

Атомные часы

Часть 1

Взаимодействие атома с лазерным полем

Частота Раби

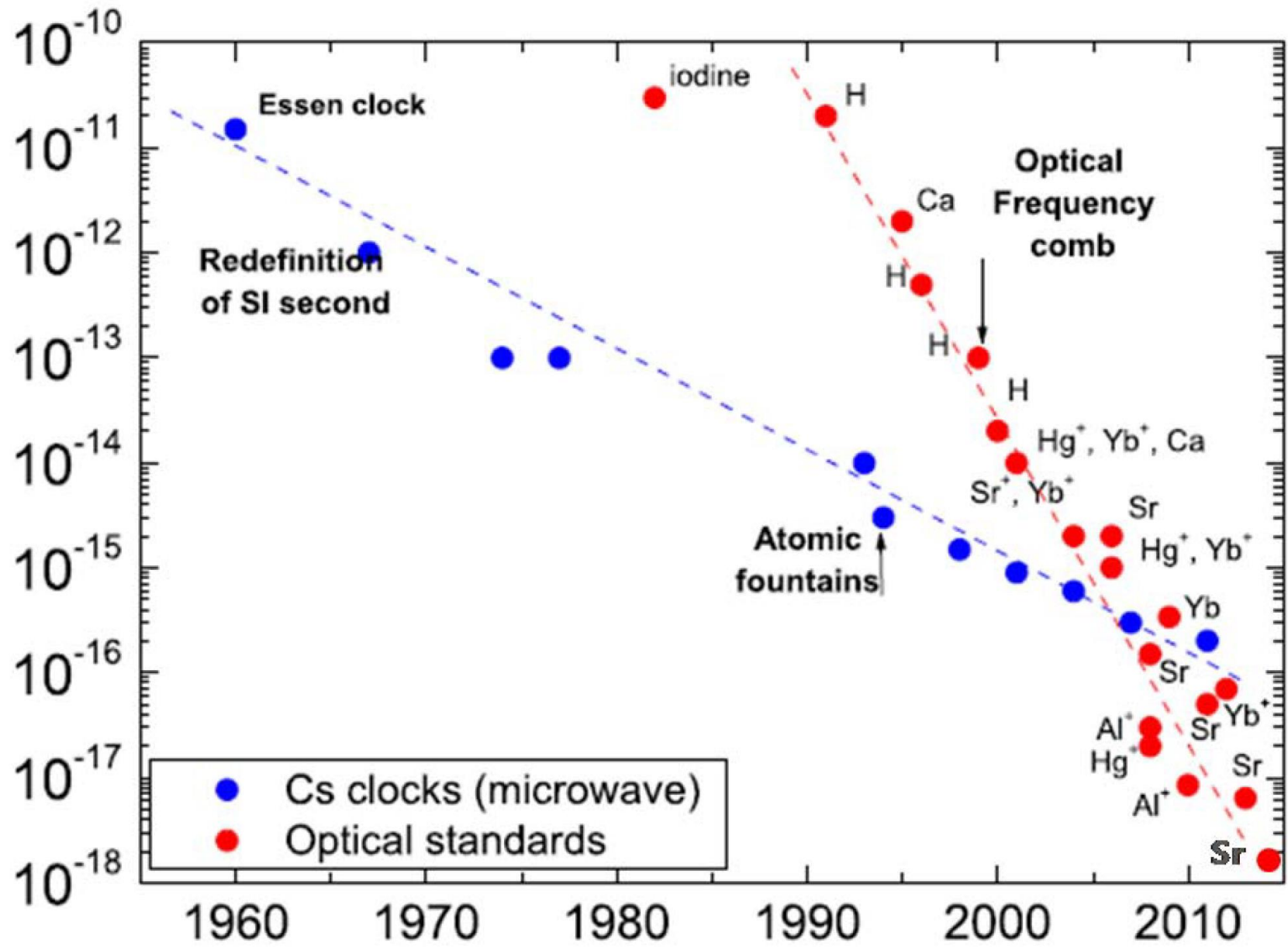
А.Е. Афанасьев

Введение

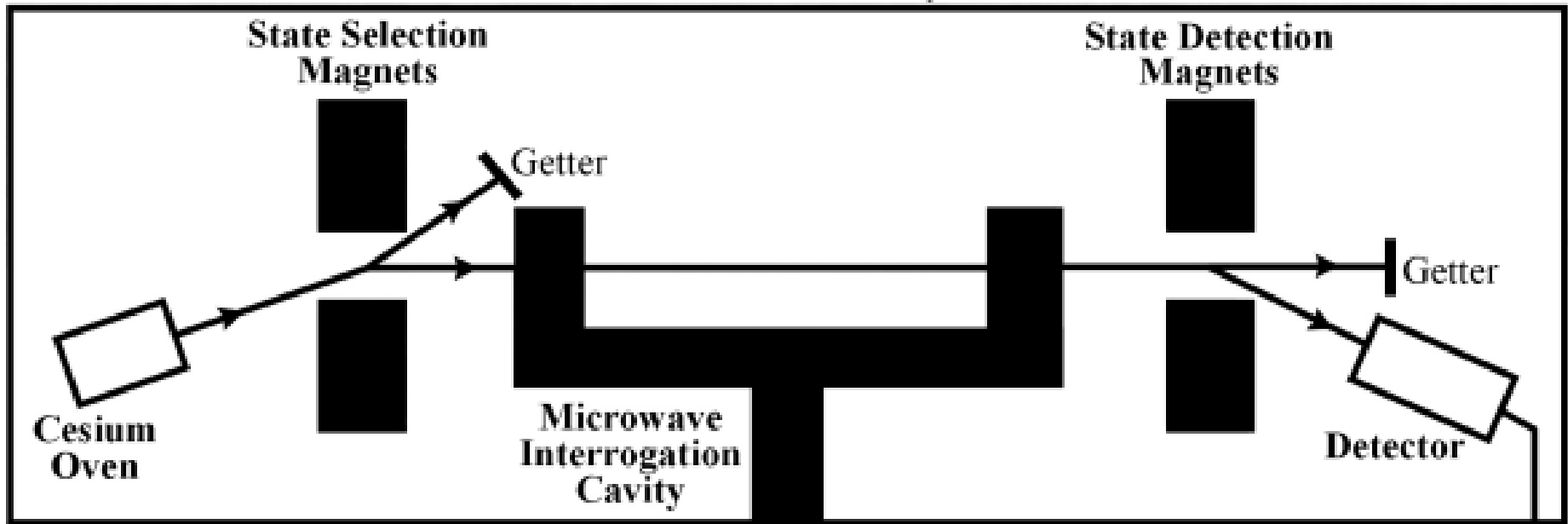
Уравнение для матрицы
плотности

