



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ

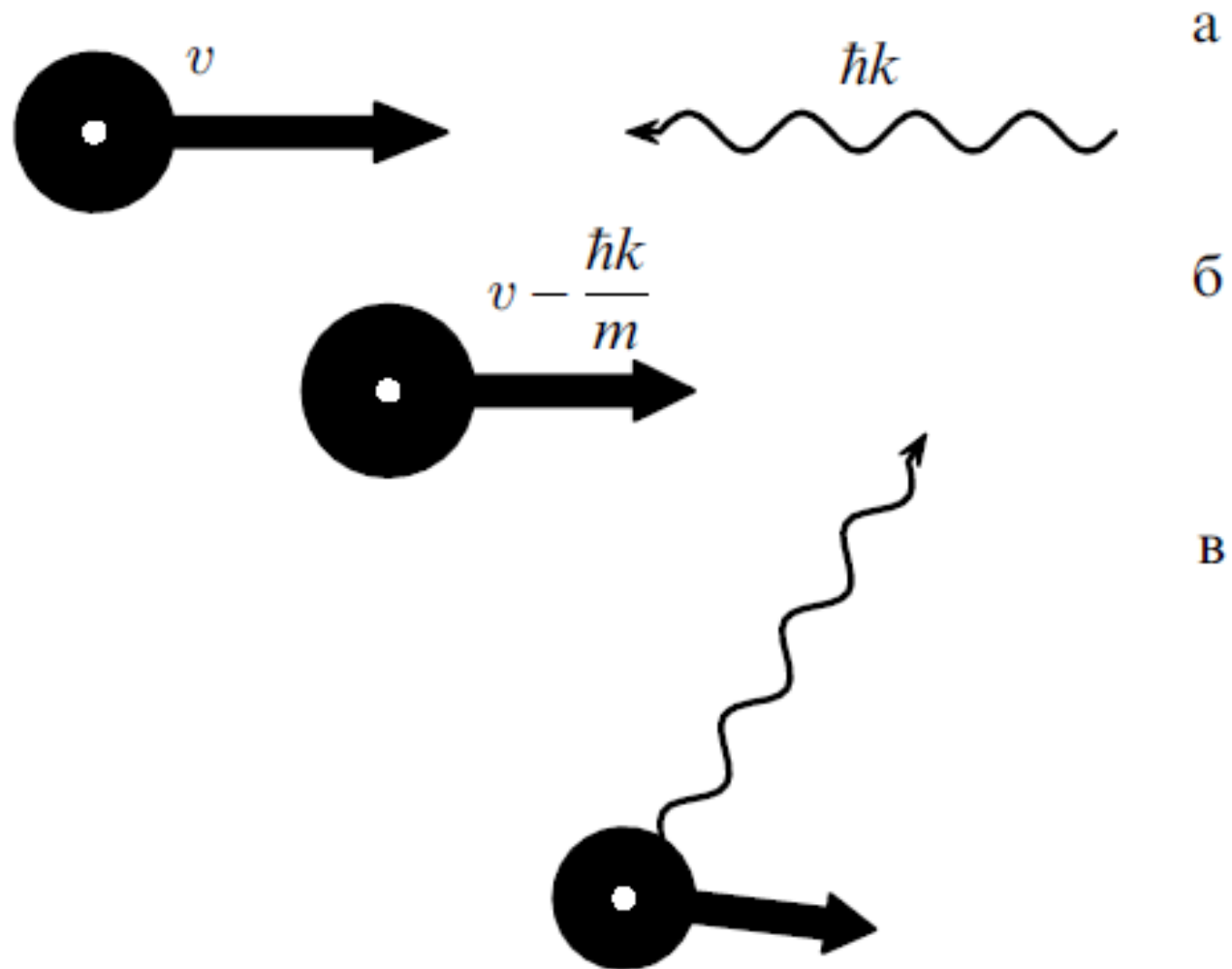
Машко Анастасия

*Институт спектроскопии Российской академии наук*

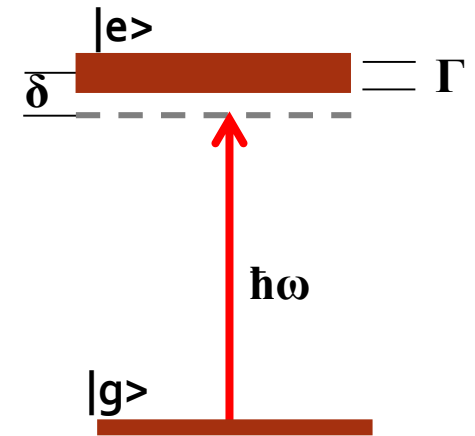
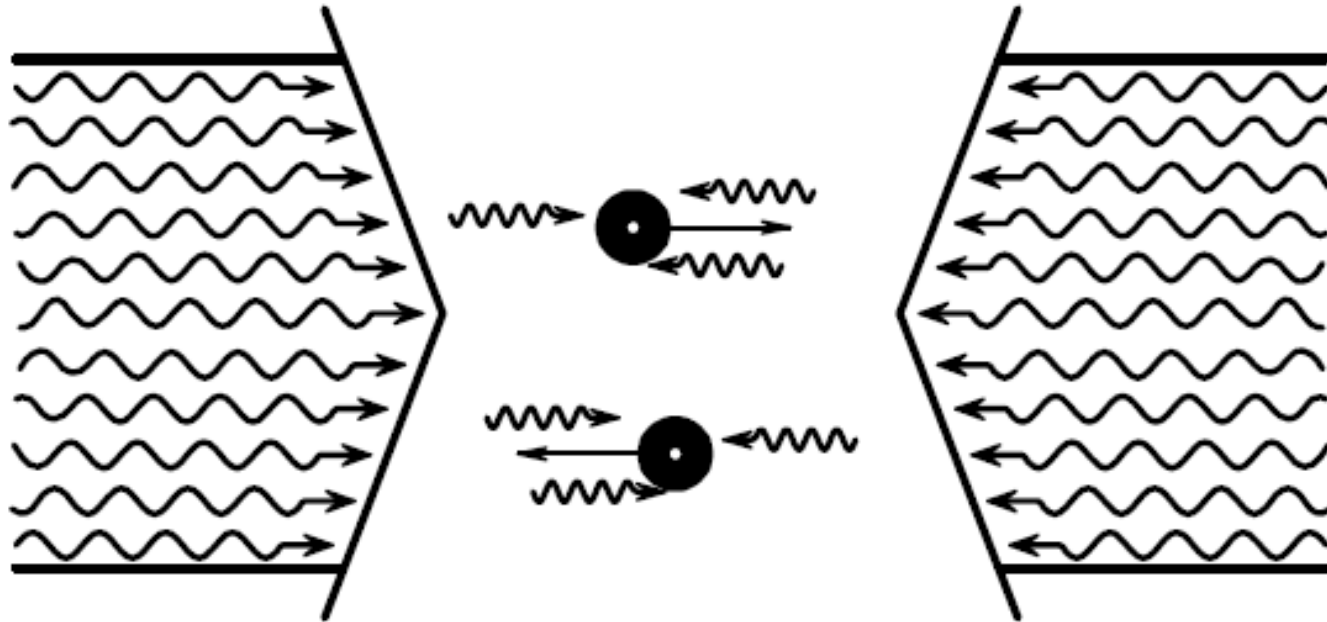
*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

05.12.2019

# Основной принцип лазерного охлаждения



# Доплеровское охлаждение

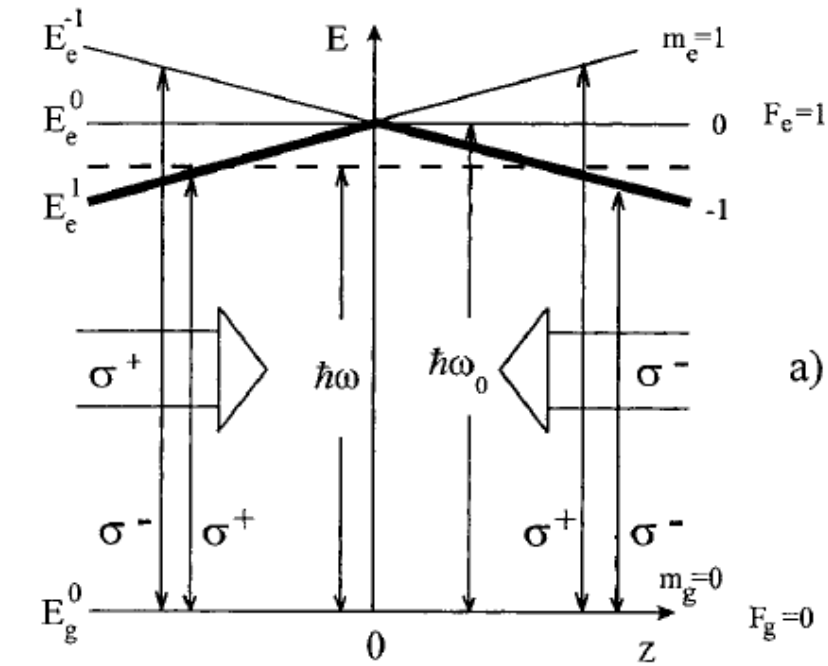


Доплеровское охлаждение в одном измерении.

