

Lublin, 21 września 2012 r.

Nadprzewodniki: właściwości i zastosowania

Tadeusz Domański

Instytut Fizyki

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej

Lublin, 21 września 2012 r.

Nadprzewodniki: właściwości i zastosowania

Tadeusz Domański

Instytut Fizyki

Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej

<http://kft.umcs.lublin.pl/doman/lectures>

Plan wykładu :

Plan wykładu :



Odkrycie nadprzewodnictwa

Plan wykładu :

- ⇒ **Odkrycie nadprzewodnictwa**
- ⇒ **Właściwości nadprzewodników**

Plan wykładu :

- ⇒ Odkrycie nadprzewodnictwa
- ⇒ Właściwości nadprzewodników
- ⇒ Istota zjawiska nadprzewodnictwa

Plan wykładu :

- ⇒ Odkrycie nadprzewodnictwa
- ⇒ Właściwości nadprzewodników
- ⇒ Istota zjawiska nadprzewodnictwa
- ⇒ Sto lat odkryć

Plan wykładu :

- ⇒ Odkrycie nadprzewodnictwa
- ⇒ Właściwości nadprzewodników
- ⇒ Istota zjawiska nadprzewodnictwa
- ⇒ Sto lat odkryć
- ⇒ Zastosowania

Plan wykładu :

- ⇒ Odkrycie nadprzewodnictwa
- ⇒ Właściwości nadprzewodników
- ⇒ Istota zjawiska nadprzewodnictwa
- ⇒ Sto lat odkryć
- ⇒ Zastosowania
- ★ Pokaz

1. Odkrycie nadprzewodnictwa

Osobliwości niskich temperatur

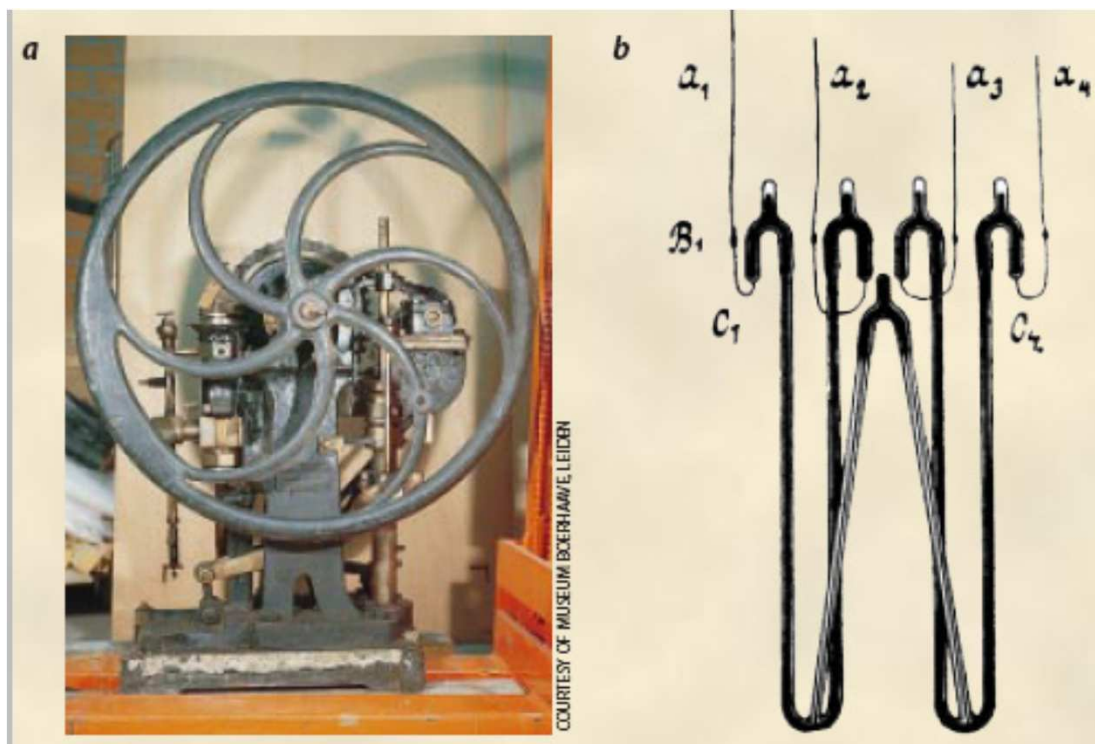
– sprzeczne oczekiwania

Dzięki opracowaniu metod skraplania gazów (tlenu, azotu i helu) na początku XX wieku udało się uzyskać temperatury rzędu - 270 °C.

Osobliwości niskich temperatur

– sprzeczne oczekiwania

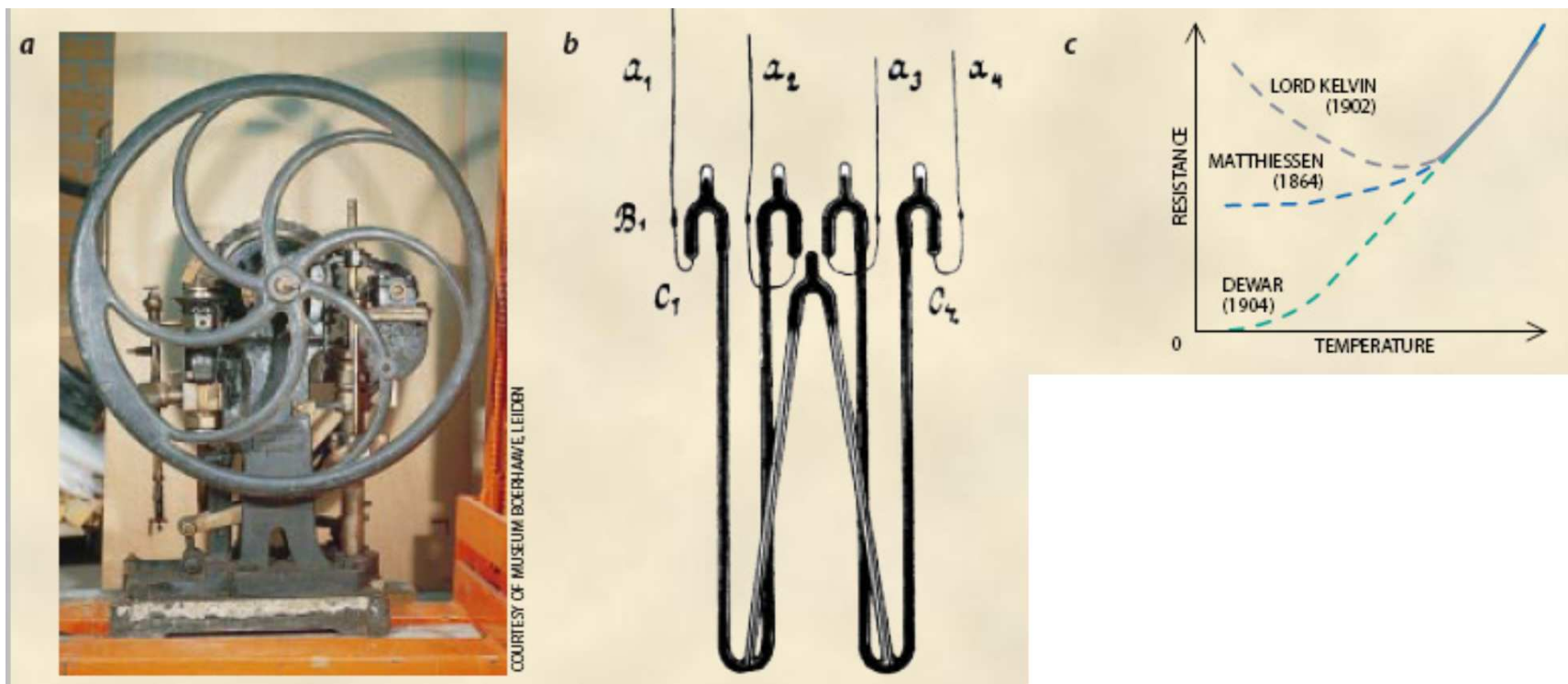
Dzięki opracowaniu metod skraplania gazów (tlenu, azotu i helu) na początku XX wieku udało się uzyskać temperatury rzędu - 270 °C.



Osobliwości niskich temperatur

– sprzeczne oczekiwania

Dzięki opracowaniu metod skraplania gazów (tlenu, azotu i helu) na początku XX wieku udało się uzyskać temperatury rzędu - 270 °C.

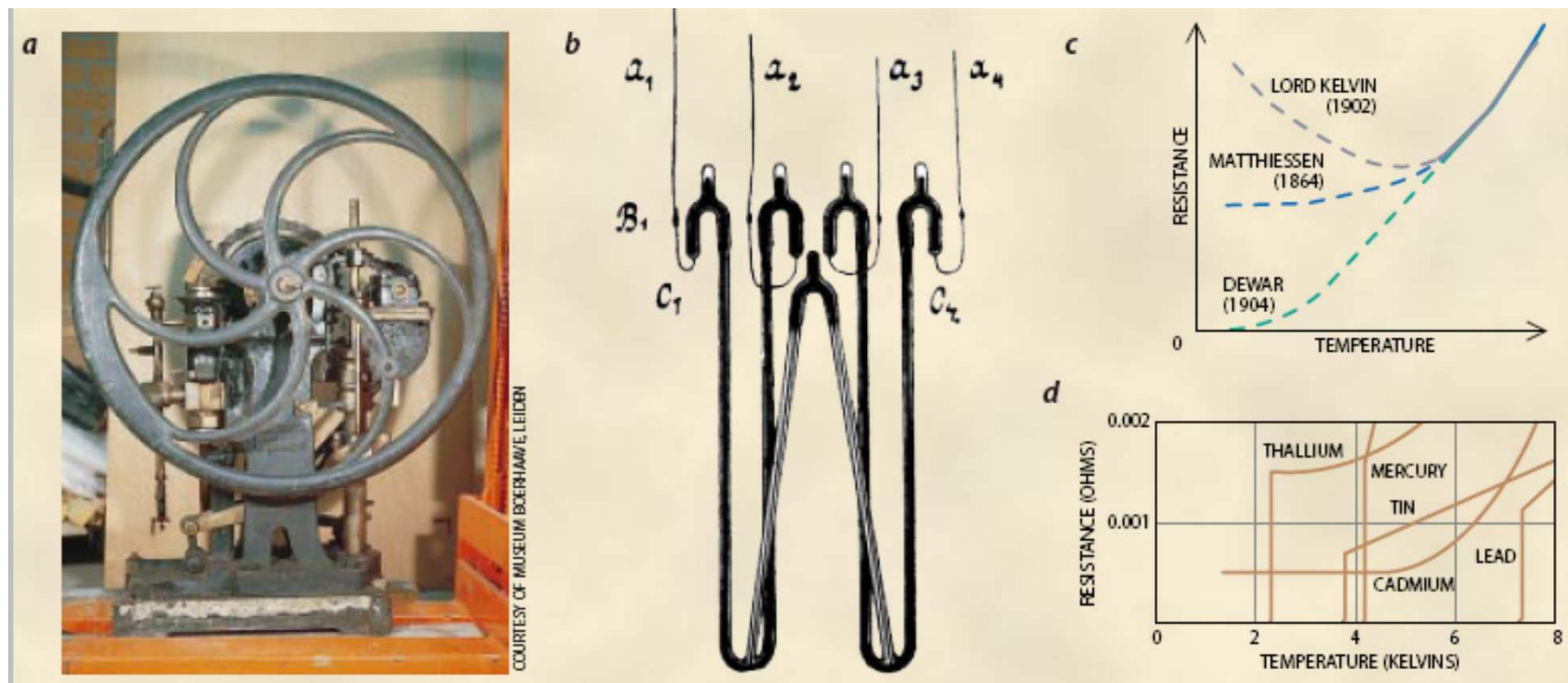


Oczekiwania dotyczące właściwości oporu były skrajnie sprzeczne.