Осцилляции Раби

Точность атомных часов



Vacuum Cavity



9 192 631 770 Hz

Frequency Synthesizer

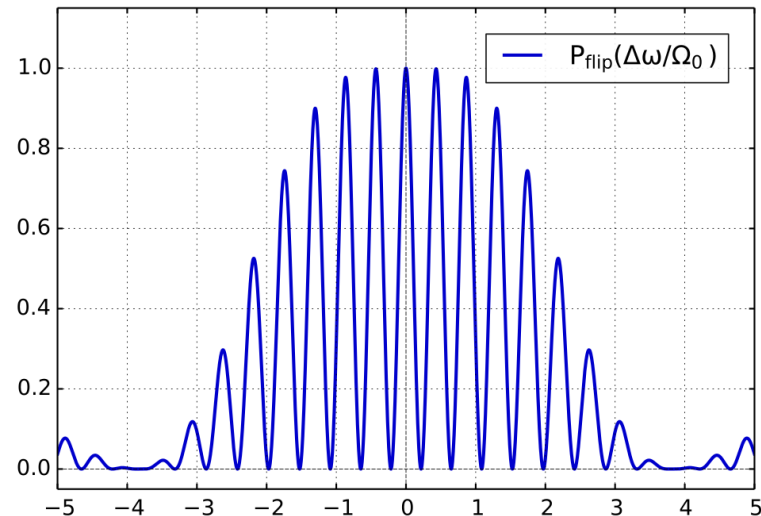
Quartz Oscillator

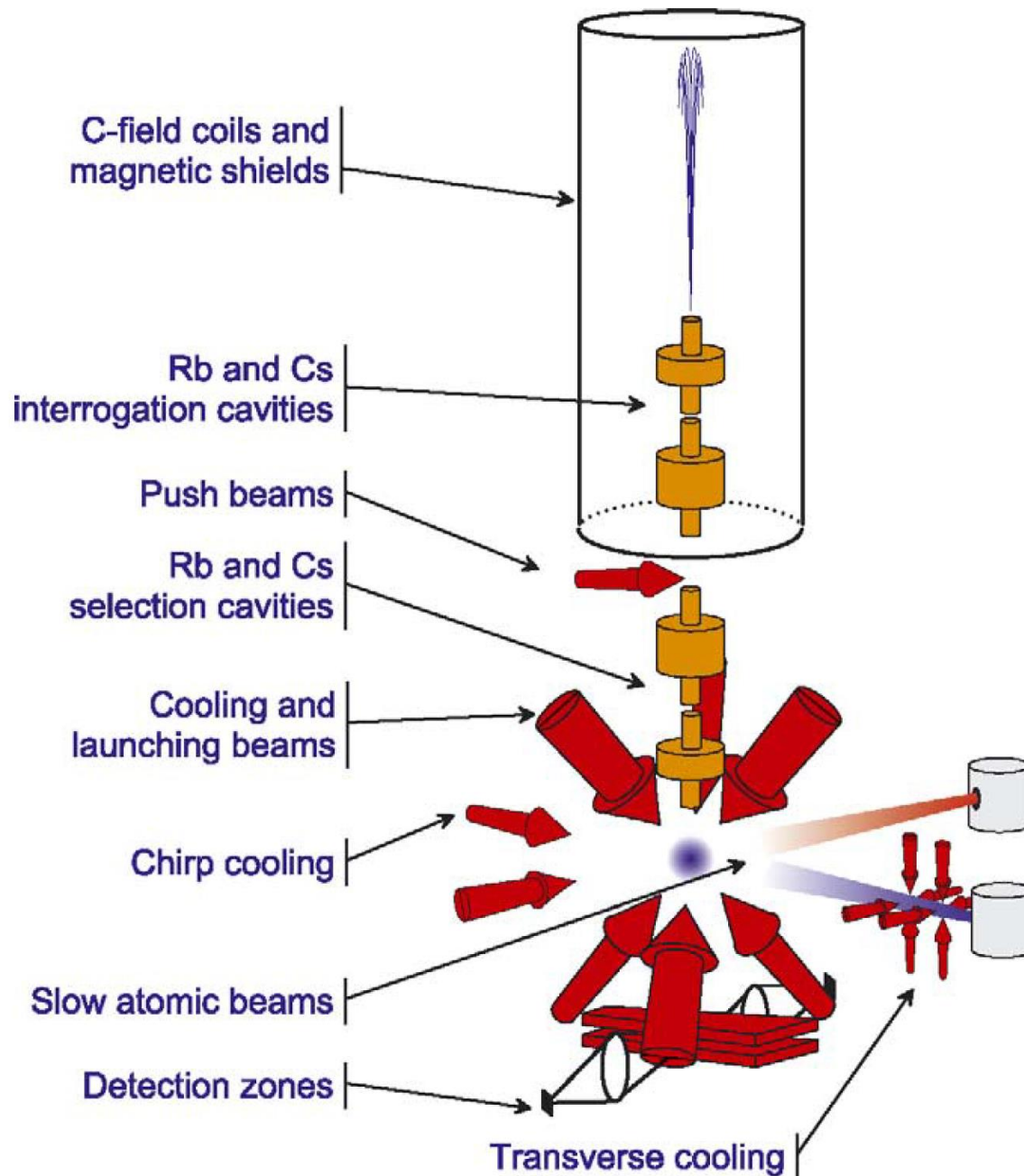
Servo Feedback

5 MHz