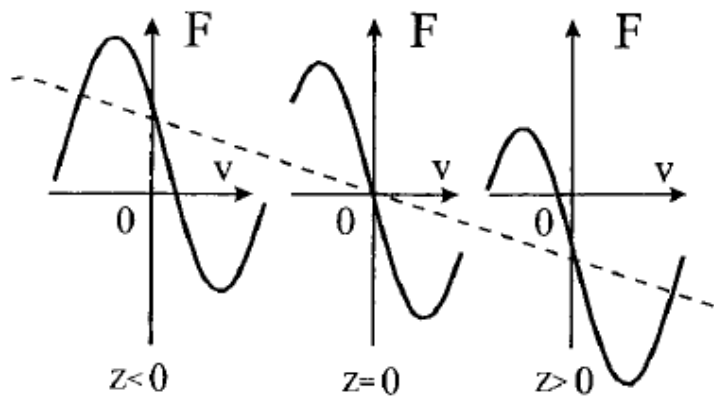
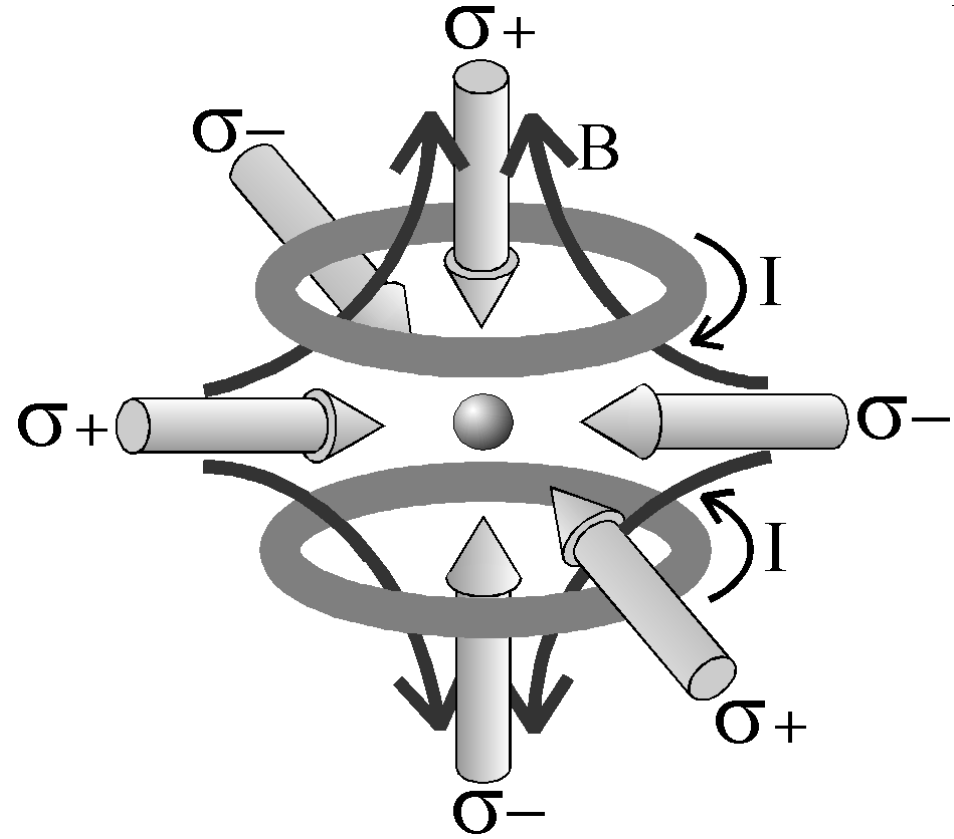
- 1977 Доплеровский предел охлаждения
- Для натрия 240 мкК (30 см/с)

$$m\langle v_i^2 \rangle = k_B T = \frac{\hbar\Gamma}{4} \left( \frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right), \quad T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

# Магнито-оптическая ловушка

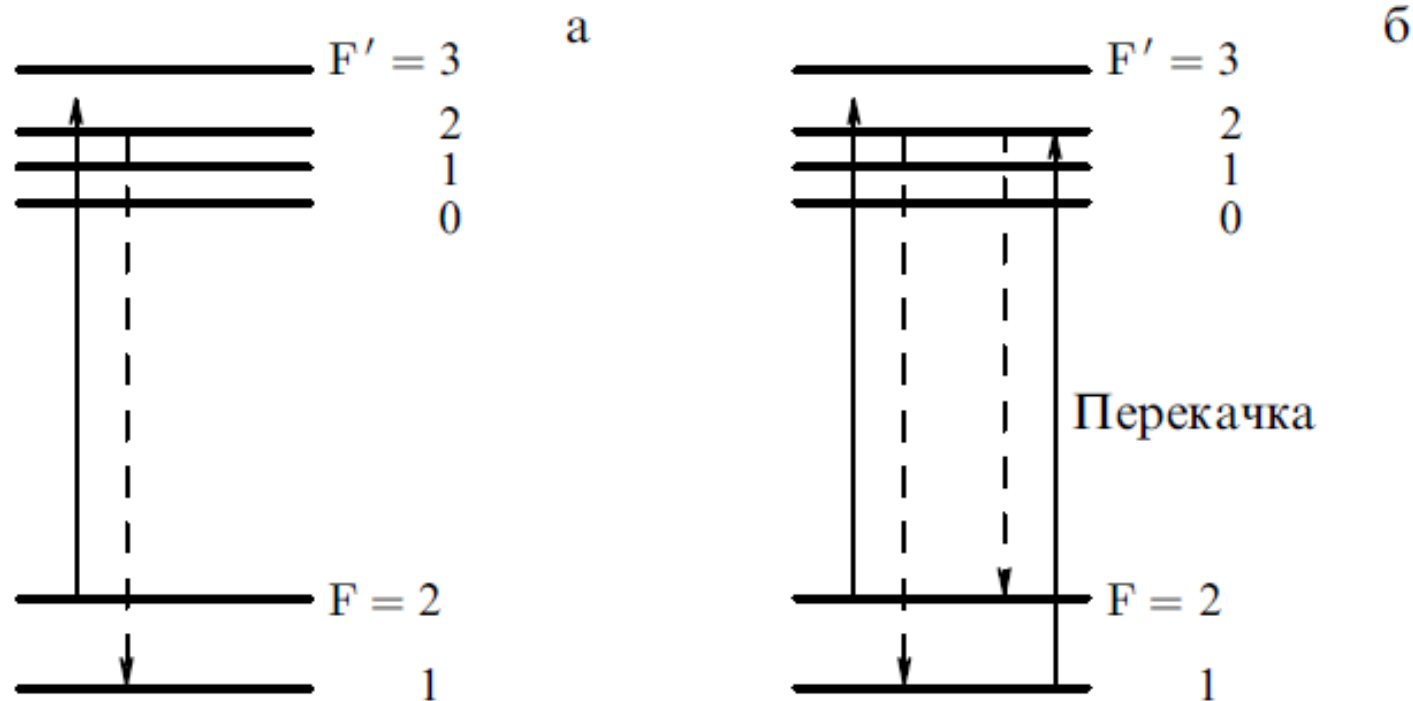


$$E_e^{\pm 1} = \hbar\omega_0 \pm \mu B(z)$$



• 1987 Жан Далибар

# Использование перекачивающего лазера



Процесс оптической накачки, препятствующий циклическому возбуждению в щелочных атомах типа натрия (а); использование перекачивающего лазера для обеспечения многих циклов поглощение – излучение (б).

