

# Концепция ячейки холодных атомов для квантовых сенсоров и стандартов частоты



Институт лазерной физики СО РАН

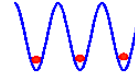
О.Н. Прудников

Р.Я. Ильенков, А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, С.Н. Багаев

# The history of laser cooling epoch

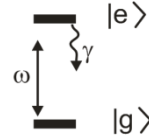
## Laser cooling and trapping of neutral atoms

- 1968 **Theory**: Localization of atoms in optical potential (Wladilen Stepanowitsch Letochow)



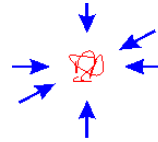
The basic idea behind laser cooling is the conservation of energy and momentum during the absorption and emission of radiation.

- 1975 **Theory** of Doppler cooling (Hansch, Shawlow, Wineland, Dehmelt)

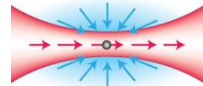


- 1980-1982 Slow downing and cooling of atomic beams  $v \sim 10 \text{ m/s}$ ,  $T \sim 1 \text{ K}$  (Balikin, Phillips et. al.)

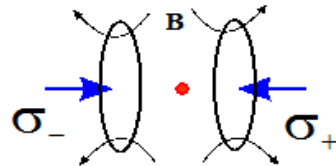
- 1985 Optical molasses  $T \sim T_D = 240 \mu\text{K}$  (Na) (Chu, Hollberg et. al.)



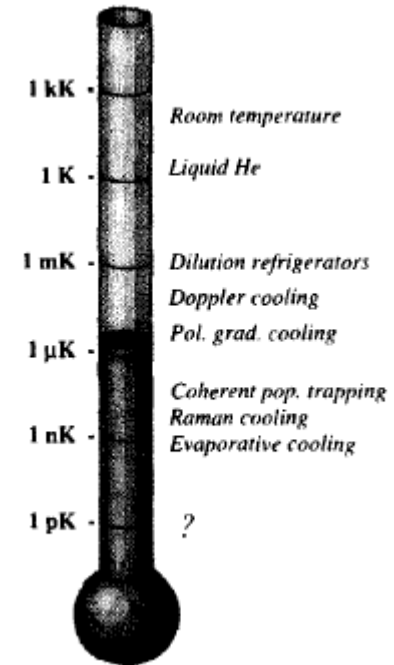
- 1986 Optical trap (Chu et. al.)



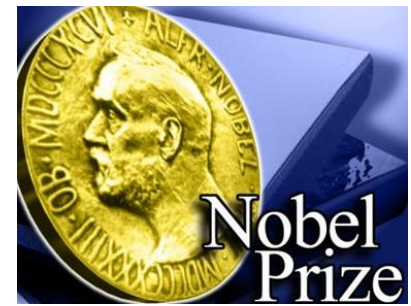
- 1986 **Theory** of MOT (Pritchard et. al., Dalibard)



- 1987 MOT (Raab et. al.)



# Nobel prize winners



- **1997** was awarded jointly to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips "**for development of methods to cool and trap atoms with laser light**".



Steven Chu  
Prize share: 1/3



Claude Cohen-Tannoudji  
Prize share: 1/3



William D. Phillips  
Prize share: 1/3

- **2001** was awarded jointly to Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle and Carl E. Wieman "**for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates**".

A weakly interacting Bose gas has been considered as a holy grail of modern atomic physics, and this breakthrough represents a powerful statement of the success of laser cooling and trapping.



Eric A. Cornell  
Prize share: 1/3



Wolfgang Ketterle  
Prize share: 1/3



Carl E. Wieman  
Prize share: 1/3

- **2012** was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland "**for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems**".



Photo: U. Montan  
Serge Haroche  
Prize share: 1/2



Photo: U. Montan  
David J. Wineland  
Prize share: 1/2

# Стандарты частоты на основе Холодных атомов и ионов

- Телекоммуникационные системы
- Системы навигации,
- Проверка постоянства фундаментальных констант

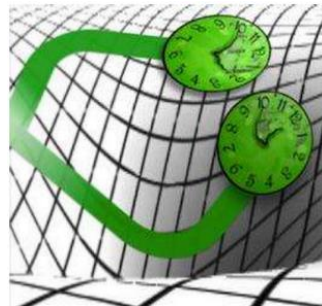
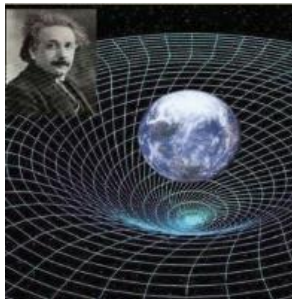
$$\frac{\Delta \nu_G}{\nu} = \frac{\Phi_G}{c^2} \quad \Phi_G \approx gH + \dots$$

$$h = 1\text{см} \rightarrow \Delta t/t \approx 10^{-18}.$$



## Измерение геопотенциала:

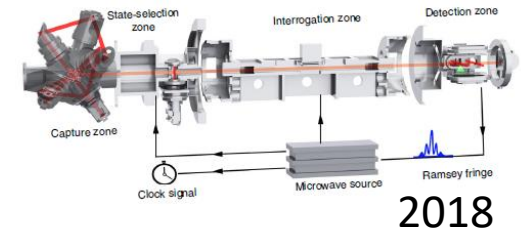
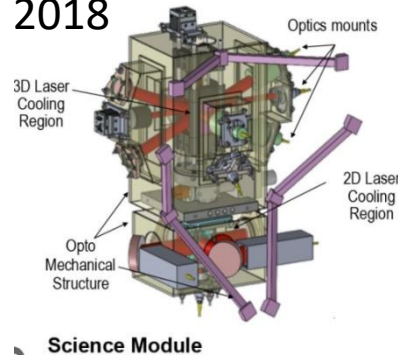
- 3D карты распределения масс Земли
- Профили глубин океанов
- Наблюдение за ледяным покровом
- Мониторинг грунтовых вод
- Поиск полезных ископаемых



NASA Jet Propulsion Laboratory  
California Institute of Technology

- Orbiting Optical Clock**  
Testing General Relativity, seeking Dark Matter.
- Lunar Laser Ranging**  
Testing Gravity, searching for extra dimensions.
- Deep Space Quantum Link**  
Studying quantum entanglement over large distances.
- Atom Interferometry, CAL**  
Pioneering quantum matter research in Space.
- Dusty Plasma Physics**  
Researching dusty, complex plasmas in Space.

