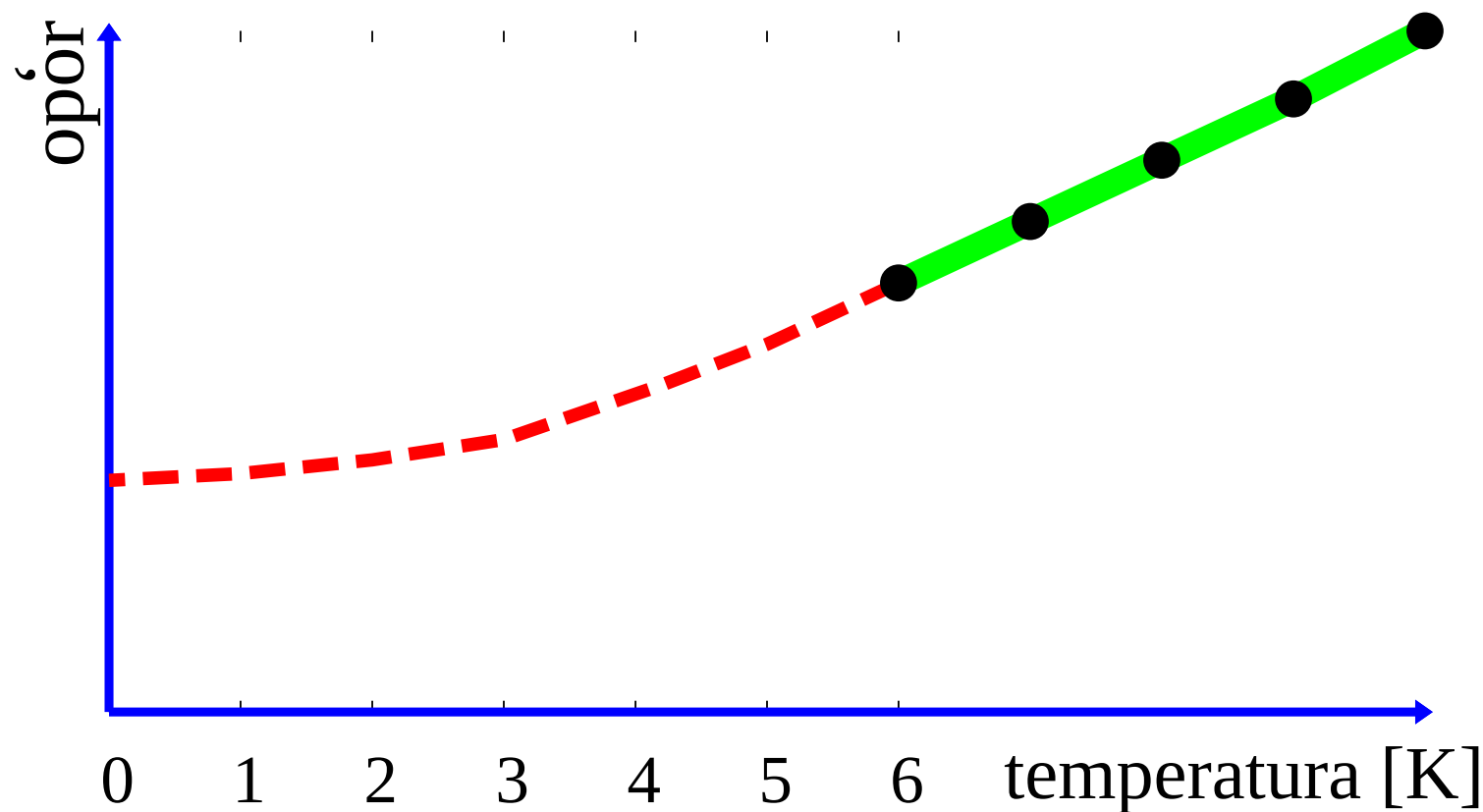
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

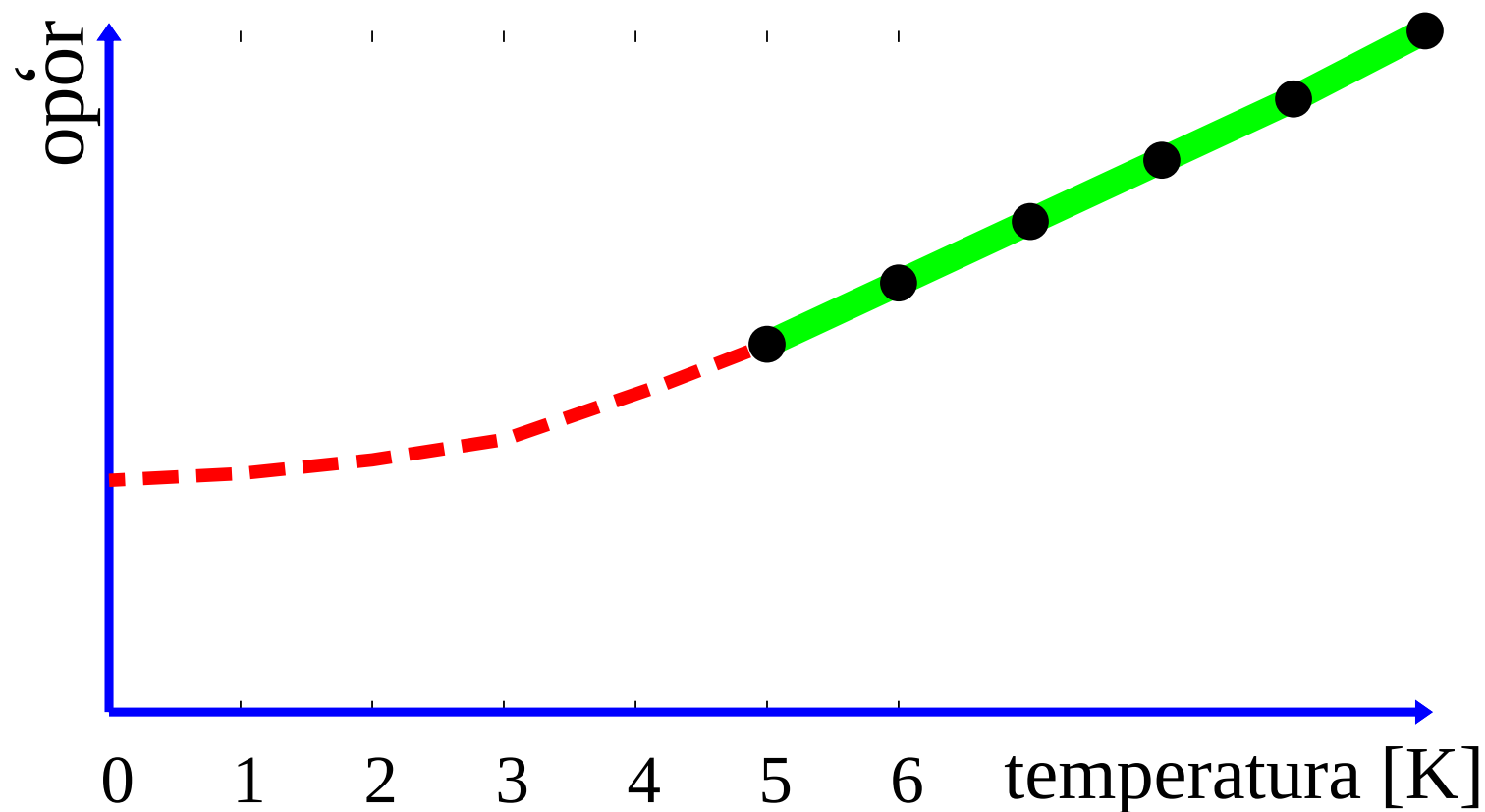
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

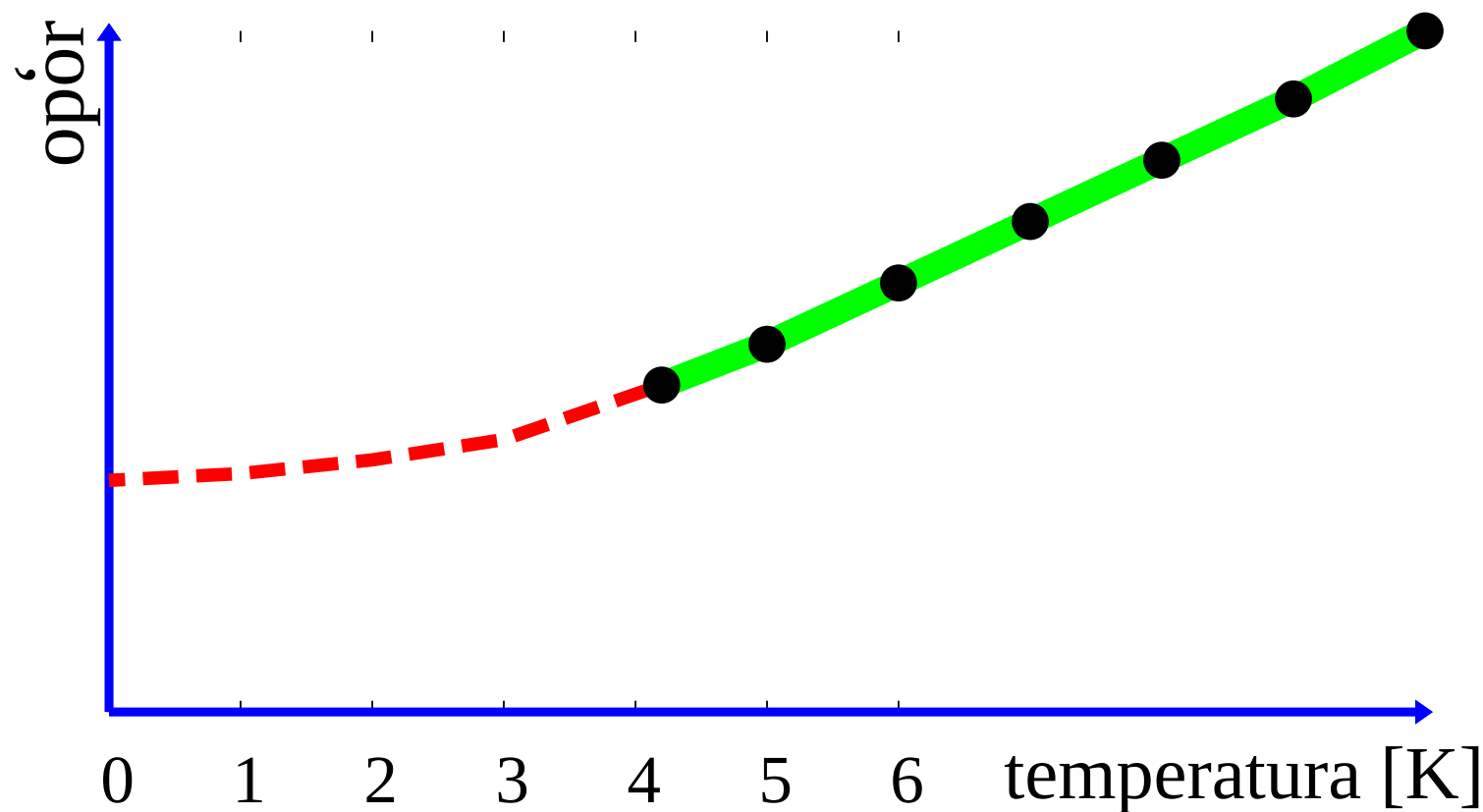
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