# Лазерное охлаждение и локализация атомов

Periodic Table of the Elements

$\lambda \approx 121 \text{ nm}$

1 IA 1A <b>H</b> Hydrogen 1.008	2 IIA 2A <b>H</b> Antihydrogen											13 IIIA 3A <b>B</b> Boron 10.811	14 IVA 4A <b>C</b> Carbon 12.011	15 VA 5A <b>N</b> Nitrogen 14.007	16 VIA 6A <b>O</b> Oxygen 15.999	17 VIIA 7A <b>F</b> Fluorine 18.998	18 VIIIA 8A <b>He</b> Helium 4.003
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012											5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.011	7 <b>N</b> Nitrogen 14.007	8 <b>O</b> Oxygen 15.999	9 <b>F</b> Fluorine 18.998	10 <b>Ne</b> Neon 20.180
11 <b>Na</b> Sodium 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 <b>Al</b> Aluminum 26.982	14 <b>Si</b> Silicon 28.086	15 <b>P</b> Phosphorus 30.974	16 <b>S</b> Sulfur 32.066	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.453	18 <b>Ar</b> Argon 39.948
19 <b>K</b> Potassium 39.098	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.956	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.942	24 <b>Cr</b> Chromium 51.996	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933	28 <b>Ni</b> Nickel 58.693	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.631	33 <b>As</b> Arsenic 74.922	34 <b>Se</b> Selenium 78.972	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.906	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.95	43 <b>Tc</b> Technetium 98.907	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.906	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.868	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.711	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.6	53 <b>I</b> Iodine 126.904	54 <b>Xe</b> Xenon 131.294
55 <b>Cs</b> Cesium 132.905	56 <b>Ba</b> Barium 137.328	57-71	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.948	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.217	78 <b>Pt</b> Platinum 195.085	79 <b>Au</b> Gold 196.967	80 <b>Hg</b> Mercury 200.592	81 <b>Tl</b> Thallium 204.383	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.980	84 <b>Po</b> Polonium [208.982]	85 <b>At</b> Astatine 209.987	86 <b>Rn</b> Radon 222.018
87 <b>Fr</b> Francium 223.020	88 <b>Ra</b> Radium 226.025	89-103	104 <b>Rf</b> Rutherfordium [261]	105 <b>Db</b> Dubnium [262]	106 <b>Sg</b> Seaborgium [266]	107 <b>Bh</b> Bohrium [264]	108 <b>Hs</b> Hassium [269]	109 <b>Mt</b> Meitnerium [278]	110 <b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111 <b>Rg</b> Roentgenium [280]	112 <b>Cn</b> Copernicium [285]	113 <b>Nh</b> Nihonium [286]	114 <b>Fl</b> Flerovium [289]	115 <b>Mc</b> Moscovium [289]	116 <b>Lv</b> Livermorium [293]	117 <b>Ts</b> Tennessine [294]	118 <b>Og</b> Oganesson [294]
Lanthanide Series		57 <b>La</b> Lanthanum 138.905	58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.908	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.242	61 <b>Pm</b> Promethium 144.913	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.925	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.930	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.934	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.055	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967	
Actinide Series		89 <b>Ac</b> Actinium 227.028	90 <b>Th</b> Thorium 232.038	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.036	92 <b>U</b> Uranium 238.029	93 <b>Np</b> Neptunium 237.048	94 <b>Pu</b> Plutonium 244.064	95 <b>Am</b> Americium 243.061	96 <b>Cm</b> Curium 247.070	97 <b>Bk</b> Berkelium 247.070	98 <b>Cf</b> Californium 251.080	99 <b>Es</b> Einsteinium [254]	100 <b>Fm</b> Fermium 257.095	101 <b>Md</b> Mendelevium 258.1	102 <b>No</b> Nobelium 259.101	103 <b>Lr</b> Lawrencium [262]	

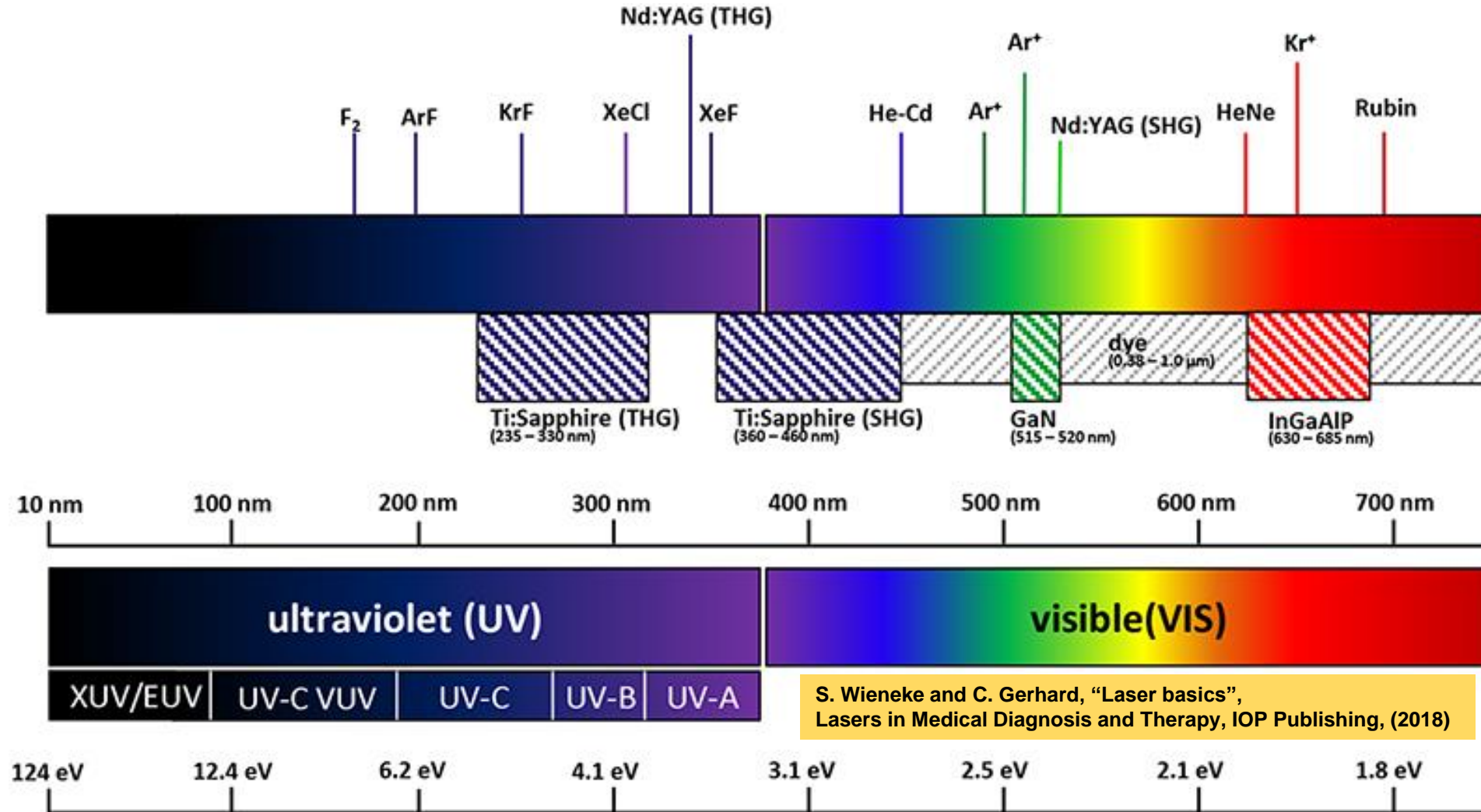
- Laser-cooled atoms

Fundamental investigations:

1. Equivalence principle
2. Fundamental constants

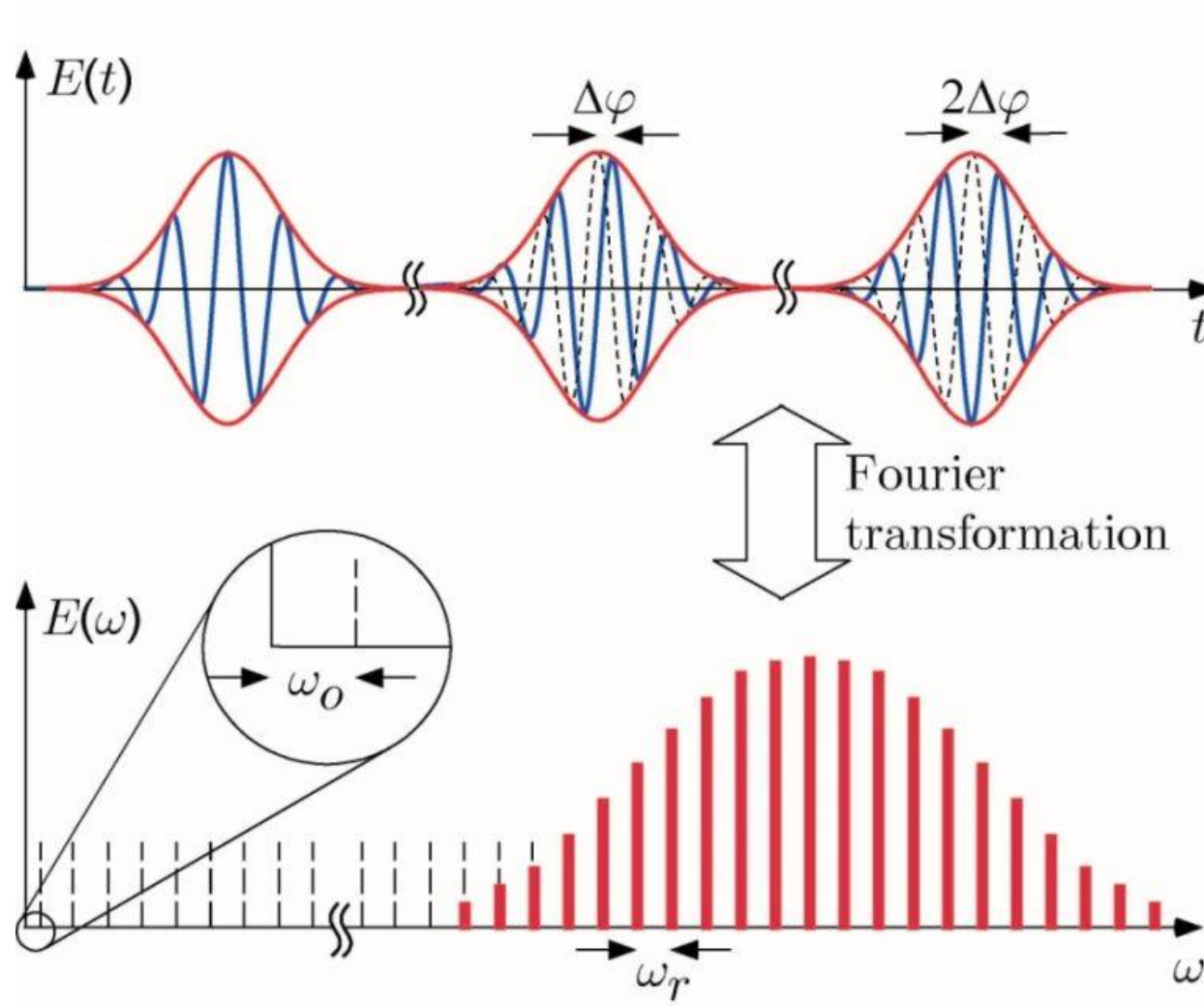


# Локализация атомов в УФ области



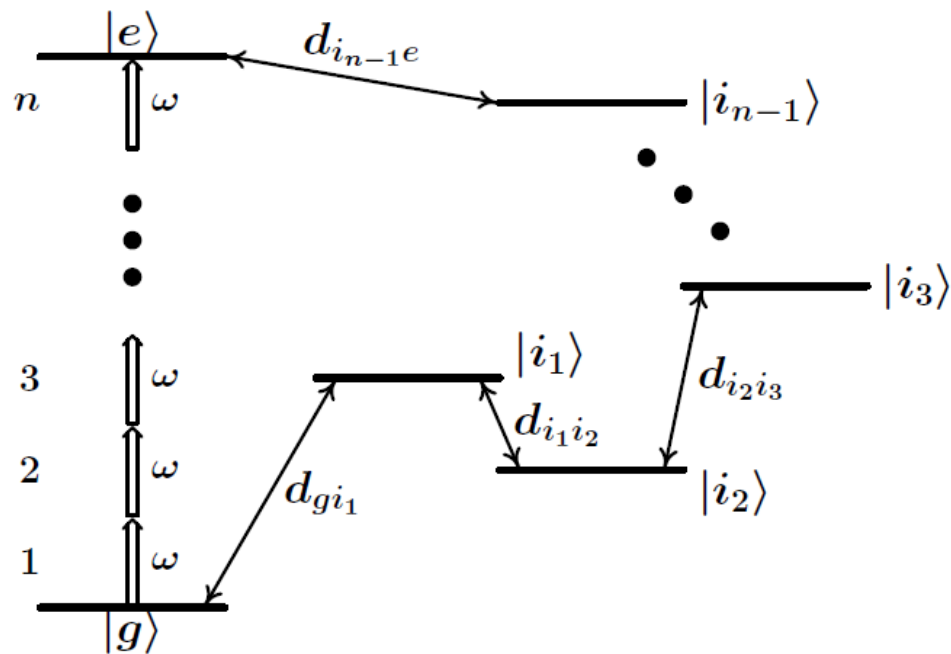
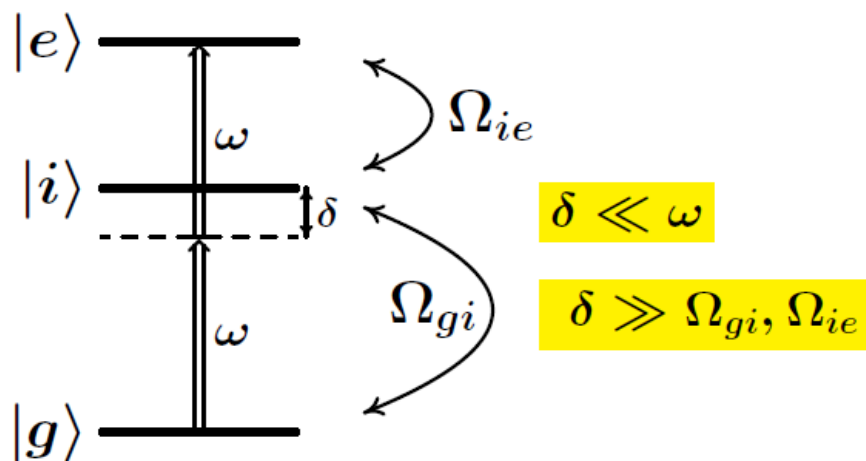
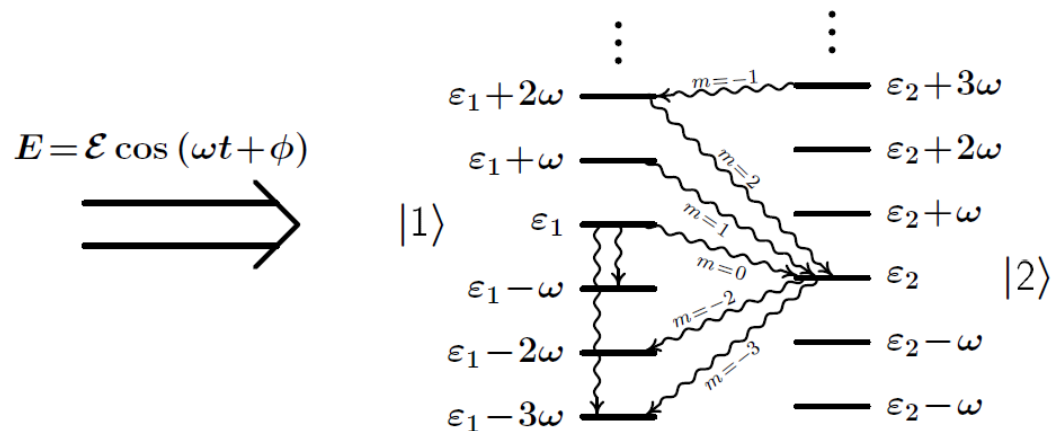
В УФ области нет подходящих для локализации источников непрерывного излучения

# Frequency comb





# Многофотонный переход

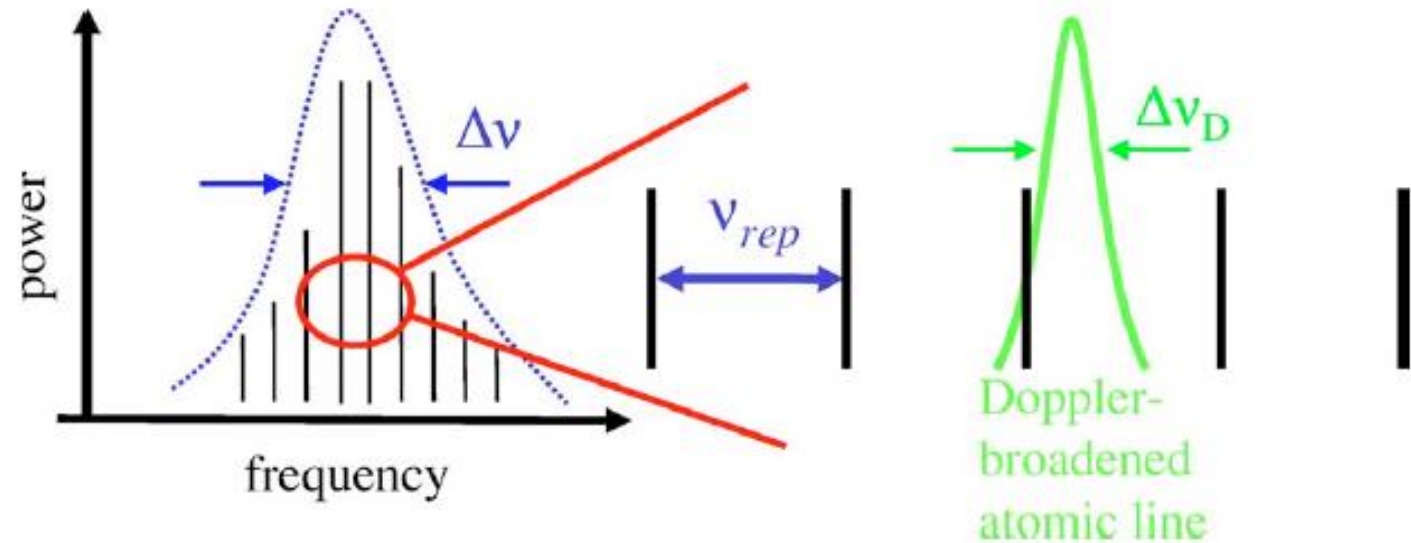


$$\Omega_{ge}^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_k \frac{\Omega_{gk} \Omega_{ke}}{\omega_{kg} - \omega},$$