## МКС 2018

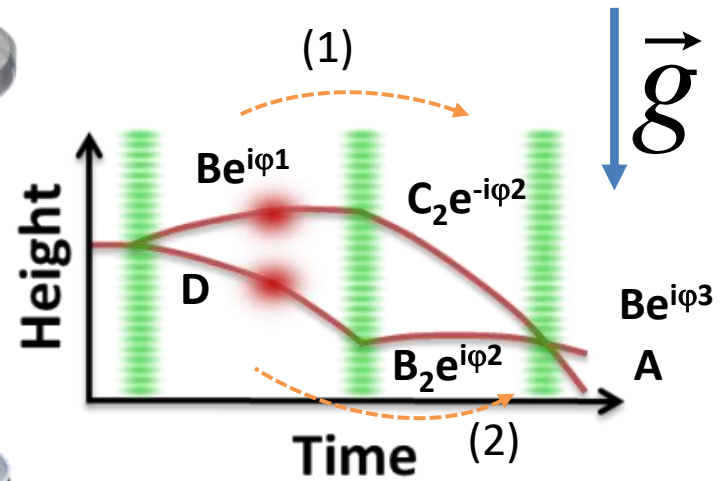
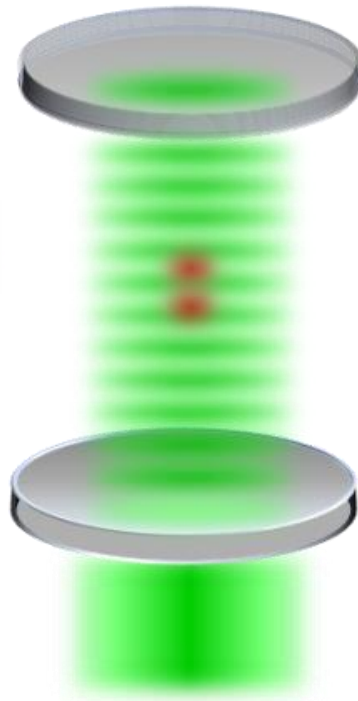
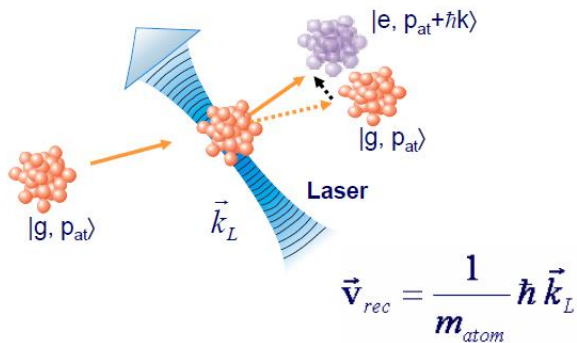


