



Новосибирский
государственный
университет



Институт
Лазерной
Физики

Влияние эффекта нагрева иона на эффективность подавления полевых сдвигов в схеме гипер-Рамси

Кузнецов Сергей Николаевич,
N.Huntemann, C.Sanner, A.B. Тайченачев, В.И. Юдин

Новосибирск
19.12.2016

План:

- Стандарты частоты
- Схема уровней иона иттербия
- Схема стандарта частоты
- Electron shelving method
- Метод Раби и Рамси
- Полевой сдвиг
- Схема гипер-Рамси
- Нагрев иона
- Влияние на схему гипер-Рамси

Стандарт частоты

Стандарт частоты - это высокостабильный по частоте источник электромагнитных сигналов



Области использования:

- Геолокация
- Космическое позиционирование
- Проверка фундаментальных теорий (квантовая механика и общая теория относительности)
- Переопределение секунды.

Коллективы разрабатывающие СЧ на Yb 171⁺

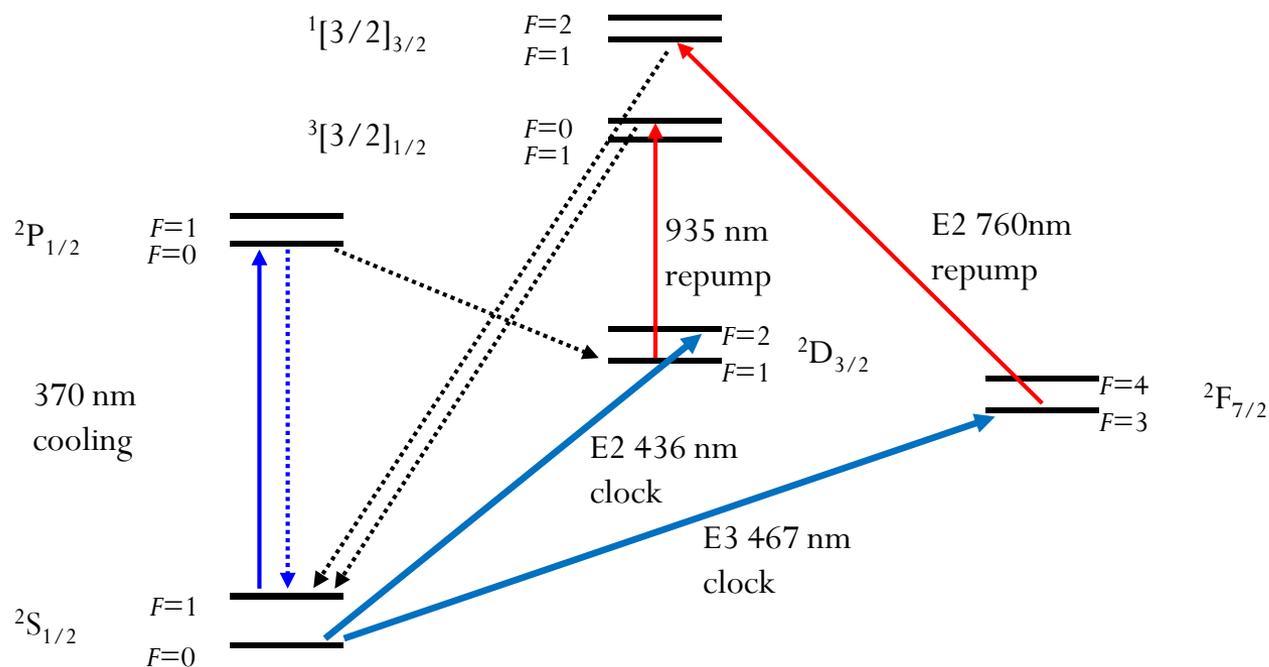
ИЛФ СО РАН

NPL (Англия)

PTB (Германия) наилучший результат по относительной неопределенности среди ионных стандартов частоты в $3.2 \cdot 10^{-18}$

[N. Huntemann PRL **116**, 063001 (2016)]

Схема уровней иона иттербия



Охлаждающий переход:



Часовые переходы:

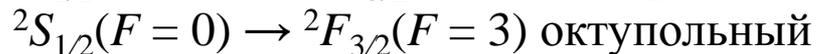
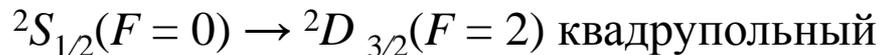
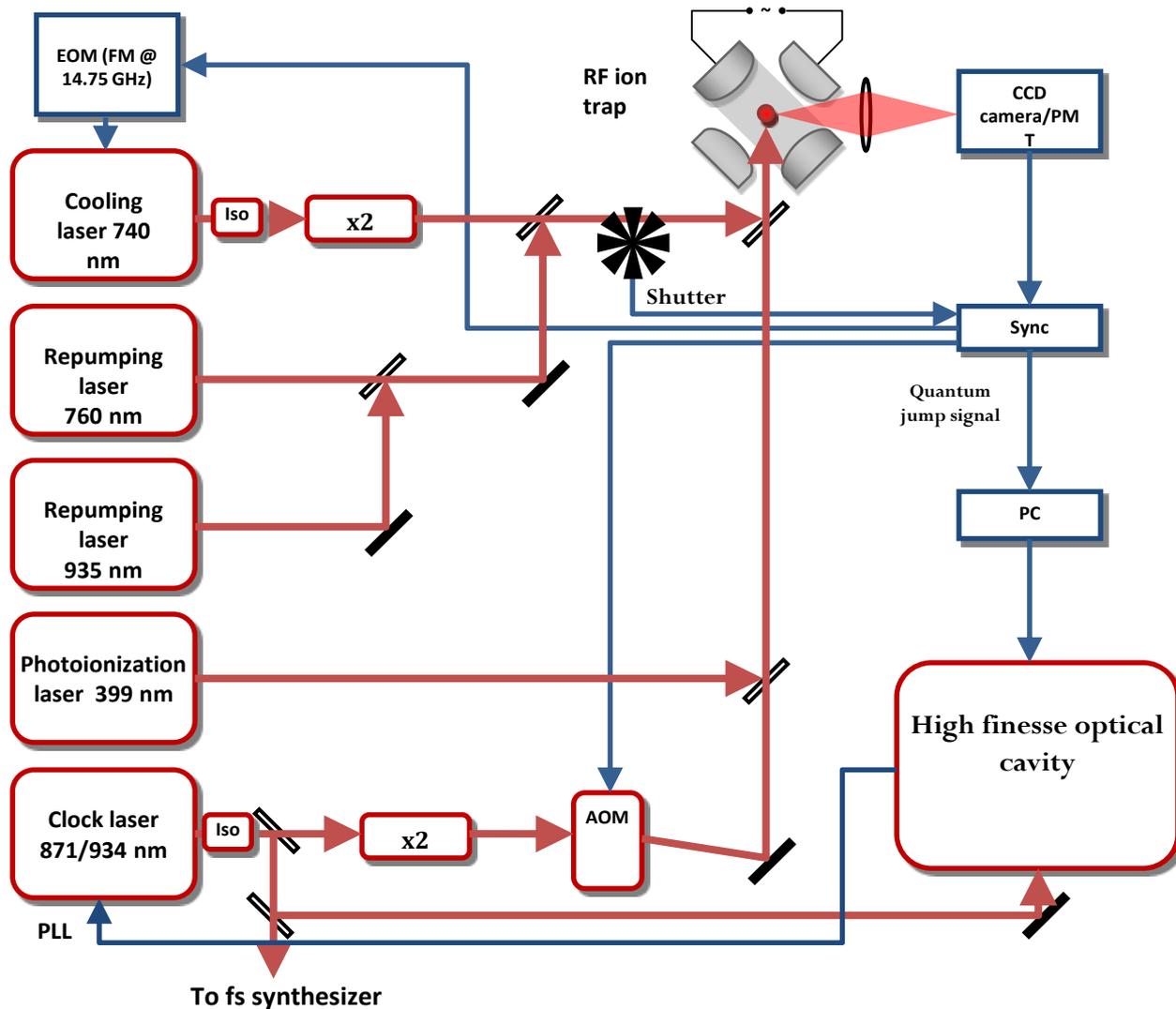
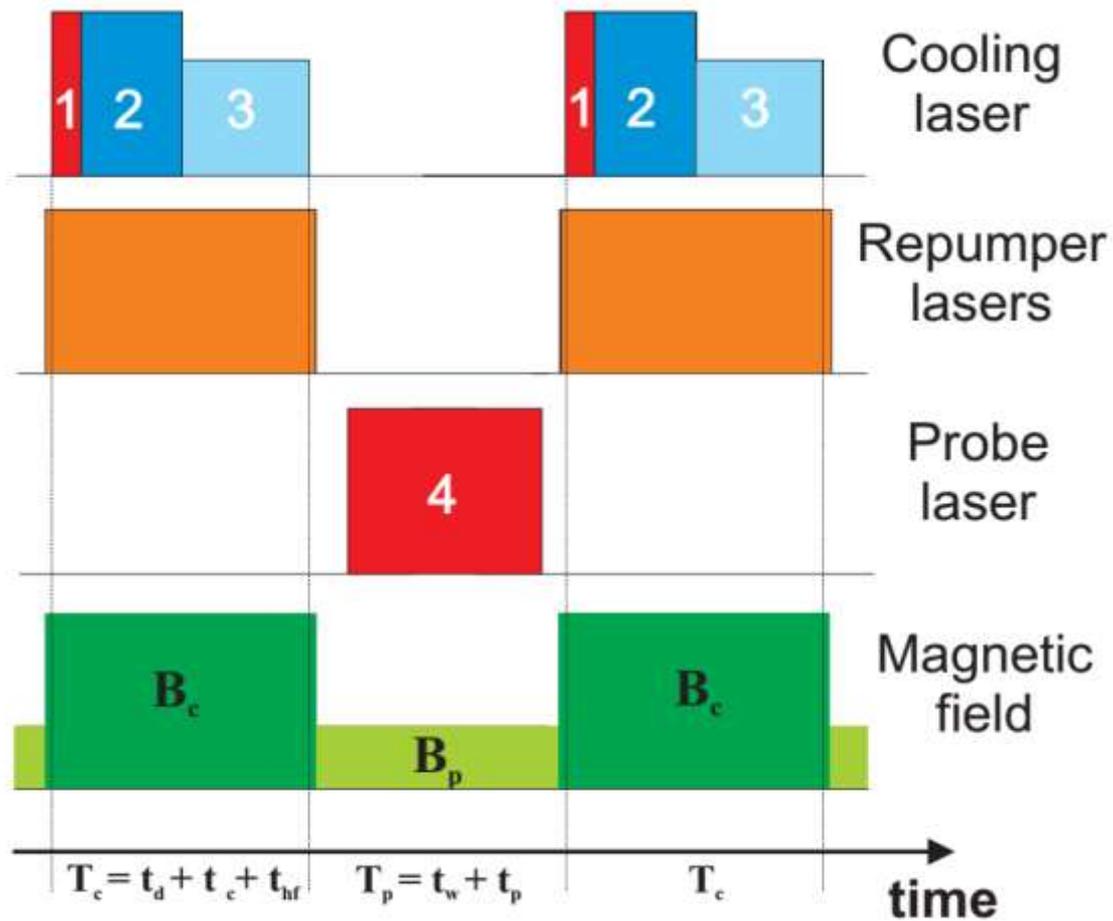


