

Россия:

Д.В. Бражников^{1,2}

А.В. Тайченачев^{1,2}

В.И. Юдин^{1,2,3}

¹ Институт лазерной физики СО РАН

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный тех. университет

Франция:

Moustafa Abdel Hafiz

Grégoire Coget

Rodolphe Boudot

**Emeric de Clercq*

FEMTO-ST, Besançon

*LNE-SYRTE, Observatoire de Paris

Высококонтрастный резонанс насыщенного поглощения в поле встречных бихроматических волн для стабилизации оптической частоты в микроволновых КПН-часах на основе холодных атомов

Приложения компактных высокостабильных часов



Навигация

Поиск ископаемых

Фунд. наука (прецизионные измерения и пр.)

Широкополосные и секретные линии связи

Умные сети энергоснабжения (Smart grid)

Финансовые транзакции

Современные коммерческие технологии часов

Основные параметры:

- Стабильность
- Энергопотребление
- Габариты и вес

КВАРЦЫ

$\sigma \sim 5 \times 10^{-12}$ @ 1 с

$V > 60 \text{ см}^3$

$P \sim 300 \text{ мВт}$

АО «Морион», Россия



ДРОР-часы (рубид. осцил.)

$\sigma \sim 3 \times 10^{-11}$ @ 1 с

$\sigma \sim 3 \times 10^{-11}$ @ 24 ч

$V \geq 50 \text{ см}^3$

$P \geq 5 \text{ Вт}$

Microsemi Corp.

Temex

Frequency Electronics

Время-Ч (Рос.), ...

Полностью оптические КПН-часы

$\sigma \sim 5 \times 10^{-11}$ @ 1 с и $\sim 5 \times 10^{-12}$ @ 24 ч

$V < 50 \text{ см}^3$, $P < 150 \text{ мВт}$

Microsemi Corp., Honeywell, AccuBeat и др.

Преимущества КПН-технологии

- ***Малые габариты и вес (35 гр):***

- Нет СВЧ-резонатора, как в ДРОР-часах
- Миниатюрные ячейки и лазеры

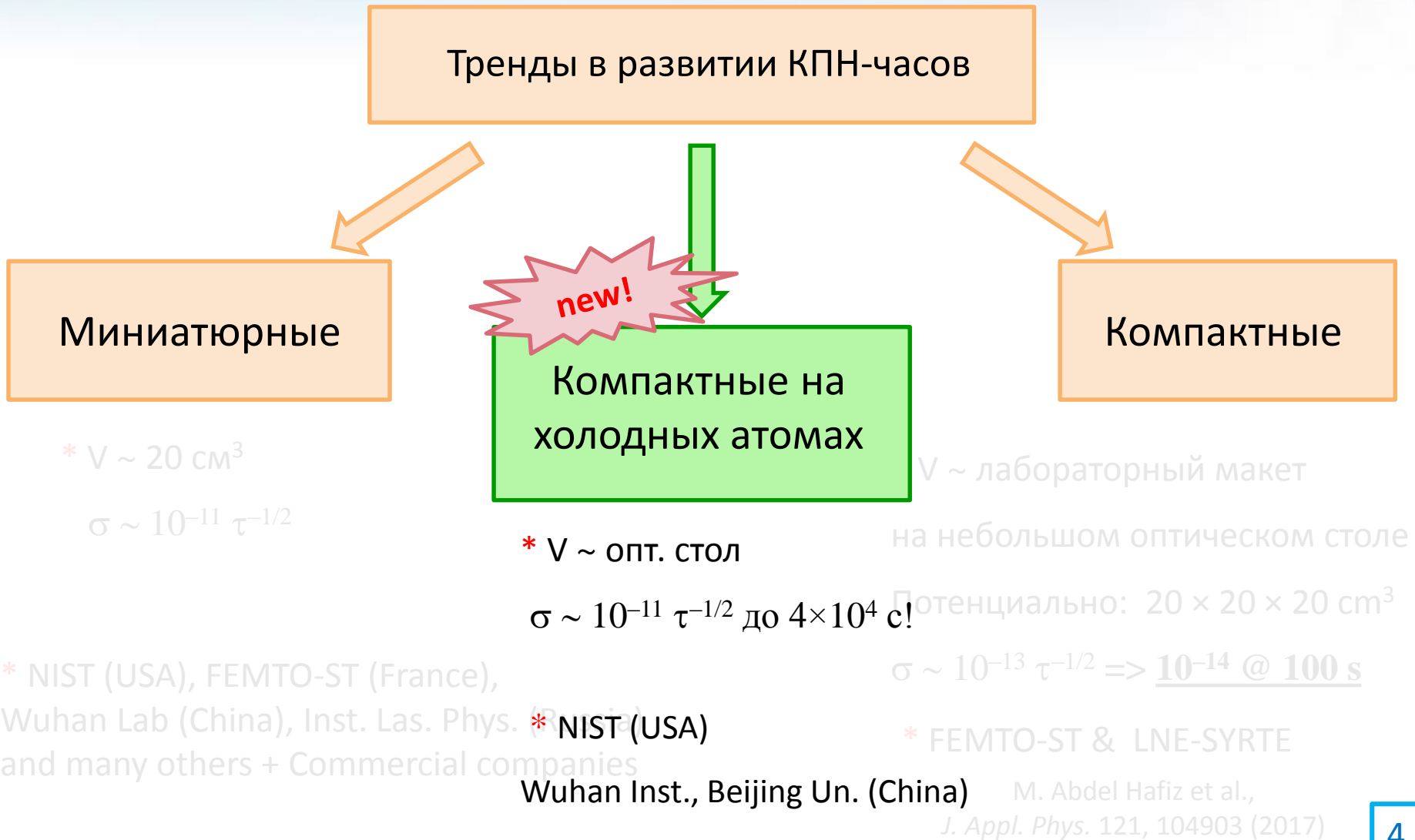
- ***Малое потребление (≈ 120 мВт и меньше – в перспективе):***

Диодные лазеры, высокоинтегрированная электроника, вакуумирование физ. блока и прочее

- ***Потенциально высокая стабильность (кратковрем. и долговрем.):***

Различные спектроскопические методики для повышения контраста и подавления сдвигов нелинейных резонансов, новые методы наблюдения возбуждения и наблюдения

В погоне за высокой стабильностью и малыми габаритами



Потенциальные преимущества и недостатки КПН-часов на холодных атомах



- 1) Нет буферных газов => нет столкновительных сдвигов!
нет столкновительного уширения оптических линий!
нет эффекта старения ячейки из-за утечки газа
- 2) Долгое время взаимодействия атомов с полями, т.е. резко сокращены пролетные эффекты и ширина резонанса может быть весьма малой
- 3) Потенциально высокая долговременная стабильность



- 1) Циклический режим работы (приготовление холодных атомов, манипуляции), хотя возможен «перезахват» атомов обратно в МОЛ
- 2) Габариты, потребление – постепенный прогресс, развитие технологий МОЛ...
- 3) Малое количество атомов ($\sim 10^6 - 10^7$), хотя большая их часть участвует в КПН
- 4) Возможны остаточные доплеровские эффекты при регистрации КПН, но возможны схемы наблюдения с уменьшением этих эффектов

Проблемы стабильности КПН-часов и их решения

Основные причины, ухудшающие стабильность:

Низкий контраст



Оптимизация схем возбуждения КПН-резонансов
(D_1 линия, опт. поляризации, метод «push-pull» ...)

Сильный шум



- Низкошумящая электроника и лазеры
- Дифференциальные схемы регистрации КПН
- Метод Pound-Drever-Hall для стабилизации частоты

Столкновительные
сдвиги



- Оптимальный состав буферных газов
- **Высокая степень термостабилизации ячейки**
- Специальные материалы стенок ячейки с низким коэффициентом пропускания буф. газов

⋮

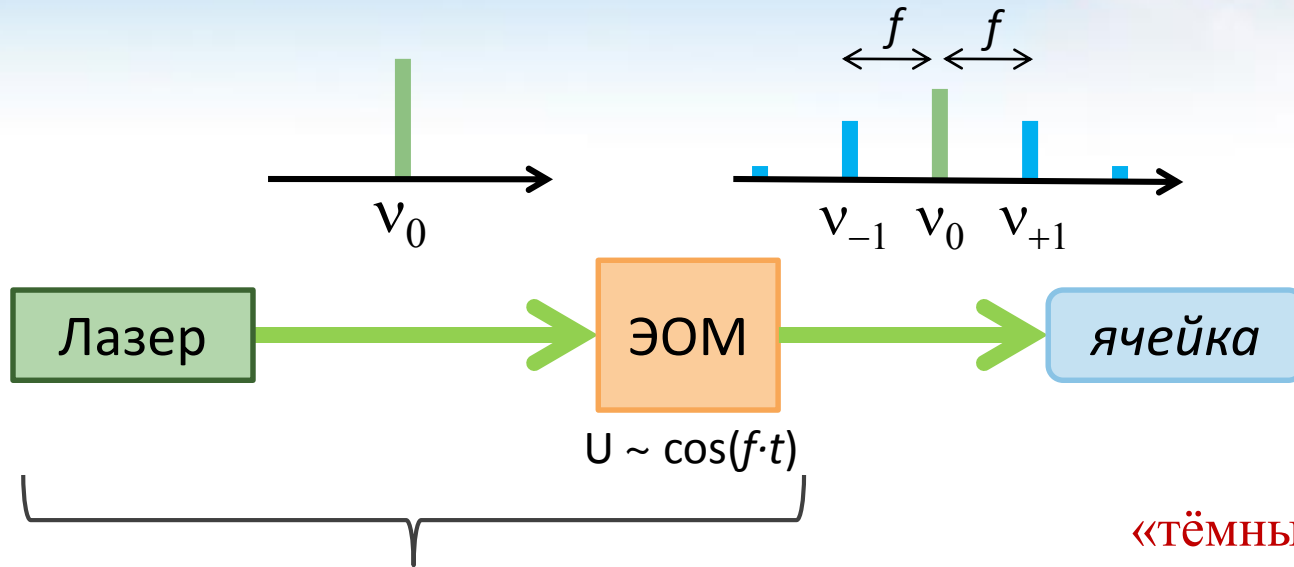
и некоторые другие...

Световые сдвиги!



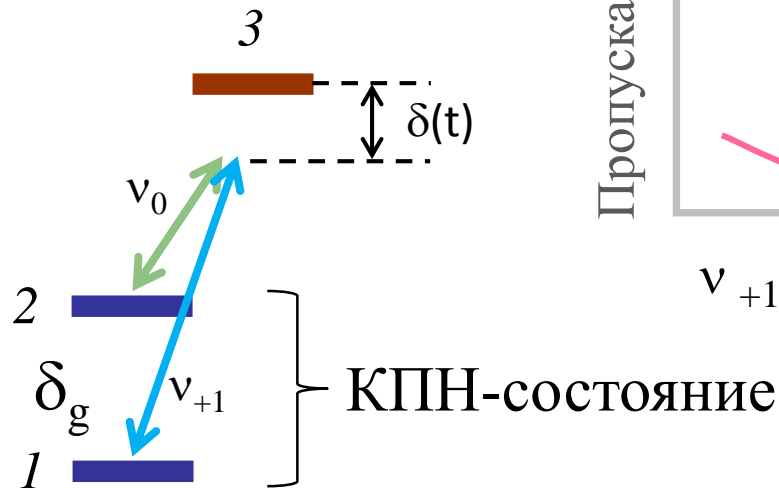
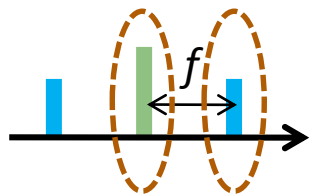
- Оптимальное соотношение интенсивностей частотных компонент возбуждающего поля
- Особые методы наблюдения КПН (Рамси, гипер-Рамси и др.)
- **Стабилизация оптической (несущей) частоты**

Два способа возбуждения КПН многочастотным полем

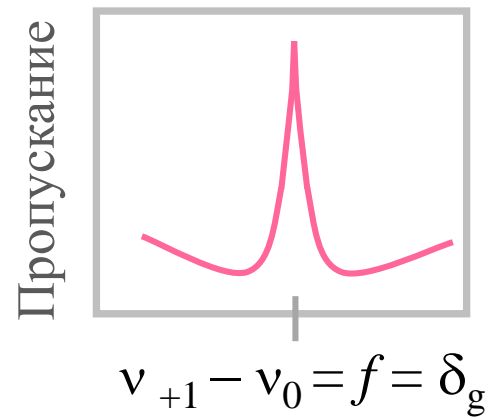


(в случай миниатюрных часов – только VCSEL, ЛВР)

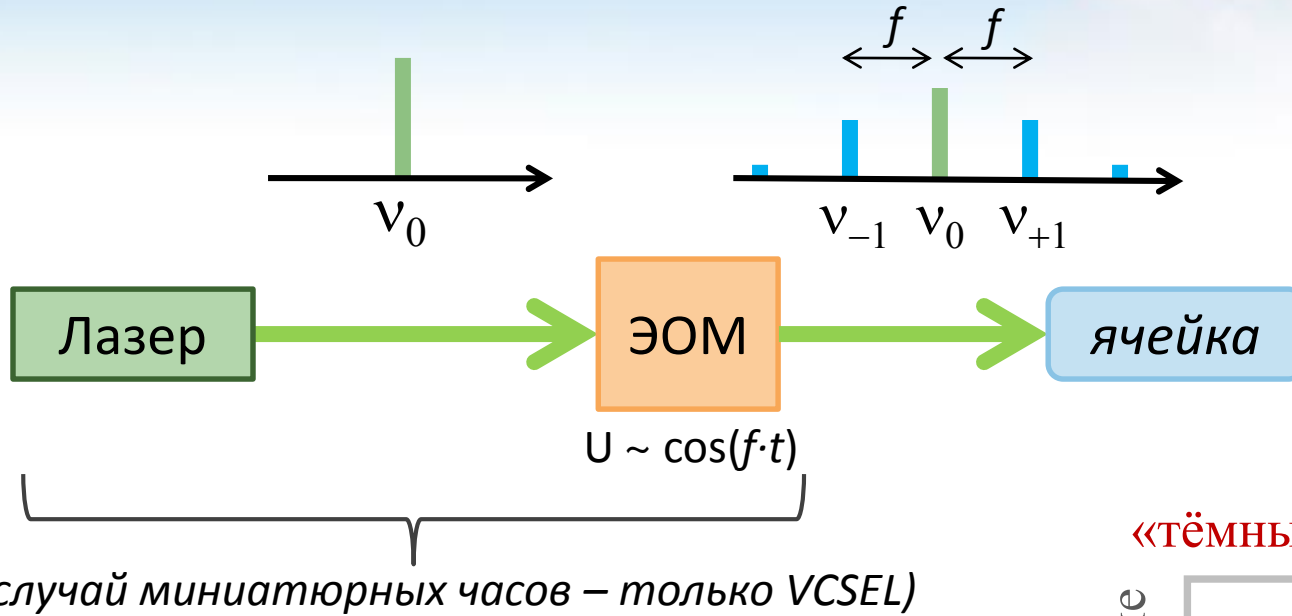
I. Использование несущей и одного «сайдбенда»:



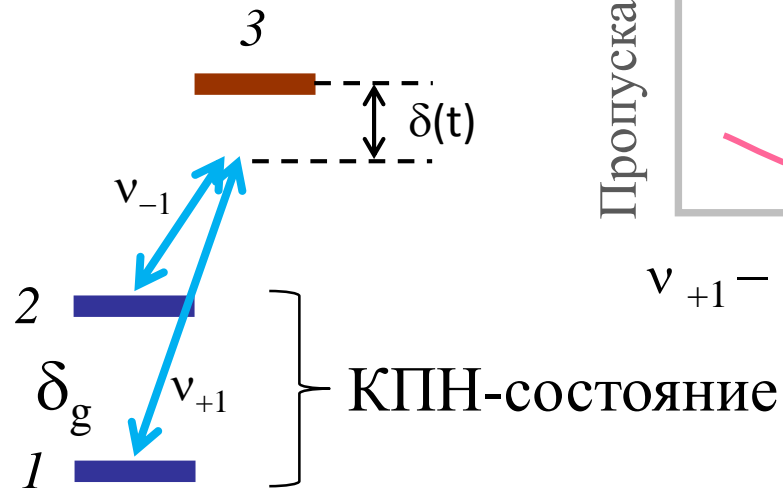
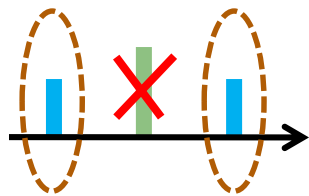
«тёмный» резонанс



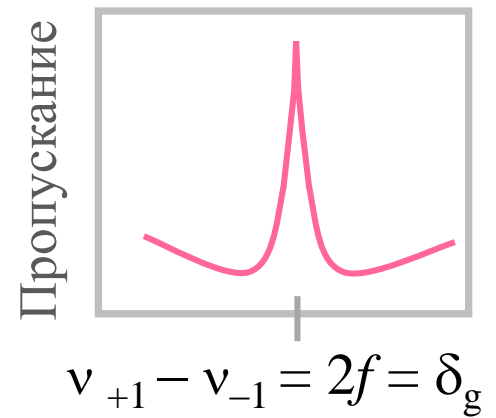
Два способа возбуждения КПН МНОГОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ



II. Использование симметричных «сайдбендов» (предпочтит.):

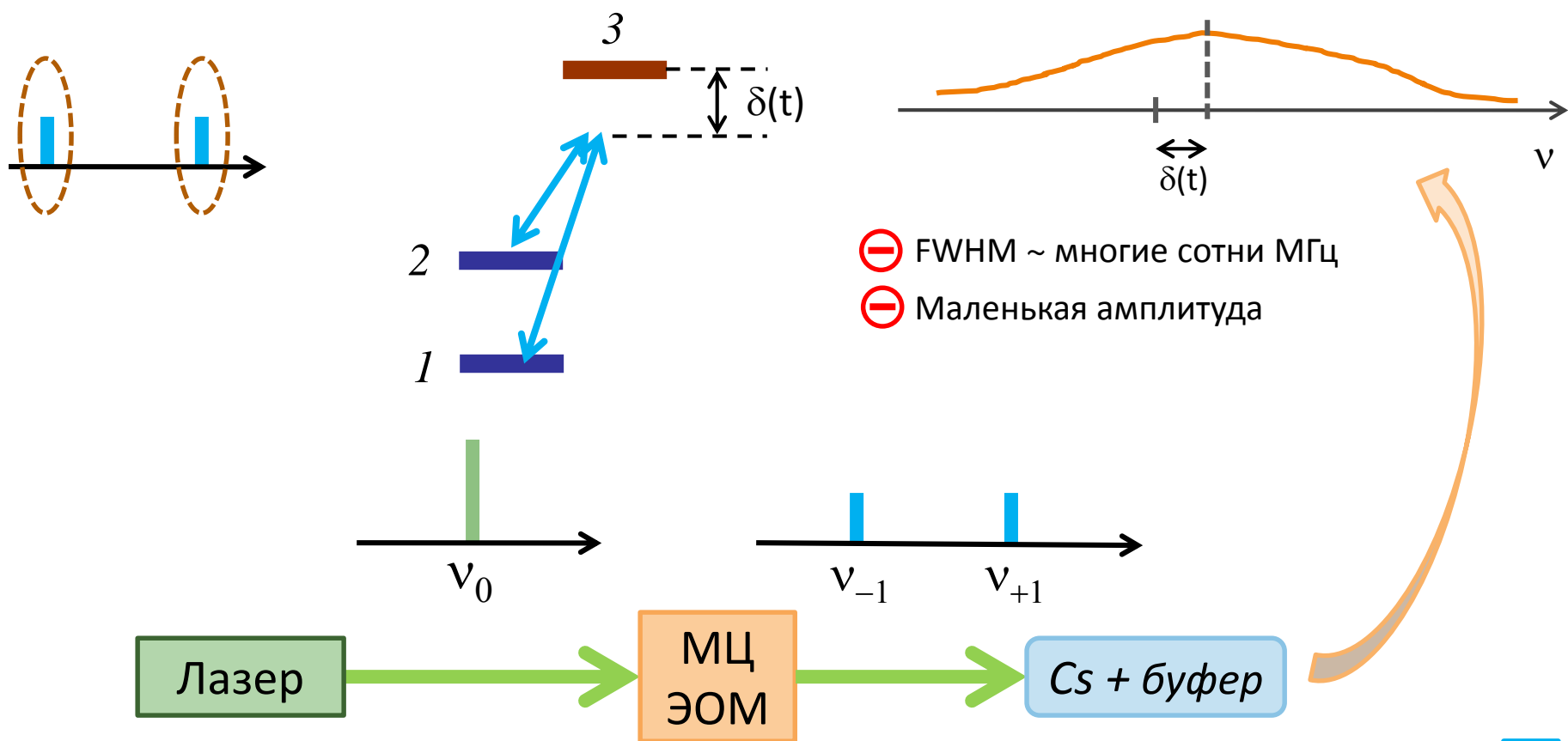


«тёмный» резонанс



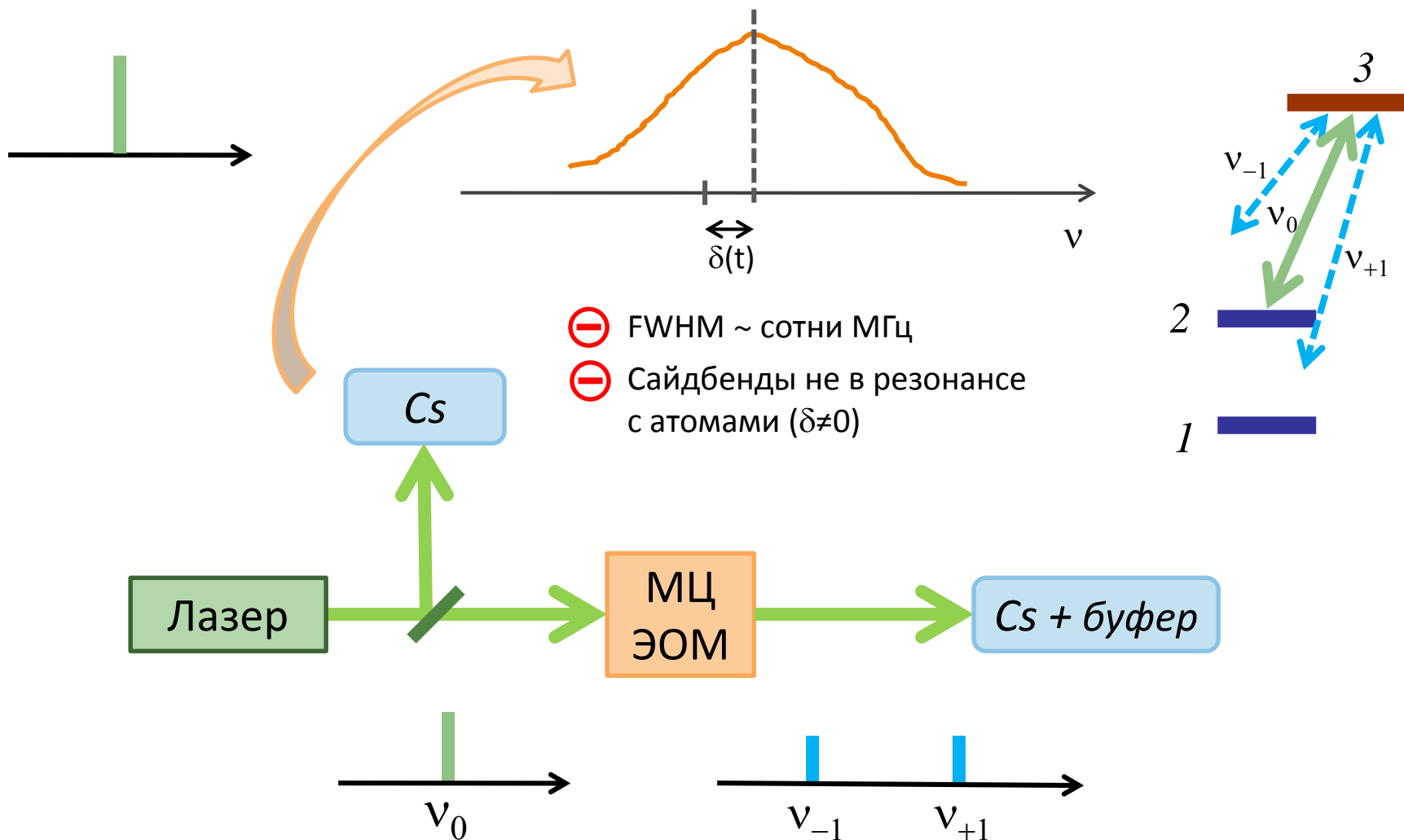
Стабилизация оптической частоты: способы

- Сайдбенды ν_{+1} и ν_{-1} «привязаны» к линии однофотонного поглощения (уширенный «Доплеровский» контур)



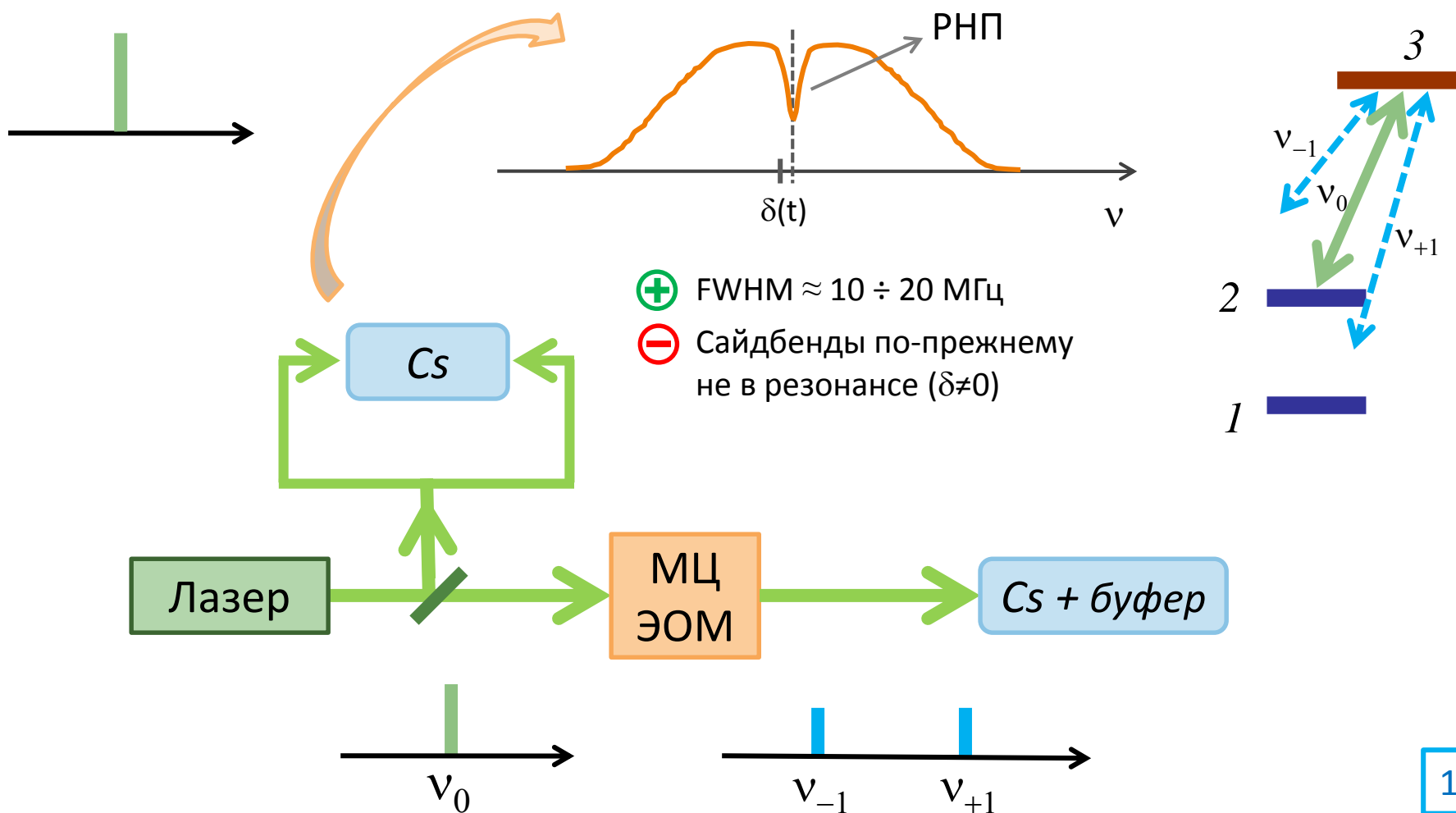
Стабилизация оптической частоты: способы

● Несущая частота ν_0 «привязана» к «доплеровскому» контуру



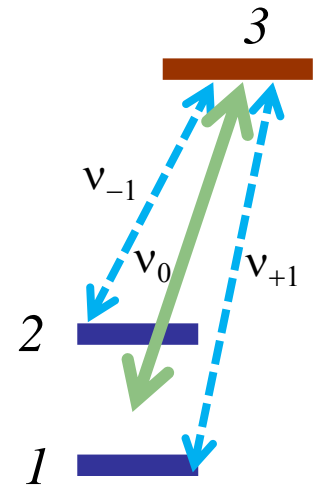
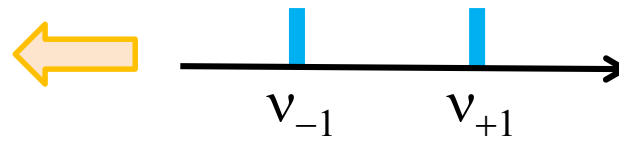
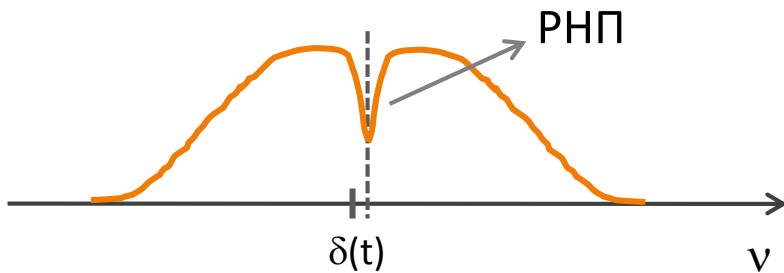
Стабилизация оптической частоты: способы

● Несущая ν_0 «привязана» к узкому субдоплеровскому резонансу

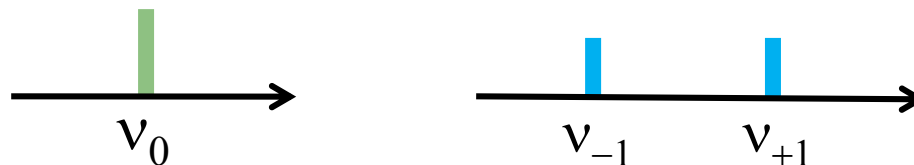
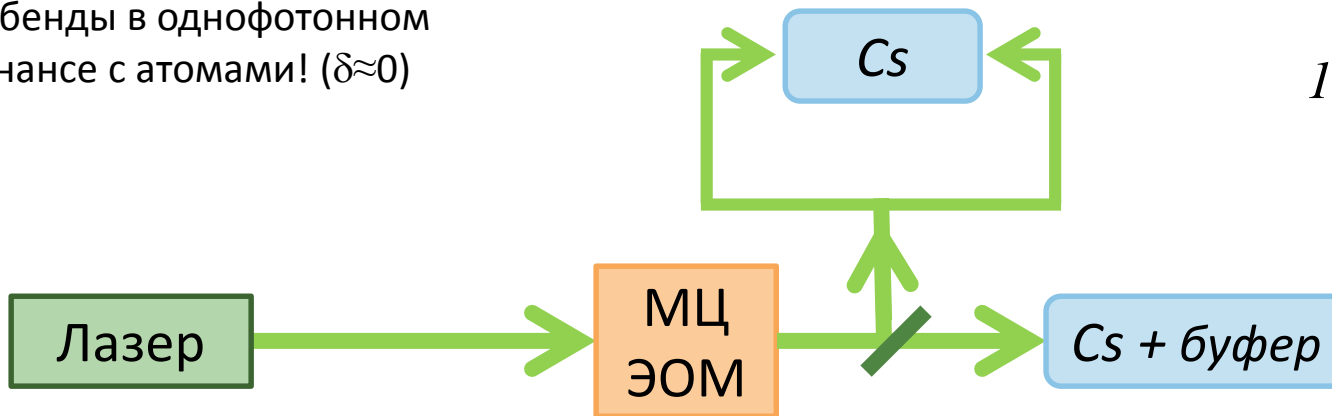


Стабилизация оптической частоты: способы

Сайдбенды ν_{+1} и ν_{-1} «привязаны» к узкому субдоплеровскому резонансу

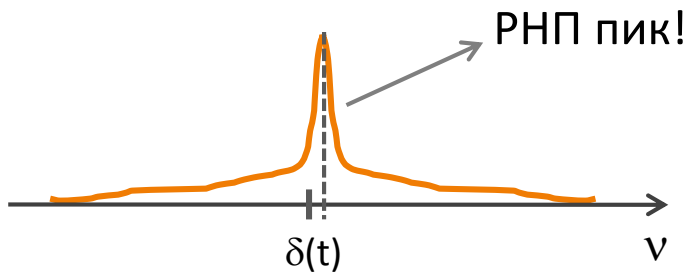


- + FWHM $\approx 10 \div 20$ МГц
- + Сайдбенды в однофотонном резонансе с атомами! ($\delta \approx 0$)



Стабилизация оптической частоты: способы

Сайдбенды ν_{+1} и ν_{-1} «привязаны» к узкому субдоплеровскому резонансу

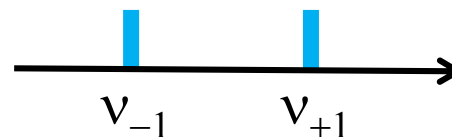
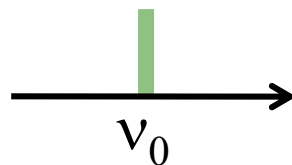
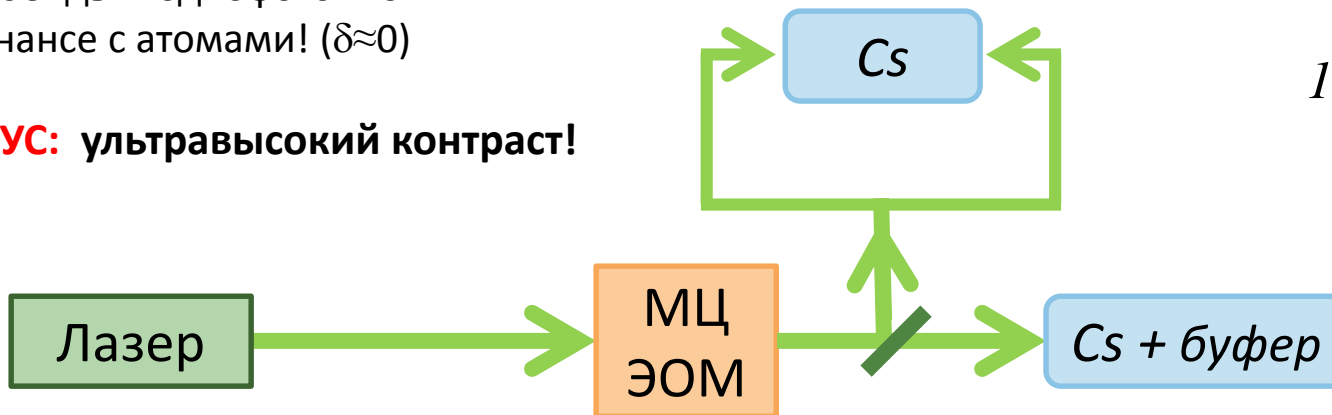
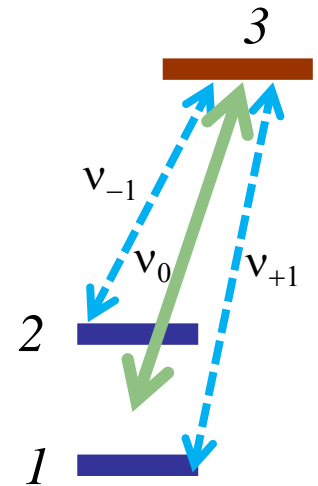
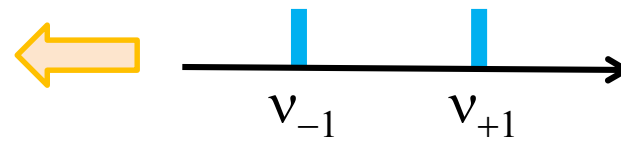


+ FWHM $\approx 10 \div 20$ МГц

+ Сайдбенды в однофотонном резонансе с атомами! ($\delta \approx 0$)

AND

+ **БОНУС:** ультравысокий контраст!