**Chinese experiments CACs.  
Rb cold atoms in space.**

**NASA Cold Atoms Lab. <sup>87</sup>Rb**

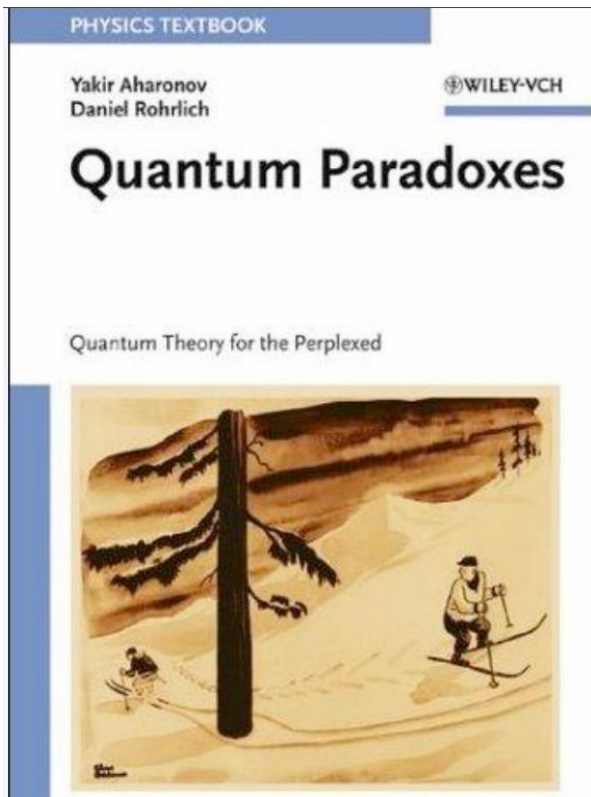


# Квантовые сенсоры на основе холодных атомов



$$\psi^{(e)} = \psi^{(e1)} + \psi^{(e2)}$$

$$\underline{\Delta\Phi = kgT^2}$$



# Гравиметры бортового базирования

## Oct. 2015, Jan. 2016 : First marine campaign (Shom, DGA)

First marine absolute gravity measurement

Precision : 0,4 - 0,9 mGal

Y. Bidet et al., Nat. Com. 9, 627 (2018)

## April 2017 : Airborne campaign in Iceland (DTU, ESA)

First airborne gravity measurement with a quantum sensor

Precision : 1.7 - 3,9 mGal

Y. Bidet et al., J. of Geodesy 94:20 (2020)

## April - Oct. 2018 : Long term marine campaign (Shom)

Precision : 0,2 - 0,5 mGal

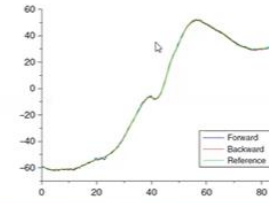
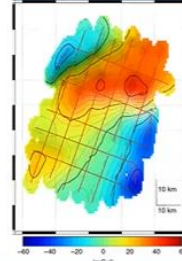
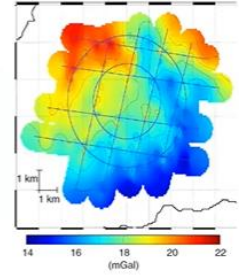
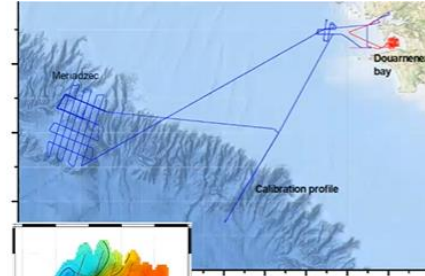
## April, Mai 2019 : Airborne campaign in France (GET, DTU, SHOM, CNES, ESA)

Precision : 0.7 - 1.4 mGal

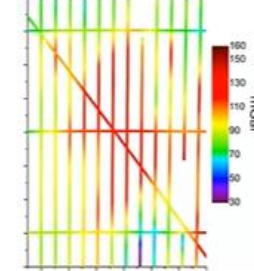
## Jan. - Oct. 2020 : Long term marine campaign (Shom)

Precision : 0.3 - 0.5 mGal

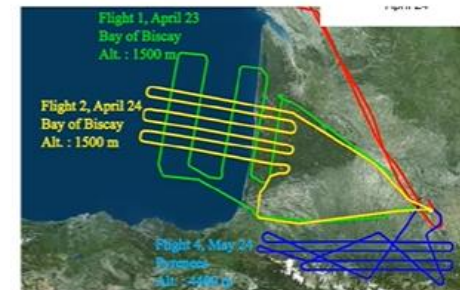
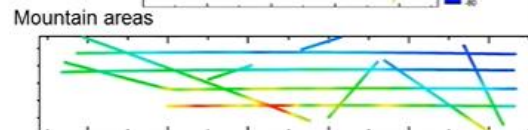
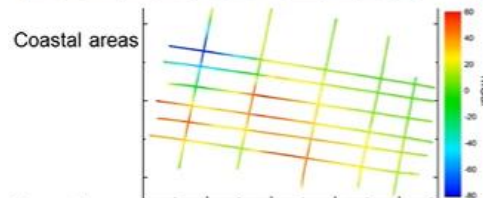
$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$



Ice cap and volcanoes

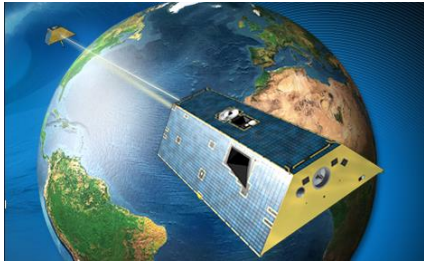


Vatnajökull

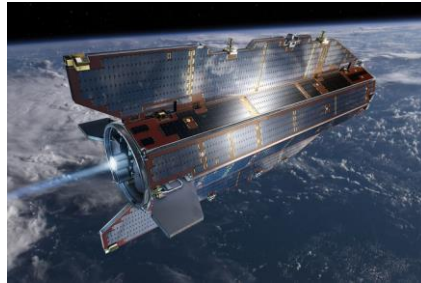


**ONERA, the French Aerospace Lab**

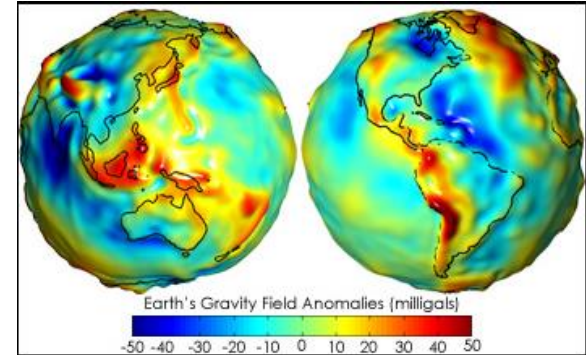
# Next generation space missions



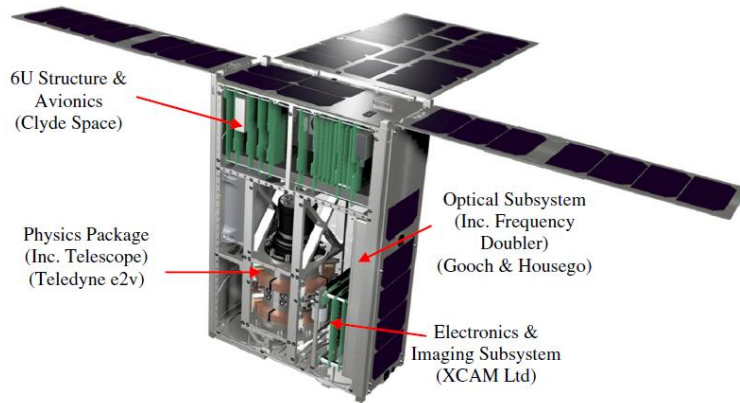
**GRACE**  
H = 500 km



**GOCE** 17/03/2009 – 11/11/2013  
H = 260 km,



## 6U CubeSat



100 x 200 x 300 mm

Масса: 15-25 кг  
рабочая орбита: 400-550 км  
Время миссии: 8-15 месяцев

## Cold Atom Space Payload (CASPA)

Gravity sensors in space are perspective for many Earth observation applications including monitoring polar ice mass, ocean currents and sea level. Cold atom sensors could enable higher resolution measurements which would allow monitoring of smaller water sources and discovery of new underground natural resources which are currently undetectable.