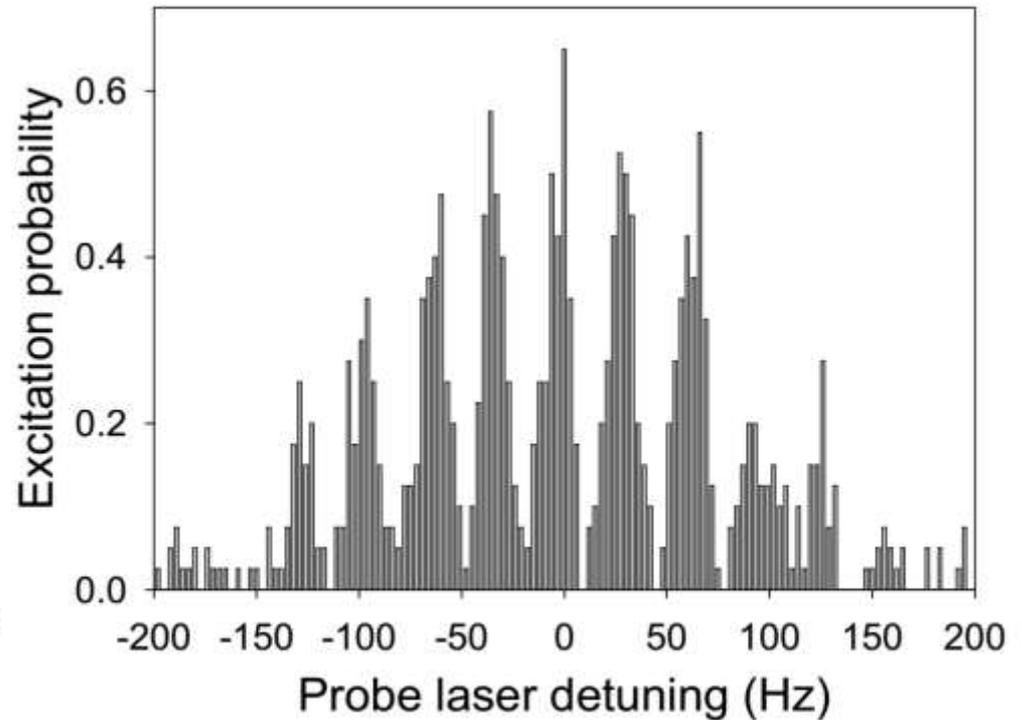
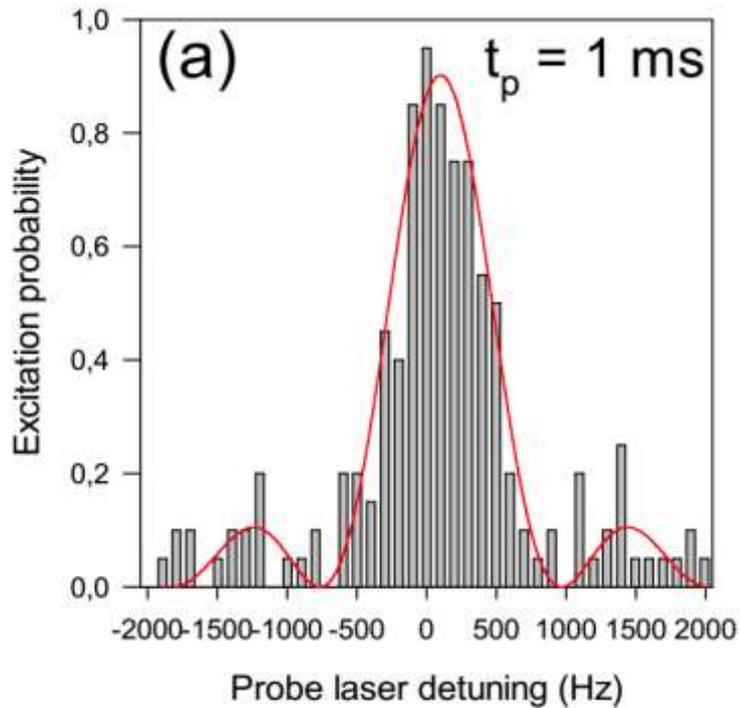
Схема стандарта частоты на одиночном ионе иттербия 171



Electron shelving method

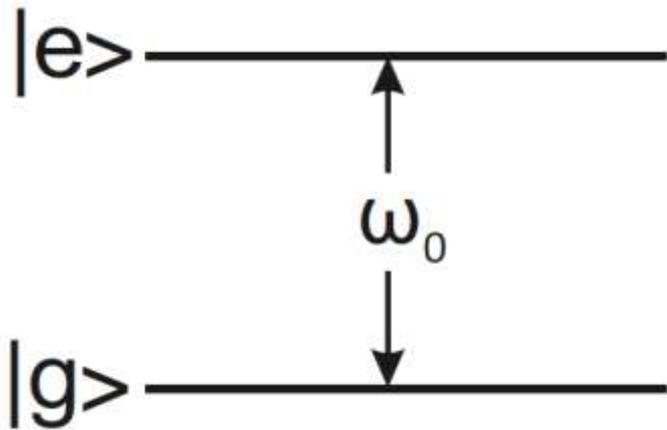


Вид получаемых спектров



Tobias Schneider «Optical Frequency Standard with a Single $^{171}\text{Yb}^+$ Ion»

Взаимодействие со светом



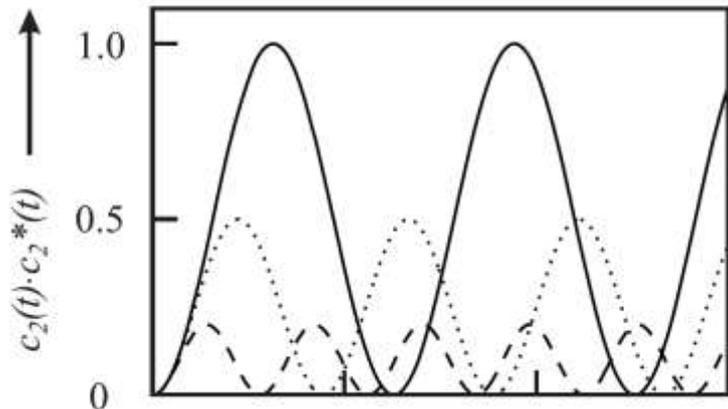
$$|c_{1,2}, t_0; t\rangle = c_1(t)|g\rangle + c_2(t)|e\rangle$$

$$H = H_0 + H_I$$

$$H_0 = E_g|g\rangle\langle g| + E_e|e\rangle\langle e|$$

$$H_I = -\frac{\hbar\Omega_0}{2}e^{i\varphi(t)}|g\rangle\langle e| - \frac{\hbar\Omega_0}{2}e^{-i\varphi(t)}|e\rangle\langle g|$$

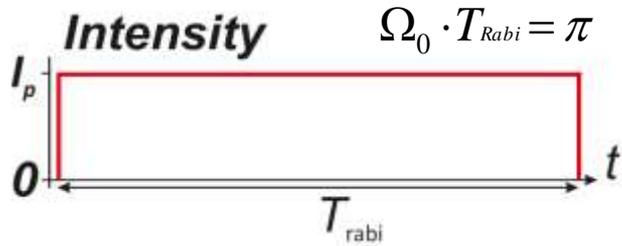
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^2 + \Delta \cos \Omega t}{\Omega^2} & -\frac{\Delta \sin \Omega t}{\Omega} & -\frac{\Omega_0}{\Omega}(1 - \cos \Omega t) \\ \frac{\Delta \sin \Omega t}{\Omega} & \cos \Omega t & \frac{\Omega_0}{\Omega} \sin \Omega t \\ -\frac{\Omega_0}{\Omega}(1 - \cos \Omega t) & -\frac{\Omega_0}{\Omega} \sin \Omega t & \frac{\Delta^2 + \Omega_0^2 \cos \Omega t}{\Omega^2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix}$$