Osobliwości niskich temperatur

– sprzeczne oczekiwania

Dzięki opracowaniu metod skraplania gazów (tlenu, azotu i helu) na początku XX wieku udało się uzyskać temperatury rzędu - 270 °C.



Weryfikacja doświadczalna okazała się jeszcze bardziej zaskakująca.

Odkrycie nadprzewodnictwa

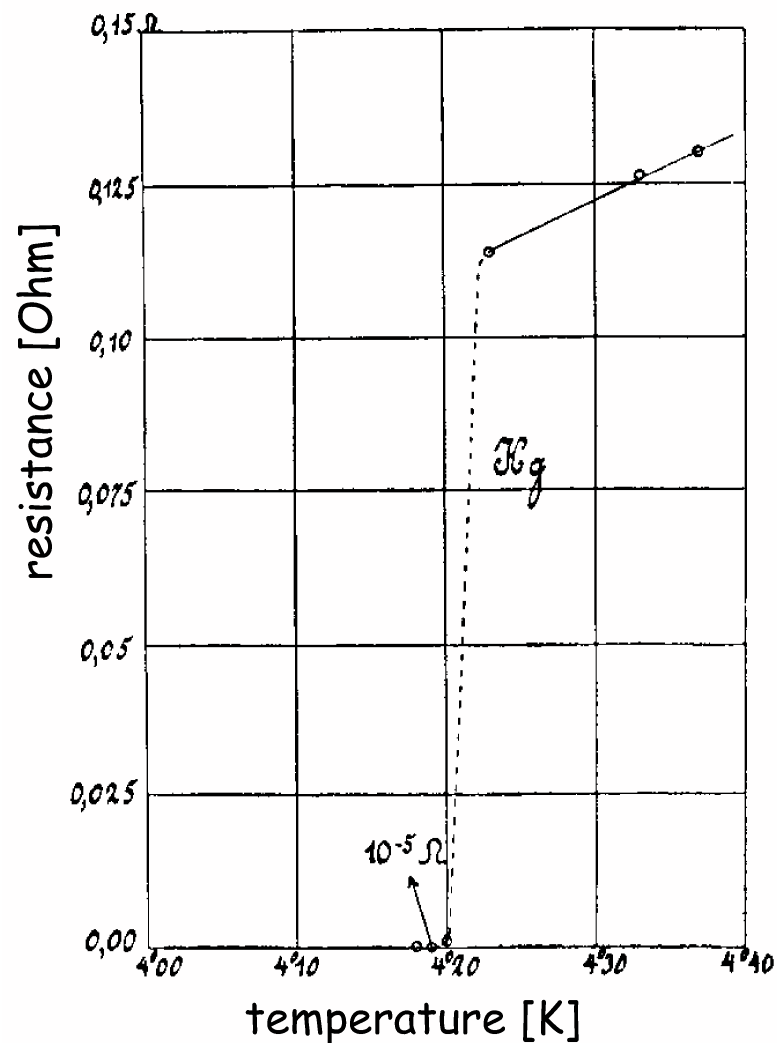
– 25 października 1911 r.

Pierwszym (przypadkowo) odkrytym nadprzewodnikiem była rtęć Hg.
Jej temperatura krytyczna wynosi $T_c = 4,2 \text{ K}$, czyli $T_c \simeq -269 \text{ }^\circ\text{C}$.

Odkrycie nadprzewodnictwa

– 25 października 1911 r.

Pierwszym (przypadkowo) odkrytym nadprzewodnikiem była rtęć Hg.
Jej temperatura krytyczna wynosi $T_c = 4,2 \text{ K}$, czyli $T_c \simeq -269 \text{ }^\circ\text{C}$.



Odkrycie nadprzewodnictwa

– 25 października 1911 r.

Pierwszym (przypadkowo) odkrytym nadprzewodnikiem była rtęć Hg.
Jej temperatura krytyczna wynosi $T_c = 4,2 \text{ K}$, czyli $T_c \simeq -269 \text{ }^\circ\text{C}$.



Heike Kamerlingh Onnes
(Lejda, Holandia)

2. Właściwości nadprzewodników

Nadprzewodniki

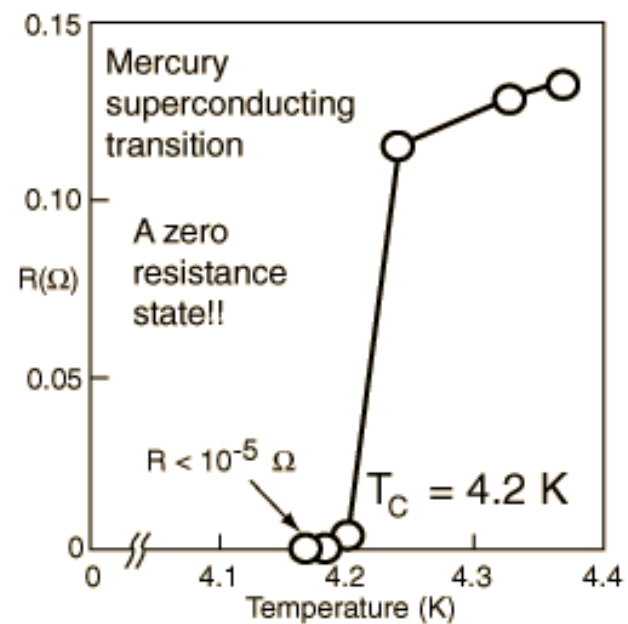
– podstawowe cechy

Nadprzewodniki

– podstawowe cechy



Idealne przewodnictwo / prądu stałego /

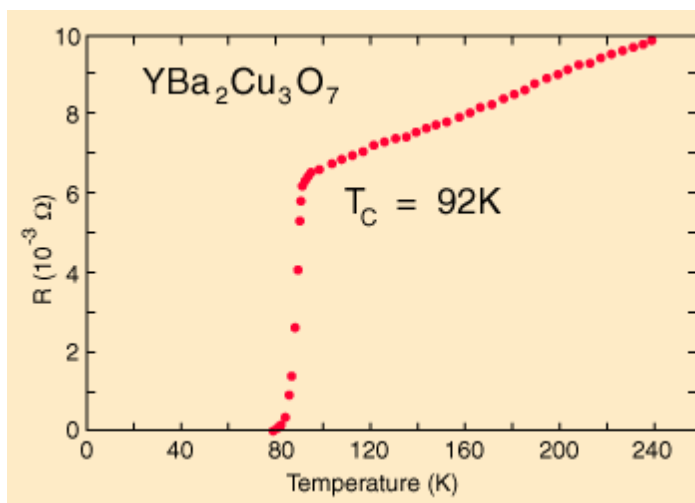


Nadprzewodniki

– podstawowe cechy



Idealne przewodnictwo
/ prądu stałego /



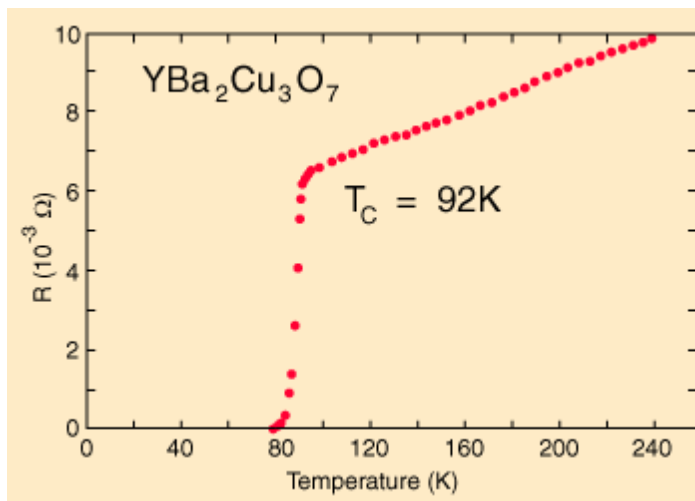
Nadprzewodniki

– podstawowe cechy



Idealne przewodnictwo

/ prądu stałego /



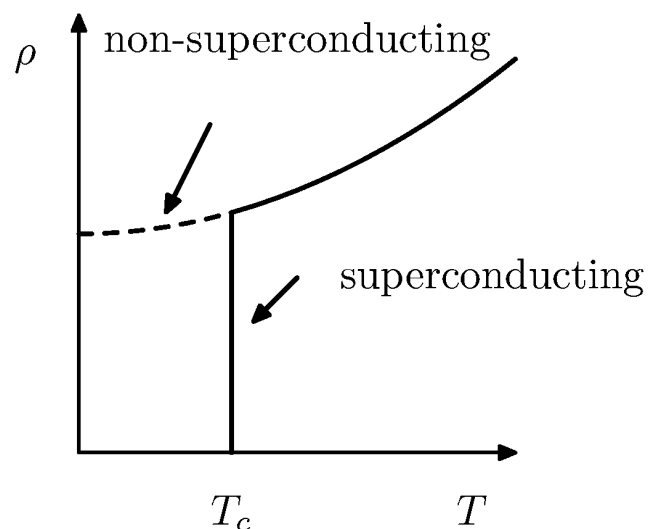
Zwykłe przewodniki:

prawo Ohma $R = \rho \frac{l}{S}$

gdzie $\rho \equiv 1/\sigma$

oraz $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$

$\tau(T)$ – czas relaksacji



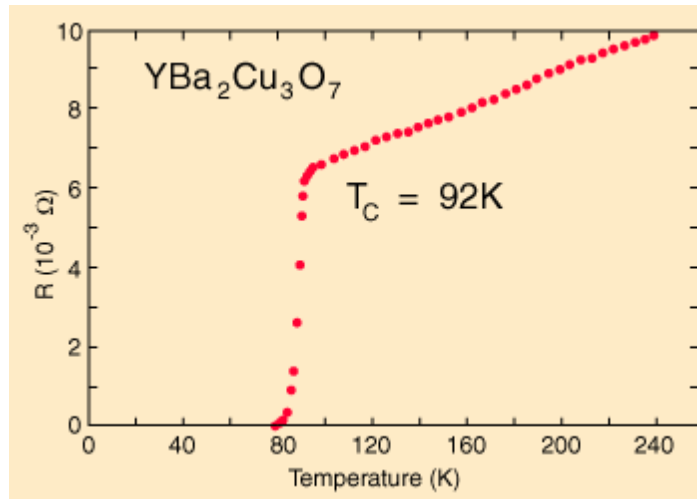
Nadprzewodniki

– podstawowe cechy



Idealne przewodnictwo

/ prądu stałego /



Przewodnictwo

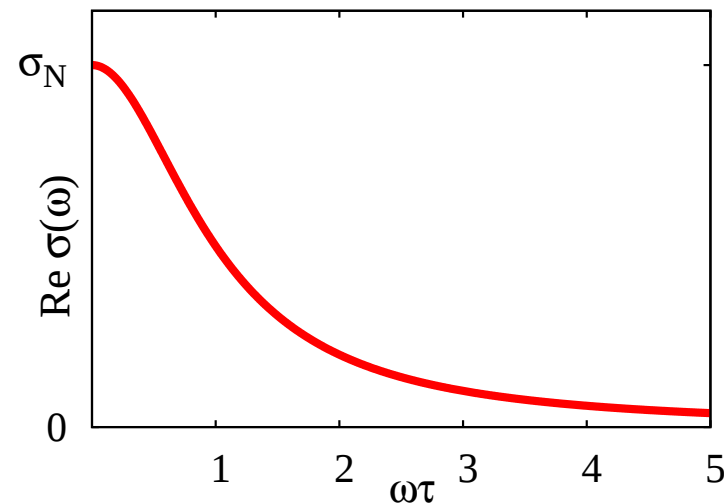
/ prądu zmiennego /

wyrażenie Drude

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2\tau}{m} \frac{1}{1-i\omega\tau}$$

spełnia regułę f-sum

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Re } \sigma(\omega) d\omega = \pi \frac{ne^2}{m}$$



