

Nadpłynność i nadprzewodnictwo

Krzysztof Byczuk

Instytut Fizyki Teoretycznej,
Wydział Fizyki,
Uniwersytet Warszawski

13 marzec 2019



www.fuw.edu.pl/~byczuk

Tarcie, opór, dysypacja ...



pomaga...



przeszkadza...



Opory ruchu pochłaniają energię

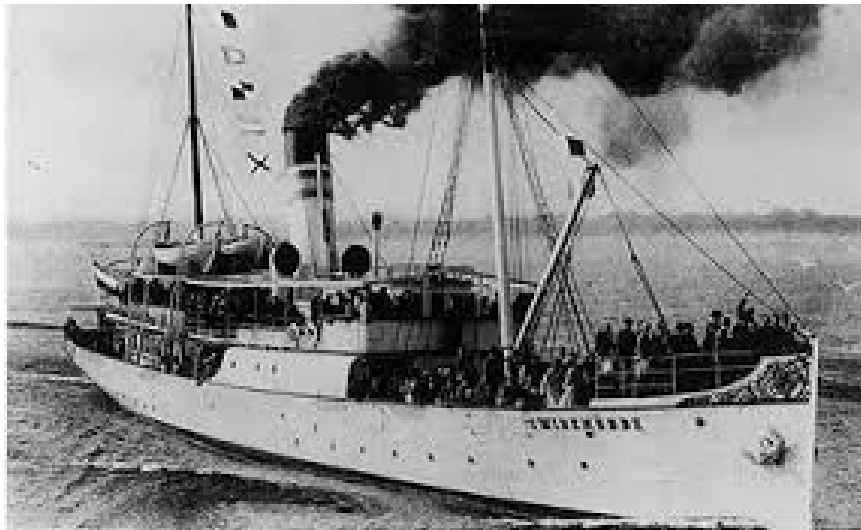
opór elektryczny

$$R \ [\Omega = V/A]$$



lepkość

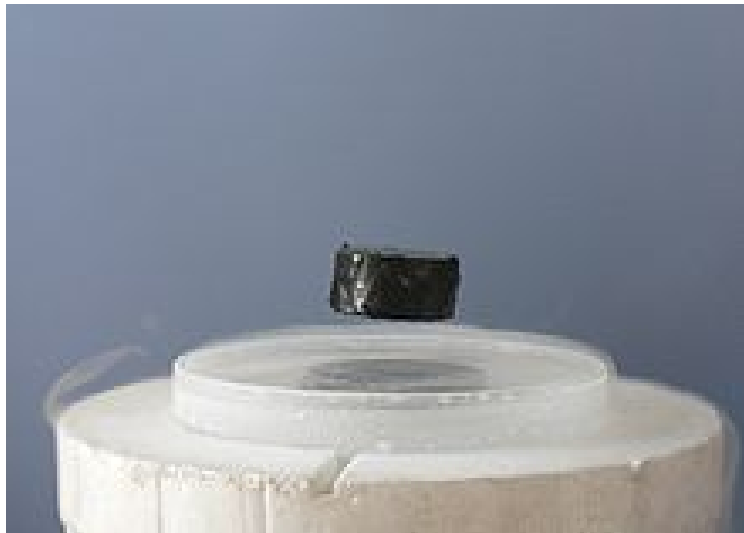
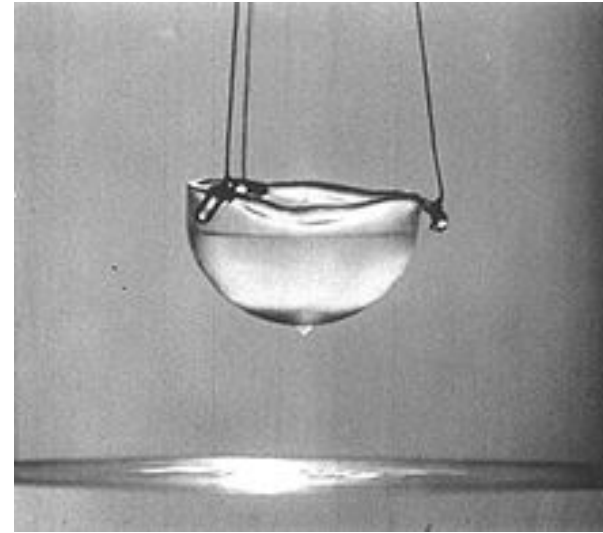
$$\eta \ [Pa \cdot s]$$