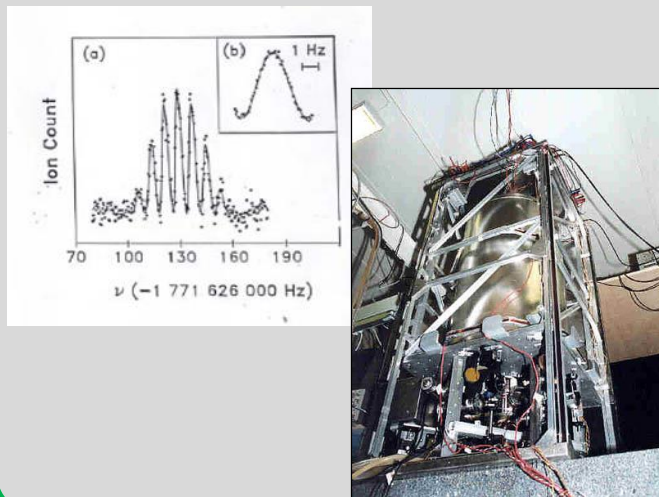


# Концепция “ячейки холодных атомов”

## Эволюция микроволнового стандарта частоты

### Часы на основе Cs фонтана

M.A. Kasevich, E. Riis, S. Chu... PRL **63**, 612 (1989)



### Компактные КПН часы

Н.В.

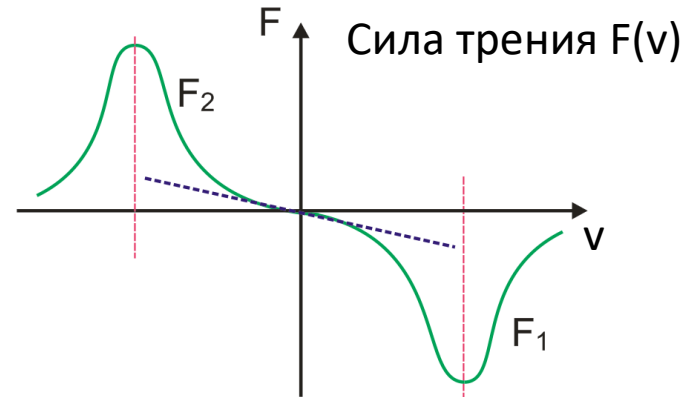
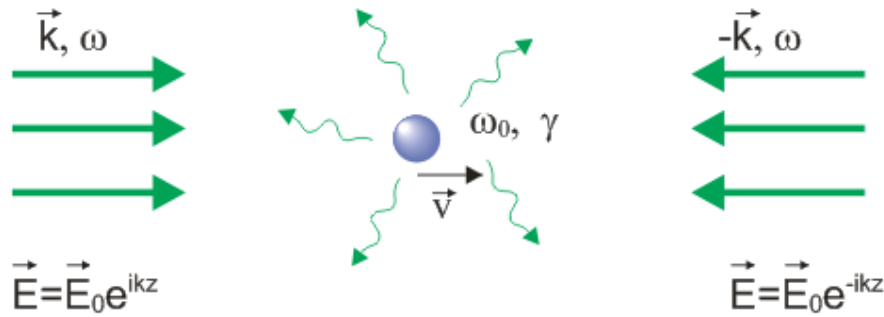


## Для компактизации систем лазерного охлаждения

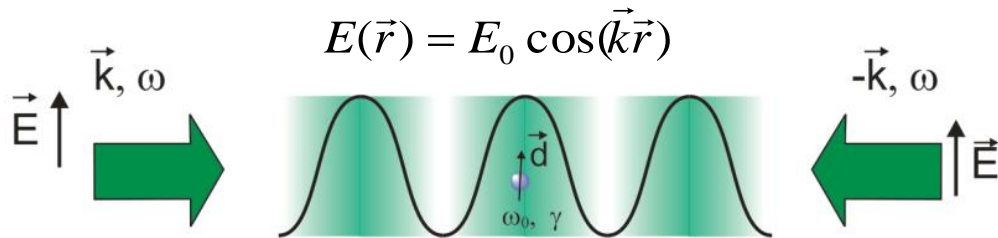
- Использовать лазерные поля малой интенсивности, сравнимой для достижения молассиса ( $\sim 10 - 50$  мВт/см<sup>2</sup>)
- Возможно исключить магнитное поле



# Охлаждение и захват атомов



## Глубина оптического потенциала



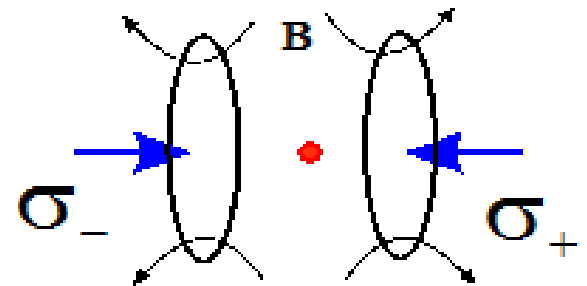
**диссипативные  
решетки**

+ позволяют охладить  
- малая глубина

**недиссипативные  
решетки**

+ глубокие ( $< 1\text{mK}$ )  
- нет охлаждения

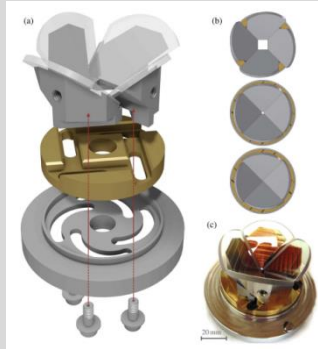
для охлаждения и удержания атомов необходима глубокая ловушка!