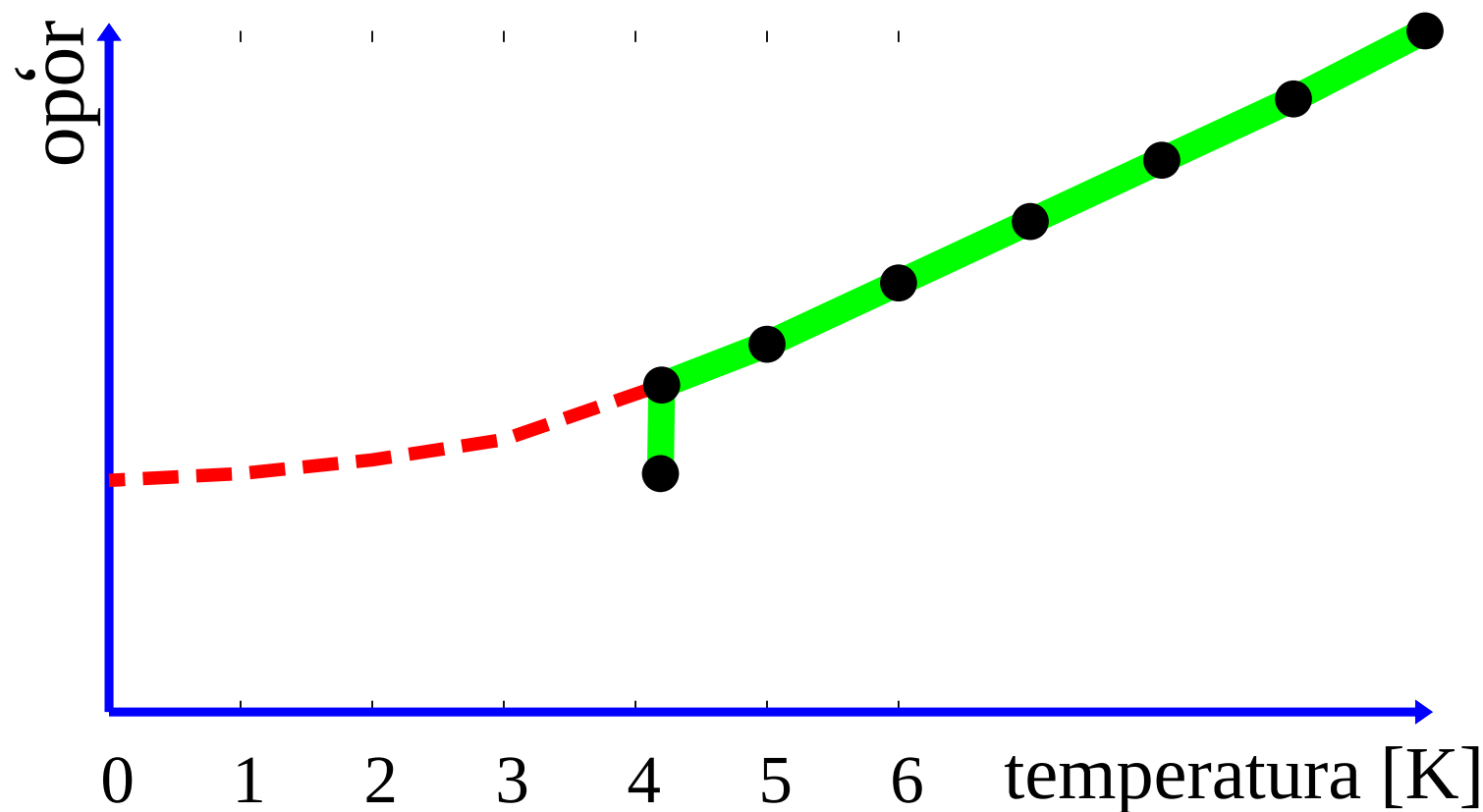
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

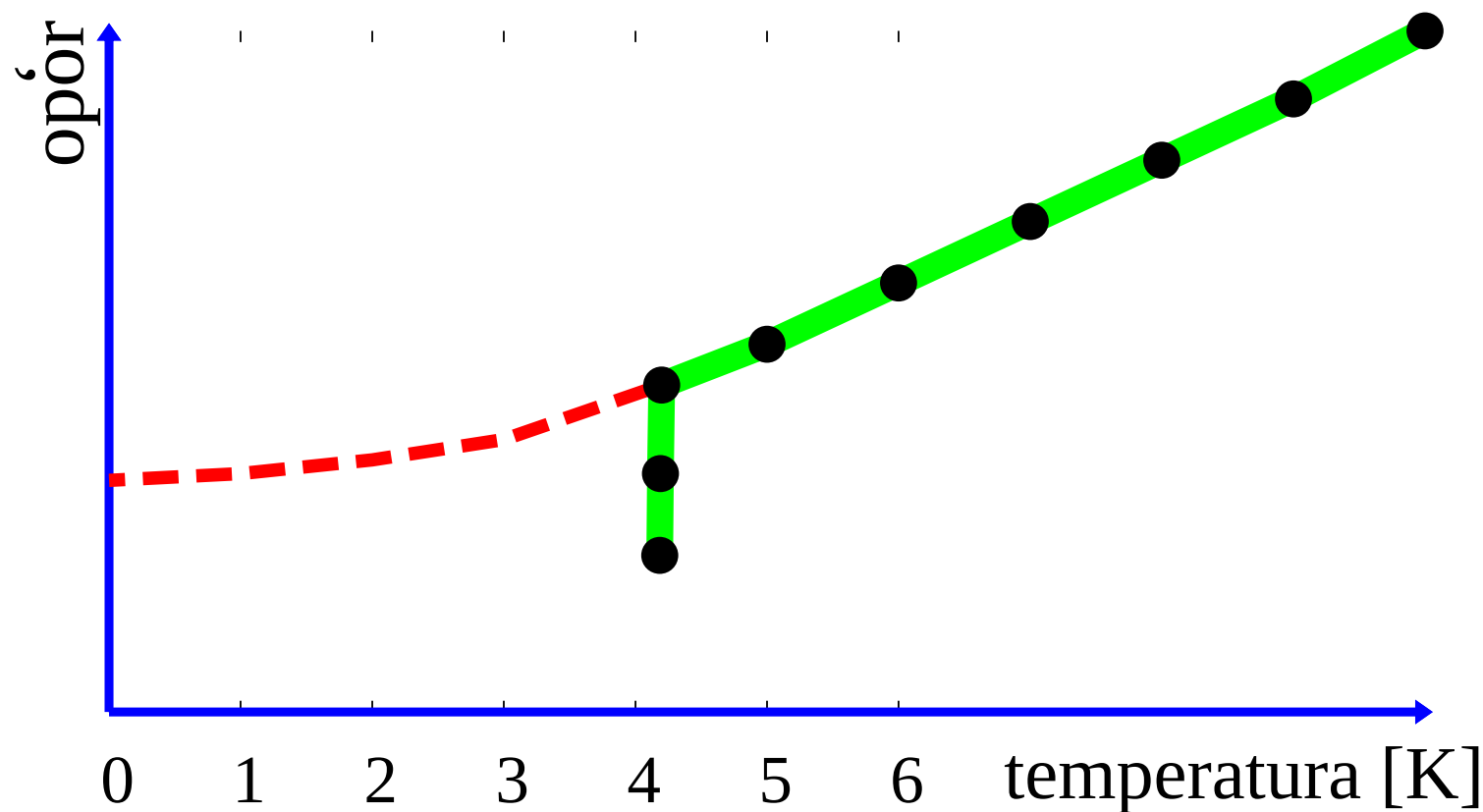
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

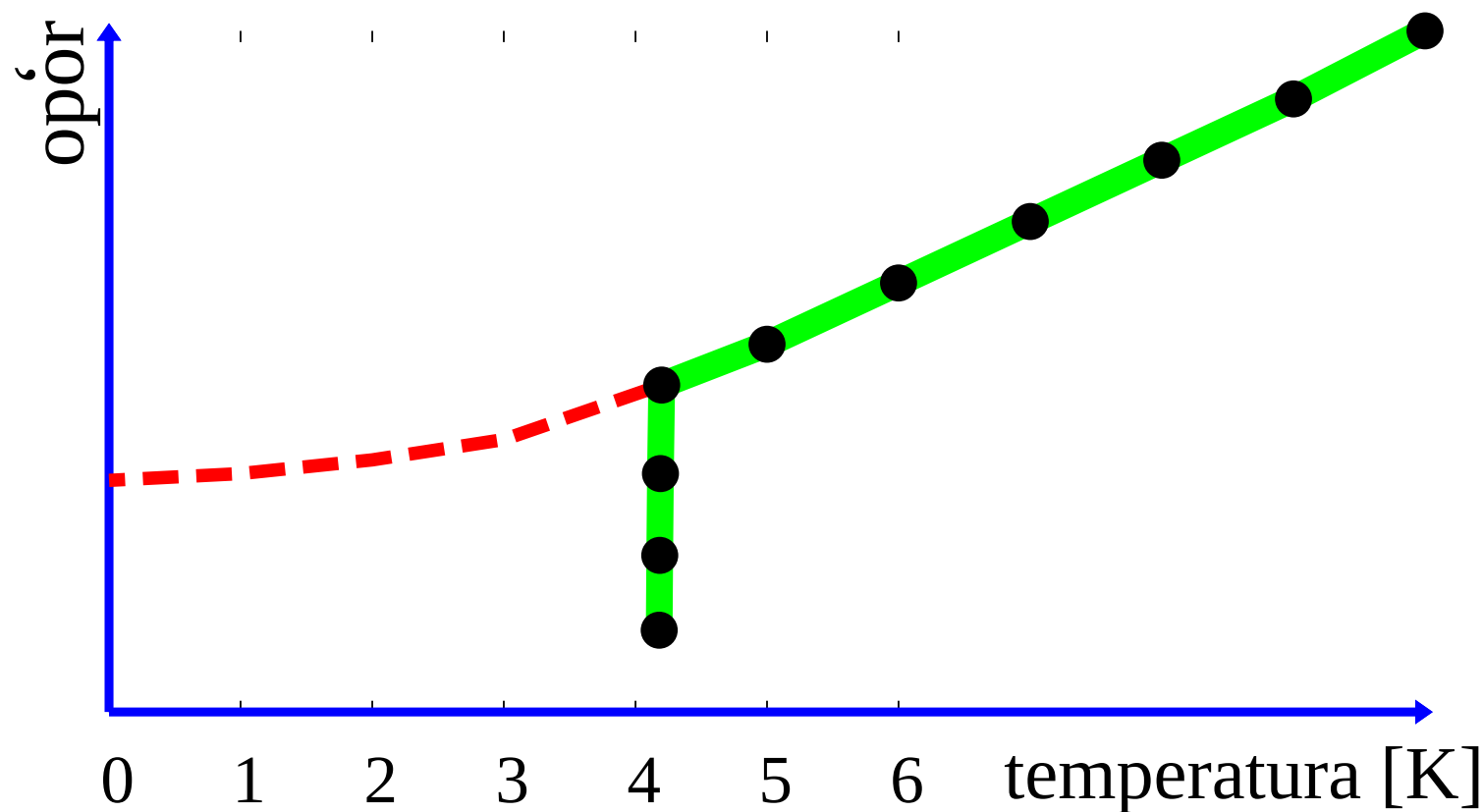
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

