

# Дипольные эффекты в ансамбле ХОЛОДНЫХ атомов



1

# Дипольное взаимодействие

## Определение и свойства

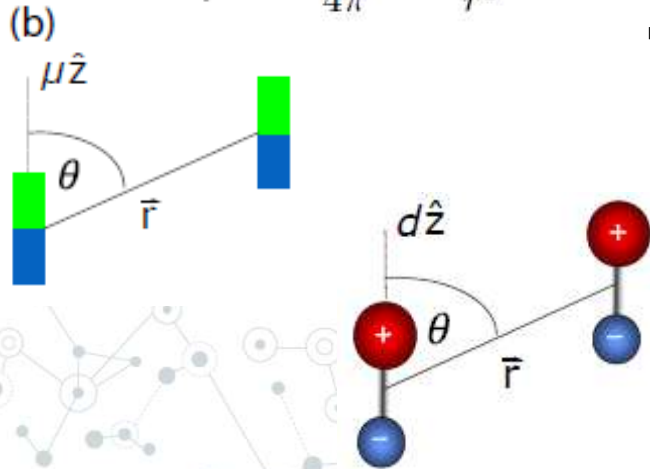
◎  $C_{dd}$  разная для разных диполей

- магнитные  $\mu_0 \mu^2$

- электрические  $d^2 / \epsilon_0$

В случае фиксированных диполей:

$$U_{dd}(r) = \frac{C_{dd}}{4\pi} \frac{1 - 3 \cos^2 \theta}{r^3}$$



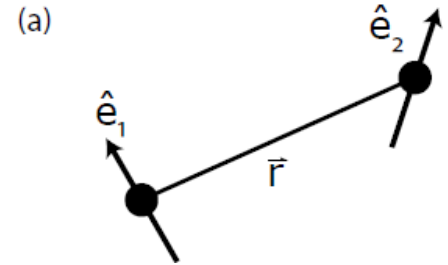
ДВ в электрическом случае  
сильнее, чем в магнитом

$$\frac{\mu_0 \mu^2}{d^2 / \epsilon_0} \sim \alpha^2 \sim 10^{-4}$$

$$d \sim q_e a_0$$

В общем случае:

$$U_{dd}(r) = \frac{C_{dd}}{4\pi} \frac{(e_1 \cdot e_2) r^2 - 3(e_1 \cdot r)(e_2 \cdot r)}{r^5}$$



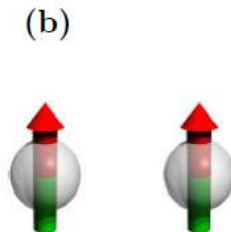
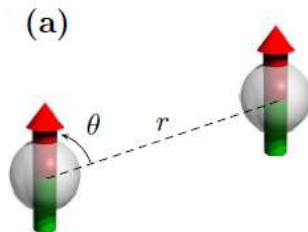
Lahaye, Thierry, et al *Reports on Progress in Physics* 72.12 (2009)

Gadway, Bryce, and Bo Yan. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 49.15 (2016)

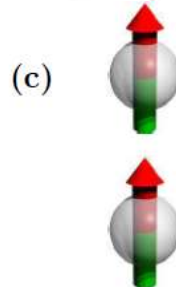
# Определение и свойства

## ⊙ Анизотропия

ДВ в 2 раза сильнее в случае поляризованных частиц



Repulsive



Attractive

## ⊙ Дальнодействие

$$\int_{r_0}^{\infty} U(r) d^D r$$

$D < n$  – взаимодействие короткодействующее (для потенциалов  $1/r^n$ )

«Магический угол»



$$\theta_m = \arccos(1/\sqrt{3}) \simeq 54.7^\circ$$

В 3D – ДДВ  
дальнодействующее  
В 2D и 1D -  
короткодействующее

Lahaye, Thierry, et al. "The physics of dipolar bosonic quantum gases." *Reports on Progress in Physics* 72.12 (2009)