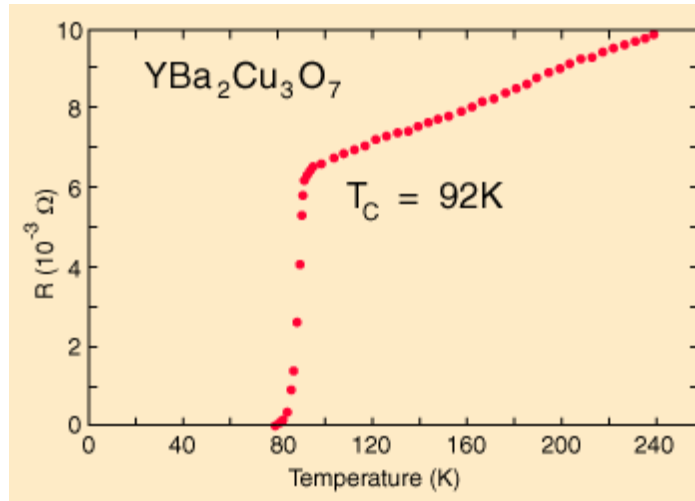
Nadprzewodniki

– podstawowe cechy



Idealne przewodnictwo

/ prądu stałego /



Przewodnictwo

/ prądu zmiennego /

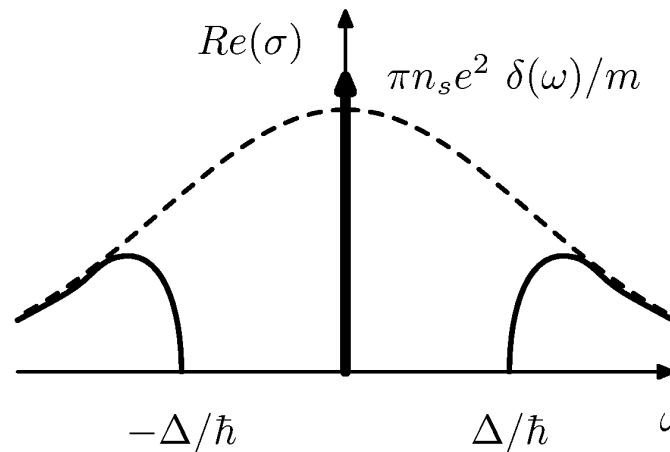
Reguła f-sum

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Re } \sigma(\omega) d\omega = \pi \frac{ne^2}{m}$$

jest też spełniona
poniżej T_c , gdzie

$$n = n_n + n_s$$

n_s – koncentracja elektronów nadciekłych



Nadprzewodniki

– podstawowe właściwości (c.d.)

Nadprzewodniki

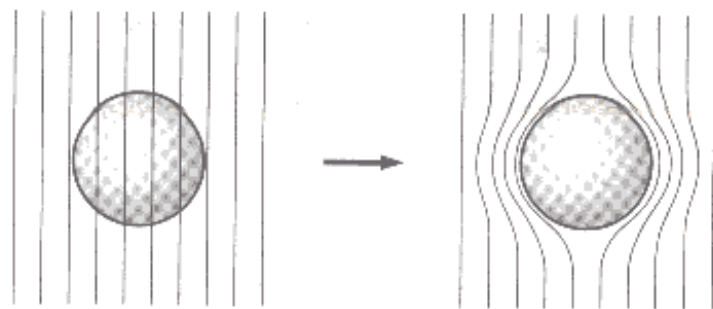
– podstawowe właściwości (c.d.)



Idealny diamagnetyzm

/całkowite ekranowanie pola magnetycznego/

Meissner i Ochsenfeld (1933 r.)



$$T > T_c$$

$$T < T_c$$

Nadprzewodniki

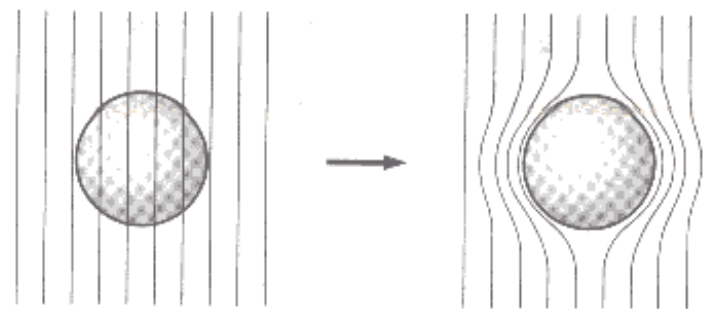
– podstawowe właściwości (c.d.)



Idealny diamagnetyzm

Meissner i Ochsenfeld (1933 r.)

/całkowite ekranowanie pola magnetycznego/



$$T > T_c$$

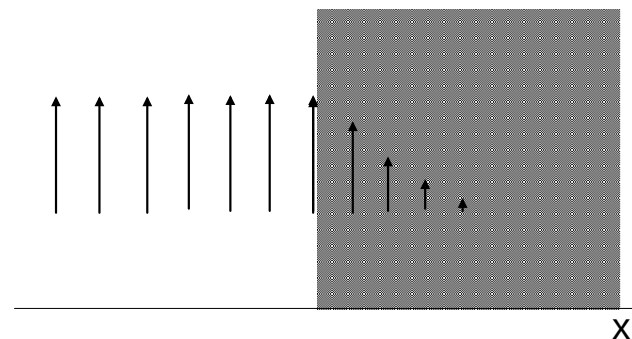
$$T < T_c$$

Równanie Londonów:

$$\vec{j} = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{A}$$

gdzie

$$\frac{n_s e^2}{m} \equiv \frac{1}{\mu_0 \lambda^2}$$



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

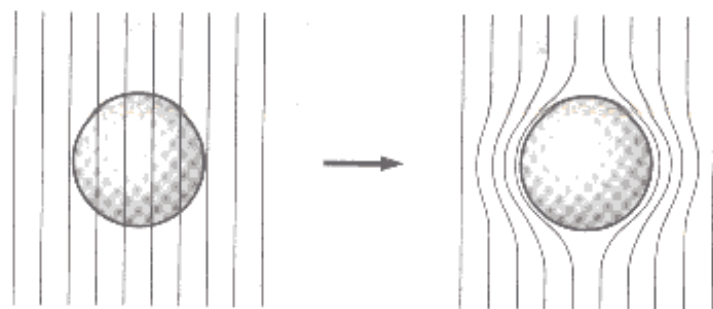
Nadprzewodniki

– podstawowe właściwości (c.d.)



Idealny diamagnetyzm

/całkowite ekranowanie pola magnetycznego/



$$T > T_c$$

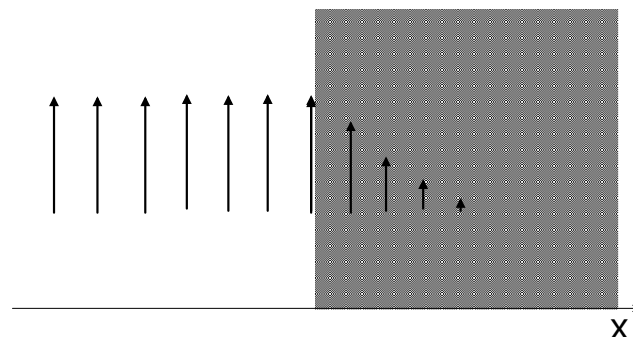
$$T < T_c$$

Równanie Londonów:

$$\vec{j} = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{A}$$

gdzie

$$\frac{n_s e^2}{m} \equiv \frac{1}{\mu_0 \lambda^2}$$



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



Heinz & Fritz London (1935 r.)

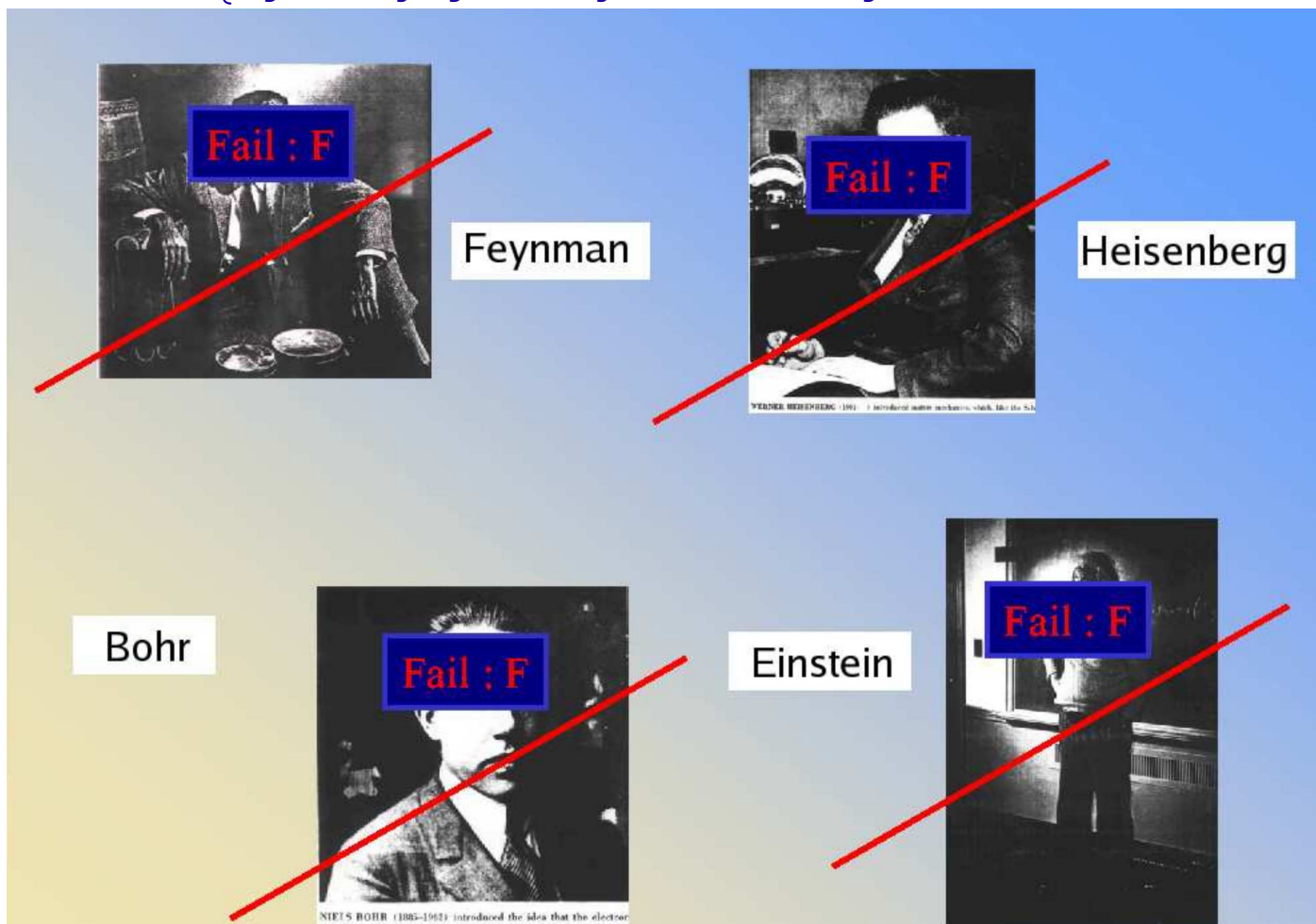
Meissner i Ochsenfeld (1933 r.)

