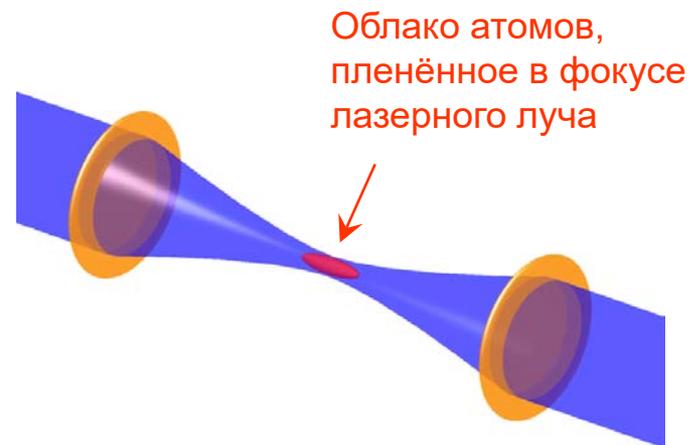
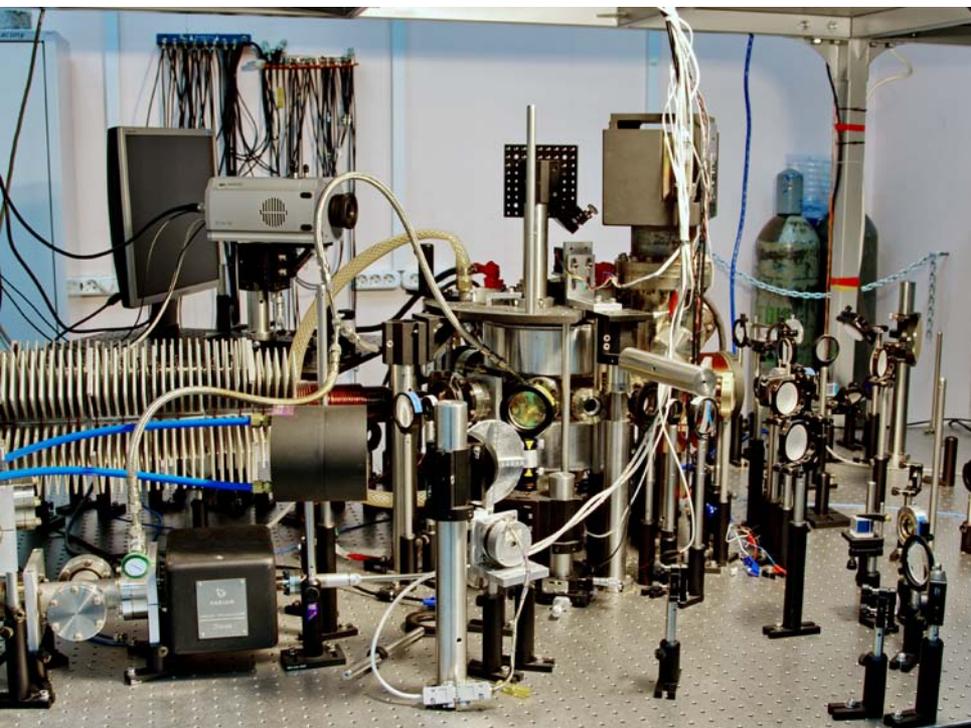


# Охлаждение до нанокельвинов лазерами и физика при низкой температуре

Андрей Турлапов, ИПФ РАН, г. Н. Новгород

Фрагмент установки:



## Как охлаждать

- известными способами
- так глубоко, как никто не охлаждал

## Физика газа атомов при нанокельвинах

## Холодные атомы и молекулы для других областей физики

- общая теория относительности
- стандартная модель элементарных частиц

# Лазерное охлаждение газа атомов

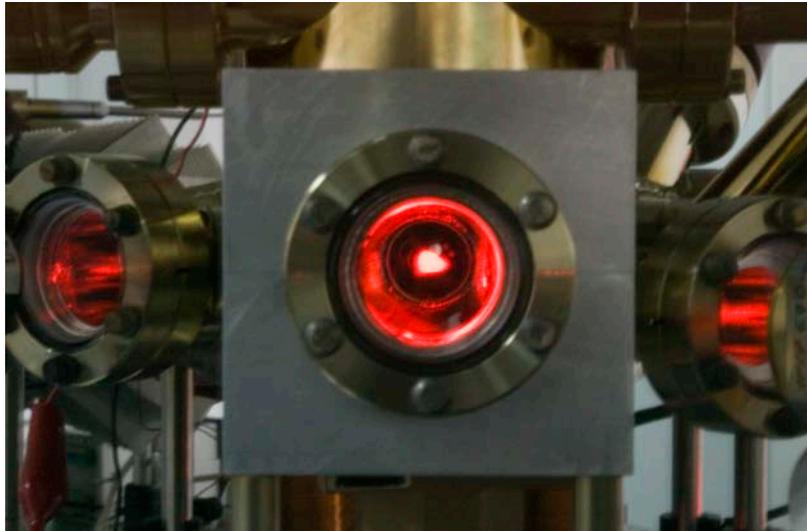


*Письма в ЖЭТФ, том 34, вып. 8, стр. 463 – 467*

*20 октября 1981 г.*

## РАДИАЦИОННОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ И МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ ПУЧКА АТОМОВ НАТРИЯ ДО 1,5 К ВО ВСТРЕЧНОМ ЛАЗЕРНОМ ЛУЧЕ

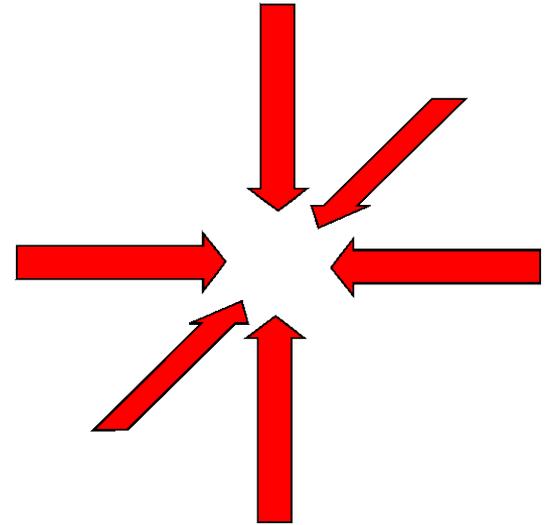
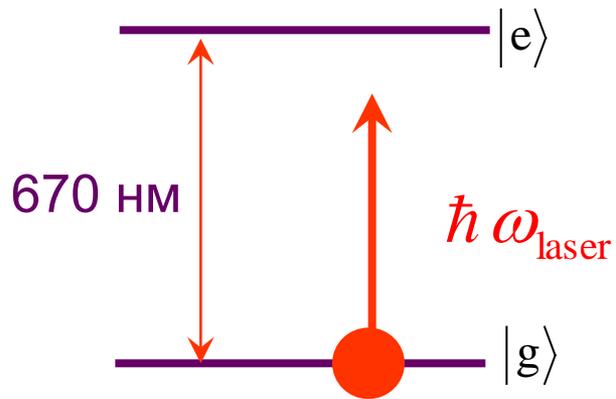
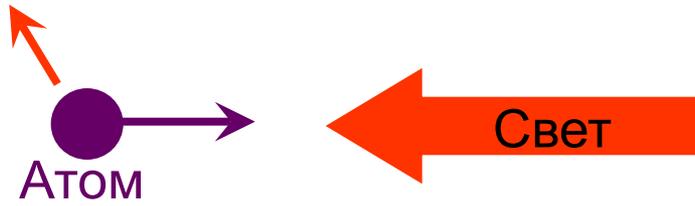
*С.В.Андреев, В.И.Балыкин, В.С.Летохов,  
В.Г.Миногин*

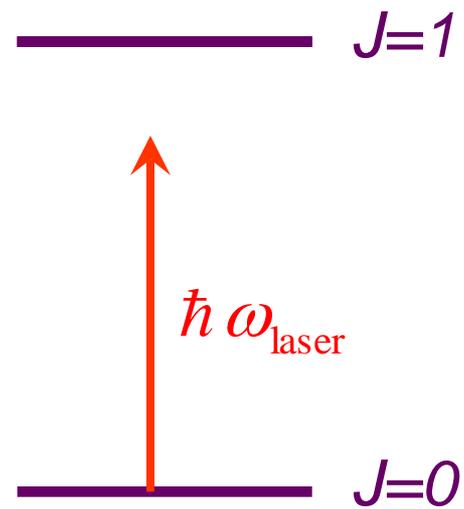
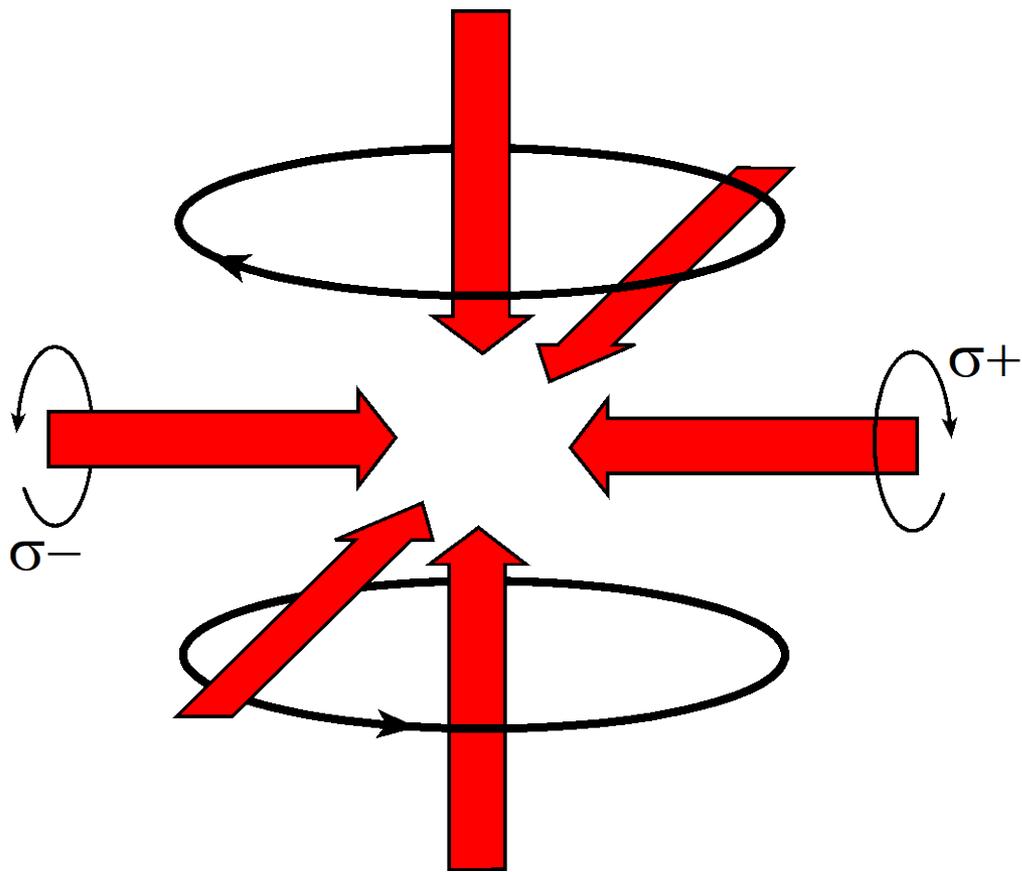