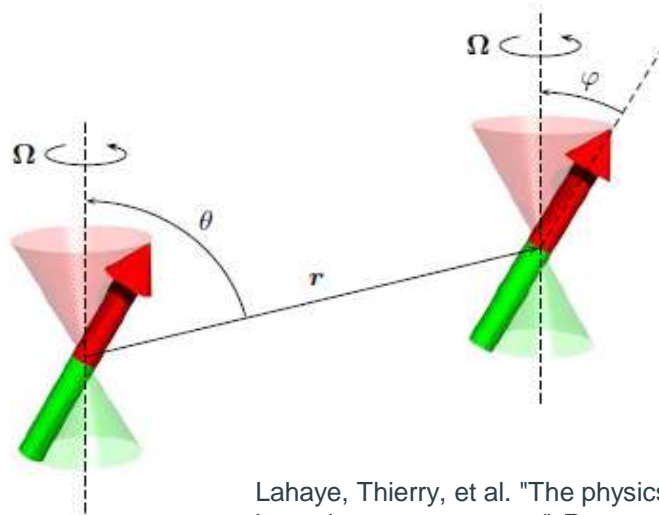
## Короткодействующее контактное взаимодействие и настройка ДДВ

В ультрахолодном режиме можно заменить реальный межатомный потенциал псевдопотенциалом

$$U_{\text{contact}}(r) = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \delta(r) \equiv g\delta(r),$$

Для разных атомов величина и знак этого потенциала может регулироваться внешним магнитным полем. Этот эффект называется **резонансом Фешбаха** (эн-я связанного сост. межатомного потенциала = кин. эн-ии сталкивающихся атомов.)

Используя вращательно поляризованное поле можно изменять эффективную силу и знак взаимодействия



Lahaye, Thierry, et al. "The physics of dipolar bosonic quantum gases." *Reports on Progress in Physics* 72.12 (2009)

## Некоторые обозначения

### ◎ Дипольная длина

Характеризует силу ДДВ

$$a_{dd} = \frac{C_{dd}m}{12\pi\hbar^2}$$

- для s- рассеяния

$$\epsilon_{dd} \equiv \frac{a_{dd}}{a} = \frac{C_{dd}}{3g}$$

при  $\epsilon_{dd} > 1$  ДДВ является доминирующим

**Table 1.** Dipolar constants for various atomic and molecular species. For the molecular species, the (yet unknown) scattering length is assumed to be  $100 a_0$  (as the  $C_6$  coefficient of the dimer is comparable to the one of a single atom, the order of magnitude of the scattering length is similar, but obviously the actual value highly depends on the details of the potential).

| Species          | Dipole moment     | $a_{dd}$              | $\epsilon_{dd}$ |
|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| $^{87}\text{Rb}$ | $1.0 \mu\text{B}$ | $0.7 a_0$             | 0.007           |
| $^{52}\text{Cr}$ | $6.0 \mu\text{B}$ | $16 a_0$              | 0.16            |
| KRb              | 0.6 D             | $2.0 \times 10^3 a_0$ | 20              |
| $\text{ND}_3$    | 1.5 D             | $3.6 \times 10^3 a_0$ | 36              |
| HCN              | 3.0 D             | $2.4 \times 10^4 a_0$ | 240             |

Gadway, Bryce, and Bo Yan. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 49.15 (2016)  
Lahaye, Thierry, et al. *Reports on Progress in Physics* 72.12 (2009)



