

Сверхтекучесть в газе ферми-атомов

Андрей Турлапов

Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова, г. Нижний Новгород
ВНИИ физико-технических и радиофизических измерений, пгт Менделеево

$$\hat{b} = u\hat{a} + v\hat{a}^+$$



Н. Н.
Боголюбов

р. Волга



О. В. Лосев

Сверхтекучесть в газе ферми-атомов

Андрей Турлапов

Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова, г. Нижний Новгород
ВНИИ физико-технических и радиофизических измерений, пгт Менделеево

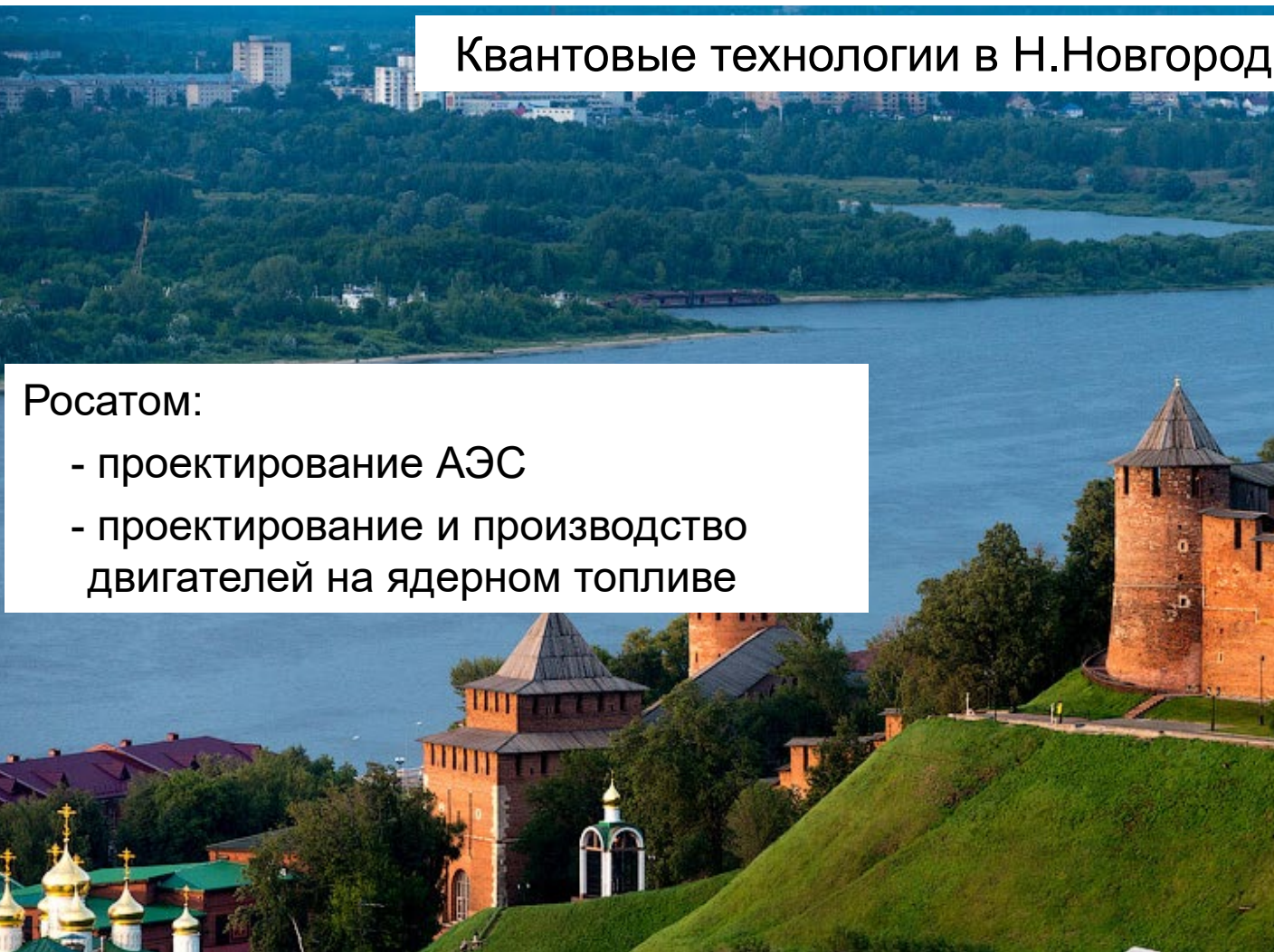
Квантовые технологии в Н.Новгороде

>2/3 мирового
производства
водородных часов



Росатом:

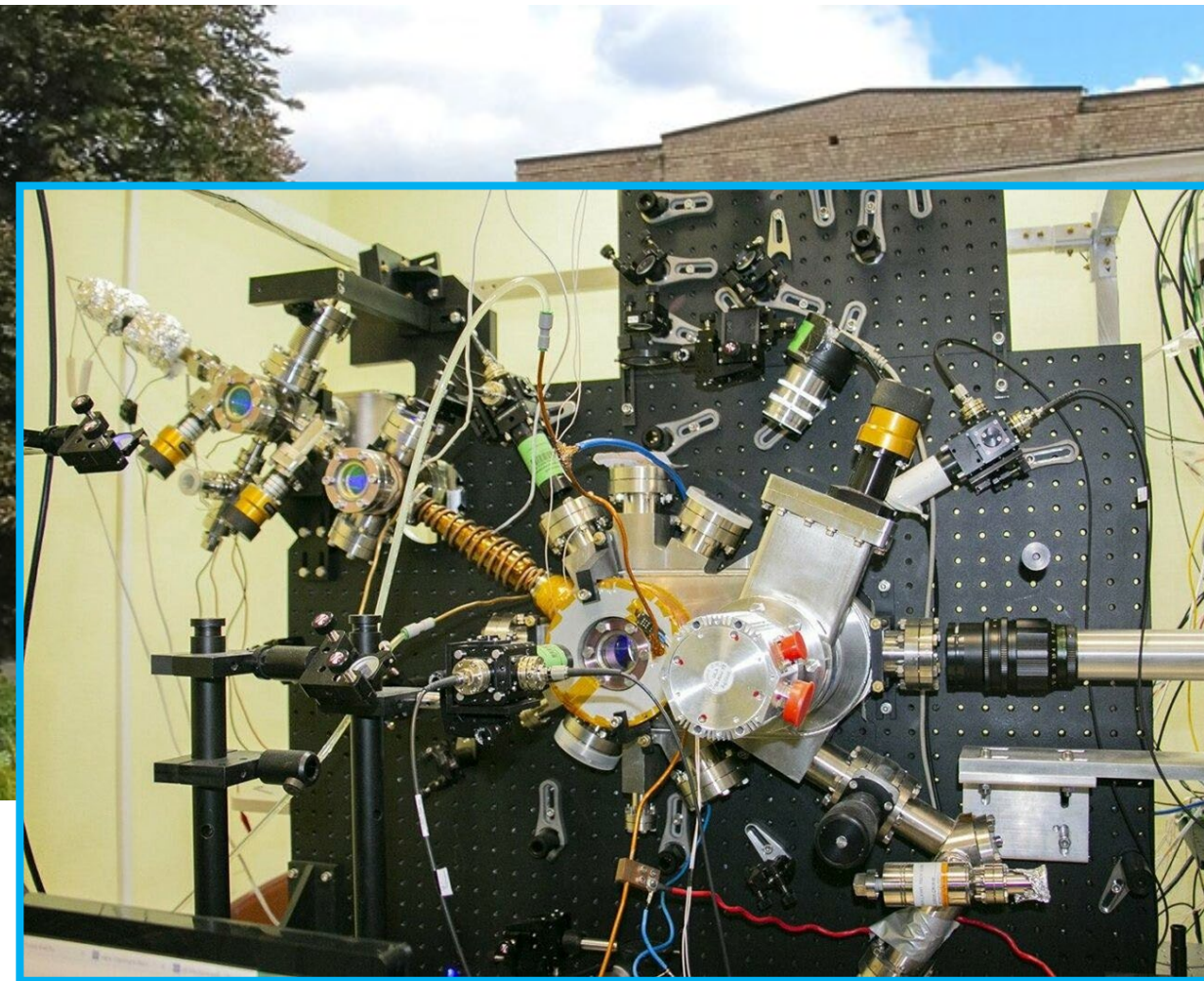
- проектирование АЭС
- проектирование и производство двигателей на ядерном топливе



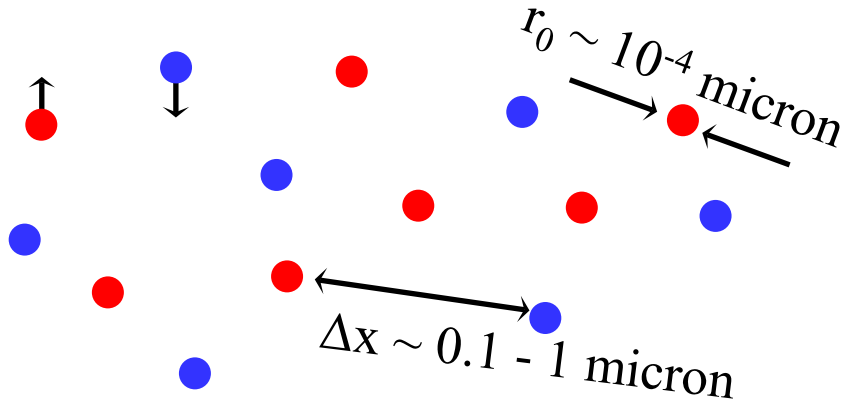
Сверхтекучесть в газе ферми-атомов

Андрей Турлапов

Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова, г. Нижний Новгород
ВНИИ физико-технических и радиофизических измерений, пгт Менделеево



