

Nadpłynne kryształy - idea i ostatnie eksperymentalne poszukiwania

Krzysztof Byczuk

Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski

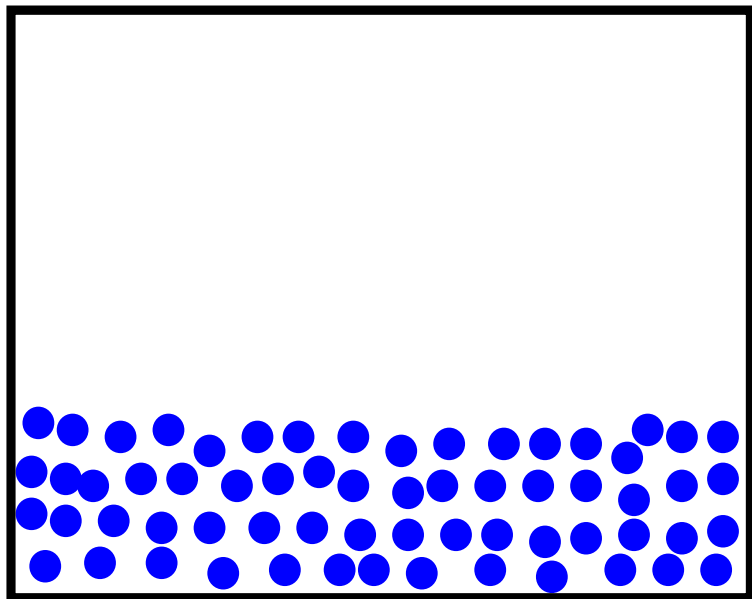
<http://www.physik.uni-augsburg.de/theo3/kbyczuk/index.html>

30 styczeń 2006

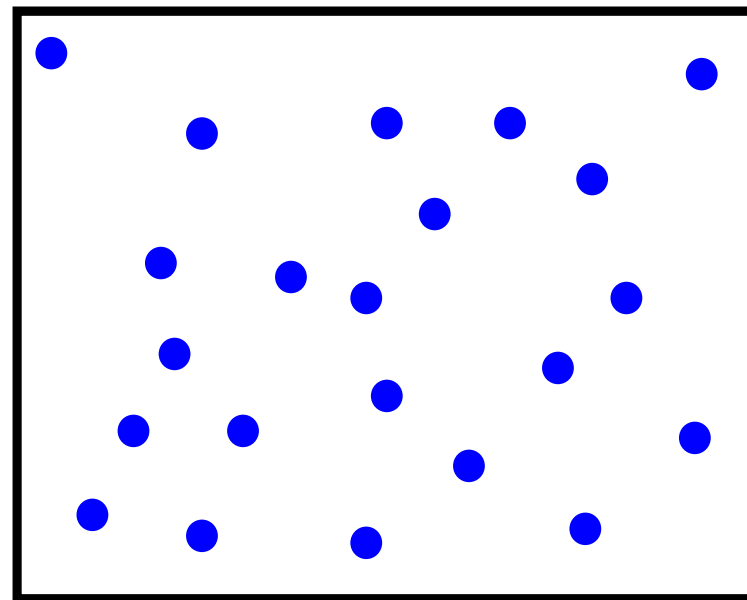


Klasyczne stany skupienia materii

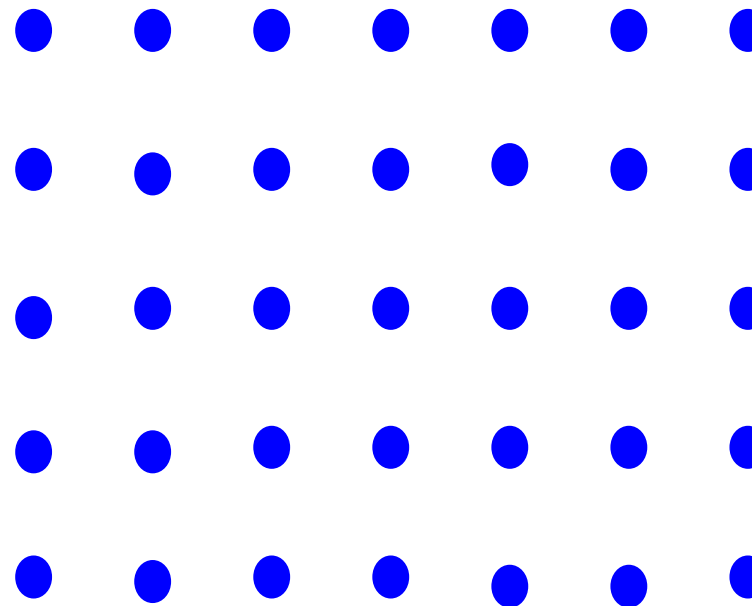
atomy i cząsteczki są w zasadzie rozróżnialne