$$\Delta E_g = -\frac{\hbar}{2} \sum_k \frac{\Omega_{gk} \omega_{kg}}{\omega_{kg}^2 - \omega^2},$$

$$\Delta E_e = -\frac{\hbar}{2} \sum_k \frac{\Omega_{ek} \omega_{ke}}{\omega_{ke}^2 - \omega^2}.$$

# Селективное по скорости рассеяние



$$\nu_k = \Gamma_D, \text{ and } \nu_{rep} \gg \Gamma_D,$$

Рассеяние от соседних линий уменьшается в  $(\Gamma_D/\nu_{rep})^2$ .

Действует так же как и CW поэтому доплеровский предел охлаждения  $h\Gamma/2$

$$R_{sc} = \left(\frac{\Gamma}{2}\right) \frac{(I/I_{sat})}{1 + 4(\Delta/\Gamma)^2 + (I/I_{sat})}. \quad \frac{I}{I_{sat}} = 2 \left(\frac{\Omega}{\Gamma}\right)^2$$

# Сравнение CW и Mode-locked

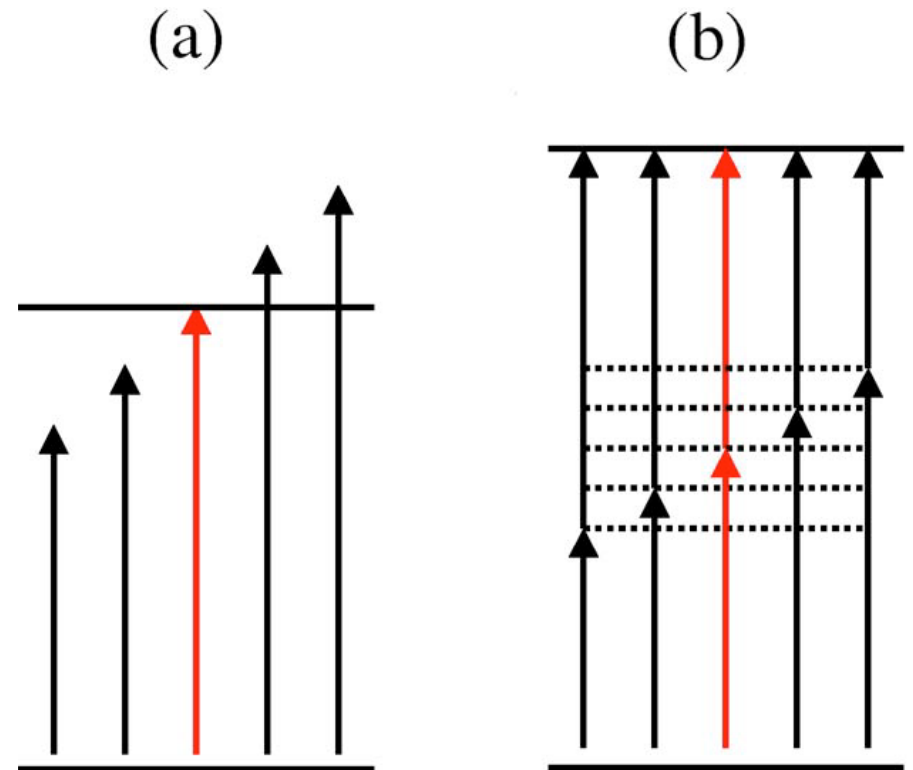
- Single-photon excitation

$$\nu_{\text{rep}} \gg \Gamma$$

При одинаковой средней интенсивности  
рассеяние уменьшается в  $\nu_{\text{rep}}/\Delta\nu$

- Two-photon excitation

При одинаковой средней интенсивности  
рассеяния равны, но Mode-locked  
предлагают большую интенсивность в УФ



# Охлаждение водорода

H, C, O, N, F, and Cl

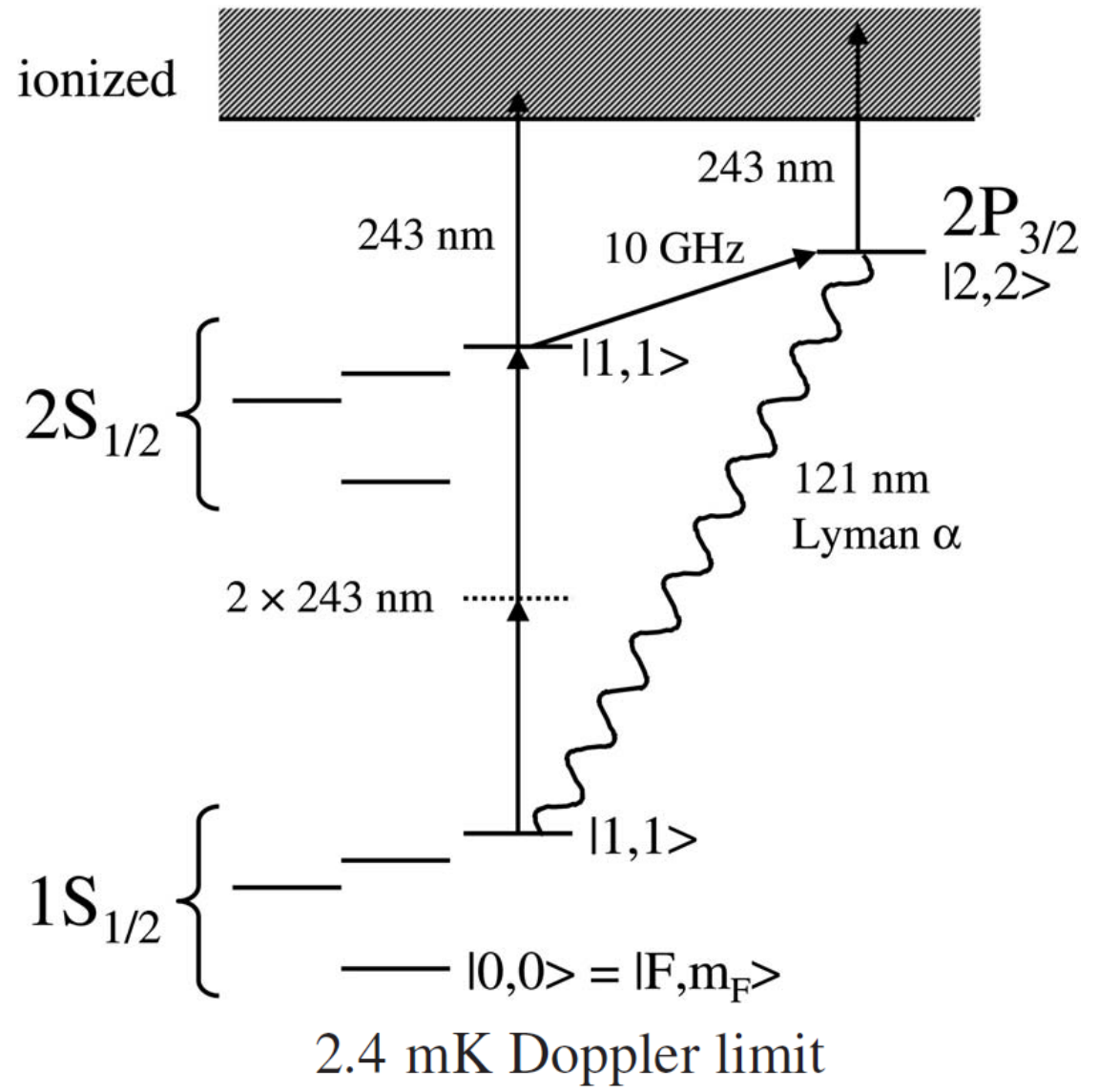
$$R_{PI} = 11.4 \bar{I}_{ML} \text{ Hz W}^{-1} \text{ cm}^2$$