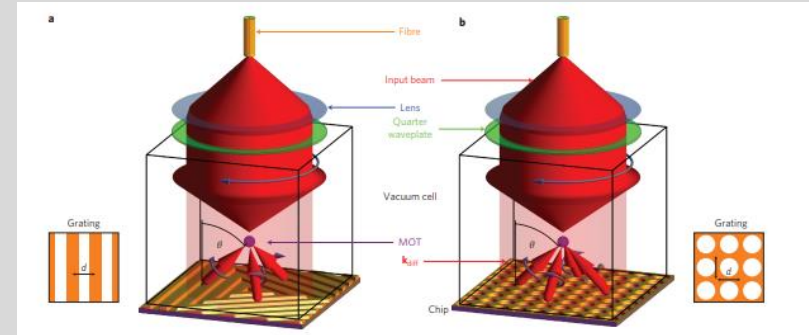
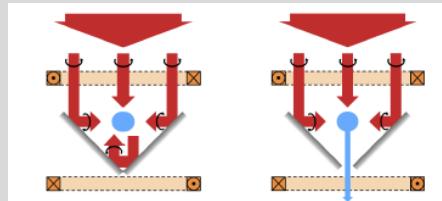
Магнитооптическая ловушка (МОЛ) является основной современных экспериментов

# Компактизация систем лазерного охлаждения

## Компактные МОЛ

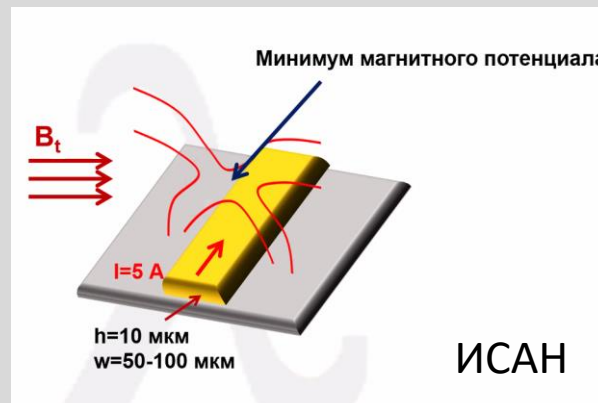
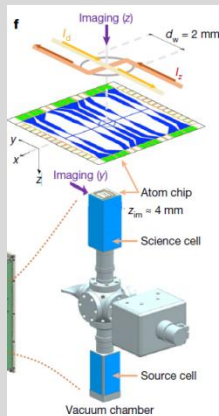


2021 High-flux, adjustable, compact cold-atom source  
University of Oxford UK



2015 A surface-patterned chip for cold atom MOT (Centre for Cold Matte, UK)

## Атомный Чип



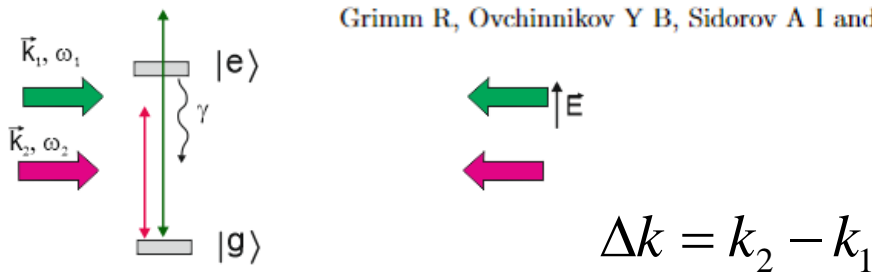
- требуется МОЛ для предварительного охлаждения
- большие токи
- высокие температуры

# Как создать глубокую оптическую ловушку?

Эффект выпрямления дипольной силы в бихроматическом поле

Kazantsev A P and Krasnov I V 1987 *JETP Lett.* **46** 332–336

Grimm R, Ovchinnikov Y B, Sidorov A I and Letokhov V S 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 1415



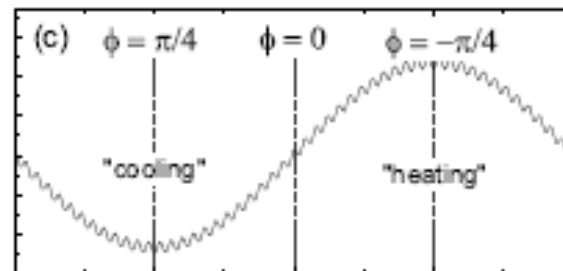
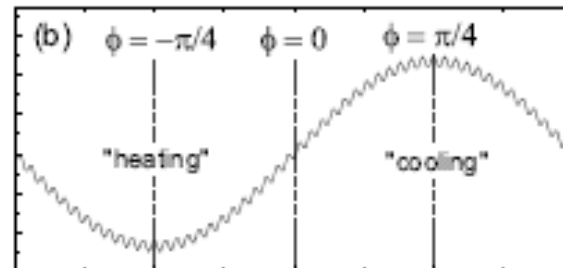
макроскопический потенциал

$$\phi = \Delta k z$$

пространственные биения полевых сдвигов

$$U_1 = U_{01} \cos^2(k_1 z)$$

$$U_2 = U_{02} \cos^2(k_2 z)$$



макроскопический  
общий период

$$\Lambda = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\pi c}{\Delta \omega}$$