stan ciekły - uporządkowanie bliskiego zasięgu



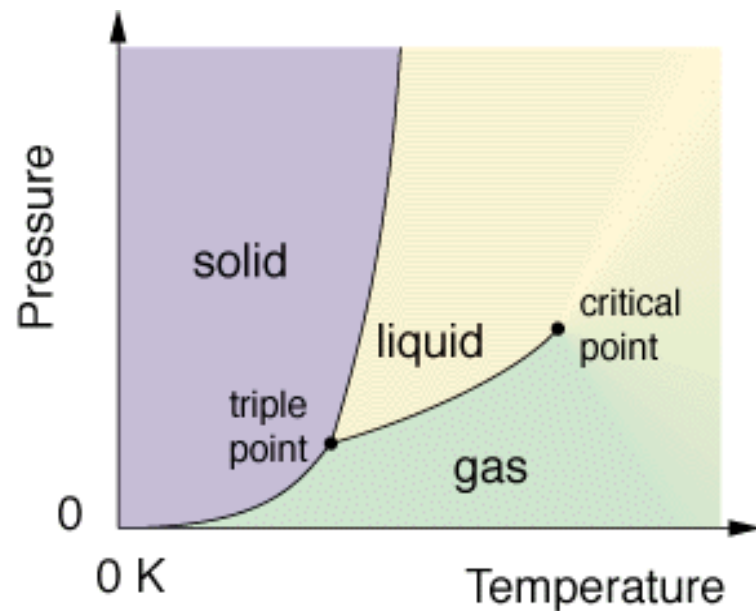
stan gazowy - brak uporządkowania



stan stały - uporządkowanie dalekiego zasięgu

Long Range Order

Przemiany fazowe - porządek z chaosu



uporządkowanie dalekiego zasięgu (LRO)

$$\langle \rho(\mathbf{r}_1) \rho(\mathbf{r}_2) \rangle \rightarrow \langle \rho(\mathbf{r}_1) \rangle \langle \rho(\mathbf{r}_2) \rangle \neq 0 \text{ gdy } |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \rightarrow \infty$$

kryształ - korelacje dalekiego zasięgu, sztywność



(Sempe)