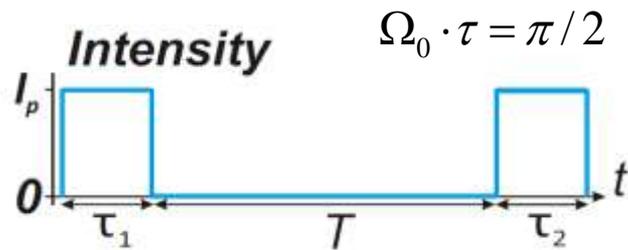
W -разность населенностей, Ω_0 -частота Раби, Ω -обобщенная частота Раби, Δ -отстройка от резонансной частоты перехода

$$|c_2|^2 = \frac{\Omega_0^2}{\Omega^2} \sin^2\left(\frac{\Omega}{2}t\right)$$

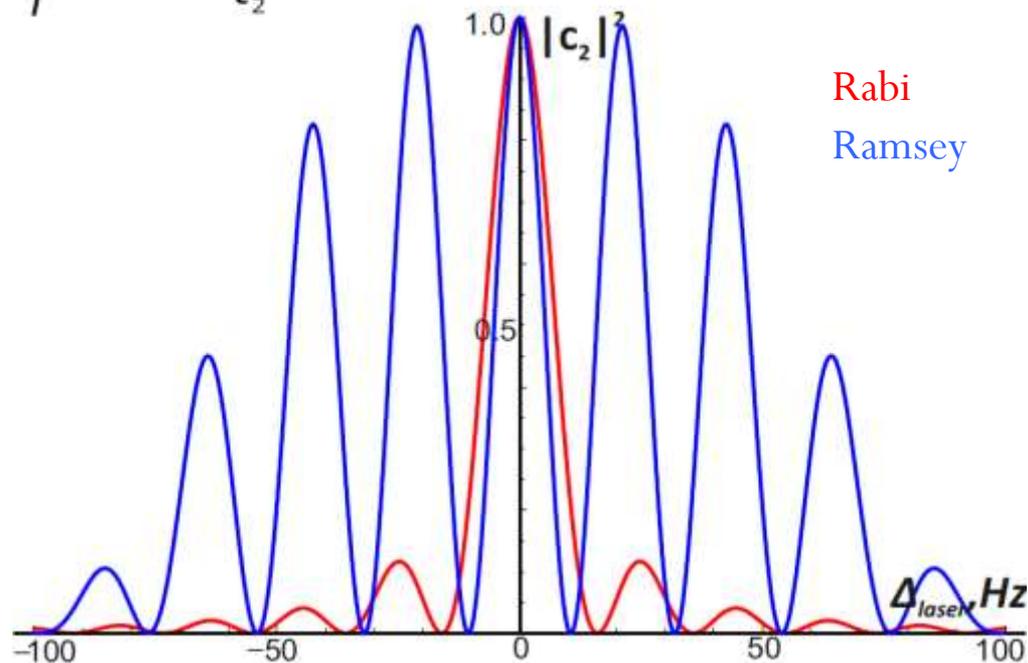
Сравнение методов Раби и Рамси



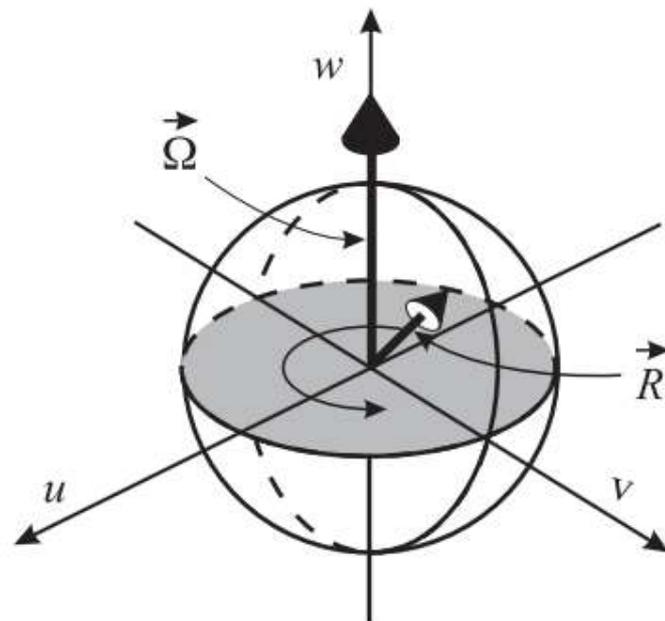
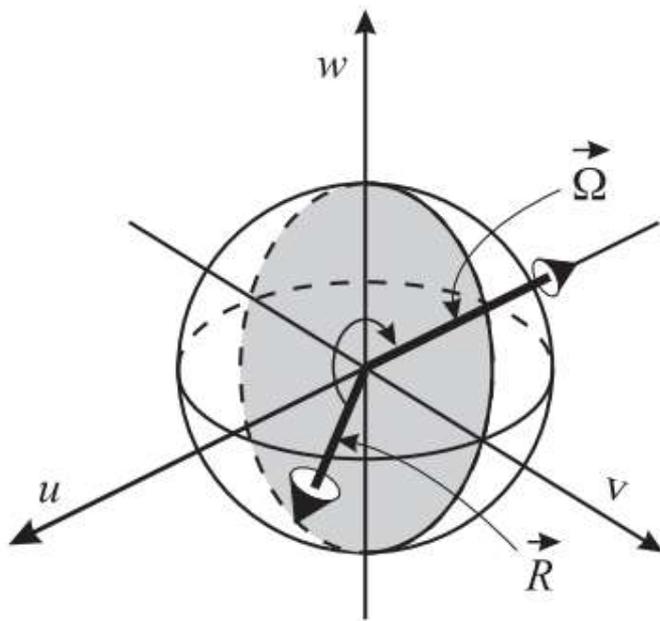
$$|c_2|^2 = \frac{\Omega_0^2}{\Omega_0^2 + \delta^2} \sin^2 \left(\frac{\sqrt{\Omega_0^2 + \delta^2}}{2} t \right)$$



$$|c_2|^2 = \frac{2\Omega_0^2}{\delta^2} \sin^2 \left(\frac{\delta\tau}{2} \right) \cos^2 \left(\frac{\delta T}{2} \right)$$