Нижний Новгород

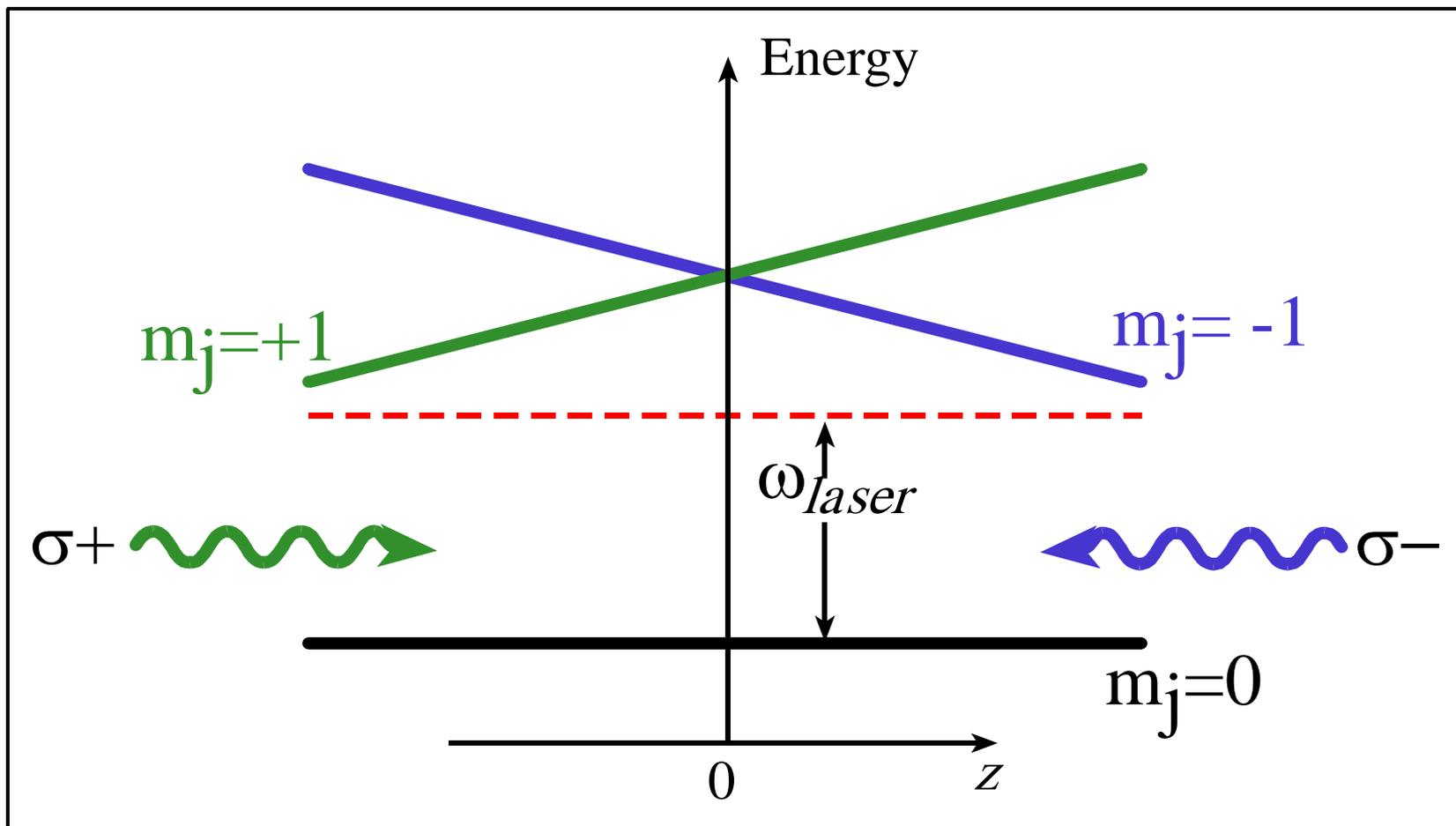
T=10 нК

# 1-ый этап: охлаждение резонансным светом





# Добавляем пленение





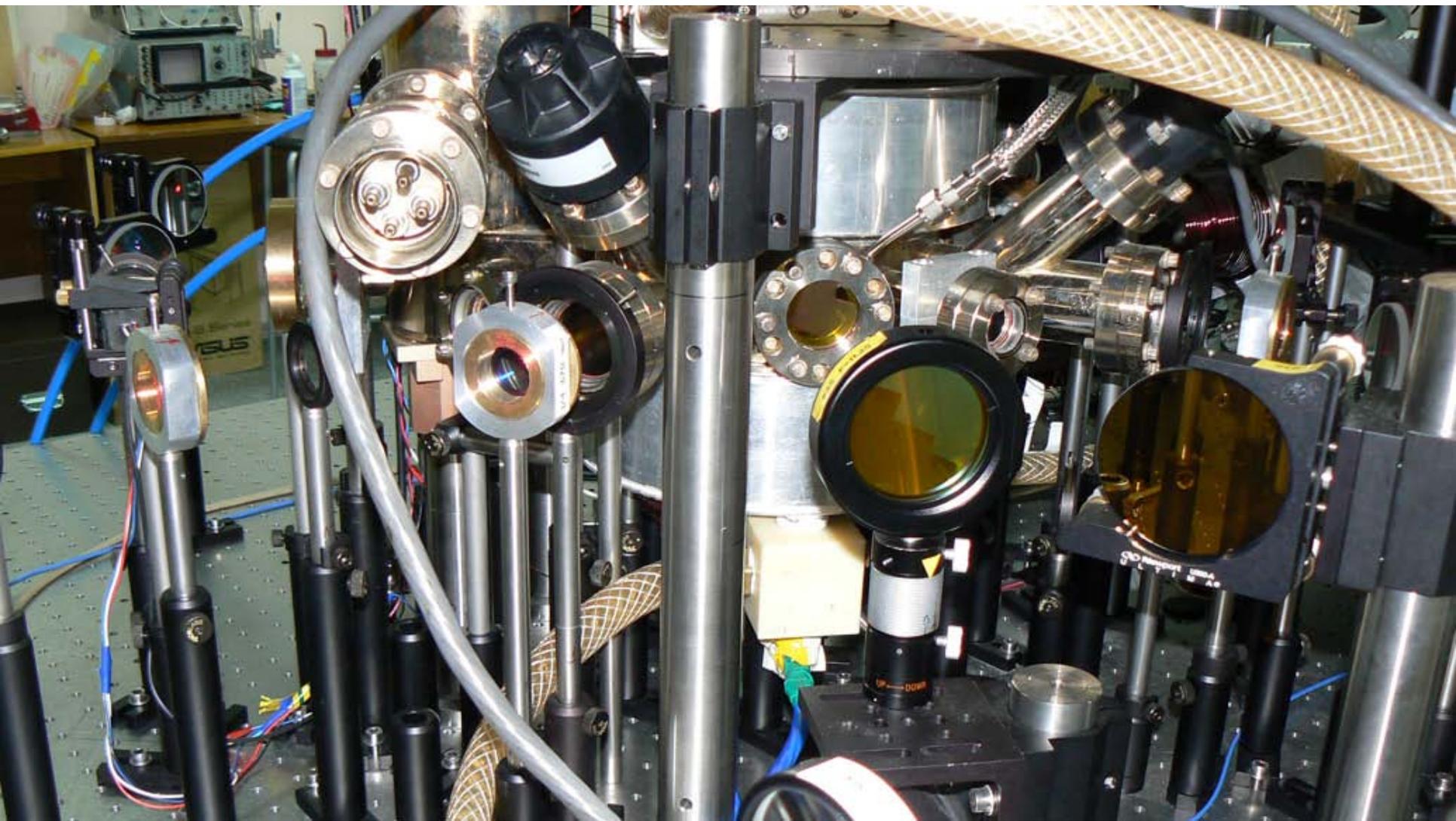
ВЫХОД

support  
5 8000

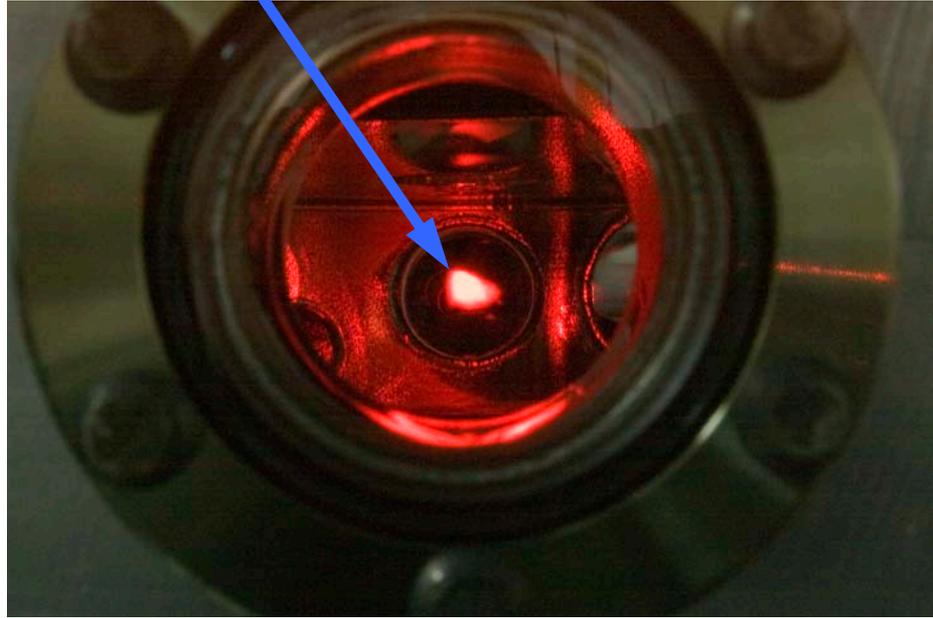
support

support

# Вакуумная камера, в которой происходит пленение и охлаждение газа



# $10^9$ атомов лития при $T=1$ мК



Предел охлаждения из-за фотонной  
отдачи:

$$T_{\min} = \frac{p_{\text{photon}}^2}{2m}, \quad p_{\text{photon}} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$$

$$T_{\min} = 4 \text{ мКК для Li}$$

Предел  
Летохова–Миногоина–Павлика  
(1977)

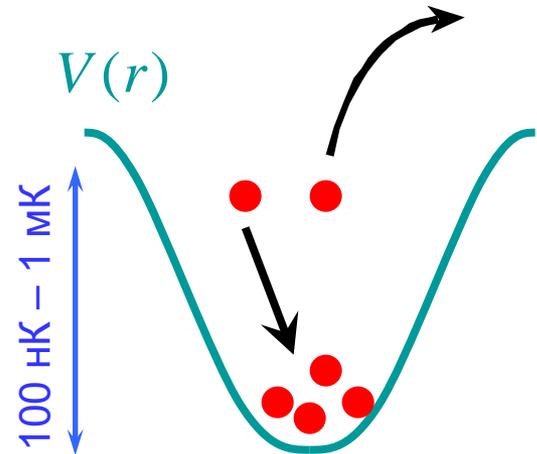
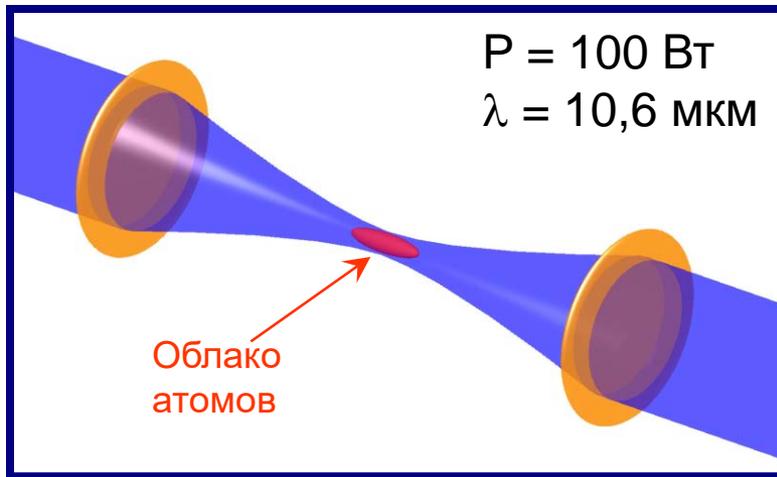
$$T_{\min} = \hbar\Gamma/2 = 150 \text{ мКК для Li}$$

$$\frac{\Delta x \Delta p}{2\pi\hbar} \sim 0.01$$

# Получение ферми- и бозе-газов (2-й этап)

Охлаждение выпариванием в консервативном потенциале  
Длина волны лазера много больше резонансной длины волны атома.  
Спонтанное излучение 1 фотон за час

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

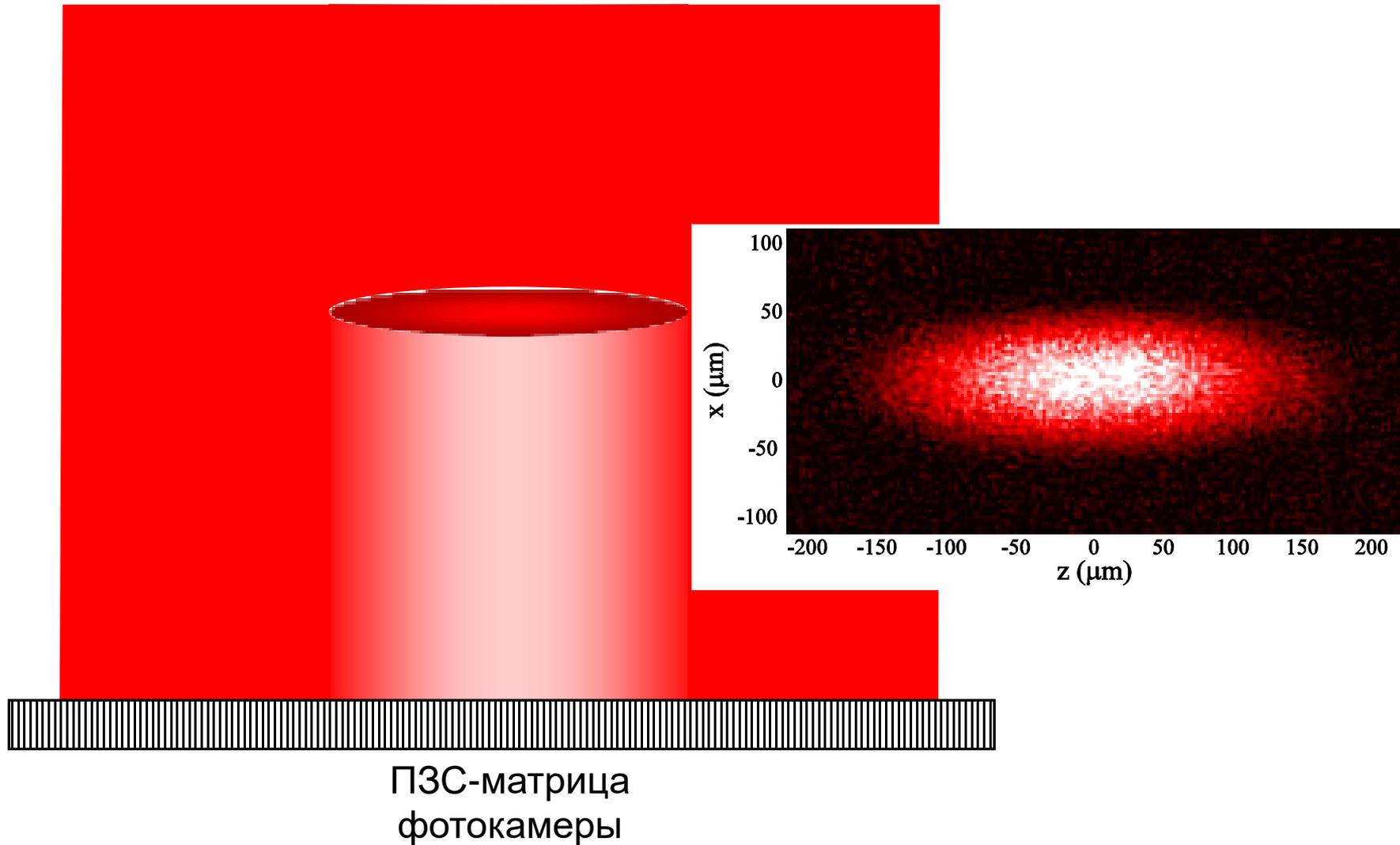


Эффективность:

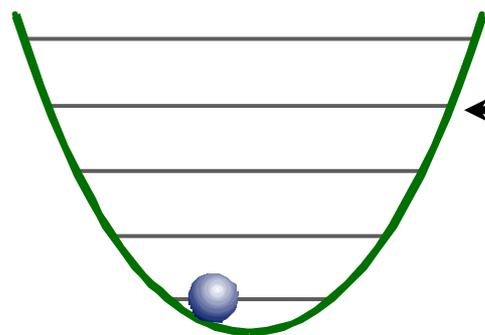
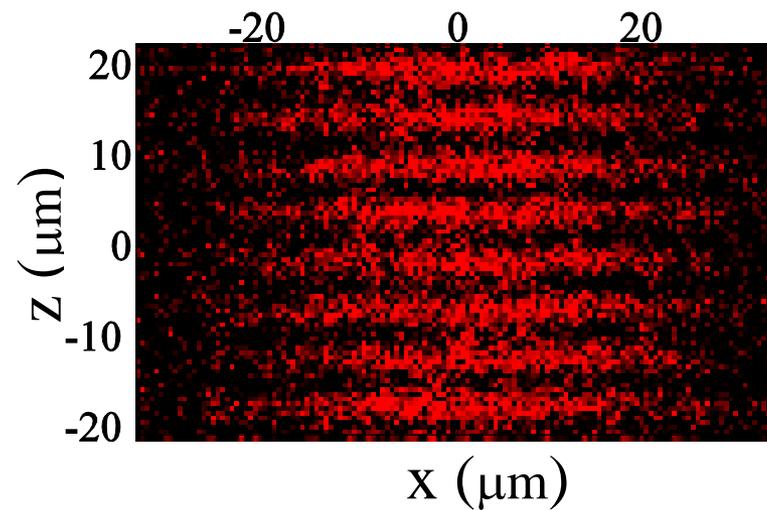
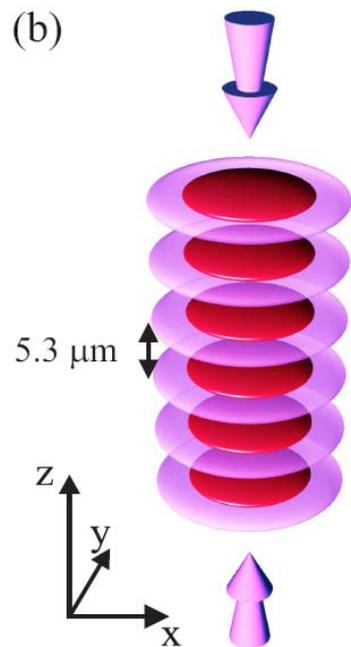
В начале:  $10^6$  атомов при  $300 \text{ мК}$ , фазовая плотность =  $10^{-6}$

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

# Диагностика – фотография



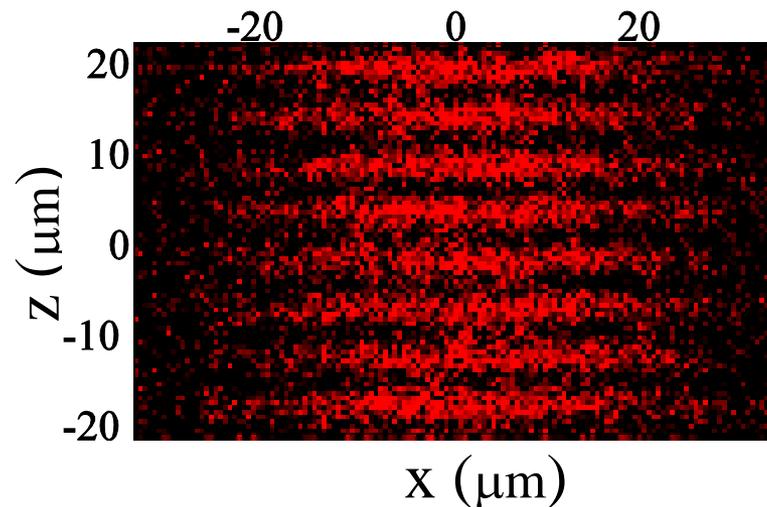
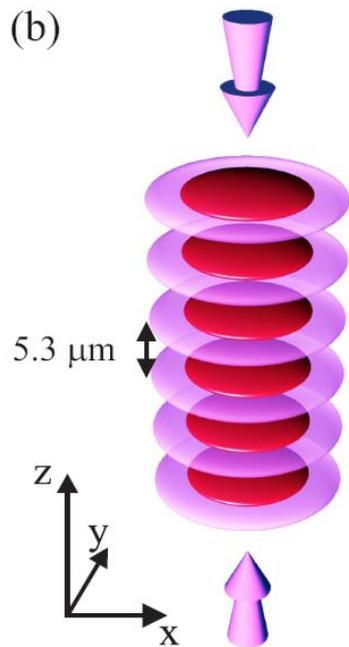
# Термометрия почти идеального ферми-газа



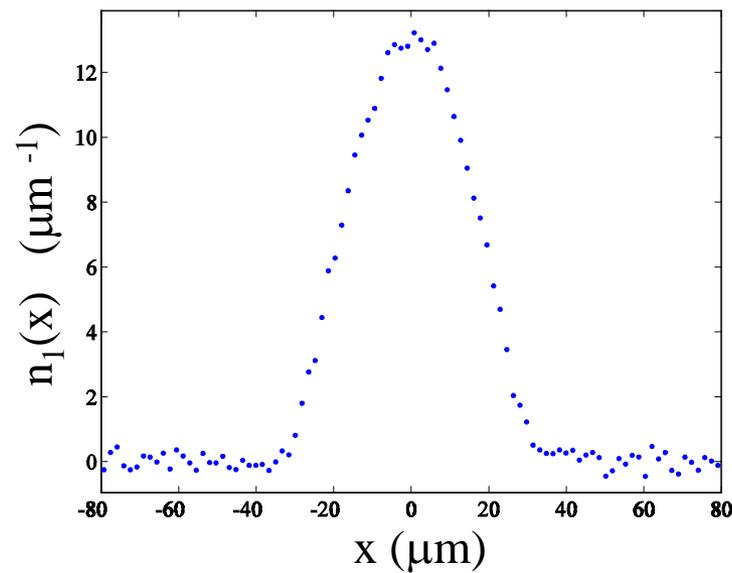
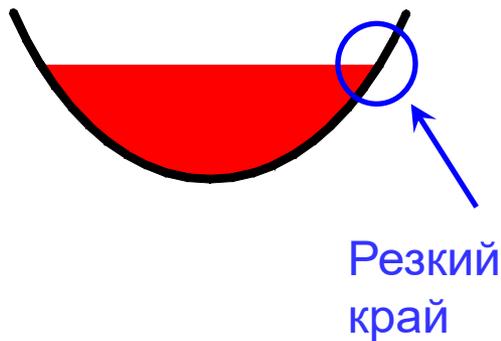
← энергия Ферми

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

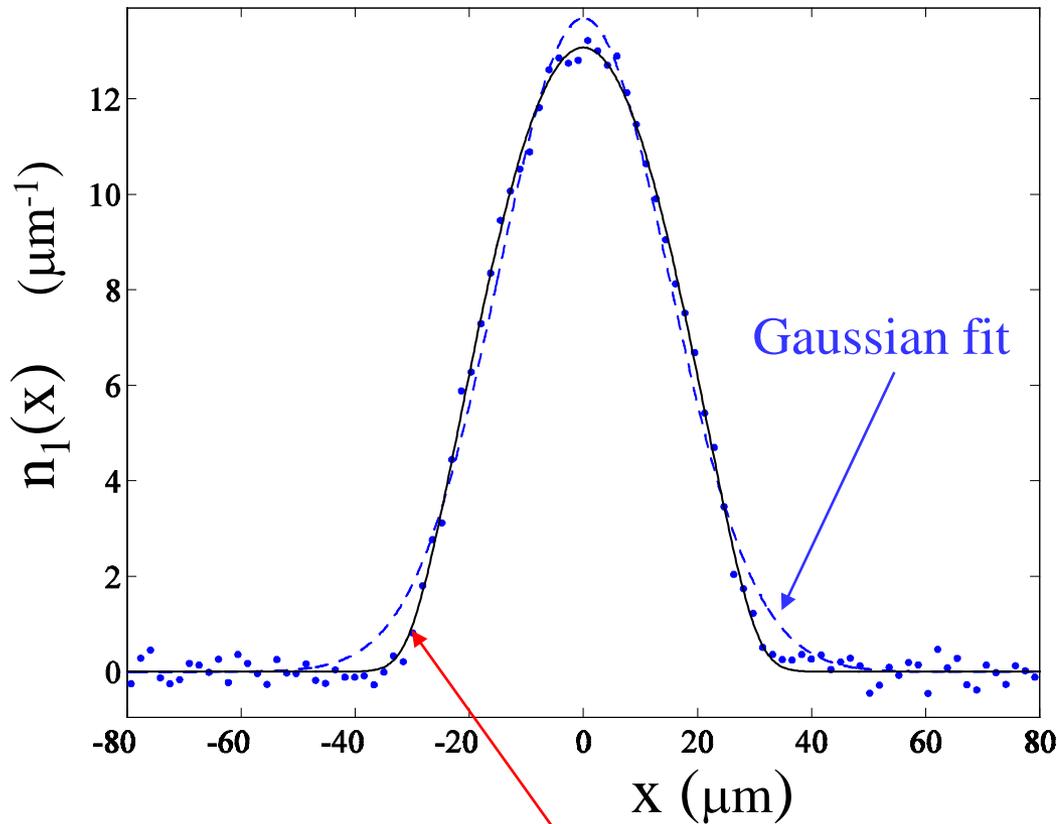
# Термометрия почти идеального ферми-газа



$$\frac{M\omega_{\perp}^2\rho^2}{2}$$



# Термометрия почти идеального ферми-газа



$$T=0.1 \text{ E}_F=10 \text{ nK}$$

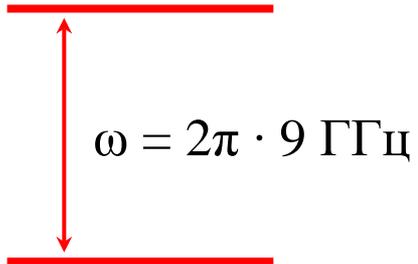
$$E_F = \hbar\omega_{\perp} \sqrt{2N}$$

N ~ 1000 атомов  
 В КАЖДОМ  
 СПИНОВОМ  
 СОСТОЯНИИ

2D Thomas-Fermi profile: 
$$n_1(x) = - \sqrt{\frac{m\omega_{\perp}}{2\pi\hbar}} \left( \frac{T}{\hbar\omega_{\perp}} \right)^{3/2} \text{Li}_{3/2} \left( - e^{\frac{\mu - m\omega_{\perp}^2 x^2}{2T}} \right)$$

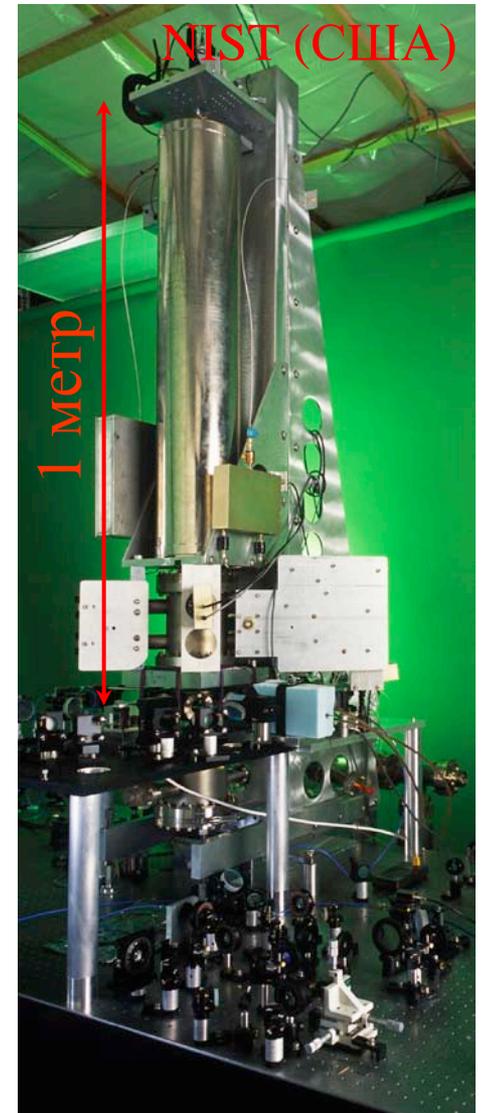
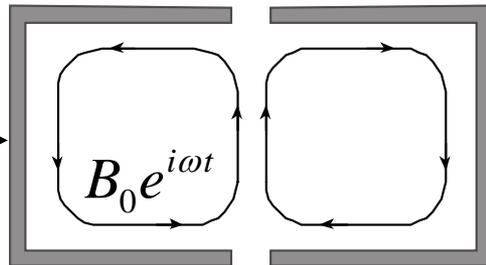
# Принцип работы часов на ультрахолодных атомах