# 2

## **Дипольные эффекты в различных ультрахолодных системах**

## Деформация ферми-поверхности в дипольном квантовом газе

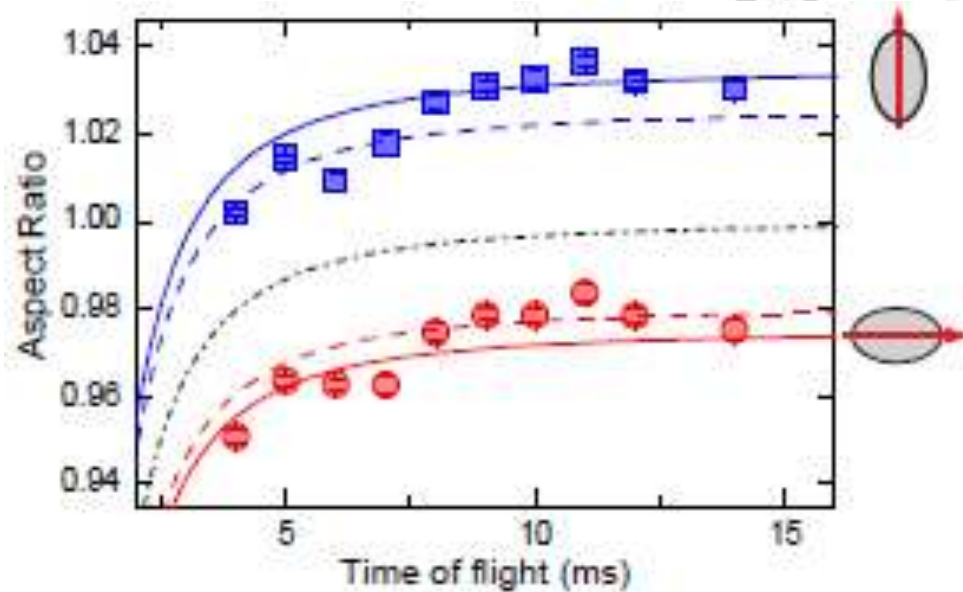
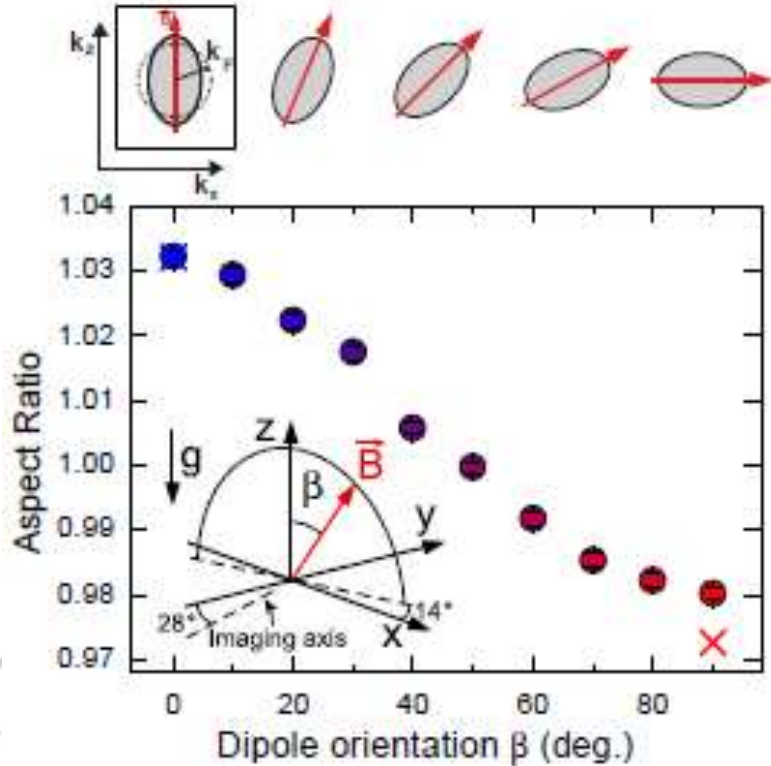
**Система:** однокомпонентный квантовый вырожденный дипольный ферми-газ атомов Er

Образец помещен в 3D оптическую гармоническую ловушку и содержит  $7 \times 10^4$  атомов при температуре  $0.18T_F, T_F = 1.12\mu K$



# Деформация ферми-поверхности в дипольном квантовом газе

$\beta$  – угол между магнитным полем и осью z.



# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах

$$\rho(x, y) = \langle \hat{\Psi}^\dagger(x) \hat{\Psi}(y) \rangle$$



$$\int dy \rho(x, y) \phi_i(y) = \lambda_i \phi_i(x)$$

$\hat{\Psi}^\dagger(x)$  - оператор рождения частицы в точке  $x$   
 $\phi_i$  - собственные функции,  $\lambda_i$  - собственные значения  
 $N$  - общее число частиц в системе