$$R_2 = 2.8 \times 10^{-7} \bar{I}_{ML}^2 \text{ Hz W}^{-2} \text{ cm}^4$$

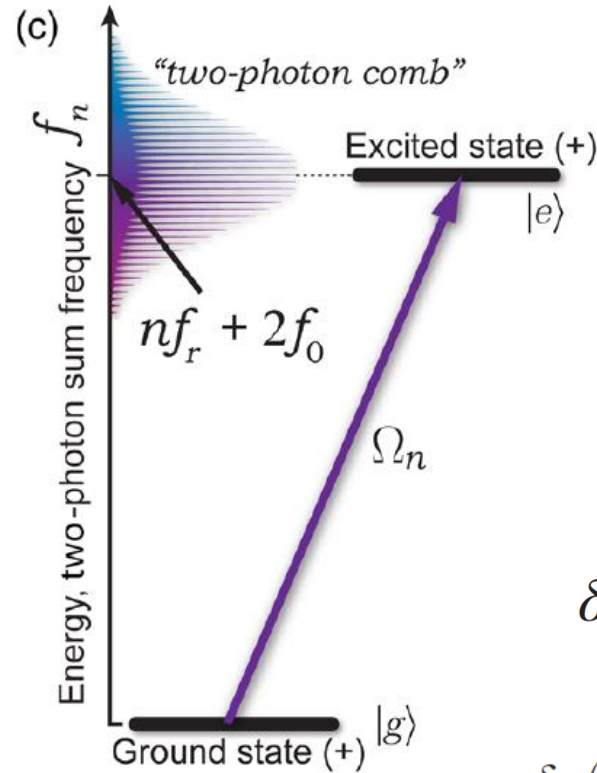
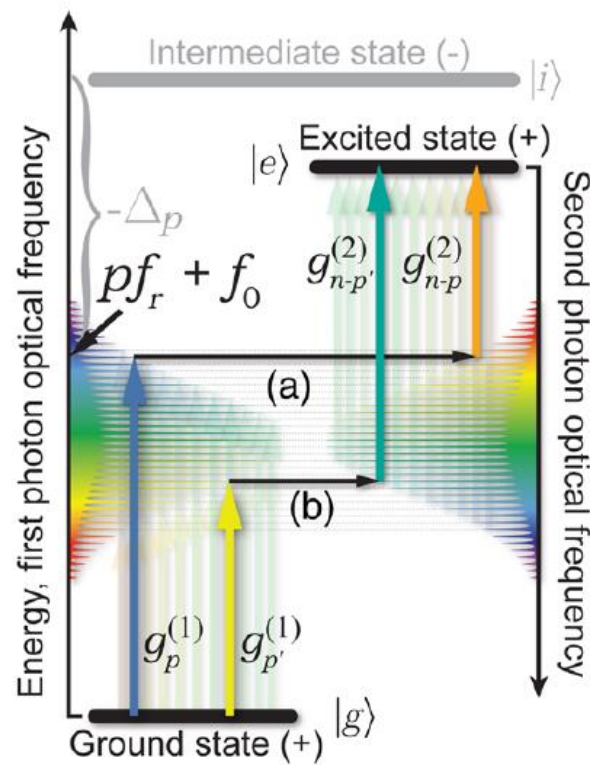
$$\bar{I}_{ML} = 160 \text{ kW cm}^{-2}, \quad R_2 = 1.0 \text{ kHz}$$

$$R_{PI} = 7 \text{ Hz}$$

Только 5% атомов будут потеряны из-за процессов фотоионизации в результате охлаждения



# Охлаждение атомов Rb на 2-фотонном переходе



$$f_n = nf_r + 2f_0$$

$$\Omega_n = \sum_p \frac{g_p^{(1)} g_{n-p}^{(2)}}{2\Delta_p}$$

$$\Delta_p = pf_r + f_0 - f_{gi}$$

$$\gamma_{\text{comb}} = \frac{\Omega_N^2 T_r}{4} \frac{\sinh(\gamma T_r/2)}{\cosh(\gamma T_r/2) - \cos(\delta_N(\mathbf{v}) T_r)}$$

$$\delta_N(\mathbf{v}) \equiv 2\pi(f_N - f_{ge} - f_N \hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{v}/c)$$

$$\delta_N(\mathbf{v}), \gamma \ll (2\pi f_r) \quad \gamma_N = \frac{\Omega_N^2}{\gamma} \frac{1}{1 + [2\delta_N(\mathbf{v})/\gamma]^2}$$

Jayich AM, Long X, Campbell WC. Direct frequency comb laser cooling and trapping. Physical Review X. 2016 Oct 10;6(4):041004.

# Нагрев VS охлаждение

$$\partial E / \partial t |_{\text{cool}} = -s_N \hbar \omega_{\text{ge}}^2 v^2 / c^2$$

$$\partial E / \partial t |_{\text{heat,abs}} = s_N \gamma \hbar^2 \omega_{\text{ge}}^2 / 4mc^2$$

Убедиться, что импульсы не воздействуют на атомы одновременно

$$\left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{\text{heat,spont}} = s_N \gamma \frac{\hbar^2 \omega_{\text{ge}}^2}{8mc^2}$$

$$T_D = \frac{3 \hbar \gamma}{4 2k_B}$$

12  $\mu\text{K}$  3D

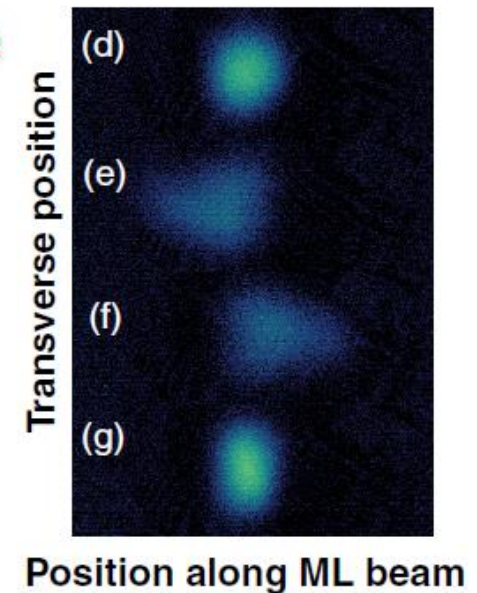
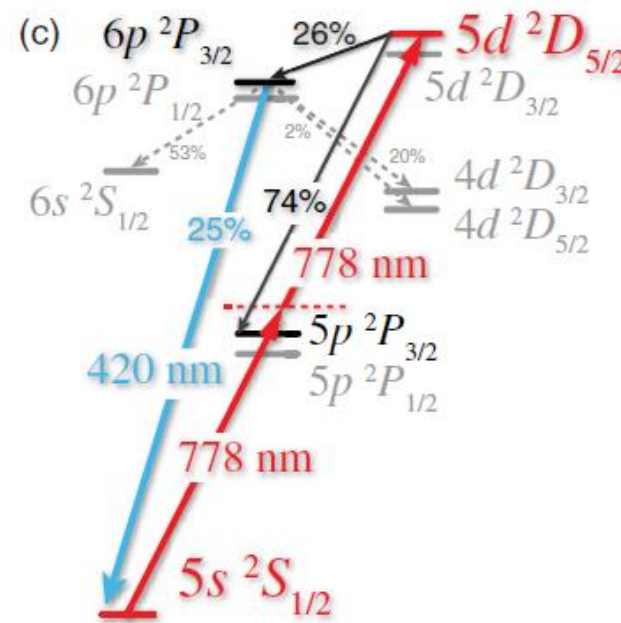
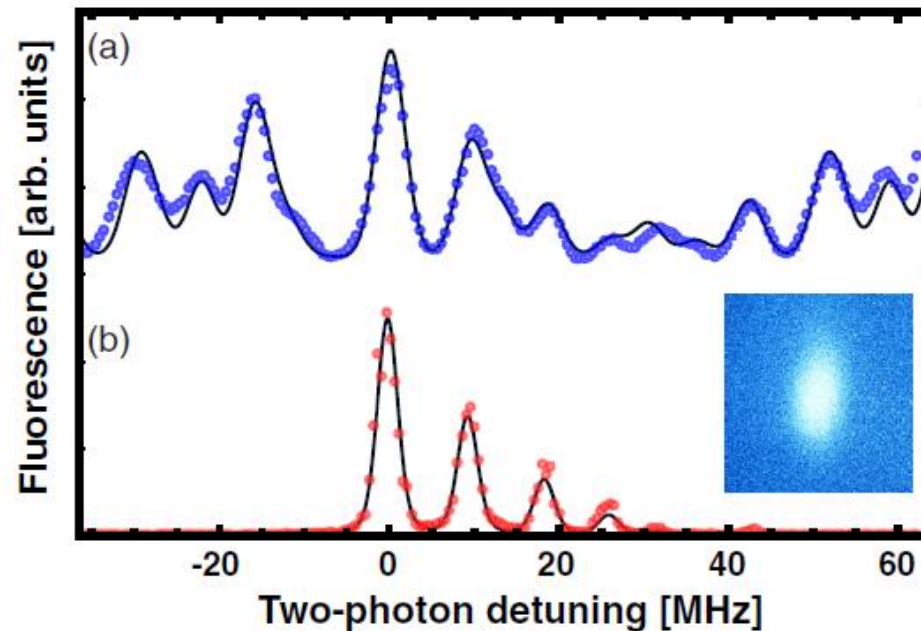
1D 31  $\mu\text{K}$

146  $\mu\text{K}$

Jayich AM, Long X, Campbell WC. Direct frequency comb laser cooling and trapping. Physical Review X. 2016 Oct 10;6(4):041004.