Газ атомов-фермионов ${}^6\text{Li}$

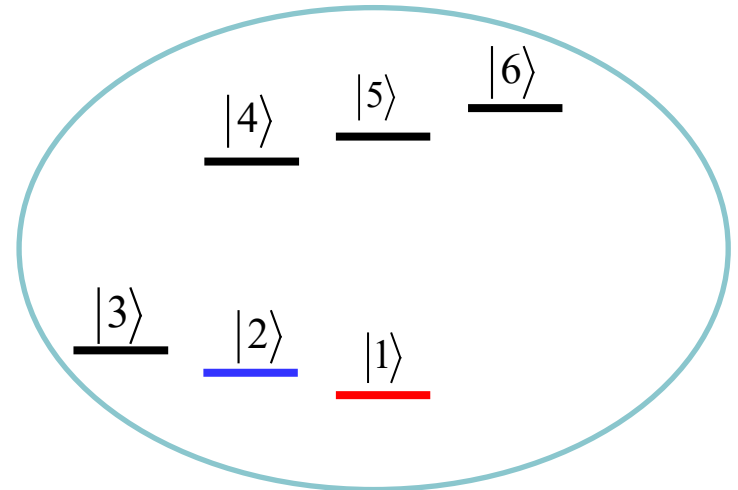


электронная оболочка: $1s^2 2s^1$, спин $S=1/2$
 ядерный спин: $I=1$

$$\uparrow \equiv |1\rangle \approx \left| S_z = -\frac{1}{2}, I_z = 1 \right\rangle$$

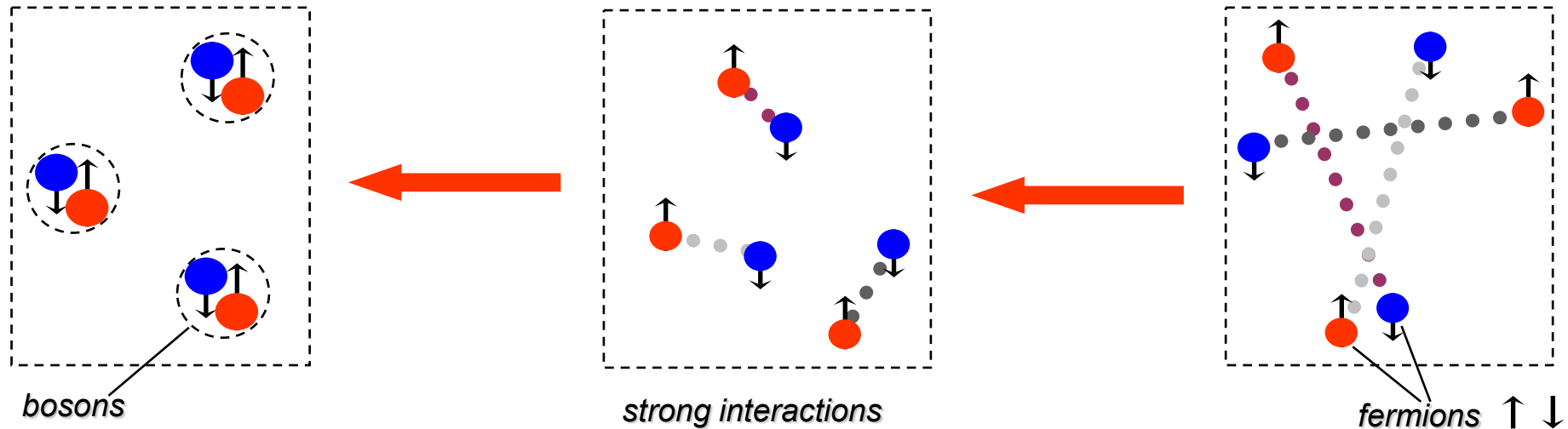
$$\downarrow \equiv |2\rangle \approx \left| S_z = -\frac{1}{2}, I_z = 0 \right\rangle$$

расщепление основного
состояния в магнитном поле

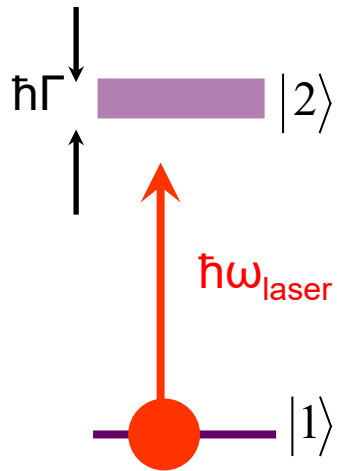


BCS-BEC crossover: from Bardeen-Cooper-Schrieffer fermionic superfluid to Bose-Einstein condensate of diatomic molecules

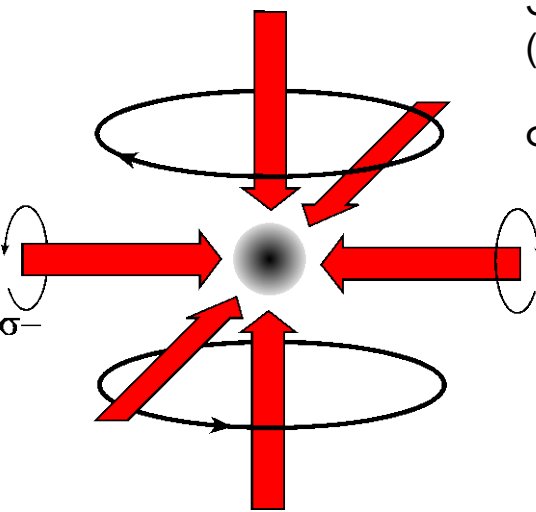
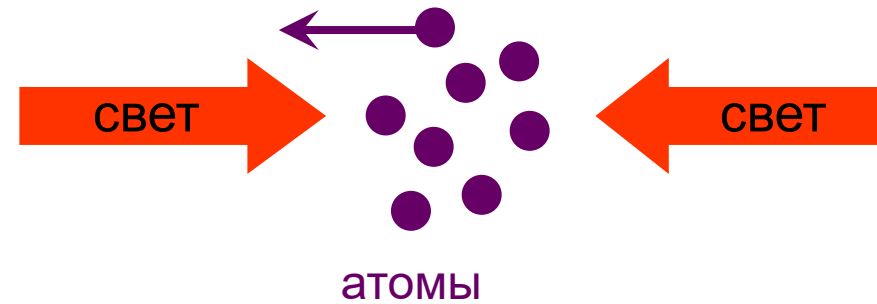
Переход между асимптотами ферми-газа и бозе-конденсата составных бозонов –
исходно предсказано для экситонов [Keldysh & Kozlov, 1968]



Как охладить газ атомов ? 1-й шаг из 2: $T = 10 \mu\text{K} - 1 \text{ mK} \gg E_F$



теория Летохова–Миногина–Павлика (ИСАН, 1977)
 $T_{\text{min}} = \hbar\Gamma/2 = 100\text{-}200 \text{ мК}$ для щелочных металлов
 эксперимент – ИСАН (1981)

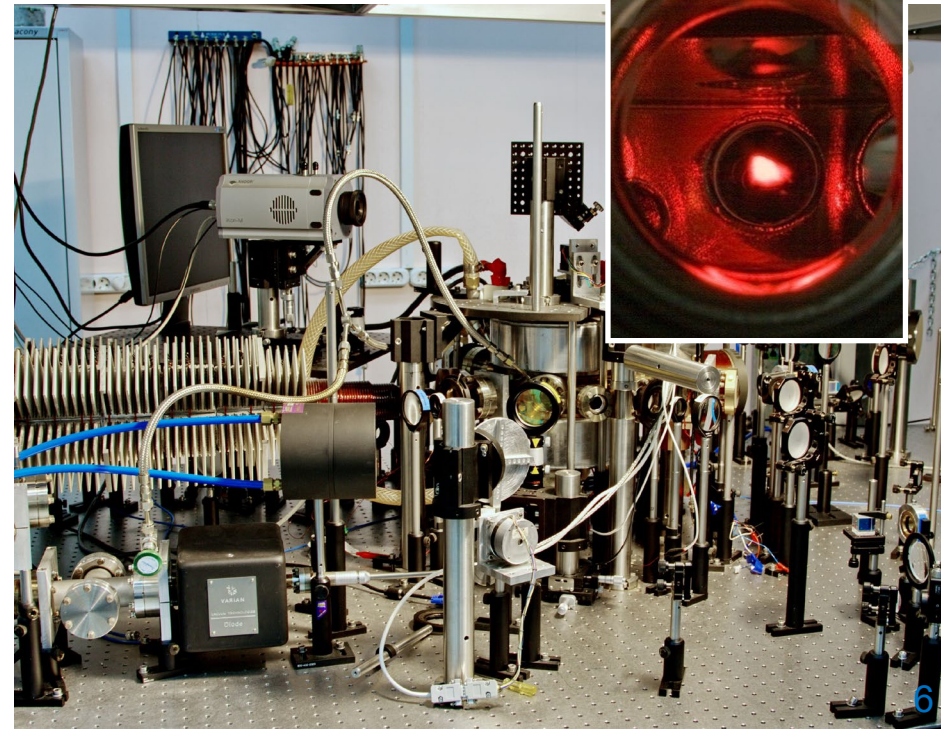


Эксперимент
 (Bell Labs 1987 – Chu, ...)