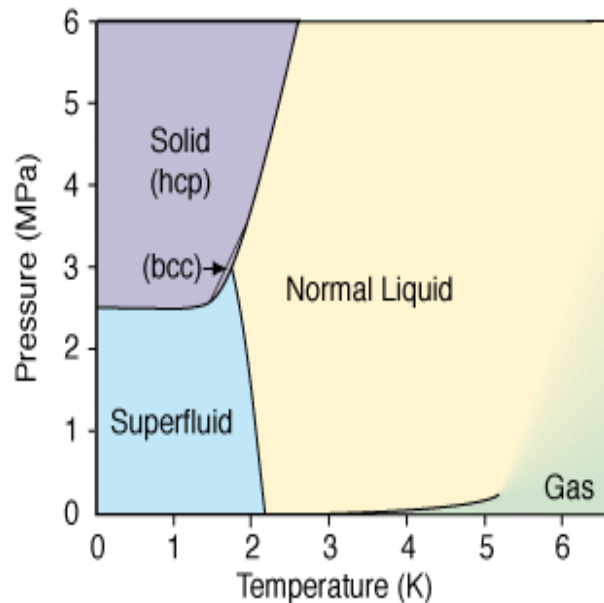
Kwantowe stany skupienia materii

atomy (cząstki) są **nierozróżnialne** - **bozony** i **fermiony**

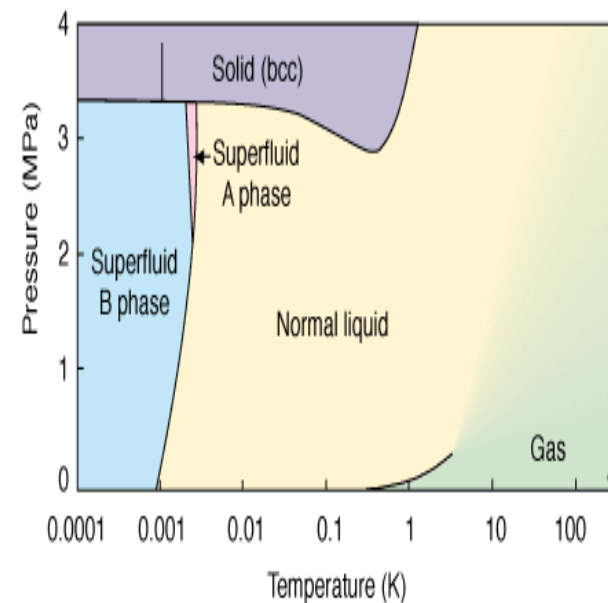
gaz kwantowy, ciecz kwantowa, nadpłynna ciecz kwantowa, kwantowy kryształ, nadpłynny kryształ kwantowy

$$\lambda_{dB} \gtrsim d$$

Dwa izotopy helu: ${}^4\text{He}$ (2p2n2e - "bozony") i ${}^3\text{He}$ (2p1n2e - "fermiony")



ciecz w T=0K!

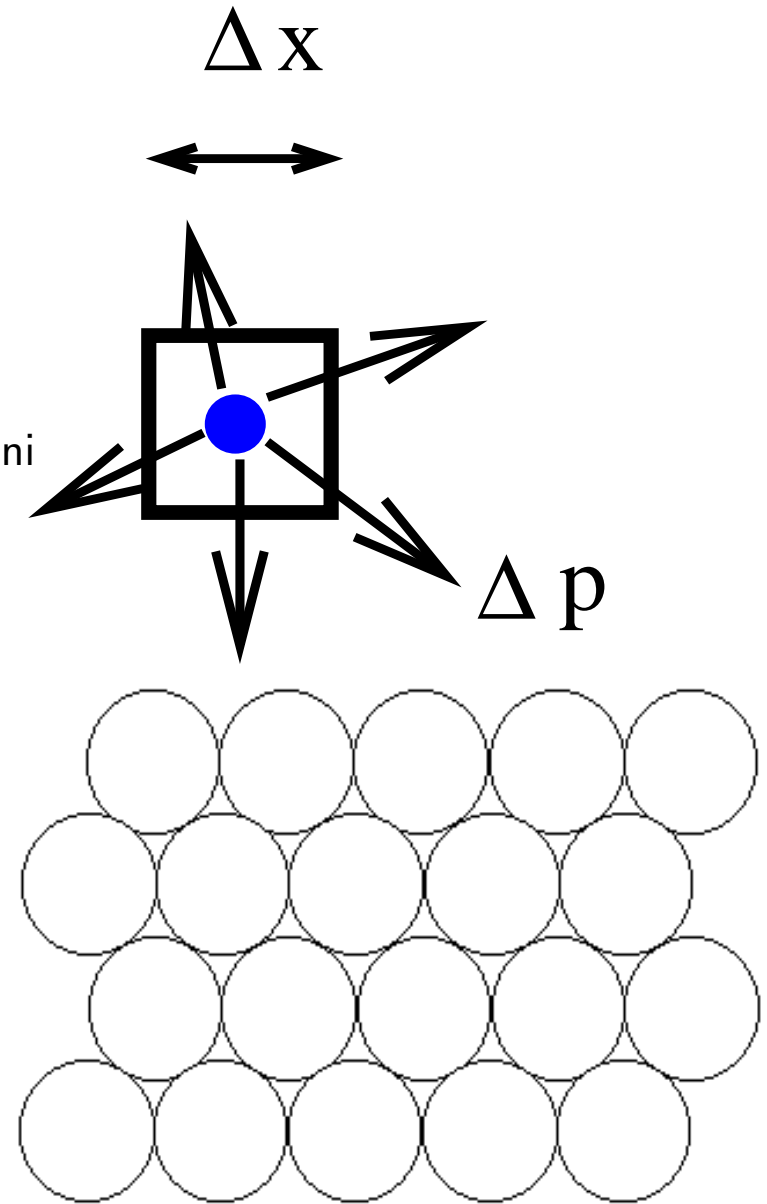


Dlaczego ciecz kwantowa w $T=0K$?