# Охлаждение атомов рубидия



$$f_r = 81.14 \text{ MHz} \quad (500 \pm 50) \text{ mW}$$

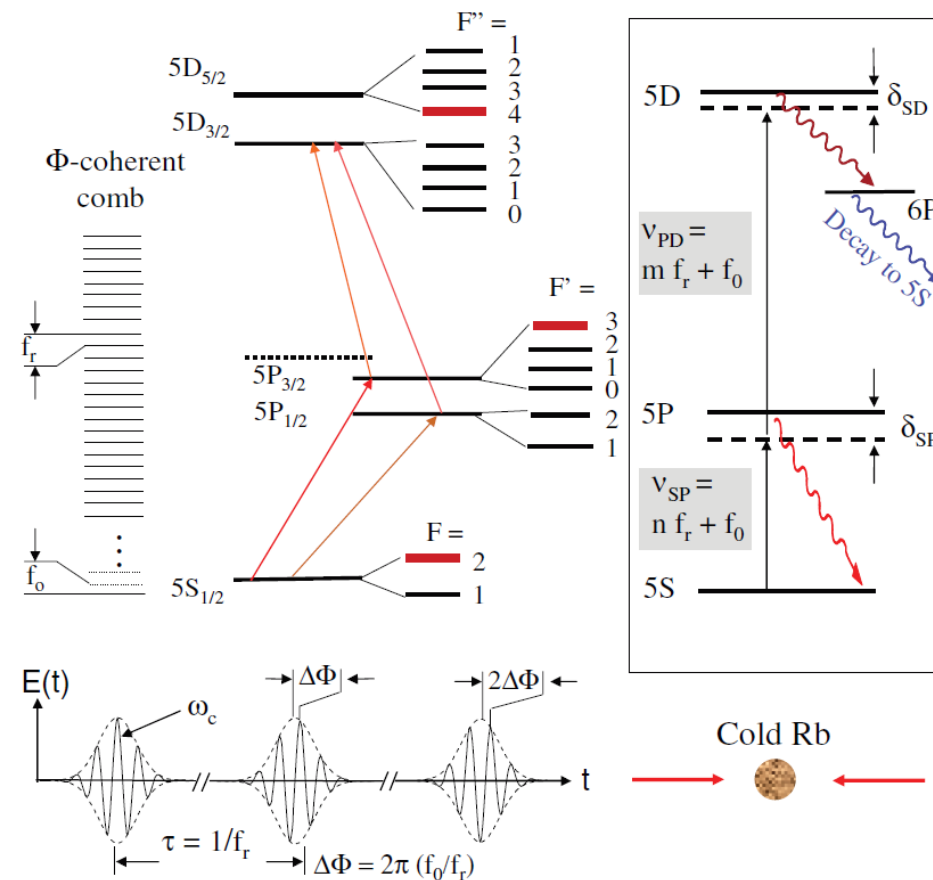
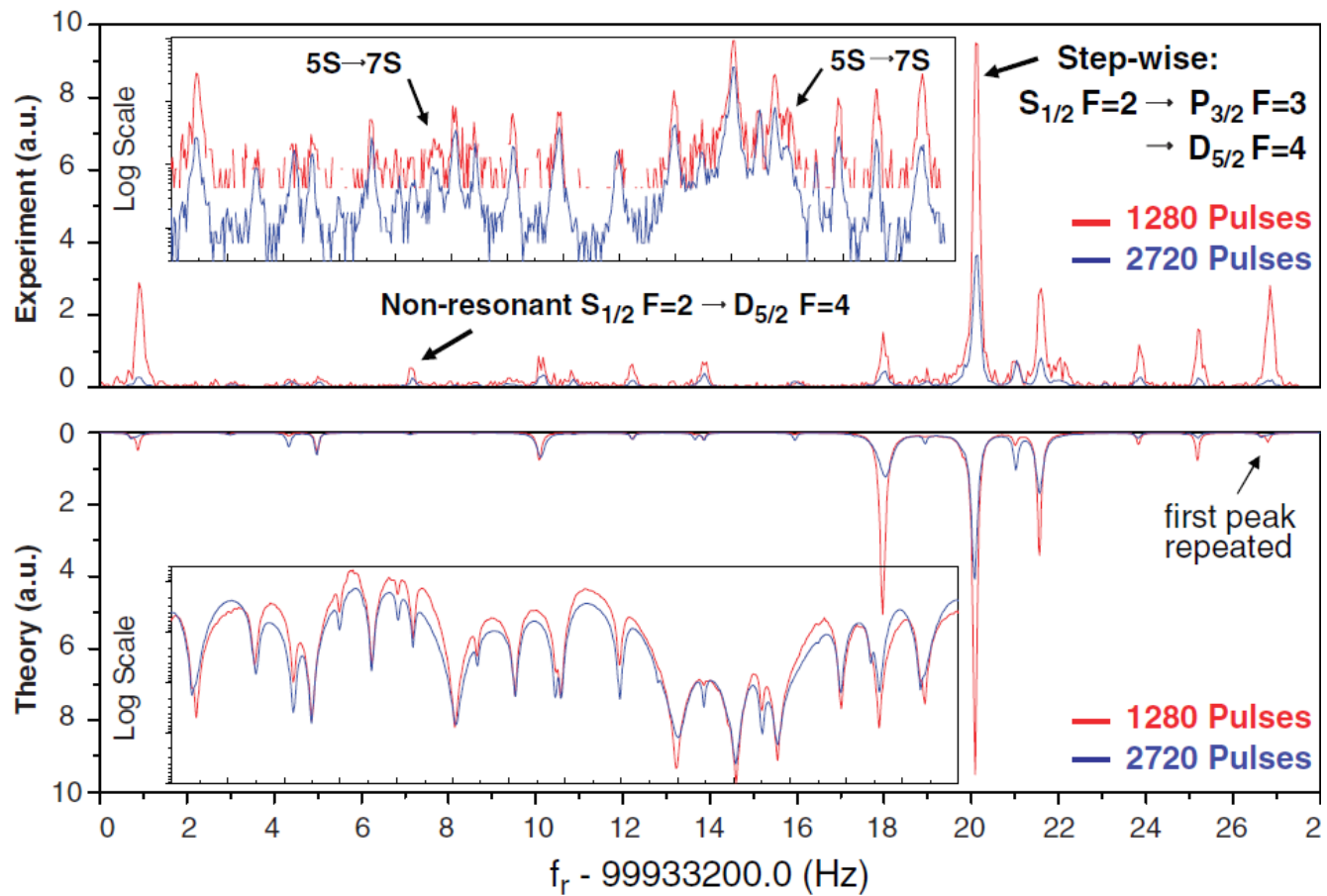
$$\gamma/2\pi = 667 \text{ kHz} \quad (1.1 \pm 0.1) \text{ mm}$$