Фазовая плотность:

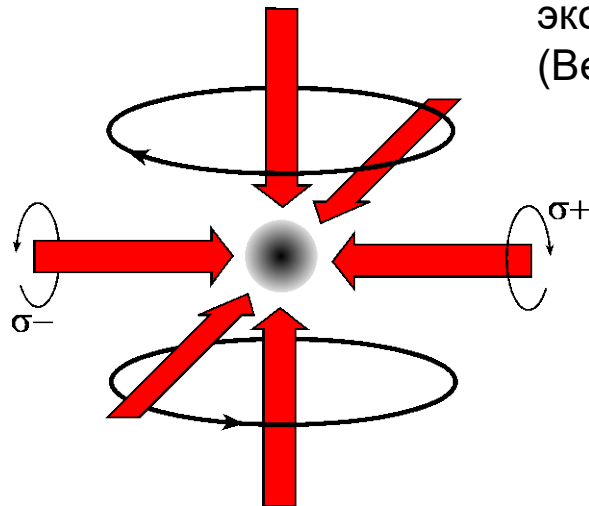
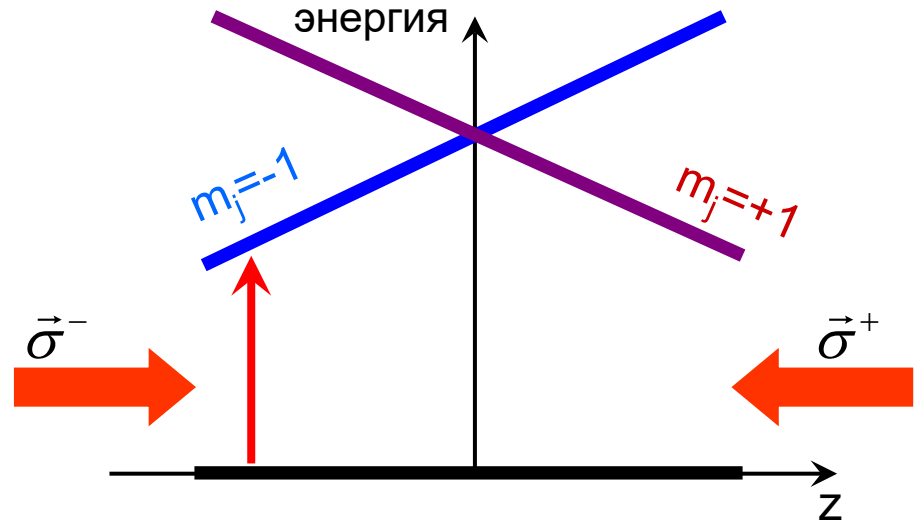
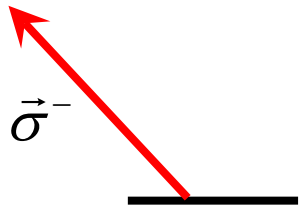
$$\sigma^+ \left(\frac{2\pi\hbar}{\Delta x \Delta p} \right)^3 \sim 10^{-6}$$

Разрежение ($n^{-1/3} \sim 1 \text{ мкм}$) из-за фотонного расталивания



Локализация – магнито-оптическая ловушка

$$m_j = -1 \quad m_j = 0 \quad m_j = +1 \sim \mu_{\text{Bohr}} B$$

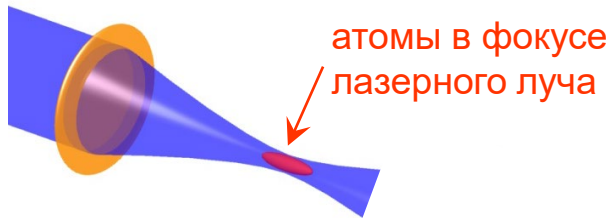


эксперимент
(Bell Labs 1987 – Chu, ...)

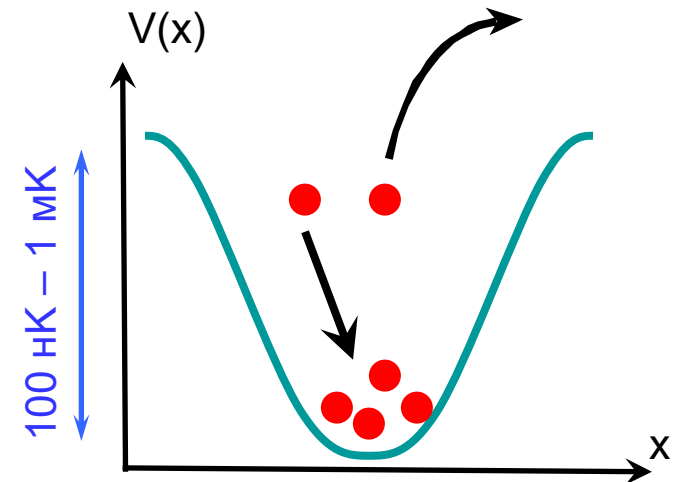
Как охладить газ атомов ? 2-ой шаг из 2: $T = 1 \text{ нК} - 1 \text{ мК} < E_F$

Охлаждение выпариванием в консервативном потенциале – оптическая дипольная ловушка

$\lambda = 10,6 \text{ мкм} \gg \lambda_{\text{atom}} = 670 \text{ нм}$
релеевское рассеяние ~ 1 фотон/час



$$V = -\vec{d} \cdot \vec{E} = -\frac{\alpha}{2} \vec{E}^2$$

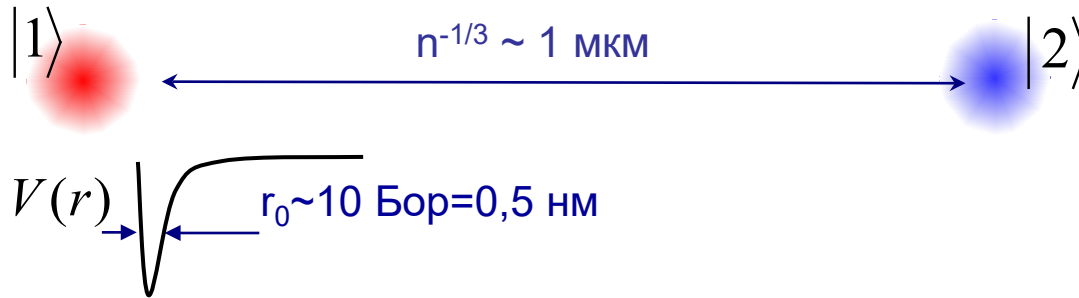


В начале: 10^6 атомов при 300 мК, фазовая плотность = 10^{-6}

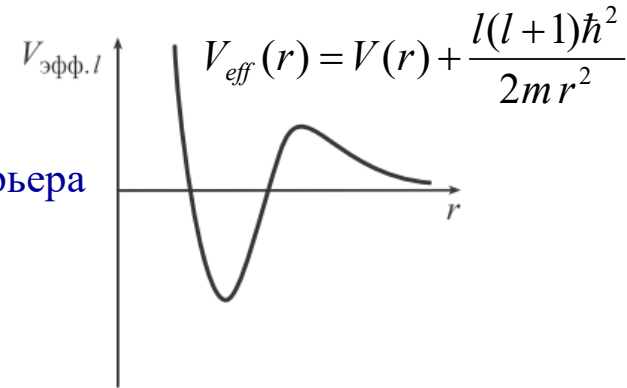
В конце: 10^5 атомов $\sim 10 \text{ нК}$, фазовая плотность = 1

$n^{-1/3} \sim 0.2 - 1 \text{ мкм}$. Почему атомы сталкиваются?

Межатомные взаимодействия



Только s-столкновения ($l=0$) из-за центробежного барьера



$$\psi(\vec{r}) = \psi_{\text{free}}(\vec{r}) + \frac{f(\vec{k}, \vec{k}')}{(2\pi)^{3/2}} \frac{e^{ikr}}{r}$$

$$f(\vec{k}, \vec{k}') \approx \frac{1}{-ik - 1/a}, \quad \sigma = 4\pi |f|^2$$

$$\hbar k \rightarrow 0: \quad \sigma = 4\pi a^2$$

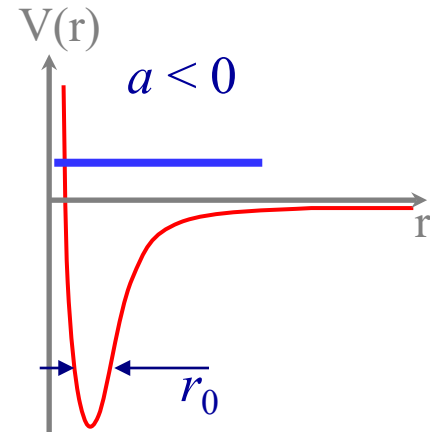
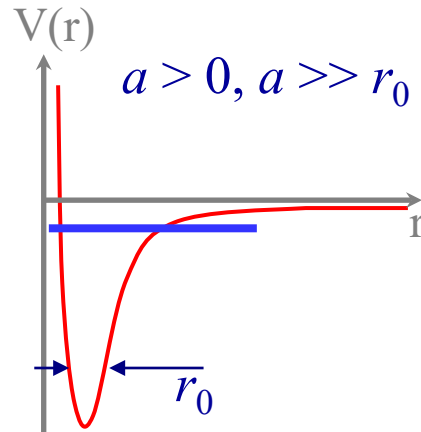
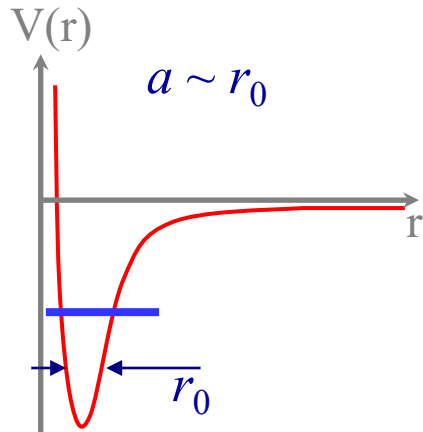
$$a \rightarrow \infty: \quad \sigma = \frac{4\pi}{k^2}$$

При $r_0 \ll a$ длина s-рассеяния a – единственный параметр взаимодействия.