$$\lambda_0 \sim N$$

**ODLRO**  
**off-diagonal**  
**long range order**  
**(ODLRO)**

➤ Системы с ODLRO обладают БЭК

O. Penrose and L. Onsager Phys. Rev. 104, 576 (1956)

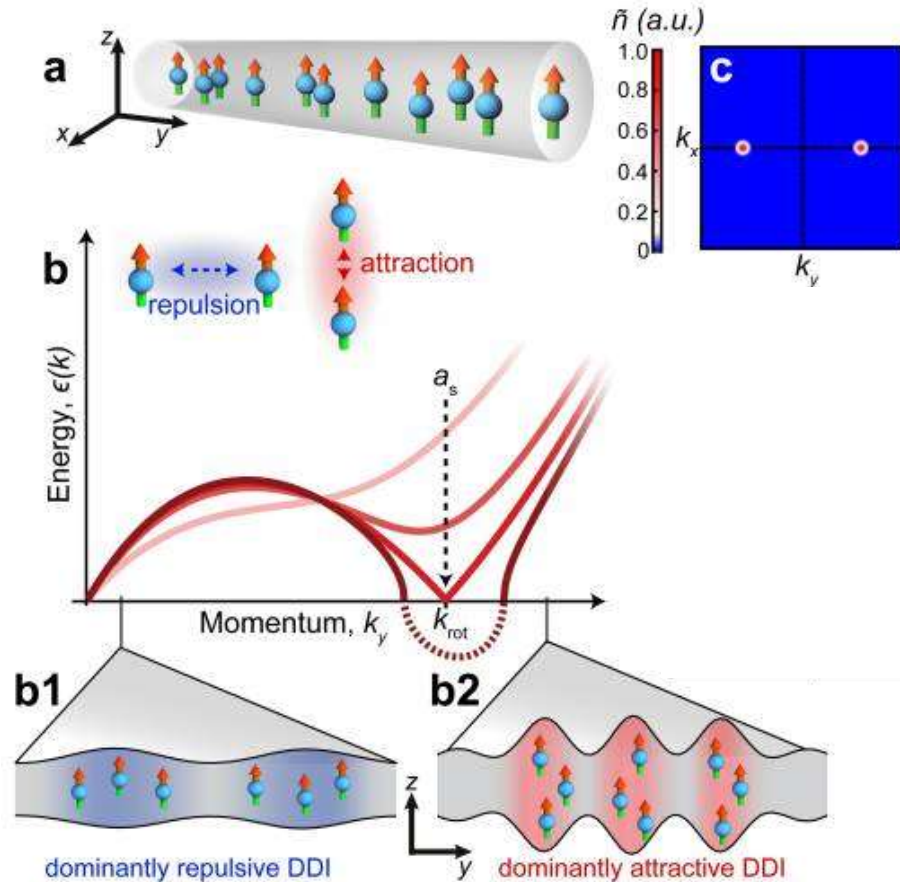
➤ Возникновение ODLRO подразумевает фазовую когерентность

P.W. Anderson, Rev. Mod. Phys. 38, 298 (1966)

**Supersolid** – фаза материи, при которой сосуществуют LRO(long-range order) и ODLRO

Colcelli, A., G. Mussardo, and A. Trombettoni *EPL* 122.5 (2018)  
Boninsegni, M., & Prokof'ev, N. V. Colloquium: Supersolids: What and where are they?. *Reviews of Modern Physics*, 84(2) (2012).

# Ротонные моды в БЭК



- БЭК с ДДВ имеет ротонный минимум

Santos L, Shlyapnikov GV, Lewenstein M Phys Rev Lett. 2003

- Энергетическая щель ротона  $\Delta = \epsilon(k_{rot})$  зависит от плотности и силы взаимодействий
- Возбуждения соответствуют периодическим модуляциям плотности при ротонной длине волны

Chomaz, L., Bijnen, R.M.W., Petter, D. *et al.* Observation of roton mode population in a dipolar quantum gas. *Nature Phys*, 442–446 (2018)

# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах

**Система:** дипольные газы Er-166  
и Dy-164

**Дипольная длина:**  $a_{dd} = \frac{\mu_0 \mu^2}{12\pi \hbar^2}$

**Длина рассеяния контактного взаимодействия:**  $a_s(Er) = 65.5a_0$

$$a_s(Dy) = 131a_0$$

**Число атомов:**

$$N(Er) = 8 \times 10^4$$

$$N(Dy) = 3.5 \times 10^4$$

Оба образца помещены в оптическую дипольную гармоническую ловушку, имеющей форму «сигары», с частотой