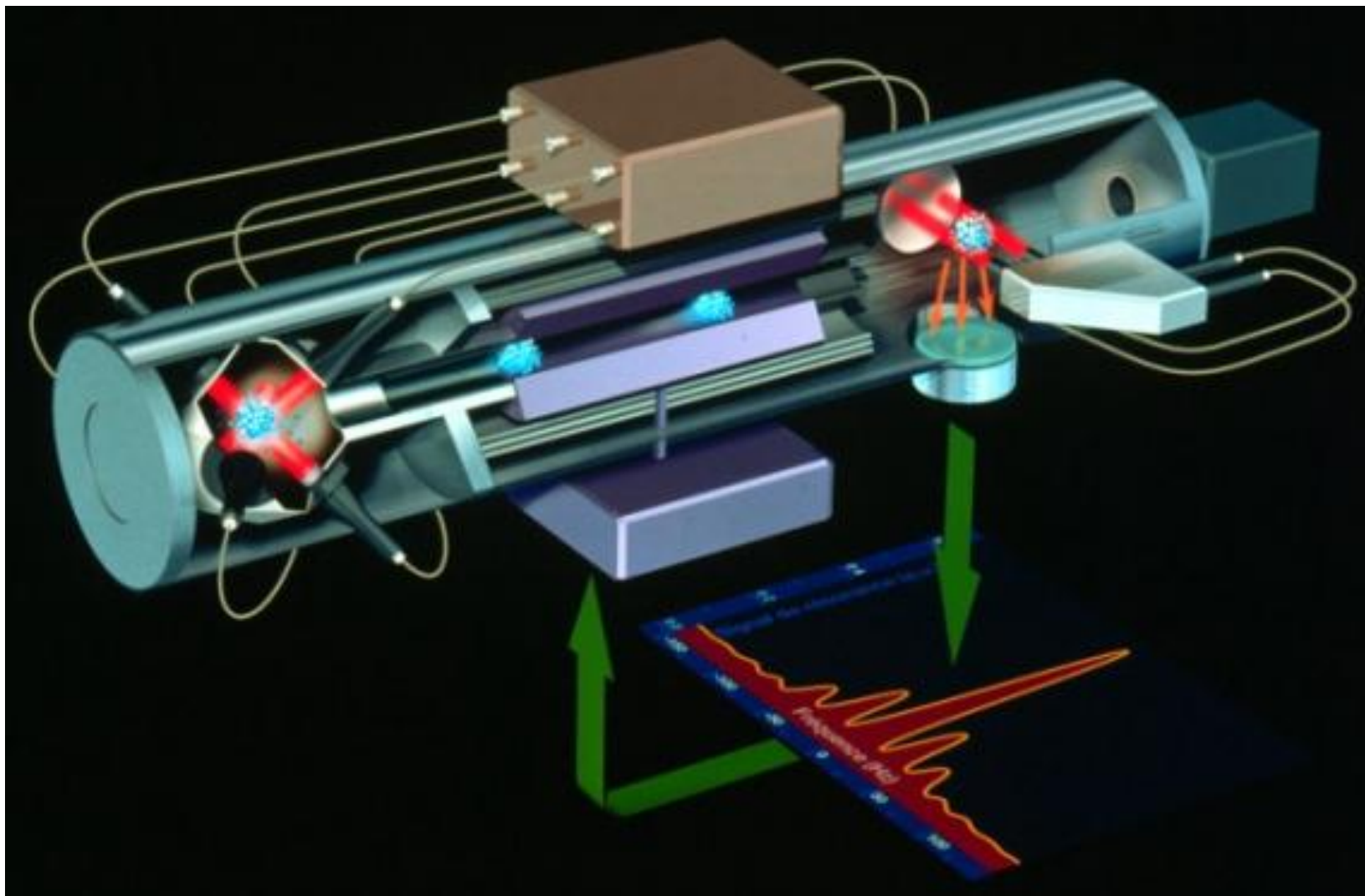
1 pps

$P_{\text{flip}}(\Delta\omega/\Omega_0)$

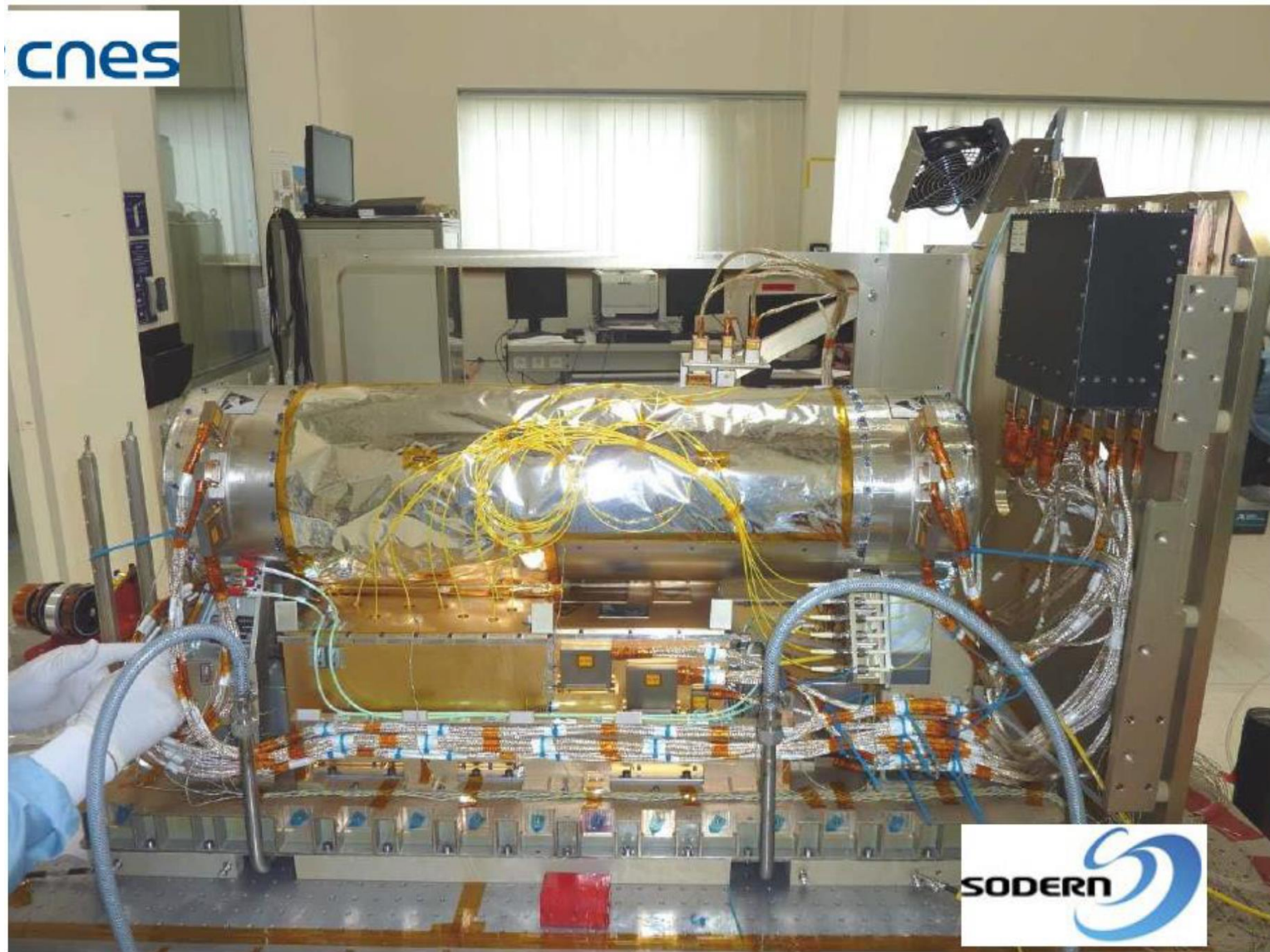




Атомные часы на орбите (PHARAO)



Атомные часы на орбите (PHARAO)



Атомные часы на орбите (CAC)