3. Istota zjawiska nadprzewodnictwa

Zagadka nadprzewodnictwa

– problemy z wyjaśnieniem

Przez prawie 50 lat nikt nie potrafił wyjaśnić mechanizmu zjawiska nadprzewodnictwa, pomimo iż zajmowali się tym najwybitniejsi naukowcy XX wieku:



„No one is smart enough to explain it”

R. Feynman

Zagadka nadprzewodnictwa

— pomocne fakty

**Kluczowe znaczenie dla zrozumienia problemu nadprzewodnictwa
miały dwa następujące fakty:**

Zagadka nadprzewodnictwa

— pomocne fakty

Kluczowe znaczenie dla zrozumienia problemu nadprzewodnictwa miały dwa następujące fakty:

⇒ odkrycie efektu izotopowego (1950 r.)

$$T_c \propto \left(\frac{1}{M} \right)^\alpha$$

Zagadka nadprzewodnictwa — pomocne fakty

Kluczowe znaczenie dla zrozumienia problemu nadprzewodnictwa miały dwa następujące fakty:

⇒ odkrycie efektu izotopowego (1950 r.)

$$T_c \propto \left(\frac{1}{M} \right)^\alpha$$

⇒ teoretyczna praca H. Fröhlicha (1950 r.)

Zagadka nadprzewodnictwa — pomocne fakty

Kluczowe znaczenie dla zrozumienia problemu nadprzewodnictwa miały dwa następujące fakty:

⇒ odkrycie efektu izotopowego (1950 r.)

$$T_c \propto \left(\frac{1}{M} \right)^\alpha$$

⇒ teoretyczna praca H. Fröhlicha (1950 r.)

Wskutek sprzężenia do drgań sieci krystalicznej elektrony doświadczają efektywnego przyciągania, dzięki czemu łączą się w pary Coopera.

Mikroskopowa teoria – 1957 r.



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

Mikroskopowa teoria – 1957 r.



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

Za opracowanie mikroskopowej teorii nadprzewodnictwa (czyli tzw. teorie BCS) przyznano Nagrodę Nobla w 1972 r.

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary Coopera

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary Coopera

⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary Coopera
- ⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola
(jak gigantyczny super-atom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

⇒ łączą się w pary Coopera

⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola
(jak gigantyczny super-atom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat Bosego-Einsteina par Coopera jest odpowiedzialny za:

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary Coopera
- ⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola
(jak gigantyczny super-atom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat Bosego-Einsteina par Coopera jest odpowiedzialny za:

- ⇒ doskonałe przewodnictwo ruch bez rozpraszania

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary Coopera
- ⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola
(jak gigantyczny super-atom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat Bosego-Einsteina par Coopera jest odpowiedzialny za:

- ⇒ doskonałe przewodnictwo ruch bez rozpraszania
- ⇒ idealny diamagnetyzm czyli efekt Meissnera

Nadprzewodnictwo klasyczne – istota zjawiska

Elektrony z otoczenia powierzchni Fermiego:

- ⇒ łączą się w pary Coopera
- ⇒ i w kolektywny sposób reagują na zewnętrzne pola
(jak gigantyczny super-atom $\sim 10^{23}$ identycznych obiektów !)

Kondensat Bosego-Einsteina par Coopera jest odpowiedzialny za:

- ⇒ doskonałe przewodnictwo ruch bez rozpraszania
- ⇒ idealny diamagnetyzm czyli efekt Meissnera
- ⇒ inne zjawiska kolektywne efekt Josephsona itp.

Źródła parowania

– egzotyczne nadprzewodniki

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

1. **fonony** / *nadprzewodniki klasyczne, MgB_2* /

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

1. **fonony** / *nadprzewodniki klasyczne, MgB_2* /
2. **magnony** / *tzw. ciężkie fermiony /*

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

1. **fonony** / *nadprzewodniki klasyczne, MgB_2* /
2. **magnony** / *tzw. ciężkie fermiony /*
3. **oddziaływanie kulombowskie** / *nadprzewodniki wysokotemperaturowe /*

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

1. **fonony** / *nadprzewodniki klasyczne, MgB_2* /
2. **magnony** / *tzw. ciężkie fermiony* /
3. **oddziaływanie kulombowskie** / *nadprzewodniki wysokotemperaturowe* /
4. **rezonanse Feshbacha** / *ultrazimne gazy atomowe* /

Źródła parowania – egzotyczne nadprzewodniki

Do powstawania par elektronowych oraz nadprzewodnictwa prowadzić mogą

1. **fonony** / *nadprzewodniki klasyczne, MgB_2 /*
2. **magnony** / *tzw. ciężkie fermiony /*
3. **oddziaływanie kulombowskie** / *nadprzewodniki wysokotemperaturowe /*
4. **rezonanse Feshbacha** / *ultrazimne gazy atomowe /*
5. **inne** / *plazma gluonowo-kwarkowa, nadciekłe gwiazdy neutronowe, ... /*

4. Sto lat odkrywania

Nadprzewodniki konwencjonalne

– historia odkryć

Nadprzewodniki konwencjonalne

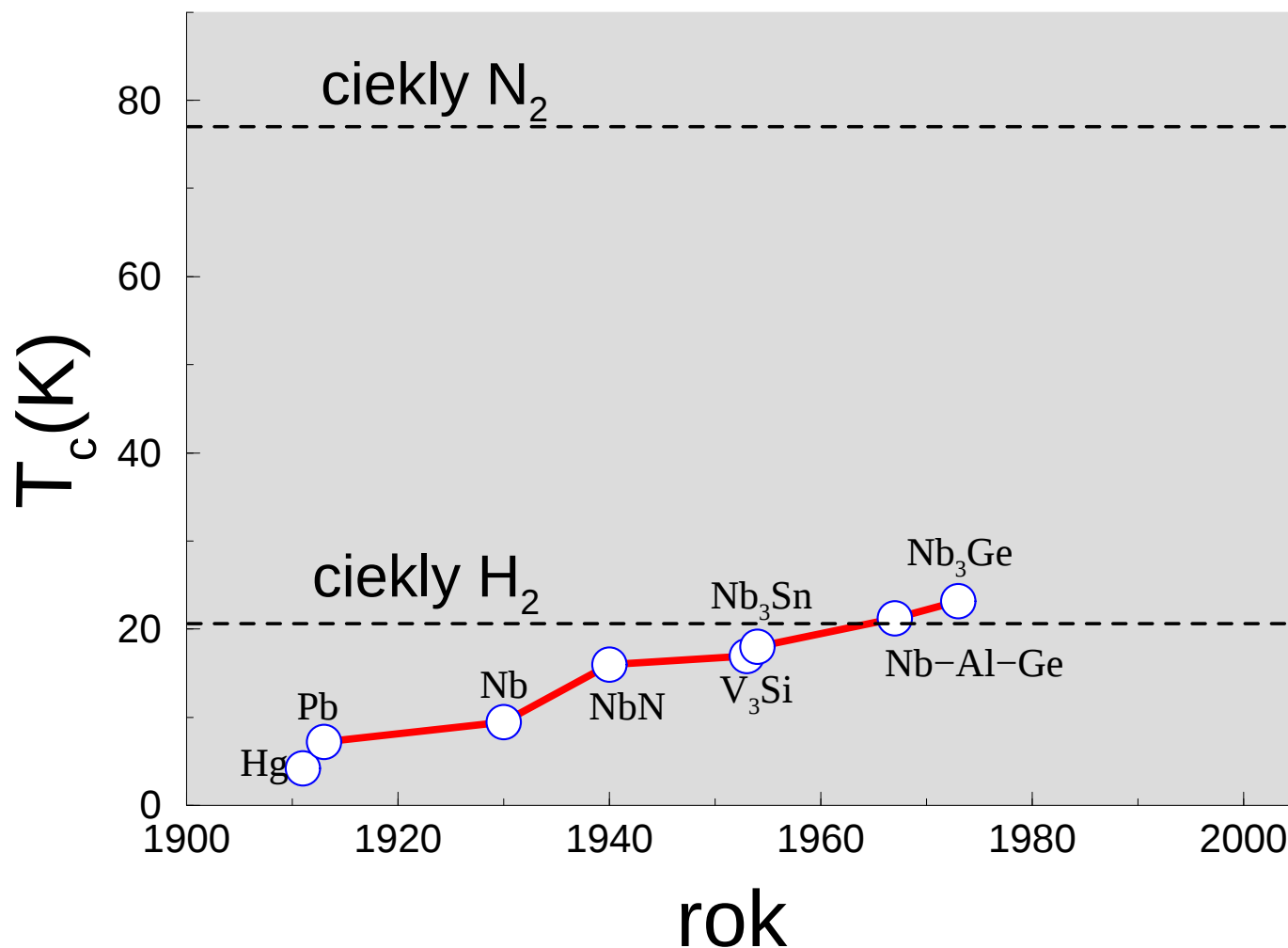
– historia odkryć

Nadprzewodnictwo (fononowe) odkryto w szeregu różnych pierwiastków oraz stopów.
Oto wybrane przykłady:

Nadprzewodniki konwencjonalne

– historia odkryć

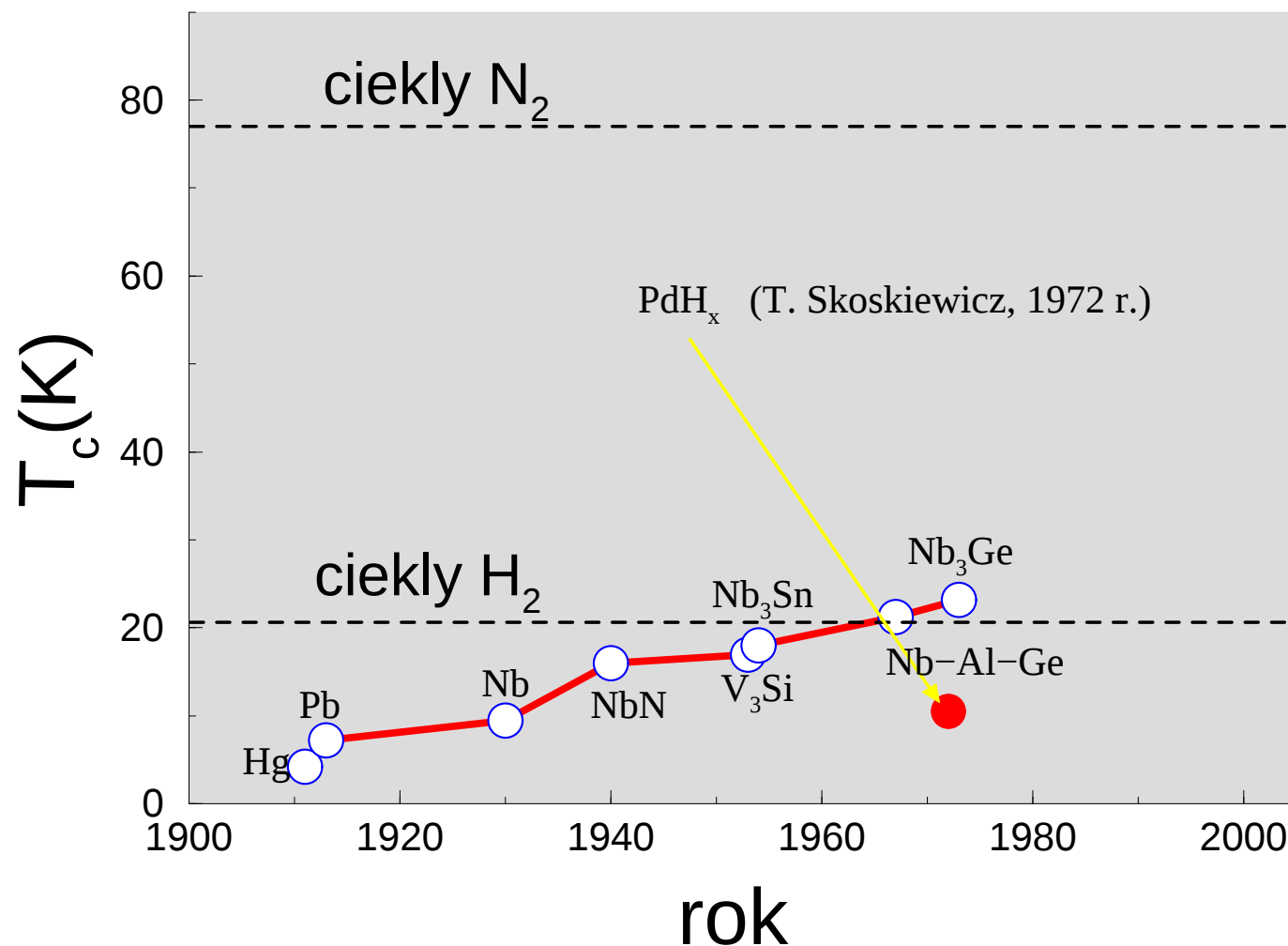
Nadprzewodnictwo (fononowe) odkryto w szeregu różnych pierwiastków oraz stopów. Oto wybrane przykłady:



Nadprzewodniki konwencjonalne

– historia odkryć

Nadprzewodnictwo (fononowe) odkryto w szeregu różnych pierwiastków oraz stopów. Oto wybrane przykłady:

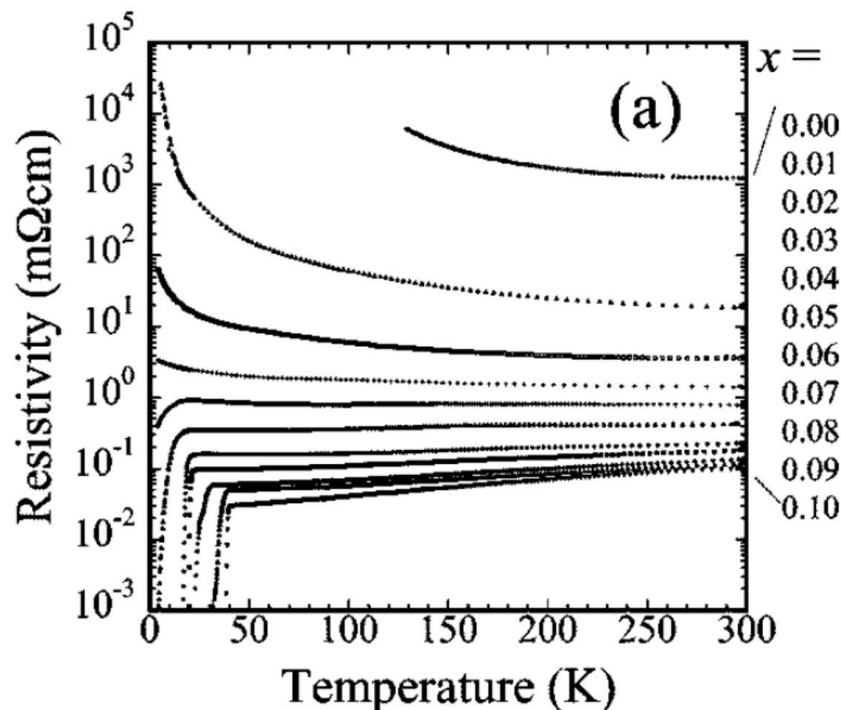
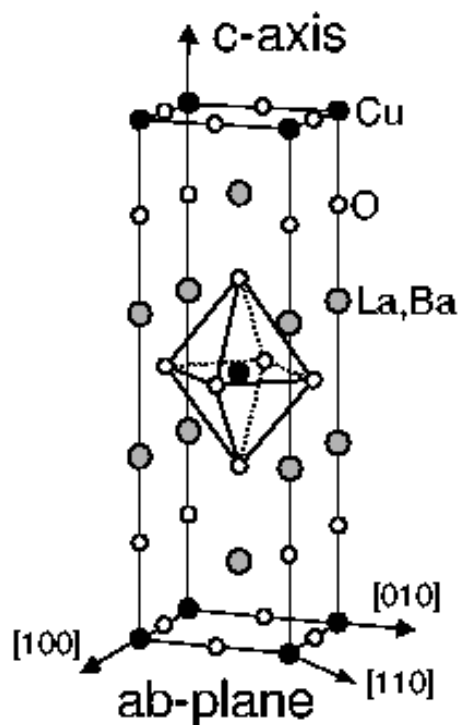


Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

– nowa epoka odkryć



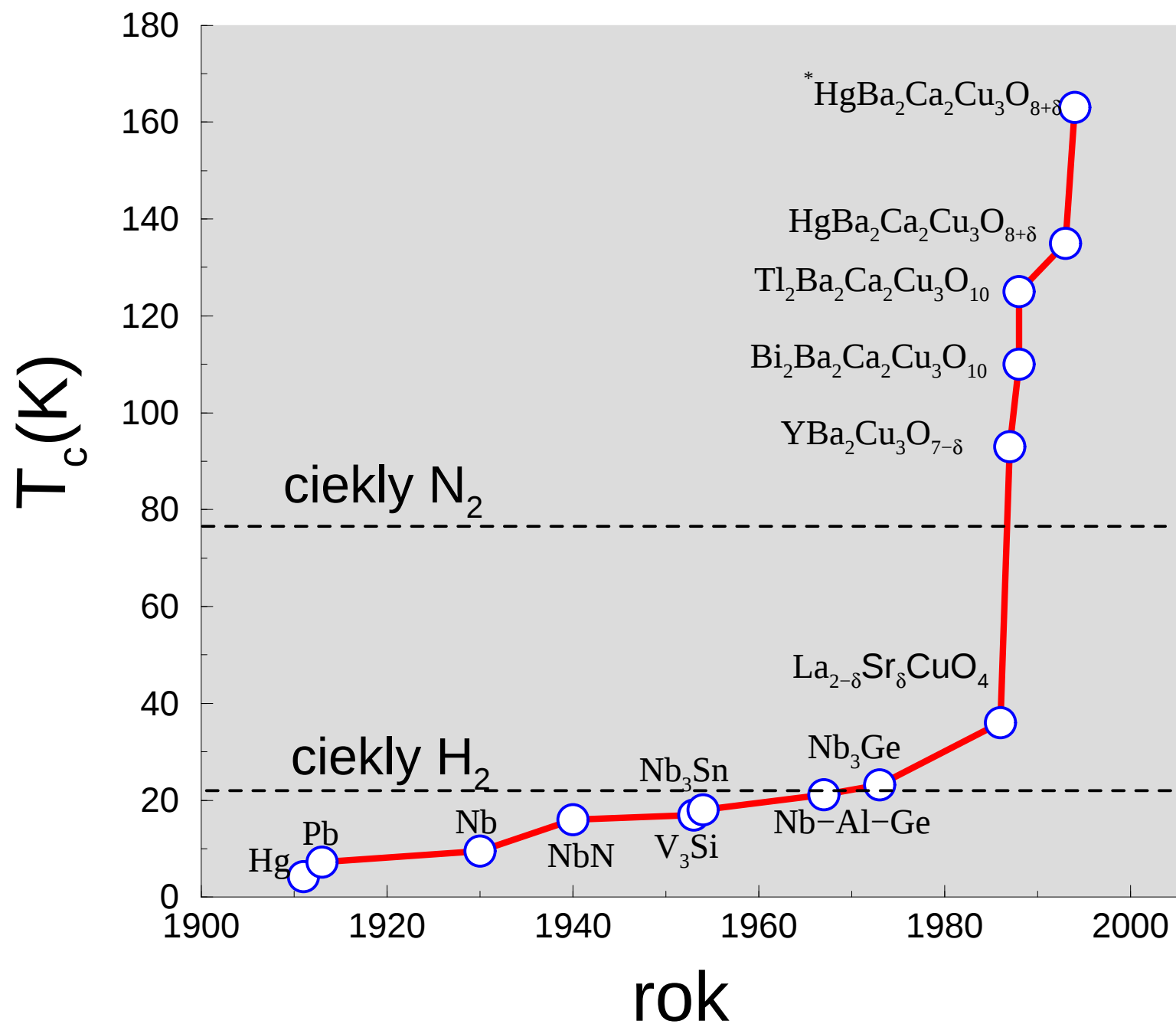
Alex Müller, Georg Bednorz

/ 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) staje się nadprzewodnikiem w zakresie domieszkowania $0,05 < x < 0,25$.

Maksymalna temperatura krytyczna tego materiału wynosi $T_c=36$ K.