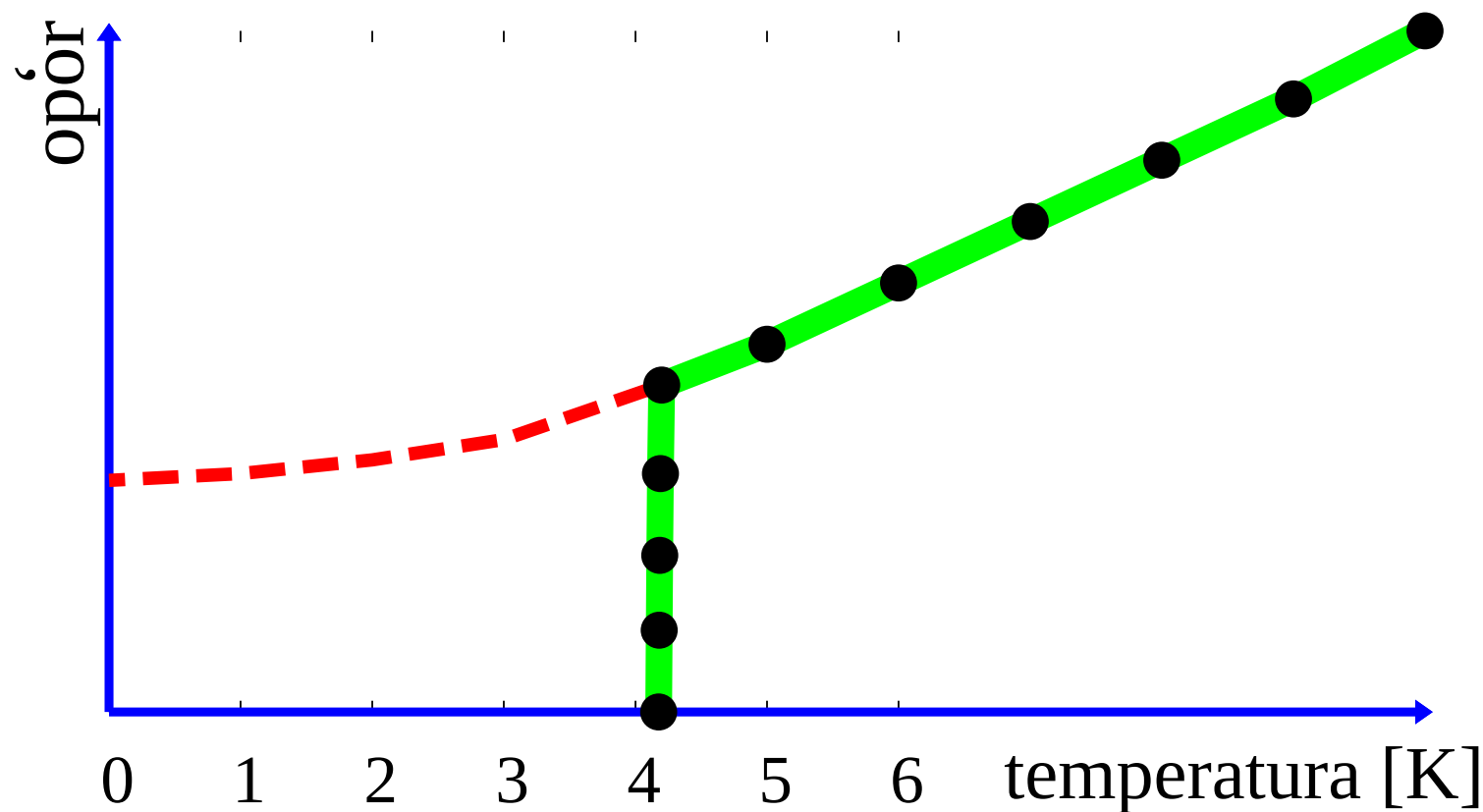
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

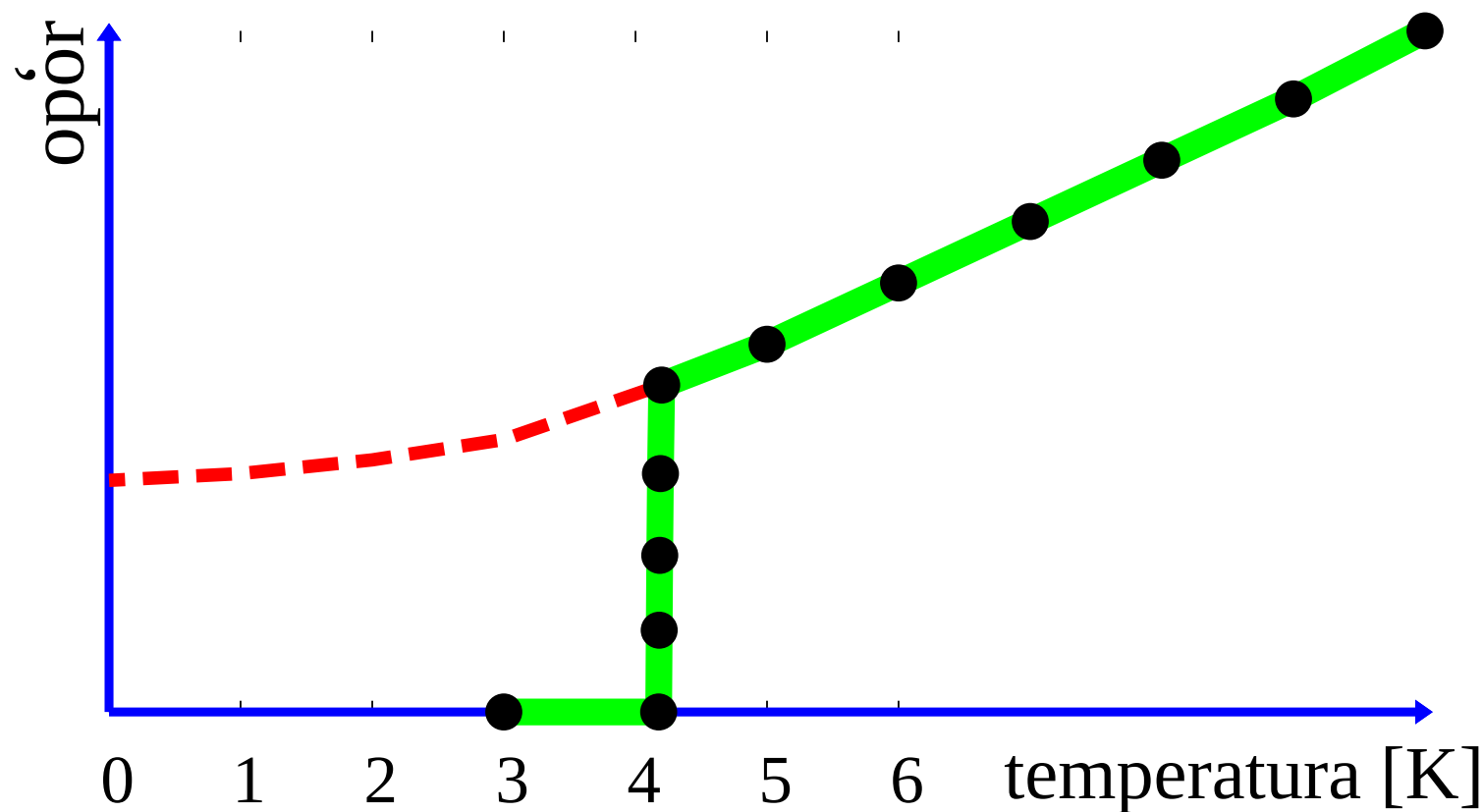
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

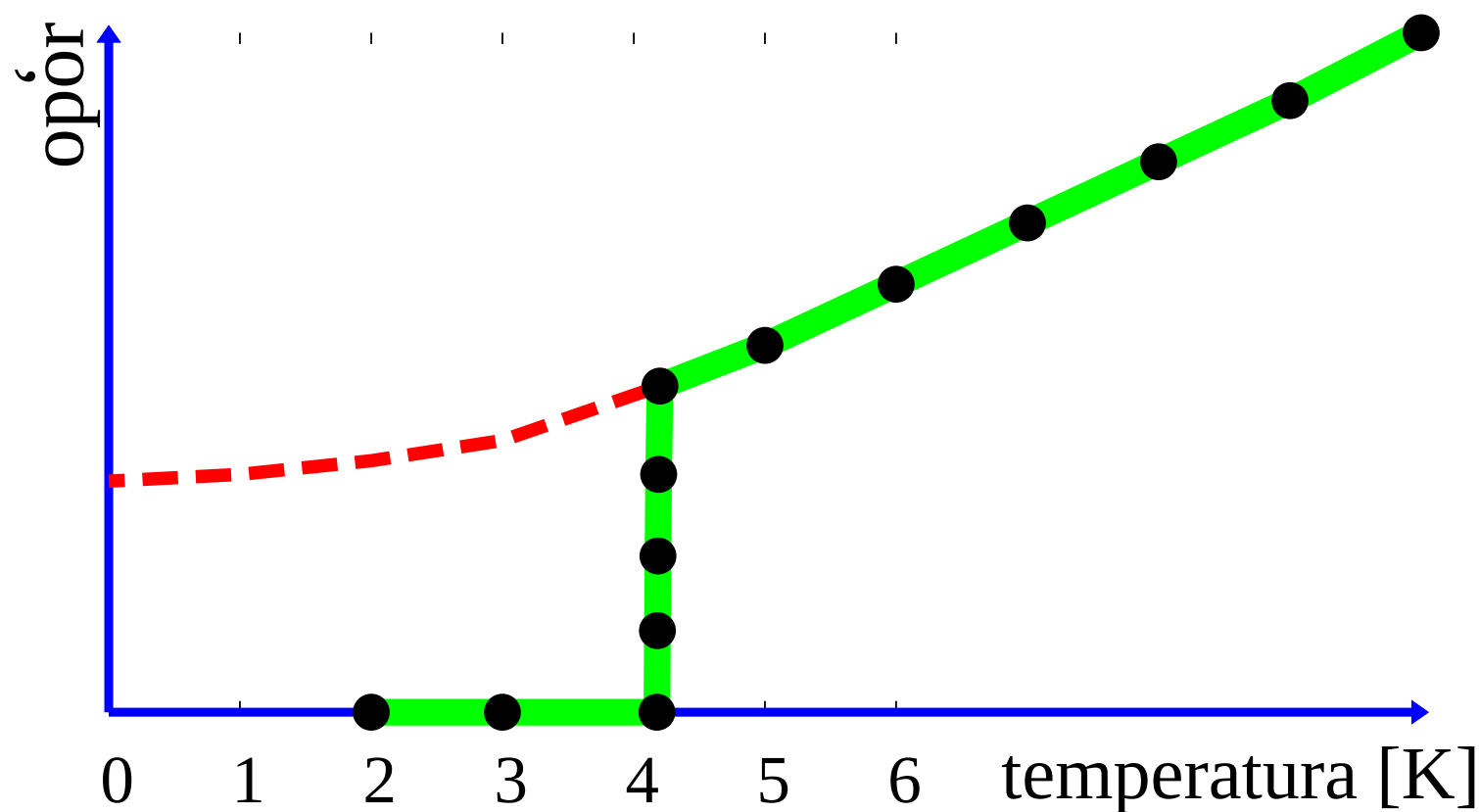
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli $-269 \text{ }^{\circ}\text{C}$) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