Основные  
уровни Cs:



Часы

$e^{i\omega t}$



# Спектроскопия ультрахолодных молекул (например, CaF)

## Поиск дипольного момента электрона



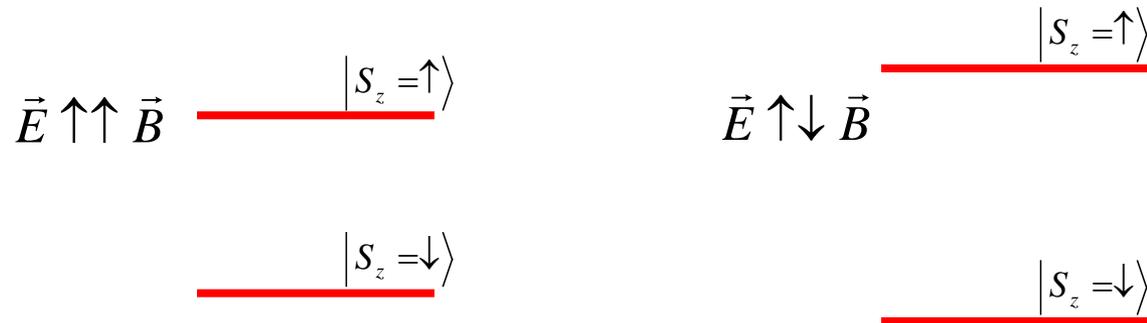
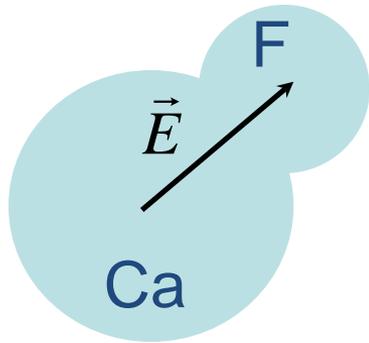
Стандартная модель:  $d_e = 10^{-38}$  е см

Альтернативные модели:  $d_e = 10^{-27}$  е см и менее

Известно (АСМЕ collaboration, 2013):  $|d_e| < 10^{-28}$  е см

Сдвиг  $U = -\vec{d}_e \cdot \vec{E}$ ,  $\vec{d}_e = d_e \frac{\vec{S}}{\hbar/2}$

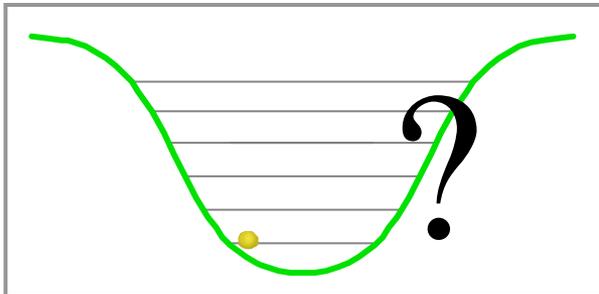
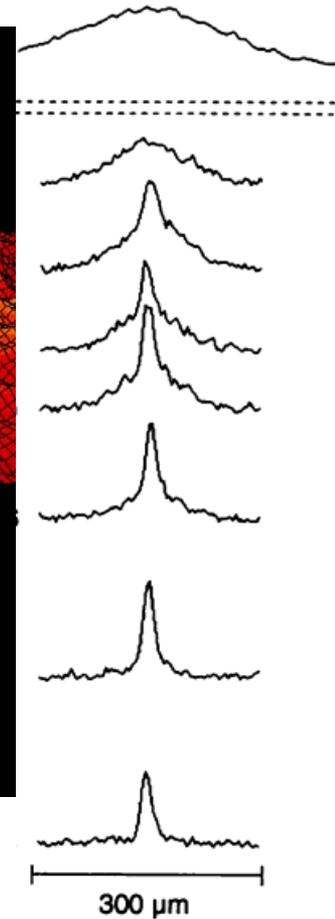
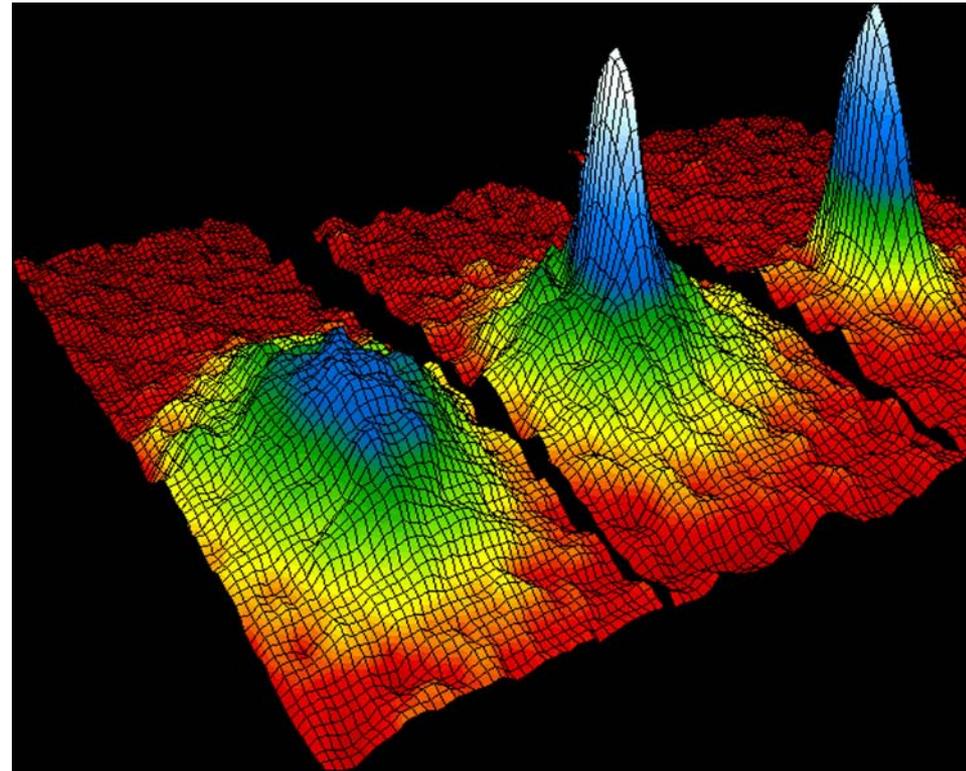
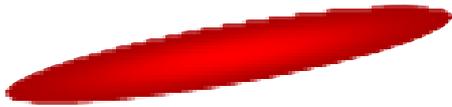
В молекуле  $E_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \sim 100$  ГВ/см



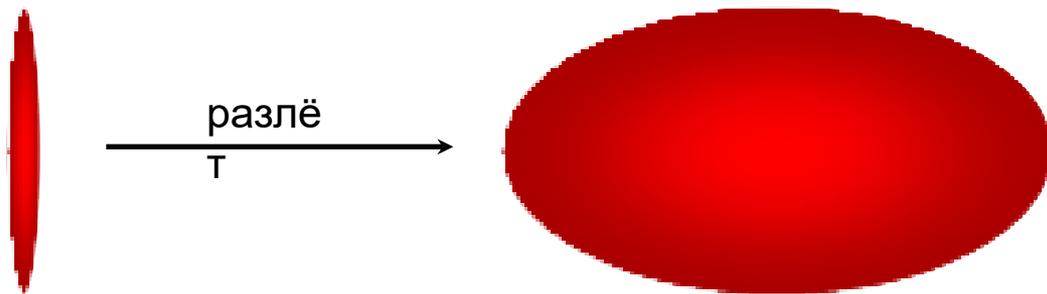
# Нобелевский эксперимент по бозе-конденсации атомов



Carl Wieman, Eric Cornell  
и коллеги (M. H. Anderson, J.  
R. Ensher, M. R. Matthews),  
NIST (г. Болдер, США)  
[Science 1995]

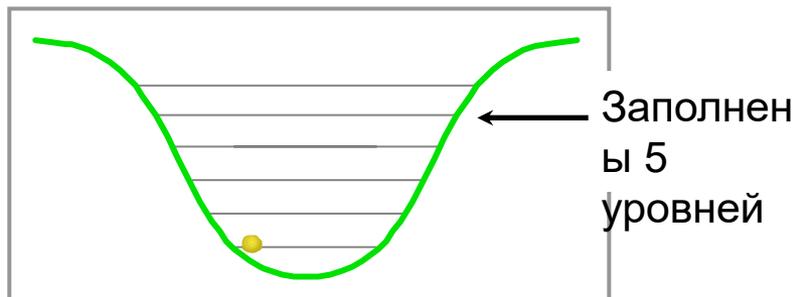
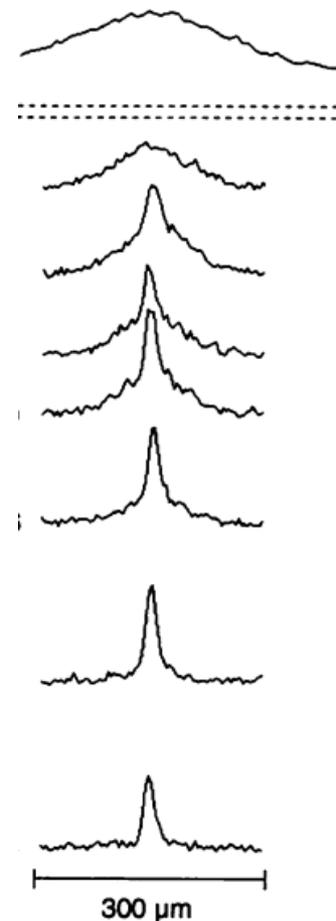


# Нобелевский эксперимент по бозе-конденсации атомов

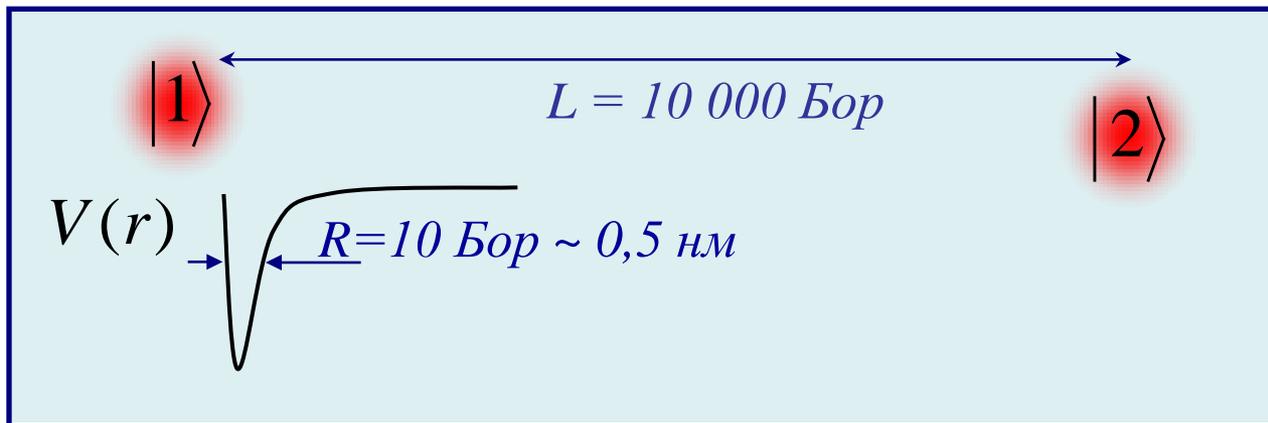


$$\frac{N_{\text{BEC}}}{N} = 1 - \left( \frac{T}{T_{\text{BEC}}} \right)^3$$

$$T_{\text{BEC}} \approx 0.2 E_{\text{Fermi}} = 0.2 \hbar (\omega_x \omega_y \omega_z)^{1/3} (6N)^{1/3}$$