Наблюдение высококонтрастного РНП: Первые эксперименты

2982 Vol. 41, No. 13 / July 1 2016 / *Optics Letters*

Letter

Optics Letters

Doppler-free spectroscopy on the Cs D₁ line with a dual-frequency laser

MOUSTAFA ABDEL HAFIZ,¹ GRÉGOIRE COGET,¹ EMERIC DE CLERCQ,² AND RODOLPHE BOUDOT^{1,*}

¹FEMTO-ST, CNRS, UFC, 26 chemin de l'épitaphe 25030 Besançon Cedex, France

²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

*Corresponding author: rodolphe.boudot@femto-st.fr

Received 20 April 2016; revised 20 May 2016; accepted 24 May 2016; posted 25 May 2016 (Doc. ID 263549); published 23 June 2016

M. Abdel Hafiz et al., *Optics Letters* **41**, 2982 (2016).

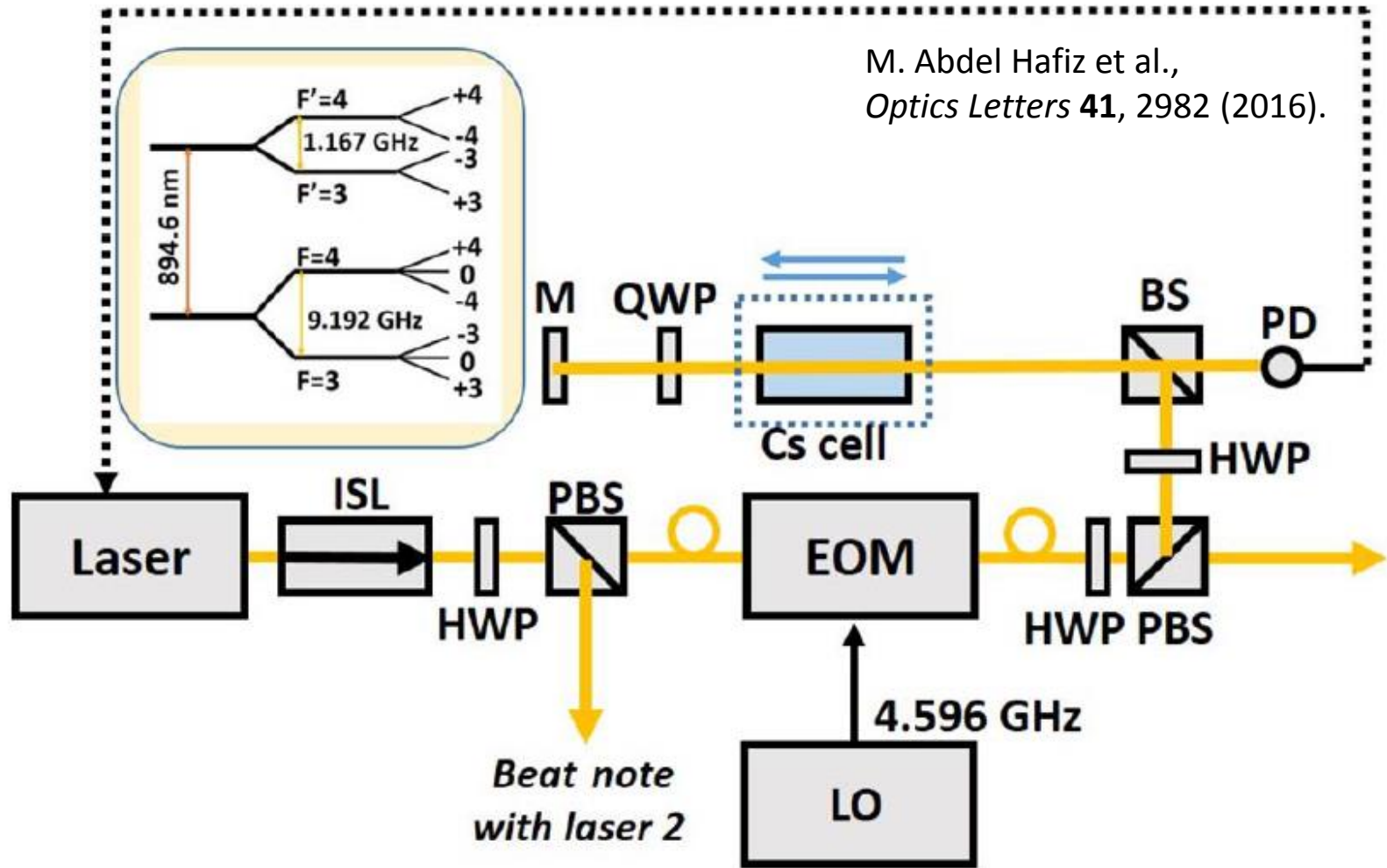
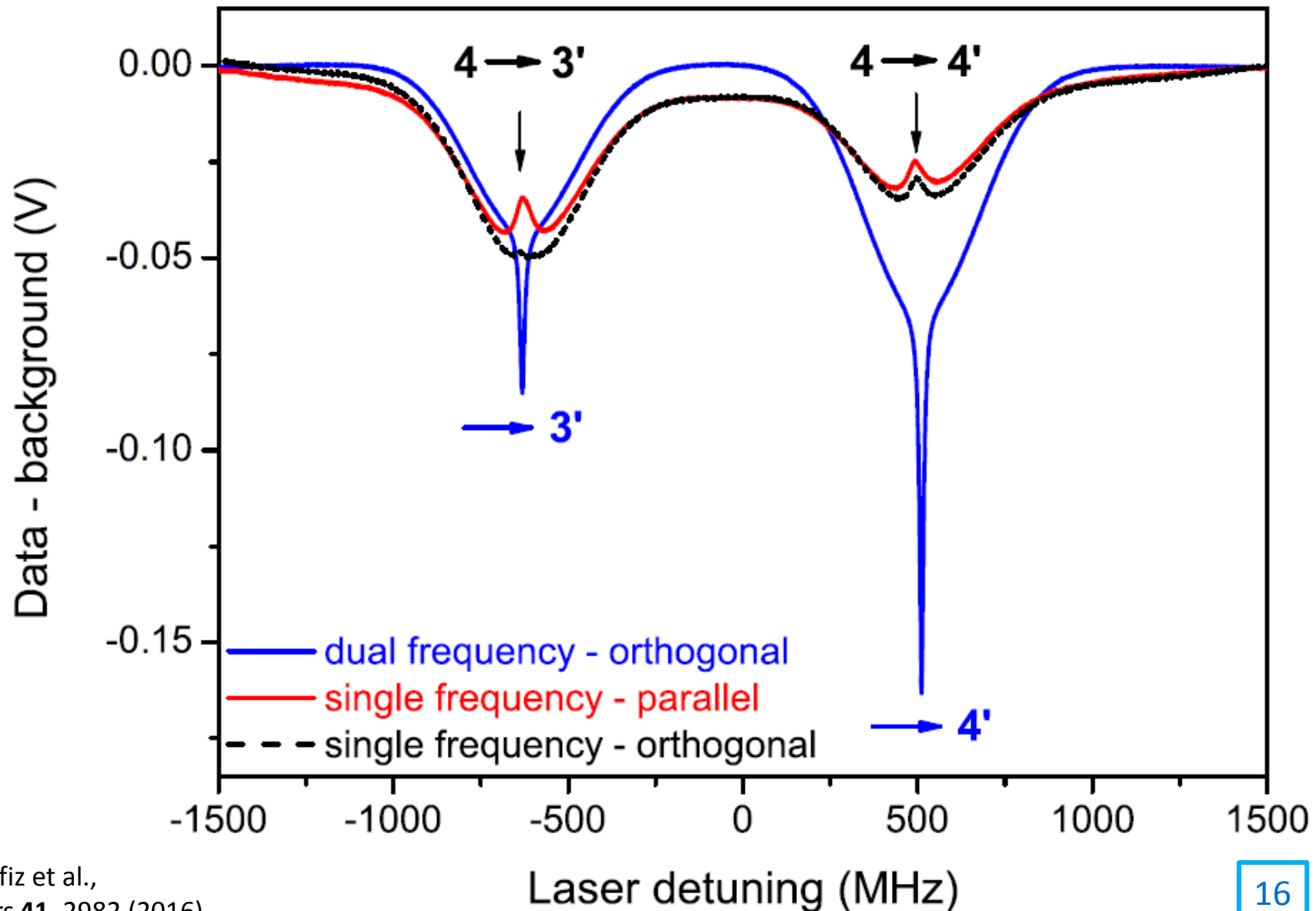
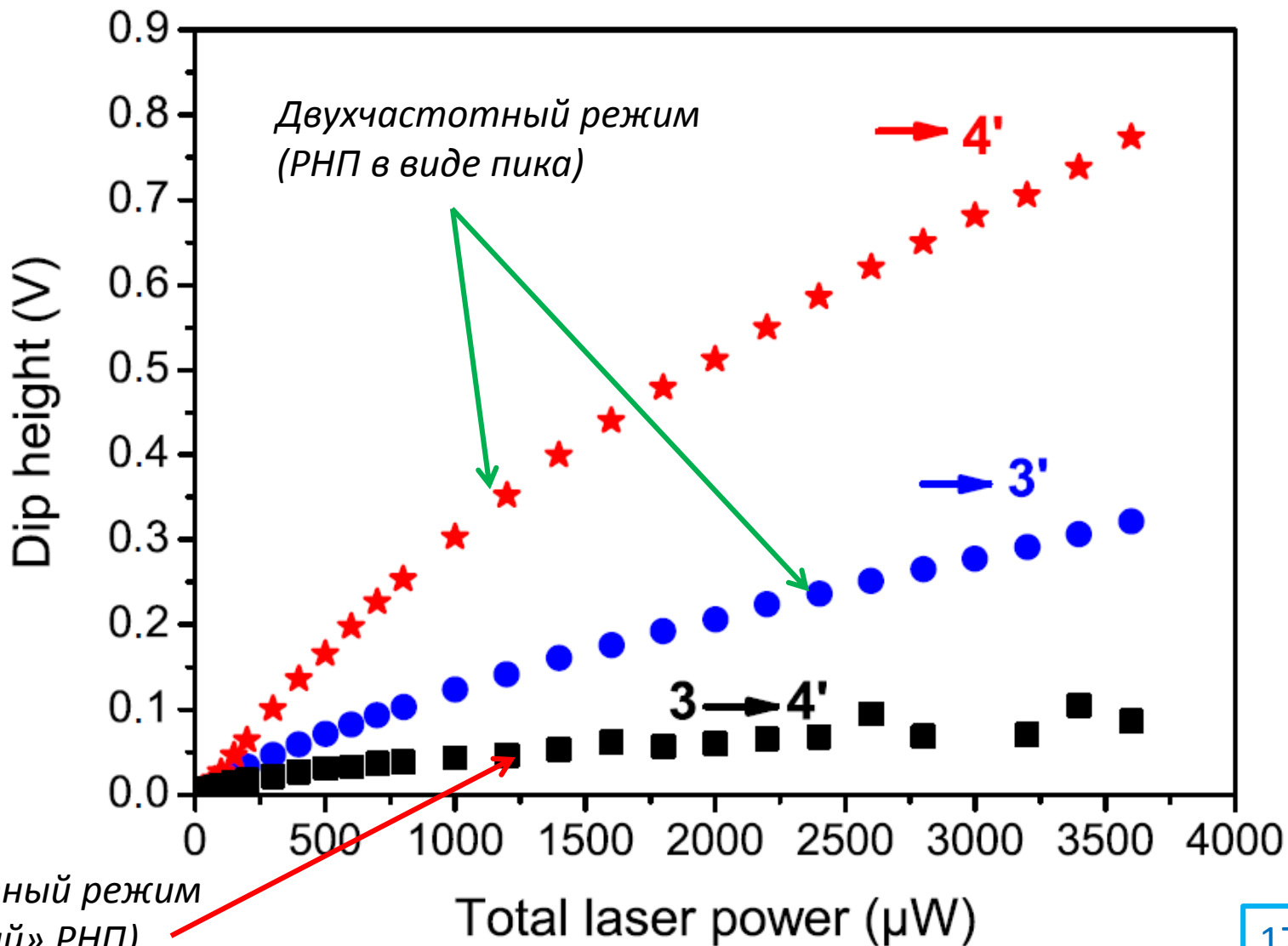


Fig. 1. Experimental setup for Doppler-free Cs D_1 line spectroscopy. EOM, electro-optic modulator; ISL, optical isolator; HWP, half-wave plate; PBS, polarizing beam splitter; BS, beam splitter; QWP, quarter-wave plate; M, mirror; PD, photodiode; LO, local oscillator. The Cs D_1 line energy structure is reminded on the top left.

Первые эксперименты



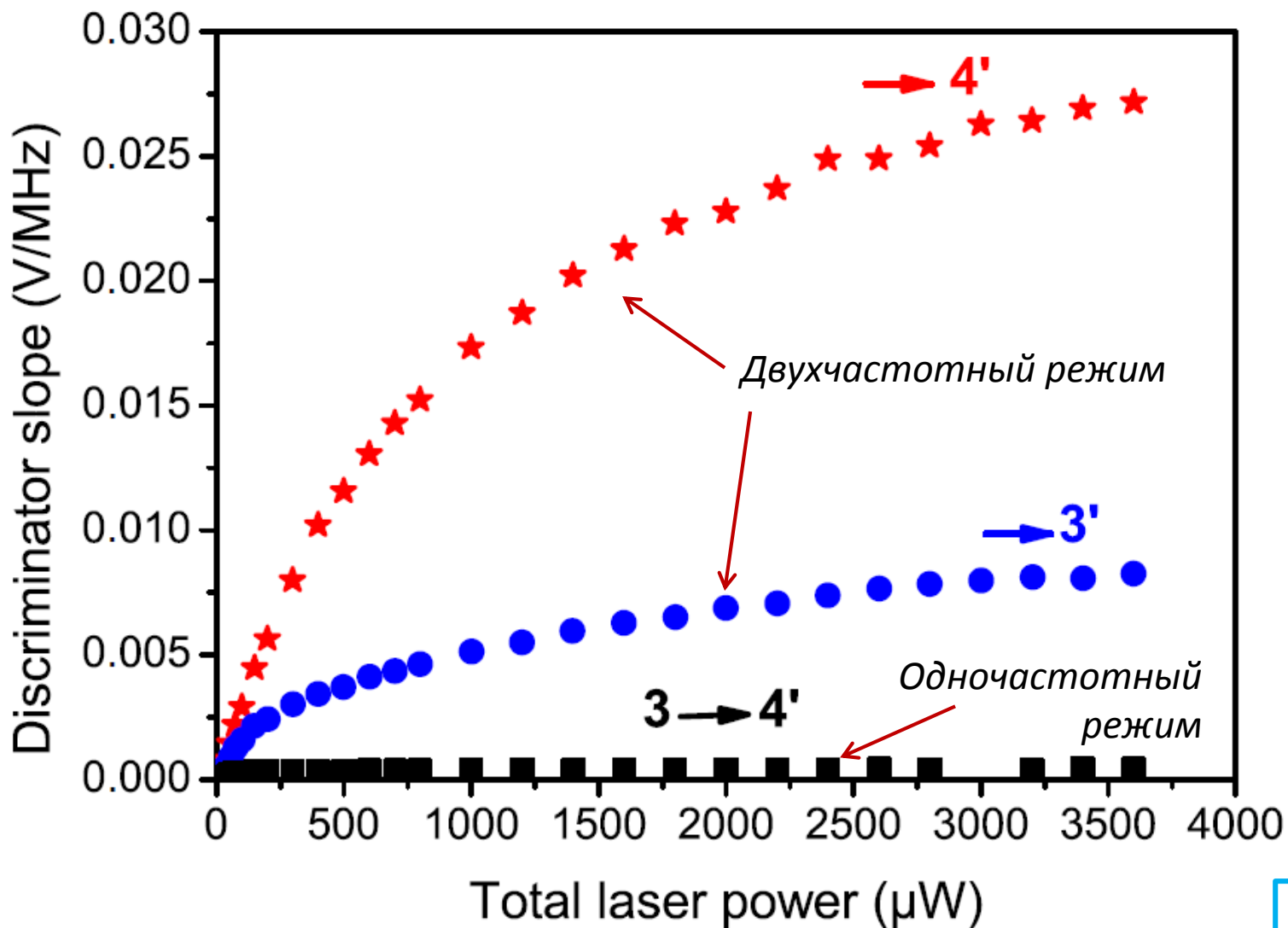
Первые эксперименты



Одночастотный режим
(«обычный» РНП)

Первые эксперименты

На порядки(!) увеличенная крутизна



Улучшение стабильности КПН-часов

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **121**, 104903 (2017)