Odkrycie to zapoczątkowało burzliwy okres historii rozwoju nadprzewodnictwa.



Nadprzewodniki

– historia odkryć (c.d.)

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

W kolejnych latach odkryto również wiele egzotycznych nadprzewodników, takich jak:

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

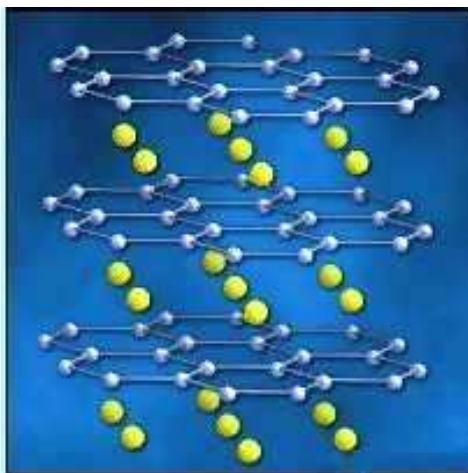
W kolejnych latach odkryto również wiele egzotycznych nadprzewodników, takich jak:

„przeoczony” nadprzewodnik

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

W kolejnych latach odkryto również wiele egzotycznych nadprzewodników, takich jak:

„przeoczony” nadprzewodnik

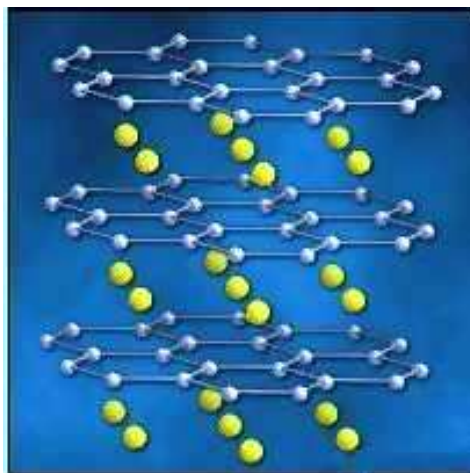


$$T_c = 39 \text{ K}$$

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

W kolejnych latach odkryto również wiele egzotycznych nadprzewodników, takich jak:

„przeoczony” nadprzewodnik

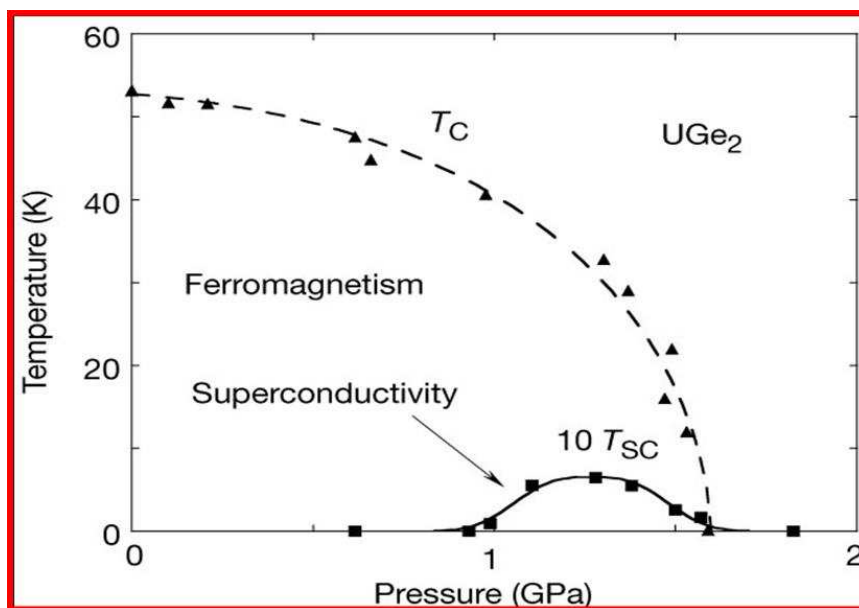


$$T_c = 39 \text{ K}$$

/ J. Nagamatsu et al, *Nature* **410**, 63 (2001). /

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

Pod ciśnieniem 1 GPa ferromagnetyk UGe_2 staje się nadprzewodzący !

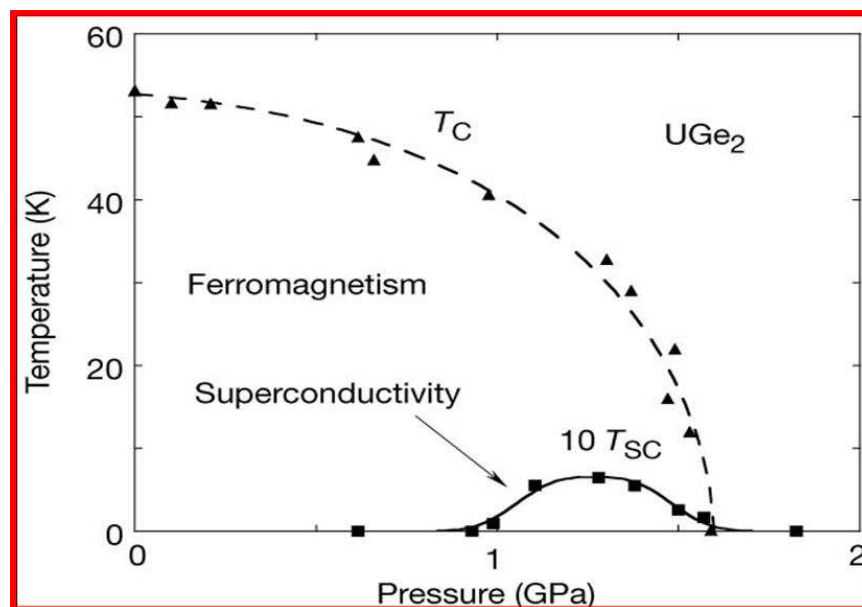


UGe_2

/ S.S. Saxena et al, *Nature* **406**, 587 (2000) /

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

Pod ciśnieniem 1 GPa ferromagnetyk UGe_2 staje się nadprzewodzący !



UGe_2

/ S.S. Saxena et al, *Nature* **406**, 587 (2000) /

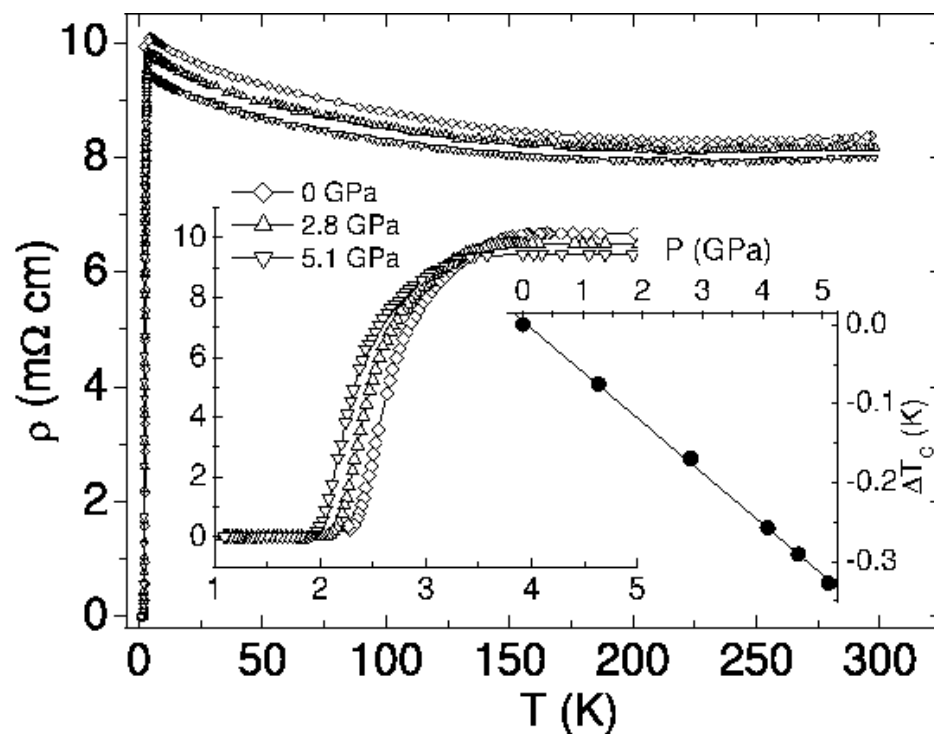
Zwykle magnetyzm rywalizuje ze stanem nadprzewodzącym.

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

Diamant domieszkowany borem (synteza pod ciśnieniem 100 tys. atmosfer) staje się nadprzewodnikiem w $T_c = 4 \text{ K}$.

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)

Diamant domieszkowany borem (synteza pod ciśnieniem 100 tys. atmosfer) staje się nadprzewodnikiem w $T_c = 4$ K.



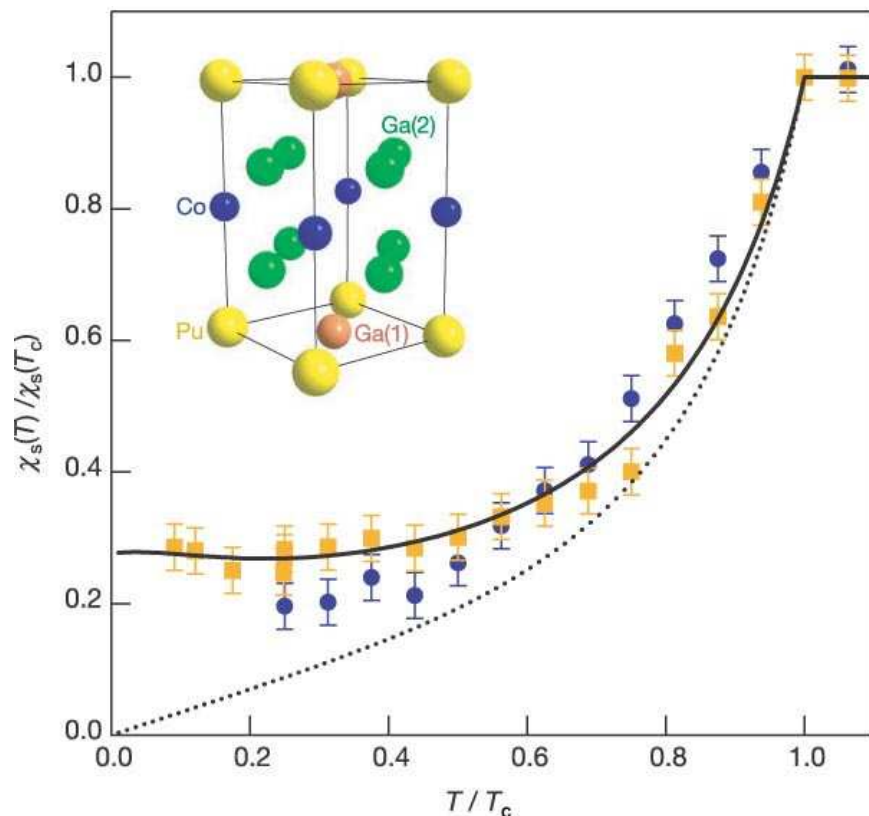
Najtwardszy nadprzewodnik

/ E.A. Ekimov et al, Nature 428, 542 (2004) /

Nadprzewodniki

– historia odkryć (c.d.)

