

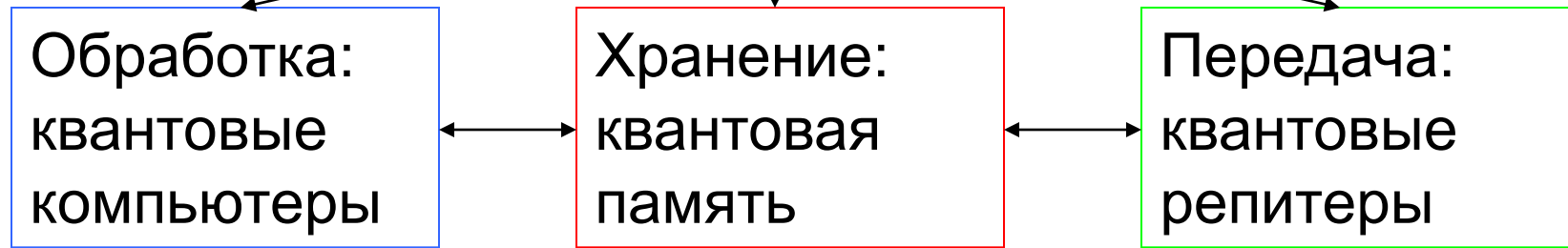


# **Логические элементы и элементы памяти на основе кристаллов, активированных ионами редкоземельных металлов**

**Р.А. Ахмеджанов\*, А.А. Бондарцев,  
Л.А. Гущин, И.В. Зеленский, А.Г. Литвак**

**\*e-mail:rinat@appl.sci-nnov.ru**

# Квантовые вычисления и коммуникации



*Quantum computers // Nature 464, p. 45 (2010)*

*Optical quantum memory // Nature Photonics 3, p. 706 (2009)*

*Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics // Rev. Mod. Phys. 83, p. 33 (2011)*

Кубит – фотон, ядро атома в молекуле, атомы и ионы в ловушках и кристаллах, сверхпроводящие цепи

Источник единичных фотонов с заданным временем хранения, квантовые репитеры

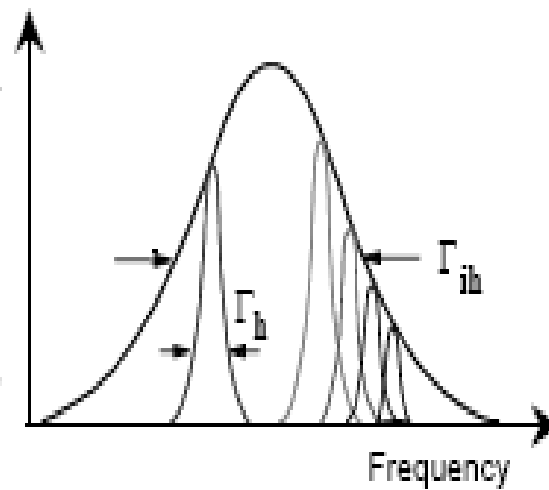
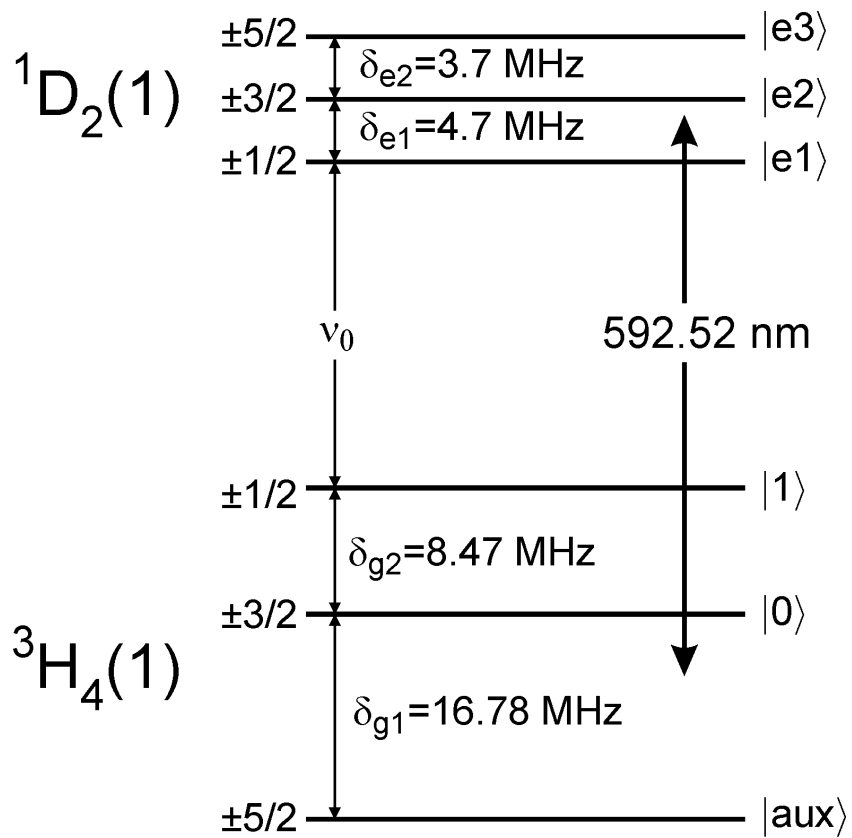
Источник перепутанных фотонов + квантовая память

«Возможно, что в будущем  
компьютеры будут весить не более  
1,5 тонн»

(Популярная механика, прогнозируя  
стремительный марш науки, 1949

«Я полагаю, что на всем мировом  
рынке мы не сможем продать  
больше пяти компьютеров»

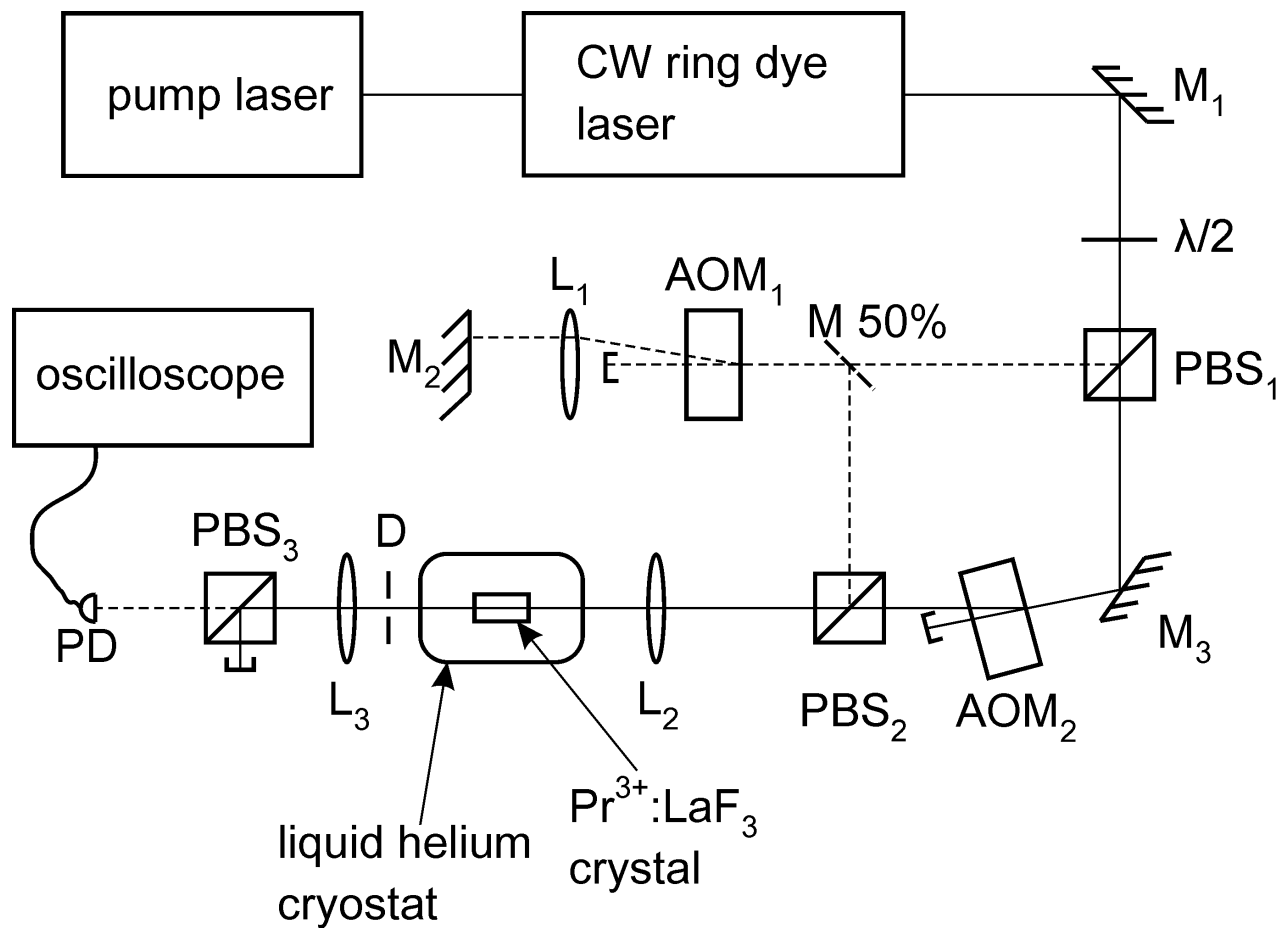
Томас Ватсон, президент IBM, 1943



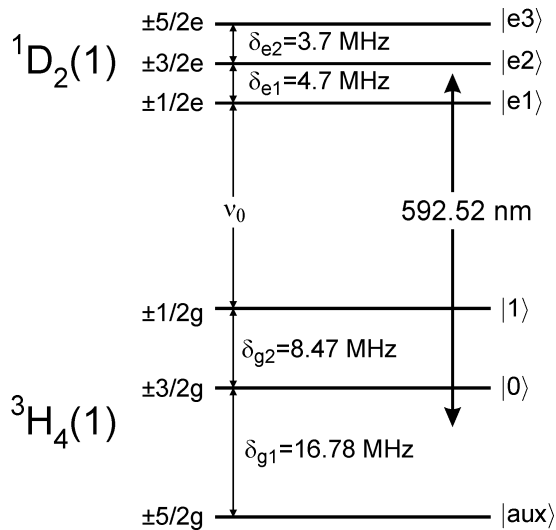
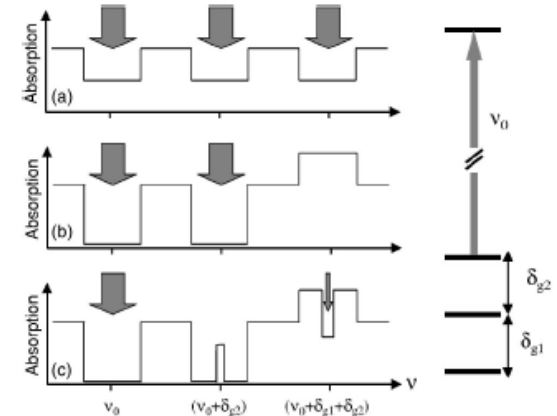
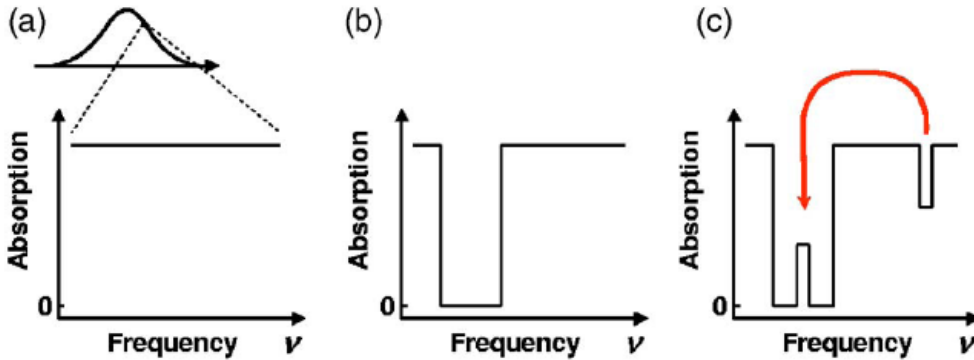
## Почему мы выбрали именно такую реализацию?