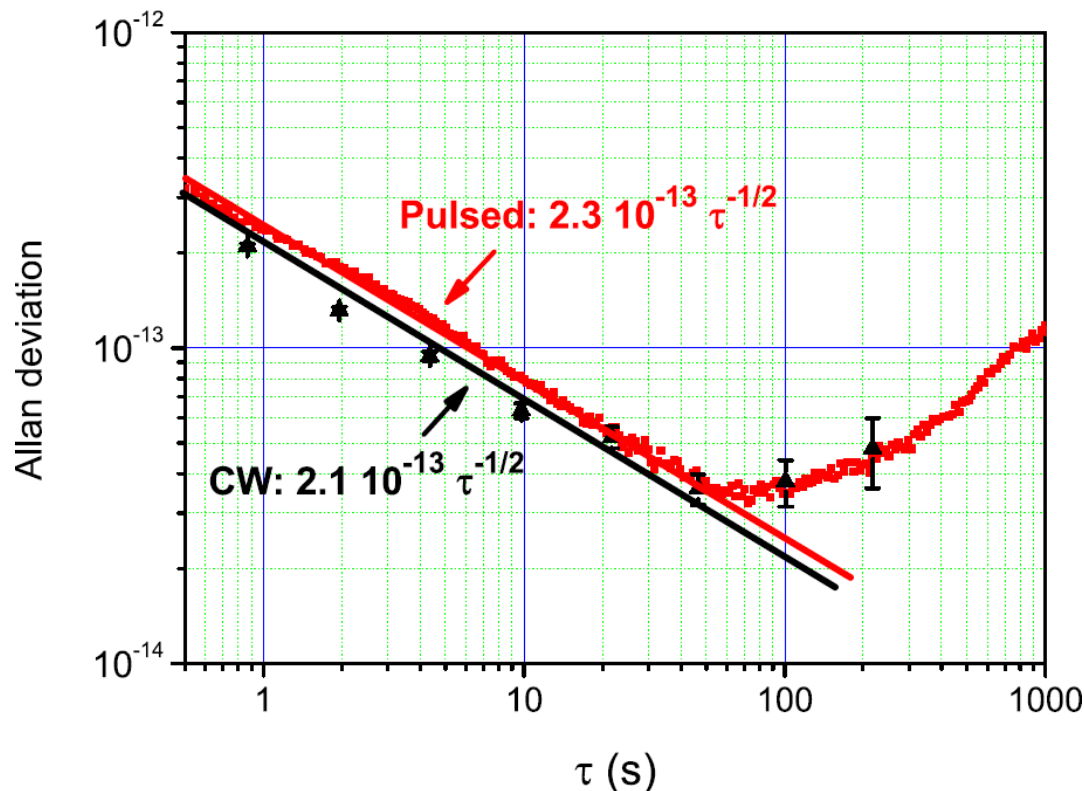
A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock

Moustafa Abdel Hafiz,¹ Grégoire Coget,¹ Peter Yun,² Stéphane Guérandel,²
Emeric de Clercq,² and Rodolphe Boudot¹

¹FEMTO-ST, CNRS, UBFC, 26 chemin de l'Épitaphe, 25030 Besançon Cedex, France

²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités,
UPMC Univ. Paris 06, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

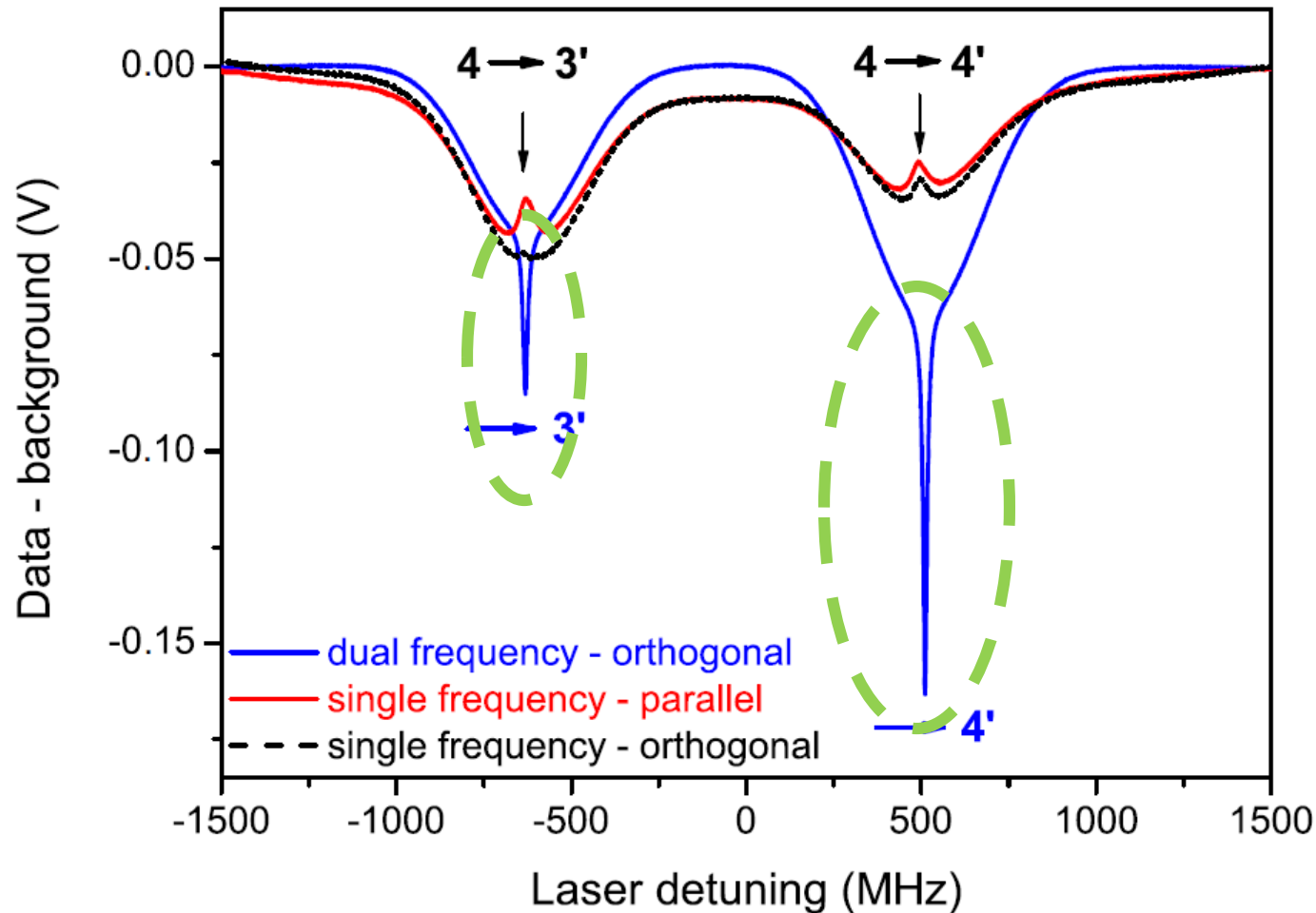
(Received 14 November 2016; accepted 20 February 2017; published online 10 March 2017)



$$\sigma \approx 3.5 \times 10^{-14} @ 100 \text{ s}$$

*Рекордный результат
для КПН-часов*

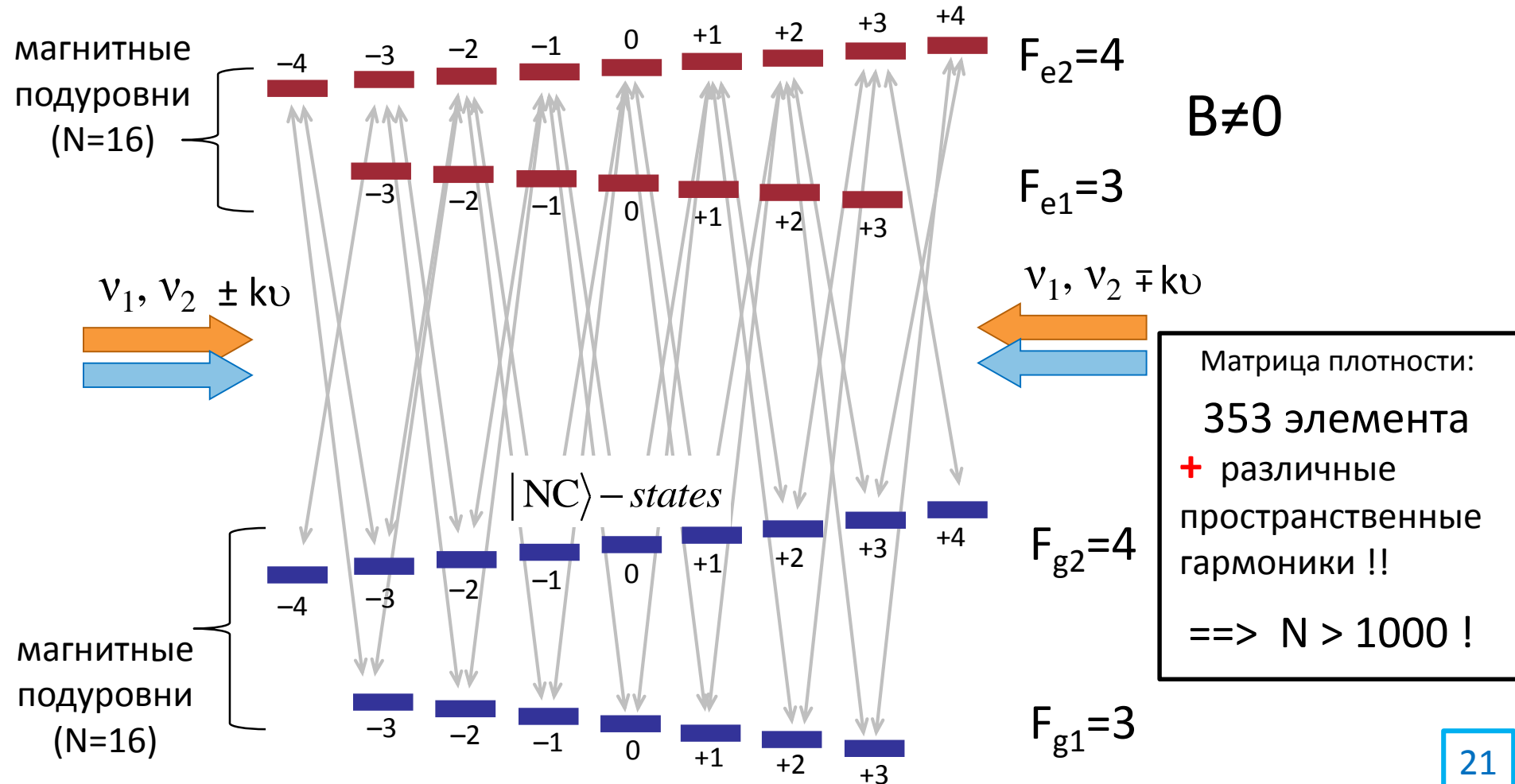
Физические причины наблюдения высокого контраста?



Теория эффекта

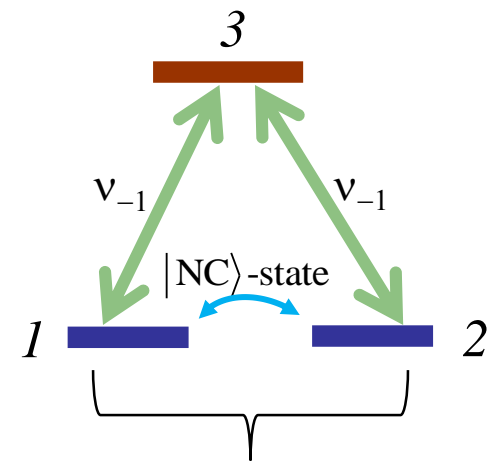
Реальная структура уровней энергии: ^{133}Cs

Движущийся атом «видит» ЧЕТЫРЕ частоты!!



Теория эффекта

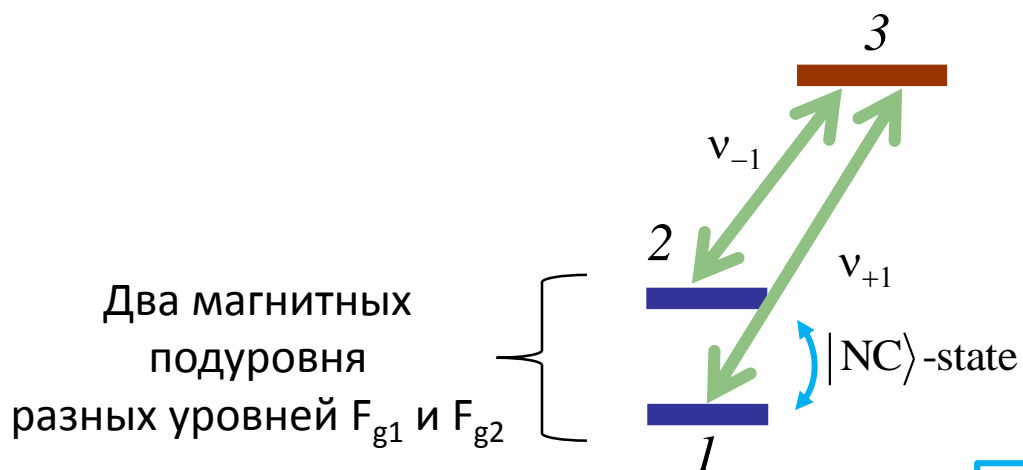
Трёхуровневая модель (Λ -схема)



Два магнитных подуровня
одного уровня F_g

Теория эффекта

Трёхуровневая модель (Λ -схема)



Теория эффекта

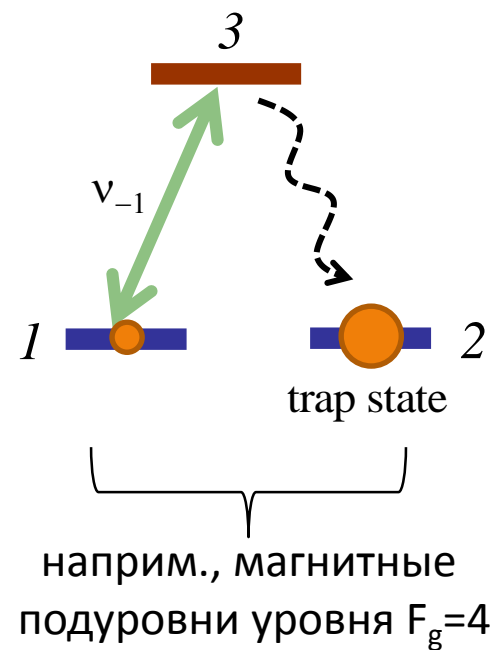
Трёхуровневая модель (Λ -схема)

Причины

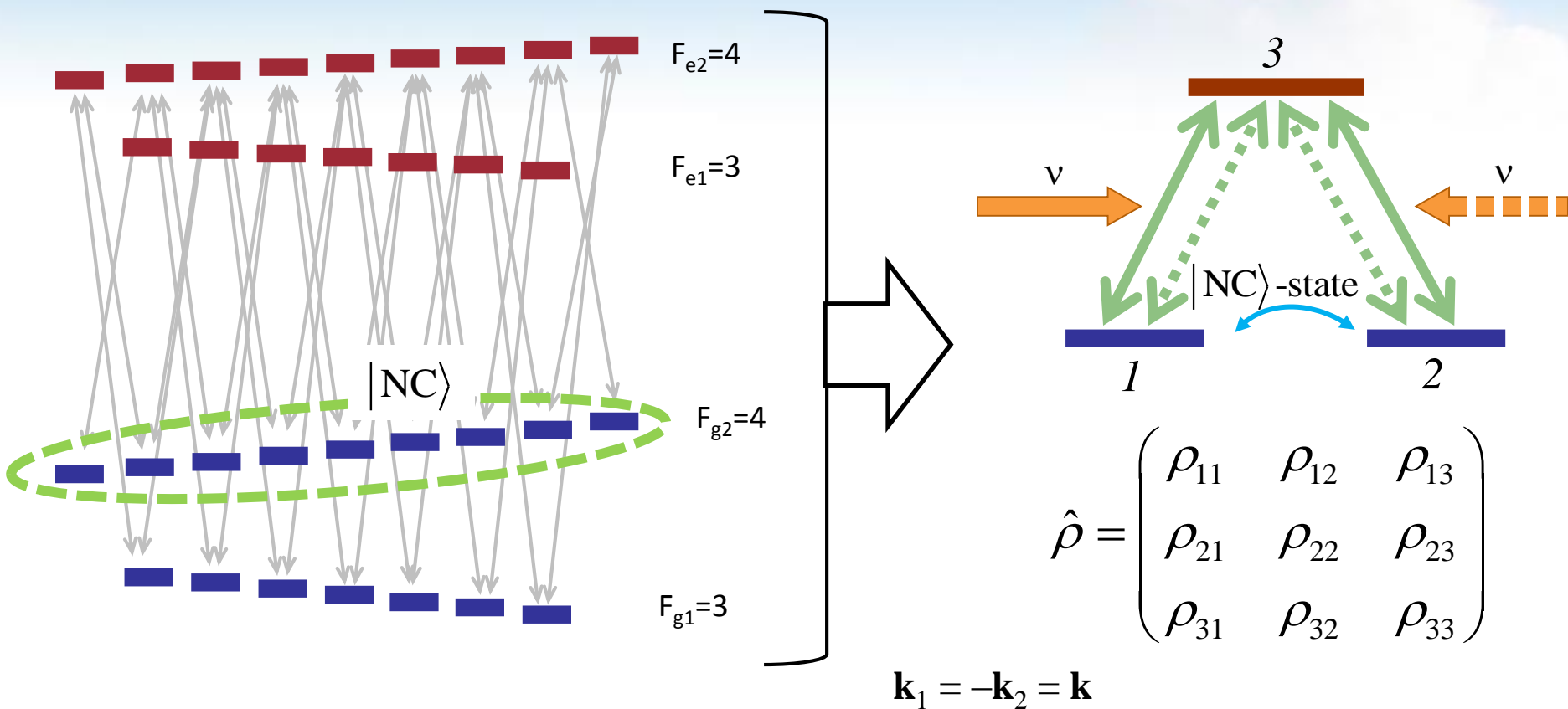
«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