Dwa nadprzypadki w przyrodzie

nadpłynność

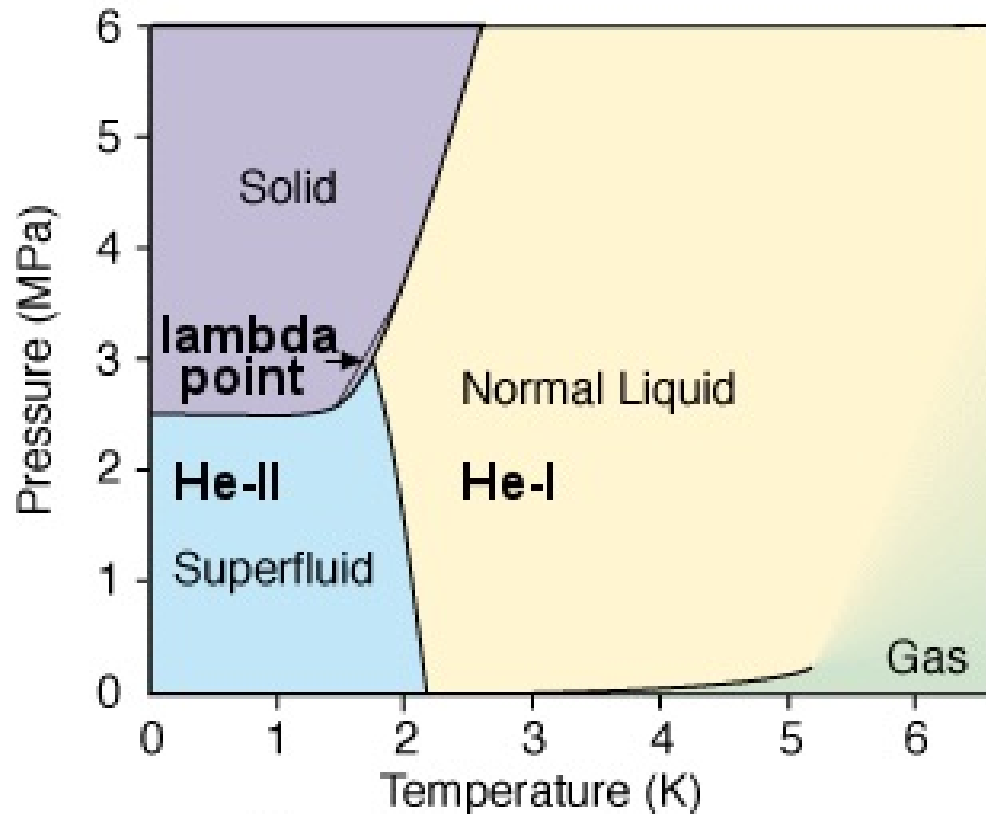
$$\eta = 0 [Pa \cdot s]$$



nadprzewodnictwo

$$R = 0 [\Omega]$$

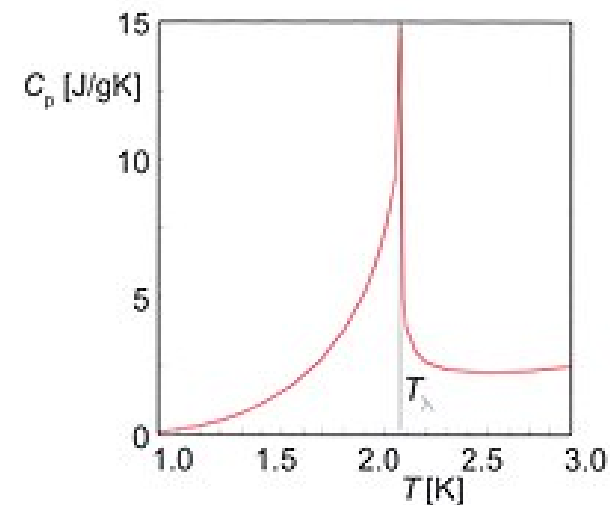
Nadpłynność ciekłego helu



He-4 Phase Diagram

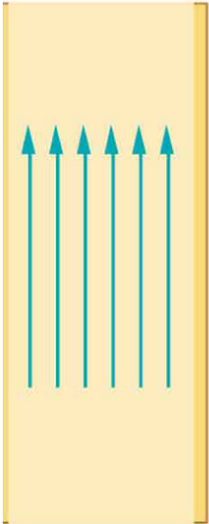
nowa faza termodynamiczna

drugi pierwiastek, ${}^2_4\text{He}$
płynny poniżej $T_c = 4,2 \text{ K}$
płynny w $T = 0 \text{ K}$ (!)
inaczej płynny
poniżej $T_\lambda = 2,1 \text{ K}$



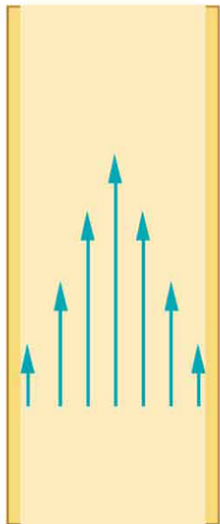
Nadpłynność - grupa zjawisk poniżej T_λ

Nonviscous
 $\eta = 0$

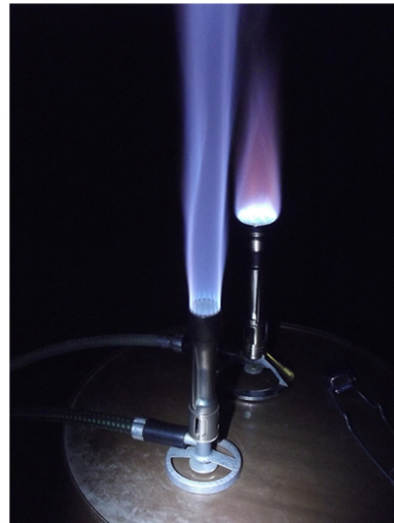


(a)

Viscous

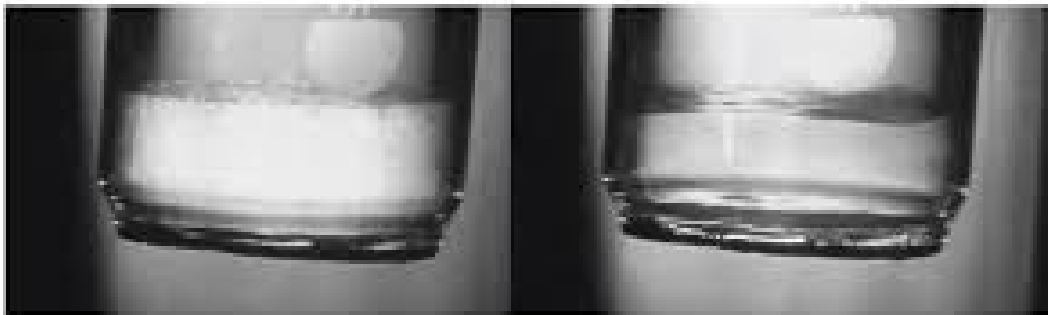


(b)



(c)

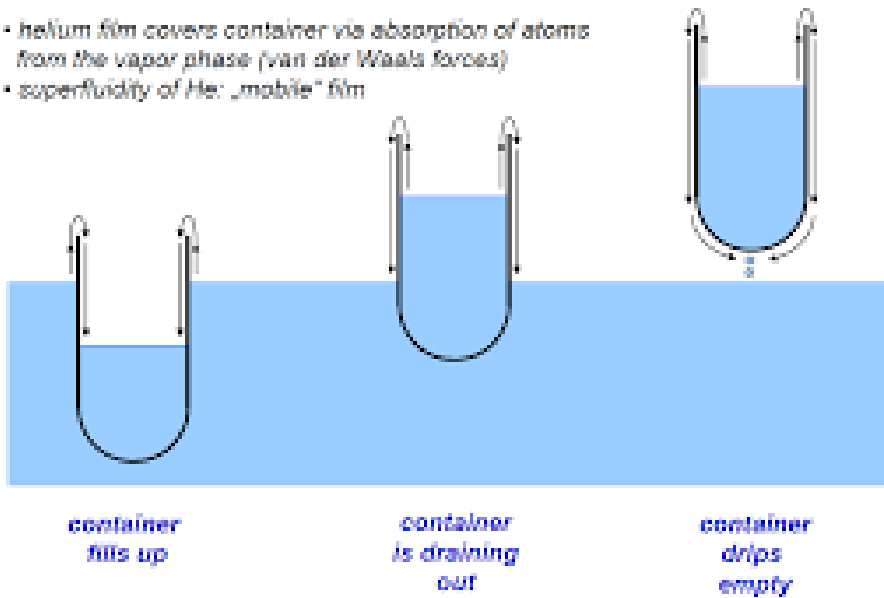
przepływ bezlepki, $\eta = 0$



przepływ przez kapilary

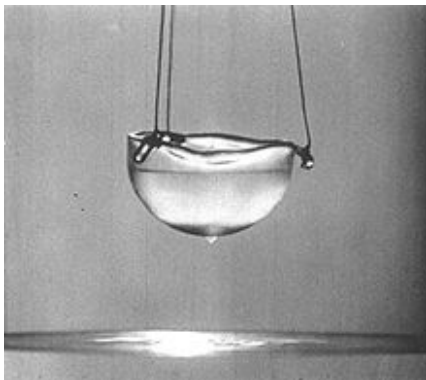
Nadpłynność - grupa zjawisk poniżej T_λ - cd.