Nadprzewodniki – historia odkryć (c.d.)



*J.L. Sarrao et al, Nature **420**, 297 (2002).*

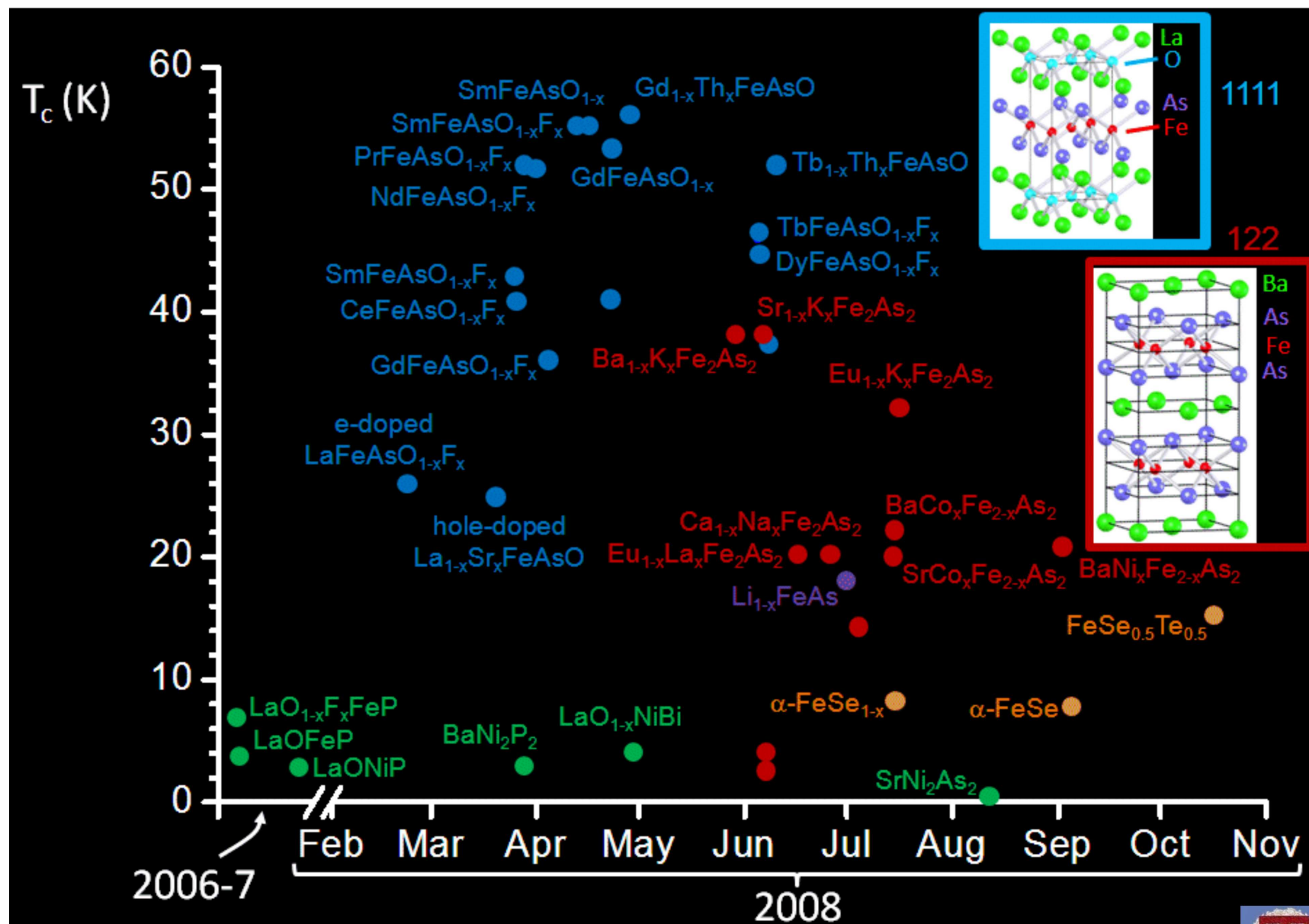
Nawet materiał promieniotwórczy PuCoGa₅, który jest wykorzystywany w broni nuklearnej, staje się nadprzewodnikiem w temperaturze $T_c = 2,3$ K.

Nadprzewodniki

– historia odkryć

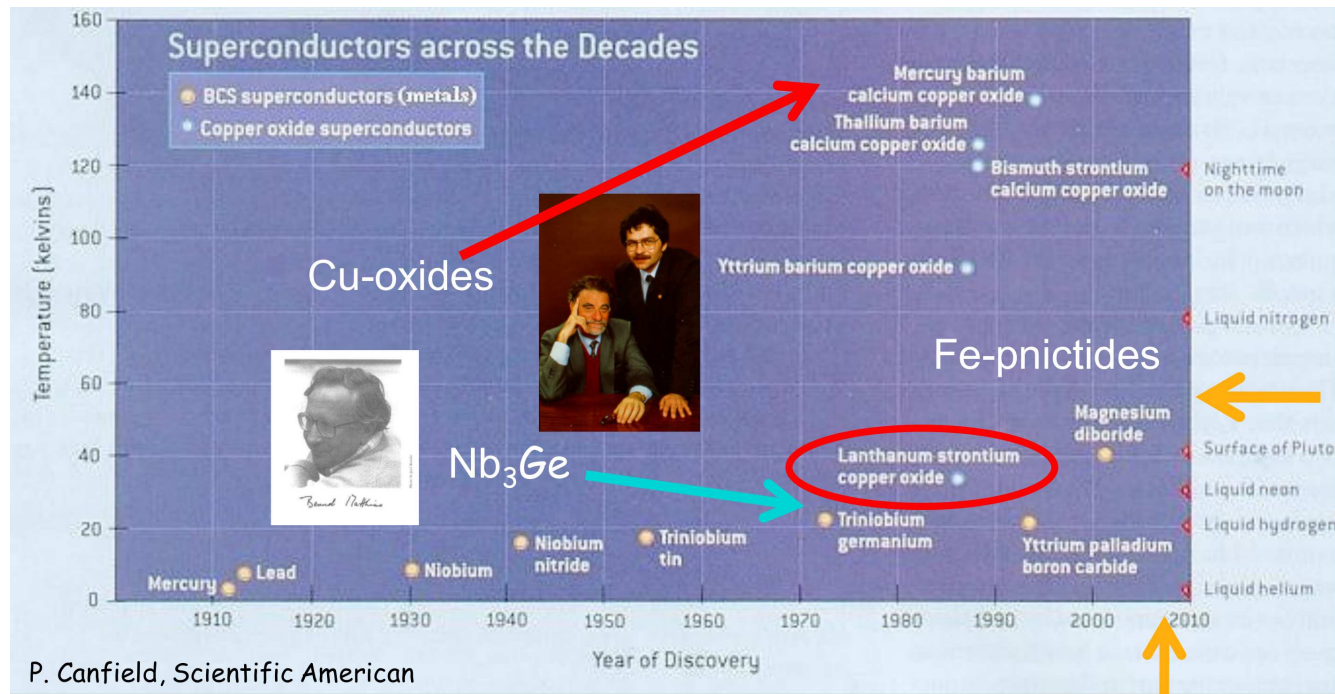
Nadprzewodniki

– historia odkryć



Nadprzewodniki

od „epoki kamienia” do „epoki żelaza”



time



5. Zastosowania nadprzewodników

1. Linie przesyłowe

– prądu stałego/zmiennego

1. Linie przesyłowe

– prądu stałego/zmiennego



Long Island Power Authority (AmSC, Stany Zjednoczone)

1. Linie przesyłowe

– prądu stałego/zmiennego



Long Island Power Authority (AmSC, Stany Zjednoczone)

Od kwietnia 2008 r. trójfazowa linia wysokiego napięcia zaopatruje w prąd energetyczny około 300 000 odbiorców indywidualnych.

1. Linie przesyłowe

– prądu stałego/zmiennego



Long Island Power Authority (AmSC, Stany Zjednoczone)

Kable wykonano z nadprzewodnika Y-Ba-Cu-O, które są w miedzianej osłonie zanurzone w ciekłym azocie (izolując od otoczenia).

1. Linie przesyłowe

– prądu stałego/zmiennego



Long Island Power Authority (AmSC, Stany Zjednoczone)

Moc pokazanej linii przesyłowej jest porównywalna z mocą konwencjonalnej trakcji energetycznej sfotografowanej obok.

2. Bezpieczniki/ograniczniki

– prądu stałego/zmiennego



Produkt firmy Nexan SuperConductors (Niemcy)

2. Bezpieczniki/ograniczniki

– prądu stałego/zmiennego



Produkt firmy Nexan SuperConductors (Niemcy)

Nadprzewodnikowe bezpieczniki umożliwiają wyłączenie prądu podczas zwarcia i po 1/60 sekundy automatyczne odblokowanie sieci.

2. Bezpieczniki/ograniczniki

– prądu stałego/zmiennego



Produkt firmy Nexan SuperConductors (Niemcy)

Taki rodzaj ograniczników działa już w miejscowości Vattenfall, gdzie zabezpiecza od przepięć elektrownię opartą na węglu brunatnym .

3. Silniki – do napędu samochodów

3. Silniki – do napędu samochodów

W 2008 r. przedstawiono prototyp samochodu (wersja Toyoty Crown) który zasilany jest silnikiem elektrycznym o mocy 365 kW.



Sumitomo Electric (Japonia)

3. Silniki – do napędu samochodów

W 2008 r. przedstawiono prototyp samochodu (wersja Toyoty Crown) który zasilany jest silnikiem elektrycznym o mocy 365 kW.



Sumitomo Electric (Japonia)

Zwoje silnika wykonano z nadprzewodnika wysokotemperaturowego które są na stałe zanurzone w ciekłym azocie (temp. poniżej - 200 °C).

3. Silniki – do napędu statków

3. Silniki – do napędu statków

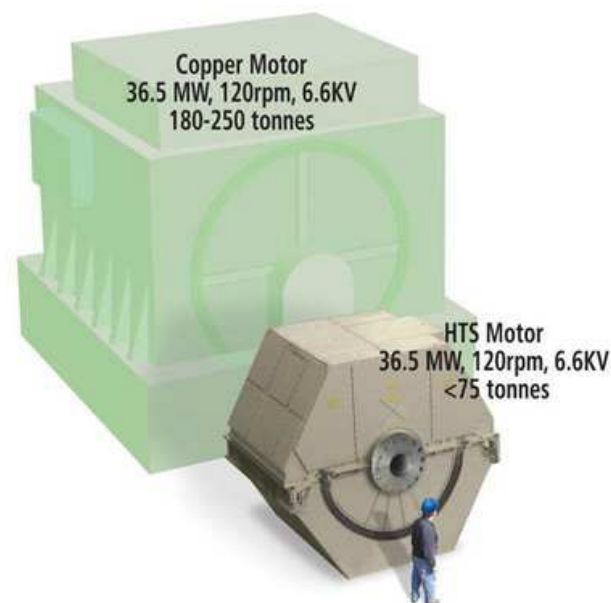
Napęd statków pasażerskich oraz wojskowych będzie zastąpiony silnikami elektrycznymi wykonanymi z nadprzewodników wysokotemperaturowych.