Подобие: для нейтронов $a = -18 \text{ фм}$, $r_0 = 2 \text{ фм}$

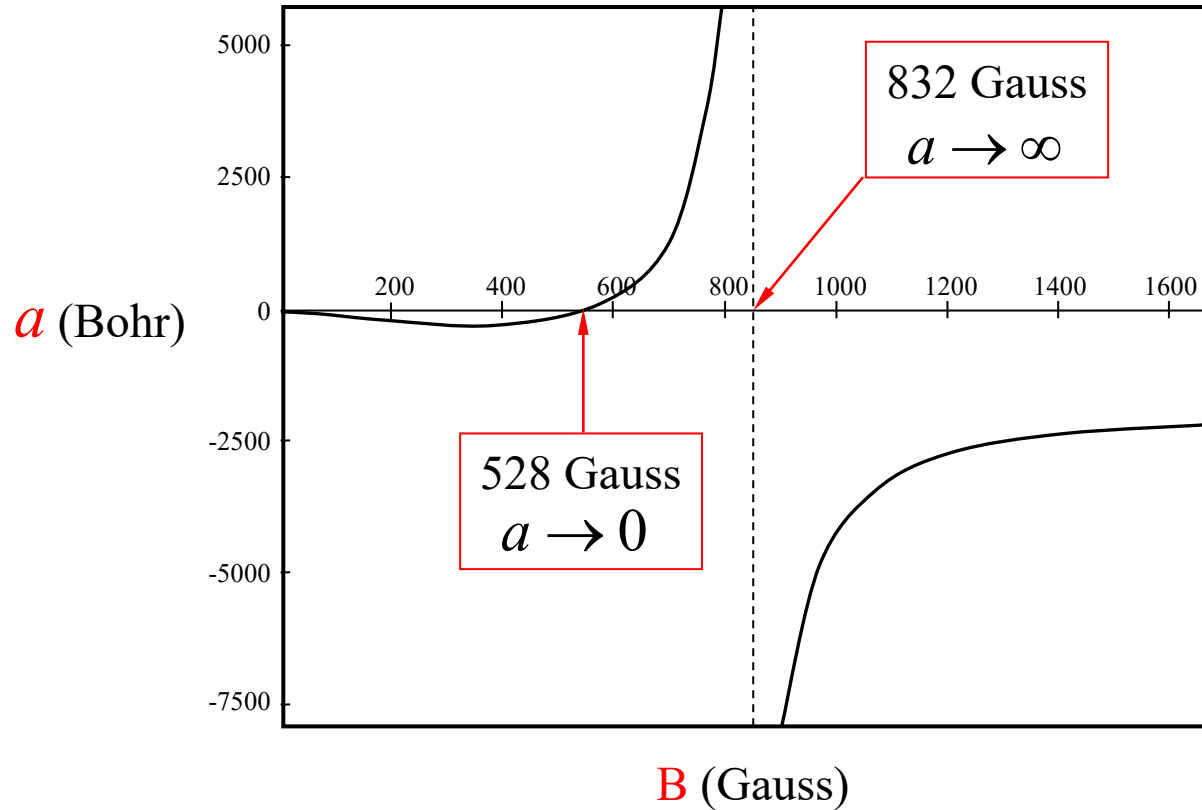
Резонансные столкновения 2 атомов

$\sigma = 4\pi a^2$ - сечение рассеяния, a - длина s-рассеяния



Нужны атомы с большим a ИЛИ резонансы Фано-Фешбаха

Fano-Feshbach resonance for lithium-6: scattering length a vs magnetic field B



Tuning scattering length a by means of Fano-Feshbach resonance

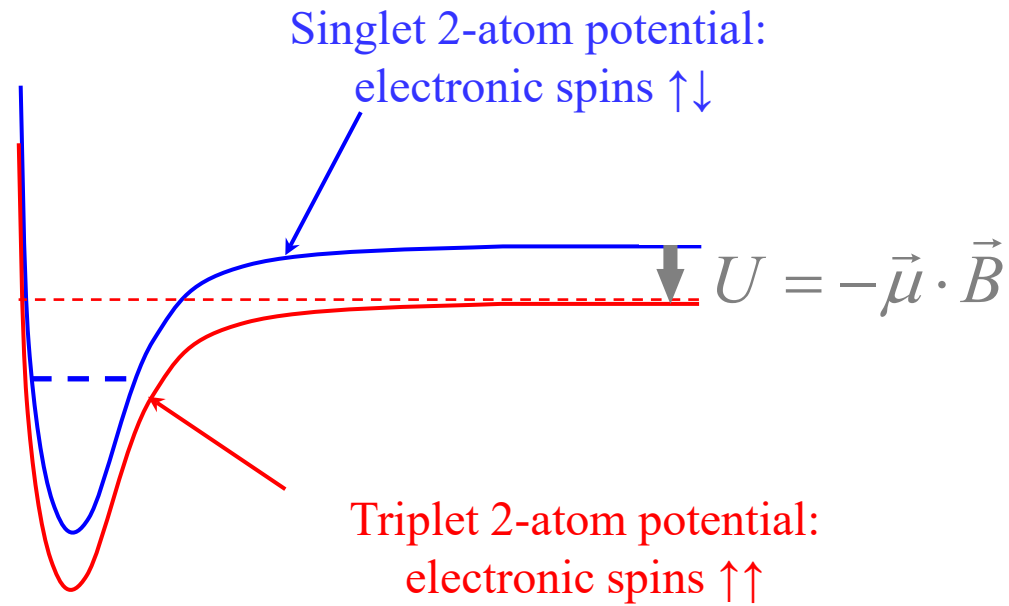
$|1\rangle$

$$|1\rangle = \left| S_z = -\frac{1}{2}, I_z = 1 \right\rangle + \alpha \left| S_z = +\frac{1}{2}, I_z = 0 \right\rangle, \quad \alpha \ll 1$$

$|2\rangle$

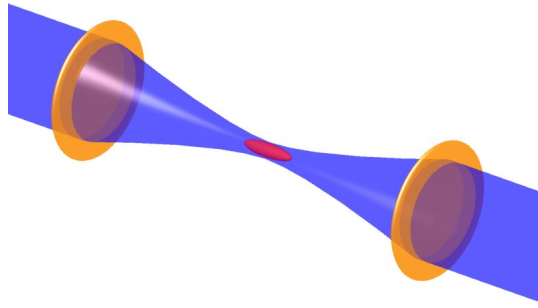
$$|2\rangle = \left| S_z = -\frac{1}{2}, I_z = 0 \right\rangle + \beta \left| S_z = +\frac{1}{2}, I_z = -1 \right\rangle, \quad \beta \ll 1$$

$$\left| \begin{array}{c} \text{valence} \\ \text{electrons} \end{array} \right\rangle = (...) \left| \text{triplet state} \right\rangle + (...) \left| \text{singlet state} \right\rangle$$



Стабильность ферми-газа при $a \rightarrow \pm \infty$

2003: J. E. Thomas and colleagues (Duke)

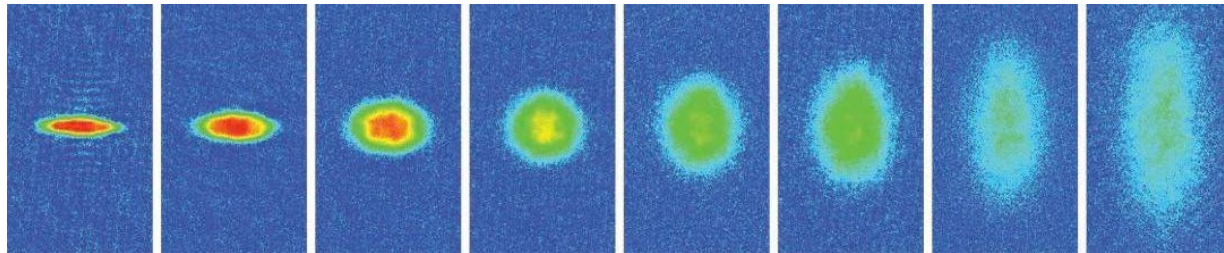


$a = \infty$?!!

Bertch's problem: Stability and ground state of a gas of N spin-1/2 fermions with $r_0 \rightarrow 0$ and $a = \infty$

Answer 1: If $r_0 \rightarrow 0$ before $N \rightarrow \infty$, then system is stable

Answer 2: If $N \rightarrow \infty$ first and $r_0 \rightarrow 0$ second, then gas collapses



$$U_{\text{int}} = -\beta \varepsilon_F(n)$$

$$\varepsilon_F(n) = \frac{\hbar^2}{2m} (6\pi^2 n)^{2/3}$$

Resonant s-wave interactions ($a \rightarrow \pm \infty$)

Is the mean field $U_{\text{int}} = \frac{4\pi \hbar^2 a}{m} n$?

Energy balance at $a \rightarrow -\infty$: $\frac{\hbar^2}{2m} (6\pi^2 n)^{2/3} + \frac{4\pi \hbar^2 a}{m} n \longrightarrow \text{Collapse}$

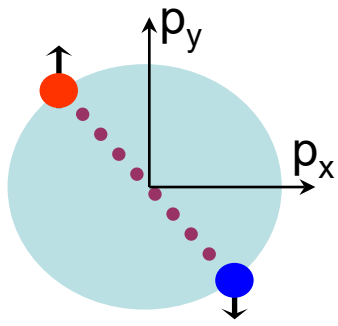
s-wave scattering amplitude: $f_{l=0} = -\frac{1}{ik + 1/a}$

In a Fermi gas $k \neq 0$. $k \sim k_F$. Therefore, at $a = \infty$, $f_{l=0} \approx -\frac{1}{ik_F}$

$U_{\text{int}} = \frac{4\pi \hbar^2 a_{\text{eff}}}{m} n$, where $a_{\text{eff}} \sim -\frac{1}{k_F}$

$n \sim k_F^3 \longrightarrow U_{\text{int}} \sim -\frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} = -\varepsilon_F(n) = -\frac{\hbar^2}{2m} (6\pi^2 n)^{2/3}$

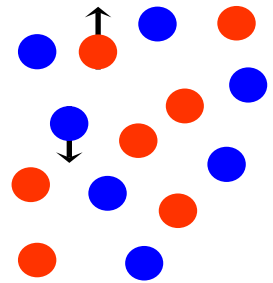
Сверхтекучесть при $a = -\infty$?