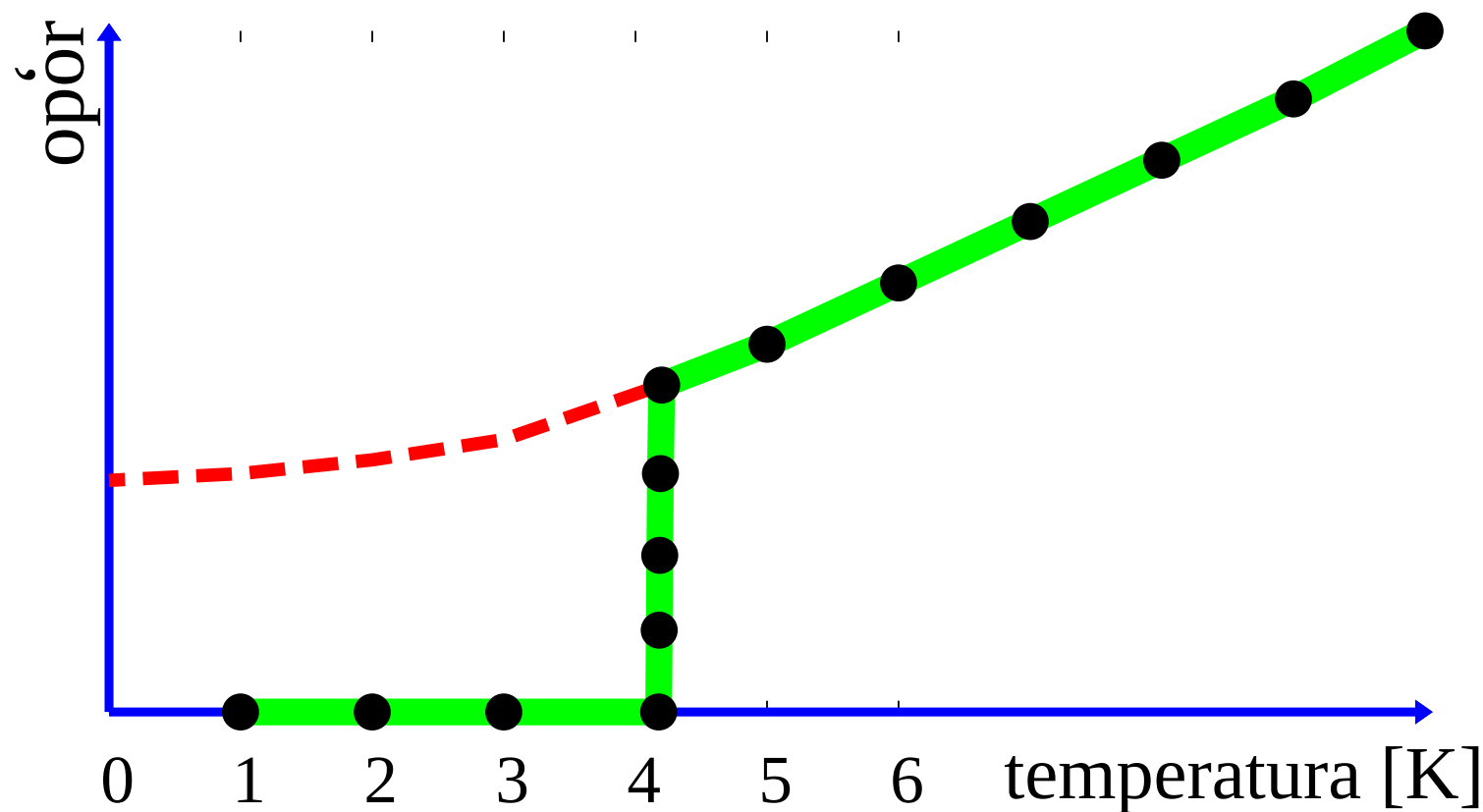
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

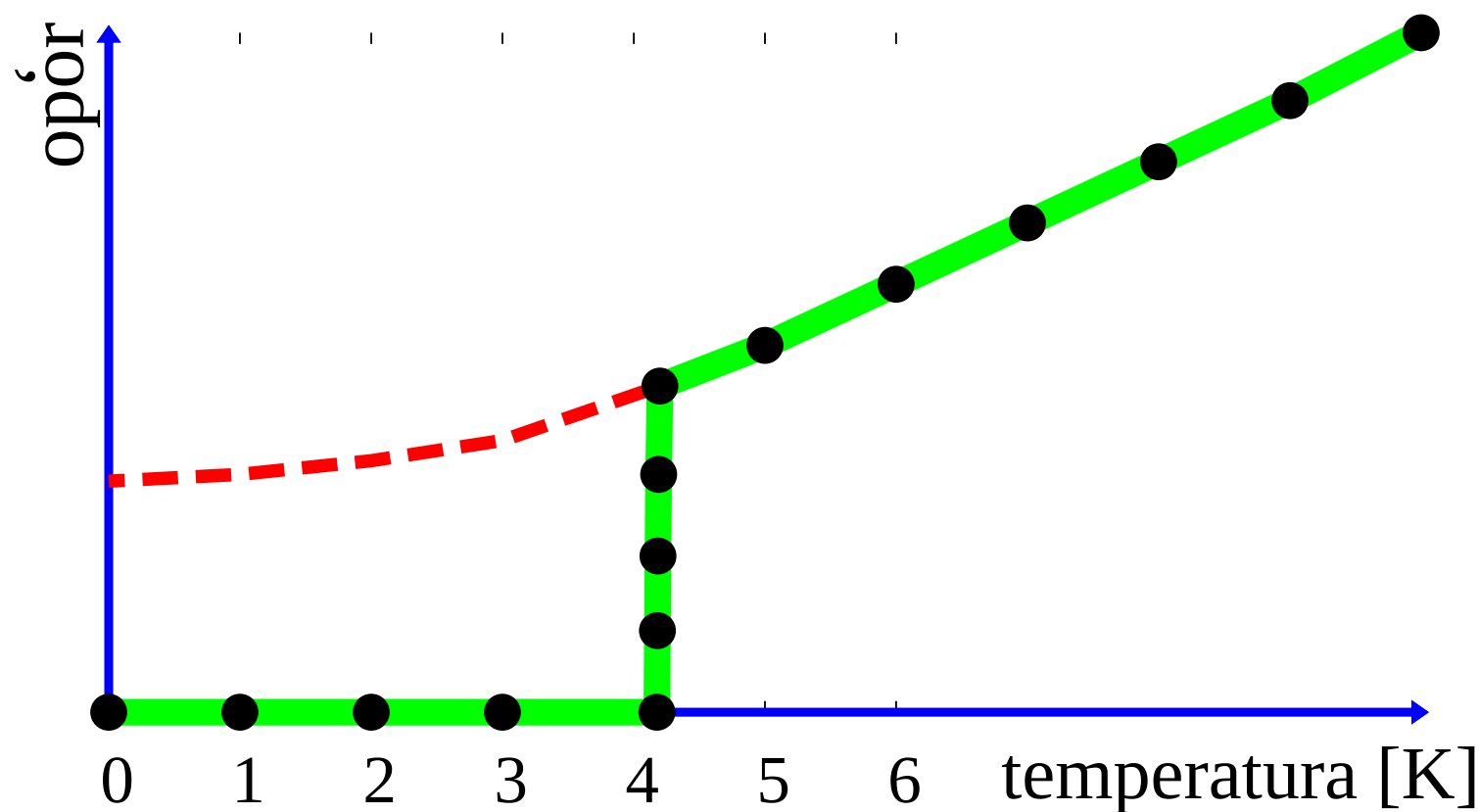
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

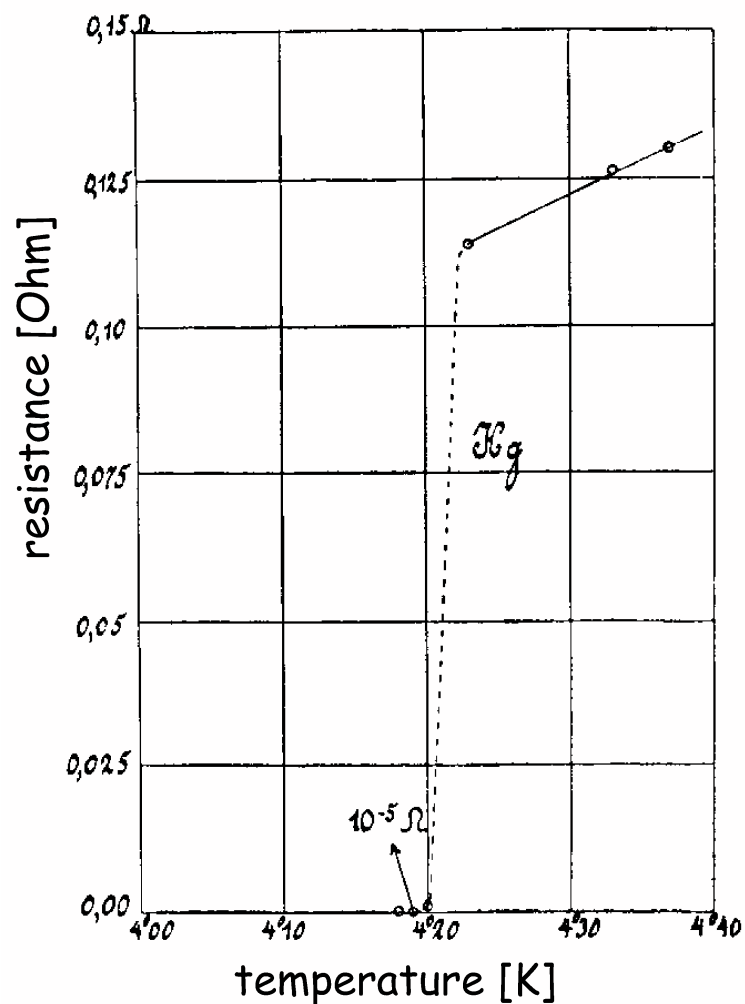
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