- zasada nieoznaczoności Heisenberga

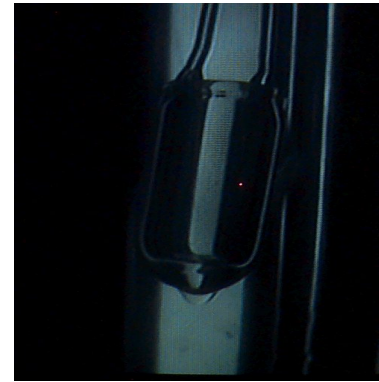
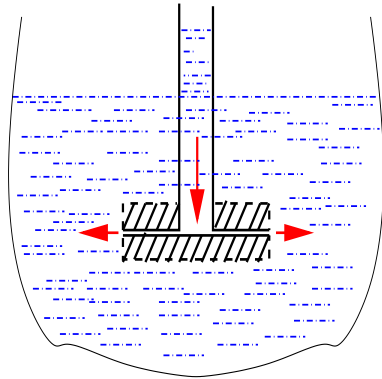
$$\Delta x \Delta p \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

- im bardziej chcemy zlokalizować cząstkę kwantową w przestrzeni tym szybciej drga; są to tak zwane drgania zerowe
- **hel i wodór atomowy w normalnym ciśnieniu nie krystalizuje z powodu dużych drgań zerowych**
- energia kinetyczna (drgań zerowych) jest duża w stosunku do potencjału przyciągającego $v(r)$
- krystalizuje pod ciśnieniem wskutek obecności twardego rdzenia (tak jak kule bilardowe gęsto upakowane tworzą strukturę uporządkowaną)



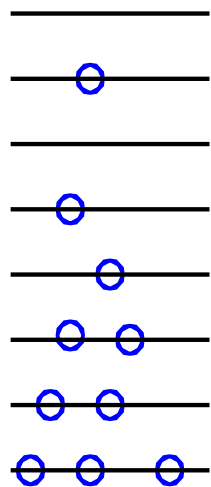
Nadpłynna ciecź kwantowa $T \leq T_\lambda$

- bezlepkościowy przepływ przez naczynia kapilarne, pełzanie, efekt fontannowy

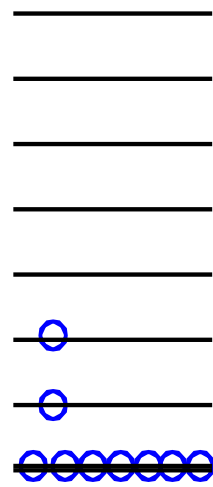


Mikroskopowa teoria nadpłynności ^4He

Rodzaj kondensacji Bosego - Einsteina oddziałujących atomów o statystyce bozonowej



$T > T_\lambda$



$T < T_\lambda$

- makroskopowa liczba bozonów N_0 znajduje się w najniżej leżącym stanie energetycznym
- N_0 bozonów opisywanych jest taką samą funkcją falową
- jednocząstkowa macierz gęstości

$$\rho(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \langle \psi^\dagger(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r}') \rangle$$

charakteryzuje uporządkowanie dalekiego zasięgu

$$\langle \psi^\dagger(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r}') \rangle \rightarrow \langle \psi^\dagger(\mathbf{r}) \rangle \langle \psi(\mathbf{r}') \rangle = N_0/V = n_0$$

gdy $\mathbf{r} - \mathbf{r}' \rightarrow \infty$

pozadiagonalne uporządkowanie dalekiego zasięgu (ODLRO)