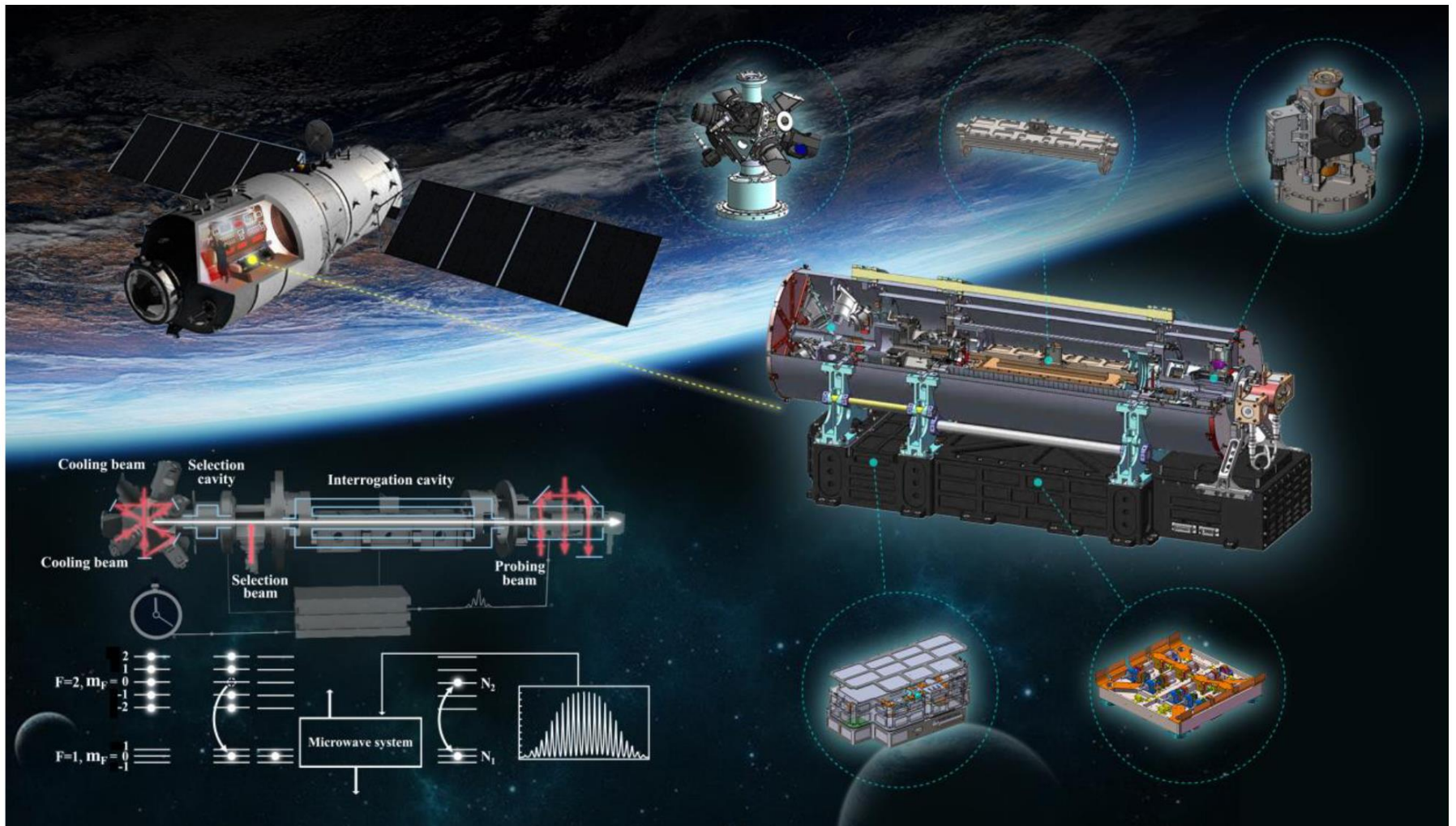


Fig. 1. Principle and structure of the space CAC located inside the spacecraft Tiangong-2. The laser cooling zone is a MOT with folded beam design. The microwave cavity is a ring cavity used for the microwave signal to interrogate cold atoms. In the detection zone, the cold atoms on both hyperfine states are detected. The optical unit includes all optics and lasers offering the requirements of cooling, state selection and detection of cold atoms. The microwave unit is a synthesizer which converts 5MHz to 6.8GHz. The functions of the control unit not only determine the CAC timing sequence, but also are used to communicate with the control center of the spacecraft.

Что почитать?

Quantum and Atom Optics

Daniel Adam Steck

Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon

The Autler-Townes effect revisited

Claude Cohen-Tannoudji



ELSEVIER

Physics Reports 365 (2002) 65–143

PHYSICS REPORTS

www.elsevier.com/locate/physrep

Density-matrix approach to dynamics of multilevel atoms in laser fields

S. Chang^a, V. Minogin^{b, *}

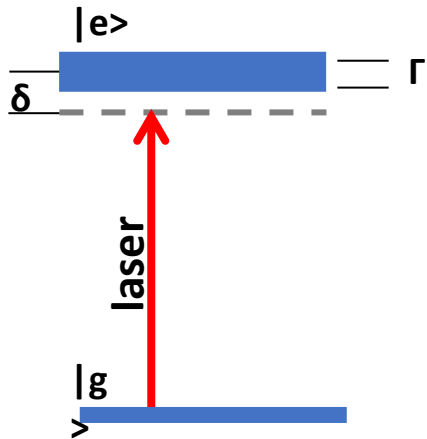
^a*Department of Physics, Han Nam University, 133 Ojungdong, Taejon 300-791, South Korea*

^b*Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, 142190 Troitsk, Moscow Region, Russia*

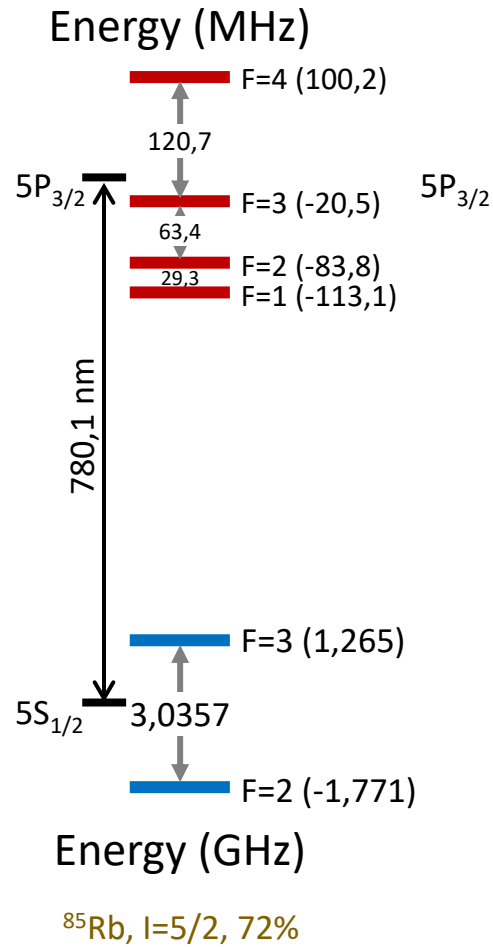
Received 1 August 2001

editor: J. Eichler

Двухуровневый атом



Атом рубидия-85



Переход F=3→F=4

$$\Gamma = 2\gamma = 2\pi \times 6 \text{ MHz}$$

$$\tau = 26 \text{ ns}$$

Уравнение матрицы плотности

$$\frac{d}{dt} \hat{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H, \hat{\rho}] + \Gamma D \hat{\rho}$$