- helium film covers container via absorption of atoms from the vapor phase (van der Waals forces)
- superfluidity of He: „mobile” film



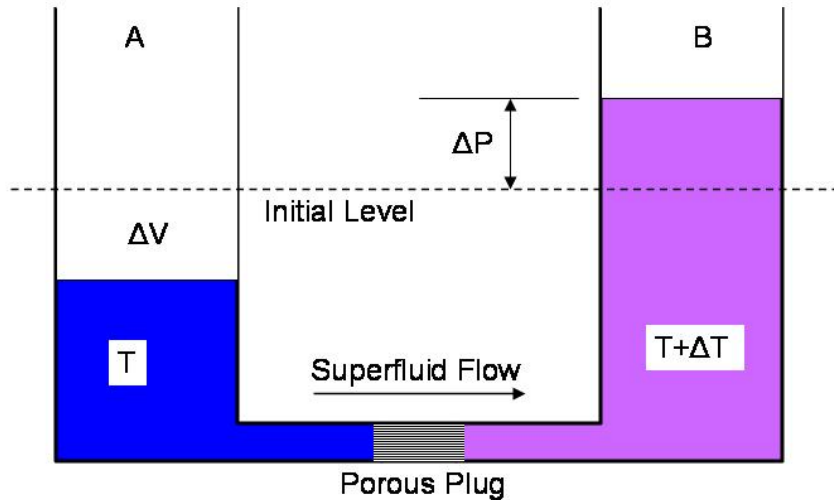
overshoot during fill up and draining out \Rightarrow oscillation of filling height

przepływ bezlepkki, $\eta = 0$

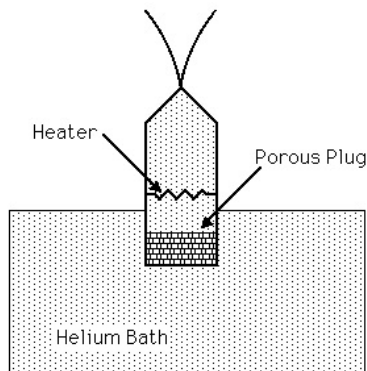


pełzanie

Nadpłynność - grupa zjawisk poniżej T_λ - cd.

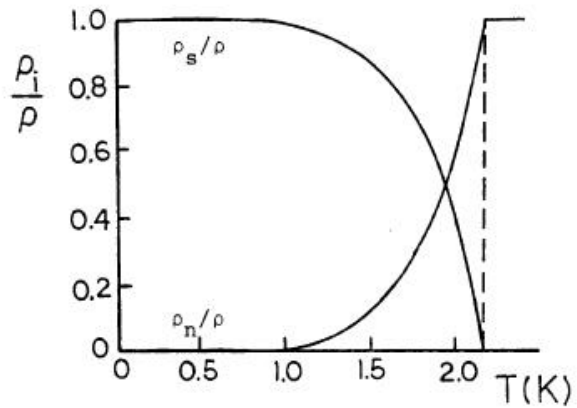
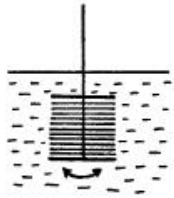


efekt termomechaniczny



efekt fontannowy

Nadpłynność - grupa zjawisk poniżej T_λ - cd.



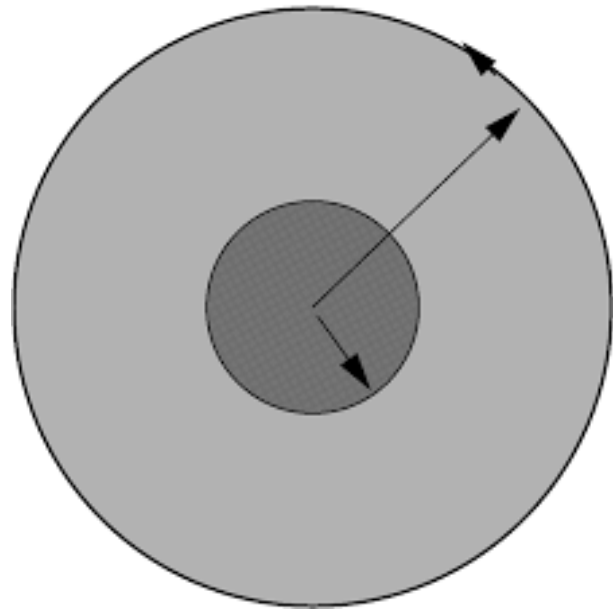
efekt Andronikashviliego



idealny przewodnik ciepła



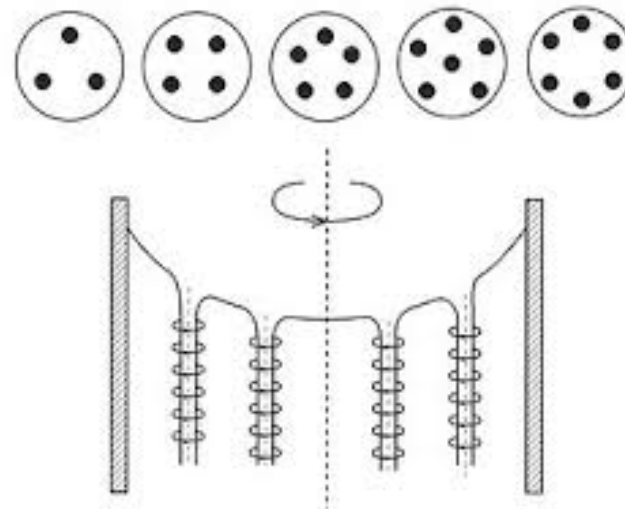
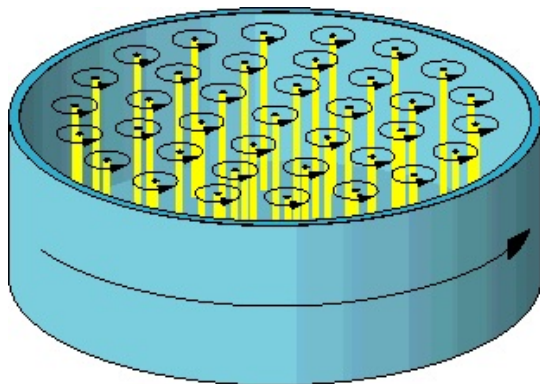
Nadpłynność - grupa zjawisk poniżej T_λ - cd.



kwantowanie krążenia

$$\kappa = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l} = \frac{h}{m}n, \quad \frac{h}{m} \approx 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$