Off Diagonal Long Range Order

Makroskopowa funkcja falowa kondensatu

- istnieje funkcja falowa kondensatu

$$\Psi(\mathbf{r}; T) = \sqrt{\rho_s(\mathbf{r})} e^{i\theta(\mathbf{r})}$$

pełniąc rolę **kwantowego parametru porządku**

- prędkość przepływu kondensatu

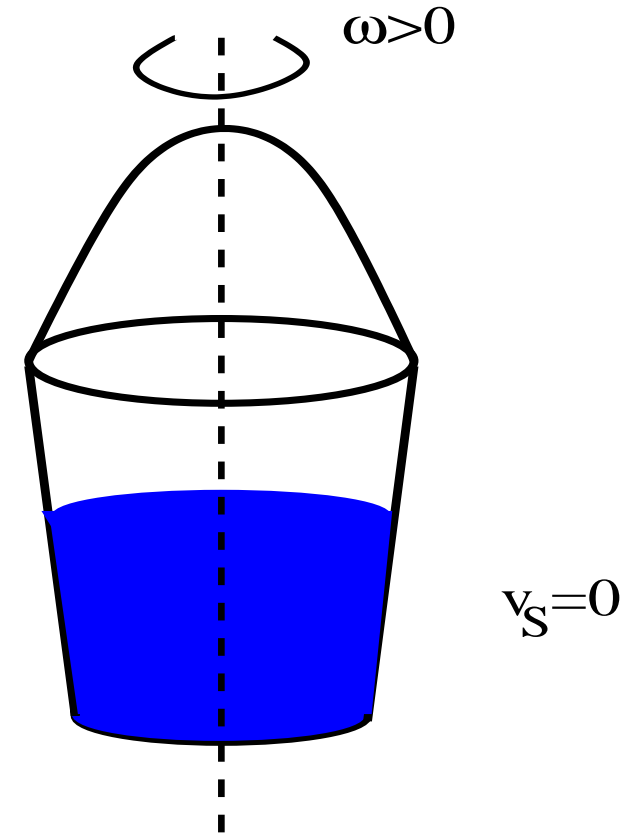
$$\mathbf{v}_s = \frac{\hbar}{m} \nabla \theta(\mathbf{r})$$

- stąd w obszarze jednorodnym przepływ musi być bezwirowy, t.j.

$$\nabla \times \mathbf{v}_s = 0$$

- w obracającym się pojemniku z ^4He , nadpłynna ciecz pozostaje w spoczynku
- **nieklasyczny moment bezwładności (NCRI)**

$$I(T) = I_{\text{klasyczny}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_s(T)}{\rho} \right)$$



London 1954, Hess i Fairbank 1967

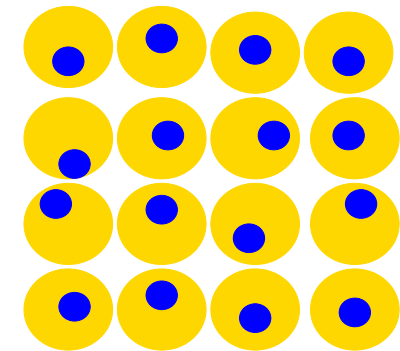
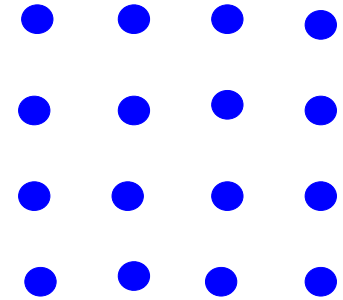
Kwantowe kryształy

- stały hel pod wysokim ciśnieniem (25atm dla ^4He i 30atm dla ^3He)
- amplituda drgań zerowych atomów He wokół węzłów sieci krystalicznej (bcc i hpc) bardzo duża, rzędu 30% stałej sieci

klasyczny kryształ - małe drgania zerowe $\Delta x \ll a$

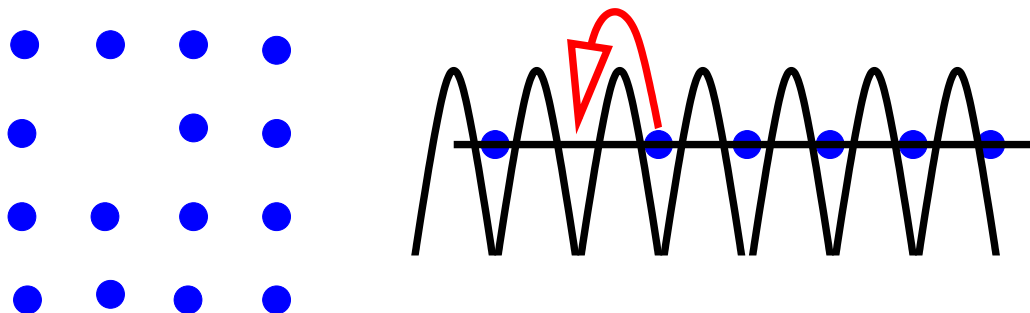
kwantowy kryształ - duże drgania zerowe $\Delta x \gg a$