H – гамильтониан системы

Атомный гамильтониан, который определяет энергии внутренних состояний атома

Кинетическая энергия атома

$$H = H_a + H_{ph} + \frac{p^2}{2m} + V$$

Энергия лазерного поля

Взаимодействие атома с полем

$$H = H_a + V$$

D - супероператор Линдблада, который описывает релаксацию населённости и фазы возбуждённого состояния

$$\frac{d}{dt} \rho_{ee} = -\Gamma \rho_{ee}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{gg} = \Gamma \rho_{ee}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{eg} = -\frac{\Gamma}{2} \rho_{eg}$$

Уравнение матрицы плотности

$$\frac{d}{dt} \hat{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H_a + V, \hat{\rho}] + \Gamma D \hat{\rho}$$

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{gg} & \rho_{ge} \\ \rho_{eg} & \rho_{ee} \end{bmatrix} \quad \rho_{ge} = \rho_{eg}^*$$

$$H_a = \begin{bmatrix} E_g & 0 \\ 0 & E_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} [H_a, \hat{\rho}] &= \begin{bmatrix} E_g & 0 \\ 0 & E_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{gg} & \rho_{ge} \\ \rho_{eg} & \rho_{ee} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_{gg} & \rho_{ge} \\ \rho_{eg} & \rho_{ee} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_g & 0 \\ 0 & E_e \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -(E_e - E_g)\rho_{ge} \\ (E_e - E_g)\rho_{eg} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\hbar\omega_0\rho_{ge} \\ \hbar\omega_0\rho_{eg} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Уравнение матрицы плотности

Взаимодействие атома с полем

$$V = -\hat{d}E$$

$$\hat{d} = \begin{bmatrix} 0 & d \\ d & 0 \end{bmatrix}$$

Электрическое поле

$$E(t) = \frac{E_0}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$$

$$\begin{aligned} [V, \hat{\rho}] &= -E(t) \left(\begin{bmatrix} 0 & d \\ d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{gg} & \rho_{ge} \\ \rho_{eg} & \rho_{ee} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_{gg} & \rho_{ge} \\ \rho_{eg} & \rho_{ee} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & d \\ d & 0 \end{bmatrix} \right) \\ &= -E(t) \begin{bmatrix} d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) & d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) \\ -d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) & -d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Уравнение матрицы плотности

$$\frac{d}{dt} \hat{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H_a + V, \hat{\rho}] + \Gamma D \hat{\rho}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \rho_{gg} & \frac{d}{dt} \rho_{ge} \\ \frac{d}{dt} \rho_{eg} & \frac{d}{dt} \rho_{ee} \end{bmatrix} = -\frac{i}{\hbar} \left(\begin{bmatrix} 0 & -\hbar\omega_0 \rho_{ge} \\ \hbar\omega_0 \rho_{eg} & 0 \end{bmatrix} - E(t) \begin{bmatrix} d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) & d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) \\ -d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) & -d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Gamma \rho_{ee} & -\frac{\Gamma}{2} \rho_{ge} \\ -\frac{\Gamma}{2} \rho_{eg} & -\Gamma \rho_{ee} \end{bmatrix}$$

Элементы матрицы плотности в этом представлении
определены через волновые функции не зависящие от
времени

$$\rho_{mn} = \tilde{\rho}_{mn} e^{-i\omega_{mn}}$$

$$\omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$$

$$\langle d \rangle = Sp(\hat{\rho} \hat{d}) = d(\rho_{eg} + \rho_{ge})$$

Уравнение матрицы плотности

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \rho_{gg} & \frac{d}{dt} \rho_{ge} \\ \frac{d}{dt} \rho_{eg} & \frac{d}{dt} \rho_{ee} \end{bmatrix} = -\frac{i}{\hbar} \left(\begin{bmatrix} 0 & -\hbar\omega_0\rho_{ge} \\ \hbar\omega_0\rho_{eg} & 0 \end{bmatrix} - E(t) \begin{bmatrix} d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) & d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) \\ -d(\rho_{ee} - \rho_{gg}) & -d(\rho_{eg} - \rho_{ge}) \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Gamma\rho_{ee} & -\frac{\Gamma}{2}\rho_{ge} \\ -\frac{\Gamma}{2}\rho_{eg} & -\Gamma\rho_{ee} \end{bmatrix}$$

Частота Раби

$$\Omega = \frac{dE_0}{\hbar}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{ee} = \frac{i\Omega}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) (\rho_{ge} - \rho_{eg}) - \Gamma\rho_{ee}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{ge} = i\omega_0\rho_{ge} + \frac{i\Omega}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) (\rho_{ee} - \rho_{gg}) - \frac{\Gamma}{2}\rho_{ge}$$

$$\rho_{gg} + \rho_{ee} = 1$$

Уравнение матрицы плотности

$$\rho_{ge} = \sigma_{ge} e^{i\omega t}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{ge} = i\omega \sigma_{ge} e^{i\omega t} + \sigma_{ge} e^{i\omega t} \frac{d}{dt} \sigma_{ge}$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{ee} = \frac{i\Omega}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) (\sigma_{ge} e^{i\omega t} - \sigma_{eg} e^{-i\omega t}) - \Gamma \rho_{ee}$$

$$i\omega \sigma_{ge} e^{i\omega t} + e^{i\omega t} \frac{d}{dt} \sigma_{ge} = i\omega_0 \sigma_{ge} e^{i\omega t} + \frac{i\Omega}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) (\rho_{ee} - \rho_{gg}) - \frac{\Gamma}{2} \sigma_{ge} e^{i\omega t}$$

$$\rho_{gg} + \rho_{ee} = 1$$

$$\frac{d}{dt} \rho_{ee} = \frac{i\Omega}{2} (\sigma_{ge} - \sigma_{eg}) - \Gamma \rho_{ee}$$

$$\frac{d}{dt} \sigma_{ge} = i(\omega_0 - \omega) \sigma_{ge} + \frac{i\Omega}{2} (\rho_{ee} - \rho_{gg}) - \frac{\Gamma}{2} \sigma_{ge}$$

$$\rho_{gg} + \rho_{ee} = 1$$

Приближение вращающейся волны (RWA)