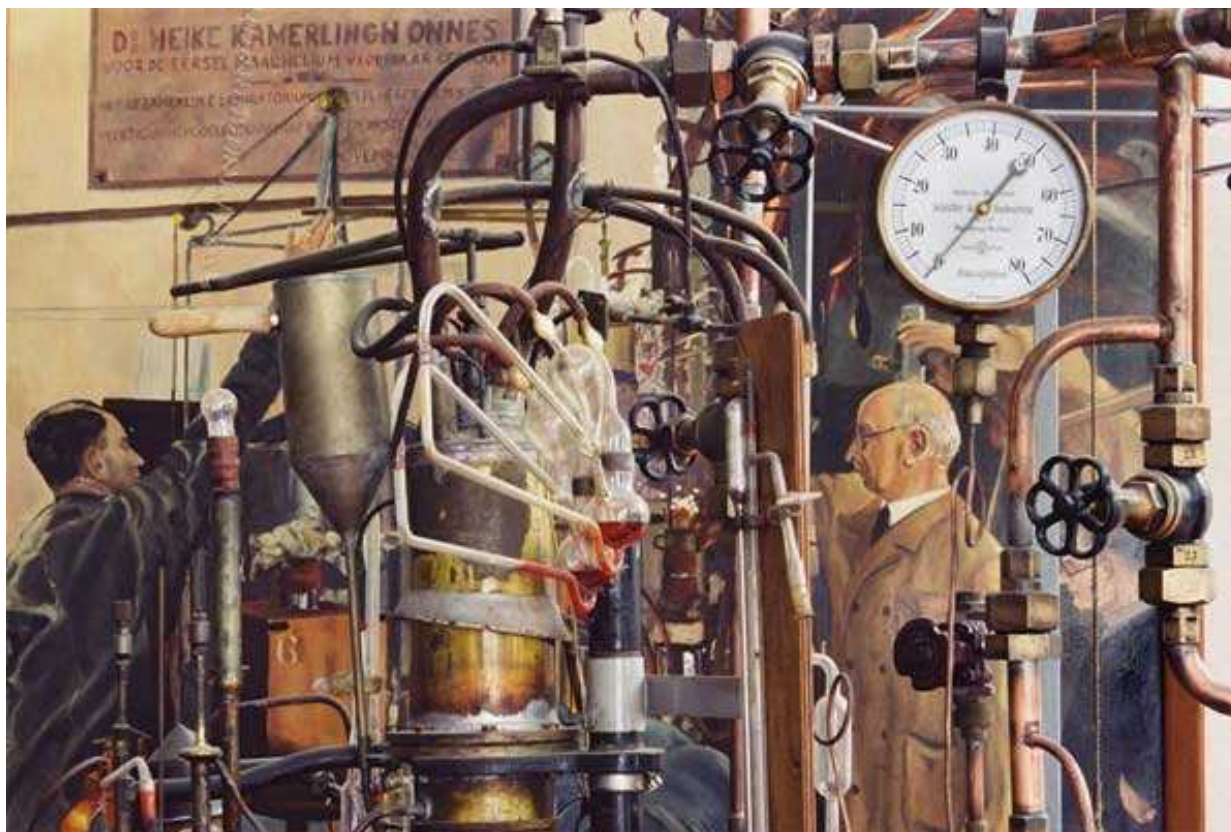
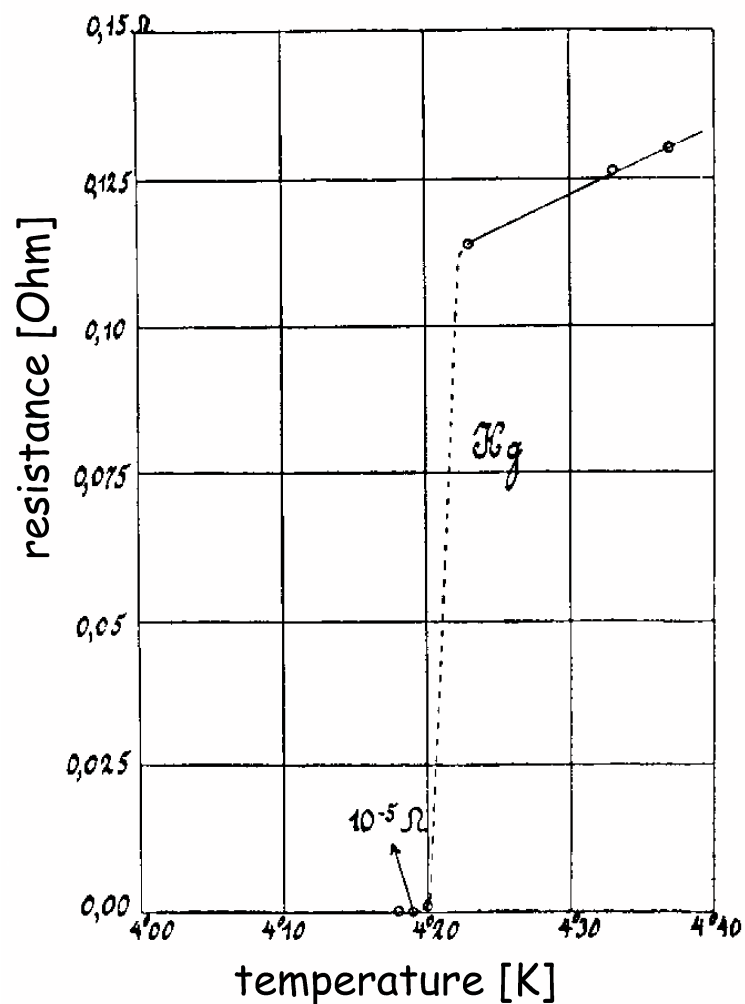
Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci.
Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 8 kwietnia 1911 r.

Stan nadprzewodzący odkryto (przypadkowo) podczas badania oporu rtęci. Poniżej temperatury $T_c = 4,2 \text{ K}$ (czyli -269°C) opór całkowicie zanika.



(Lejda, Holandia)

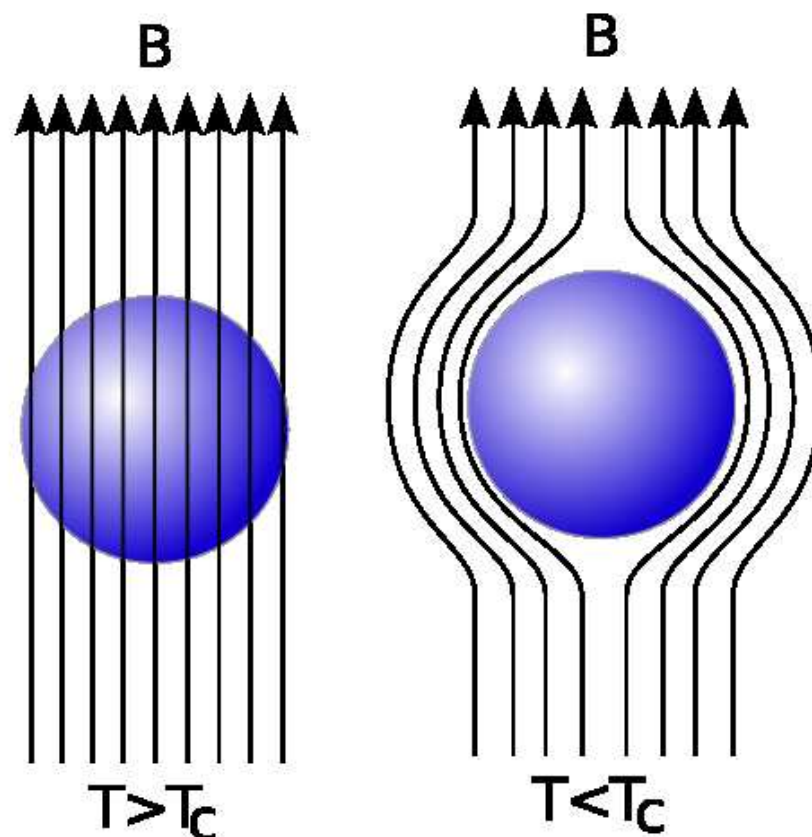
Heike Kamerlingh Onnes

Nadprzewodniki

– efekt Meissnera

Nadprzewodniki – efekt Meissnera

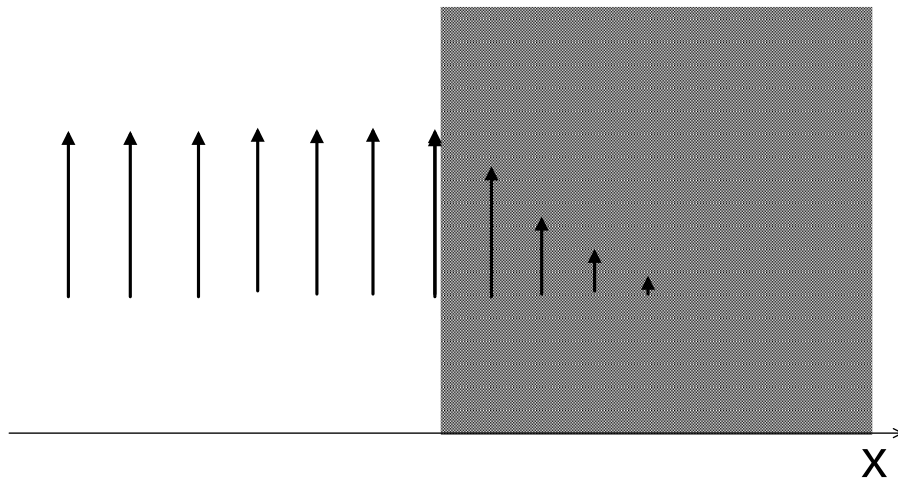
Nadprzewodniki charakteryzują się jednocześnie **idealnym diamagnetyzmem**.
Zjawisko to polega na całkowitym ekranowaniu pola magnetycznego.



W. Meissner, R. Ochsenfeld (1933 r.)

Nadprzewodniki – efekt Meissnera

Pole magnetyczne wnika jedynie do niewielkiej głębokości przy powierzchni.



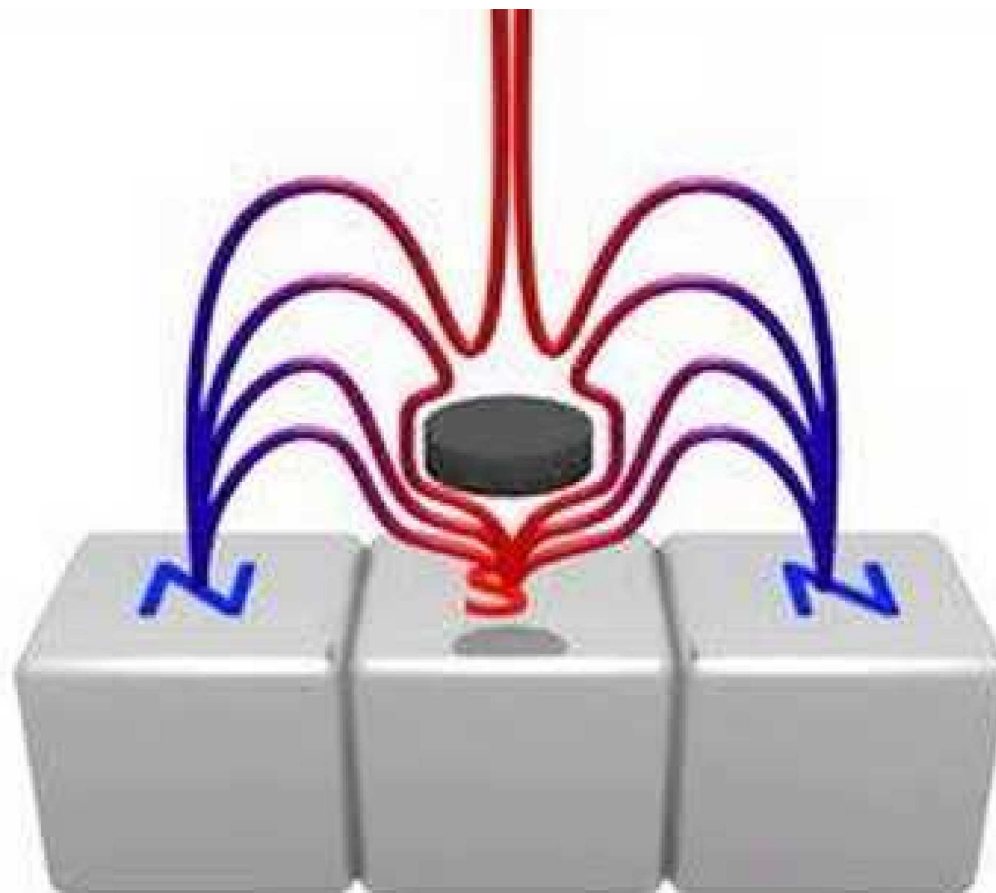
$$B(x) = B_0 e^{-x/\lambda}$$



Heinz i Fritz London (1935 r.)