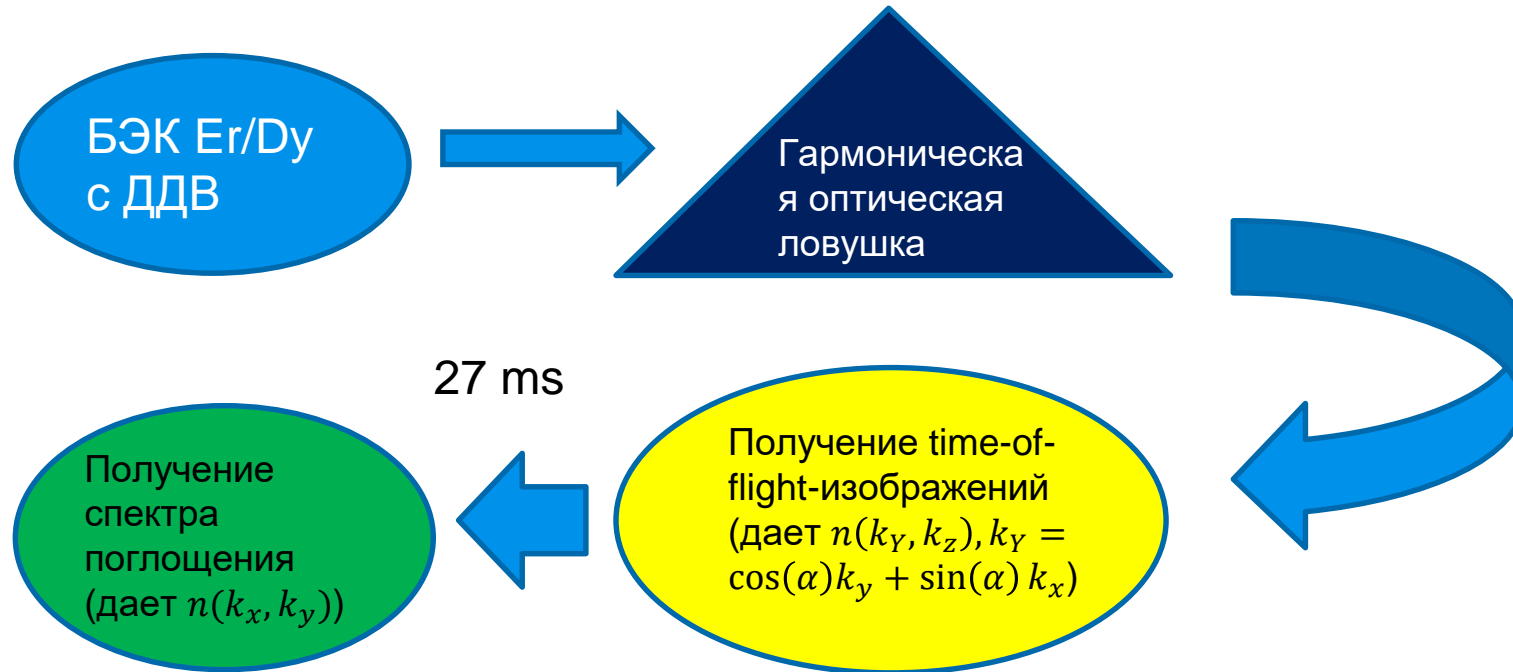
$$\omega_{x,y,z} = 2\pi \times (145, 31.5, 151) \text{ Hz}$$