- 1. Большие времена когерентности** ( $\tau_{\text{opt}} \sim \text{мс}$ ;  $\tau_{\text{HF}} \sim \text{с}$ ) подходят как для логических элементов, так и для квантовой памяти. Релаксация за счет неоднородности ансамбля может быть обращена. Время одной операции – несколько мкс
- 2. Селекция и адресация** не в координатном, а в частотном пространстве!!!
- 3. Взаимодействие кубитов за счет разницы электрических дипольных моментов в основном и возбужденном состояниях**
- 4. Хорошие перспективы для масштабируемости** системы за счет перепутывания кубитов в физически разнесенных кристаллах
- 5. Реализация концепций** хранения, обработки и передачи информации на однотипных кристаллах
- 6. Ансамбль покоящихся частиц** – высокая оптическая плотность для эффективного взаимодействия с излучением, отсутствие движения частиц

# Экспериментальная установка



# Подготовка спектрально выделенных ансамблей (кубитов)

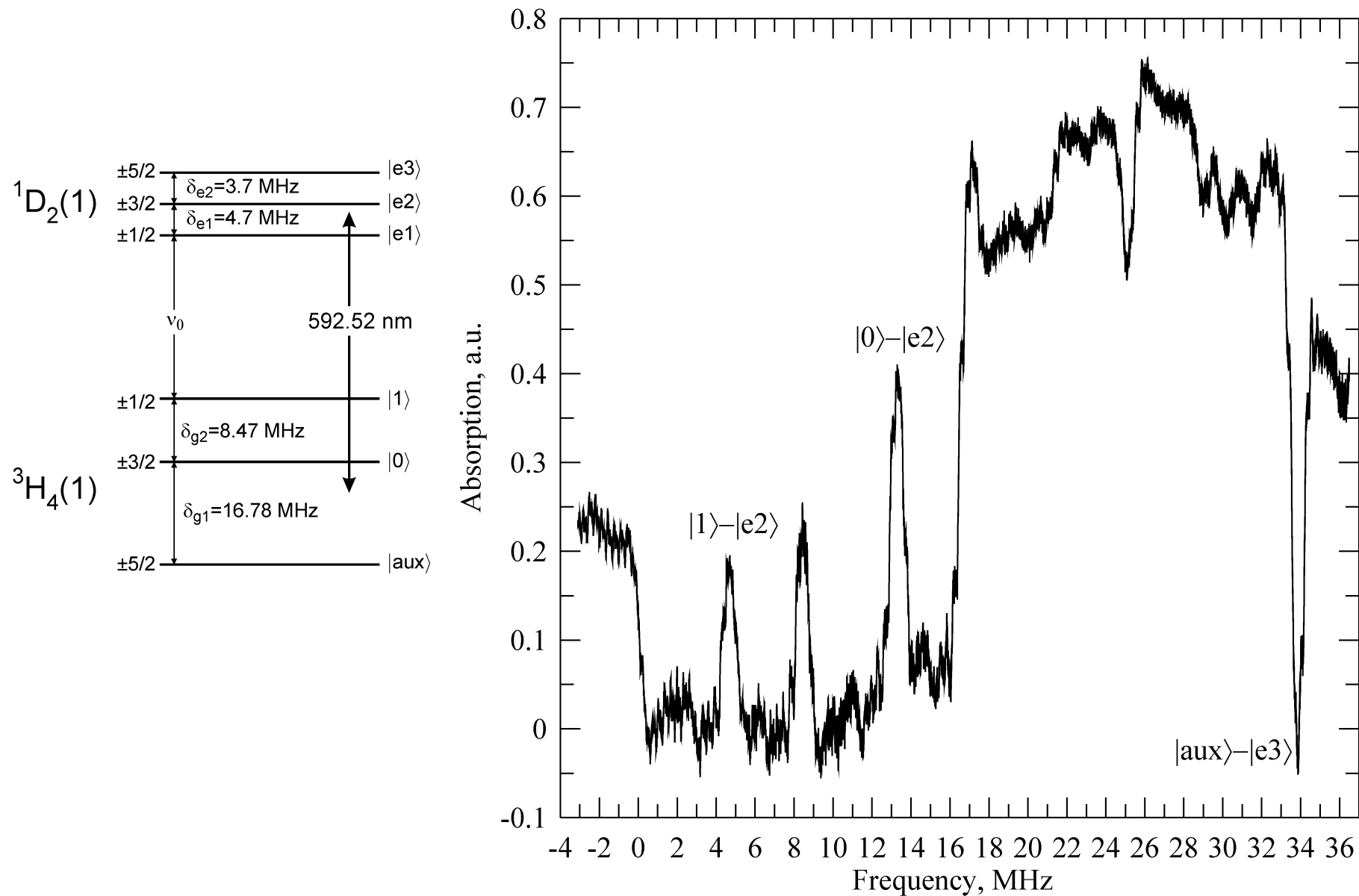


1. Выжигание спектральной дырки в окрестности перехода  $1/2g - 1/2e$  ( $\pm 3$  МГц), 100 циклов импульсов длительностью 1,7 мкс с шагом 200 кГц, интервал между циклами 600 мкс;
2. Выжигание спектральной дырки в окрестности перехода  $3/2g - 3/2e$  ( $13,2 \pm 3$  МГц), 100 циклов импульсов длительностью 1,7 мкс с шагом 200 кГц, интервал между циклами 600 мкс;
3. Выжигание спектральной дырки в окрестности перехода  $5/2g - 5/2e$  ( $33,6 \pm 3$  МГц), 100 циклов импульсов длительностью 1,7 мкс с шагом 200 кГц, интервал между циклами 600 мкс;
4. Выжигание спектральной дырки в диапазоне -3 – 15,2 МГц, 300 циклов импульсов длительностью 1,7 мкс с шагом 200 кГц, интервал между циклами 600 мкс;
5. 10 импульсов на частоте 36,6 МГц, длительностью 50 мкс, интервал между импульсами 600 мкс;
- 6 этап. Пробные (считывающие) импульсы: сканирование частоты в диапазоне -3 – 39,9 МГц с шагом 64 кГц, длительность каждого импульса 1,7 мкс.