Nadprzewodniki – efekt Meissnera

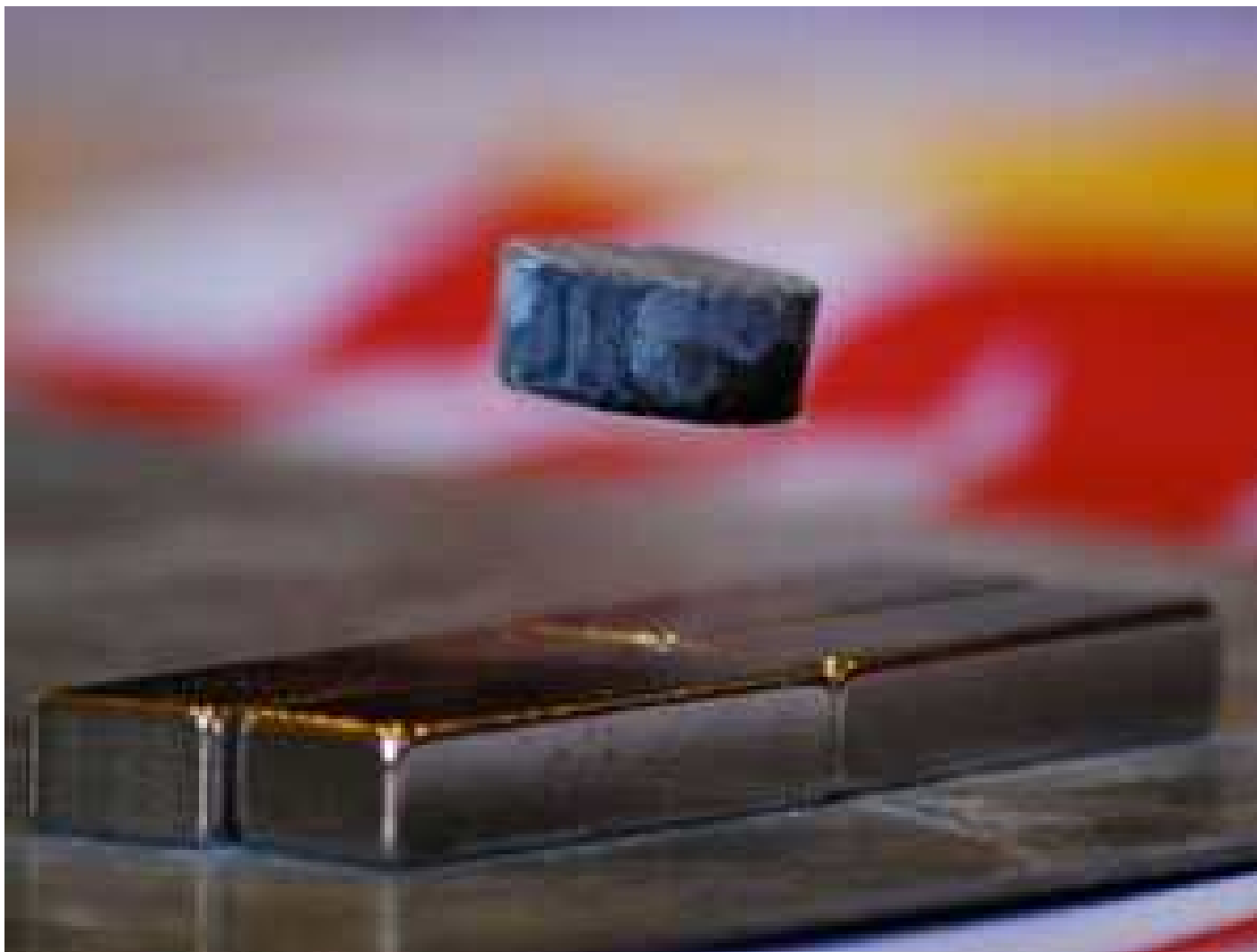
Zjawisko Meissnera wykorzystuje się np. do profilowania linii sił pola magnetycznego.



adding a superconductor changes the fields

Nadprzewodniki – efekt Meissnera

W ten sposób można skompensować siłę grawitacji, uzyskując efekt lewitacji.



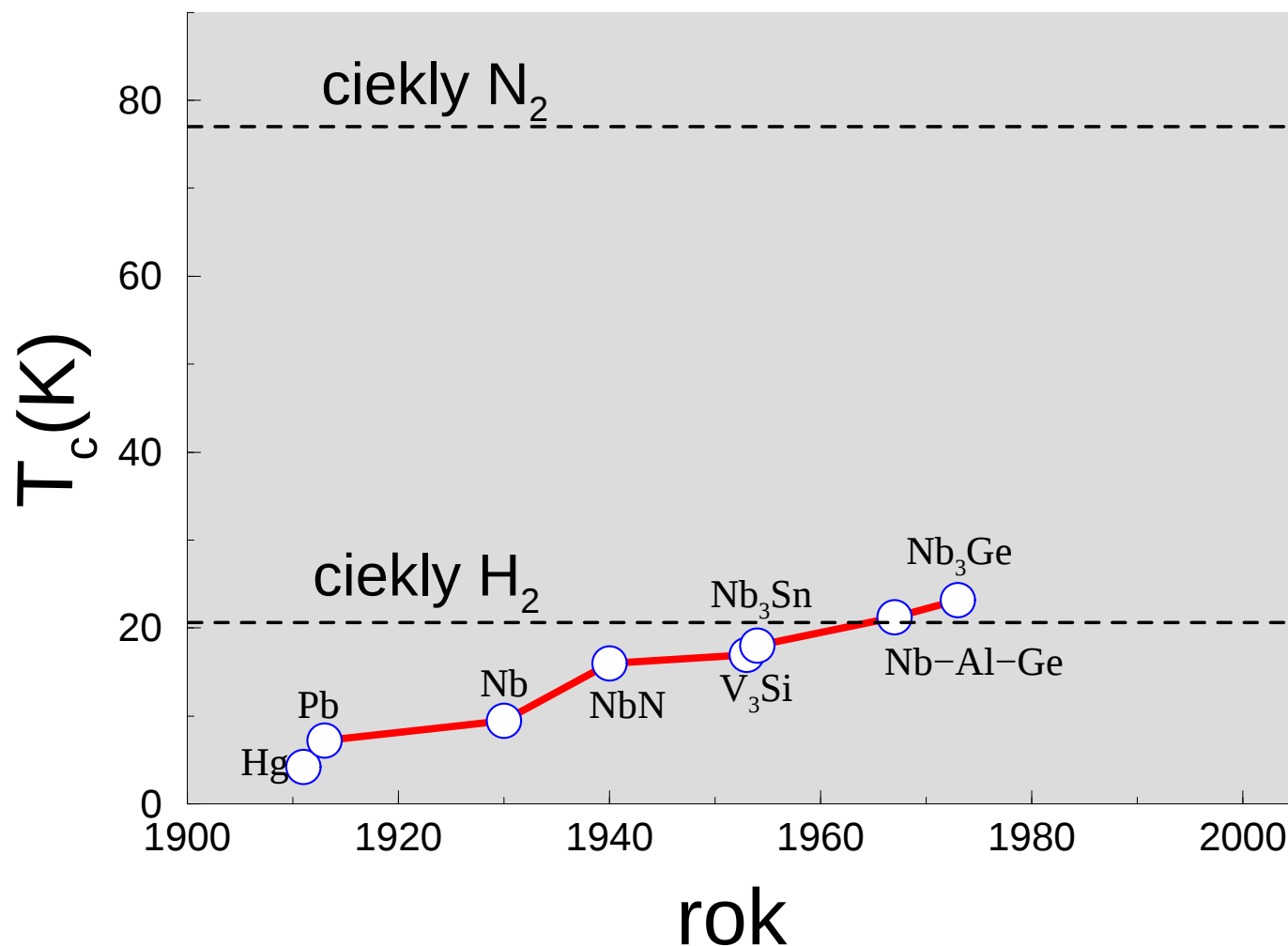
Nadprzewodniki – kolejne odkrycia

Nadprzewodniki – kolejne odkrycia

Stan nadprzewodzący został później odkryty w kilku innych pierwiastkach oraz stopach. Oto wybrane przykłady:

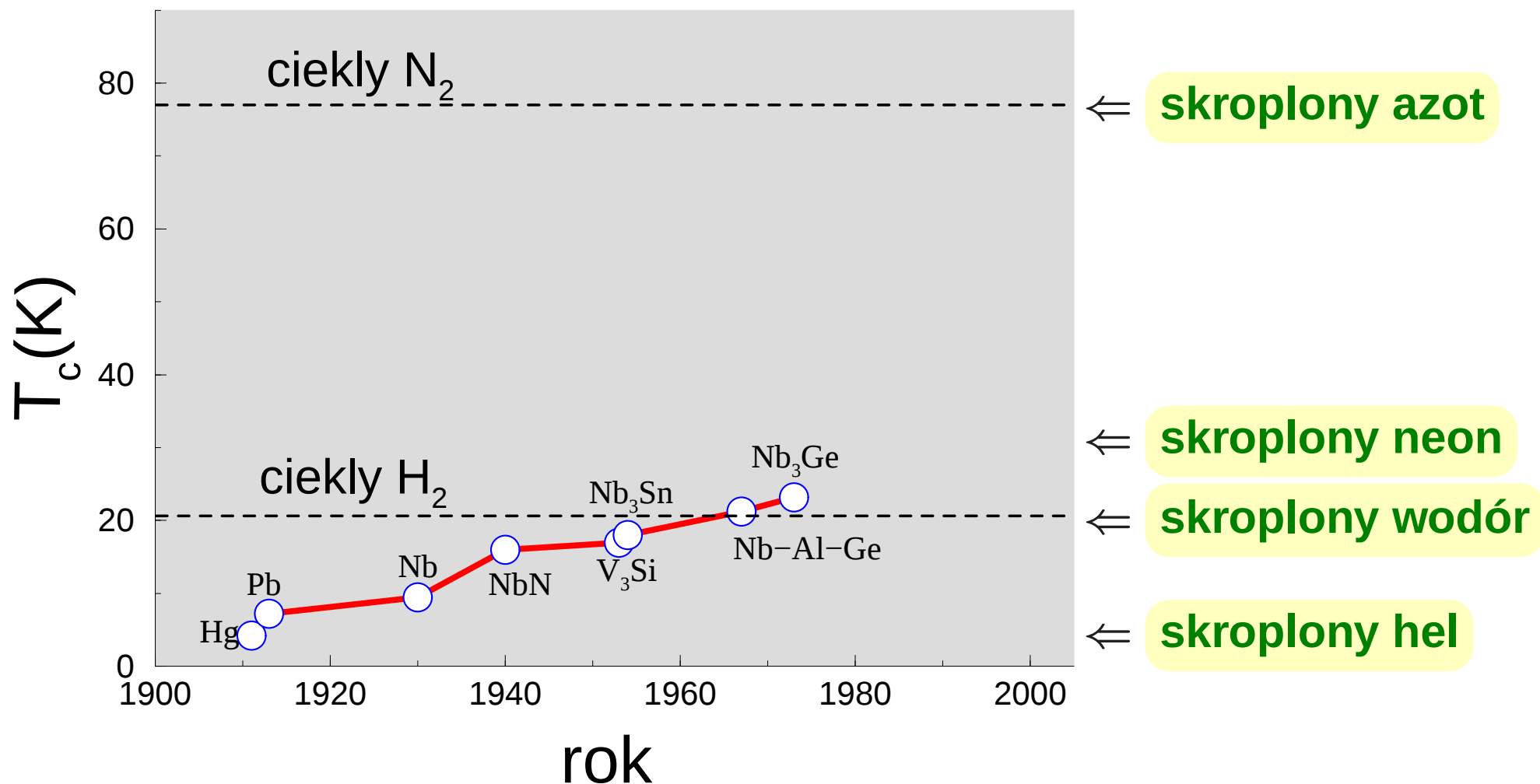
Nadprzewodniki – kolejne odkrycia

Stan nadprzewodzący został później odkryty w kilku innych pierwiastkach oraz stopach. Oto wybrane przykłady:



Nadprzewodniki – kolejne odkrycia

Stan nadprzewodzący został później odkryty w kilku innych pierwiastkach oraz stopach. Oto wybrane przykłady:



Istota nadprzewodnictwa — pomocne fakty

**Kluczowe znaczenie dla zrozumienia mechanizmu
(konwencjonalnego) nadprzewodnictwa miało:**

Istota nadprzewodnictwa — pomocne fakty

Kluczowe znaczenie dla zrozumienia mechanizmu
(konwencjonalnego) nadprzewodnictwa miało:

⇒ odkrycie efektu izotopowego (1950 r.)

$$T_c \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

M - masa jonów

Teoria nadprzewodnictwa

– 1957 r.