American Superconductor Corporation (USA)

3. Silniki – do napędu statków

Napęd statków pasażerskich oraz wojskowych będzie zastąpiony silnikami elektrycznymi wykonanymi z nadprzewodników wysokotemperaturowych.



American Superconductor Corporation (USA)

Takie silniki są 3-krotnie mniejsze od konwencjonalnych oraz lżejsze i cichsze.

Na obrazku jest pokazany szkic silnika o mocy 36 megawatów (49 tys KM).

4. Magnesy – pola stałego

W akceleratorze LHC w CERN wykorzystano magnesy nadprzewodnikowe

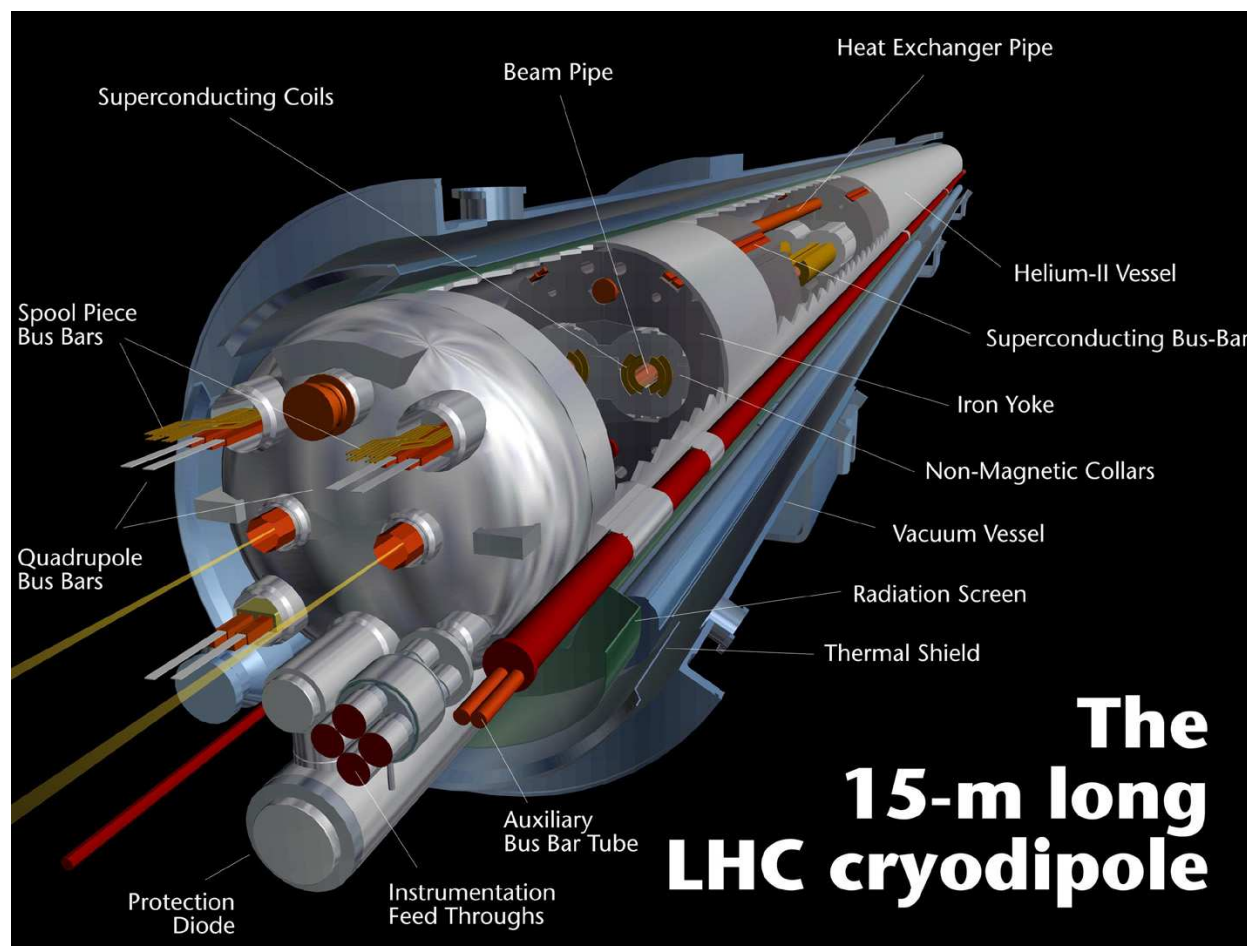
4. Magnesy – pola stałego

W akceleratorze LHC w CERN wykorzystano magnesy nadprzewodnikowe



4. Magnesy – pola stałego

W akceleratorze LHC w CERN wykorzystano magnesy nadprzewodnikowe



Elementy nadprzewodzące zostały wykonane ze stopu NbTi.

5. Medycyna – obrazowanie rezonansem magnetycznym (MRI)

Zasadę działania rezonansu magnetycznego opracowano już dawno temu. Dopiero jednak od 1977 roku udało się uzyskać metody obróbki danych (skanowania) dzięki zastosowaniu komputerów.



Na świecie jest użytkowanych ponad 20 tys. tego rodzaju urządzeń

Najważniejszą częścią urządzenia jest magnes, który uzyskuje się wskutek przepływu prądu przez zwoje nadprzewodzące. Dzięki temu można łatwo sterować natężeniem pola i uzyskiwać odpowiedni przestrzenny rozkład.

5. Medycyna – magnetoencefalografia (MEG)

Zasadę działania rezonansu magnetycznego opracowano już dawno temu. Dopiero jednak od 1977 roku udało się uzyskać metody obróbki danych (skanowania) dzięki zastosowaniu komputerów.



Najnowsze urządzenia technologii biomagnetycznej konstruowane są w oparciu o zastosowanie SQUID-ów (interferencji prądów Josephsona). Urządzenia te są tak dokładne, że wyczuwają pola magnetyczne **miliard razy słabsze** od pola potrzebnego do poruszenia igły w kompasie. Ta nieinwazyjna metoda nie wymaga bezpośredniego kontaktu z pacjentem.

5. Medycyna – **magnetokardiografia (MCG)**

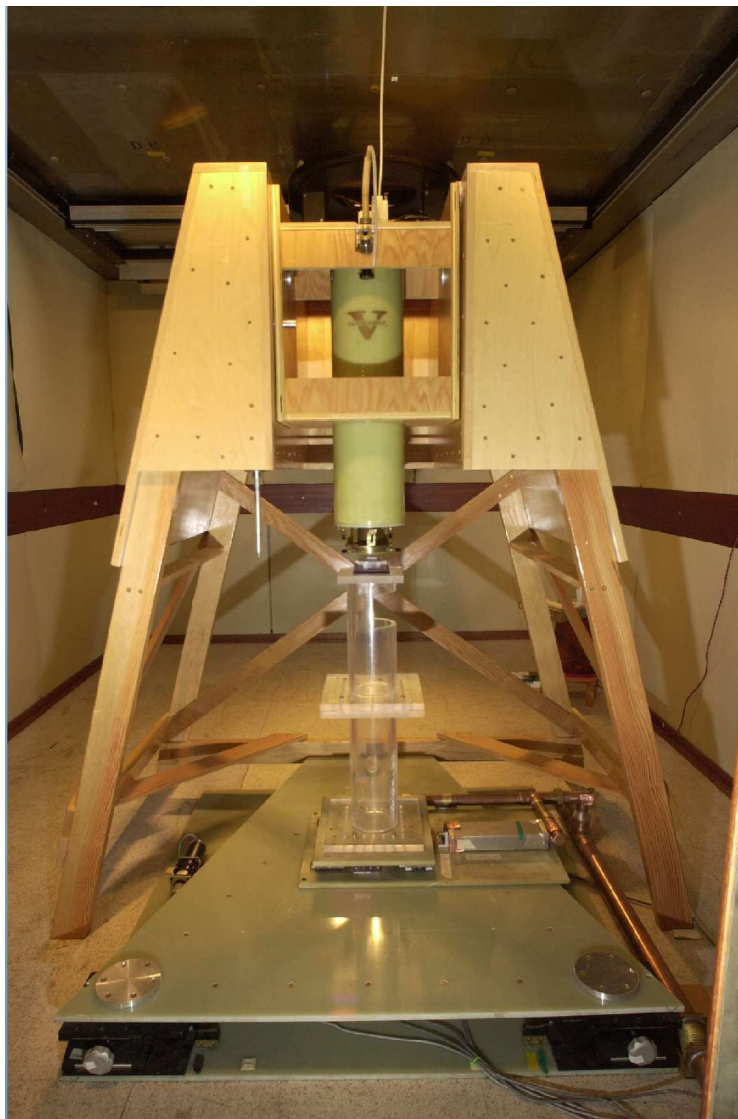
Zasadę działania rezonansu magnetycznego opracowano już dawno temu. Dopiero jednak od 1977 roku udało się uzyskać metody obróbki danych (skanowania) dzięki zastosowaniu komputerów.



Bardzo czułe interferometry SQUID służą również do śledzenia prądów elektrycznych, sterujących pracą mięśni serca. Ta nieinwazyjna metoda ma dużą przewagę nad tradycyjnymi sposobami EKG.

6. Gradiometria

– pomiary pól grawitacyjnych



Interferometry SQUID są też pośrednio wykorzystywane w gradiometrach grawitacyjnych. Bardzo precyzyjne żyroskopy z wbudowanymi interferometrami SQUID stosowano w próbach pomiarów efektów związanych z zakrzywieniem przestrzenno-czasowym w pobliżu Ziemi.

W badaniach kosmologicznych dotyczących tzw. *ciemnej materii* oraz *ciemnej energii* (95 % Wszechświata) również używane są ultraprecyzyjne detektory podłączone do cewek z wbudowanymi SQUID-ami.

7. Lewitujące pociągi

MAGLEV = **Mag**netically **Lev**itated Vehicle

7. Lewitujące pociągi

MAGLEV = **Mag**netically **Lev**itated Vehicle



Pierwszą testową linię lewitujących pociągów firmy Yamanashi otwarto w 1996 roku. Efekt lewitacji został uzyskany Dzięki wytworzeniu pola magnetycznego w zwojach nadprzewodnikowych.

7. Lewitujące pociągi

MAGLEV = **Mag**netically **Lev**itated Vehicle



W 2003 roku pociąg Maglev złożony z 3 wagonów osiągnął rekordową prędkość:

581 km/h

7. Lewitujące pociągi

MAGLEV = **Mag**netically **Lev**itated Vehicle



Szanghaj, Chiny

Regularna linia MAGLEV (30 km) obsługuje obecnie pasażerów podróżujących z Szanghaju do lotniska Pudong – jest to wspólna inwestycja niemiecko-chińska.

7. Lewitujące pociągi

MAGLEV = Magnetically Levitated Vehicle



Cennik przejazdów: 6 \$ – bilet normalny

12 \$ – pierwsza klasa

8. Antygravitacja

zastosowania w terapii

8. Antygravitacja

zastosowania w terapii