Схема уровней ионов

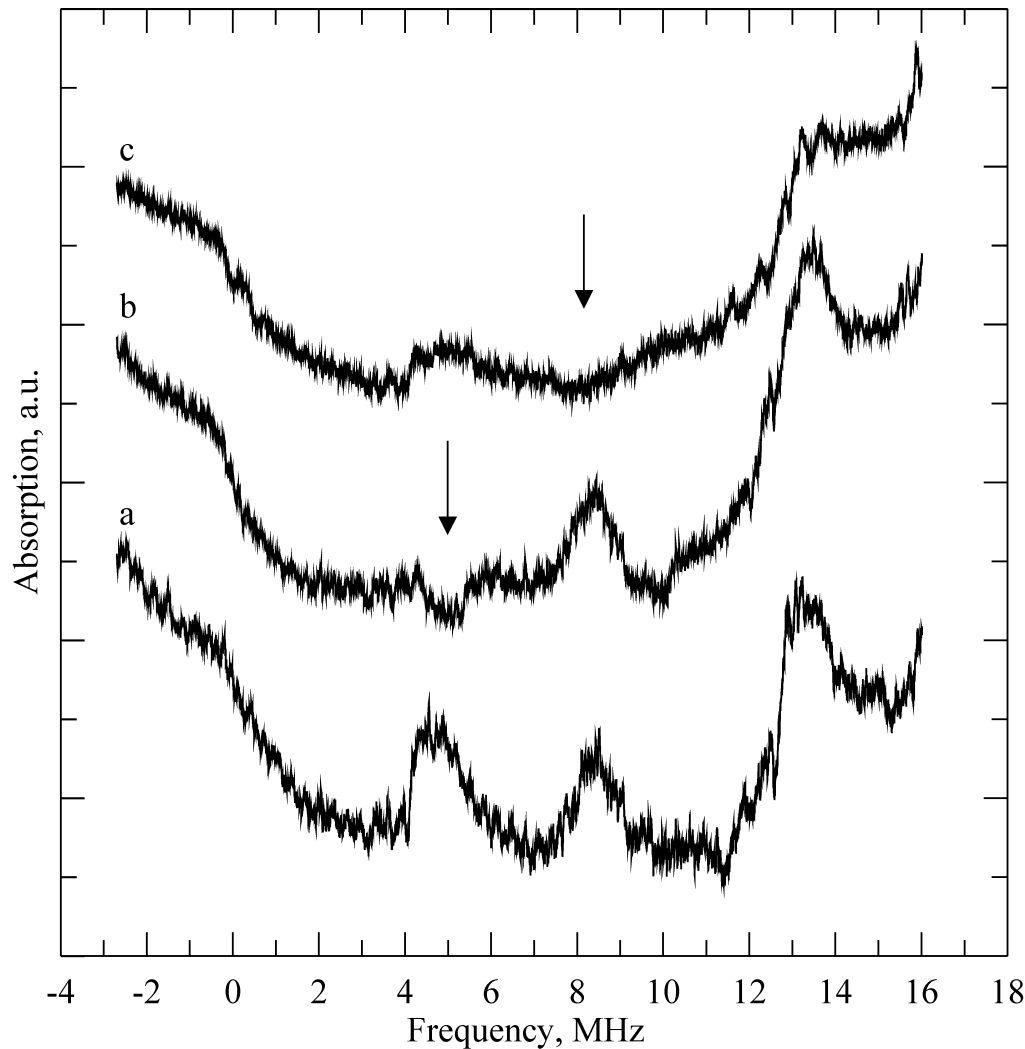
$\text{Pr}^{3+}$  в  $\text{LaF}_3$

# Спектр поглощения

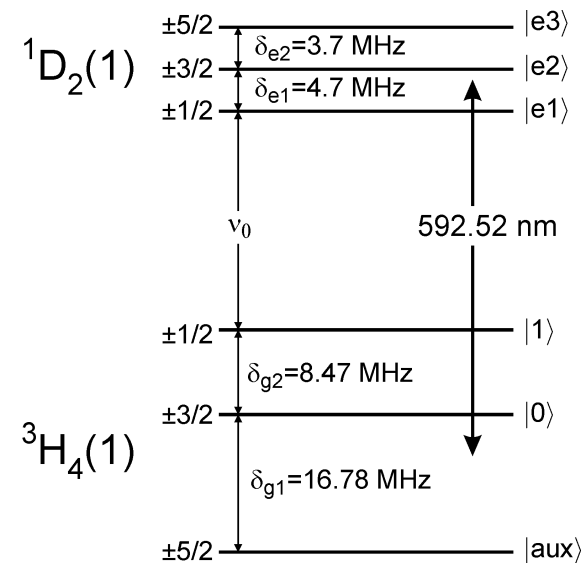




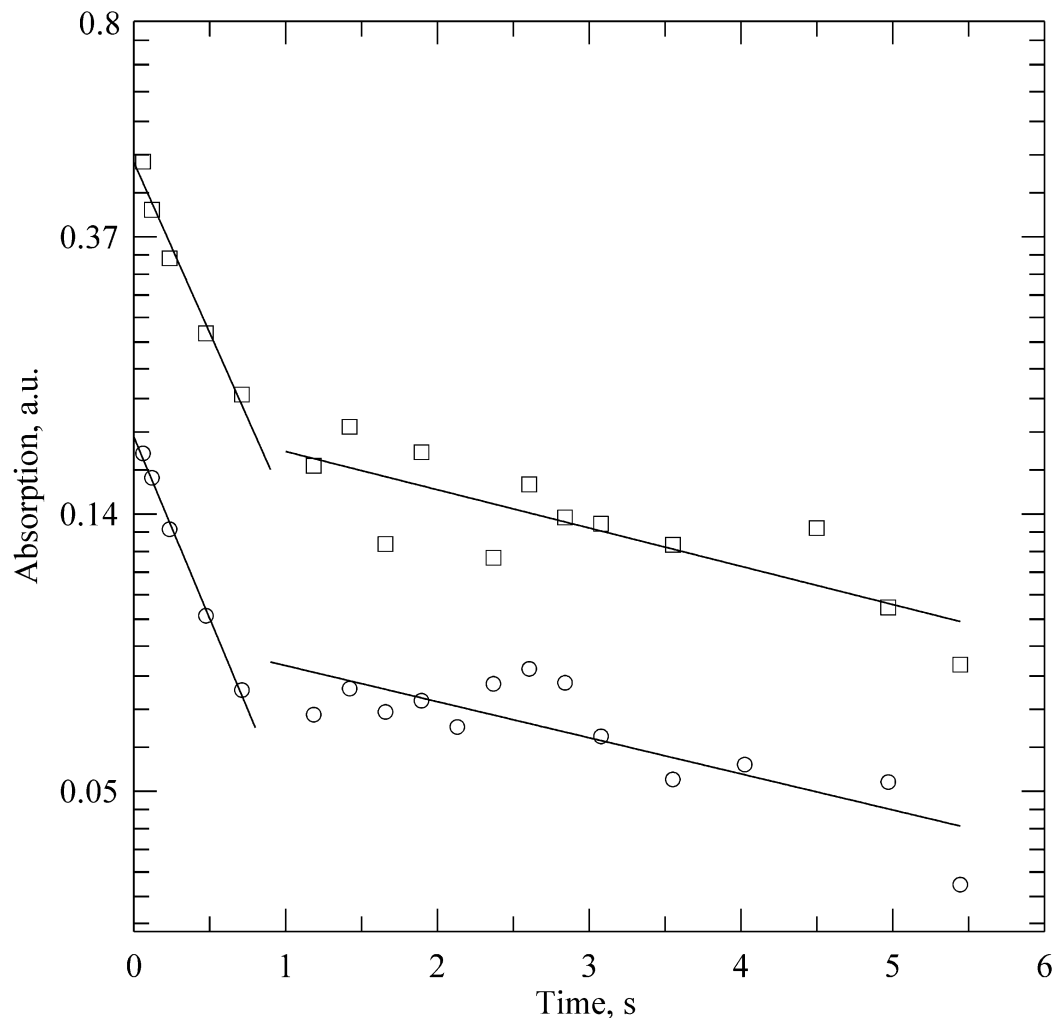
# Манипуляции населенностями сверхтонких (кубитовых) уровней



- a) Без лазерной накачки
- b) Лазер настроен на переход  $|1\rangle \rightarrow |e2\rangle$
- c) Лазер настроен на переходы  $|1\rangle \rightarrow |e3\rangle$  and  $|0\rangle \rightarrow |e1\rangle$



# Измерение времени жизни населенности на сверхтонких (кубитовых) уровнях



□ - переход  $|0\rangle \rightarrow |e2\rangle$

○ - переход  $|1\rangle \rightarrow |e2\rangle$

**8,47 MHz – 0,405 c<sup>-1</sup>**

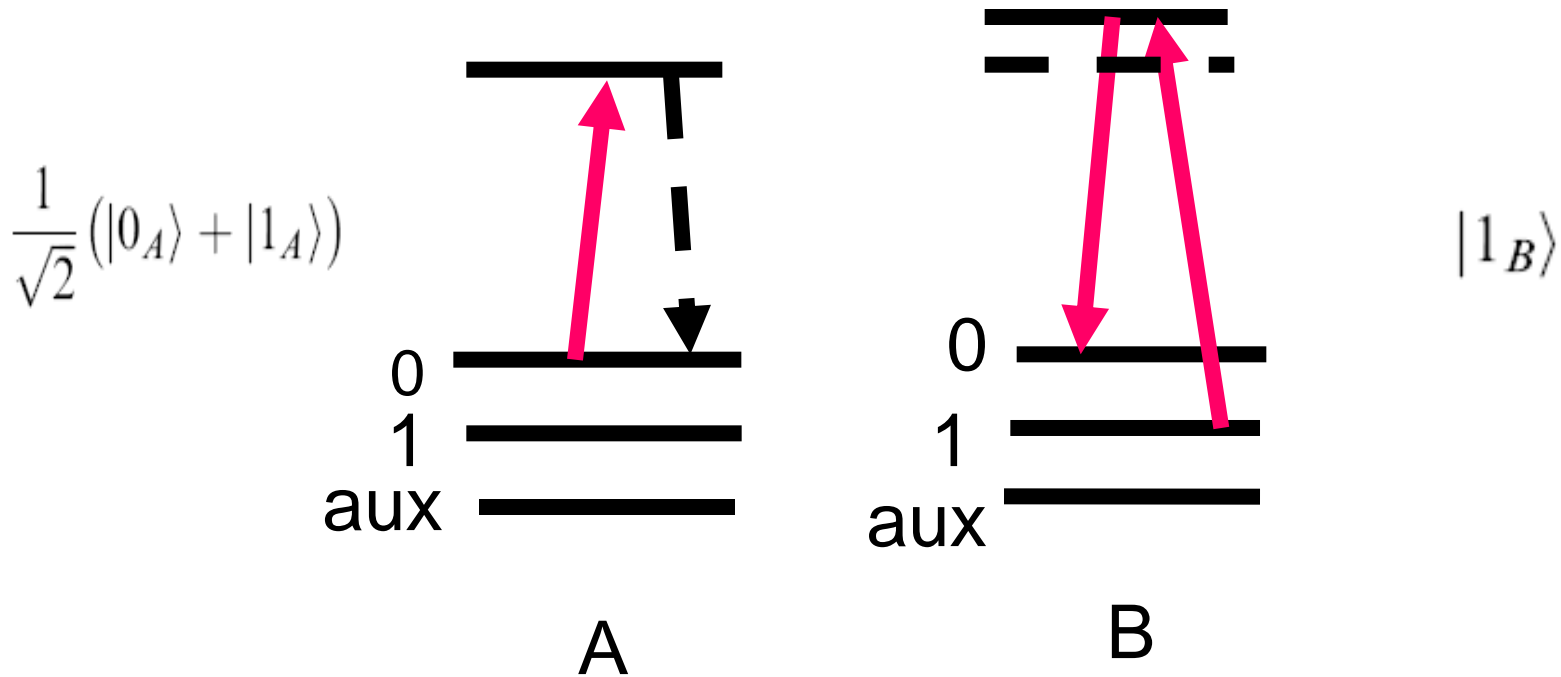
**16,7 MHz – 0,075 c<sup>-1</sup>**

[R.Shelby, R.Macfarlane, and C.Yannoni. Optical Measurement of spin-lattice Relaxation of dilute nuclei: LaF<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>. Phys.Rev.B, **21**, 5004]