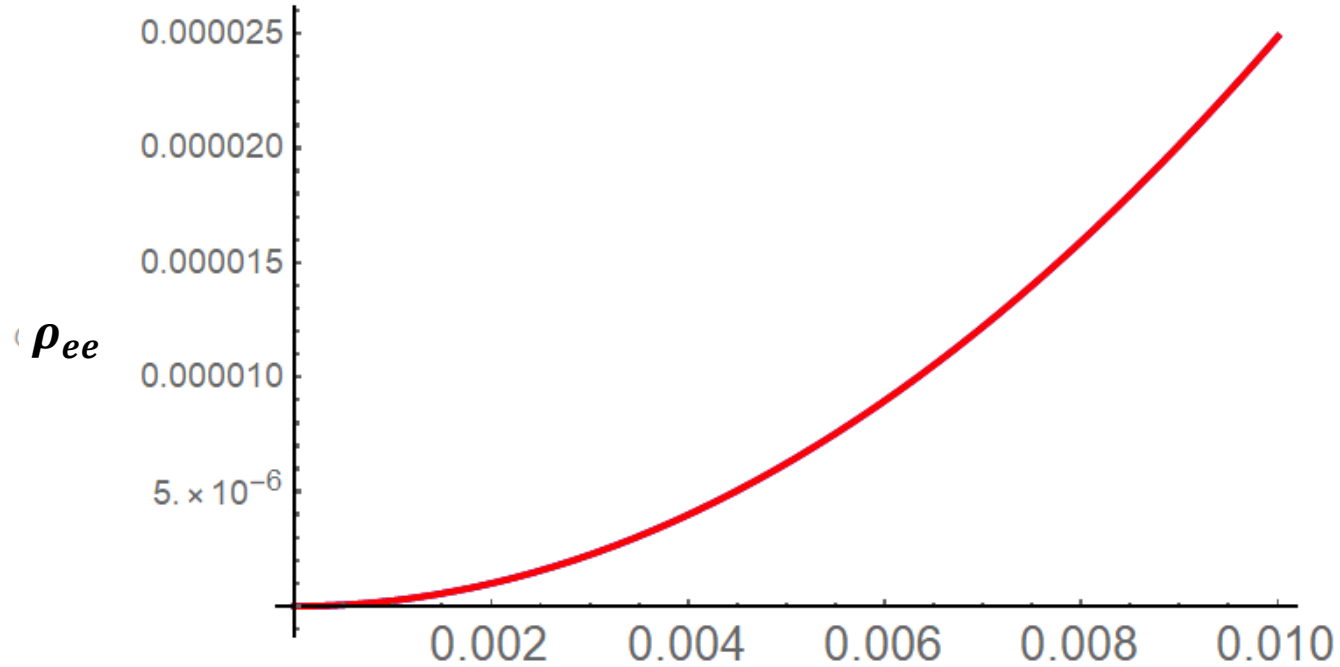
Пренебрегаем членами $e^{2i\omega t}$

$$|\delta| = |\omega - \omega_0| \ll \omega + \omega_0$$

Приближение вращающейся волны (RWA)

$$\rho_{ee}[0.01/\Gamma] = 0.0000248751 \quad \text{Full}$$

$$\rho_{ee}[0.01/\Gamma] = 0.0000248741 \quad \text{RWA}$$



Стационарное решение

$$\frac{d}{dt}\rho_{ee} = \frac{i\Omega}{2}(\sigma_{ge} - \sigma_{eg}) - \Gamma\rho_{ee} = 0$$

$$\frac{d}{dt}\sigma_{ge} = -i\delta\sigma_{ge} + \frac{i\Omega}{2}(\rho_{ee} - \rho_{gg}) - \frac{\Gamma}{2}\sigma_{ge} = 0$$

$$\rho_{gg} + \rho_{ee} = 1$$

$$\rho_{ee} = \frac{1}{2} \frac{G(r)}{1 + 4 \left(\frac{\delta - k\nu}{\Gamma} \right)^2 + G(r)}$$

$$G(r) = \frac{2\Omega^2(r)}{\gamma^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{dE_0(r)}{\hbar\gamma} \right)^2 = \frac{I(r)}{I_S}$$