J. Bardeen*, L. Cooper, R. Schrieffer

Za opracowanie mikroskopowej teorii nadprzewodnictwa (tzw. teorię BCS) przyznano Nagrodę Nobla w 1972 roku.

Nadprzewodnictwo

– **zjawisko emergentne**

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary (Coopera)

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary (Coopera)

⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary (Coopera)

⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia
(jak gigantyczny superatom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary (Coopera)

⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia

(jak gigantyczny superatom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat par Coopera jest odpowiedzialny za:

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary (Coopera)

⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia

(jak gigantyczny superatom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat par Coopera jest odpowiedzialny za:

⇒ idealne przewodnictwo (ruch bez rozpraszania)

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary (Coopera)
- ⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia
(jak gigantyczny superatom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat par Coopera jest odpowiedzialny za:

- ⇒ idealne przewodnictwo (ruch bez rozpraszania)
- ⇒ idealny diamagnetyzm (efekt Meissnera)

Nadprzewodnictwo – zjawisko emergentne

Elektrony w powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary (Coopera)
- ⇒ i kolektywnie reagują na zewnętrzne zaburzenia
(jak gigantyczny superatom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat par Coopera jest odpowiedzialny za:

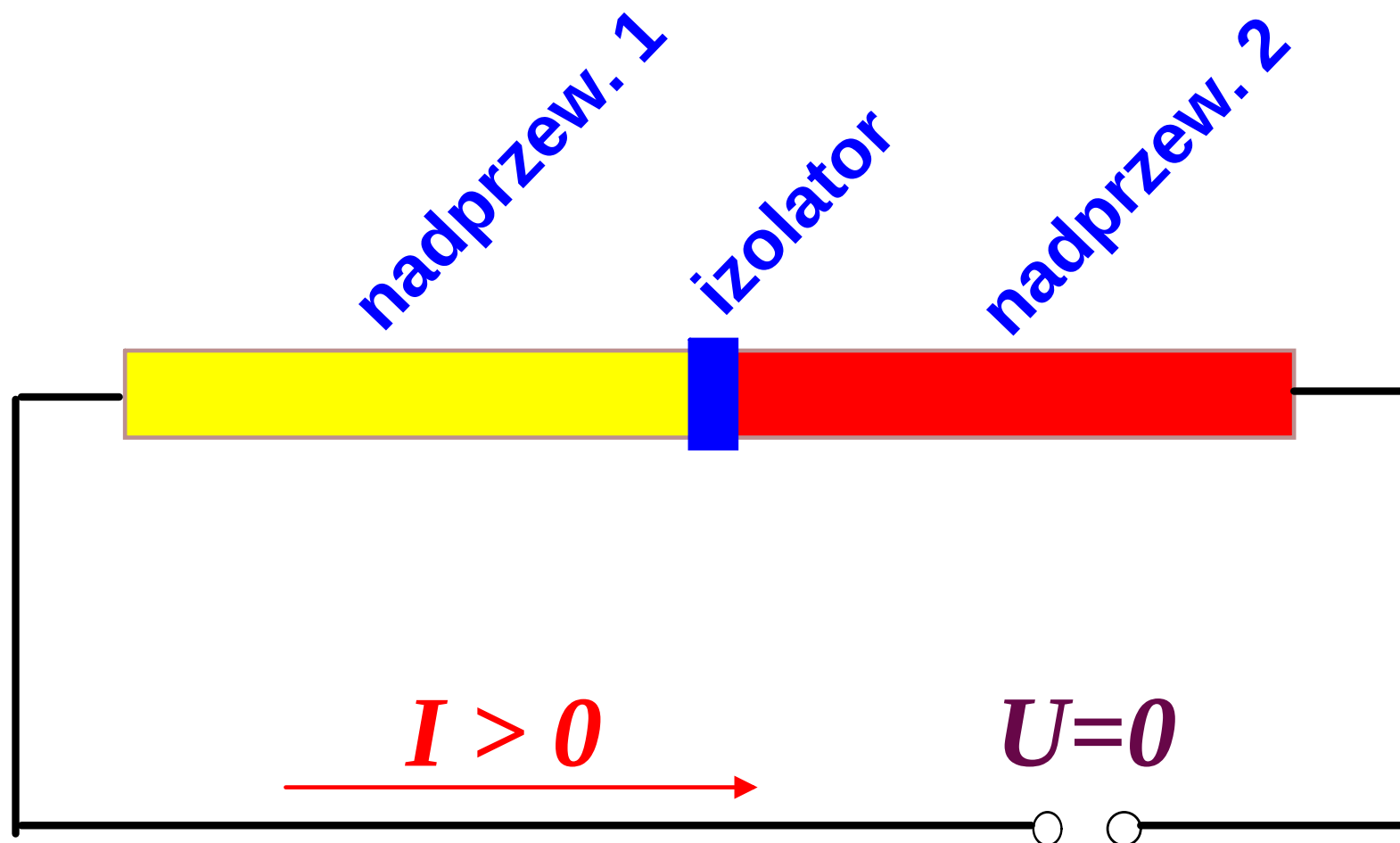
- ⇒ idealne przewodnictwo (ruch bez rozpraszania)
- ⇒ idealny diamagnetyzm (efekt Meissnera)
- ⇒ nowe zjawiska (efekt Josephsona, wiry kwantowe itp.)

Efekt Josepha

– prąd par Coopera

Efekt Josephsona

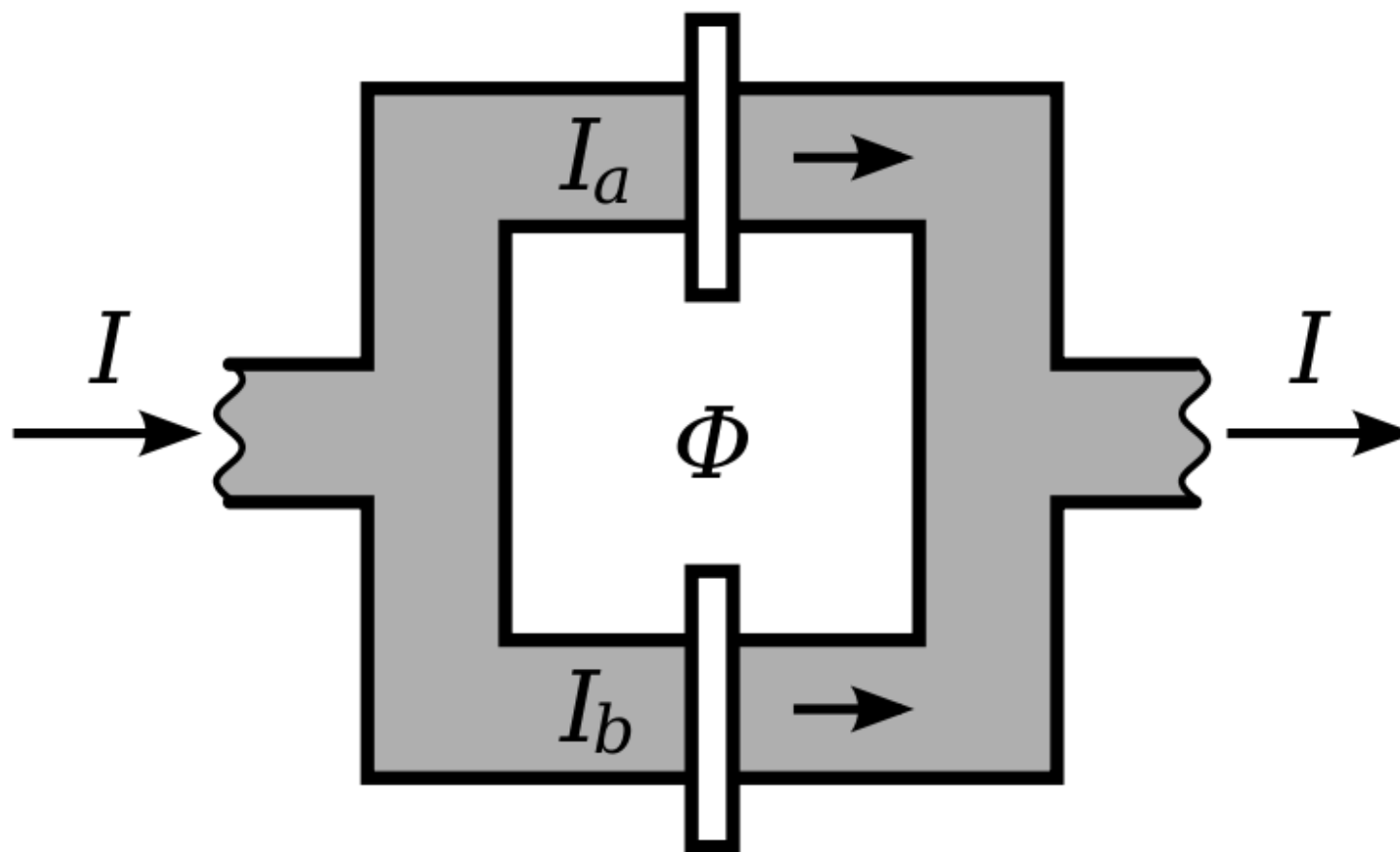
– prąd par Coopera



Złącze utworzone z dwóch nadprzewodników i cienkiej warstwy izolatora.

Efekt Josephaona

– prąd par Coopera



SQUID – Superconducting QUantum Interferometer Device.

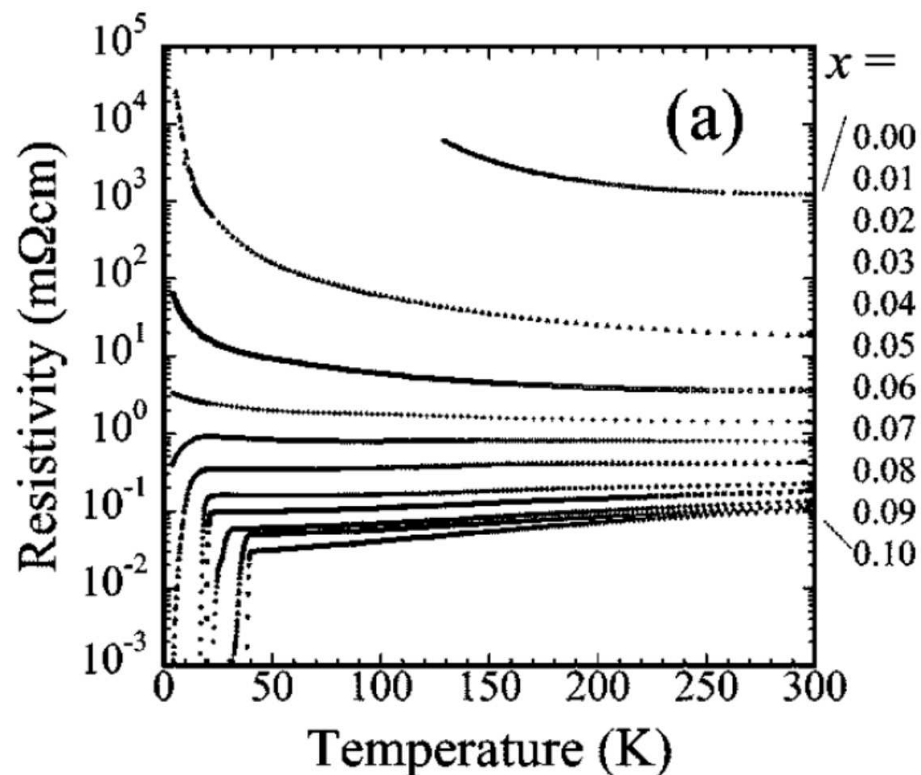
Takie urządzenia są w stanie wykryć bardzo małe pola magnetyczne $\sim 10^{-15}$ T.