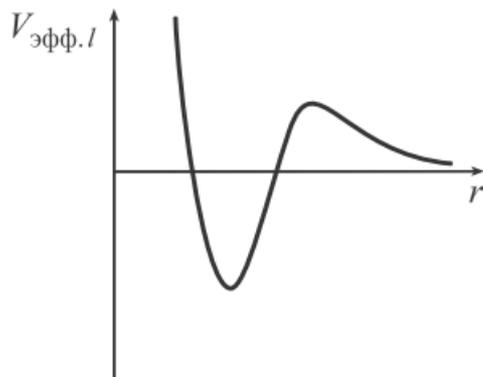
# Взаимодействие в разреженном газе



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

Для p-столкновений ( $l=1$ ) центробежный барьер  $\sim 1$  мК  $\gg T$ ,  $E_F \sim 1$  мК

$$V_{eff}(r) = V(r) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2}$$

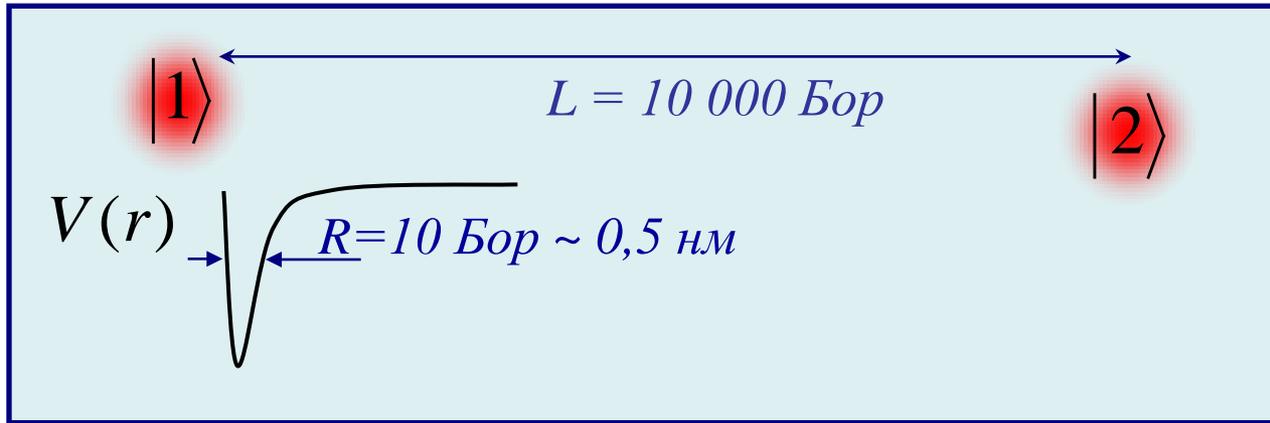


$$\psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} + f(\vec{k}, \vec{k}') \frac{e^{ikr}}{r} (2\pi)^{-3/2}$$

$$e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) i^l j_l(kr) P_l(\hat{k} \cdot \hat{x}) =$$

$$= j_0(kr) + \sum_{l=1}^{\infty} \dots$$

# Физический смысл длины рассеяния $a$



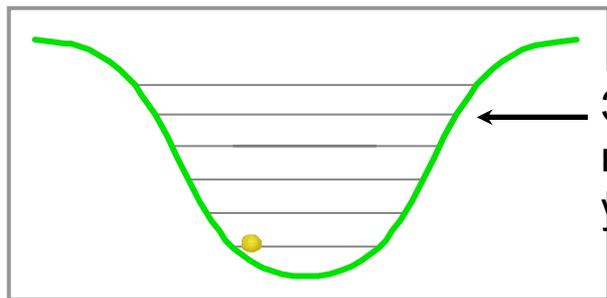
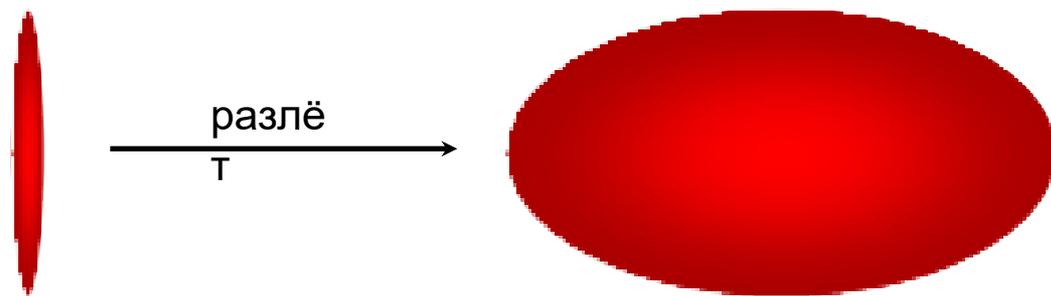
$$\psi(\vec{r}) = \psi_{\text{free}}(\vec{r}) + f(\vec{k}, \vec{k}') \frac{e^{ikr}}{r} (2\pi)^{-3/2}$$

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

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

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

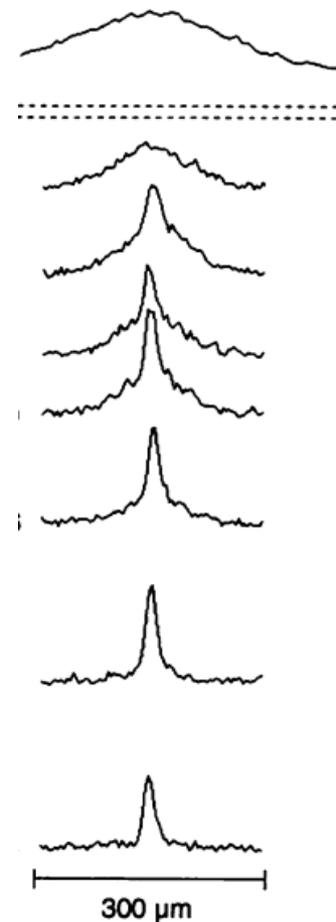
# Нобелевский эксперимент по бозе-конденсации атомов



Заполнены 5 уровней

$$U = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} n$$

$a = 5 \text{ nm}$



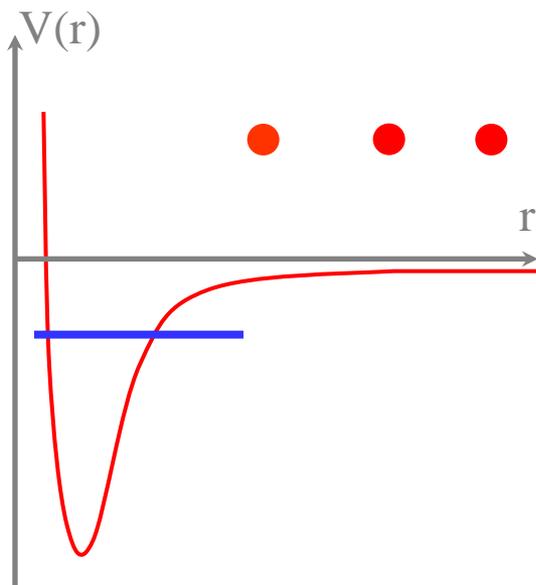
# Доказательство бозе-конденсации. Эффект 1/6

*Письма в ЖЭТФ, том 42, вып. 4, стр. 169 – 172*

*25 августа 1985 г.*

## ВЛИЯНИЕ БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИИ НА НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗЕ

*Ю.Каган, Б.В.Свиштунов, Г.В.Шляпников*



# Interference of Bose condensates

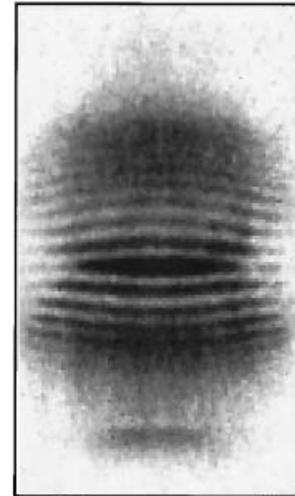
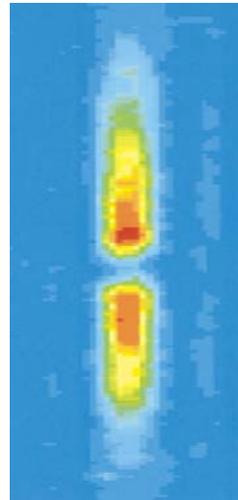


Wolfgang Ketterle  
и коллеги  
MIT (г.Бостон)  
[Science 1997]

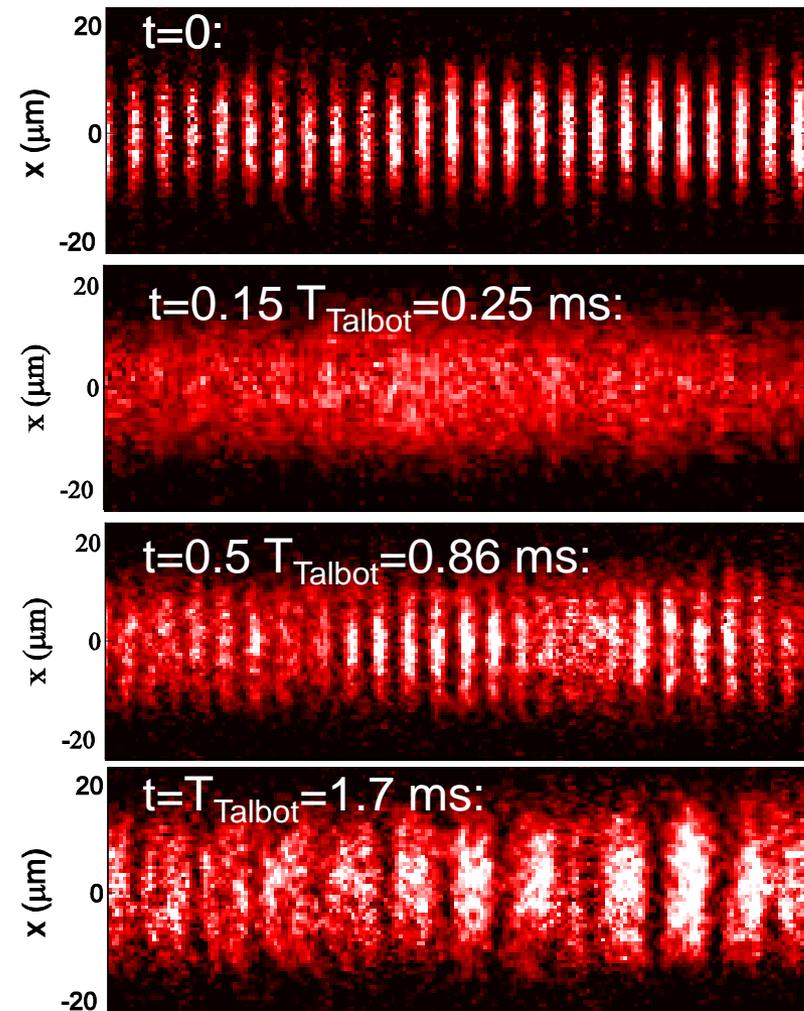
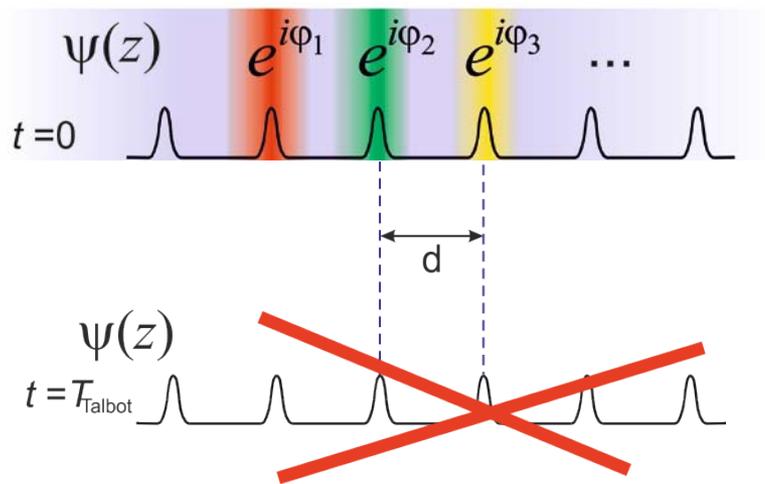
1997:

## Observation of Interference Between Two Bose Condensates

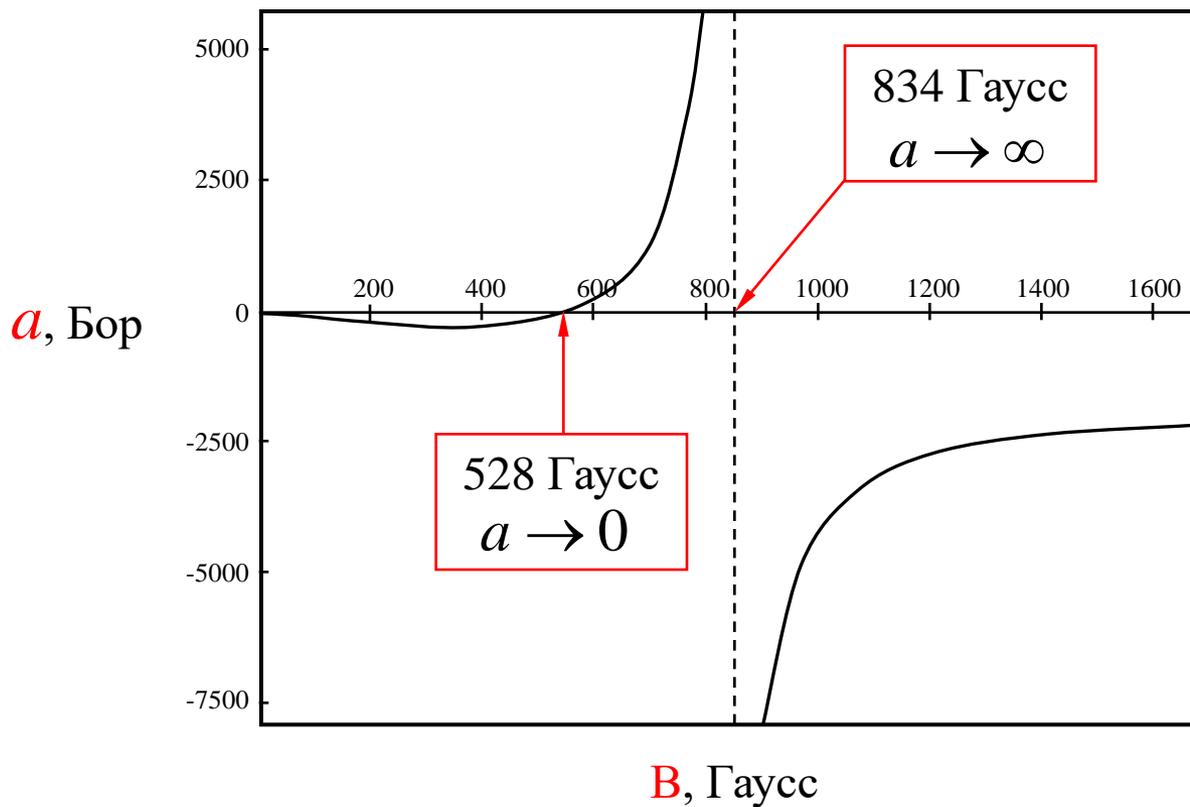
M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee,  
D. M. Kurn, W. Ketterle