для Er

$$\omega_{x,y,z} = 2\pi \times (300, 16, 222) \text{ Hz}$$

для Dy

# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах



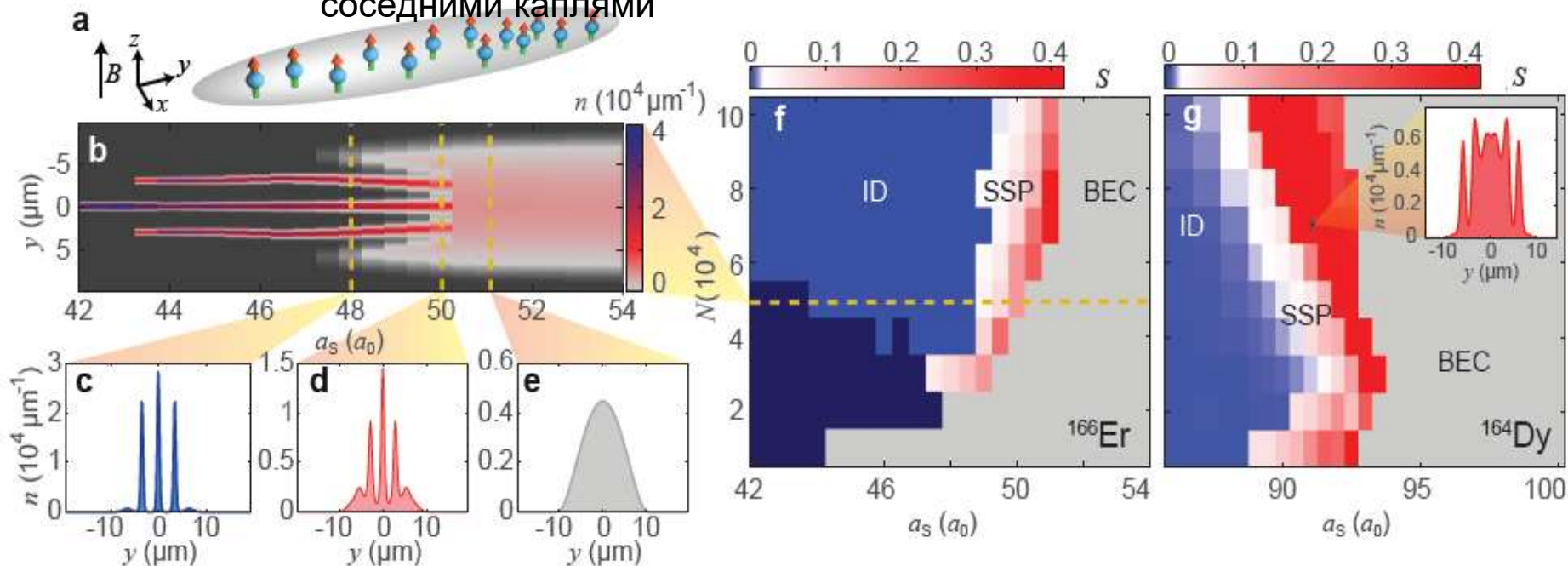
Так как длина волны ротона много меньше расширения БЭК вдоль  $y$ , то можно воспользоваться локальной аппроксимацией плотности по оси  $y$ .

Chomaz, L., et al. "Long-lived and transient supersolid behaviors in dipolar quantum gases." *Physical Review X* 9.2 (2019)

# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах

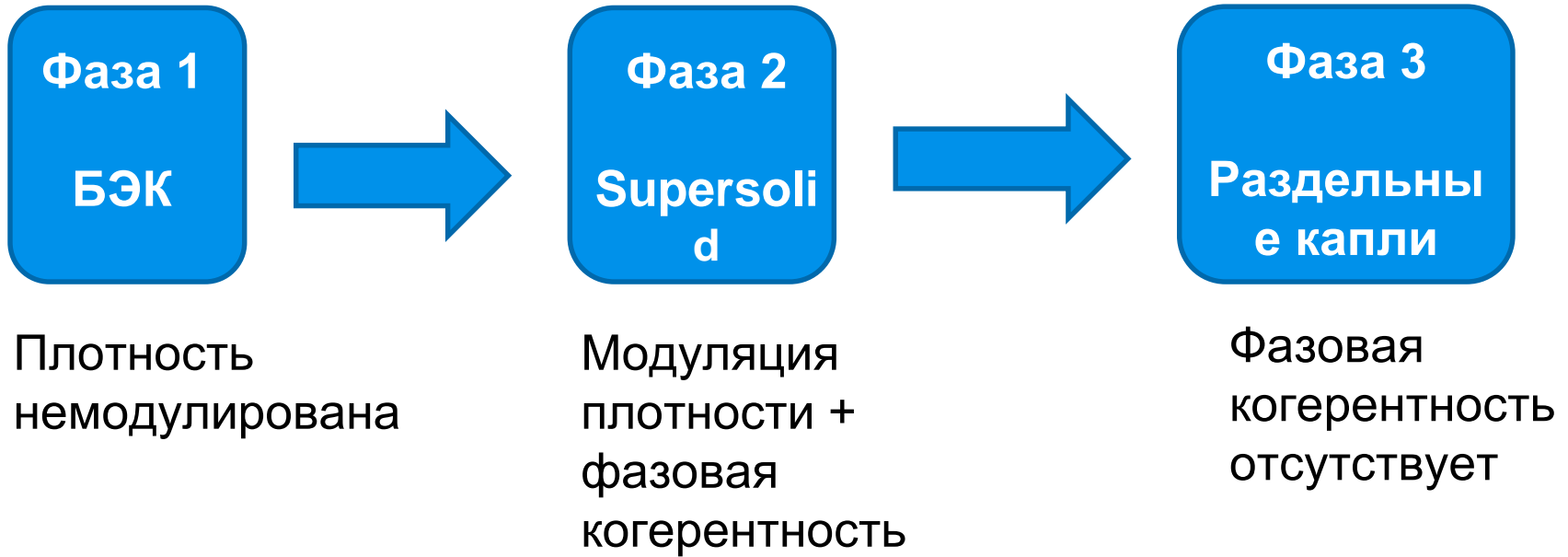
$S = \exp(-d^2/4\sigma_y^2)$  - среднее значение волновой функция перекрытия между соседними каплями

$$\ell_y = \sqrt{\hbar/m\omega_y}$$



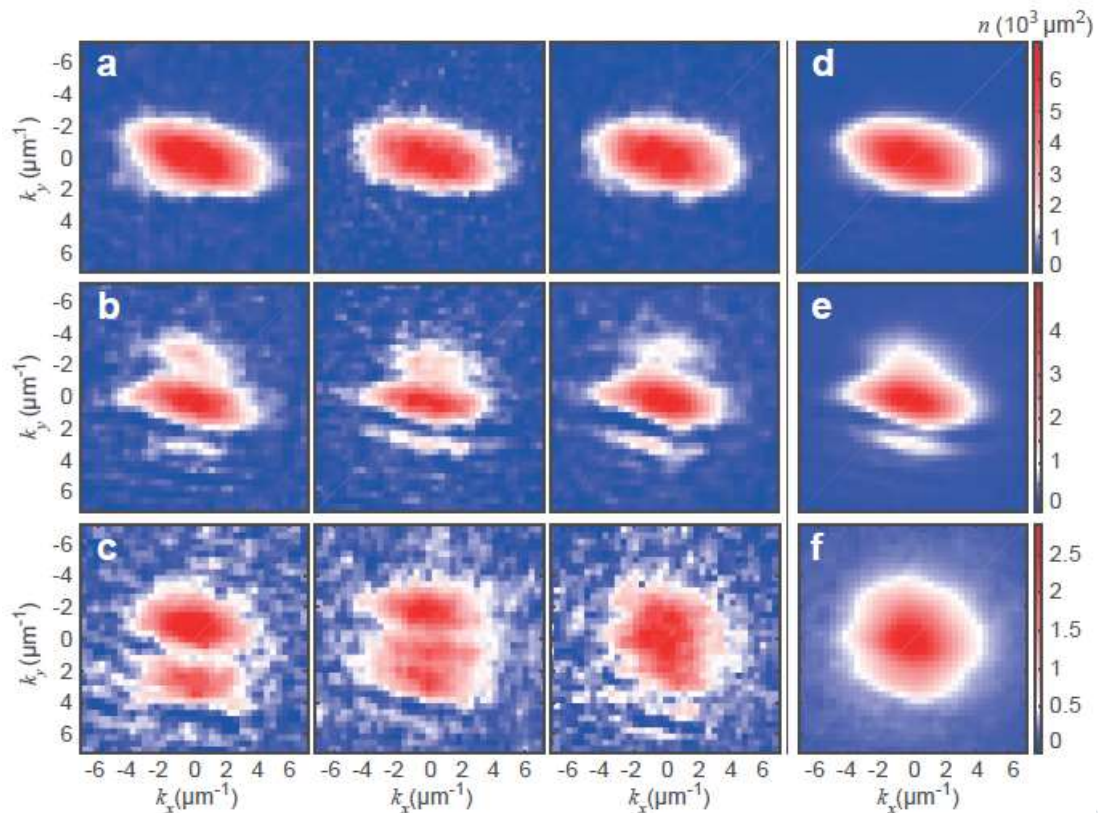
Chomaz, L., et al. "Long-lived and transient supersolid behaviors in dipolar quantum gases." *Physical Review X* 9.2 (2019)

# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах





# Supersolid поведение в дипольных квантовых газах



**График:** распределение плотности в пространстве импульсов для  $E_r$

$$a_s = \{54.7(2), 53.8(2), 53.3(2)\} a_0$$

БЭК

Отдельные капли

Supersolid

Chomaz, L., et al. "Long-lived and transient supersolid behaviors in dipolar quantum gases." *Physical Review X* 9.2 (2019)



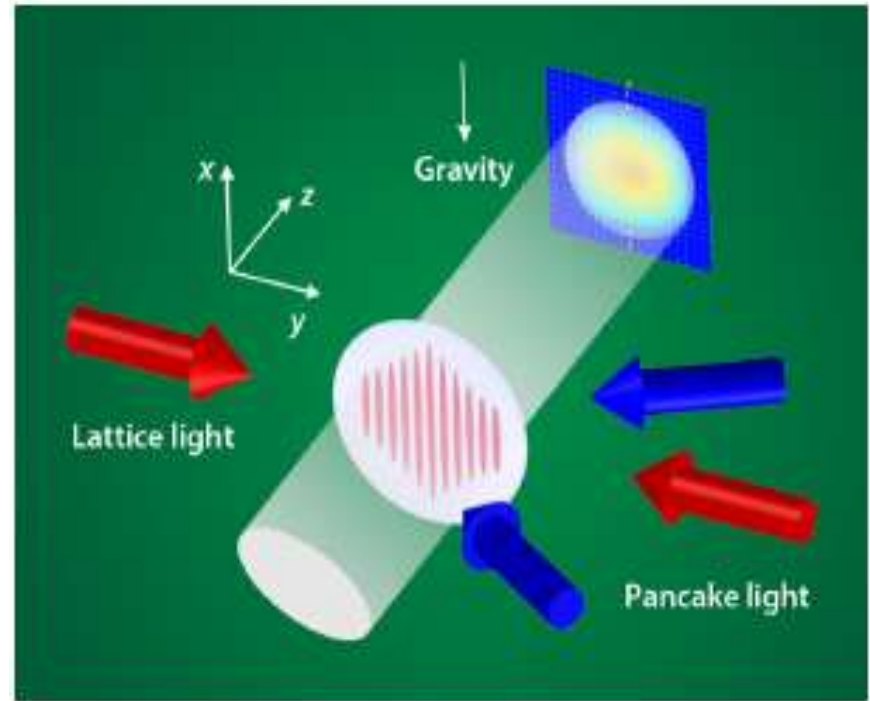
A decorative network diagram in the top-left corner, consisting of various sized nodes (some solid grey, some hollow white) connected by thin grey lines, forming a complex web-like structure.

3

# 1D-системы

- ❑ В одномерии отсутствуют индивидуальные возбуждения
- ❑ Для описания фермионных систем малой размерности теория жидкости Ландау не применима

**Система:** 1D последовательность пойманных в ловушку ультрахолодных атомов рубидия-87



**Figure 1:** Sketch of the experimental setup used by Yang *et al.* Arrays of rubidium-87 atoms, cooled and trapped by laser beams, exhibit Tomonaga-Luttinger liquid (TLL) behavior. (Adapted from B. Yang *et al.* [2] by APS/Alan Stonebraker)