- atomy w kwantowym kryształcie są nierozróżnialne



Luki w kwantowym kryształach

luka przemieszcza się przeciwnie do ruchu atomów

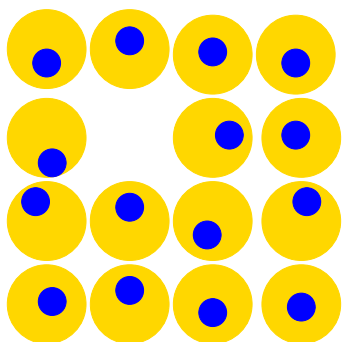


kryształ klasyczny

atom musi pokonać barierę potencjału

potrzebuje energii aktywacji Δ

$$p \sim \exp(-\Delta/k_B T)$$



kryształ kwantowy

atom tuneluje pod barierę potencjału

luka nie jest statyczna

luka jest elementarnym wzbudzeniem

defekton

$$|\mathbf{k}\rangle = \sum_i e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_i} |\mathbf{R}_i\rangle$$

koherentne kwazicząstki z relacją dyspersji $\epsilon(\mathbf{k})$

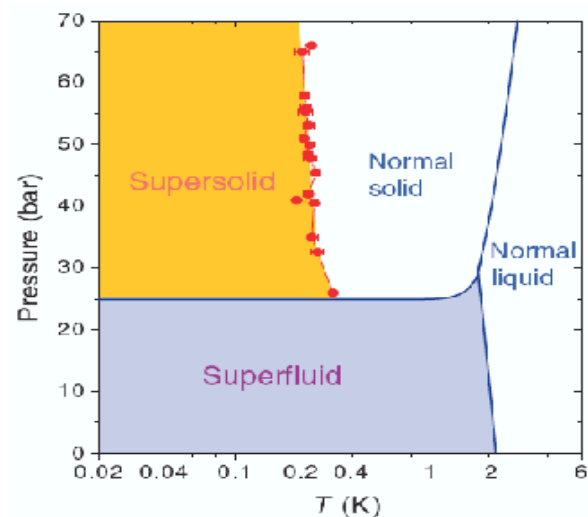
Nadpłynny kryształ kwantowy - nadkryształ

Andreev, Lifshitz (1969), Chester (1970), Leggett (1970), ...

- wiele defektonów w ^4He zachowuje się jak bozony
- defektony kondensują do najniższego stanu (BEC) poniżej T_c
- defektony w kondensacie są nadpłynne
- kondensat defektonów nie porusza się wraz z kryształem
- moment bezwładności powinien być odpowiednio mniejszy

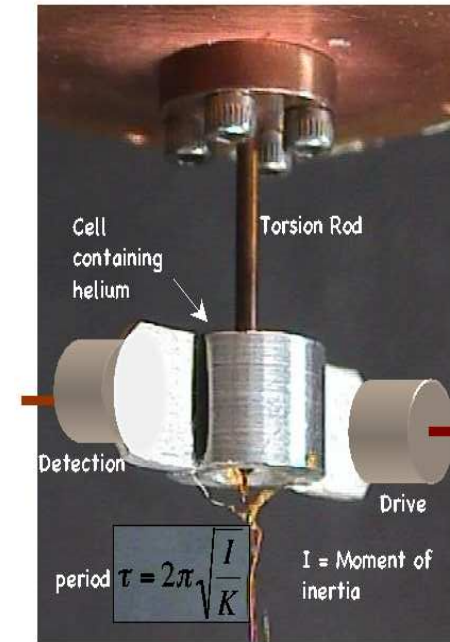
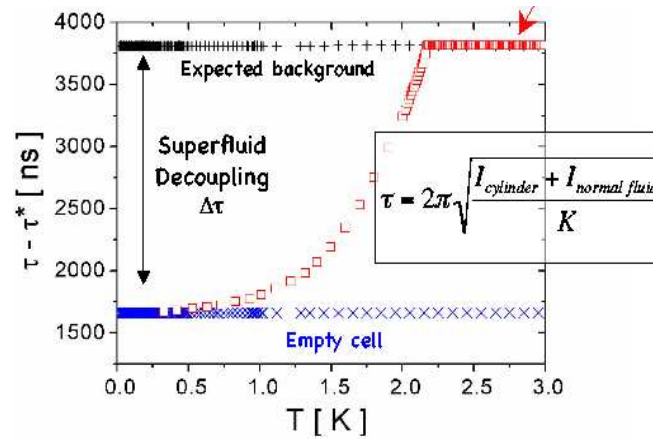
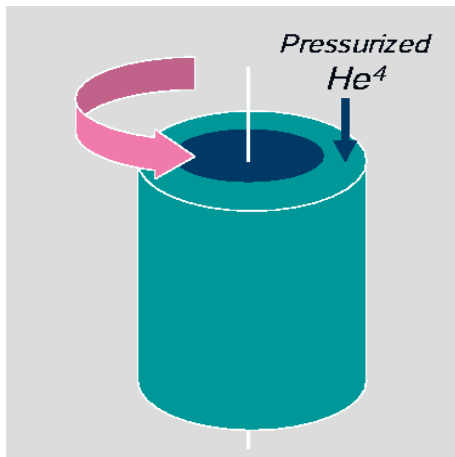
$$I(T) = I_{\text{klasyczny}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_s(T)}{\rho}\right)$$