**8,47 MHz – 0,85 c<sup>-1</sup>**

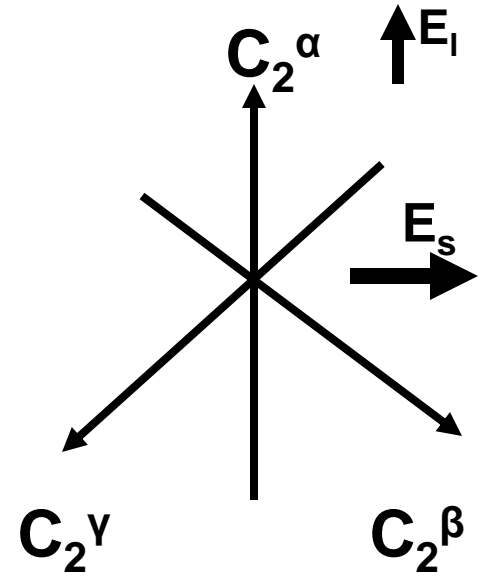
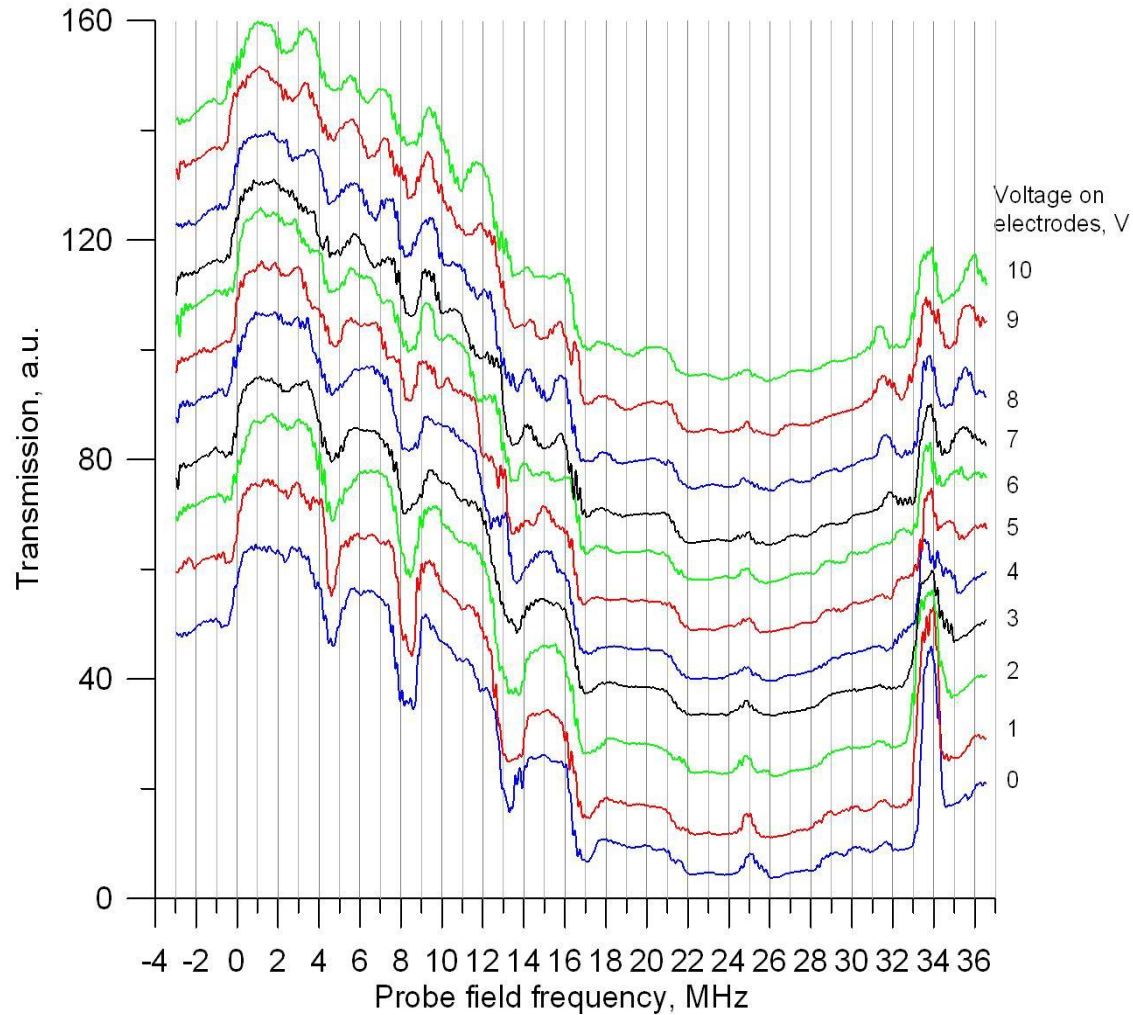
**16,7 MHz – 0,11 c<sup>-1</sup>**

# Операция CNOT + перепутывание

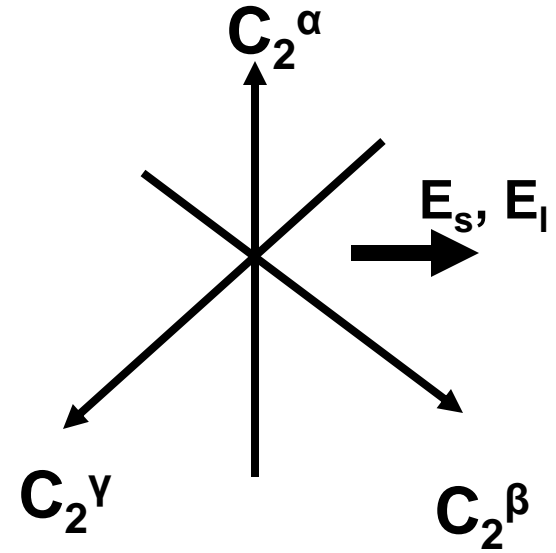
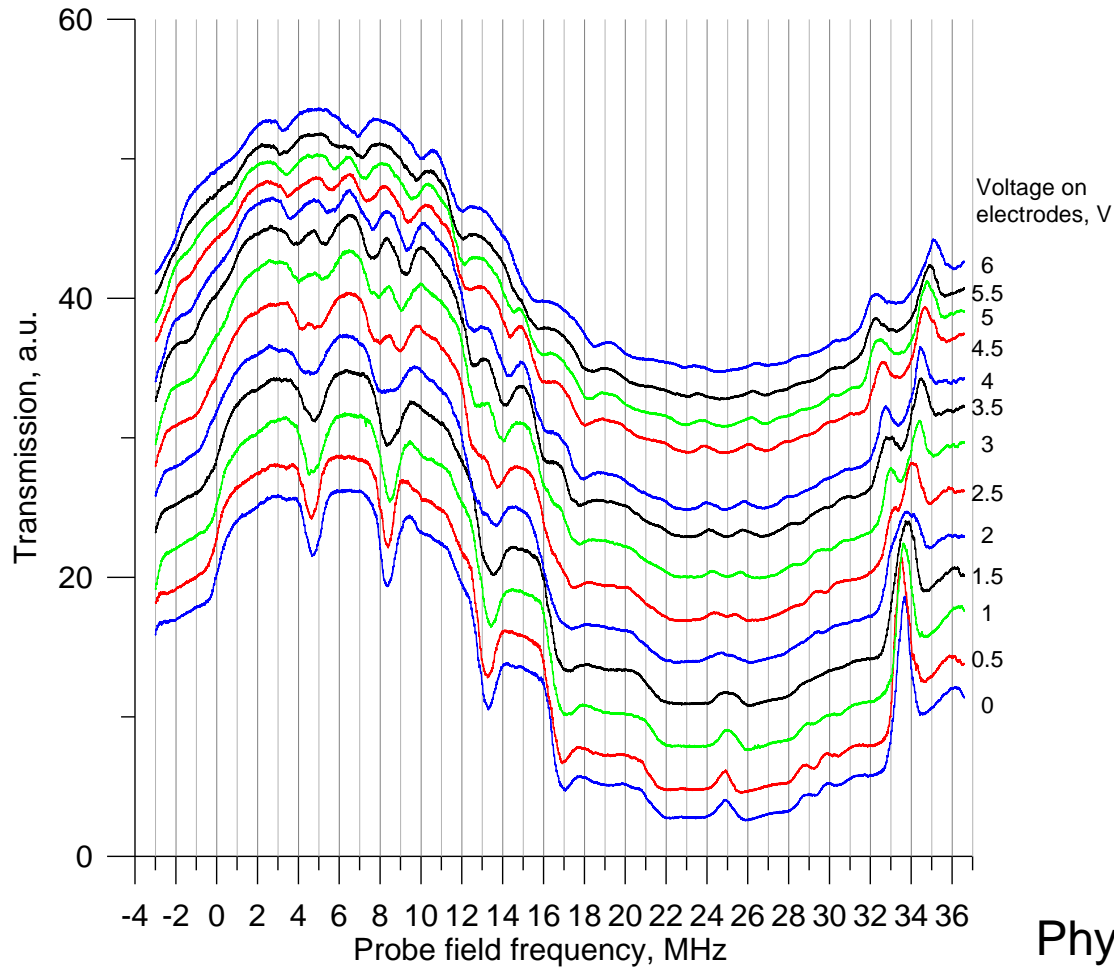


$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A\rangle + |1_A\rangle) |1_B\rangle \xrightarrow{\text{CNOT, перепутывание}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A\rangle|1_B\rangle + |1_A\rangle)$$