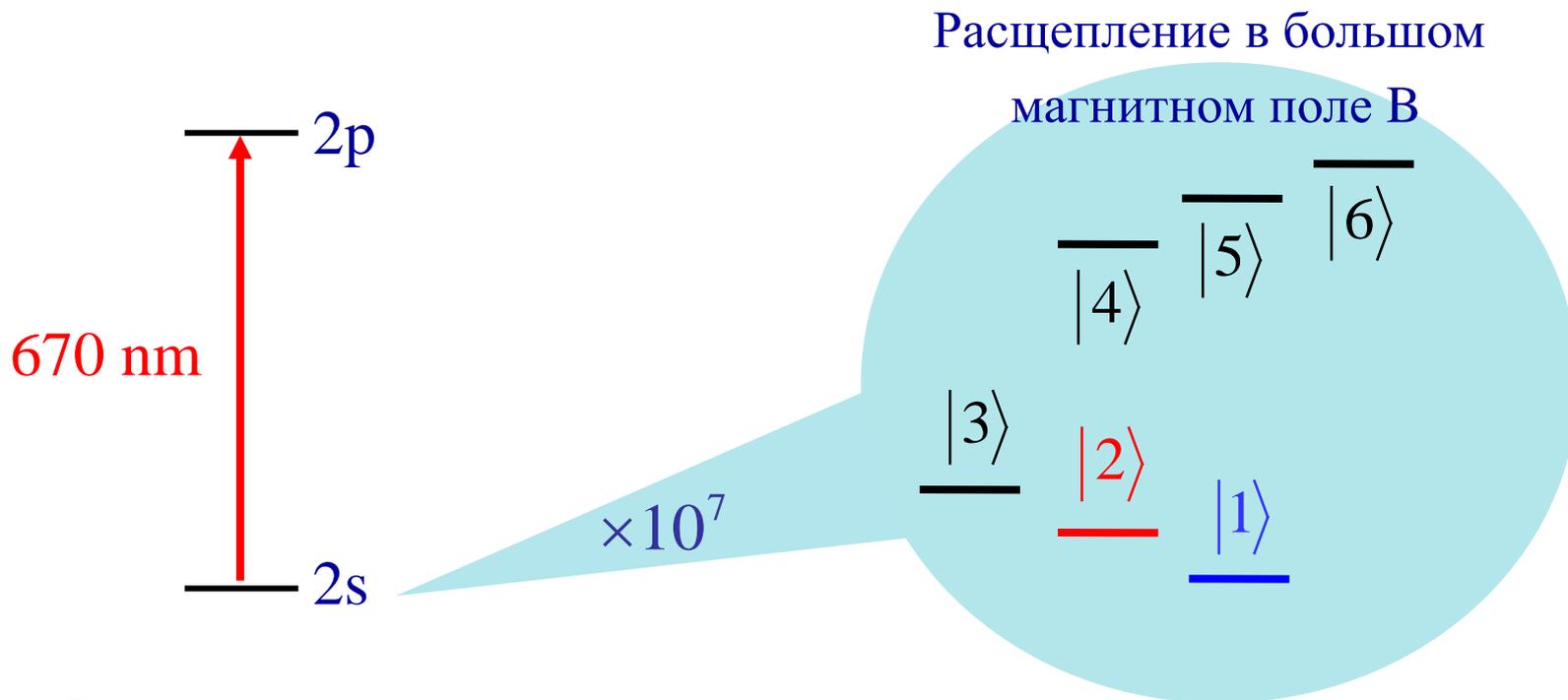
# Порядок в интерференции бозе-конденсатов со случайными фазами



# Резонанс Фешбаха: длина рассеяния $a$ в зависимости от магнитного поля $B$



# Спиновые состояния атома ${}^6\text{Li}$



Основное состояние

электрона:  $1s^2 2s^1$

Ядерный спин:  $I=1$

Полный спин  $\frac{1}{2}$  вниз:

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

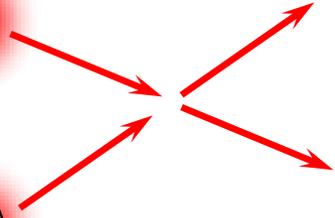
Полный спин  $\frac{1}{2}$  вверх:

$$|1\rangle = |\uparrow\rangle = \left| -\frac{1}{2}, 1 \right\rangle$$

# Настройка длины рассеяния $a$ с помощью резонанса Фешбаха

$|1\rangle$

$|2\rangle$



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

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

$$\left| \text{валентные электроны} \right\rangle = (\dots) \left| \text{триpletное состояние} \right\rangle + (\dots) \left| \text{синглетное состояние} \right\rangle$$

Синглетный 2-атомный потенциал:

электронные спины  $\uparrow\downarrow$



Триpletный 2-атомный потенциал:

электронные спины  $\uparrow\uparrow$

# Преобразование ферми-газа в бозе-газ

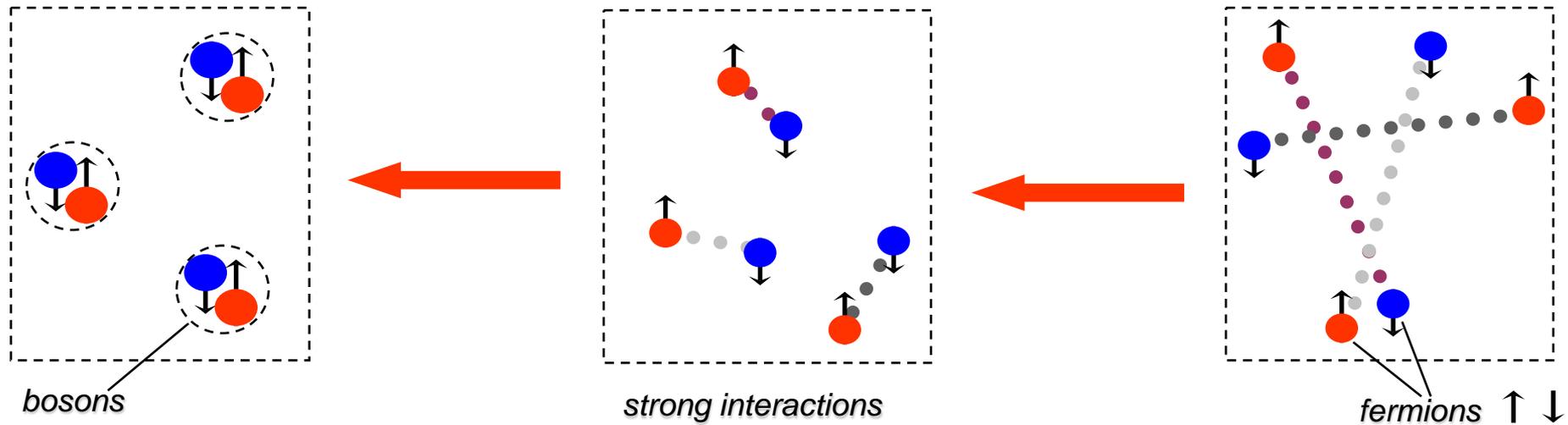
SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 27, NUMBER 3

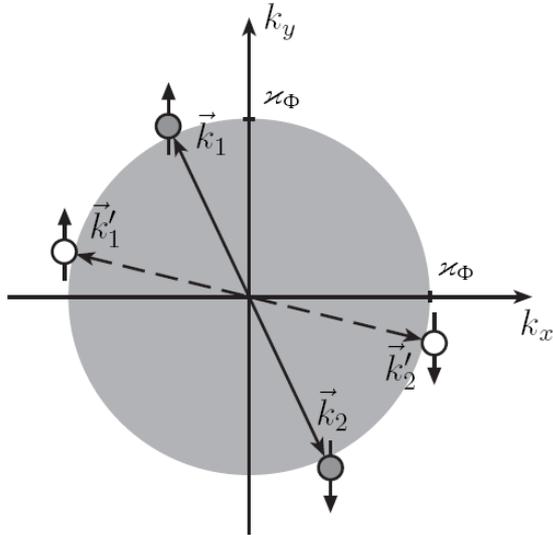
SEPTEMBER, 1968

## COLLECTIVE PROPERTIES OF EXCITONS IN SEMICONDUCTORS

L. V. KELDYSH and A. N. KOZLOV



# Плавный переход между ферми- и бозе-статистикой



Теория сверхтекучего ферми-газа  
по Боголюбову [1958]



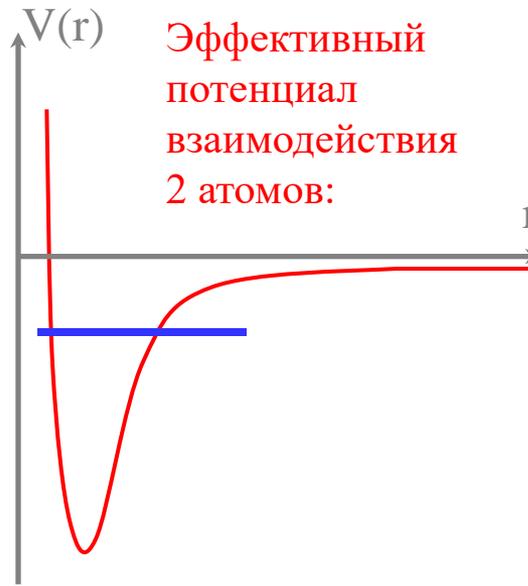
$$\hat{H} = \sum_p \frac{p^2}{2m} (\hat{a}_{p\uparrow}^+ \hat{a}_{p\uparrow} + \hat{a}_{p\downarrow}^+ \hat{a}_{p\downarrow}) + g \sum_{p',p} \hat{a}_{p'\uparrow}^+ \hat{a}_{-p'\downarrow}^+ \hat{a}_{p\downarrow} \hat{a}_{-p\uparrow}$$

Решение в виде прямого  
произведения куперовских пар:

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

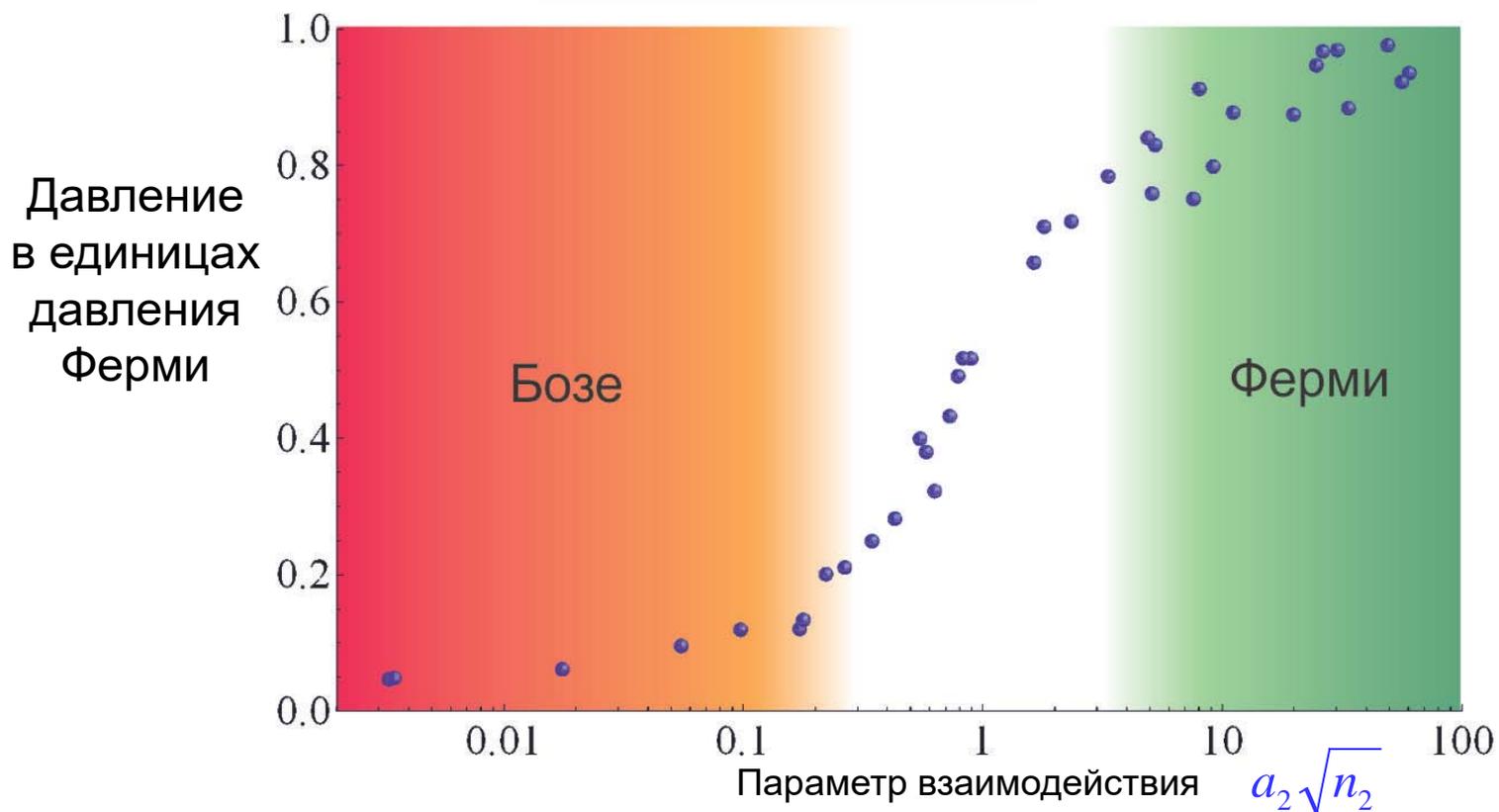
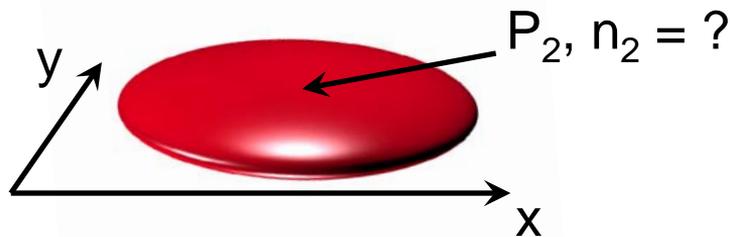
$$g \approx \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}$$