Nadpłynność - model dwucieczowy

współlistnienie cieczy normalnej i nadpłynnej

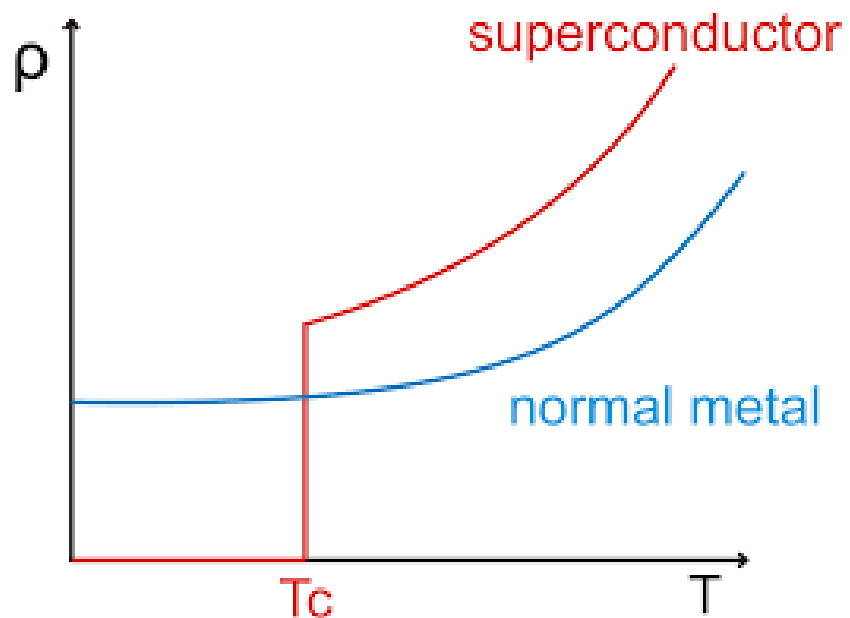
$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_s$$

$$\vec{j}_n = n_n \vec{v}_n \quad \vec{j}_s = n_s \vec{v}_s$$

ciecz nadpłynna ma zerową: lepkość, entropię i rotację prędkości (wirowość) $\vec{\nabla} \times \vec{v}_s = 0$

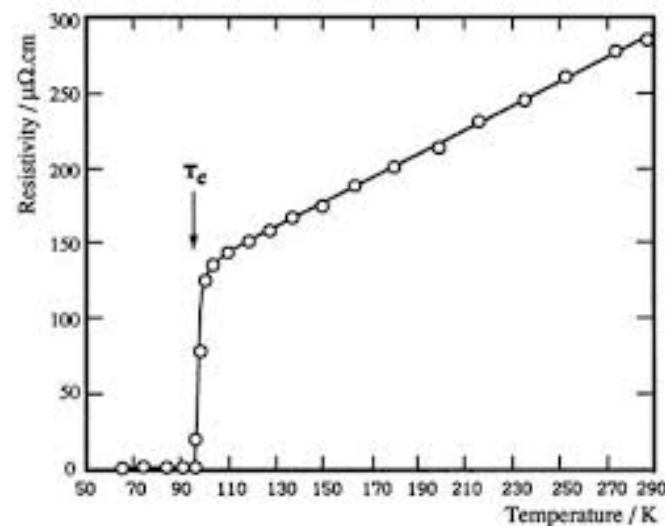
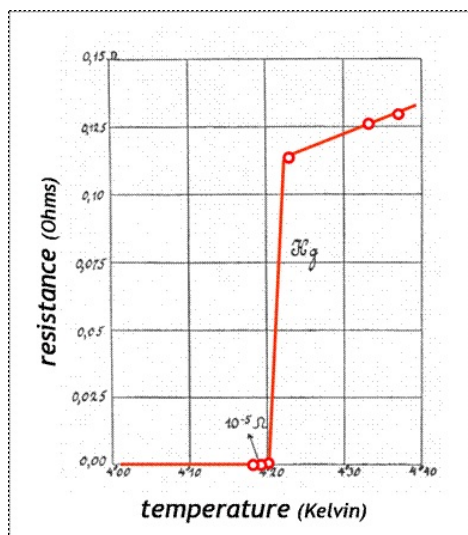
nadpłynność = idealna ciecz + kwantyzacja krążenia

Nadprzewodnictwo przewodników

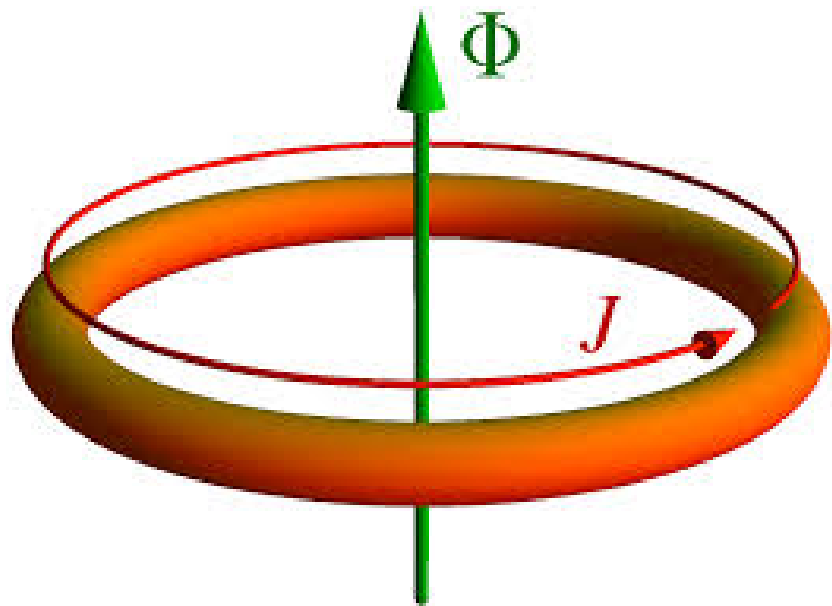


idealny przewodnik, $R = 0$ [Ω]