# Эффект Штарка



# Эффект Штарка



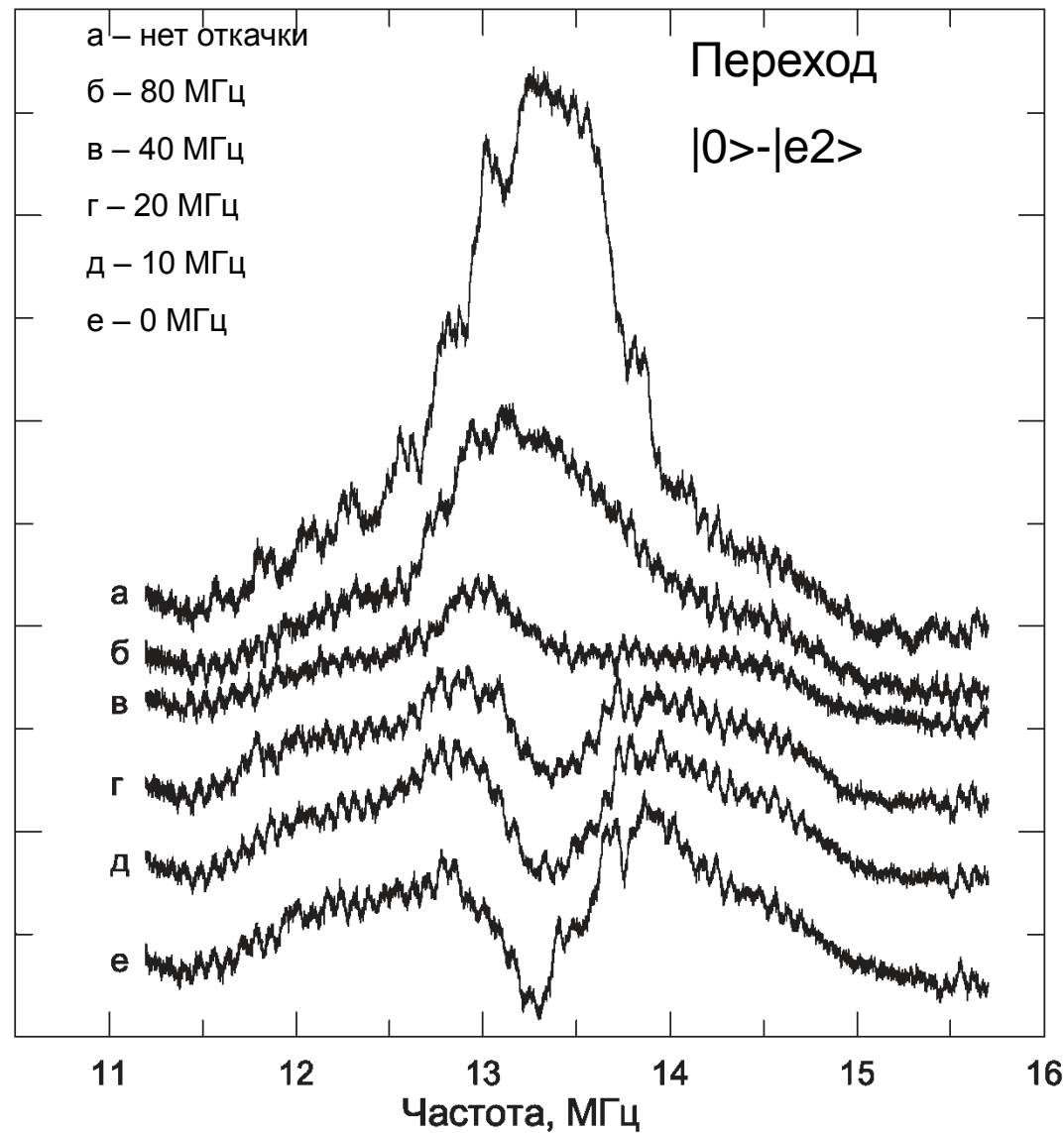
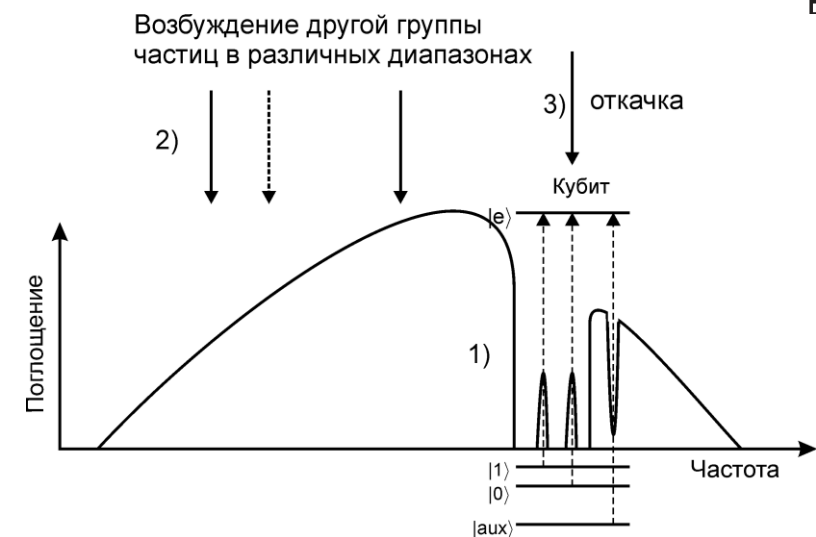
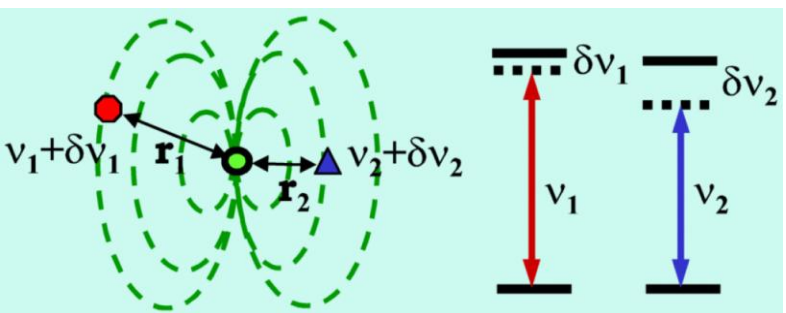
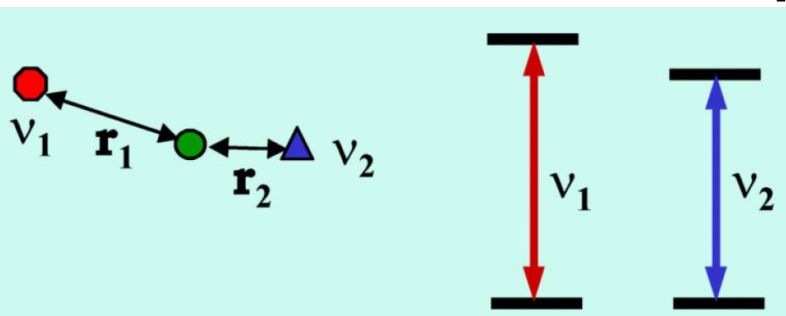
**СДВИГ**  
**0,25 MHz/(V\*cm<sup>-1</sup>)**

$$\delta(h\nu) = -L\delta\mu E_0 - \frac{1}{2}L^2 E_0 \delta\alpha E_0$$

$$L = (\varepsilon_1 + 2)/3$$

Physica Scripta.T102,178-185,2002  
 0,5%, 1 MHz, 1 MHz, **1-10%???**

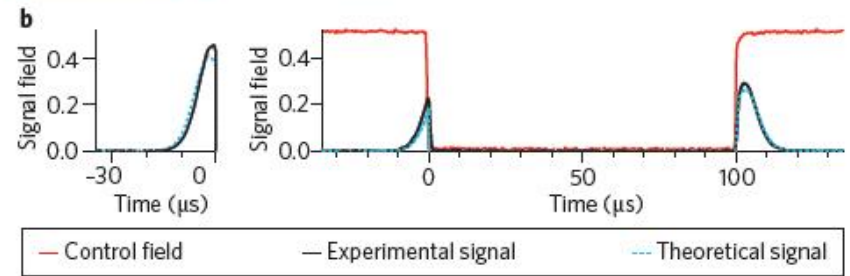
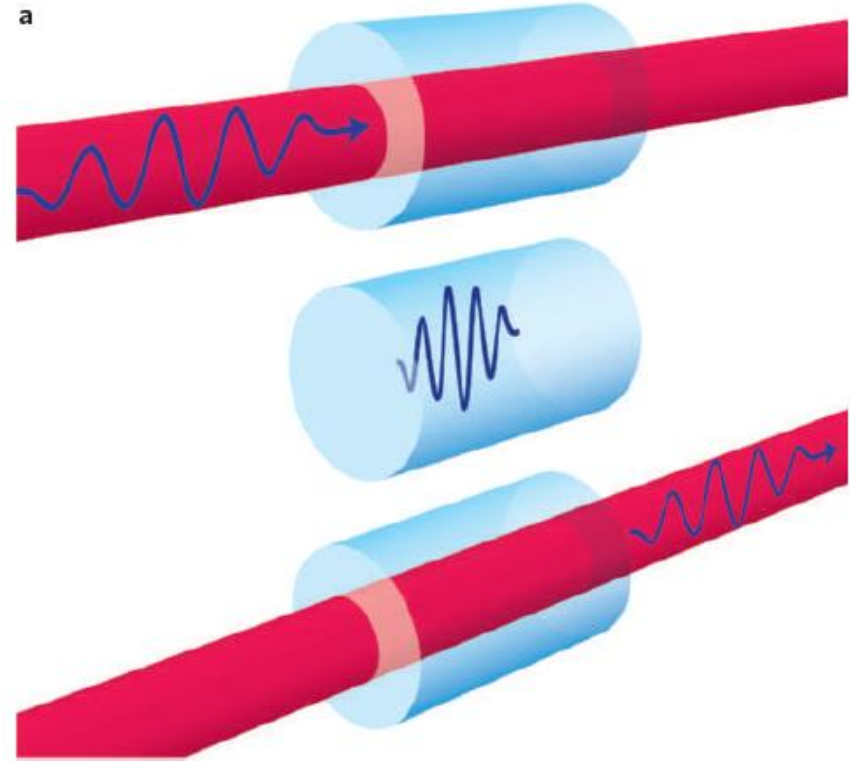
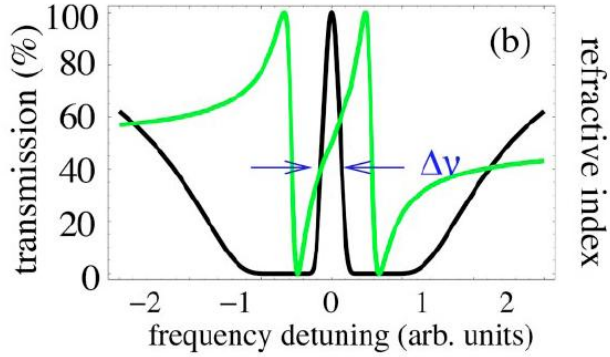
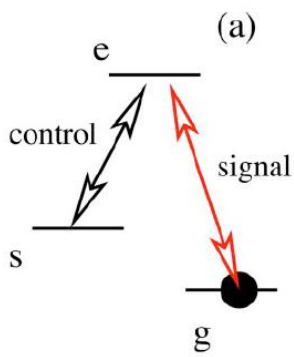
# Взаимодействие кубитов («чистка» кубитов)



# Проблемы

- Масштабирование
- Эффективное управление кубитами

# Квантовая память на основе эффекта электромагнитно индуцированной прозрачности



$c$

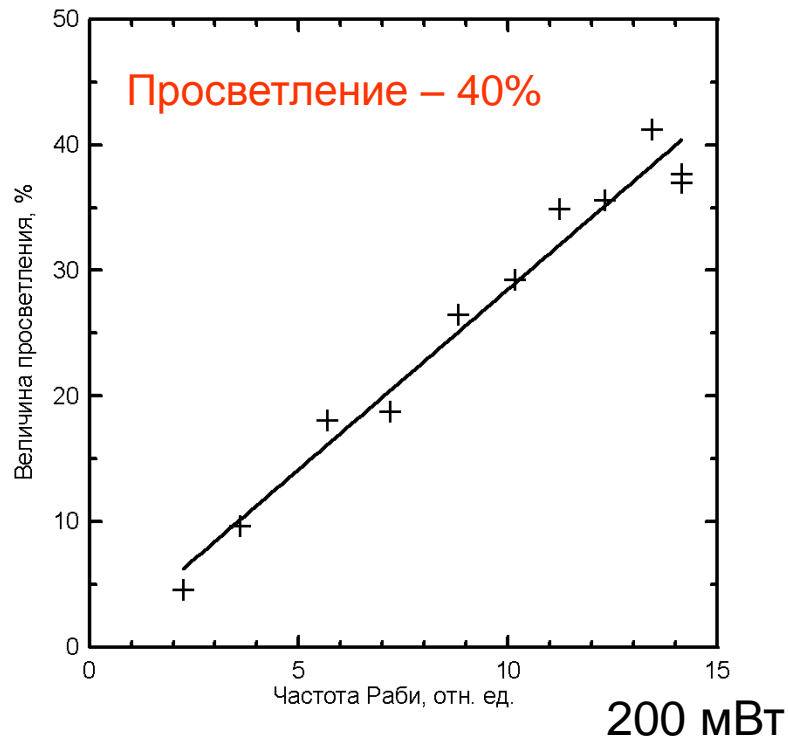
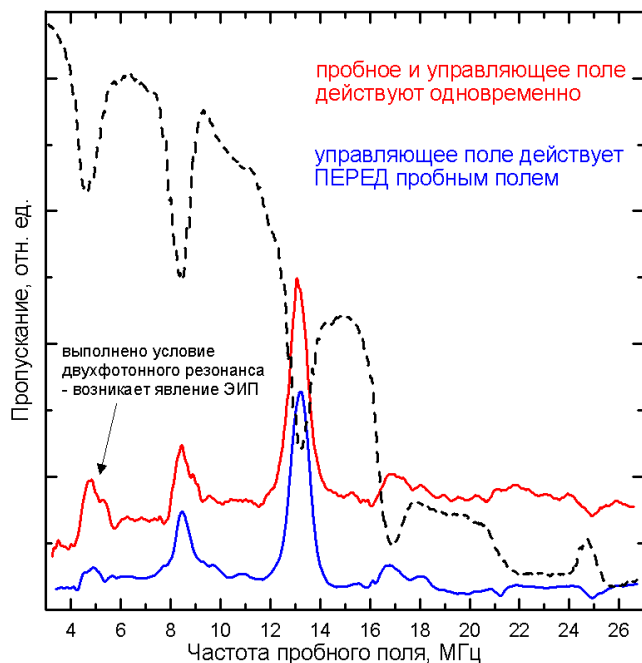
$$v_g = \frac{c}{1 + g^2 N / |\Omega|^2}$$