Параметр насыщения

$$I(r) = (c/8\pi)E_0^2(r)$$

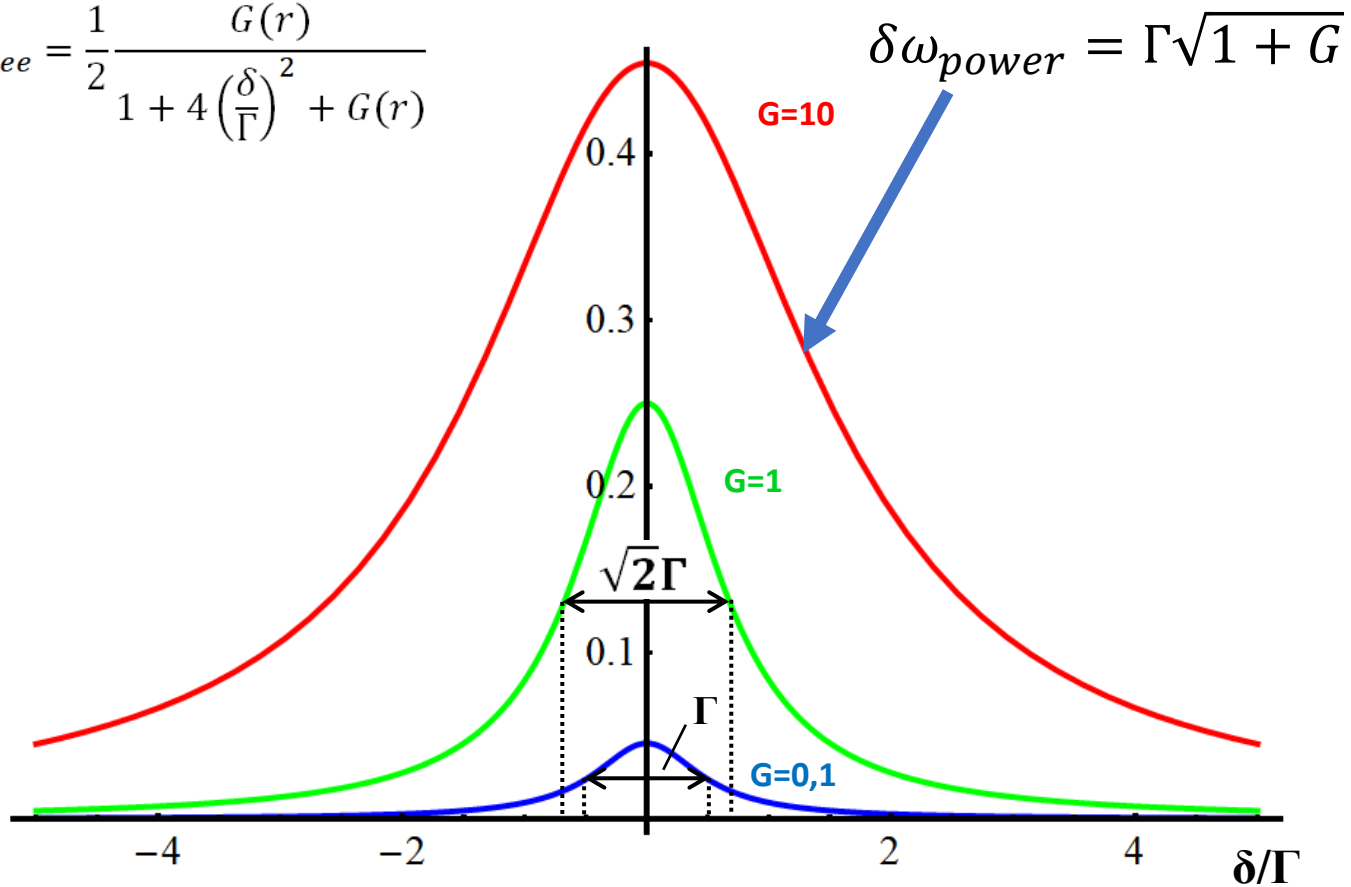
Интенсивность лазерного излучения

$$I_S = (c/4\pi)(\hbar\gamma/d)^2$$

Интенсивность насыщения

Стационарное решение

$$\rho_{ee} = \frac{1}{2} \frac{G(r)}{1 + 4 \left(\frac{\delta}{\Gamma}\right)^2 + G(r)}$$



Динамика возбуждения

$$\frac{d}{dt} \rho_{ee} = \frac{i\Omega}{2} (\sigma_{ge} - \sigma_{eg})$$

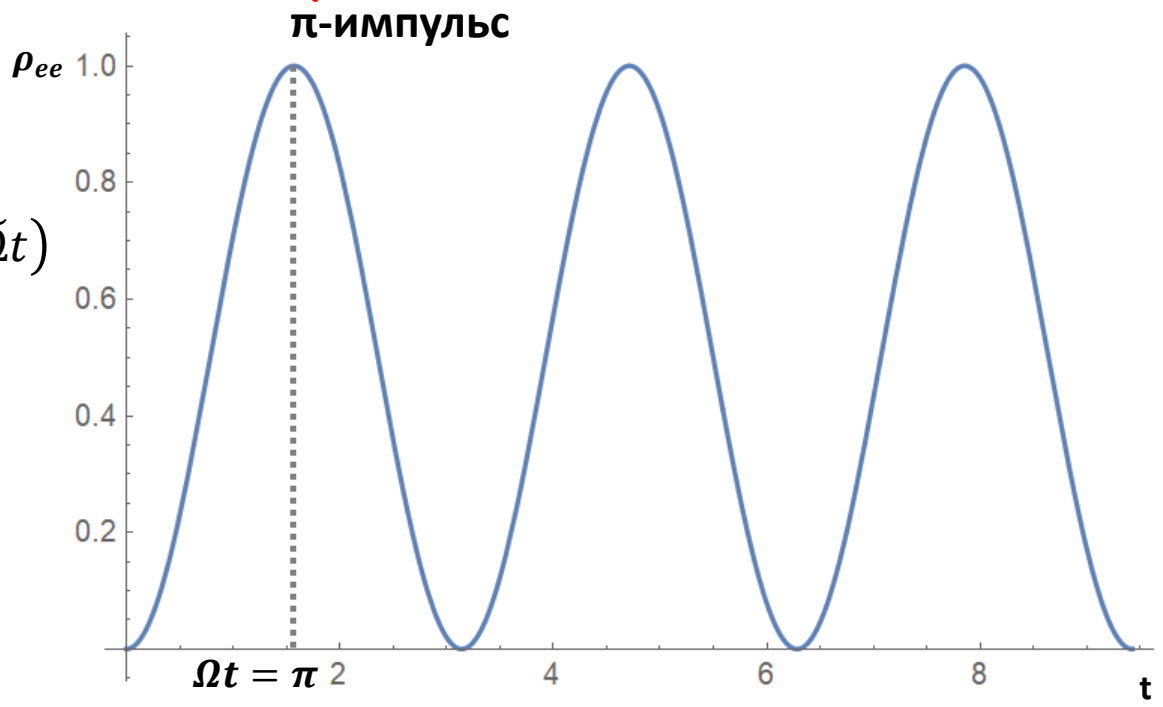
$$\frac{d}{dt} \sigma_{ge} = i(\omega_0 - \omega) \sigma_{ge} + \frac{i\Omega}{2} (\rho_{ee} - \rho_{gg})$$

$$\rho_{gg} + \rho_{ee} = 1$$

$$\rho_{ee} = \frac{\Omega^2}{\tilde{\Omega}^2} \sin^2 \frac{\tilde{\Omega}t}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Omega^2}{\tilde{\Omega}^2} (1 - \cos \tilde{\Omega}t)$$