кривизна потенциала

$$U = \kappa \frac{z^2}{2} \quad \kappa \sim \frac{\Delta k}{k}$$

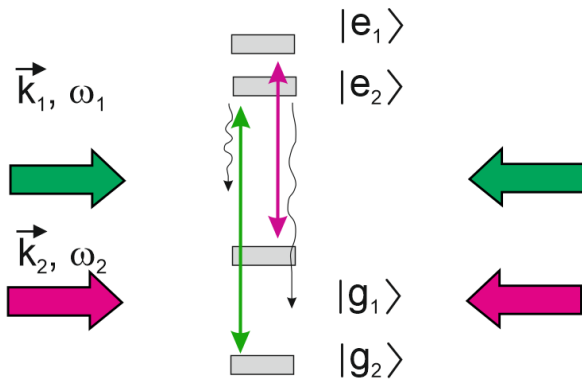
для реализации  $\Lambda \sim 1 \text{ см}$   $\Delta \omega \sim 10 \text{ ГГц}$

Prudnikov O N, Baklanov A S, Taichenachev A V, Tumaikin A M and Yudin V I 2013 *JETP* **117** 222–231

Prudnikov O N, Taichenachev A V and Yudin V I 2017 *Quantum Electronics* **47** 438–445

для реализации сравнимых по глубине сдвигов при существенно различных отстройках  $\delta_1$  и  $\delta_2$  требуется поле высокой интенсивности.

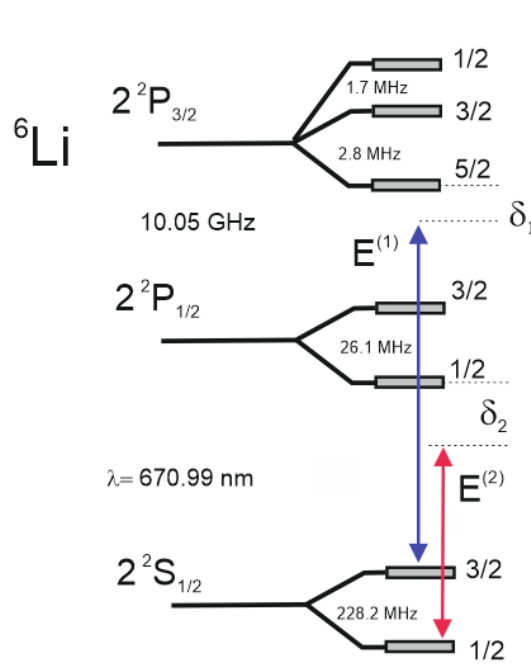
# Многоуровневая структура атомов



Каждое из полей резонансно выделено/ оптическому переходу. Соответственно, для создания оптических сдвигов состояний  $|g_1\rangle$  и  $|g_2\rangle$  глубиной  $U \sim \hbar\gamma$  требуются небольшие интенсивности полей  $\sim I_{sat}$  (раби  $\Omega \sim \gamma$ )

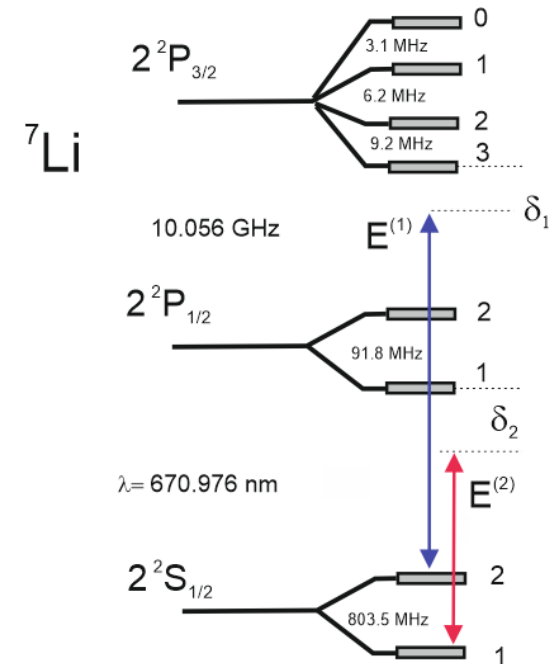
$$I_{sat} = 2.6 \text{ mW} / \text{cm}^2$$

$$\Lambda = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\pi c}{\Delta \omega}$$



$$\Lambda \approx 1.5 \text{ cm}$$

$$\Delta \omega = 10 \text{ ГГц}$$



$$\Lambda \approx 1.6 \text{ cm}$$



# 1D конфигурации световых полей

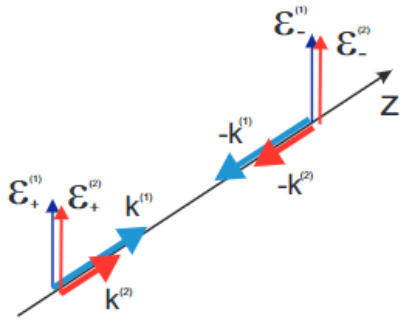
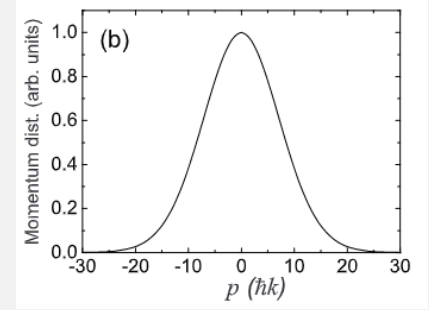
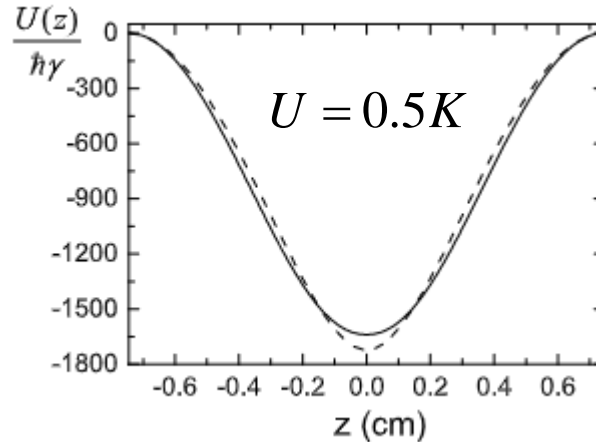
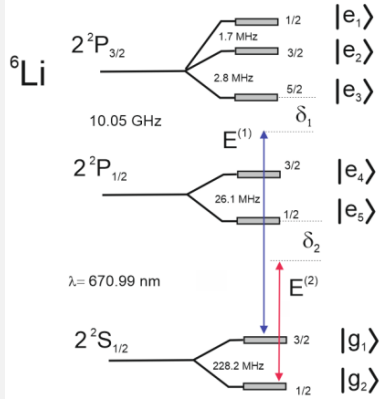