$$\hat{\Psi}(z, t) = \cos \theta \hat{E}(z, t) - \sin \theta \sqrt{N} \hat{s}(z, t),$$

$$\cos \theta = \frac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2 + g^2 N}}, \quad \sin \theta = \frac{g \sqrt{N}}{\sqrt{\Omega^2 + g^2 N}}.$$



# Эффективный режим электромагнитно индуцированной прозрачности

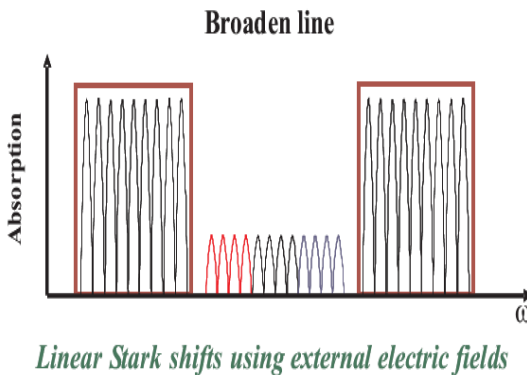
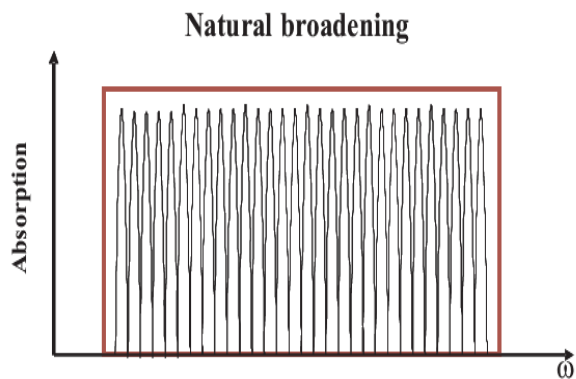


Akhmedzhanov R. et al. *Effective regime of electromagnetically induced transparency in a Pr<sup>3+</sup>:LaF<sub>3</sub> crystal* // JETP Letters **94**, pp. 544-548 (2011).

В предыдущей работе при сходных экспериментальных условиях, **но без спектральной селекции** получено просветление 3-5%

**Проблемы:** модовая емкость  $\sim \sqrt{d}$ , спектральная ширина записываемого импульса ограничена областью прозрачности

# Контролируемое обращение неоднородного уширения (CRIB)



Модовая емкость  $\sim d$ ,  
 Эффективность до 100%,  
 Контролируемое время Хранения!!!

**STEP 3**

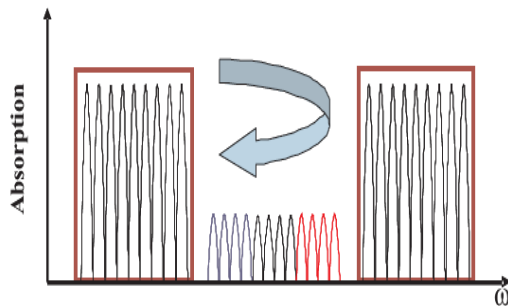
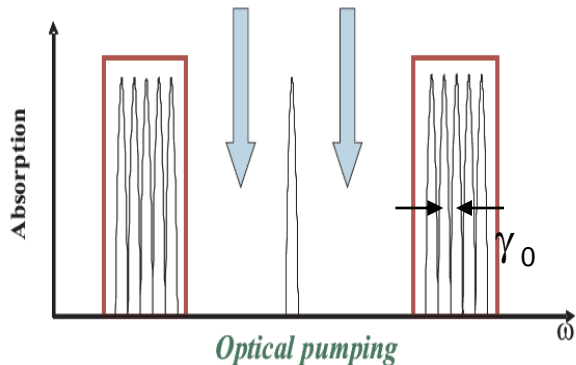
Absorb photon

**STEP 4**

Trigger reemission

**STEP 1**

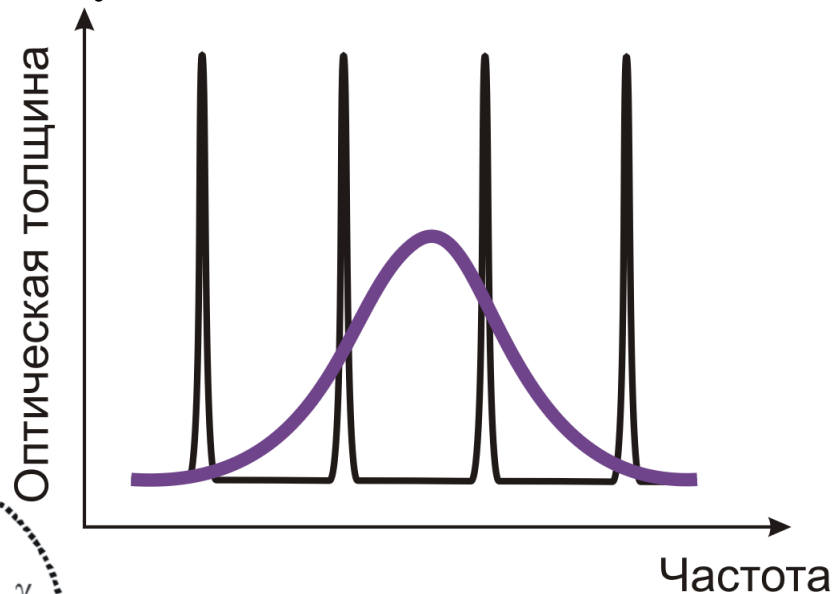
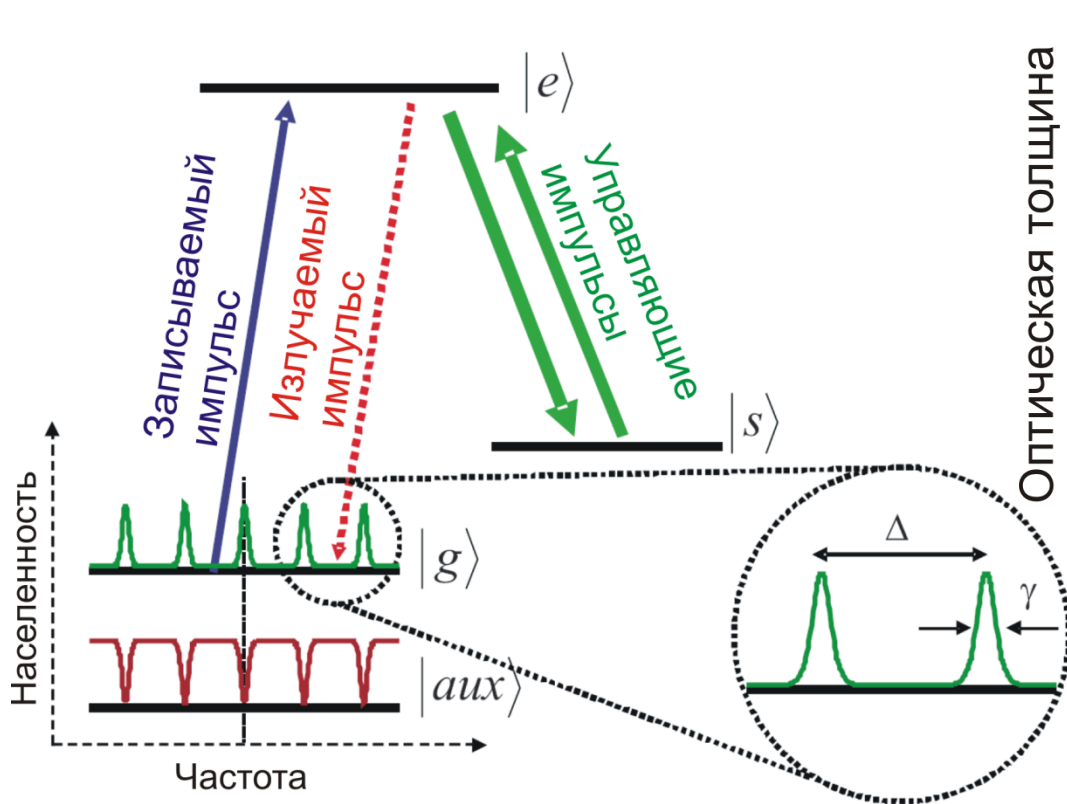
Prepare narrow absorption line



Mode matching operation and controlled reversible broadening by changing the polarity of the electric fields