«Микроволновый» (СТС) КПН эффект, вовлекающий разные СТС-компоненты основного состояния атома, F_{g1} и F_{g2}

Простой эффект оптической накачки, объясняемый с помощью скоростных уравнений



«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g



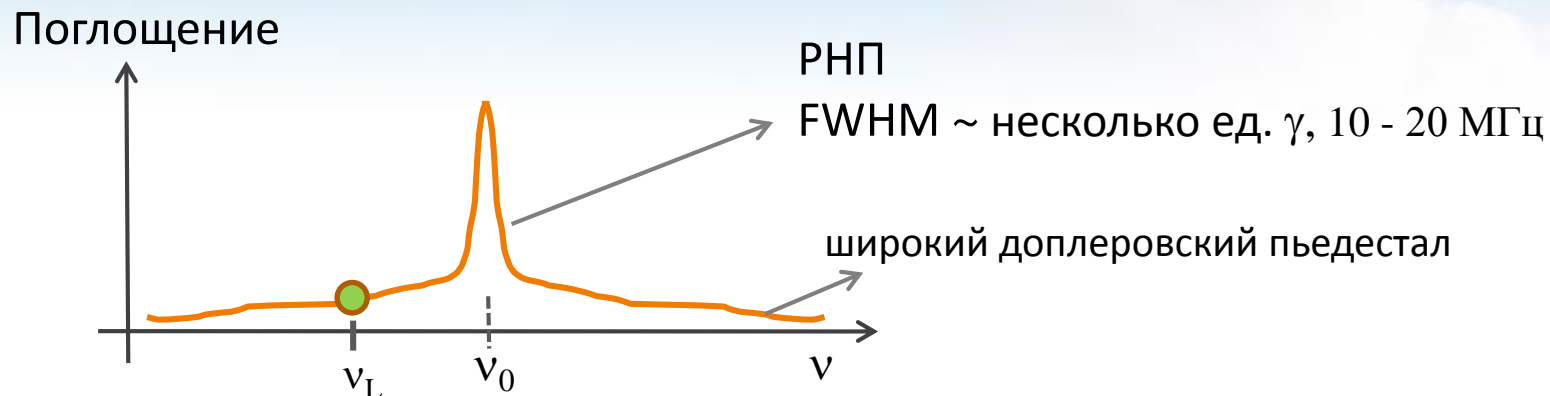
Населённости: $\rho_{nn} \neq f(z)$ – только нулевые простр. гармоники

Зеемановские когерентности: $\rho_{12,21} \neq f(z)$ – только нулевые гармоники

Оптические когерентности: $\rho_{13,23,31,32} \sim e^{\pm ikz}$ – только первые гармоники

«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

Режим большой однофотонной отстройки: $|\delta| \gg \gamma$

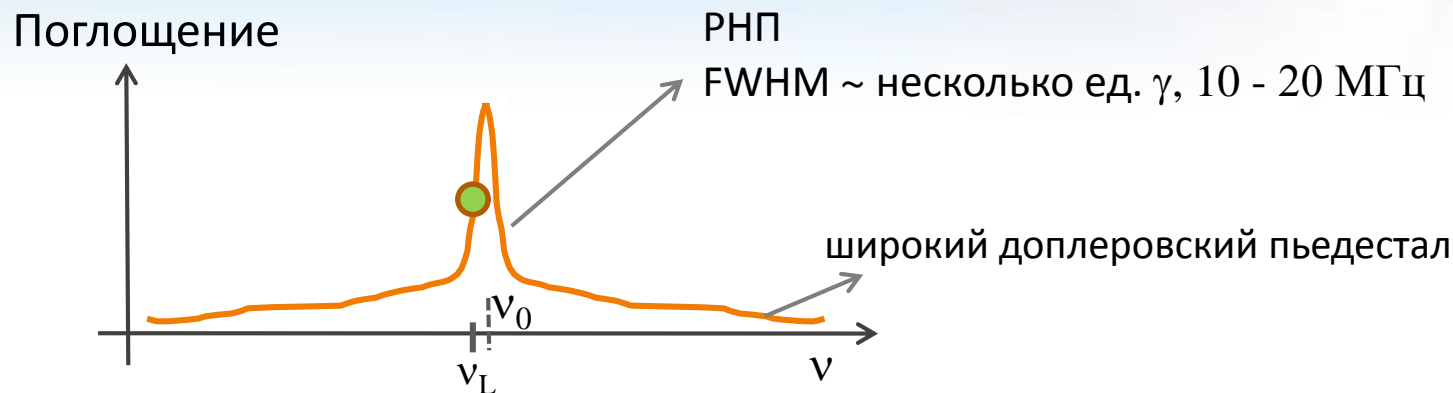


Рассмотрим $\delta = \nu_L - \nu_0 < 0$, тогда имеется две **независимые** скоростные группы атомов в газе, которые резонансно взаимодействуют с полем излучения:

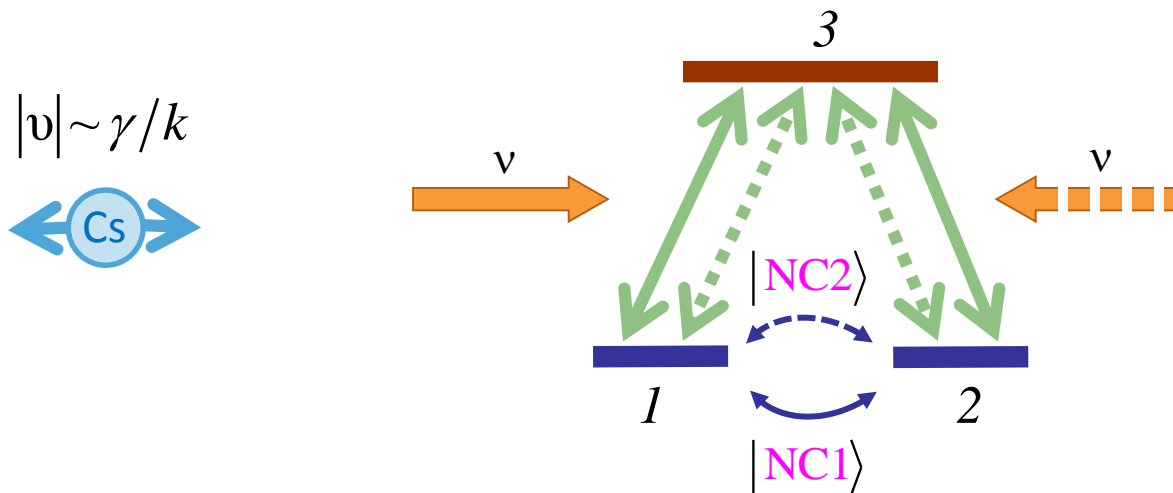


«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

Режим однофотонного резонанса: $|\delta| \leq \gamma$



Две встречные волны действуют на одну и ту же группу атомов, что приводит к субдоплеровскому резонансу:



«Конкуренция» состояний КПН может привести к отсутствию этого состояния как такового и увеличению поглощения света

«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

«Конкуренция» между NC_1 и NC_2

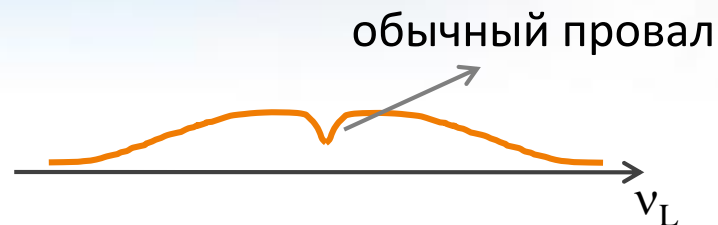
1) Если NC_1 и NC_2 состояния «параллельны»,

т.е. $\langle NC_1 | NC_2 \rangle = 1$, то эффект КПН

не уничтожается, но, наоборот, ещё больше

атомов накачиваются двумя волнами в «тёмное» состояние, что приводит к

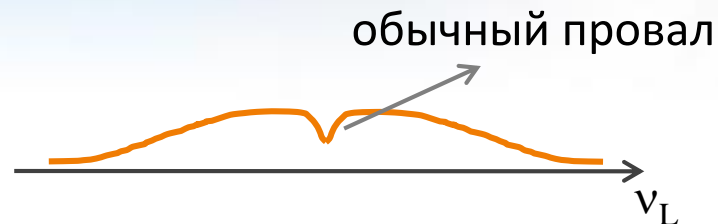
дополнительному просветлению среды и резонансу НП в виде провала.



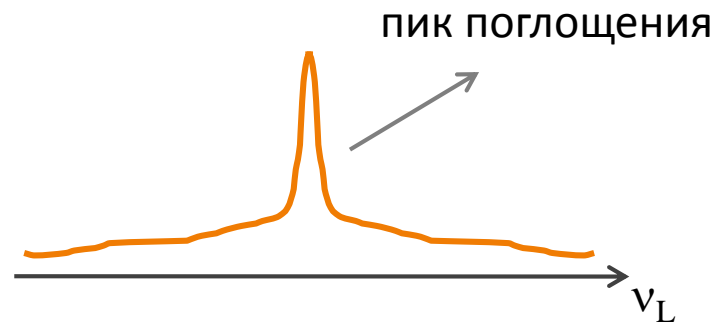
«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

«Конкуренция» между NC_1 и NC_2

1) Если NC_1 и NC_2 состояния «параллельны», т.е. $\langle NC_1 | NC_2 \rangle = 1$, то эффект КПН не уничтожается, но, наоборот, ещё больше атомов накачиваются двумя волнами в «тёмное» состояние, что приводит к дополнительному просветлению среды и резонансу НП в виде провала.



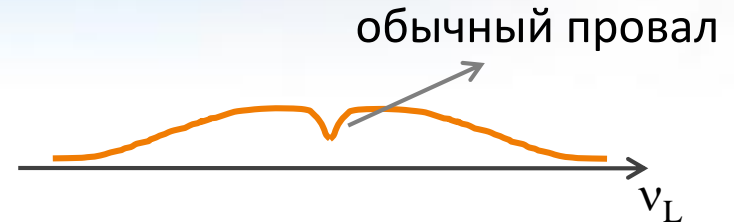
2) Напротив, если NC_1 и NC_2 ортогональны, т.е. $\langle NC_1 | NC_2 \rangle = 0$, тогда КПН полностью уничтожается и наблюдается резкое увеличение поглощения света.



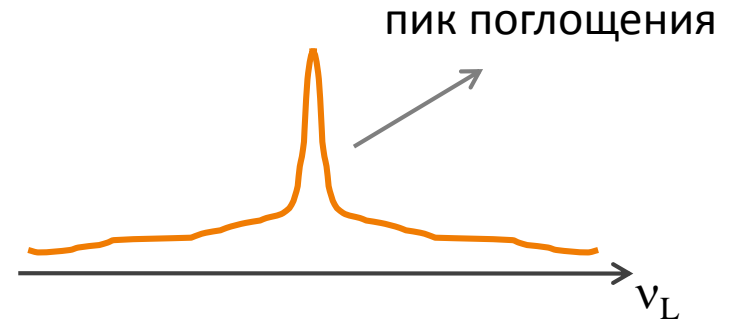
«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

«Конкуренция» между NC_1 и NC_2

1) Если NC_1 и NC_2 состояния «параллельны», т.е. $\langle NC_1 | NC_2 \rangle = 1$, то эффект КПН не уничтожается, но, наоборот, ещё больше атомов накачиваются двумя волнами в «тёмное» состояние, что приводит к дополнительному просветлению среды и резонансу НП в виде провала.



2) Напротив, если NC_1 и NC_2 ортогональны, т.е. $\langle NC_1 | NC_2 \rangle = 0$, тогда КПН полностью уничтожается и наблюдается резкое увеличение поглощения света.

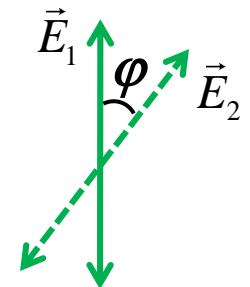


Процессом «конкуренции» состояний КПН можно управлять, меняя параметры поляризации света:

1) $lin \parallel lin$ configuration

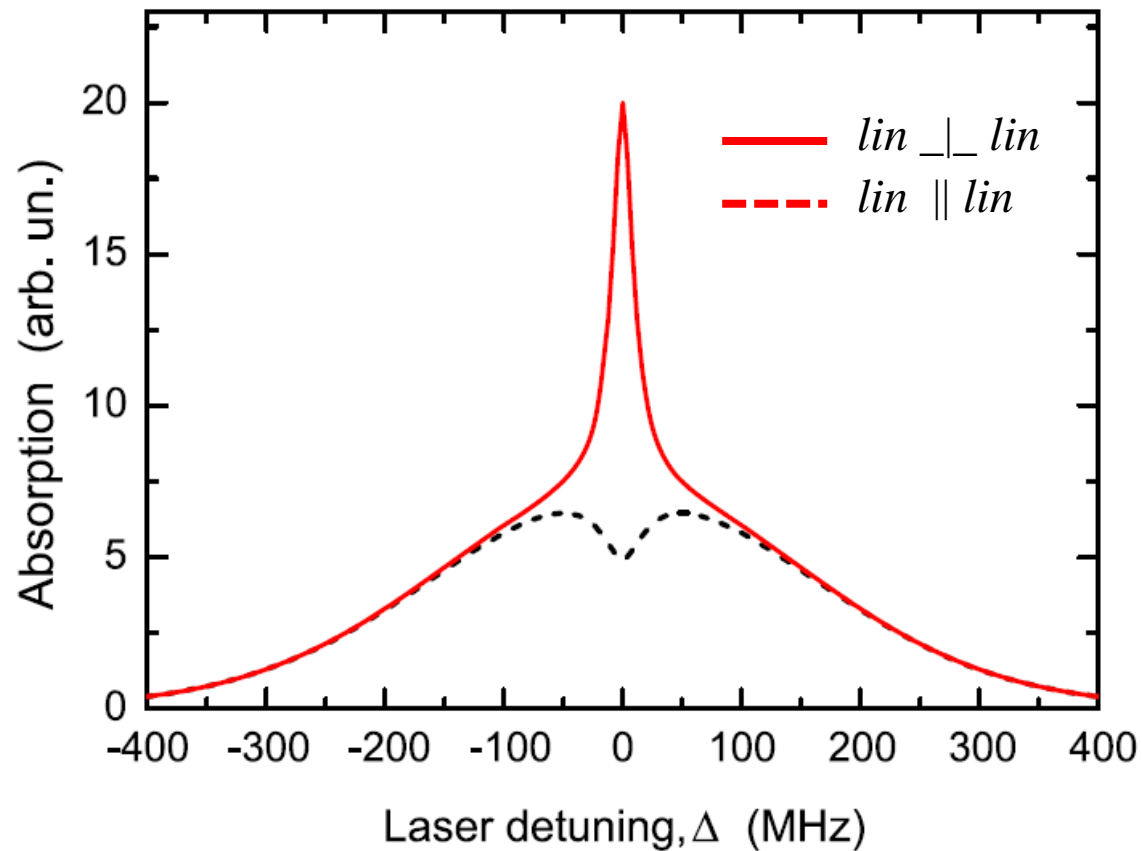
$$\left| \langle 3 | \hat{V}_2 | NC_1 \rangle \right| = \sin(\varphi)$$

2) $lin \perp \perp lin$ configuration



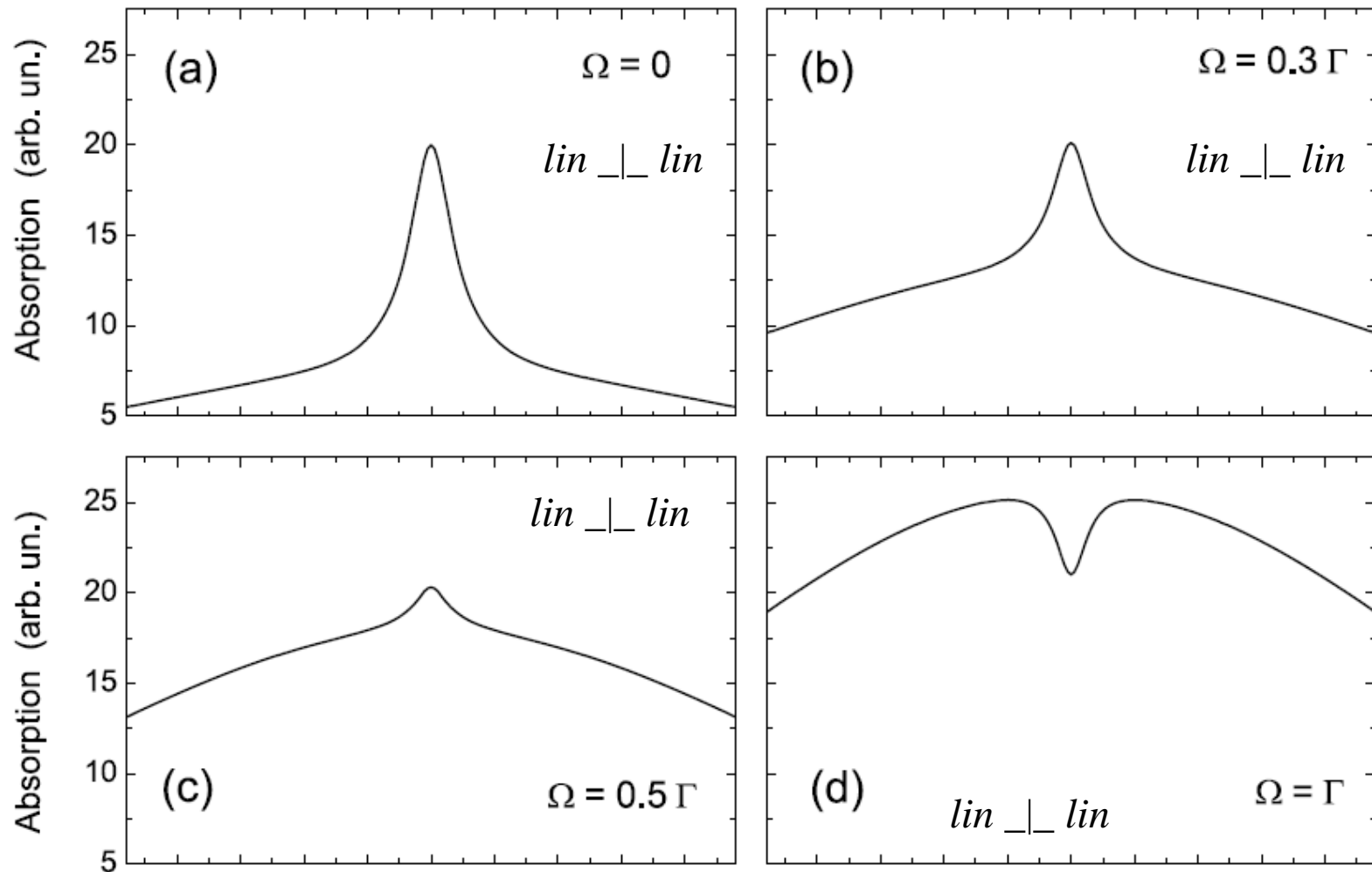
«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