$$\hat{H} = \sum_p \frac{p^2}{2m} (\hat{a}_{p\uparrow}^+ \hat{a}_{p\uparrow} + \hat{a}_{p\downarrow}^+ \hat{a}_{p\downarrow}) + V_2 \sum_{p', p, q} \hat{a}_{p\uparrow}^+ \hat{a}_{-p+q\downarrow}^+ \hat{a}_{p'\downarrow} \hat{a}_{-p+q\uparrow}$$

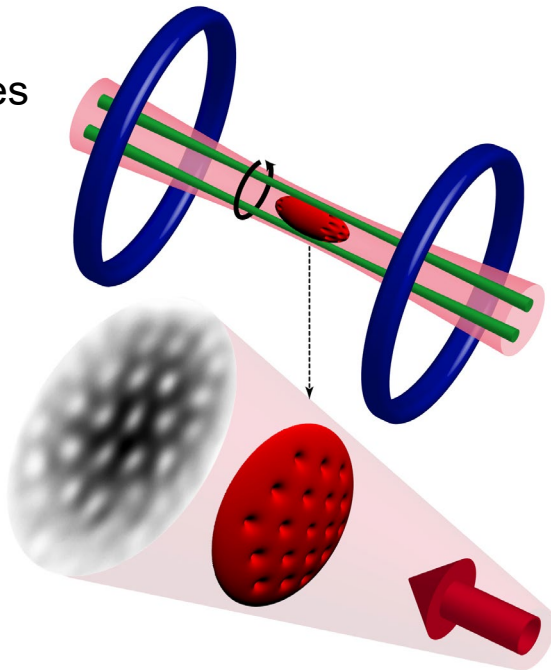
$$V_2 \approx \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}$$

Сверхпроводник: $T_{\text{crit}} \sim \omega_{\text{Debye}} e^{-\pi/2\kappa_F|a|}$



Газ (Горьков, Мелик-Бархударов 1961) : $T_{\text{crit}} = 0.28\epsilon_F e^{-\pi/2\kappa_F|a|}$

W. Ketterle
and colleagues
MIT 2005

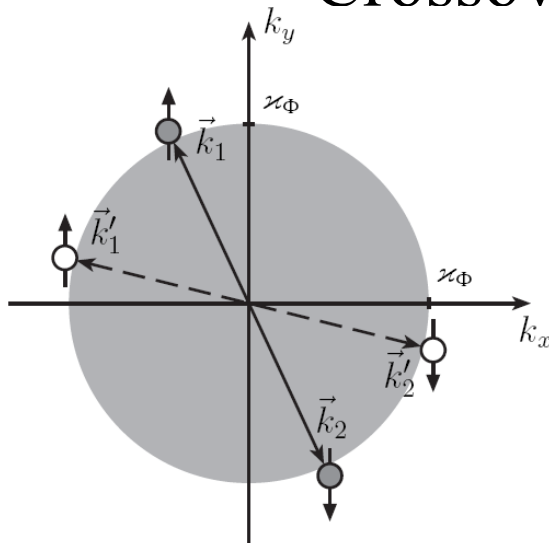


В газе атомов при $a = -\infty$:

$T_c = 0,17 \epsilon_F$ [Zwierlein и коллеги, 2011]

Highest critical temperature in cuprate
superconductors: $T_c = 140 \text{ K} = 0,01 \epsilon_{F2}$
[Bozovic, 1991]

Crossover from a BCS superfluid to BEC



The Bogolubov theory of superconductivity, 1958



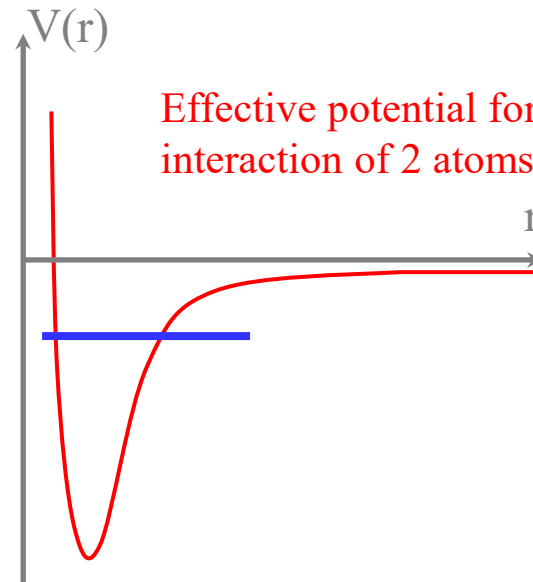
$$\hat{H} = \sum_p \frac{p^2}{2m} (\hat{a}_{p\uparrow}^+ \hat{a}_{p\uparrow} + \hat{a}_{p\downarrow}^+ \hat{a}_{p\downarrow}) + g \sum_{p',p} \hat{a}_{p'\uparrow}^+ \hat{a}_{-p'\downarrow}^+ \hat{a}_{p\downarrow} \hat{a}_{-p\uparrow}$$

Solution – direct product of Cooper pairs:

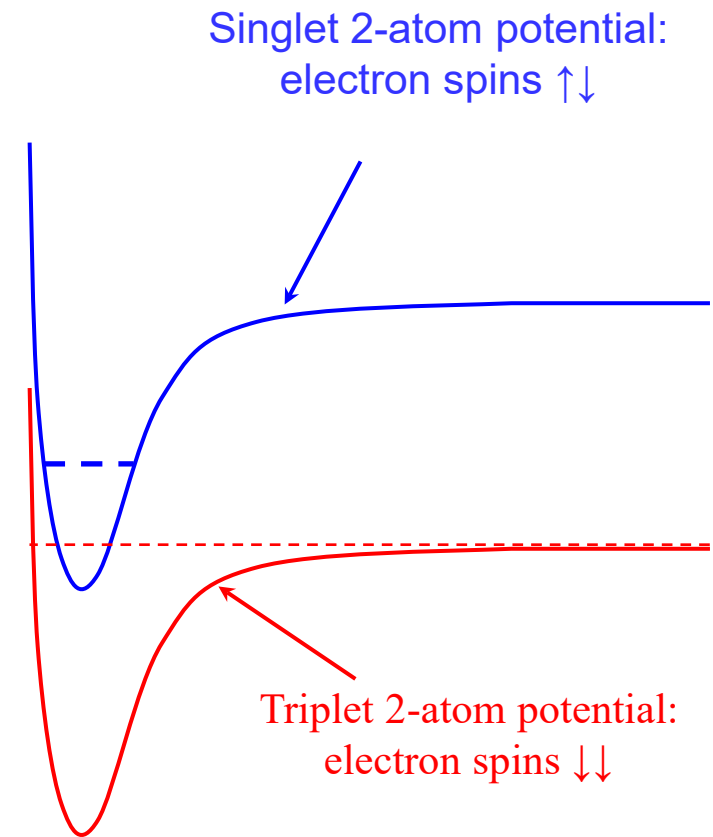
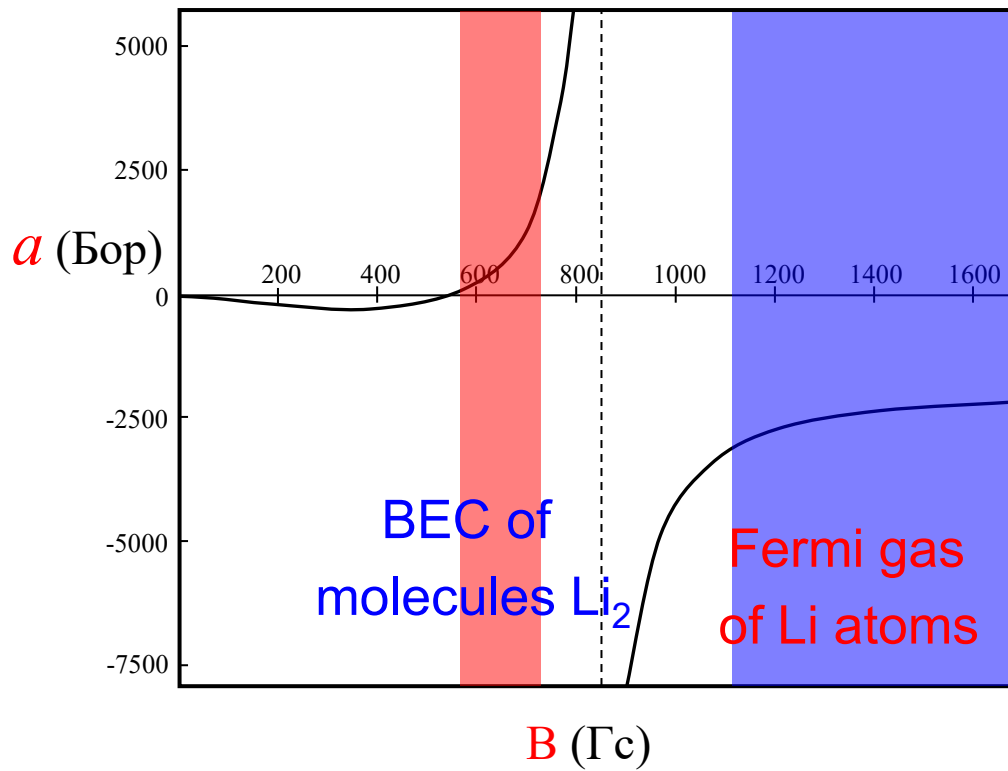
$$\prod_{\vec{k}} (u_{\vec{k}} + v_{\vec{k}} \hat{a}_{\vec{k}\uparrow}^+ \hat{a}_{-\vec{k}\downarrow}^+) | \text{vacuum} \rangle$$