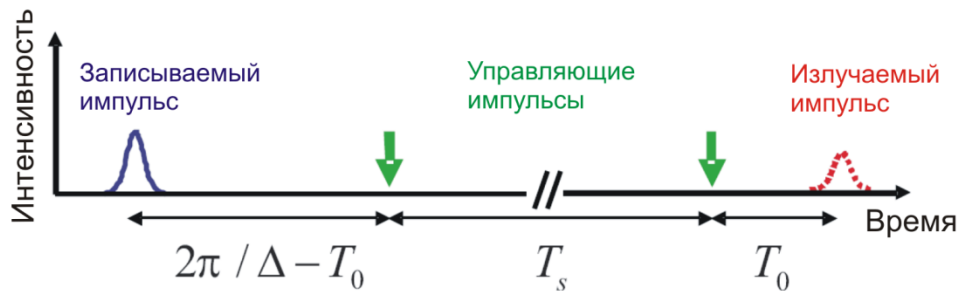
**STEP 2**

# Атомная частотная гребенка (AFC)

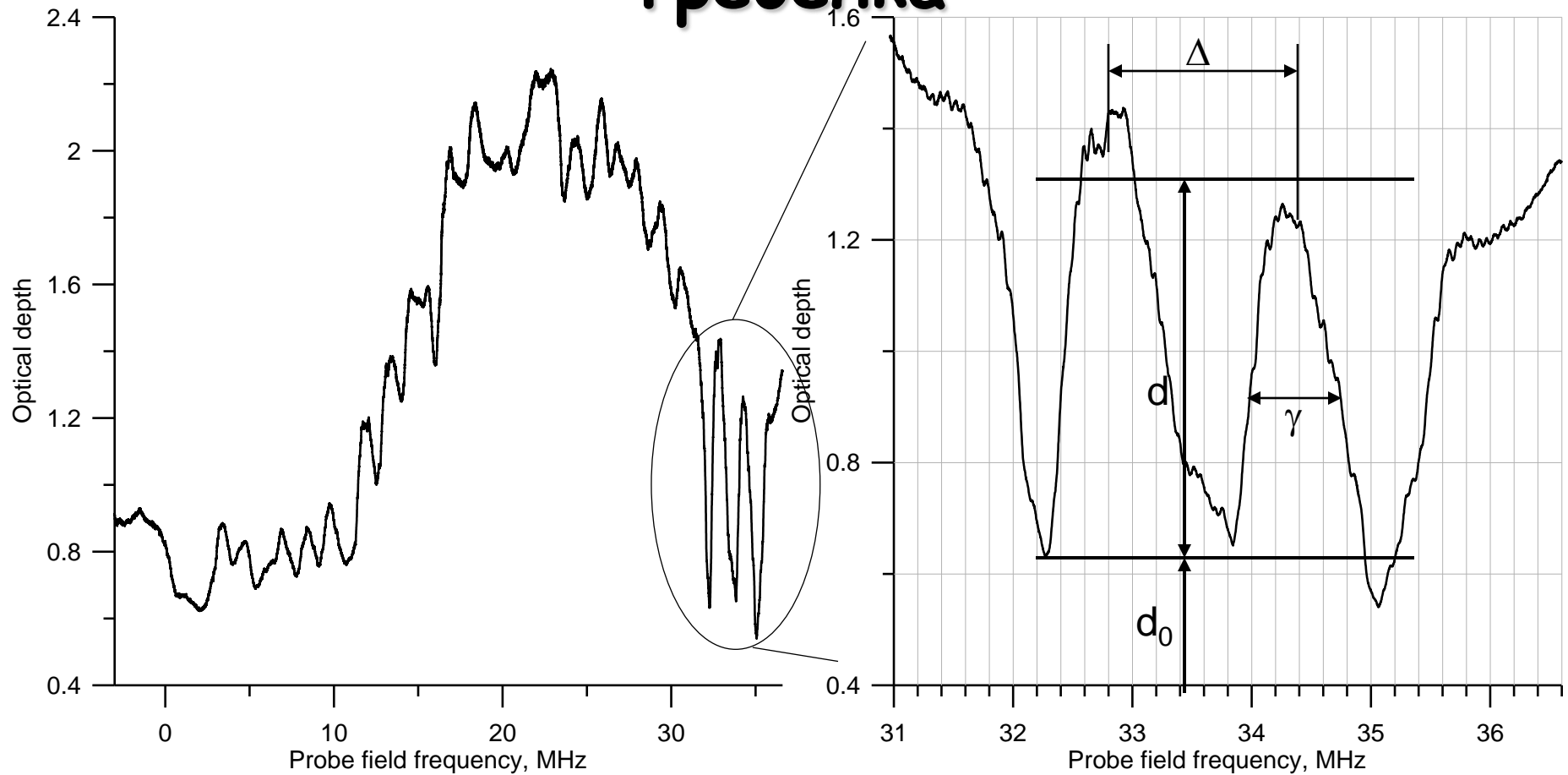


Время хранения без применения управляющих импульсов =  $m/\Delta$

( $m$  – порядок эха), при использовании полного протокола с переносом оптического возбуждения на спиновые уровни порядка секунд, эффективность до 100%, модовая емкость ~ числу пиков, при неполном протоколе **время хранения фиксировано**



# Эксперимент: атомная частотная гребенка



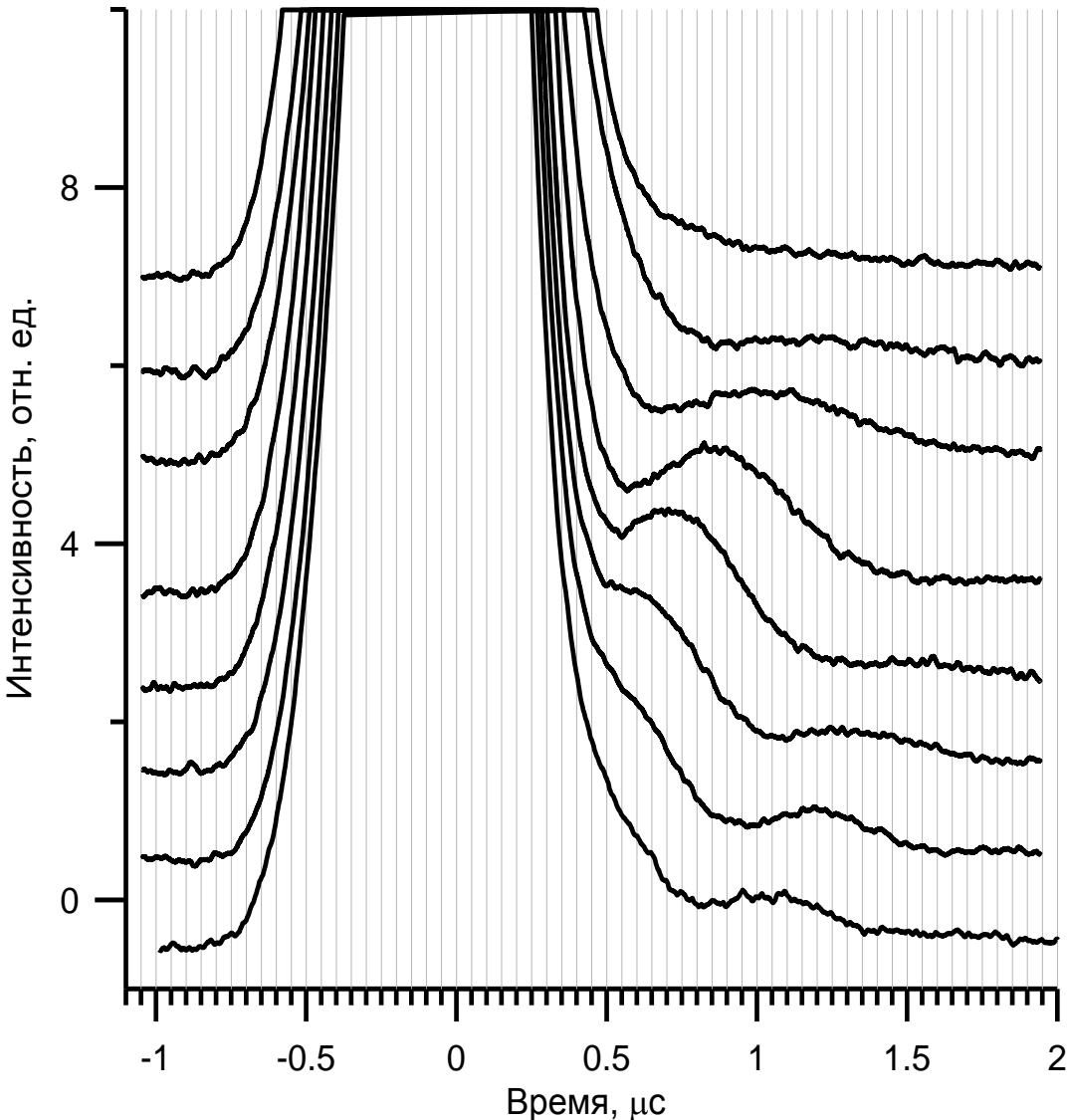
$$\eta_{\text{AFC}} = \frac{d^2}{F^2} e^{-\frac{d}{F}} e^{-d_0} e^{-\frac{1}{F^2} \frac{\pi^2}{4 \ln 2}}.$$

$$F = \Delta / \gamma$$

$$d = 0.7; d_0 = 0.6; \Delta = 1.6 \text{ MHz}; \gamma = 0.8 \text{ MHz}; F = 2 \Rightarrow \eta_{\text{AFC}} \approx 2\%$$

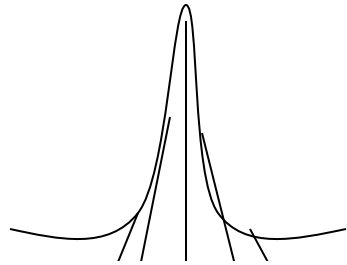
# Хранение оптического импульса на атомной частотной гребенке

Время хранения  $\tau = m/\Delta$ , где  $m$  – номер эха

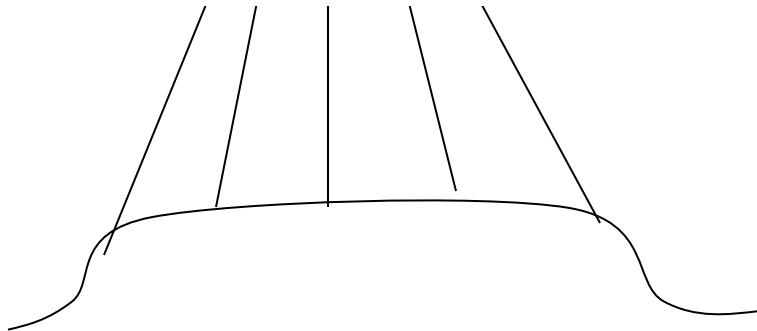


$\Delta$ , МГц	$\tau$ , $\mu\text{с}$ $m=1$		$\tau$ , $\mu\text{с}$ $m=2$	
	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.
0	-	-	-	-
0.6	1.3	1.66	-	3.33
0.8	1.05	1.25	-	2.5
1	0.9	1	-	2
1.2	0.75	0.833	1.6	1.66
1.4	0.7	0.714	1.35	1.43
1.6	0.6	0.625	1.2	1.25
1.8	-	0.55	1.05	1.11