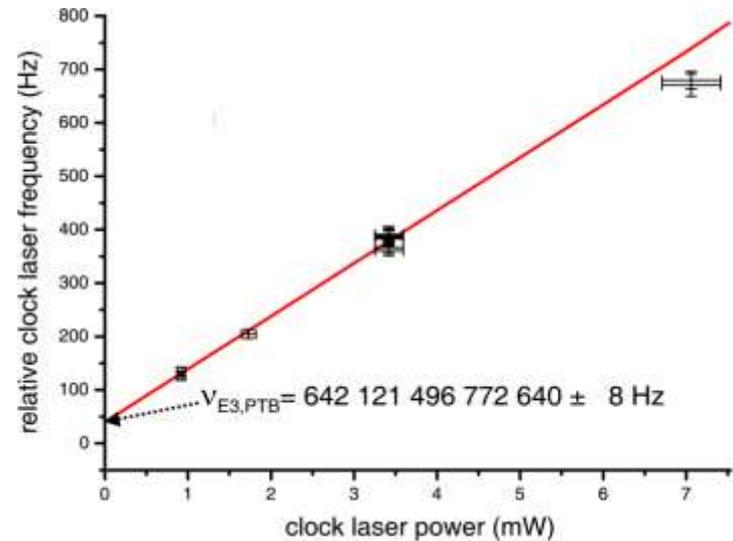


Пояснение π и $\pi/2$ импульсов

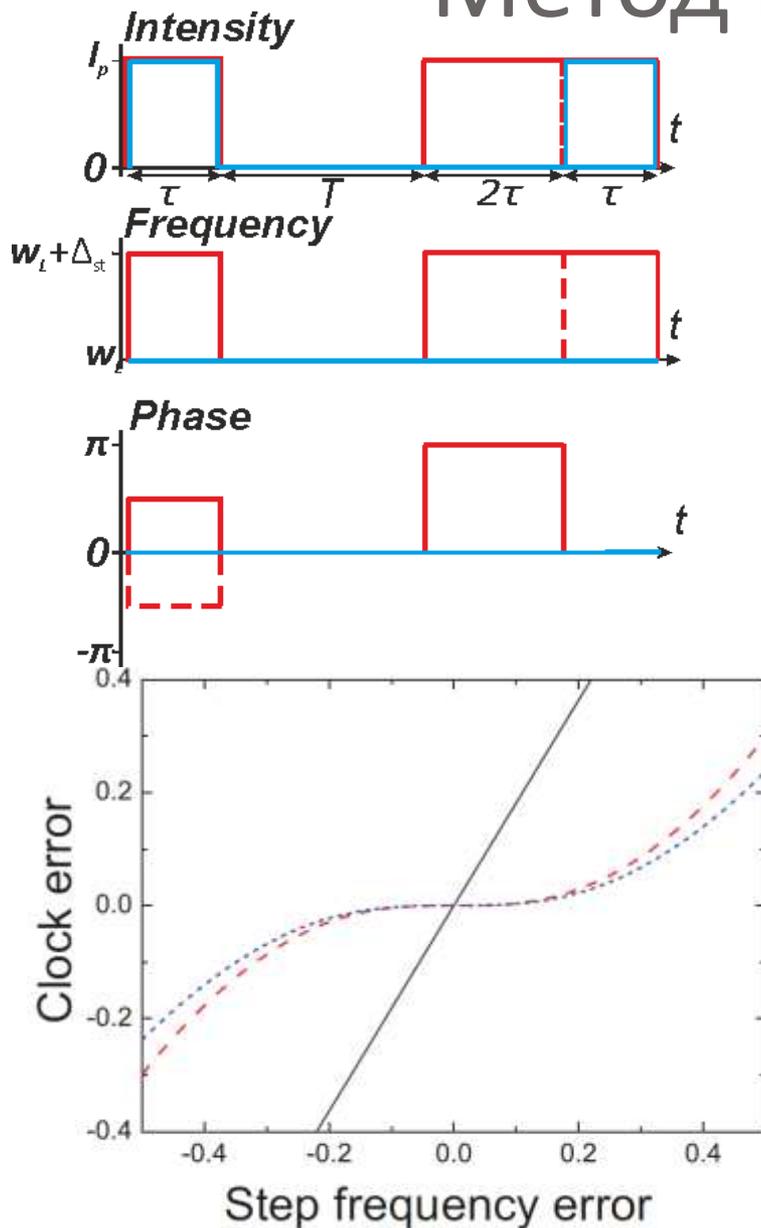


Полевой сдвиг

Электрический октупольный переход $^2S_{1/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ в $^{171}\text{Yb}^{+}$ сильно запрещенный подвержен сдвигу вследствие динамического эффекта Штарка



Метод гипер-Рамси



1. Общая длительность взаимодействия 2π
2. Частотная ступенька
3. Смена фазы

Моделирование ошибки эталонной частоты от ошибки определения полевого сдвига для схемы рамси и для схемы гипер-Рамси [с дополнительным фазовым скачком в \$\pi\$ и без него](#)