Рис. 2: Двойная lin||lin конфигурация светового поля.



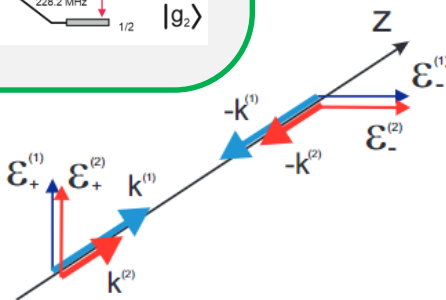
$$T \simeq 1.1 \hbar\gamma / k_B \simeq 300 \mu\text{K}$$

$$\sigma_z \simeq 320 \mu\text{m}$$

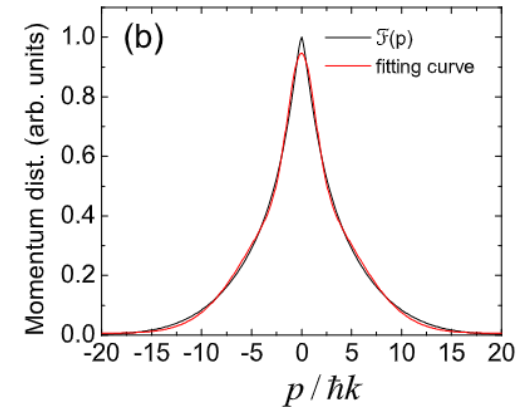
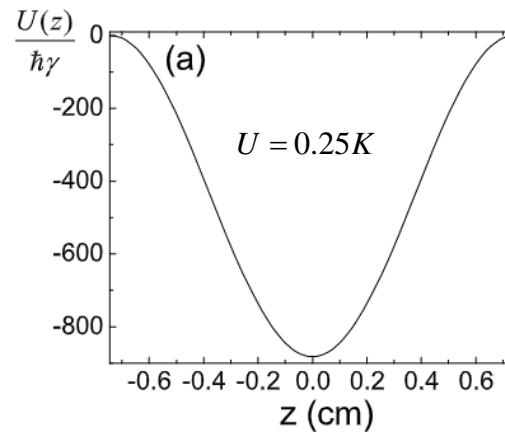


$$\delta_1 = -2\gamma, \quad I_1 = 9 \text{ mW} / \text{cm}^2, \quad \Omega_1 \approx 1.3\gamma$$

$$\delta_2 = -3\gamma, \quad I_2 = 20 \text{ mW} / \text{cm}^2, \quad \Omega_2 \approx 1.9\gamma$$



Двойная lin ⊥ lin конфигурация светового поля



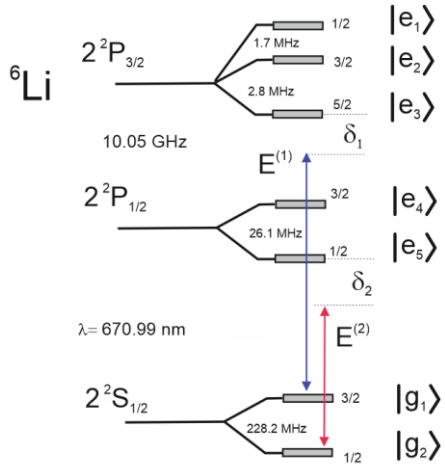
$$\delta_1 = -1.5\gamma, \quad I_1 = 5.2 \text{ mW} / \text{cm}^2$$

$$\delta_2 = -\gamma, \quad I_2 = 8 \text{ mW} / \text{cm}^2$$

$$T_C \simeq 0.035 \hbar\gamma / k_B \simeq 10 \mu\text{K} \quad (N_c \simeq 0.2)$$

$$T_H \simeq 0.5 \hbar\gamma / k_B \simeq 140 \mu\text{K} \quad (N_c \simeq 0.8)$$

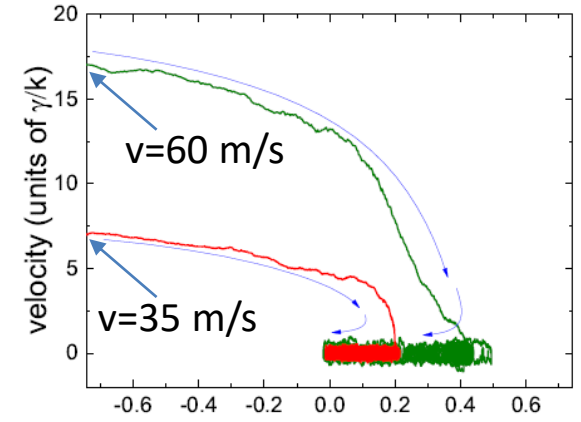
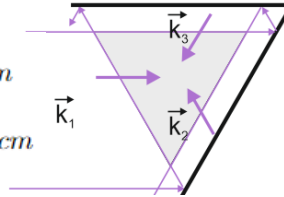
# Макроскопический оптический потенциал