supersolid = LRO + ODLRO

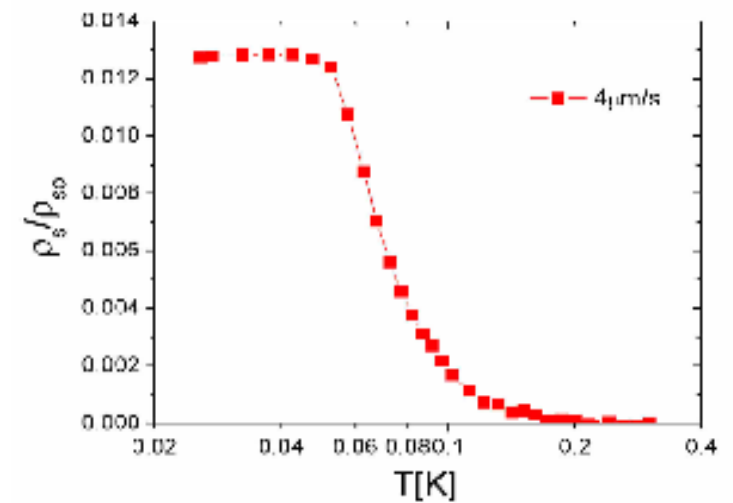
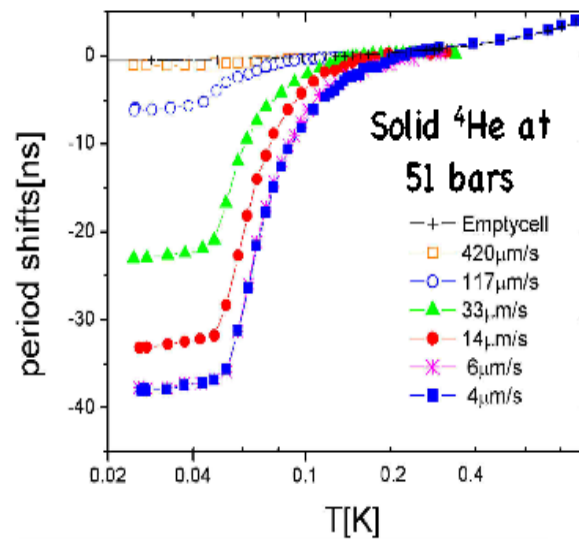
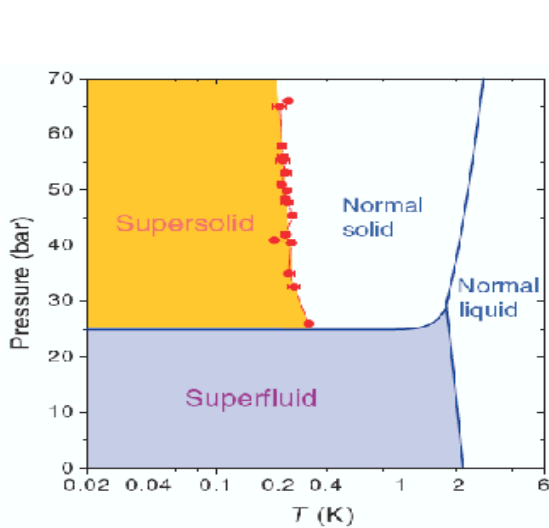