$a$  – длина s-рассеяния

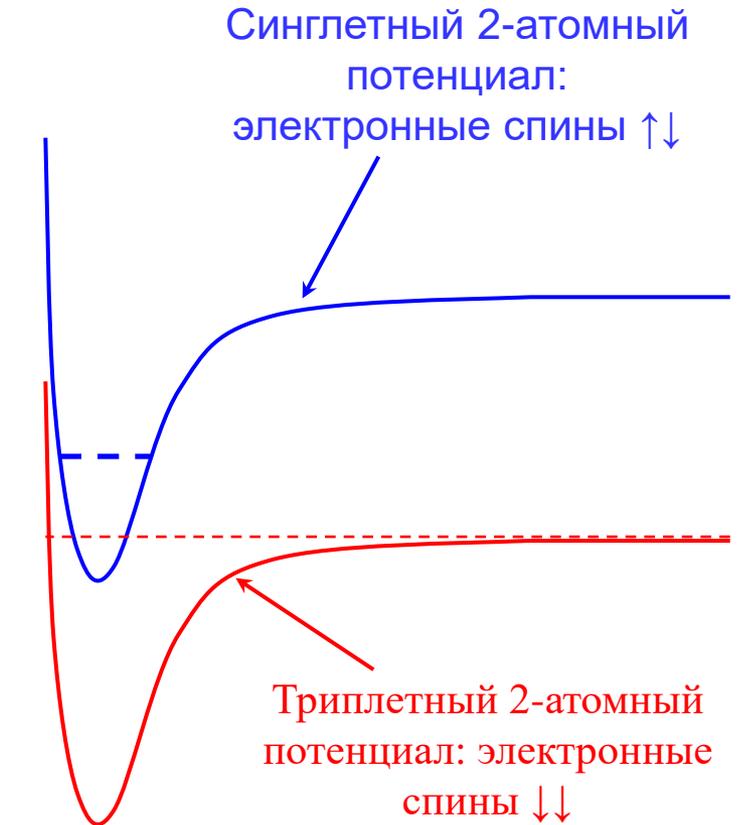
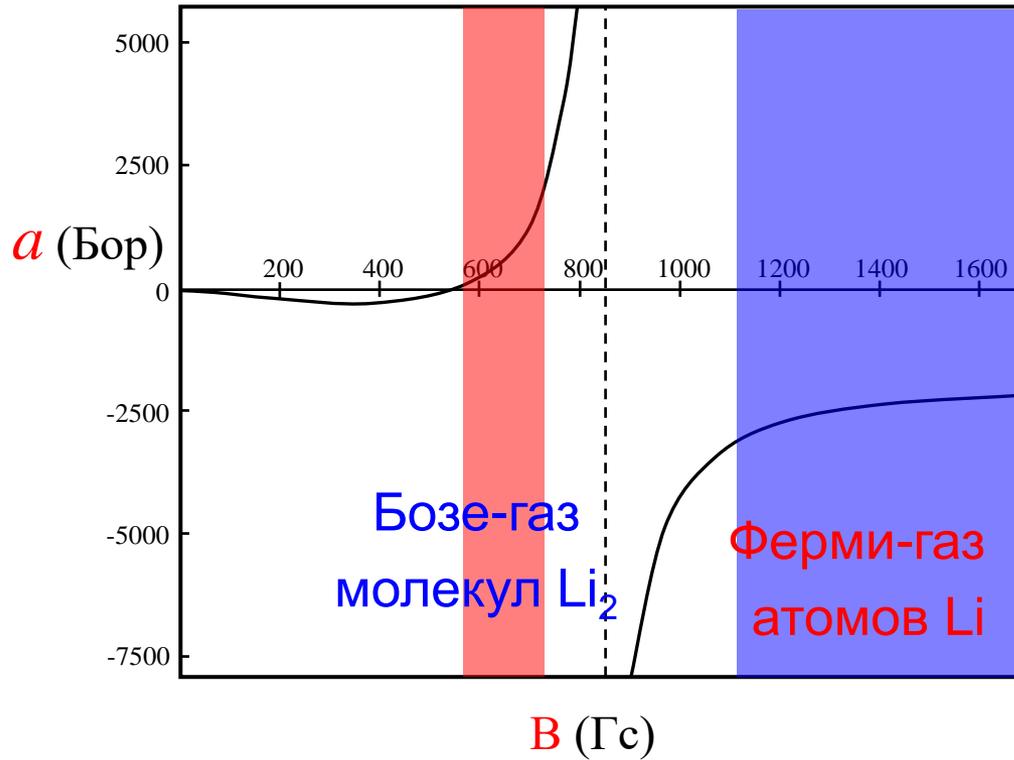


Эффективный  
потенциал  
взаимодействия  
2 атомов:

# Плавный обратимый переход от атомов-фермионов к молекулам-бозонам



# Переход от ферми-газа атомов к бозе-конденсату молекул

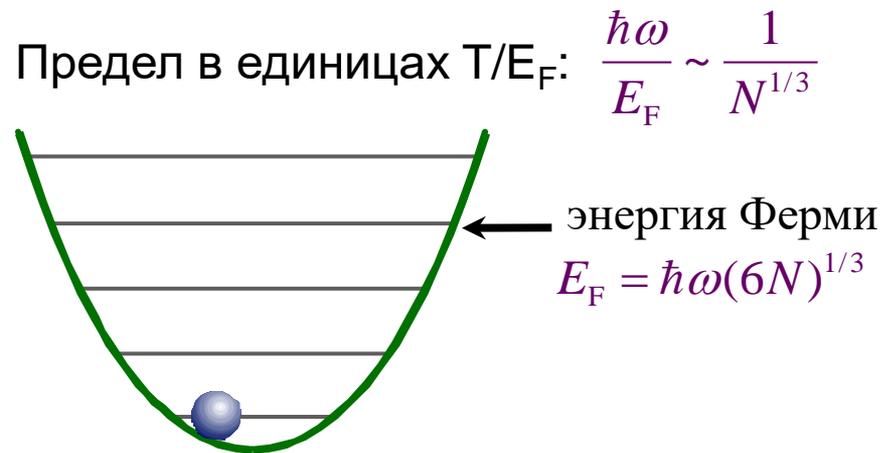


$$T_{\text{crit}} \sim \varepsilon_{\text{F}} e^{-\pi/2\kappa_{\text{F}}|a|}$$

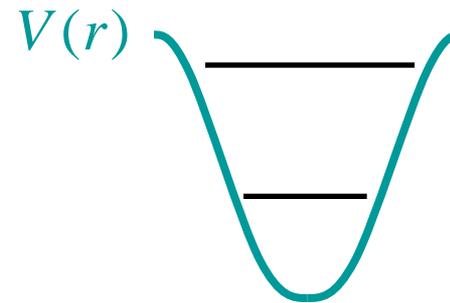
# Предел охлаждения

Спиновая температура ядер родия (твёрдое тело) – 100 пК

Кинематическая температура в ультрахолодных атомных газах  
~ 1 нК, 0,01  $E_F$

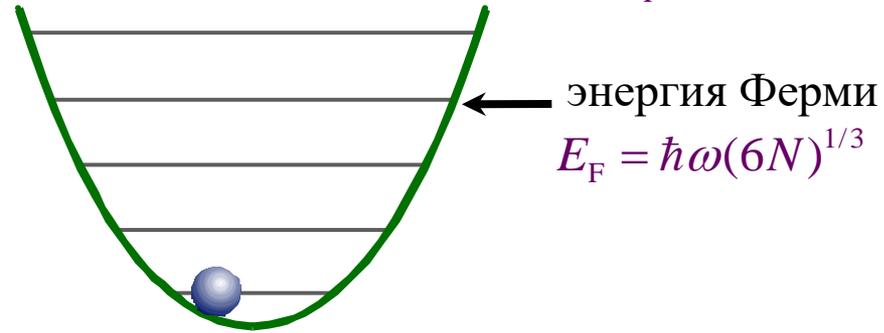


Предел в единицах  $T \sim 10$  нК  
ограничен числом уровней в яме

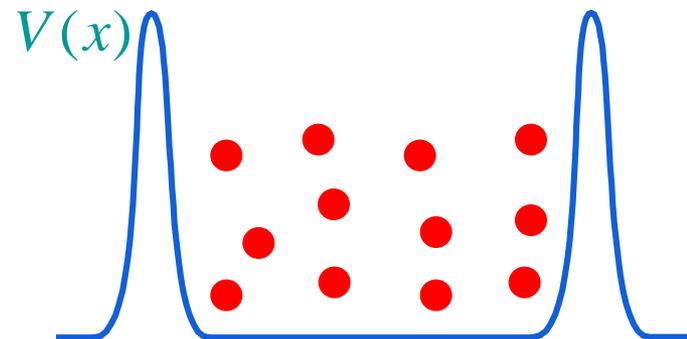
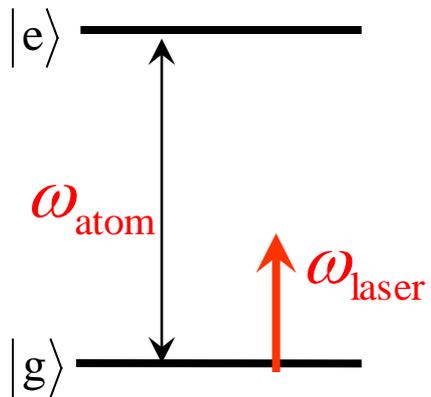
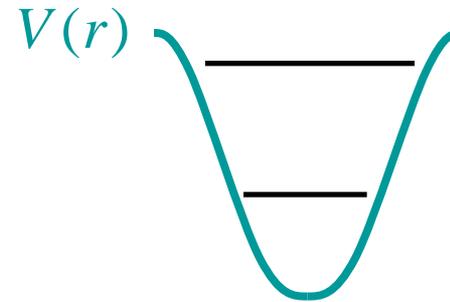


# Предел охлаждения

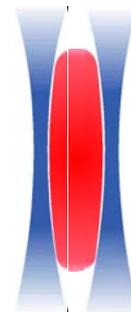
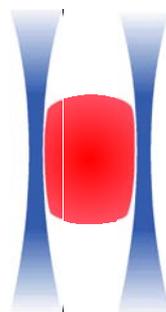
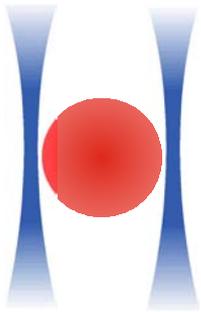
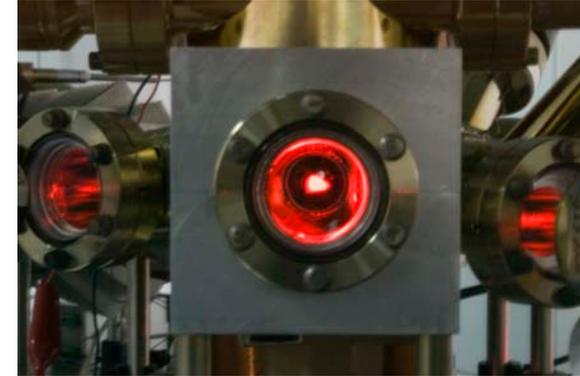
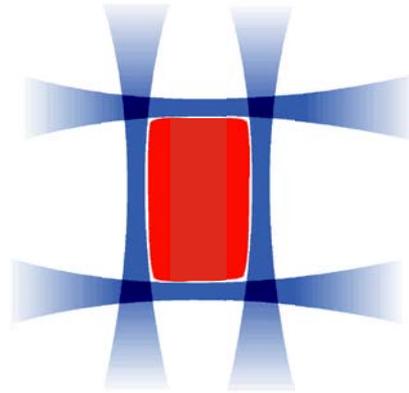
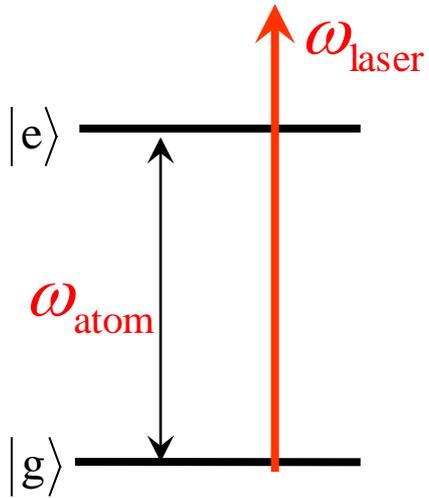
Предел в единицах  $T/E_F$ :  $\frac{\hbar\omega}{E_F} \sim \frac{1}{N^{1/3}}$