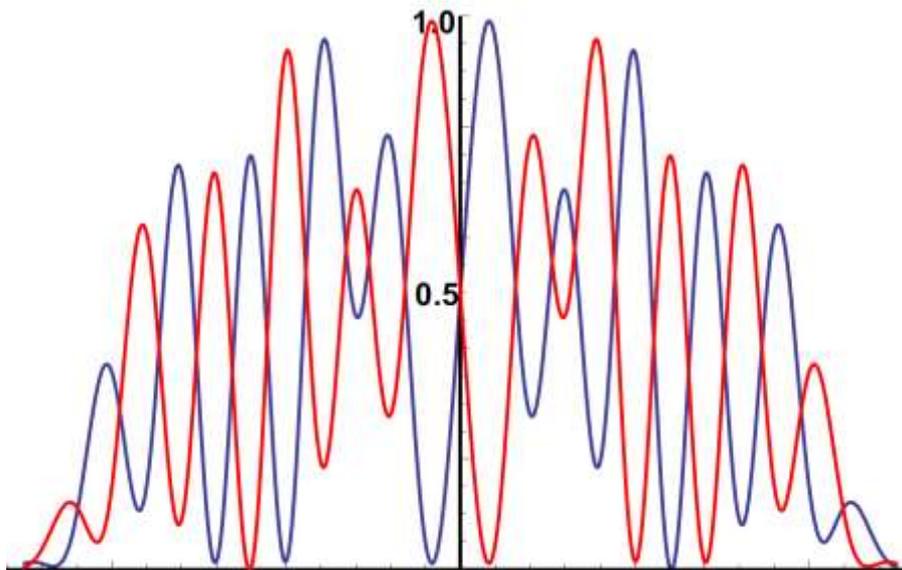
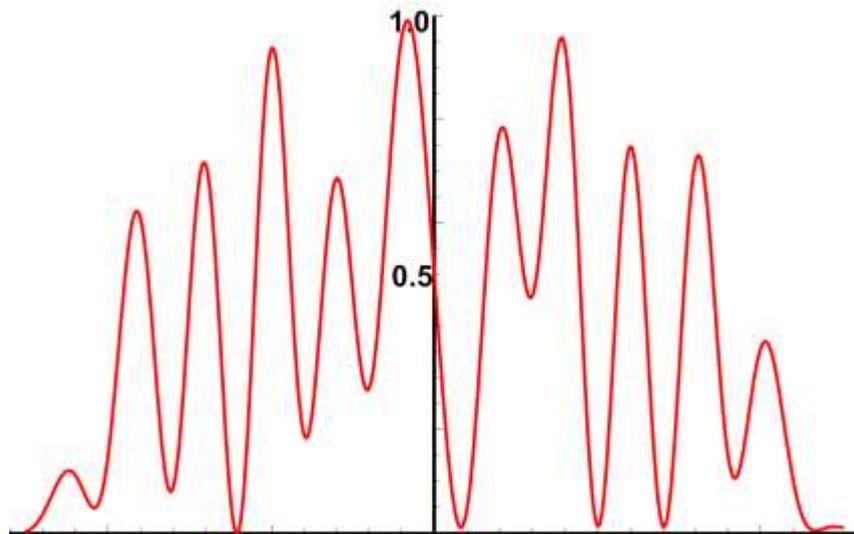
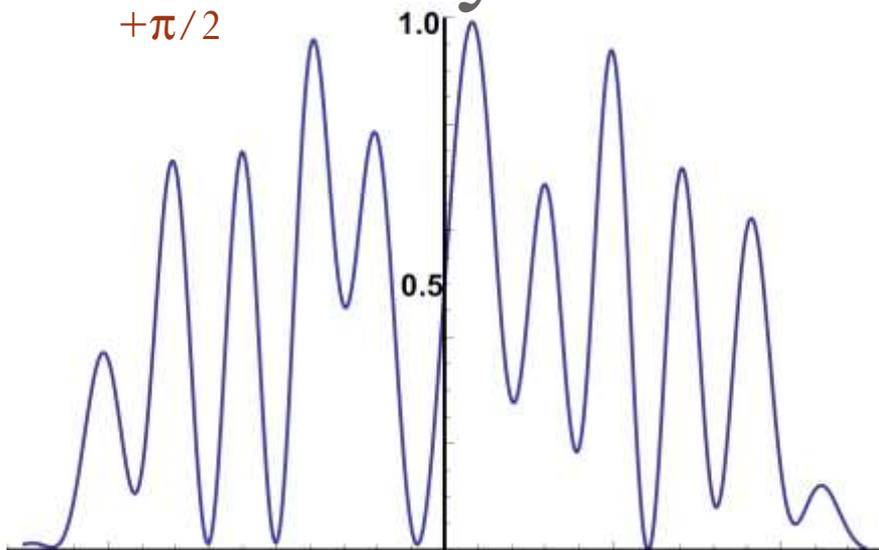
V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, et al. PRA 82 011804(R) (2010).

В 2012 был первый эксперимент, подтверждающий эффективность схемы гипер-Рамси **PRL 109, 213002 (2012)**

Получение сигнала ошибки

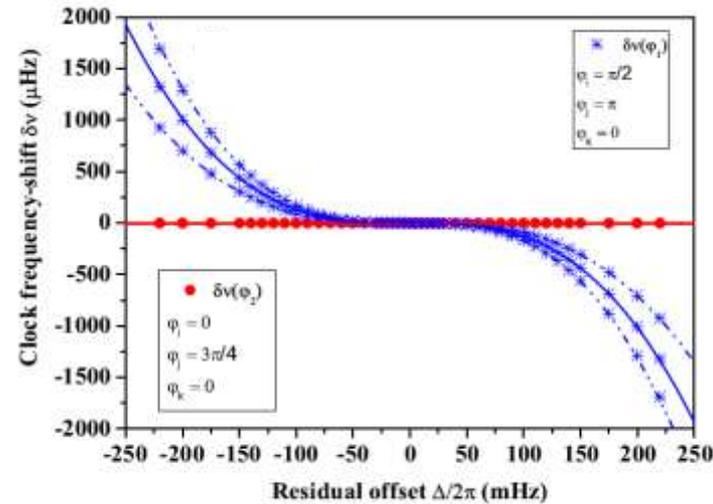
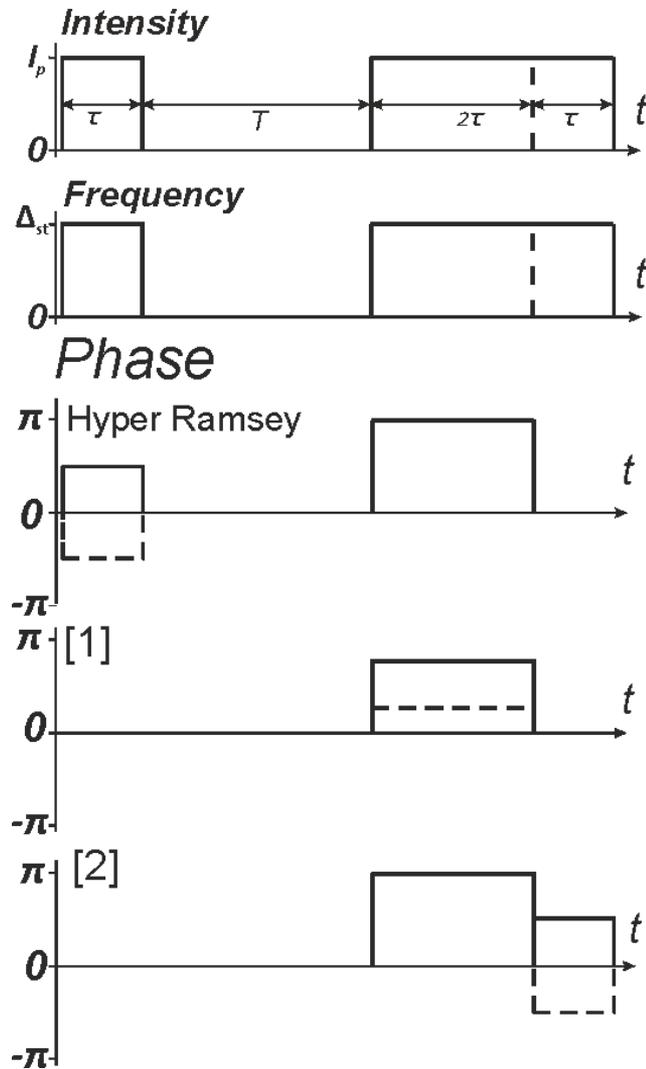
$+\pi/2$