**2D**

$$\Lambda_x = \frac{\lambda}{3} \frac{k}{\Delta k} \simeq 1.9 \text{ cm}$$

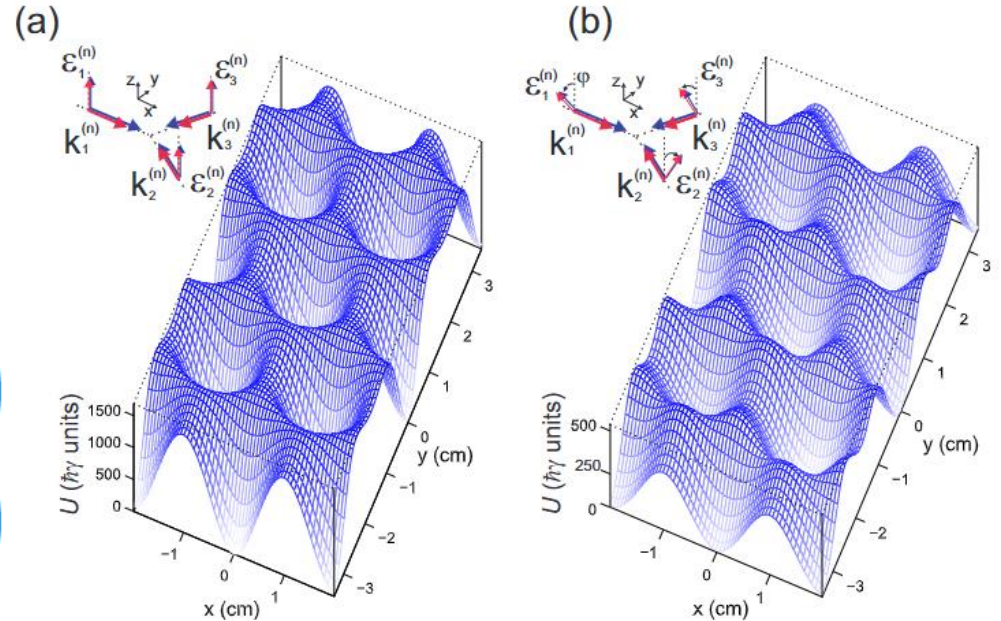
$$\Lambda_y = \frac{\lambda}{\sqrt{3}} \frac{k}{\Delta k} \simeq 3.4 \text{ cm}$$



$$\hat{H}_{eff}^{(n)} = \delta_n S_n \hat{U}^{(n)}, \quad n = 1, 2$$

$$\hat{U}^{(1)} = \frac{2}{3} |\mathcal{E}_1|^2 \hat{P} g_1 - \frac{i}{3} \left( [\mathcal{E}_1^* \times \mathcal{E}_1] \cdot \frac{\hat{F}}{F_{g_1}} \right)$$

$$\hat{U}^{(2)} = \frac{1}{3} |\mathcal{E}_2|^2 \hat{P} g_2 - \frac{i}{9} \left( [\mathcal{E}_2^* \times \mathcal{E}_2] \cdot \frac{\hat{F}}{F_{g_2}} \right)$$



$$\mathcal{E}_n = \frac{\mathbf{E}^{(n)}}{|\mathbf{E}^{(n)}|} = \sum_{q=0,\pm 1} \mathcal{E}_n^q \mathbf{e}_q, \quad n = 1, 2$$

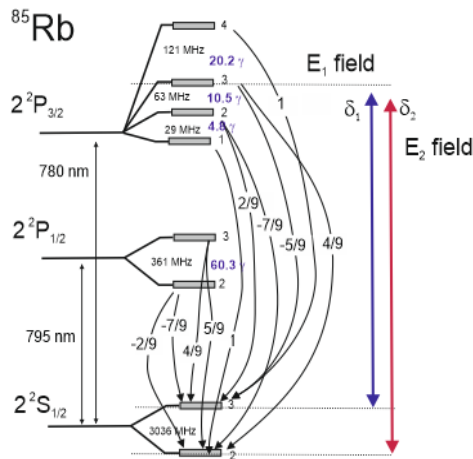
Рис. 10: (a) Макроскопический 2D оптический потенциал формируемый бихроматическим полем световых волн с линейной поляризацией вдоль оси  $z$ . Параметры волн, формирующих потенциал соответствуют параметрам рис. 4. (b) Макроскопический 2D оптический потенциал формируемый бихроматическим полем световых волн с линейной поляризацией ориентированных под углом  $\varphi = \pi/4$  к оси  $z$ . Параметры волн, формирующих потенциал соответствуют параметрам Рис. 8.

# Результаты

Представлена концепция реализации «ячейки холодных атомов»

1. возможность реализации полностью оптической диссипативной ловушки для нейтральных атомов с глубиной порядка и более 1 K (сопоставима с МОЛ)
2. требует сравнительно малые интенсивности полей  $\sim 50\text{-}100 \text{ mW/cm}^2$
3. не требует наличия магнитного поля

основа реализации компактных устройств на основе холодных атомов



$$\Lambda = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\pi c}{\Delta \omega}$$

$$\Lambda_{85Rb} \approx 4.9 \text{ cm}$$

$$\Lambda_{87Rb} \approx 2.2 \text{ cm}$$

$$\Lambda_{133Cs} \approx 1.5 \text{ cm}$$

$$\Lambda_{199Hg} \approx 0.7 \text{ cm}$$