$$g \approx \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}$$

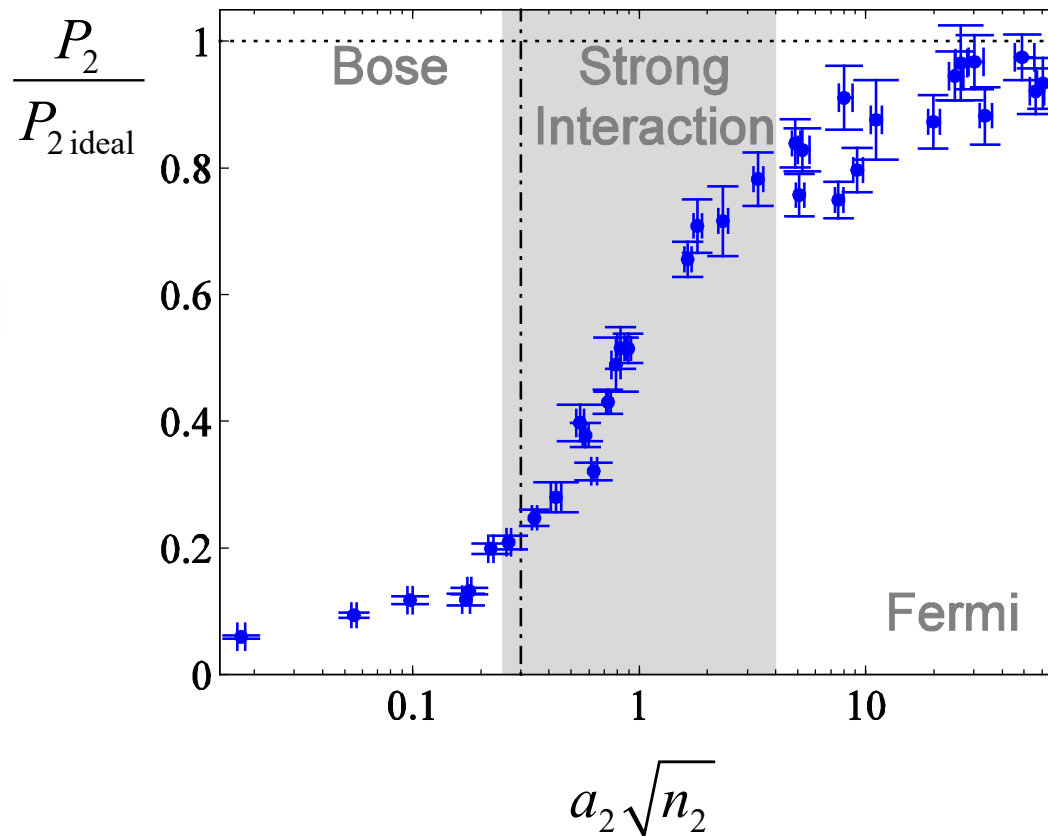
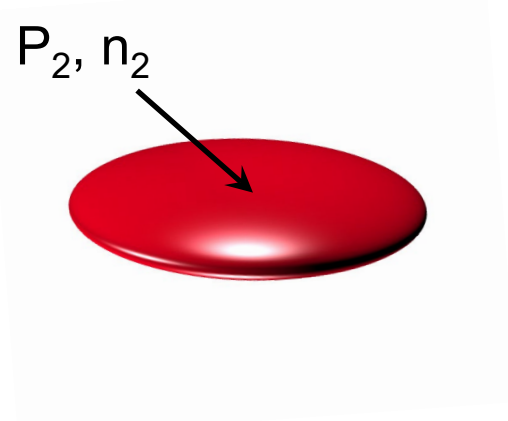
a – s-wave scattering length



Crossover from a BCS superfluid to BEC



Pressure in the 2D Fermi-to-Bose crossover

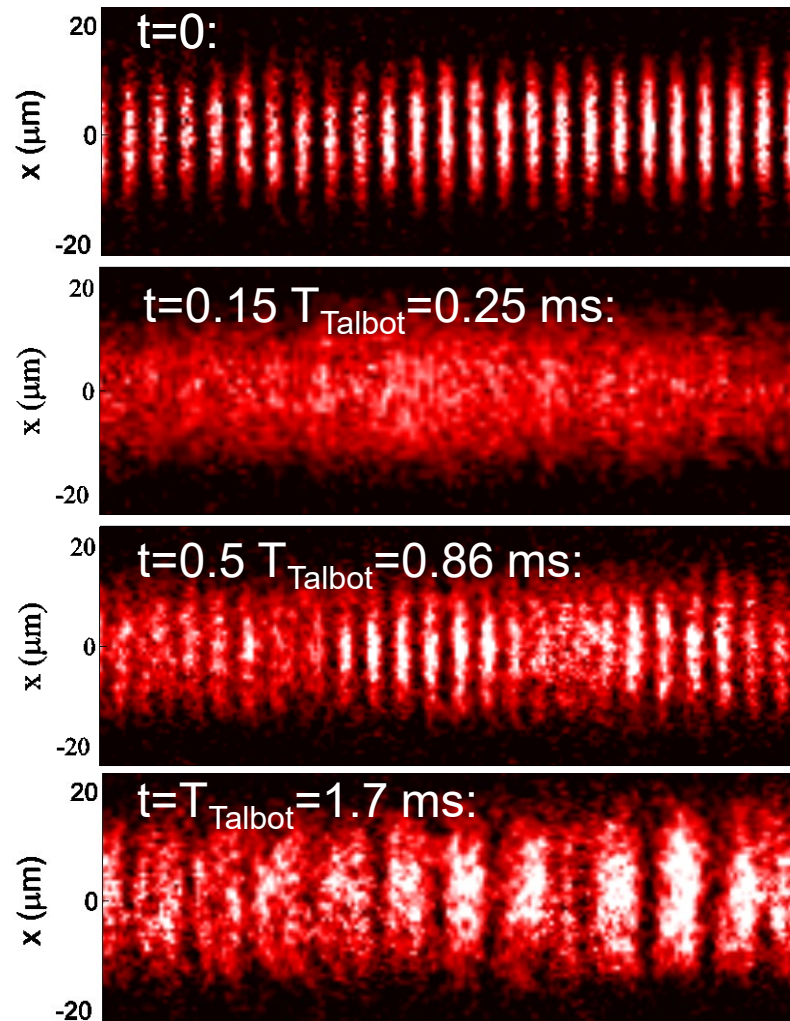
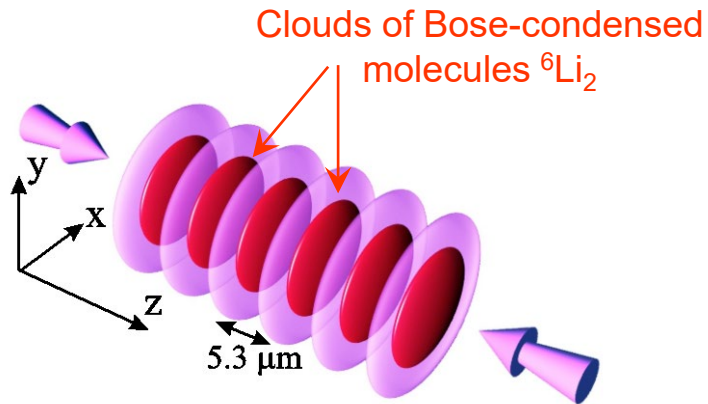


$$P_{2 \text{ ideal}} = \frac{n_2 \varepsilon_F}{2}$$

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi n_2$$

a_2 – 2D s-wave scattering length

Proof of Bose condensation: Interference



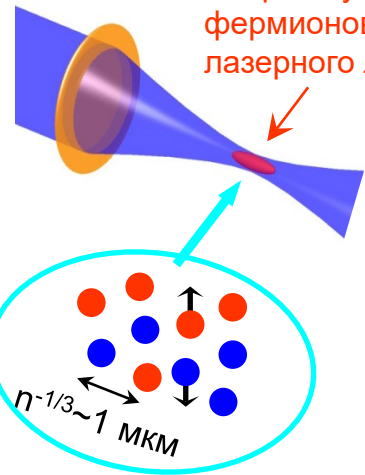
Взгляд в будущее

Микромеханизм комнатнотемпературной сверхпроводимости

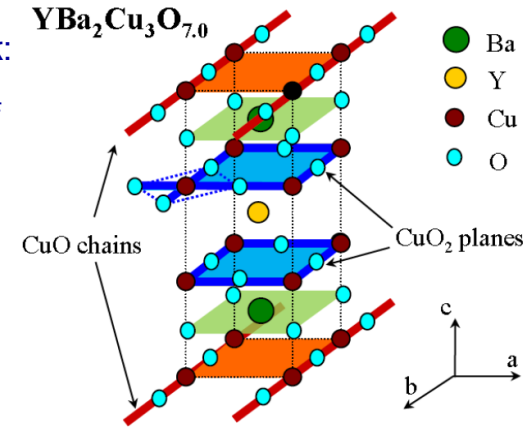
Сверхтекучий газ атомов-фермионов в фокусе лазерного луча, $T \sim 10$ нК.

$$T_c = 0,17 \epsilon_F$$

[MIT 2011]



Купратный
сверхпроводник:
 $T_c = 140$ K $= 0,01 \epsilon_F$
[Bozovic 1991,
Dai et al. 1995]



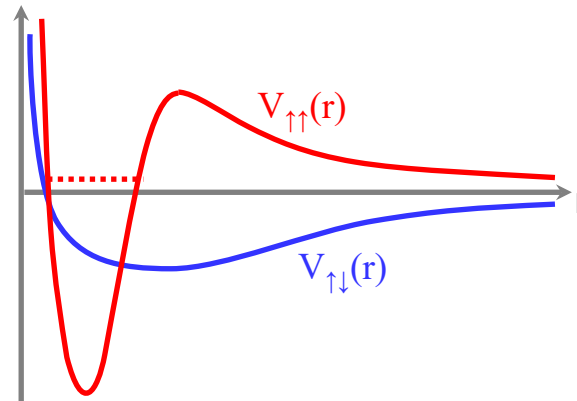
В приближении 2-частичных взаимодействий:

$$\hat{H} = \sum_p \frac{p^2}{2m} (\hat{a}_{p\uparrow}^\dagger \hat{a}_{p\uparrow} + \hat{a}_{p\downarrow}^\dagger \hat{a}_{p\downarrow}) + \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \sum_{p', p, q} \hat{a}_{p\uparrow}^\dagger \hat{a}_{-p+q\downarrow}^\dagger \hat{a}_{p'\downarrow} \hat{a}_{-p'+q\uparrow}$$