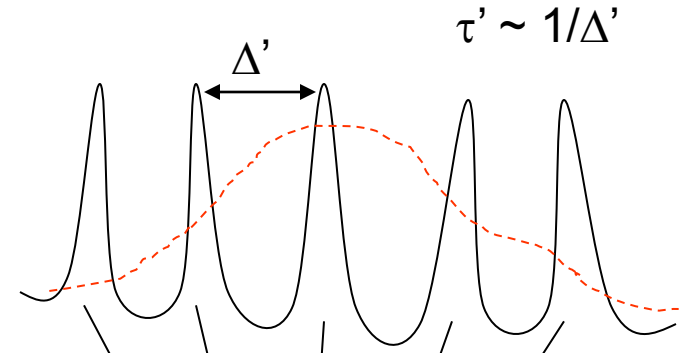
# Вариант улучшения памяти



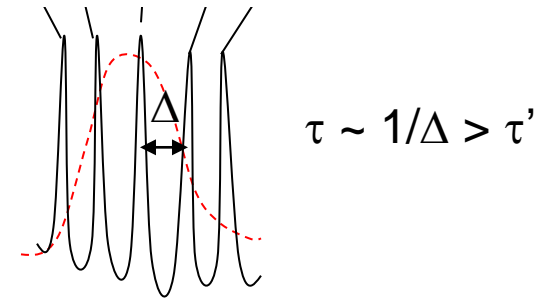
1. Создаем изолированную линию поглощения



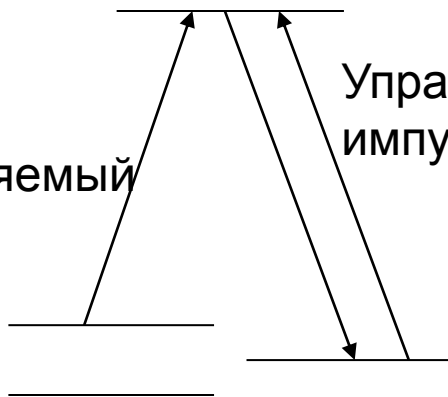
2. Прикладываем неоднородное электрическое поле



3. На этой неоднородно уширенной линии создаем гребенку и записываем импульс



Сохраняемый фотон

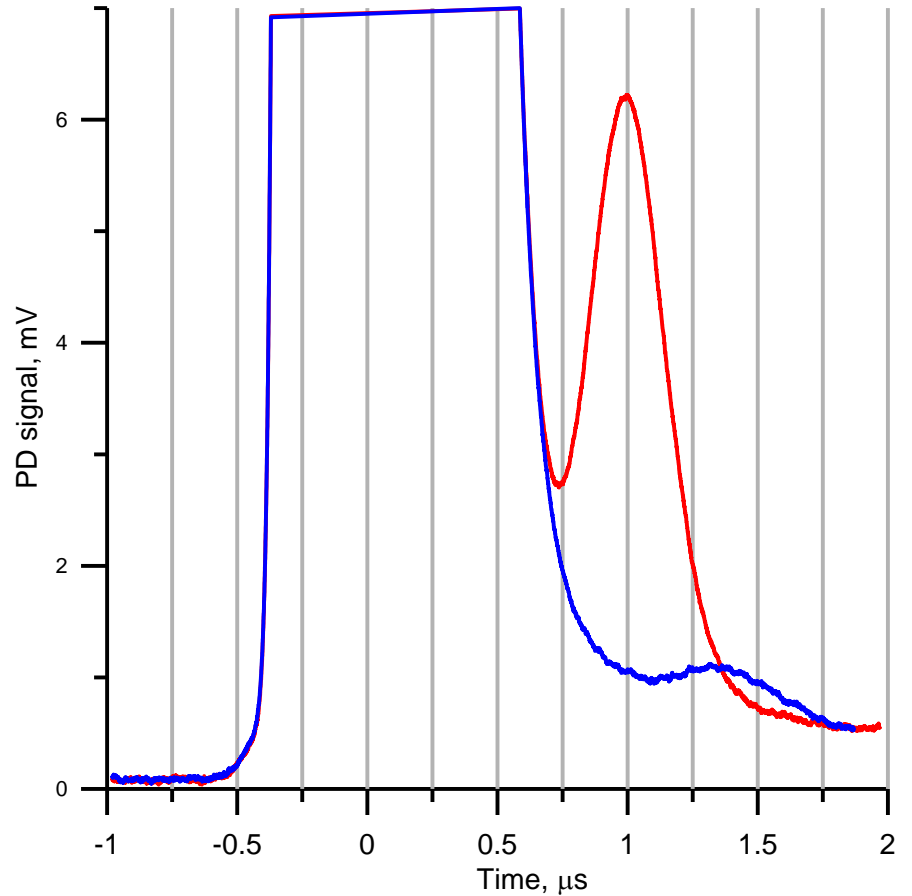
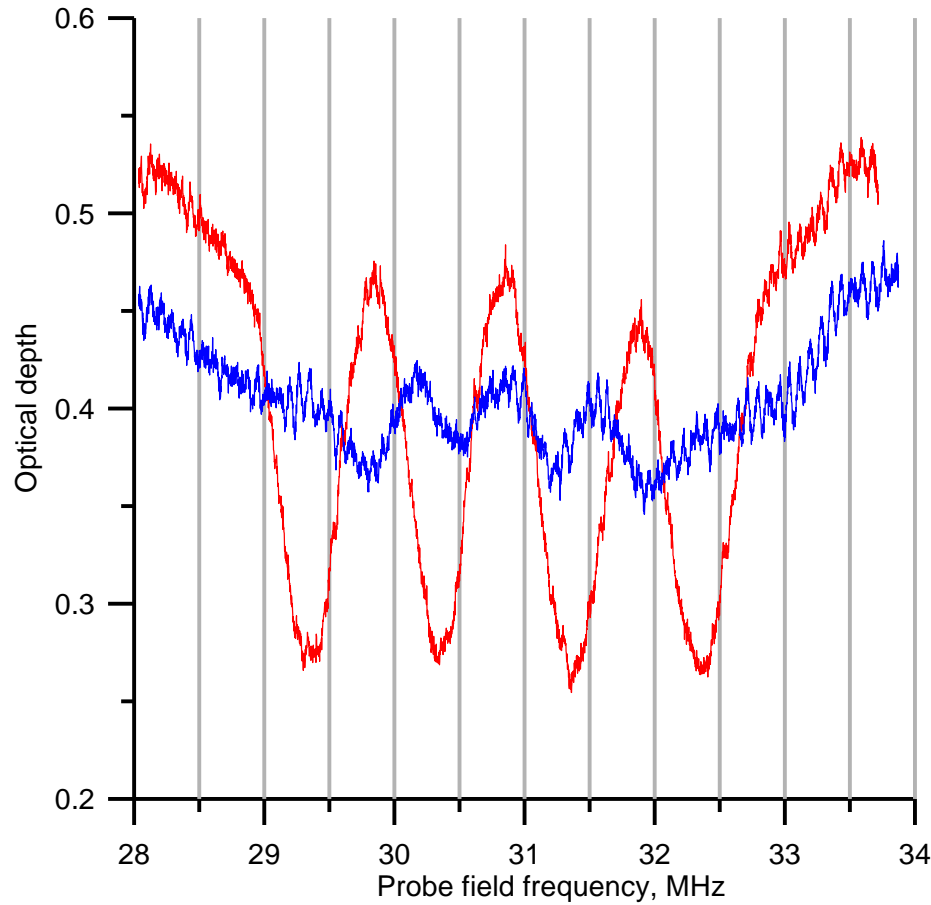


Управляющие импульсы

4. Уменьшаем электрическое поле, т.е. контролируемым образом сжимаем гребенку :

- контролируемо изменяем время хранения
- более эффективно используем управляющие импульсы

# Экспериментальная реализация



Начальное AFC готовится при электрическом поле 86 вольт:  $\Delta=1$  MHz,  $\tau=1$  μs.

Сжатие AFC при электрическом поле 62 вольт:  $\Delta=0.7$  MHz,  $\tau=1.428$  μs.

# Результаты

1. Методом выжигания долгоживущих спектральных провалов в неоднородно уширенной линии поглощения ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле  $\text{LaF}_3$  экспериментально реализована спектральная селекция – выделение группы частиц с разбросом по резонансным частотам, меньшим сверхтонкого расщепления рабочих уровней. Продемонстрирована возможность реализации кубитов на ансамблях спектрально выделенных частиц и осуществления основных операций над ними, включая манипуляцию населенностями сверхтонких (кубитовых) уровней и контролируемый сдвиг линии поглощения одной спектрально выделенной группы ионов при возбуждении другой (двухкубитовые операции).
2. Экспериментально продемонстрировано, что использование спектральной селекции позволяет существенно увеличить степень просветления среды в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности по сравнению со средой без частотной селекции.
3. Экспериментально реализована одна из наиболее перспективных концепций квантовой памяти, основанной на эффекте фотонного эха с использованием атомной частотной гребенки из спектрально выделенных ансамблей ионов. Предложен метод изменения параметров атомной частотной гребенки, позволяющий контролируемо изменять время хранения.
4. Экспериментально осуществлена штарковская спектроскопия спектрально выделенного ансамбля ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле  $\text{LaF}_3$ , что может быть использовано для измерения разности статических дипольных моментов, необходимой при расчете эффективности взаимодействия кубитов на основе таких ансамблей.



# Публикации

1. Р.А. Ахмеджанов, А.А. Бондарцев, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, «Эффективный режим электромагнитно индуцированной прозрачности в кристалле  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ », **Письма в ЖЭТФ** 94, вып. 7, стр. 585-589 (2011).
2. Р. А. Ахмеджанов, А. А. Бондарцев, Л. А. Гуцин, И. В. Зеленский, А. Г. Литвак, «Кубиты на основе спектрально выделенных групп ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле  $\text{LaF}_3$ », **Письма в ЖЭТФ** 94, вып. 12, стр. 945-950 (2011)
3. R. Akhmedzhanov, A. Bondartsev, L. Gushchin, I. Zelensky, and O. Kocharovskaya, “Efficient Regime of Electromagnetically Induced Transparency in  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  Crystal”, Book of abstracts of 20th International **Laser Physics Workshop, July 11–15, 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina**, p. 65 (2011)
4. R.A. Akhmedzhanov, A.A. Bondartsev, L.V. Gushchin, I.V. Zelensky, O.A. Kocharovskaya, A.G. Litvak «Experimental demonstration of effective regime of EIT and qubit-qubit interaction in  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  crystal». 21th International **Laser Physics Workshop (LPHYS'12), Calgary, Canada, 23–27 July 2012.**
5. Р.А. Ахмеджанов, А.А. Бондарцев, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, А.Г. Литвак. «Экспериментальная демонстрация кубит-кубитового взаимодействия и эффективного режима электромагнитно индуцированной прозрачности в кристалле  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ » / Сборник трудов VII международной конференции «**Фундаментальные проблемы оптики – 2012**». стр. 351-354. Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО. Санкт-Петербург. 2012

Спасибо за  
внимание!