nowa faza termodynamiczna



$R = 0$ - konsekwencje



strumień pola magnetycznego

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = BS$$

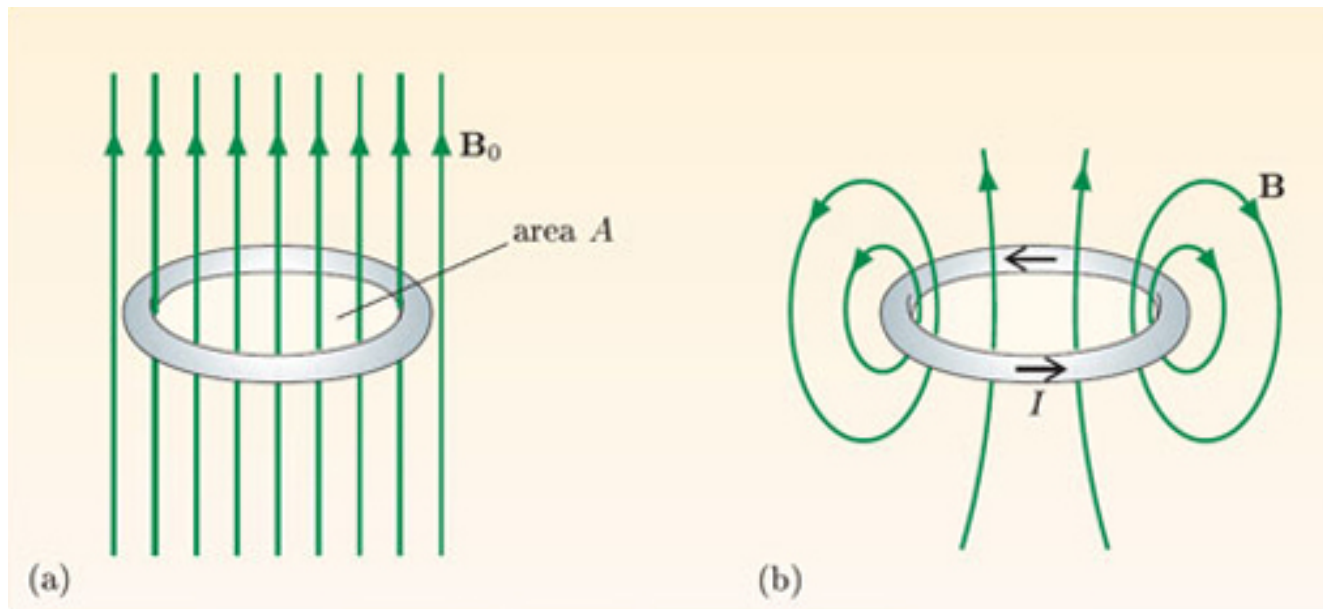
prawo Kirchhoffa na SEM

$$-S \frac{dB}{dt} = RI + L \frac{dI}{dt}$$

jeśli $R = 0$ to $-S \frac{dB}{dt} = L \frac{dI}{dt}$ czyli $\frac{d}{dt}(BS + LI) = 0$

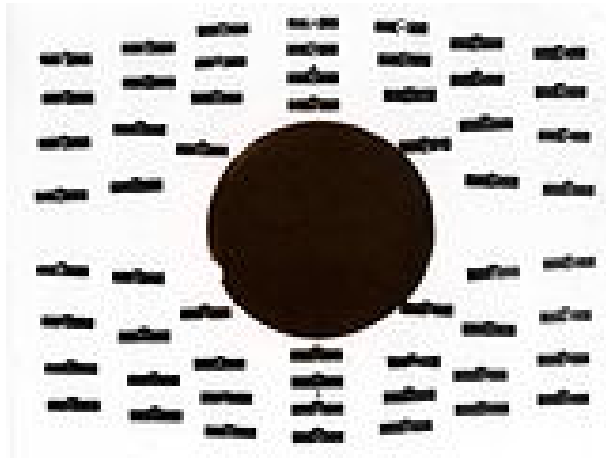
$SB + LI = \text{const}$ - całkowity strumień stały w czasie

$R = 0$ - konsekwencje



$SB + LI = \text{const}$ - całkowity strumień stały w czasie

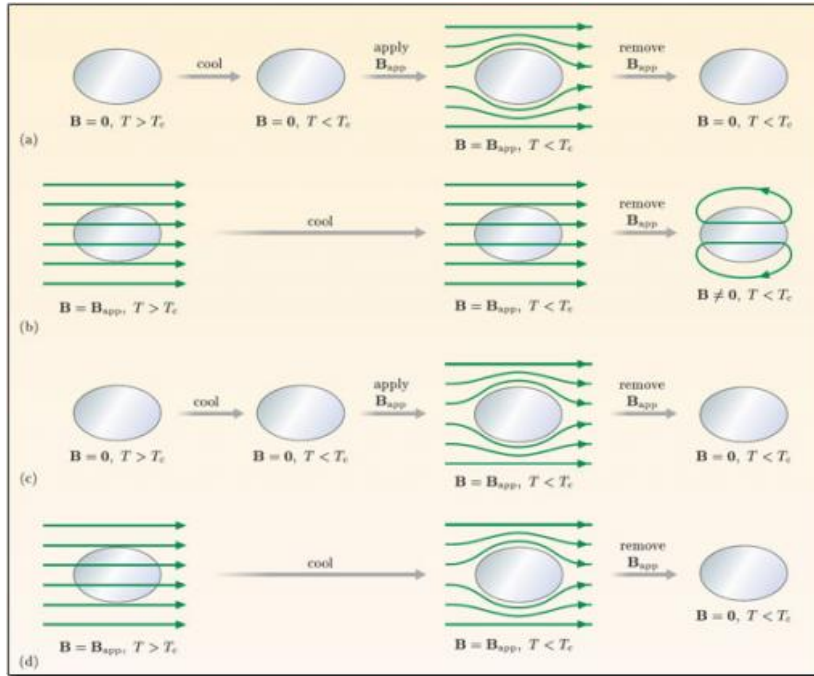
Efekt Meissnera-Ochsenfelda



$\Phi = 0$ **w nadprzewodniku!**

elektrodynamika do poprawki ...

Idealny przewodnik $R = 0$ vs nadprzewodnik



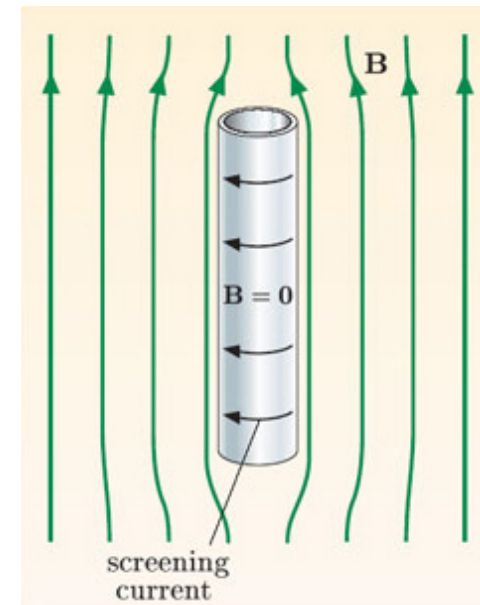
$\Phi = \text{const}$ w idealnym metalu

$\Phi = 0$ w nadprzewodniku!

indukcja magnetyczna znika

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} = 0$$

superprądy indukują magnetyzację



Kwantyzacja strumienia magnetycznego

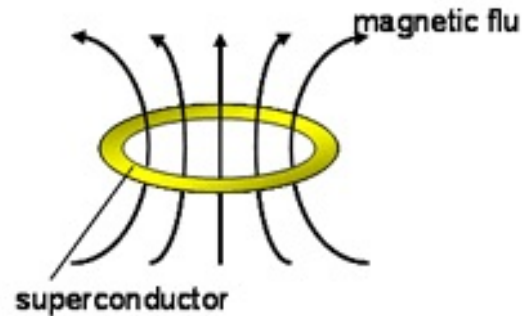


Fig.7 Superconducting ring which hang in the air

$$\Phi = \frac{h}{2e}n, \quad \frac{h}{2e} = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ [Wb]}$$