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć



Alex Müller, Georg Bednorz

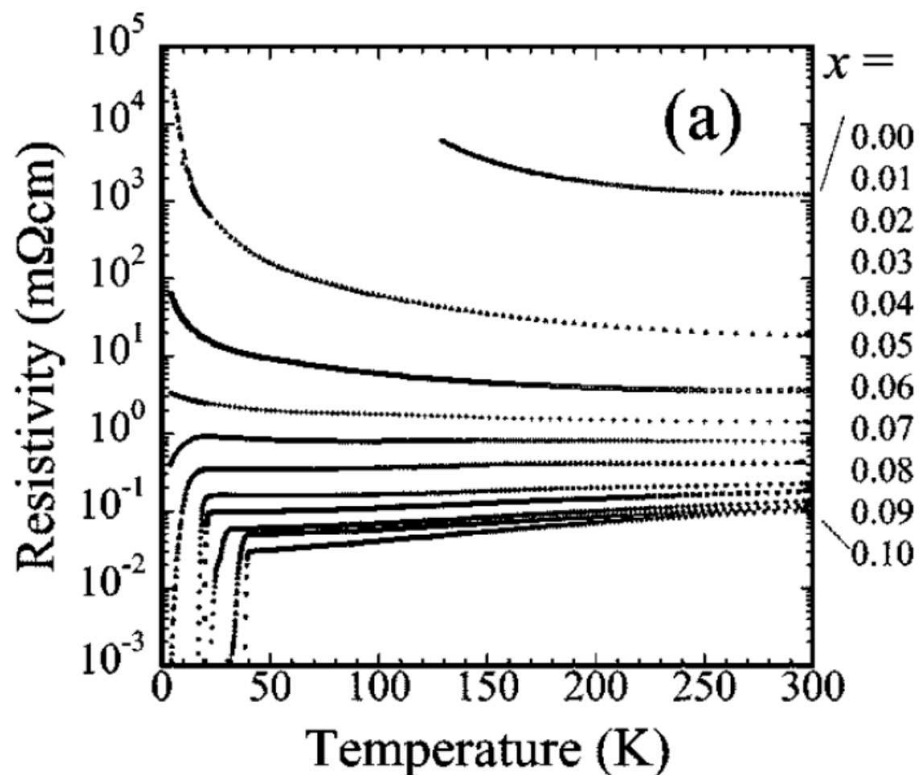
/ IBM Rüschlikon, Szwajcaria /

W 1986 r. odkryto, że materiał ceramiczny $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (który dla $x=0$ jest izolatorem typu Motta) w zakresie domieszkowania $0,05 < x < 0,25$ staje się nadprzewodnikiem.

Maksymalna temperatura krytyczna $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ wynosi $T_c=36$ K.

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć



Alex Müller, Georg Bednorz

Nagroda Nobla, 1987 r.

W 1986 r. odkryto, że materiał ceramiczny $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (który dla $x=0$ jest izolatorem typu Motta) w zakresie domieszkowania $0,05 < x < 0,25$ staje się nadprzewodnikiem.

Maksymalna temperatura krytyczna $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ wynosi $T_c=36$ K.

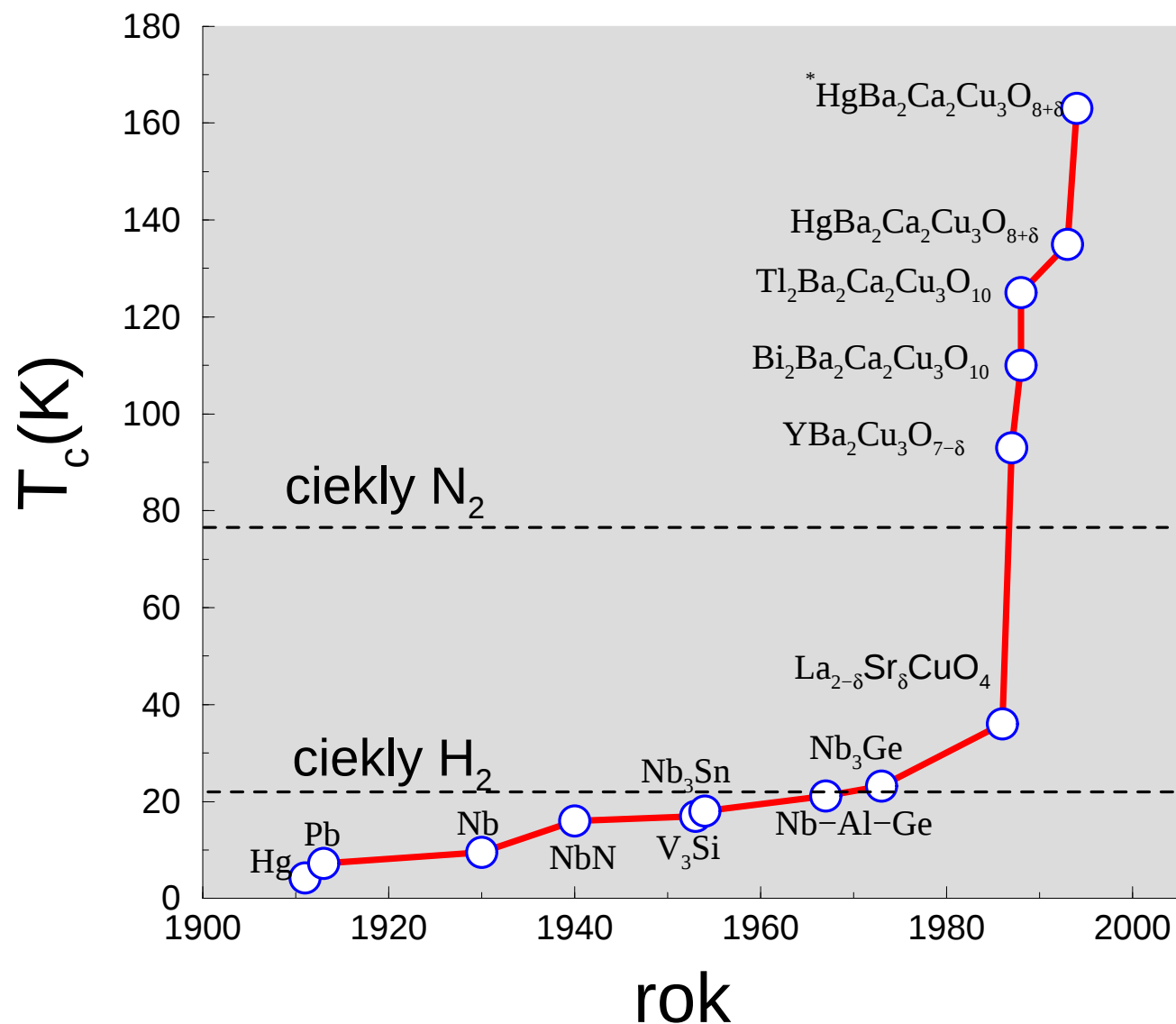
Nadprzewodniki wysokotemperaturowe – nowa epoka odkryć

Odkrycie to zapoczątkowało burzliwy okres historii rozwoju nadprzewodnictwa.

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

— nowa epoka odkryć

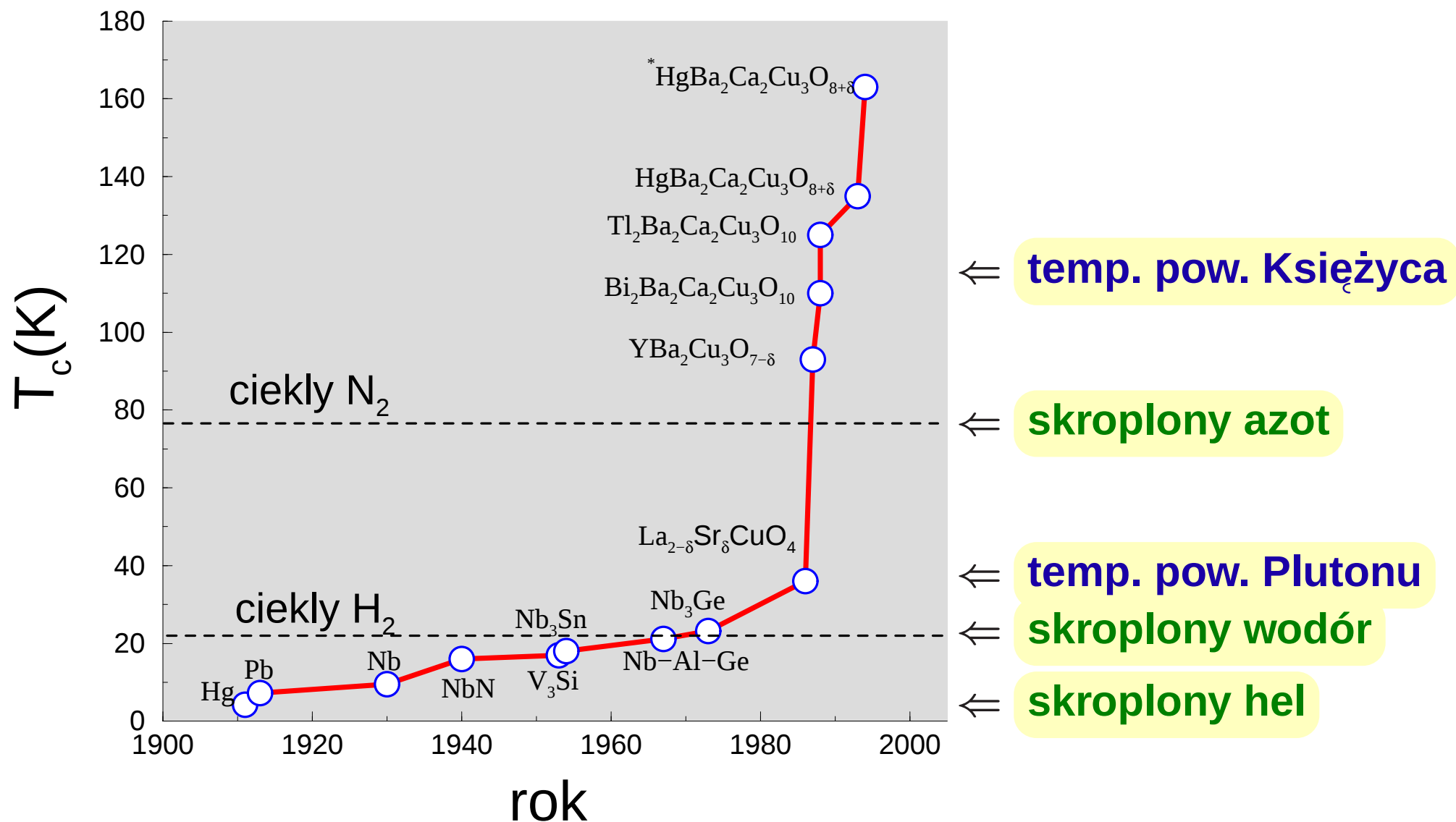
Odkrycie to zapoczątkowało burzliwy okres historii rozwoju nadprzewodnictwa.



Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć

Odkrycie to zapoczątkowało burzliwy okres historii rozwoju nadprzewodnictwa.



2. Nowy rozdział nadprzewodnictwa:

⇒ rola efektów topologicznych