Предел в единицах  $T \sim 10$  нК  
ограничен числом уровней в яме



# Box trap with adjustable volume



Similar to harmonic trap

$$T_{\text{min}}/E_F \sim 1/N^{1/3}$$

# Проверка постулата Эйнштейна об эквивалентности гравитационной и инертной массы



$$m_{\text{grav}} = m_{\text{inertial}}$$

Модель  $\Lambda$ -CDM (cold dark matter + тёмная энергия с космологическим параметром  $\Lambda$ ) – во Вселенной

- 4,9% барионного вещества

- 26,8% тёмной материи (на основе данных о вращении галактик, пространственного спектра реликтового излучения, гравитационных линзах);

- 69,3% тёмной энергии (на основе анализа красного смещения сверхновых класса Ia)

$$m_{\text{grav}} \neq m_{\text{inertial}}$$

Квантовые теории гравитации

T. R. Taylor and G. Veneziano 1988

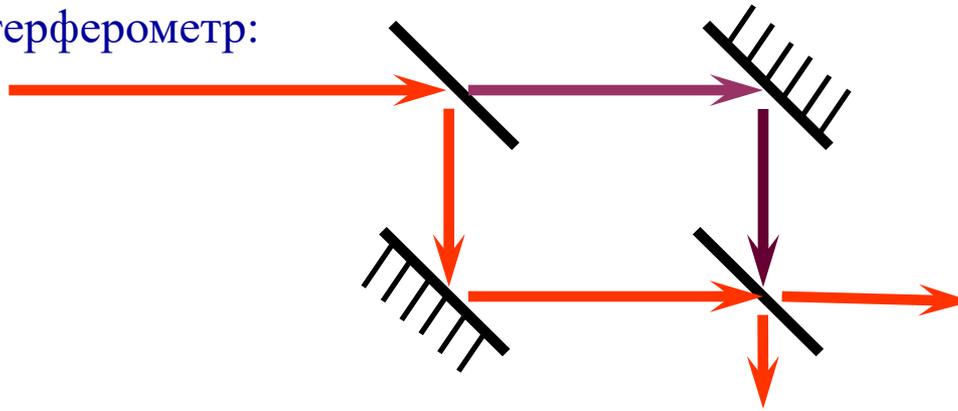
T. Damour and A. M. Polyakov 1994

S. Dimopoulos and G. F. Giudice 1996

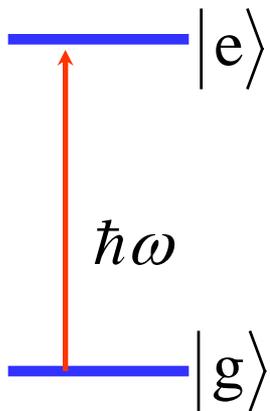
...

# Интерферометрия

Оптический интерферометр:

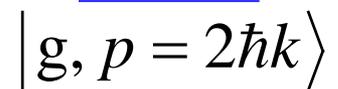
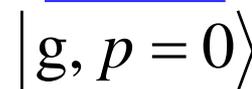


Стоячая оптическая волна - делительная пластинка для волн Дебройля



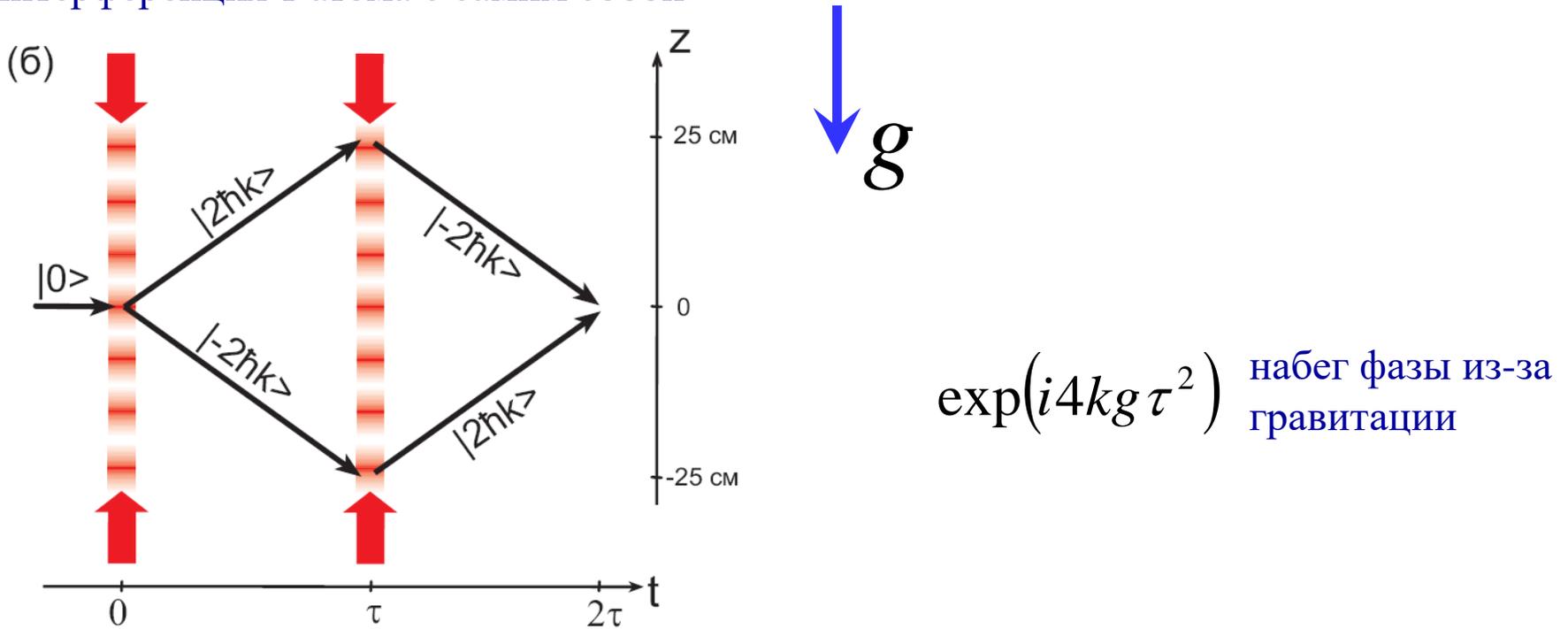
$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 700 \text{ nm}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



# Гравиметр

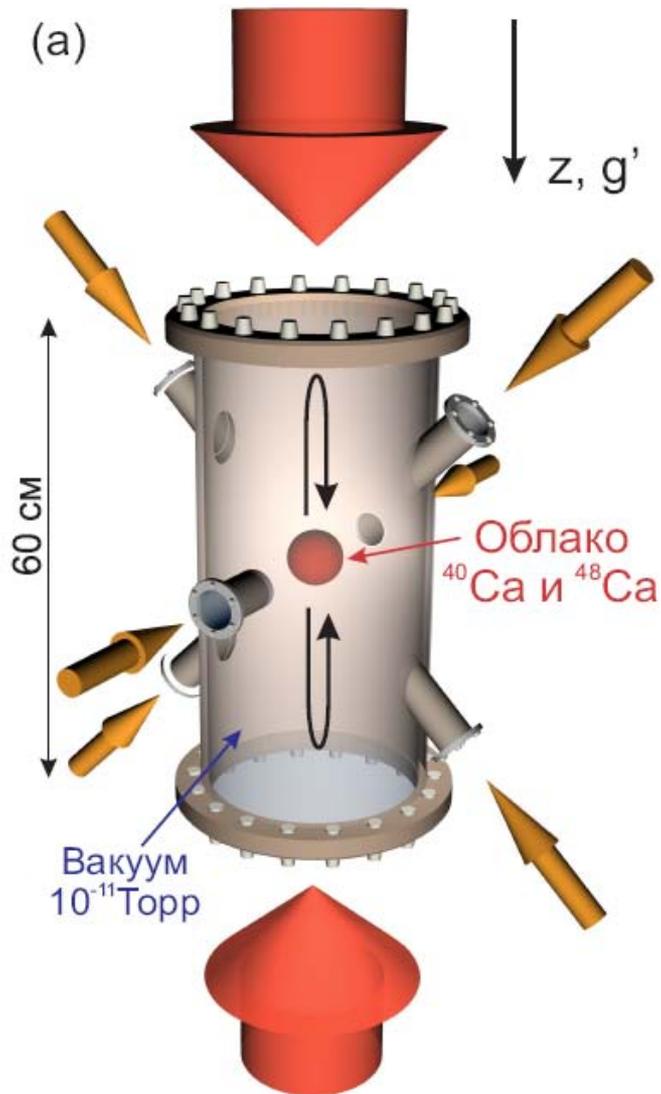
Интерференция 1 атома с самим собой



Применение гравиметров

- поиск полезных ископаемых
- автономная навигация

# Реализация



## Сравнить $^{40}\text{Ca}$ и $^{48}\text{Ca}$

Гравитация, возможно, по разному действует на протоны и нейтроны [Т. Damour and A. M. Polyakov, 1994]

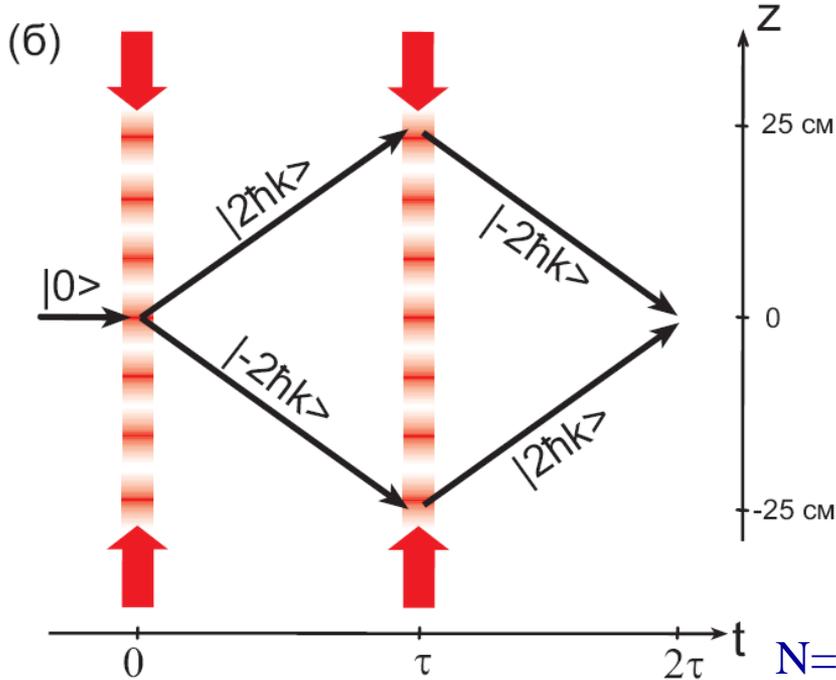
Трудность:  $T = 100$  нК,  $N = 10^6$  атомов,  
 $^{48}\text{Ca}$  – распространённость 0,2%

Преимущество перед  $^{85}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Rb}$ :  $\mu = 0$

Объём установки 0,5-2 м<sup>3</sup>;  
энергопотребление 0,5-2 кВт

# Принцип измерения

## Интерференция 1 атома с самим собой



$\exp(i4kg'\tau^2)$  набег фазы из-за гравитации

Вариация Аллана:

$$\frac{1}{\sqrt{N/(2\tau)(4k)(2\tau)^2}} = 5 \cdot 10^{-14} \frac{g}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$N=10^6$  атомов;  $k=2\pi/(420 \text{ нм})$ ;  $\tau=5 \text{ с}$

За год интегрирования в космосе  $\Delta g' = 0,9 \cdot 10^{-17} g$

За год на Земле ( $\tau=0,2 \text{ с}$ )  $\Delta g' = 0,5 \cdot 10^{-14} g$

## Известные проверки постулата $m_{\text{grav}} = m_{\text{inert}}$

- на Земле точность  $10^{-13}$  с классическими объектами (1999),  $10^{-7}$  с квантовыми

- в космосе с классическими массами выполняется  $\mu\text{-SCOPE}$ , целевая точность  $10^{-15}$

# Результаты из ИПФ РАН

Василий Махалов – А.Т. – Татьяна Бармашова – Кирилл Мартьянов