$-\pi/2$

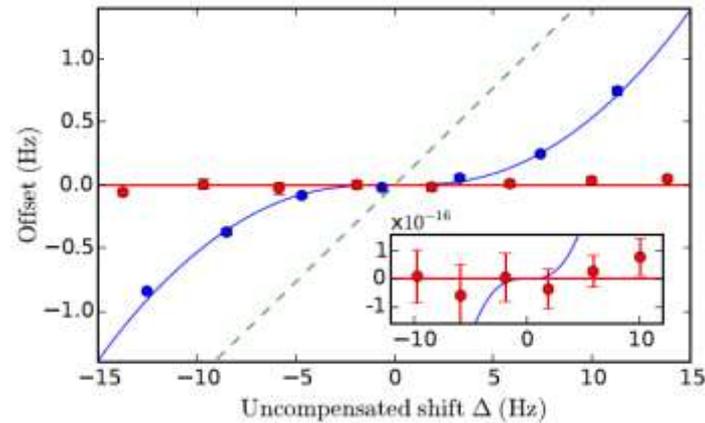


Гипер-Рамси

Модифицированные схемы ГР



Zanon-Willette, et al., arXiv:1511.04847 (2015) [1]



R. Hobson, et al., PRA 93, 010501(R) 2015 [2]

Описание нагрева

$$\bar{n}(t) = \bar{n}_0 + v_n * t$$

n_0 - начальное колебательное число, а v_n - скорость роста этого числа.

$$\Omega_n = \Omega_0 L_n(\eta^2) \approx \Omega_0 \left(1 - \eta^2 n + \frac{1}{4} \eta^4 n(n-1)\right)$$

где L_n -полиномы Лагера,

$$\eta = k \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}} \text{ - параметр Лэмба-Дике}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^2 + \Delta \cos \Omega t}{\Omega^2} & -\frac{\Delta \sin \Omega t}{\Omega} & -\frac{\Omega_0}{\Omega} (1 - \cos \Omega t) \\ \frac{\Delta \sin \Omega t}{\Omega} & \cos \Omega t & \frac{\Omega_0}{\Omega} \sin \Omega t \\ -\frac{\Omega_0}{\Omega} (1 - \cos \Omega t) & -\frac{\Omega_0}{\Omega} \sin \Omega t & \frac{\Delta^2 + \Omega_0^2 \cos \Omega t}{\Omega^2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix}$$

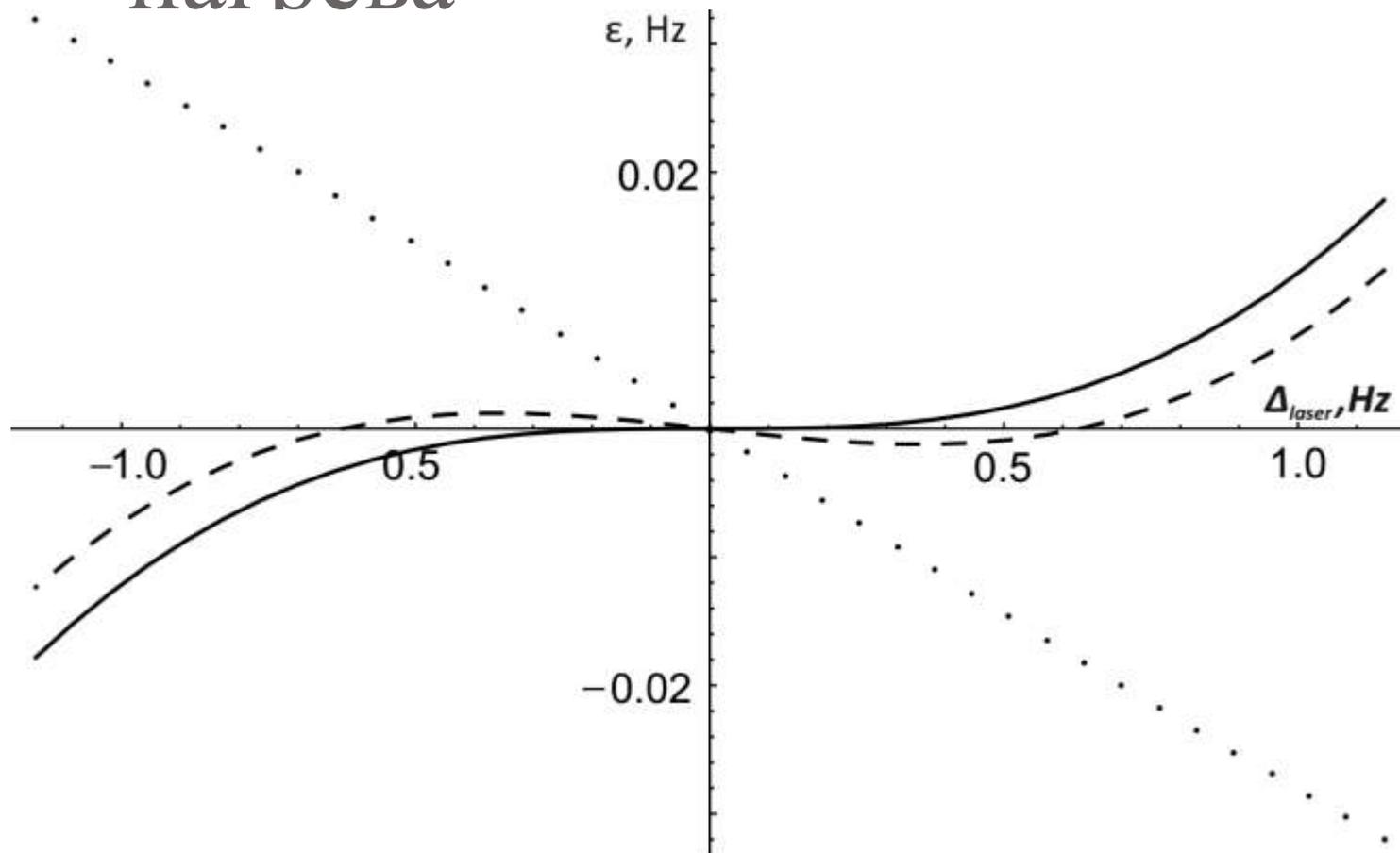
Частота Раби Ω_0 в случаи отсутствия излучения равна 0