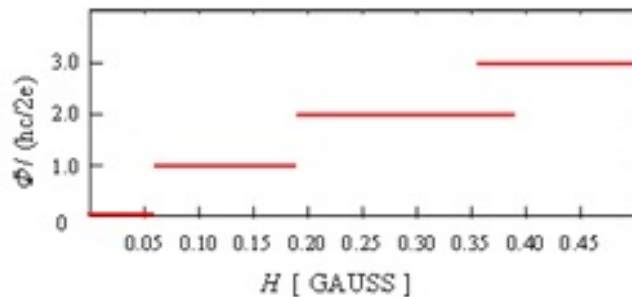


Fig.8 Quantum flux measurement

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$

nadprzewodnik = idealny przewodnik + kwantyzacja strumienia

Dwa rodzaje nadprzewodników

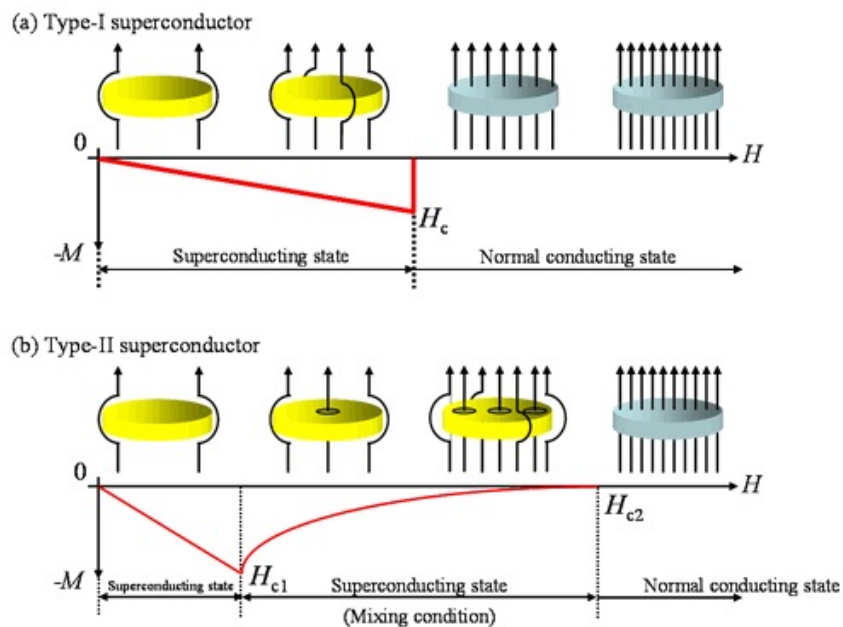
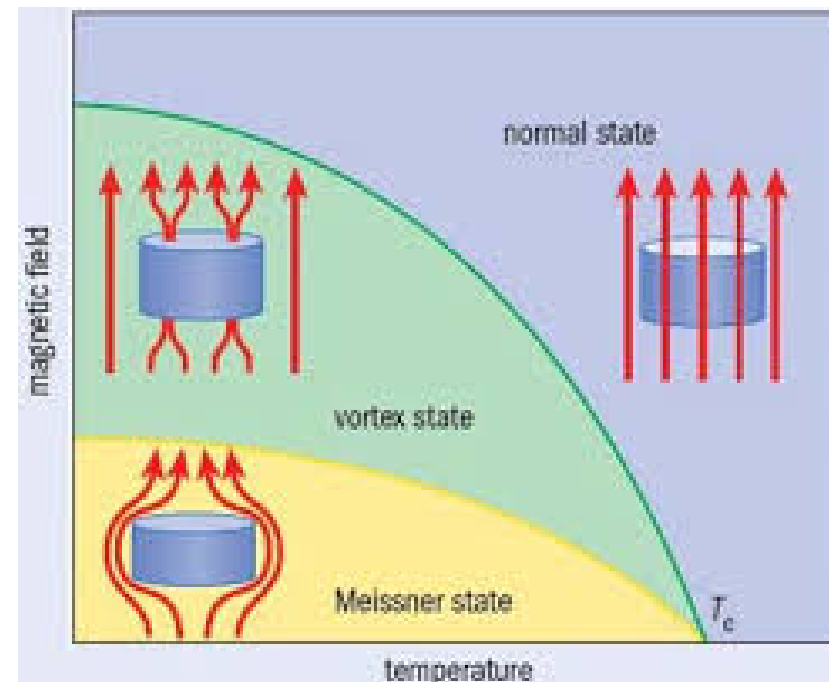
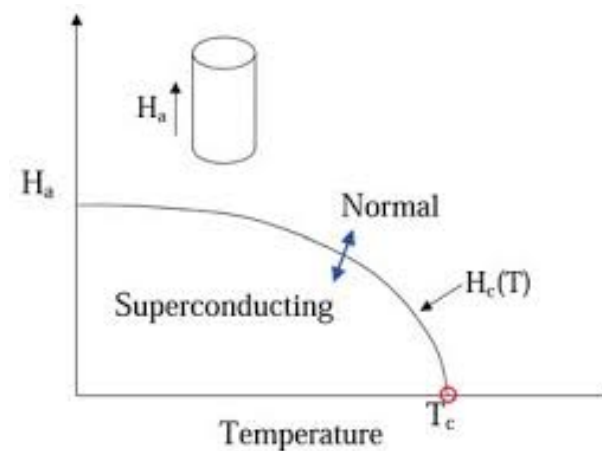


Fig. 6 Difference of magnetic field dependence of magnetization between (a) Type-I and (b) Type-II superconductor



pokazy lewitacji

Nadpłynność vs nadprzewodnictwo

- $\eta = 0$ i $R = 0$ - brak mechanizmu dysypacji
- $\kappa = n \frac{h}{m}$ i $\Phi = n \frac{h}{2e}$ - kwantowa spójność

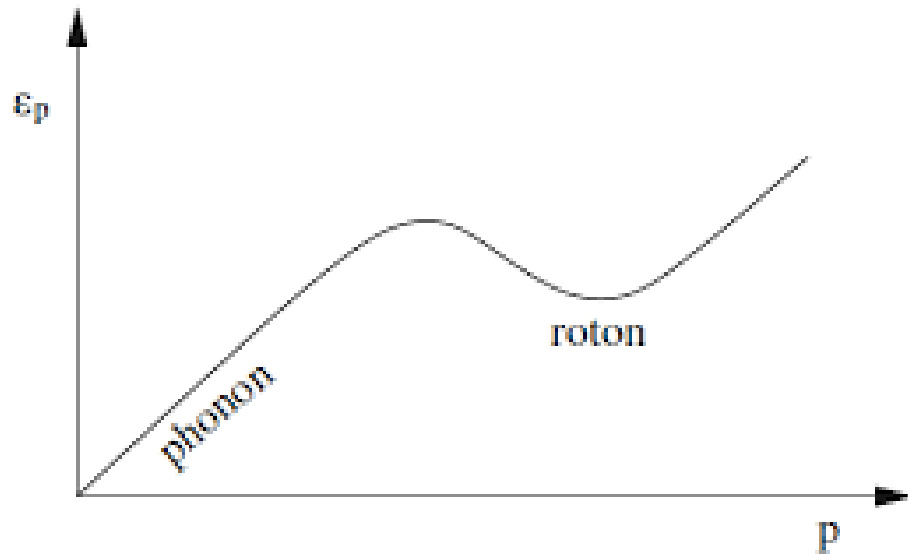
- bliźniacze zjawiska w płynach neutralnych i naładowanych elektrycznie

- dlaczego?