2–5-ps pulses      500 GHz

$$\gamma_{\text{scatt}} = (6500 \pm 700) \text{ s}^{-1}$$

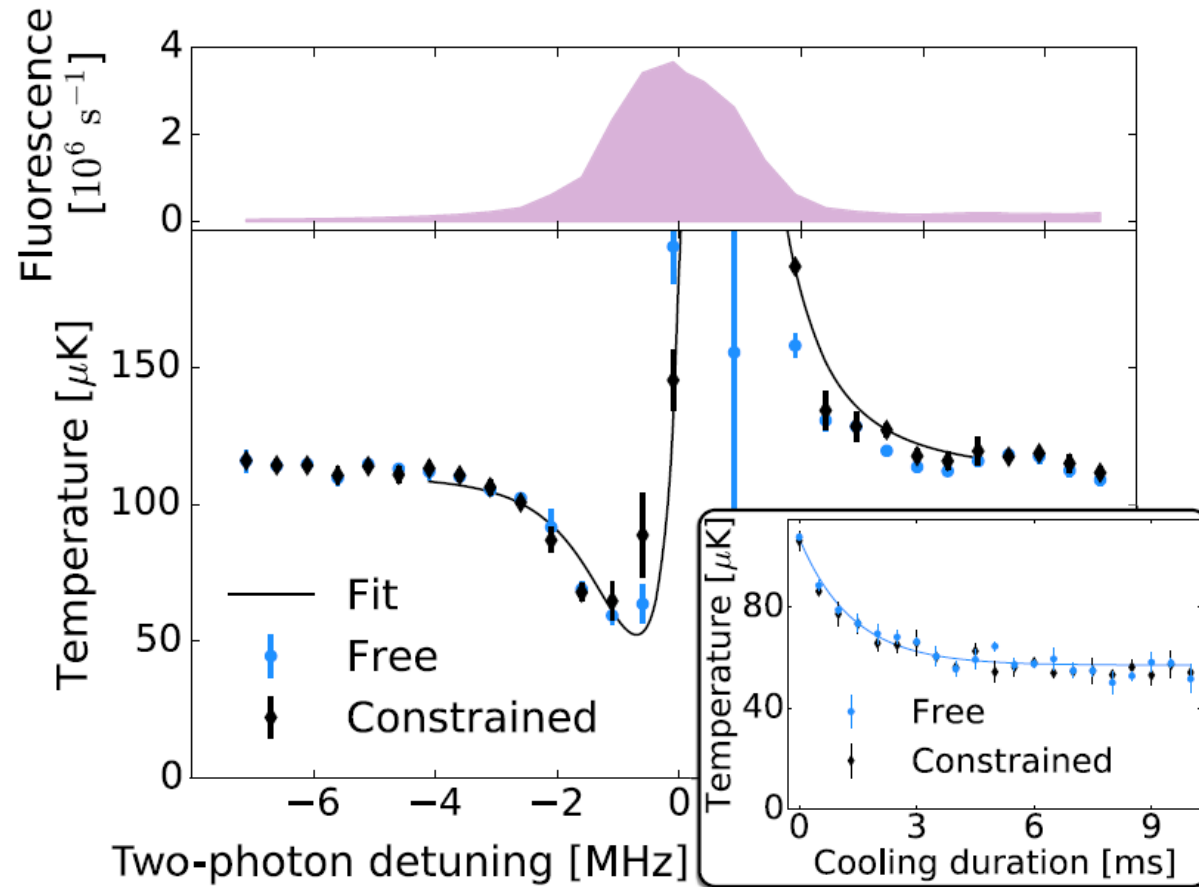
Jayich AM, Long X, Campbell WC. Direct frequency comb laser cooling and trapping. *Physical Review X*. 2016 Oct 10;6(4):041004.

# Динамика атомов при взаимодействии с импульсным излучением



Marian, Adela, et al. "United time-frequency spectroscopy for dynamics and global structure." *science* 306.5704 (2004): 2063-2068.

# Измерение температуры охлажденных атомов

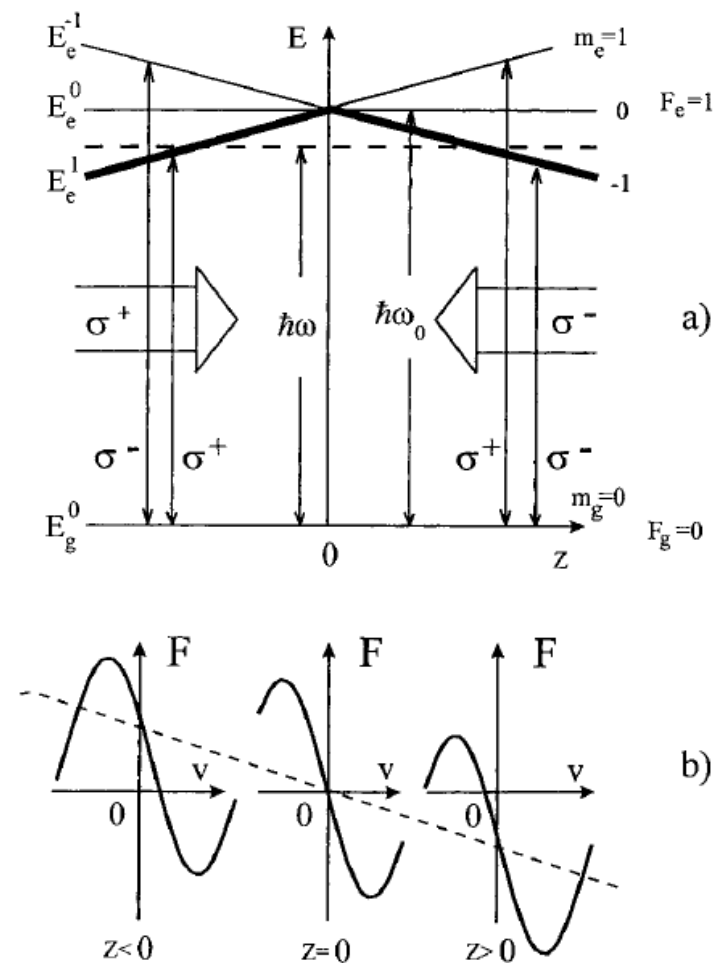
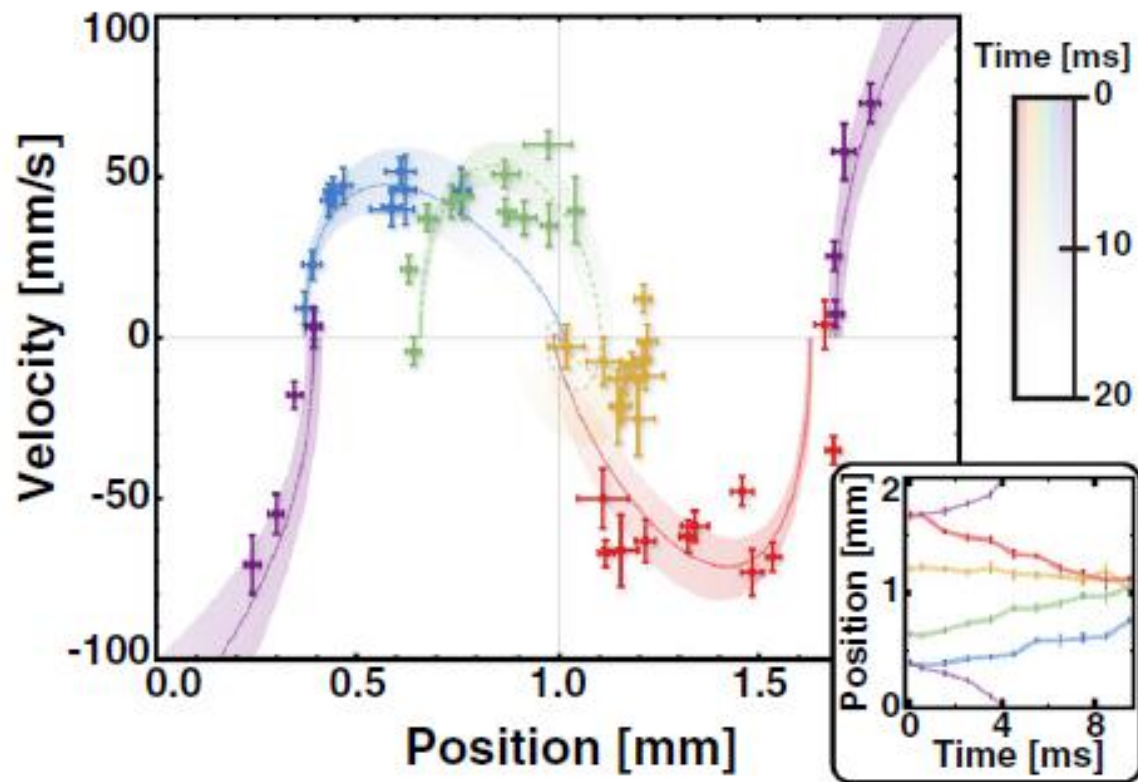


$$(57 \pm 2) \mu\text{K}$$

$$w(t) = \sqrt{w_0^2 + \frac{k_B T}{m} t^2}$$

Jayich AM, Long X, Campbell WC. Direct frequency comb laser cooling and trapping. Physical Review X. 2016 Oct 10;6(4):041004.

# 1D MOT



Jayich AM, Long X, Campbell WC. Direct frequency comb laser cooling and trapping. Physical Review X. 2016 Oct 10;6(4):041004.