Doświadczenie typu “Mary goes round”

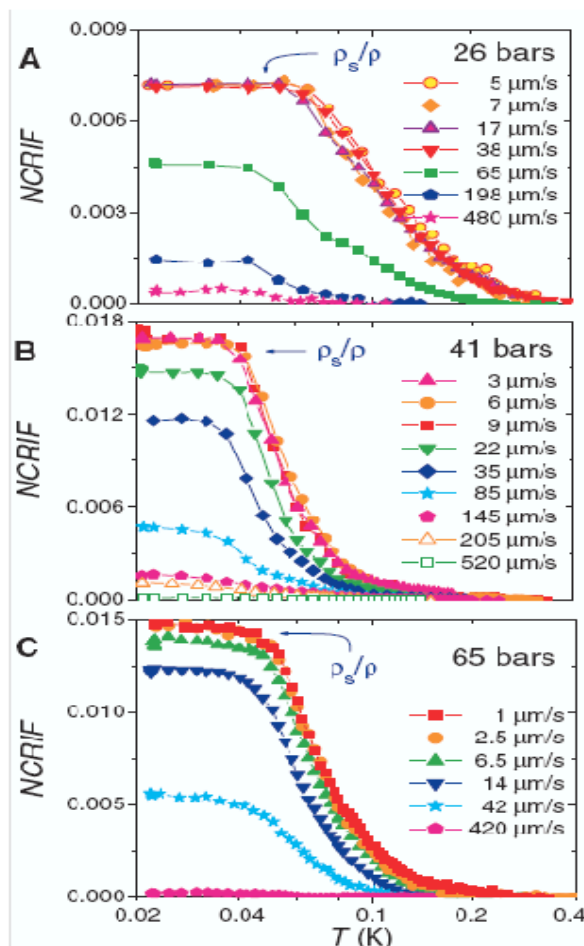
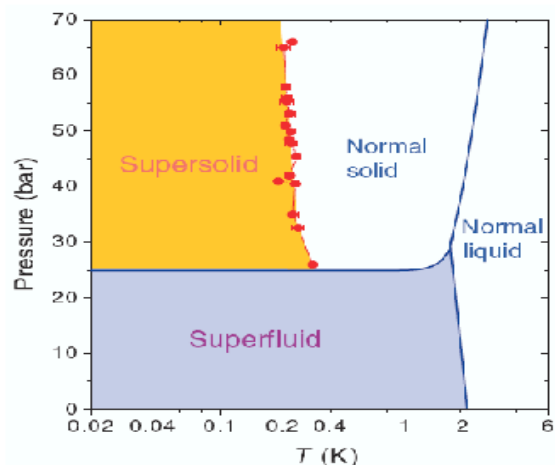
E. Kim, M.H. Chan,
 Nature (2004), Science (2004), J. Low Temp. Phys. (2005)



w kryształce poniżej 0,2K obserwuje się spadek okresu oscylacji - moment bezwładności jest mniejszy



Nadpłynny kryształ?



doświadczenie Kim'a i Chan'a - około 1,3% kryształu jest nadkryształem

problem: w stałym helu ilość luk (i innych defektów) jest wiele rzędów wielkości mniejsza!

nadkryształ bez luk?, separacja faz?, mikrokryształy?, ...

Zakończenie

- koncepcja kwantowych cieczy i kwantowych kryształów
- nadpłynny kryształ = połączenie krystaliczności z bezlepkim przepływem
- koncepcje mogą dotyczyć wodoru, helu, atomów w pułapkach magnetoptycznych i na sieciach optycznych, czy lekkich domieszek atomowych w innych kryształach
- doświadczenie Kim'a i Chan'a z pewnością wymaga poprawnej interpretacji ...
- ... ale z pewnością ożywiło zainteresowanie **nadkryształami**

Literatura:

1. E. Kim, M.H. Chan, Nature **425**, 227 (2004); Science **305**, 1941 (2004);
2. Physics Today, November 2004, p. 23.