Blokada mechanizmu dysypacji

$$\epsilon(\vec{p}) = \frac{\vec{p}^2}{2m}$$

relacja dyspersji $E(\vec{p})$ cząstek oddziałujących



Excitations in Liquid Helium: Neutron Scattering Measurements*

J. L. YARNELL, G. P. ARNOLD, P. J. BENDT, AND E. C. KERR

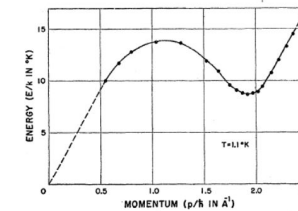
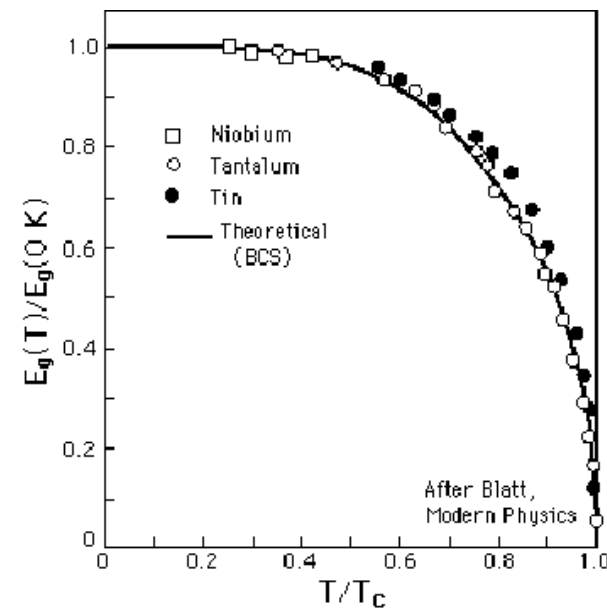
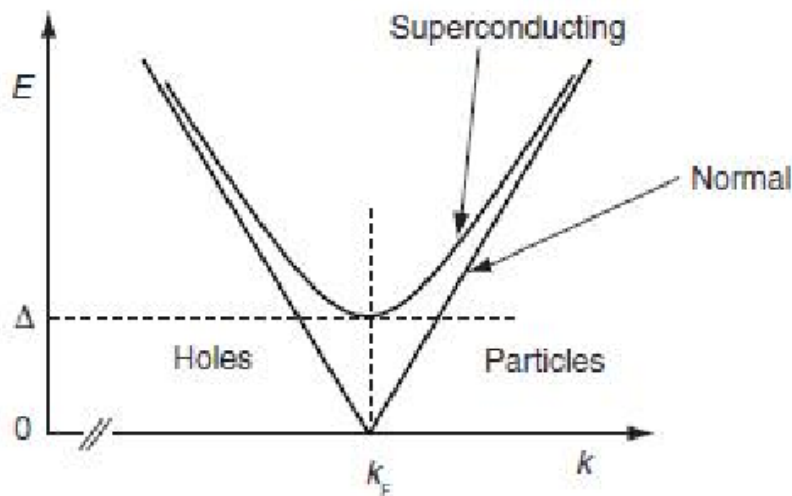


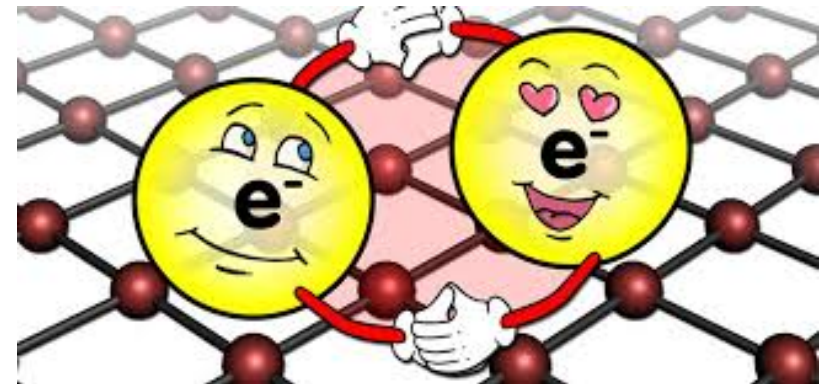
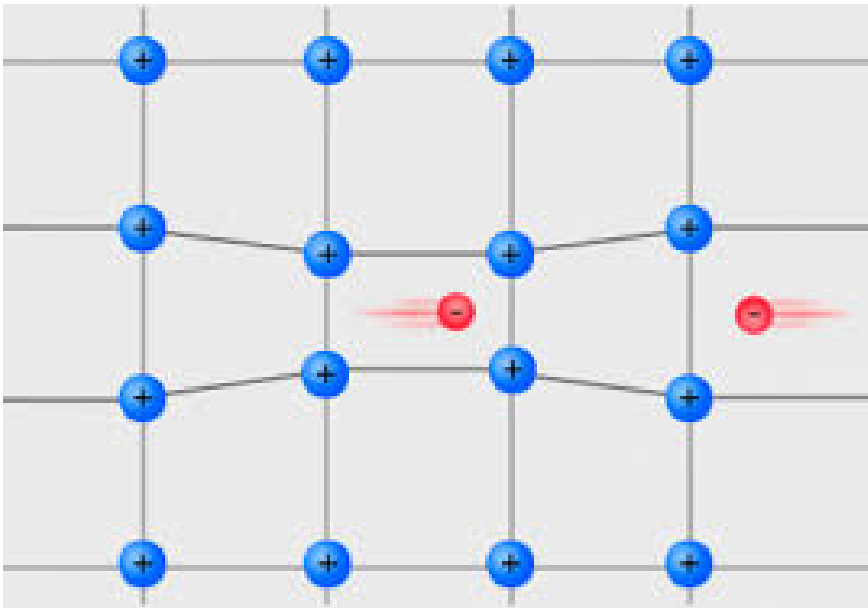
FIG. 8. The energy spectrum of the excitations in liquid helium at 1.1°K. The dashed line joining the origin and the first measured point has a slope corresponding to a first sound velocity of 239 ± 5 meters/sec. The maximum occurs at $p/h = 1.11 \pm 0.04 \text{ \AA}^{-1}$, $E/h = 13.92 \pm 0.10 \text{ °K}$. The region of the minimum is shown in greater detail in Fig. 9.



Pary Coopera w nadprzewodniku

$$\epsilon(\vec{p}) = \frac{\vec{p}^2}{2m}$$

relacja dyspersji $E(\vec{p})$ cząstek oddziałujących



$$E(\vec{p}) = \sqrt{(\epsilon(\vec{p}) - \epsilon_F)^2 + \Delta^2}$$

energia wiązania pary $E_b = -2\epsilon_0 e^{-1/g}$

Kwantowa spójność - funkcja falowa

- układ wielu cząstek $N \sim 10^{23}$ ma funkcję falową

$$\Psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N)$$

- prawdopodobieństwo

$$P(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N) = |\Psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N)|^2 \Delta r_1 \dots \Delta r_N$$

- identyczne cząstki są nierozróżnialne

Kondensacja do jednej funkcji falowej

- N_0 (gdzie $N_0/N \sim 1$) kondensuje do tego samego stanu

$$\Psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_{N_0}) = \Phi(\vec{r}_1) \cdot \dots \cdot \Phi(\vec{r}_{N_0})$$