Результат численных расчётов



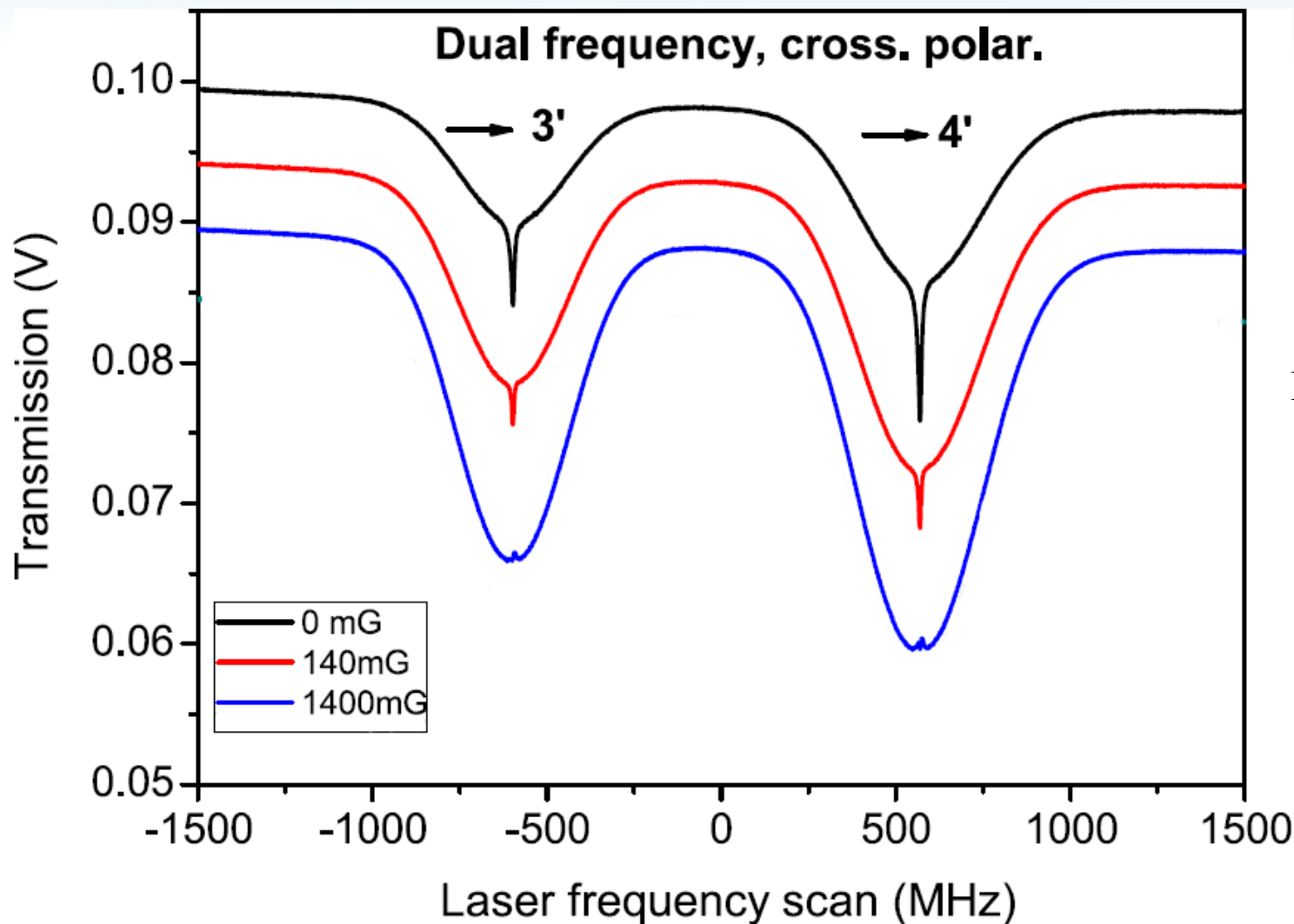
«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

Результаты расчётов: влияние продольного магнитного поля



«Зеемановский» КПН в пределах одного уровня F_g

Результаты экспериментов: влияние продольного магнитного поля




$I_{\text{total}} = 6 \text{ мВт/см}^2$
 $d = 2 \text{ мм}$

При $B > 500 \text{ мГс}$
состояние КПН
полностью
уничтожается

Резюме

M. Abdel Hafiz, D. Brazhnikov, G. Coget et al., *New J. Phys.* **19**, 073028 (2017)





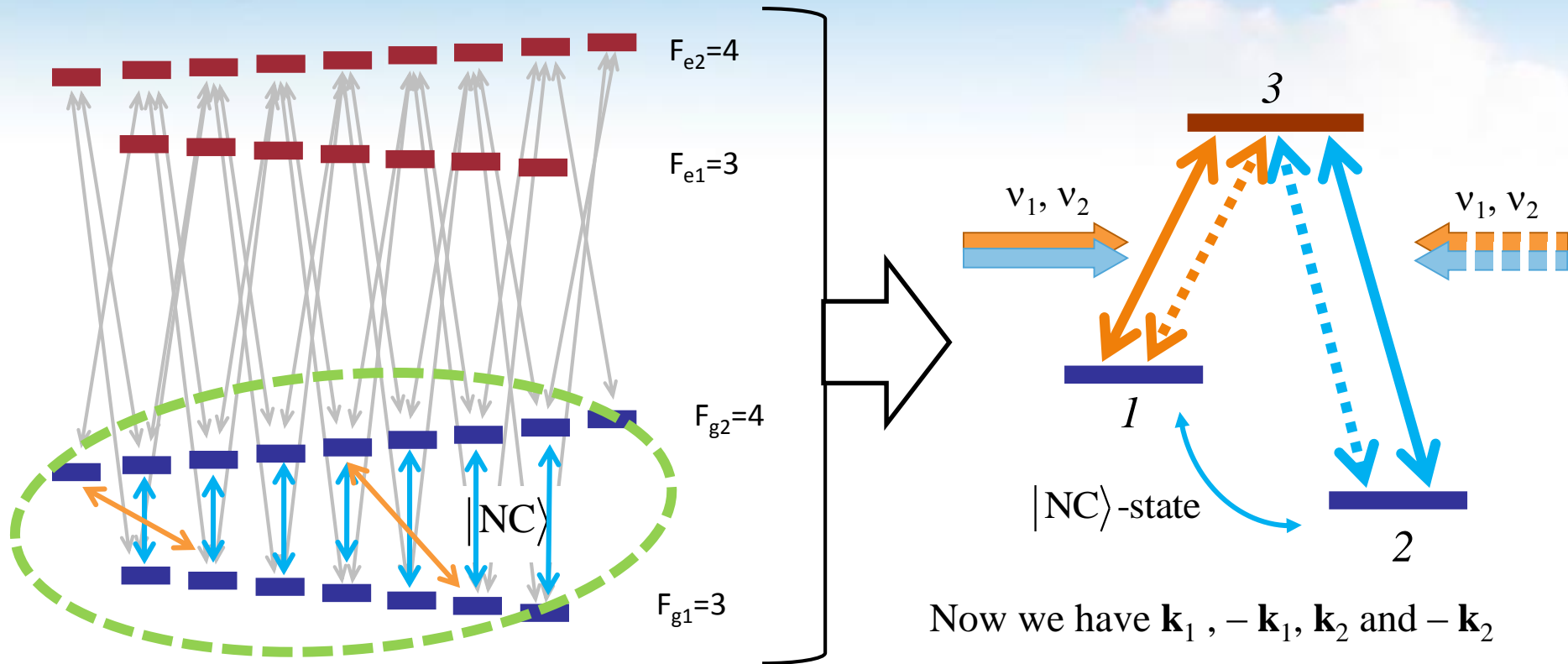
Thank you for your attention!

and Happy New Year!..



Additional slides

Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}



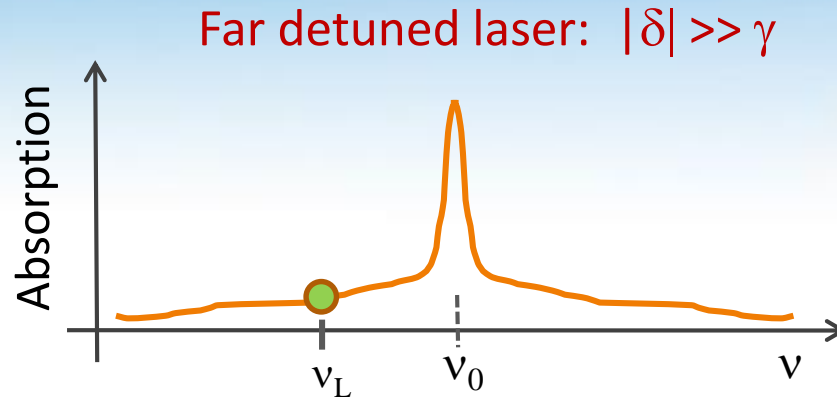
Now we have \mathbf{k}_1 , $-\mathbf{k}_1$, \mathbf{k}_2 and $-\mathbf{k}_2$
 So that $\Delta k = k_1 - k_2 \neq 0$

$$\rho_{12}(z, t) \approx e^{i\Delta_{12}t} [\rho_{12}^{(+)} e^{ik_{12}z} + \rho_{12}^{(-)} e^{-ik_{12}z}]$$

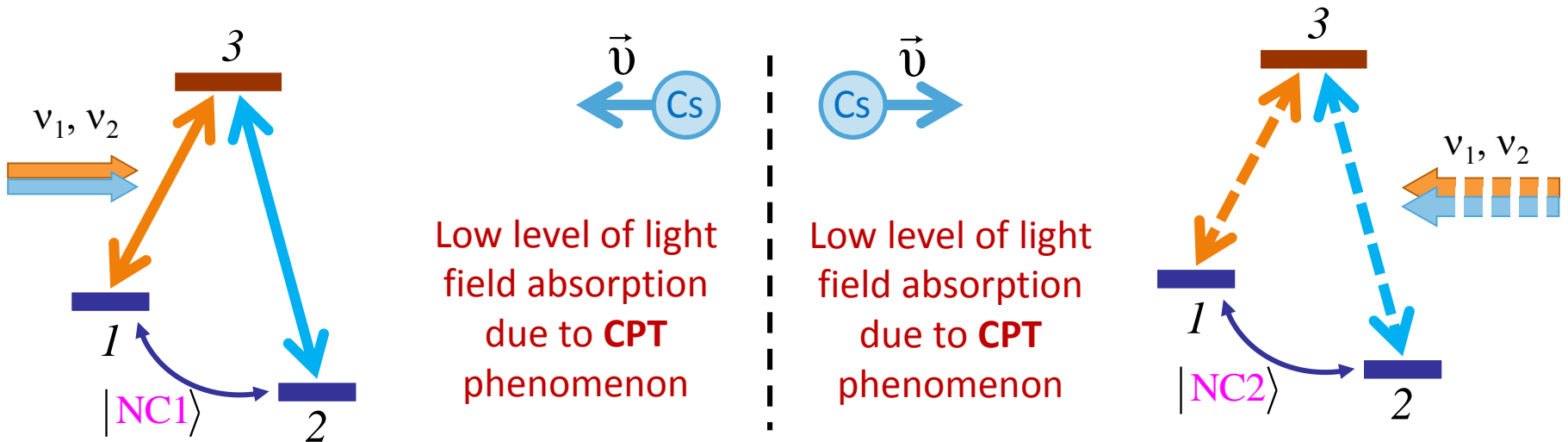
$$\rho_{nn}(z) \approx \rho_{nn}^{(0)} + \rho_{nn}^{(+)} e^{2ik_{12}z} + \rho_{nn}^{(-)} e^{-2ik_{12}z}$$

Optical coherences: $\rho_{13,23,31,32} \sim e^{\pm ik_1 z}, e^{\pm ik_2 z}, e^{\pm i(2k_1 - k_2)z}, \dots$ – various spatial harmonic

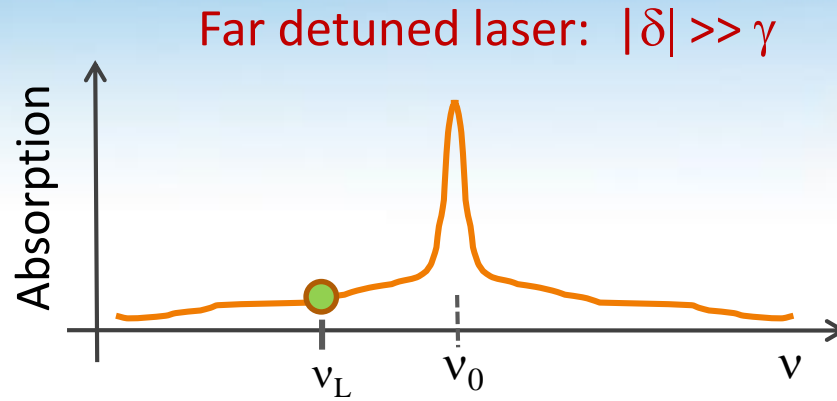
Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}



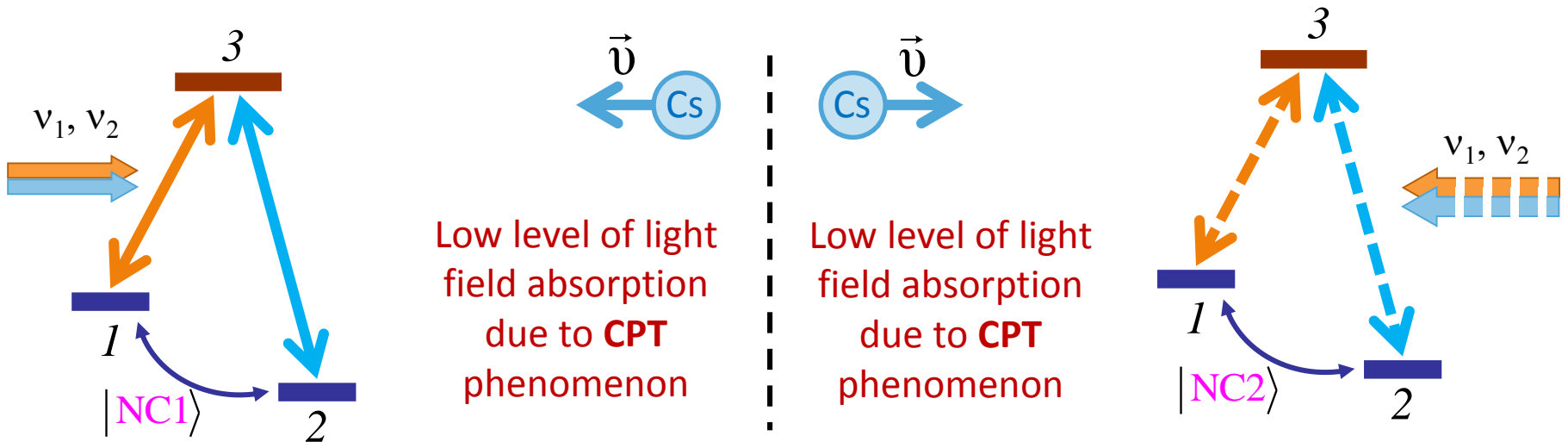
When $\delta \gg \gamma$, there are two different resonant groups of atoms:



Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}



When $\delta \gg \gamma$, there are two different resonant groups of atoms:

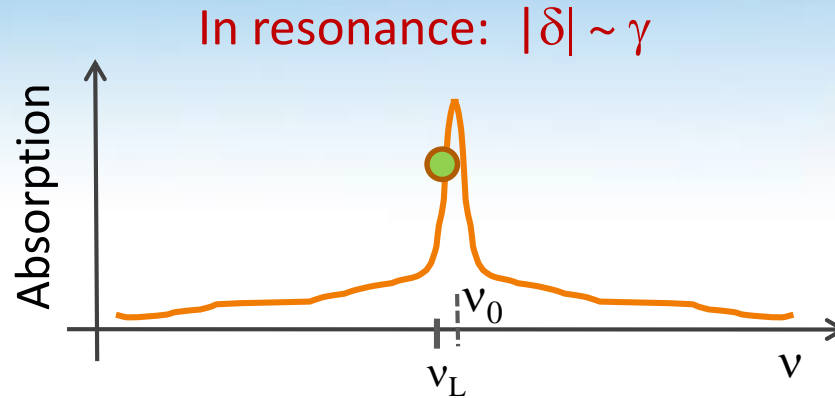


The main difference between the *Zeeman CPT* and the *microwave CPT* phenomena consists in spatial variations of the NC states:

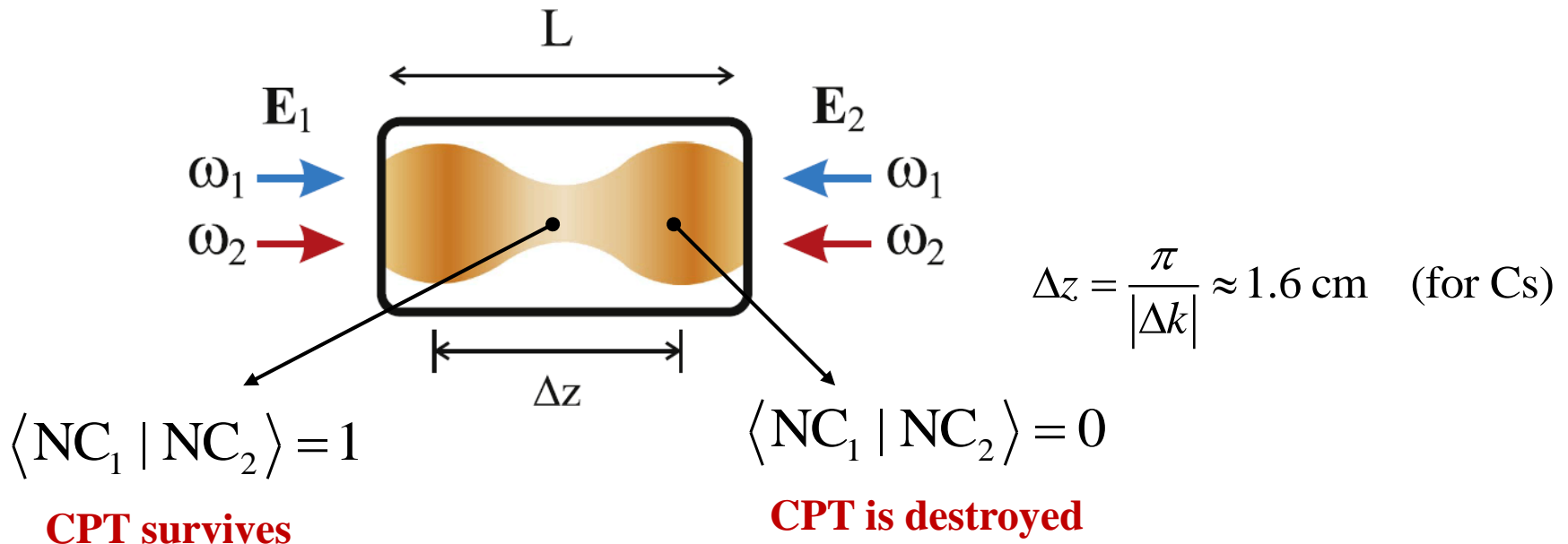
$$|NC_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1\rangle - e^{ik_{12}z} |2\rangle]$$

$$|NC_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1\rangle - e^{-i(k_{12}z + \phi_{12} + 2\phi)} |2\rangle]$$

Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}

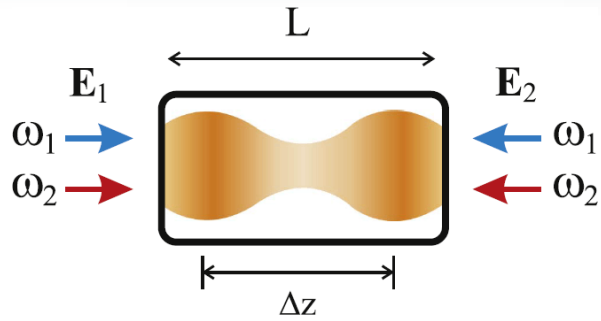


Spatial inhomogeneity of $NC_{1,2}$ states leads to a spatially inhomogeneous level of absorption or, in other words, to a inhomogeneous fluorescence of the cell:

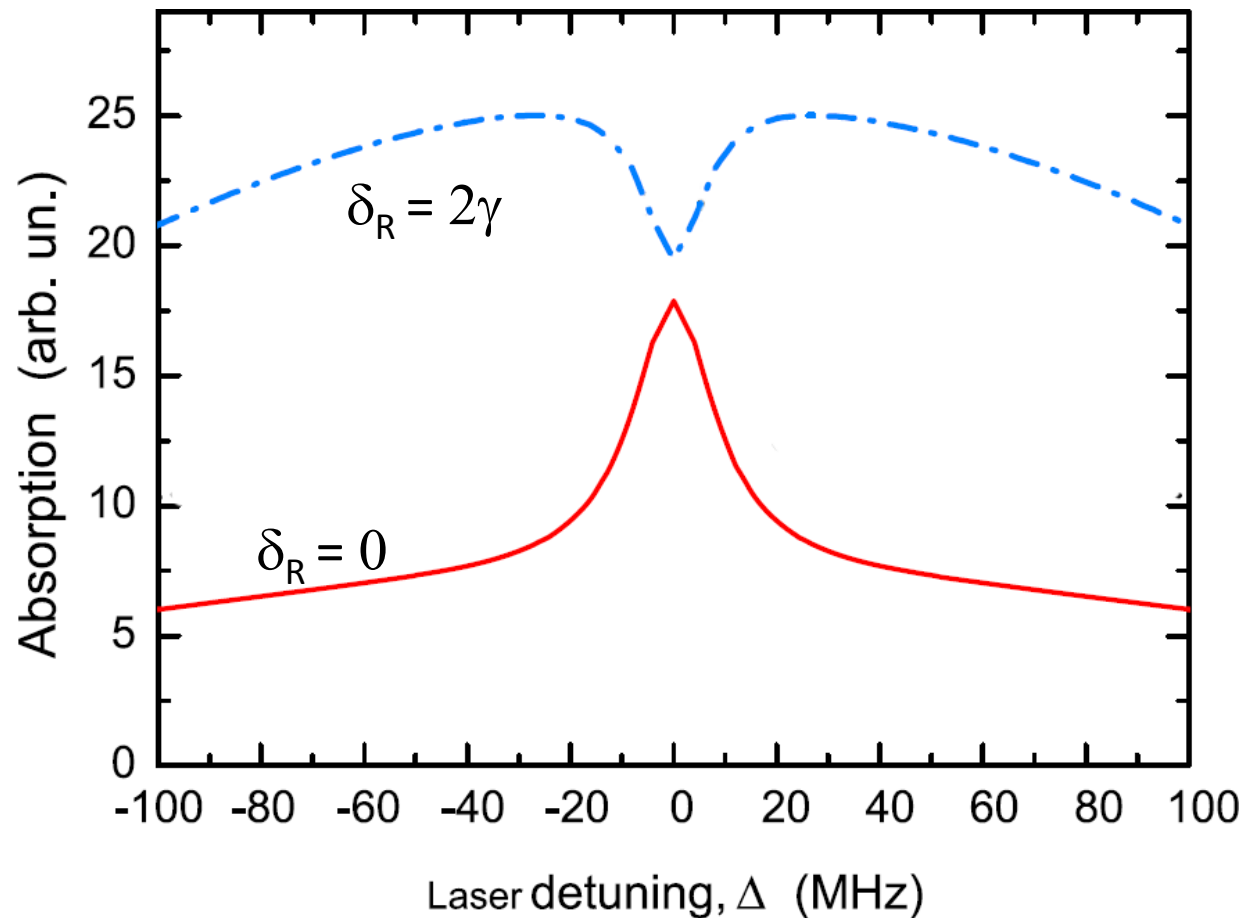
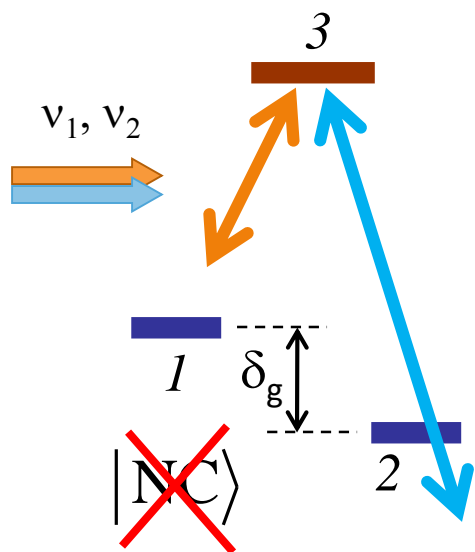


Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}

Raman detuning destroys the microwave CPT phenomenon



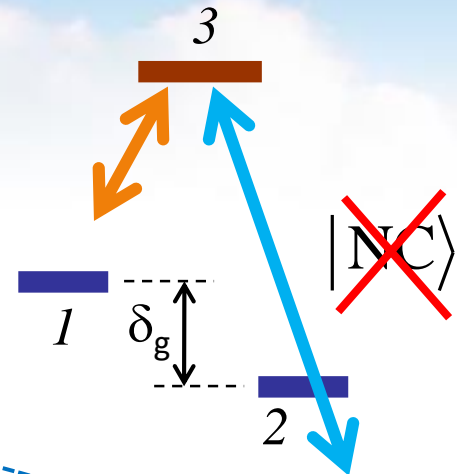
$$\delta_R = \nu_1 - \nu_2 - \delta_g$$



Microwave CPT phenomenon embraces two HFS levels F_{g1} and F_{g2}

Raman detuning destroys the microwave CPT phenomenon

$$\delta_R = \nu_1 - \nu_2 - \delta_g \neq 0$$

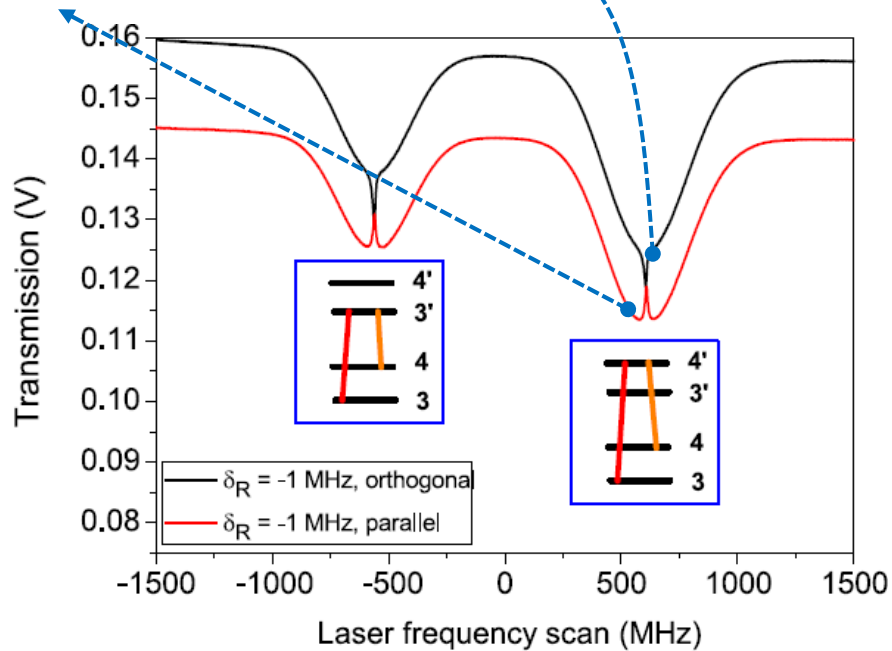
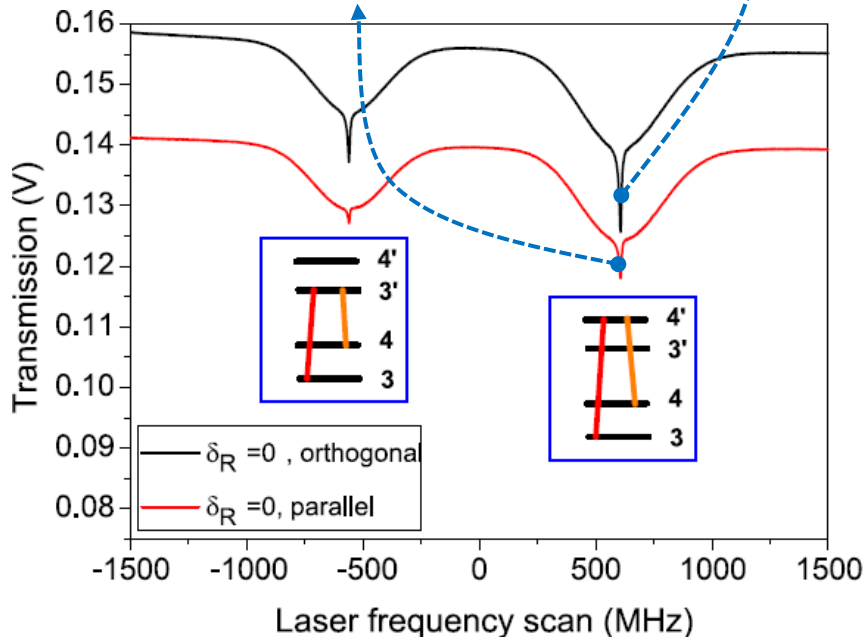


*lin*_|*lin*: A spike due to Zeeman & Microwave CPT

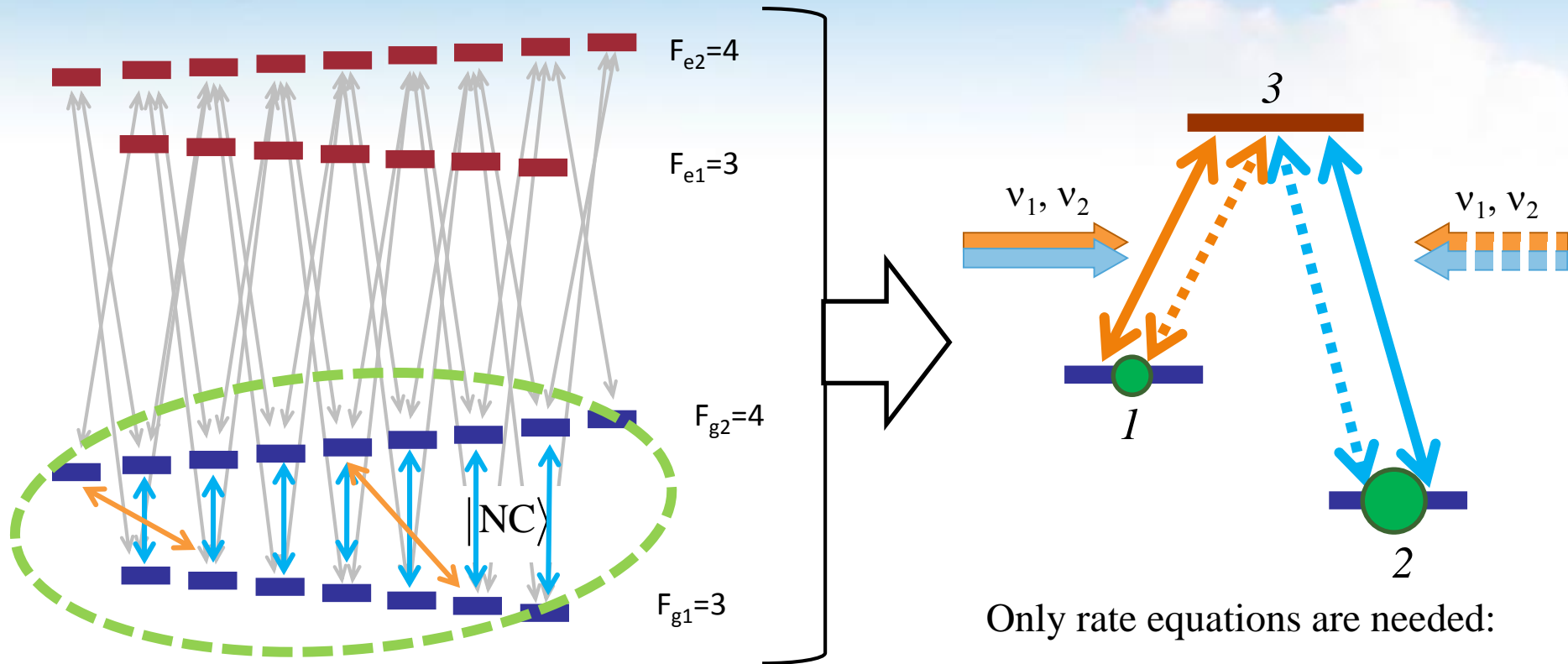
*lin*_|*lin*: A spike due to Zeeman CPT only

The spike effect is absent

lin || *lin*: A spike due to only Microwave CPT



Simple optical pumping effect can also cause the peak creation



Only rate equations are needed:

Level populations:

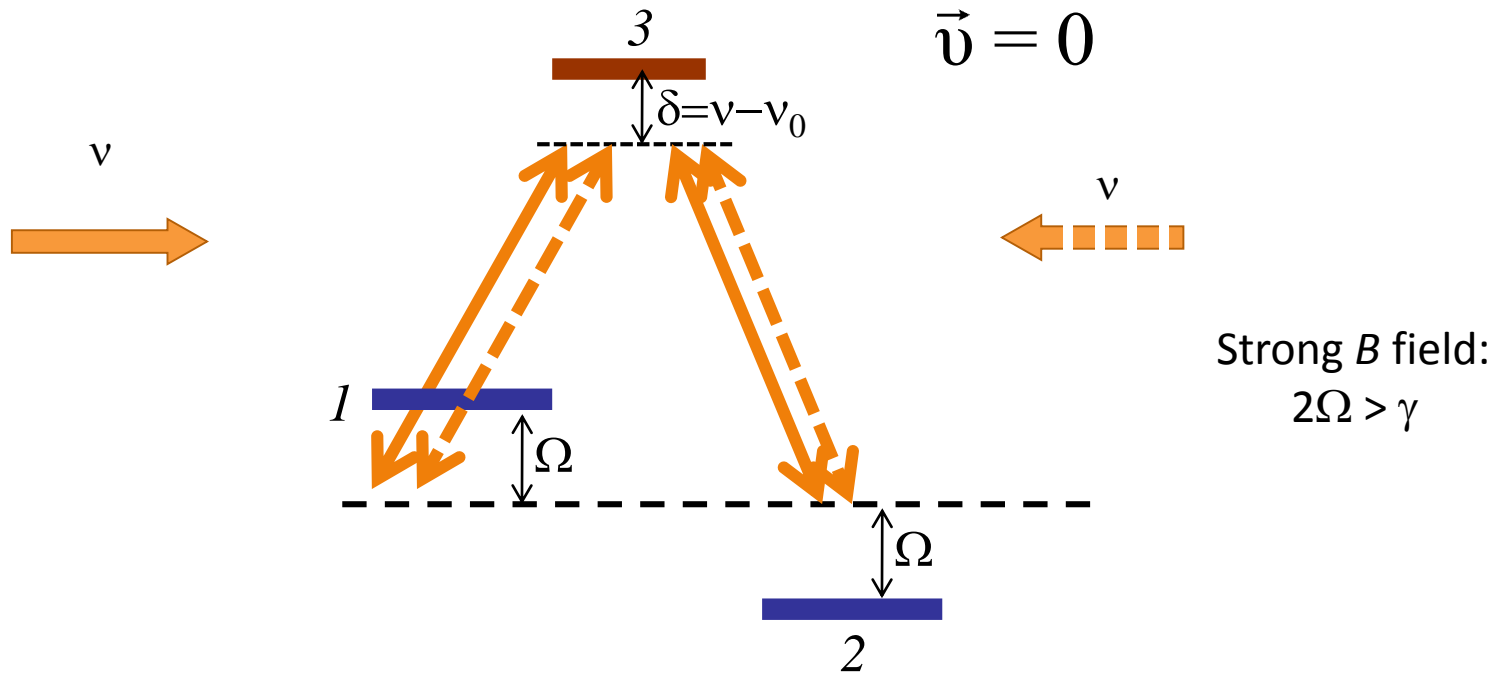
$$N_{11} \equiv \rho_{11}$$

$$N_{22} \equiv \rho_{22}$$

$$N_{33} \equiv \rho_{33}$$

Optical pumping effect causes the peak effect too

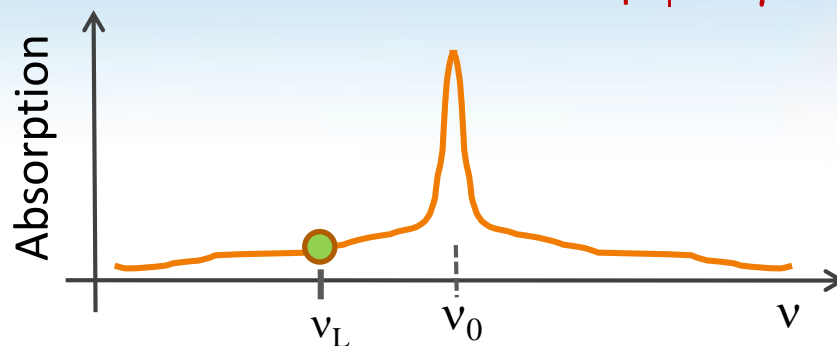
Let us consider a L-scheme as in the case of Zeeman-CPT effect, i.e. there is only one frequency ν , which is tuned to the resonance with an atom at rest ($\nu = \nu_0$):



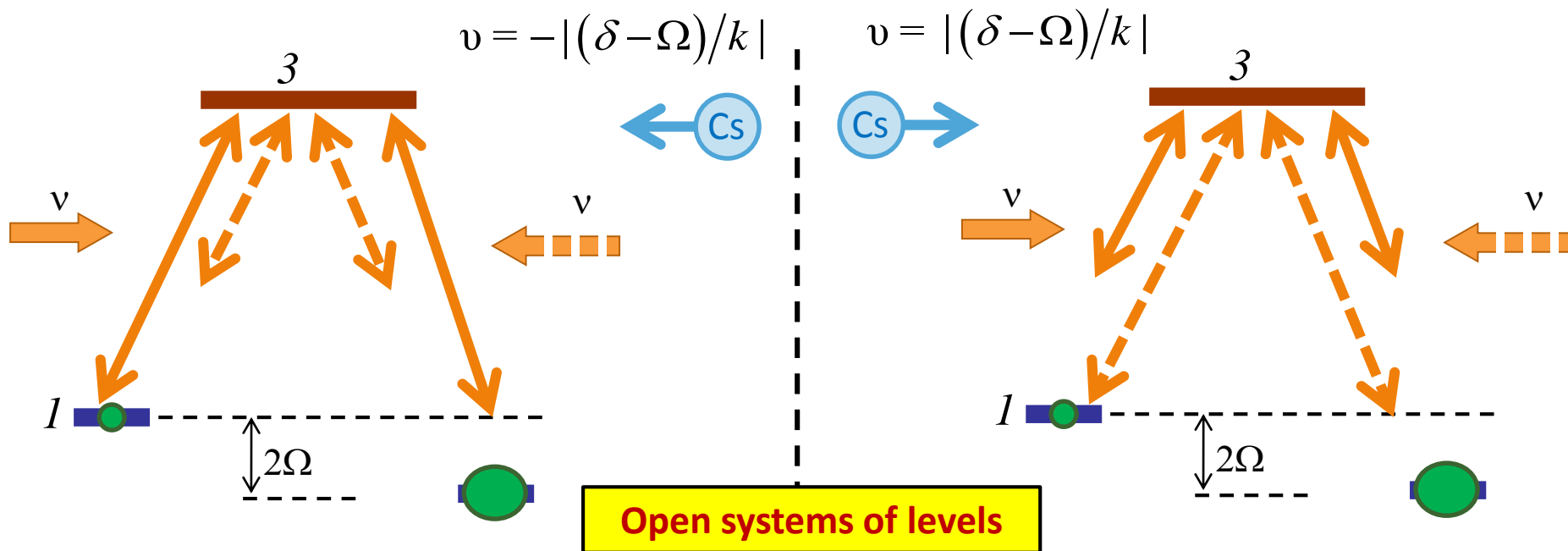
Atom at rest sees two light waves, which are far detuned with respect to the one-photon resonances $1 \rightarrow 3$ and $2 \rightarrow 3$ even in case $\delta = 0$

Optical pumping effect causes the peak effect too

Far detuned laser: $|\delta| \gg \gamma$



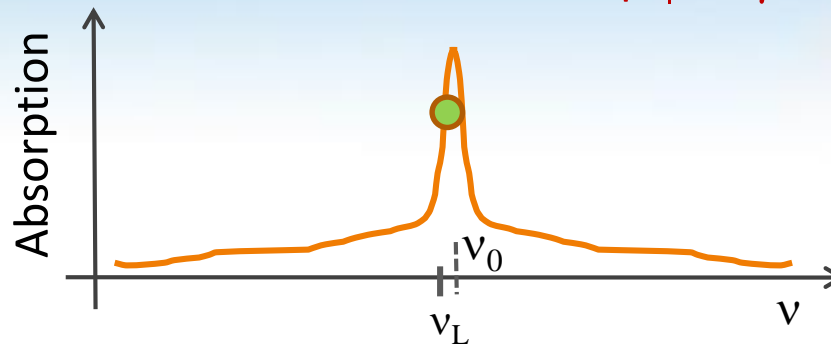
When $|\delta| \gg \gamma$ (and let it be $|\delta| > |\Omega|$), there are **4 different resonant groups** of atoms, 2 of them are:



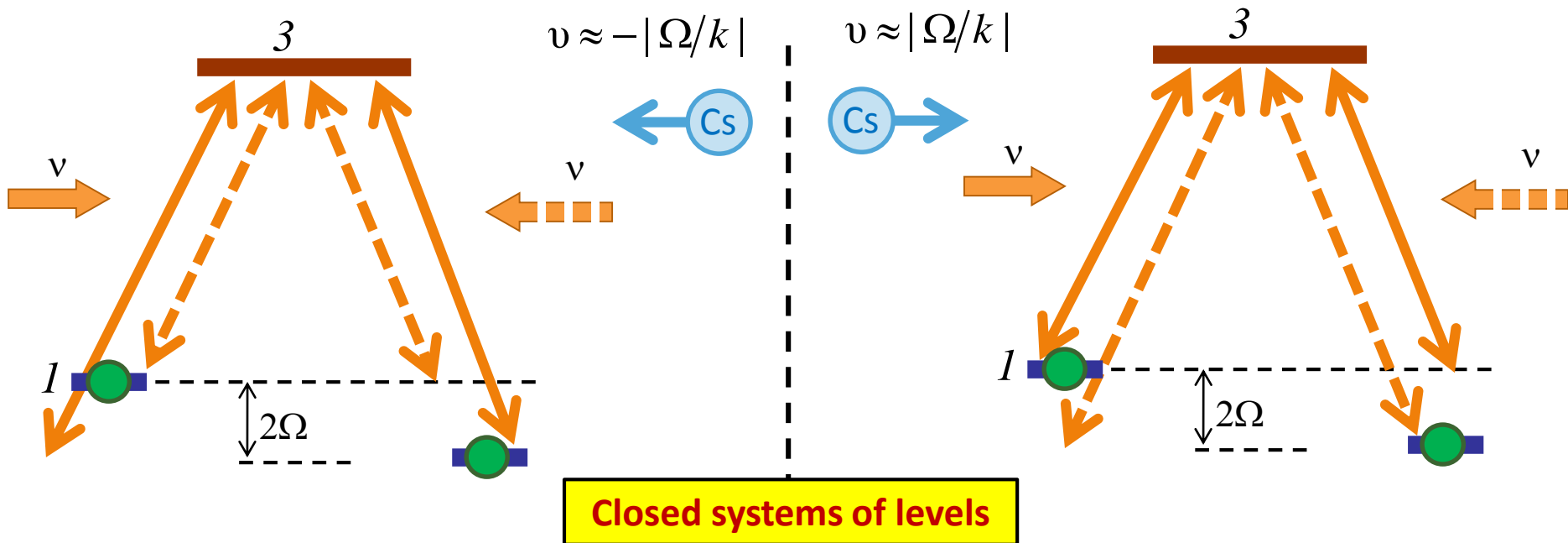
Low level of light absorption due to optical pumping to a non-resonant level

Optical pumping effect causes the peak effect too

Far detuned laser: $|\delta| \gg \gamma$



When $|\delta| \sim \gamma$ (and let it be $\Omega > \gamma$), there are **2 different resonant groups** of atoms:



High level of light absorption, because **both arms** of the Λ -scheme are excited

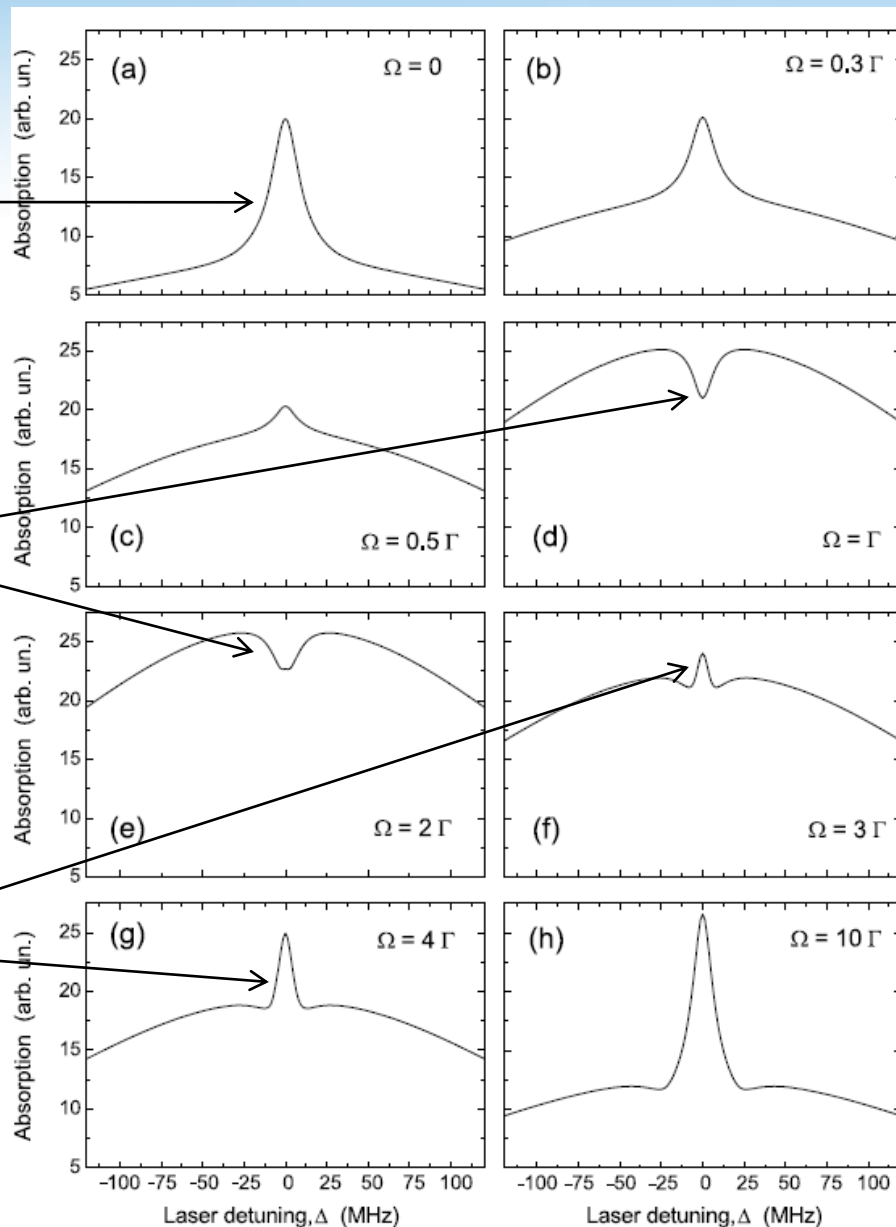
Optical pumping effect causes the peak effect too

Results of calculations

High-contrast spike
due to Zeeman-CPT effect

Zeeman-CPT states are
totally destroyed by the
magnetic field

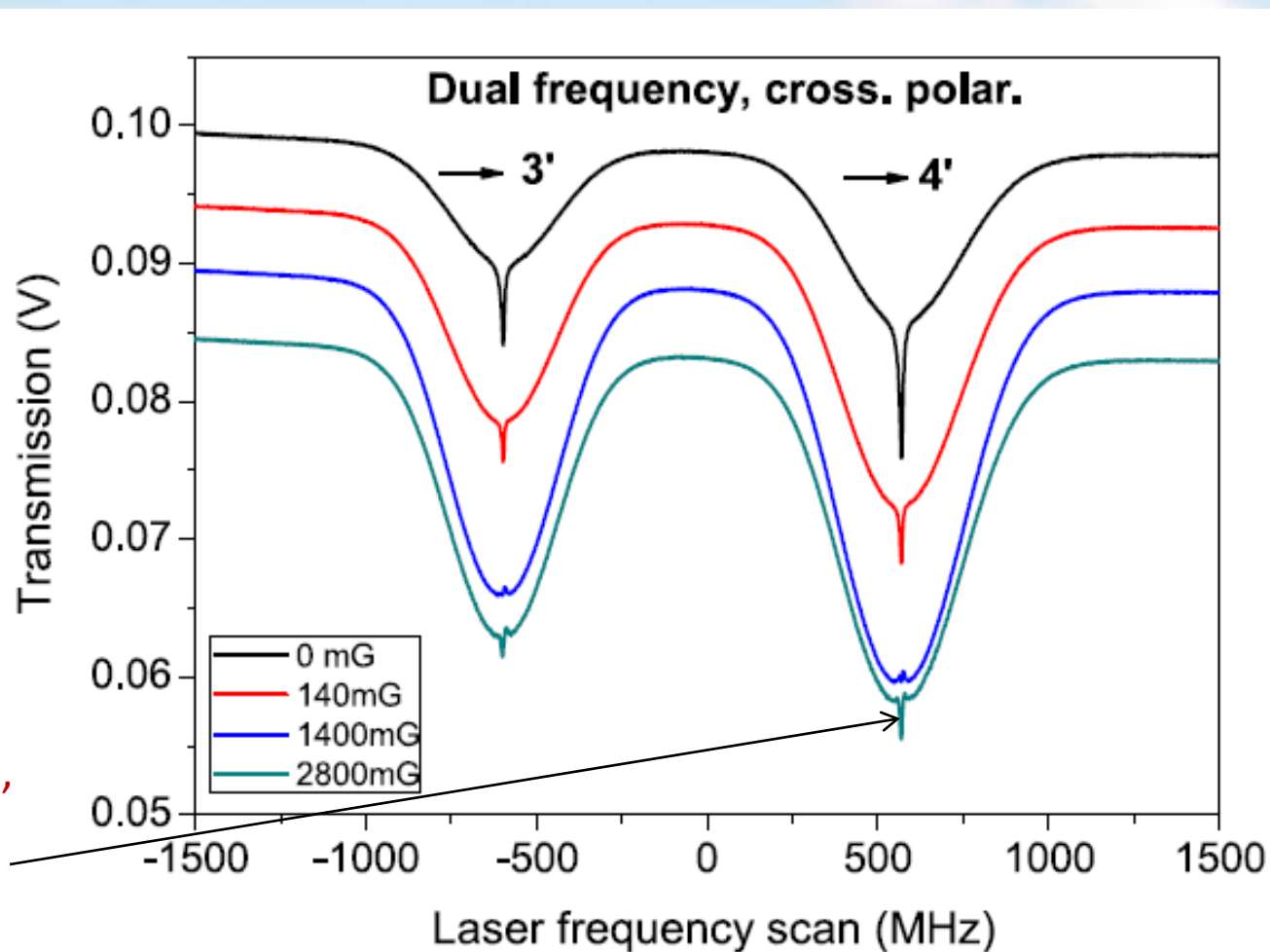
The peak arises again,
owing to the optical
pumping reason



Magnetic
field
increases

Optical pumping effect causes the peak effect too

Results of experiments



The peak arises again,
owing to the optical
pumping reason