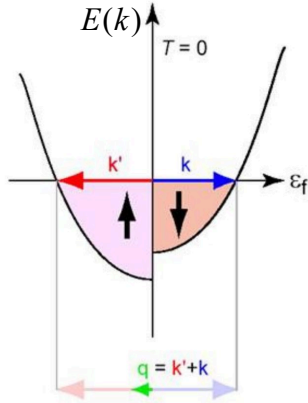
$$T_{\text{crit}} = 0.28 \epsilon_F e^{-\pi/2 \kappa_F |a|}$$

Сложность задачи: при $a = -\infty$ две ветви решения – стабильная и нестабильная (задача Бейкера-Берча)

Возможный микромеханизм
сверхпроводимости при комнатной
температуре:
потенциал электрон-электрон



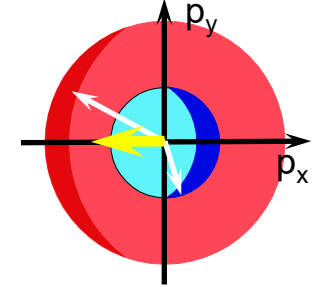
Максимальное магнитное поле, допускающее сверхпроводимость?



Предел Клогстона –
разрушение
сверхпроводимости по
БКШ:

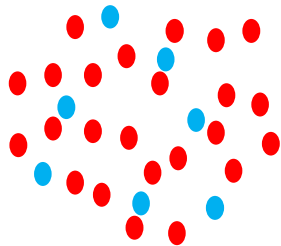
$$B_{\text{crit}} = \frac{\Delta_{\text{gap}}}{\mu_{\text{Bohr}} \sqrt{2}}$$

Спаривание по Фульде-
Фереллу-Ларкину-
Овчинникову?

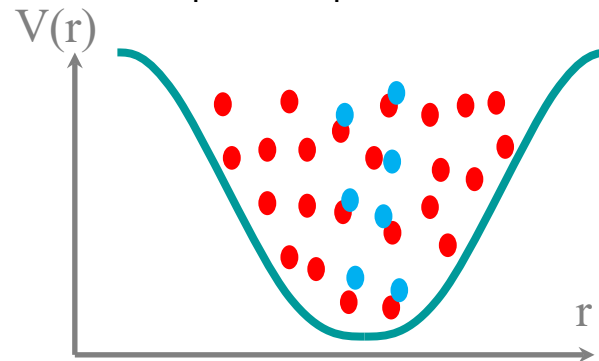


Попытки наблюдения фазы ФФЛО в 2-мерных органических сверхпроводниках:
теплоёмкость [Lortz et al. 2007]
анизотропия в рассеянии акустических волн [Imajo et al. 2022]

Спаривание по ФФЛО в газе атомов? Ранние попытки

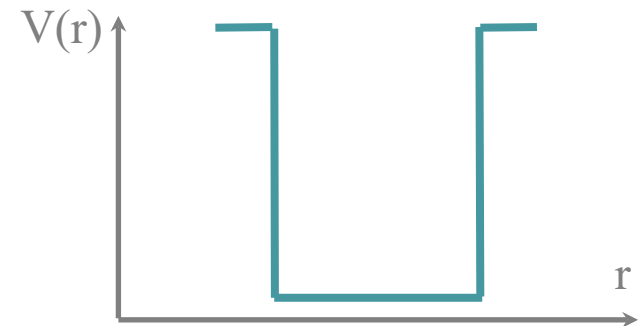


In a parabolic potential:
phase separation

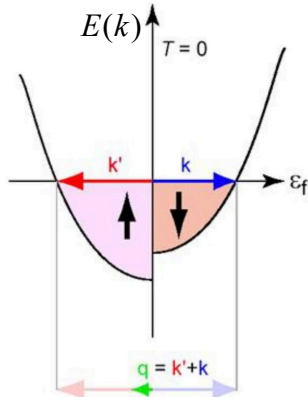


Observed: MIT 2006; Rice 2006

Будущее решение:



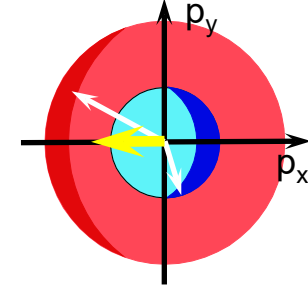
Максимальное магнитное поле, допускающее сверхпроводимость?



Предел Клогстона –
разрушение
сверхпроводимости по
БКШ:

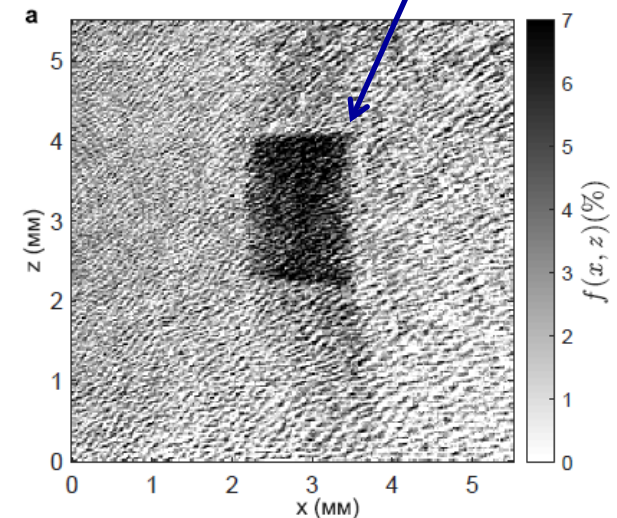
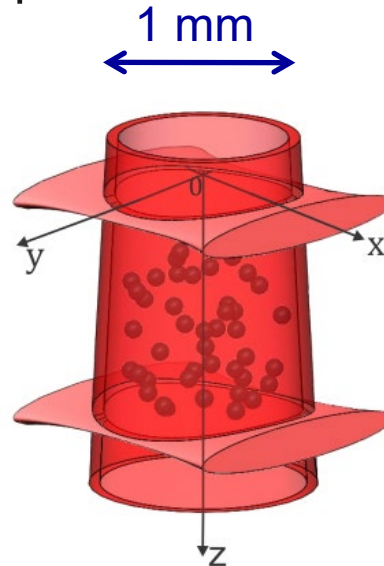
$$B_{\text{crit}} = \frac{\Delta_{\text{gap}}}{\mu_{\text{Bohr}} \sqrt{2}}$$

Спаривание по Фульде-
Фереллу-Ларкину-
Овчинникову?



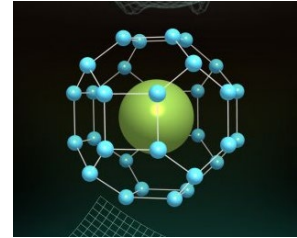
Попытки наблюдения фазы ФФЛО в 2-мерных органических сверхпроводниках:
теплоёмкость [Lortz et al. 2007]
анизотропия в рассеянии акустических волн [Imajo et al. 2022]

На пути к спариванию по ФФЛО – в Н.Новгороде



Важность большого числа атомов N : $T_{\text{min}} = 2/N^{1/3}$

Максимум T_{crit}/E_F для различных парциальных волн?



s-спаривание: LaH_{10} — $T_{\text{crit}} = 250 \text{ K} (170 \text{ ГПа}) = 3 \cdot 10^{-3} E_F$

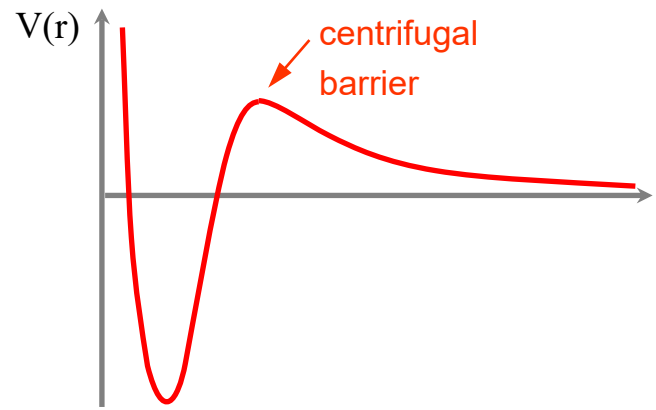
газ атомов [MIT 2012] — $\max(T_{\text{crit}}/E_F) = 0,17$

p-спаривание: сверхтекучесть ^3He — $T_{\text{crit}} \sim 10^{-3} E_F$

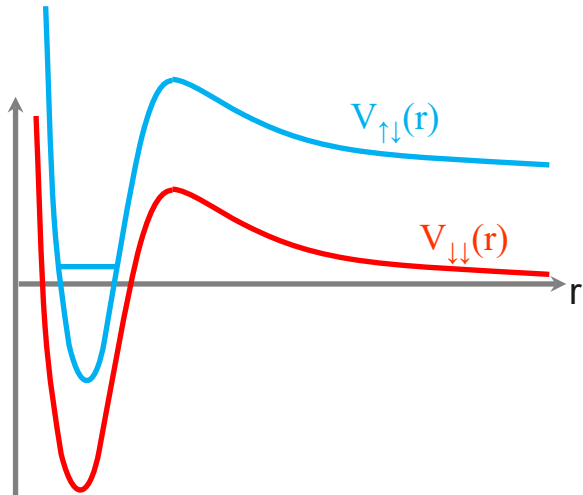
d-спаривание: купратные сверхпроводники — $T_{\text{crit}} = 0.01 E_F$ [Bozovic 1991]

Максимальное $T_{\text{кр}}/E_F$ для p -волнового спаривания в газе атомов 40K ?