- wszystkie $\Phi(\vec{r}_i)$ są identyczne (nierozróżnialność)
- jedna funkcja falowa dla całego kondensatu

$$\Psi_0(\vec{r}) = \sqrt{N_0} e^{i\theta(\vec{r})} |\Phi(\vec{r})|$$

- każda cząstka w kondensacie ma identyczną fazę $\theta(\vec{r})$

$$z = x + iy = |z|(\cos \theta + i \sin \theta) = e^{i\theta} |z|, \tan \theta = y/x, i = \sqrt{-1}$$

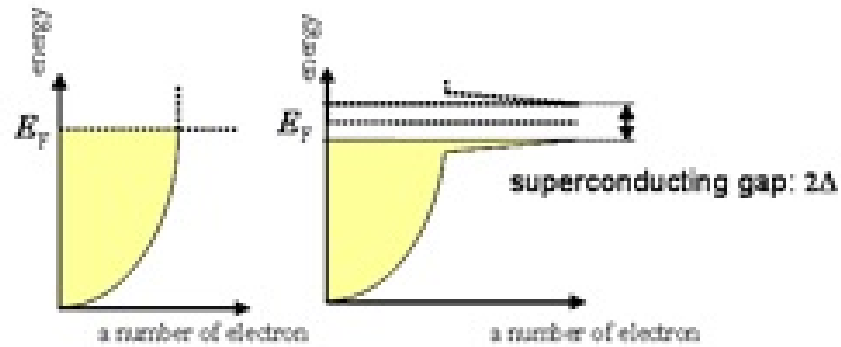
Kwantowa spójność - jedna funkcja falowa

- jedna funkcja falowa dla całego kondensatu

$$\Psi_0(\vec{r}) = \sqrt{N_0} e^{i\theta(\vec{r})} |\Phi(\vec{r})|$$

- każda cząstka w kondensacie ma identyczną fazę $\theta(\vec{r})$
- **makroskopowa spójność kwantowa**
- światło lasera, kondensaty Bosego-Einsteina, nadpłynny ${}^4_2\text{He}$, nadpłynny ${}^3_2\text{He}$, nadprzewodniki, skondensowane magnony, ekscytyny,

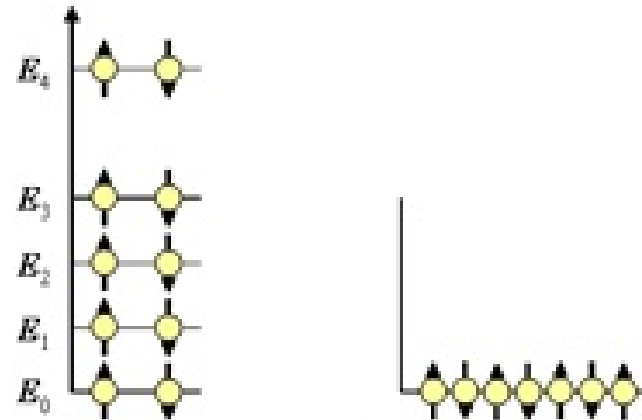
Pary Coopera - kondensat BCS



(a) The metal

(b) The superconductor

Fig.9 Density of state (a)the metal, (b)the superconductor

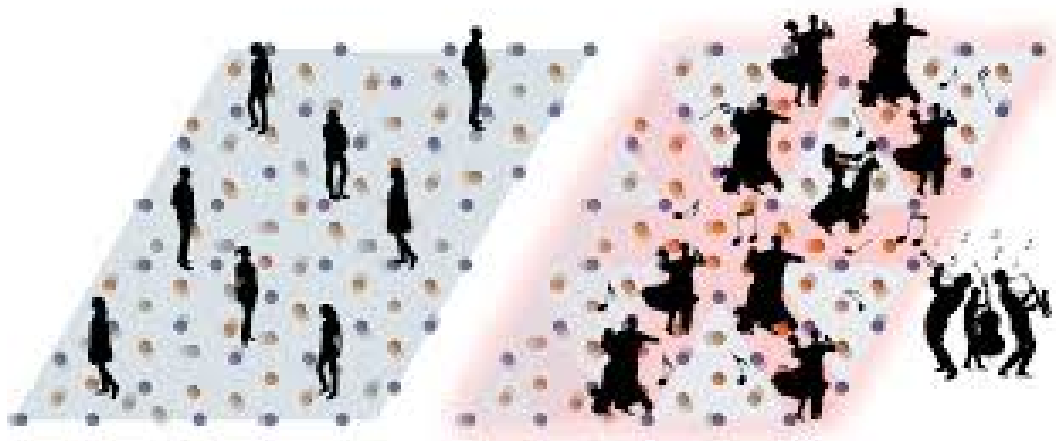


(a) Distribution of Fermi particle

(b) Distribution of Bose particle

Fig.10 Fermi particle and Bose particle

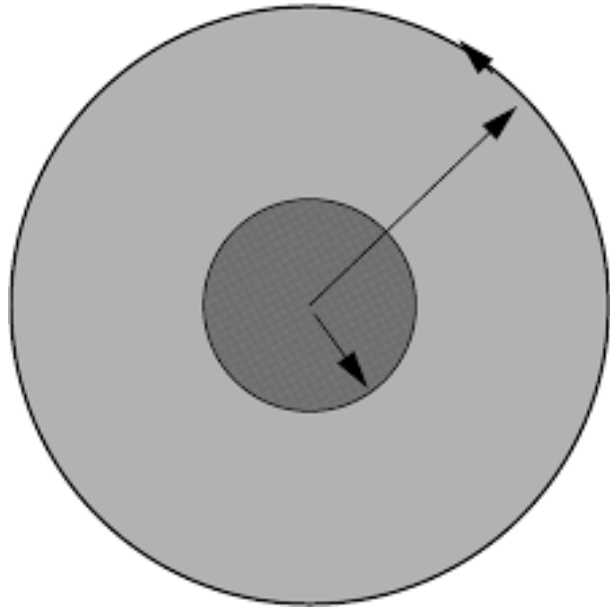
taniec Coopera



tai chi BCS



Kwantyzacja krążenia i strumienia



kwantowanie krążenia

$$\kappa = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l} = \frac{\hbar}{m} n, \quad \frac{\hbar}{m} \approx 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\Psi_0(\vec{r}) = \sqrt{N_0} e^{i\theta(\vec{r})} |\Phi(\vec{r})| \rightarrow \vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} \theta(\vec{r})$$

$$\kappa = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l} = \frac{\hbar}{m} \Delta\theta, \text{ gdzie } \Delta\theta = 2\pi n \text{ i } \hbar = h/2\pi$$

$$z = x + iy = |z|(\cos \theta + i \sin \theta) = e^{i\theta} |z|, \tan \theta = y/x, i = \sqrt{-1}$$

Podsumowanie: nadpłynność i nadprzewodnictwo

- $\eta = 0$ i $R = 0$ - brak mechanizmu dysypacji
- $\kappa = n \frac{h}{m}$ i $\Phi = n \frac{h}{2e}$ - kwantowa spójność

- bliźniacze zjawiska w płynach neutralnych i naładowanych

- **mechanika kwantowa w skali makroskopowej**

Autor oświadcza, że nie wykonał żadnego rysunku, wszystkie pochodzą z WWW