$$P_n = \frac{1}{\bar{n} + 1} \left(\frac{\bar{n}}{\bar{n} + 1} \right)^n$$

p_n -вероятность найти систему в n -ом состоянии
 —
 \bar{n} - среднее колебательное число

Моделирование нагрева

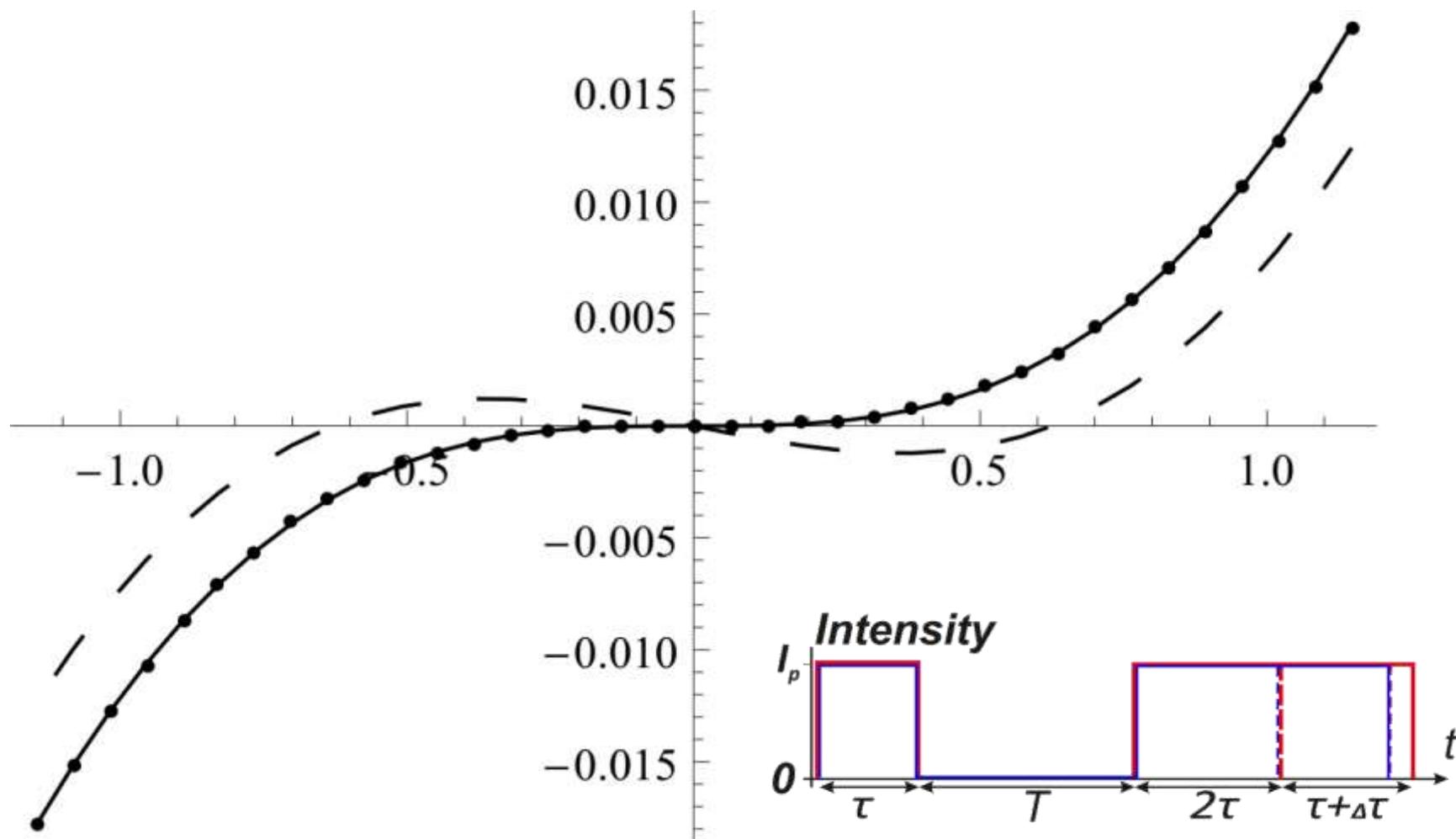
Параметры:
200 кол. состояний в секунду
 $T=4 \tau$, $\tau=37\text{ms}$



Оригинальная ГР без нагрева – сплошная линия
Оригинальная ГР с нагревом – пунктирная
Модернизированная ГР с нагревом – точки

Моделирование

Компенсация нагрева



Оригинальная ГР без нагрева – сплошная линия

Оригинальная ГР с нагревом – пунктирная

Оригинальная ГР с нагревом и увеличенным импульсом на 2,2%- точки

Заключение

- Нагрев иона может оказывать значительное влияние на эффективность схемы гипер-Рамси
- Оригинальная схема менее подвержена влиянию нагрева по сравнению с ее модификацией.
- Эффективность может быть восстановлена путем учета нагрева и увеличения длительности последнего импульса.

Спасибо за внимание