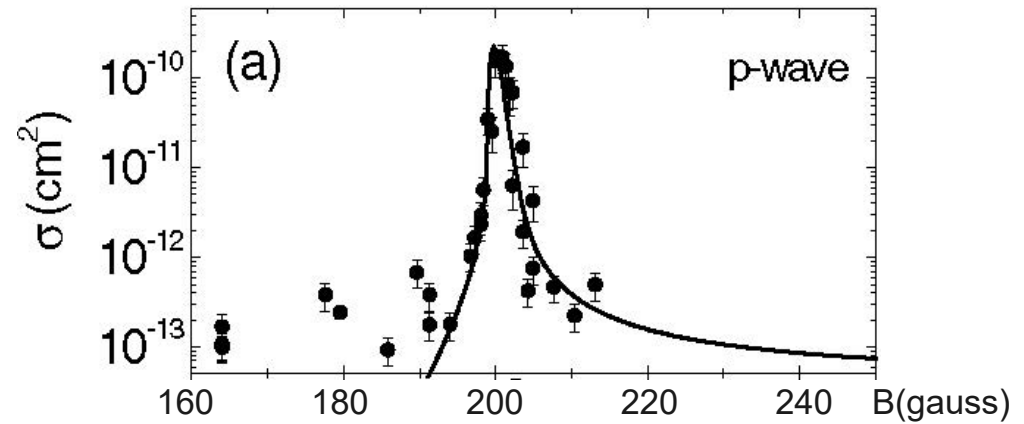
Центробежный барьер
мешает сильному
взаимодействию



p-wave electric interactions: Fano-Feshbach resonance in ^{40}K

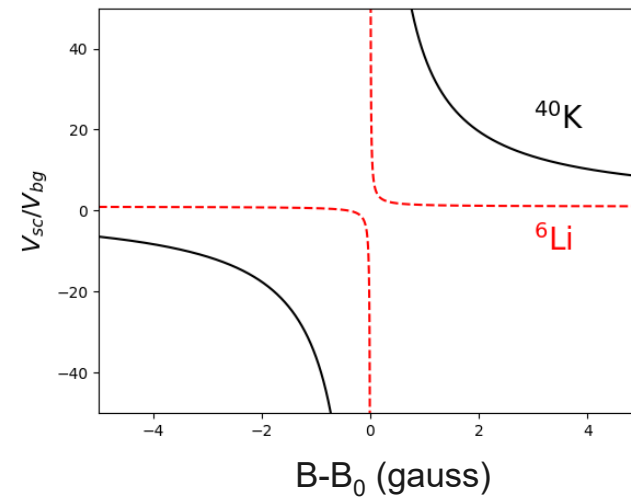


resonance for 2 atoms in $F=9/2, F_z=-7/2$ [D.Jin 2003]

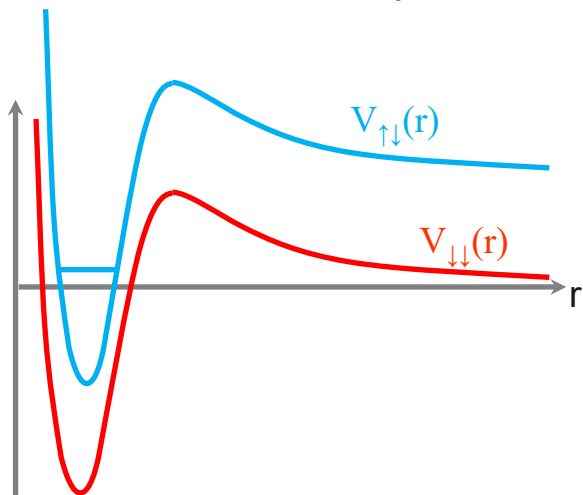


$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} 3 \sin^2 \delta_1$$

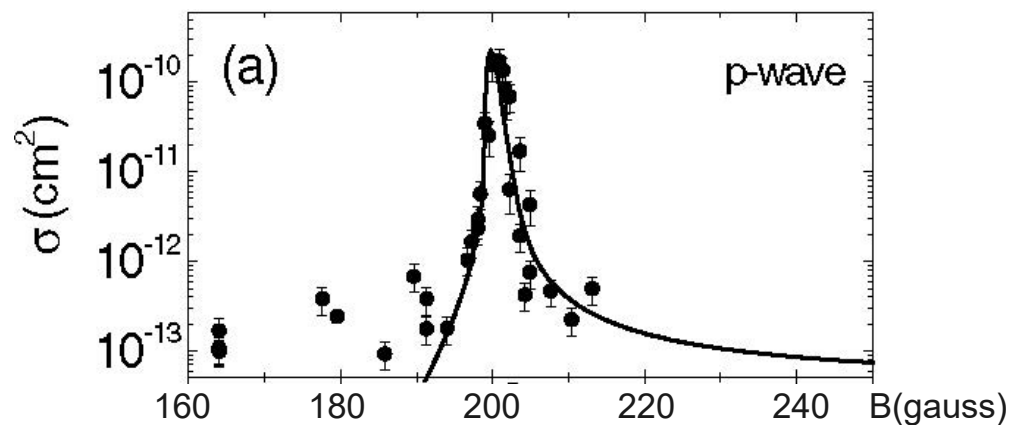
$$\text{tg} \delta_1 = -k^3 V_{\text{scatt}}(B) = -k^3 V_{\text{bg}} \left[1 - \frac{\Delta}{B - B_0} \right]$$



p-wave electric interactions: Fano-Feshbach resonance



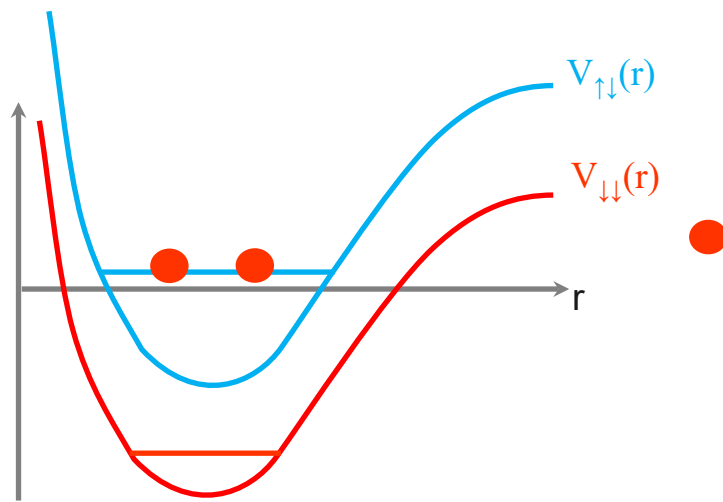
FF resonance for 2 atoms in $F=9/2, F_z=-7/2$ [D.Jin 2003]



2- and 3-body collisional losses

2-body loss (rate $\sim n$): $\left| F = \frac{9}{2}, F_z = -\frac{7}{2} \right\rangle + \left| \frac{9}{2}, -\frac{7}{2} \right\rangle \longrightarrow \left| \frac{9}{2}, -\frac{7}{2} \right\rangle + \left| \frac{9}{2}, -\frac{9}{2} \right\rangle$

3-body loss (rate $\sim n^2$):

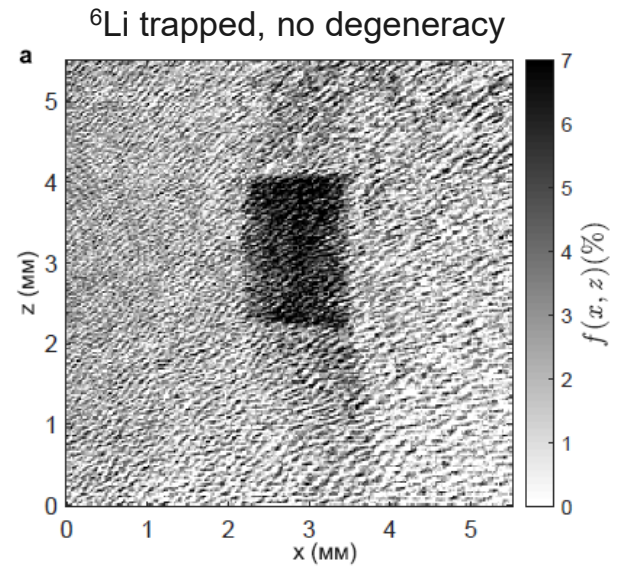
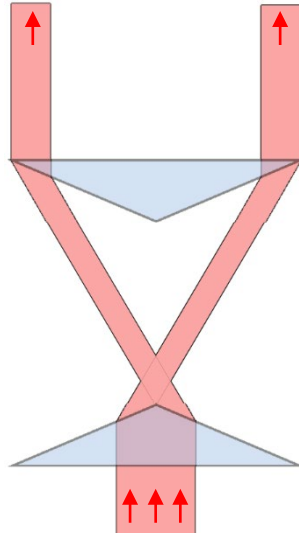
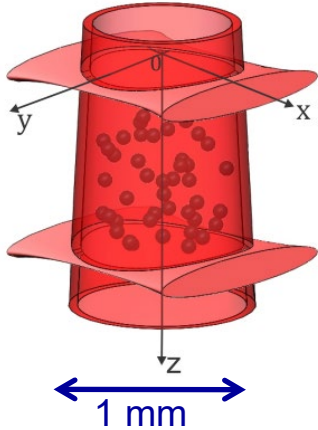


Inhibit losses: Make gas even more dilute

2-body loss rate $\sim n$; 3-body loss rate $\sim n^2$

Lifetime 10-100 s, $n^{-1/3} = 3\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$

Shallow thin-wall dipole trap – other way to dilute gas – expands. $\frac{T_{\min}}{E_{\text{Fermi}}} \sim \frac{2}{N^{1/3}}$



Аналогичная большая полая ловушка для ⁴⁰K ?