$$\tilde{\Omega} = \sqrt{\delta^2 + \Omega^2}$$

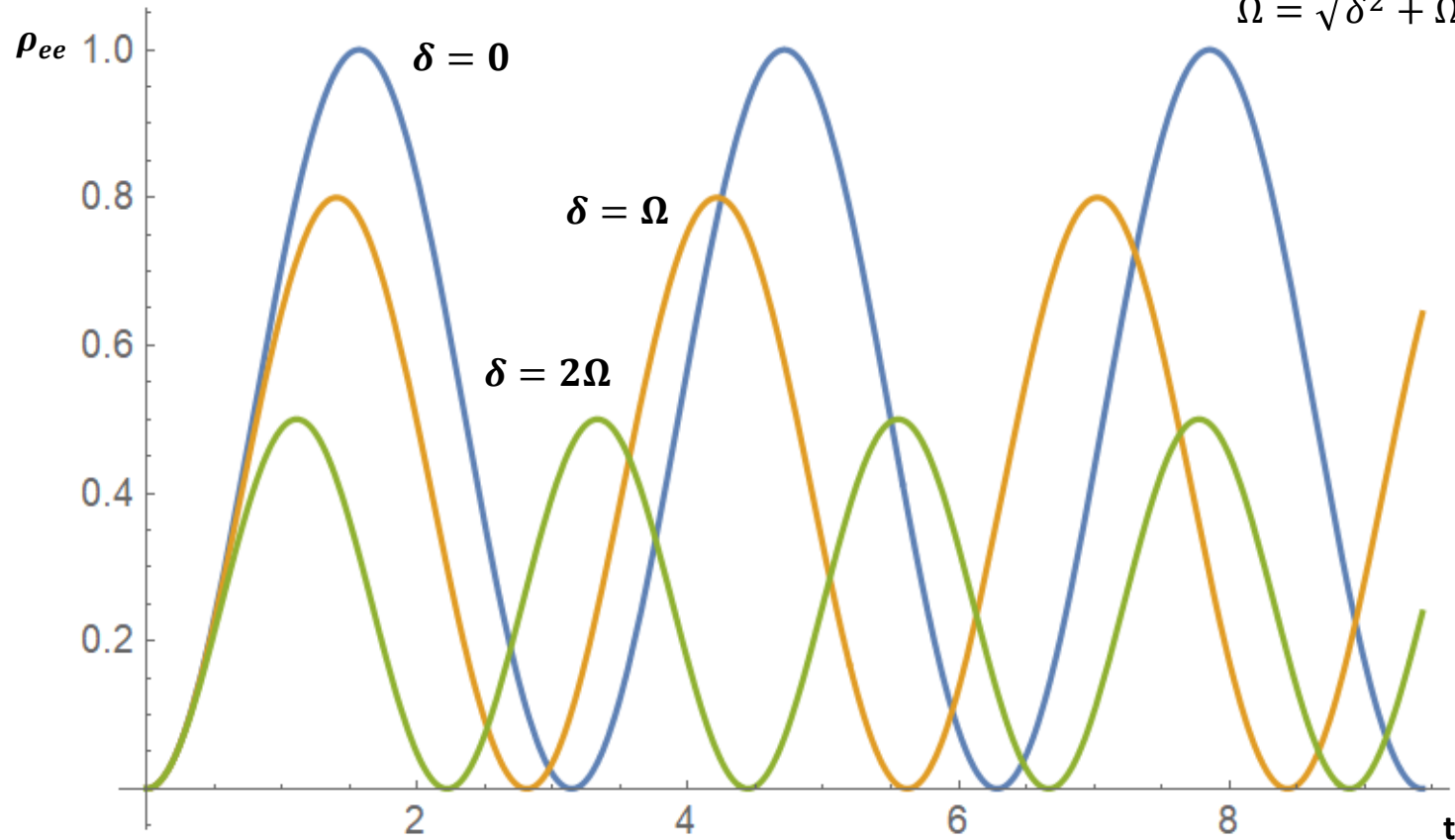
Релаксация не учитывается



Динамика возбуждения

$$\rho_{ee} = \frac{\Omega^2}{\tilde{\Omega}^2} \sin^2 \frac{\tilde{\Omega}t}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Omega^2}{\tilde{\Omega}^2} (1 - \cos \tilde{\Omega}t)$$

$$\tilde{\Omega} = \sqrt{\delta^2 + \Omega^2}$$



Возбуждение нерезонансным излучением

$$E_1(z) = \frac{E_0}{2} (e^{-i\omega t} + e^{i\omega t})$$

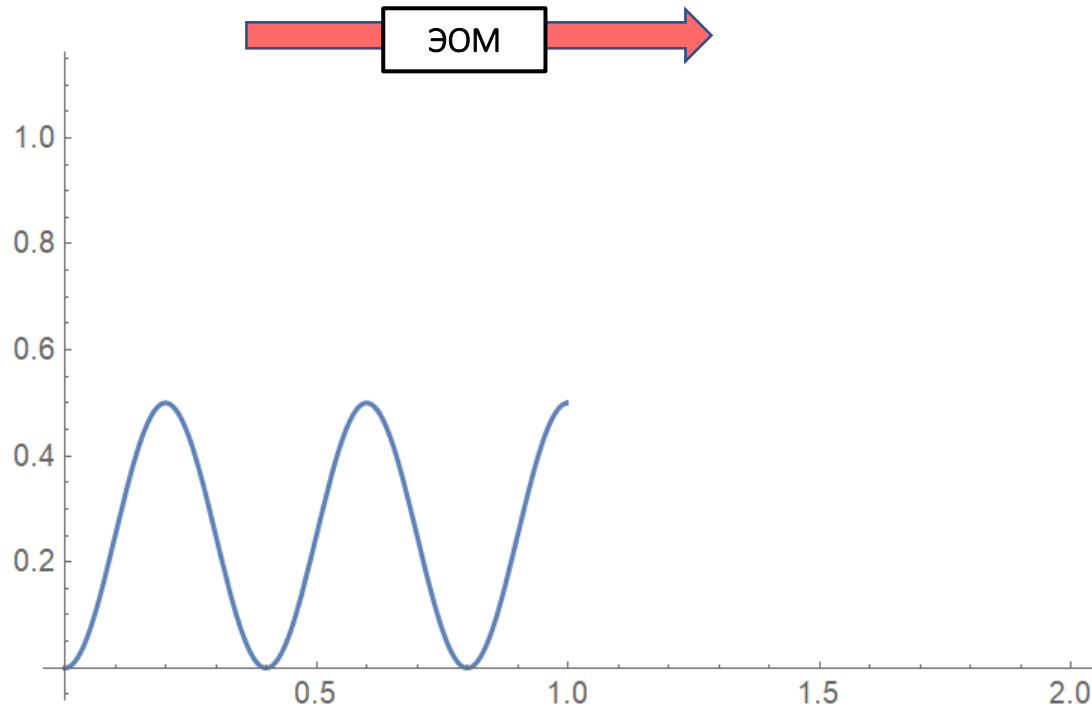
$$\delta = -2\Gamma$$

$$\Omega = \Gamma$$

$$E_2(z) = \frac{E_0}{2} (e^{-i(\omega t + \varphi)} + e^{i(\omega t + \varphi)})$$

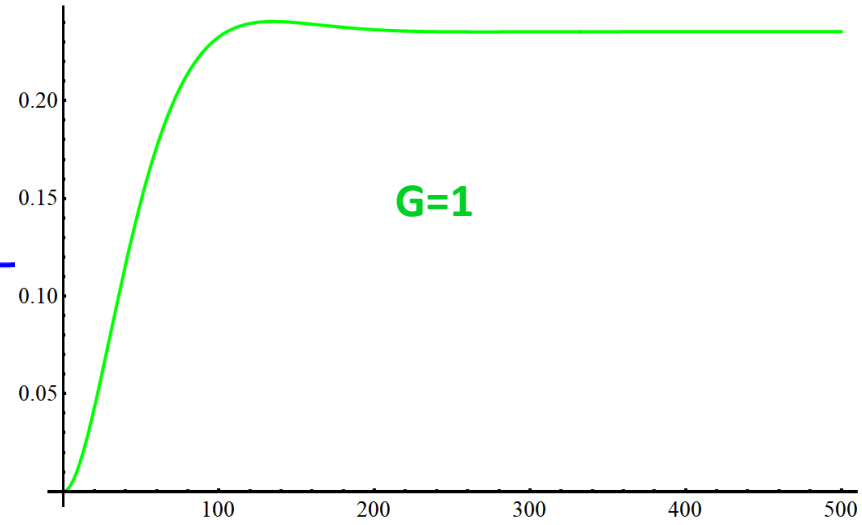
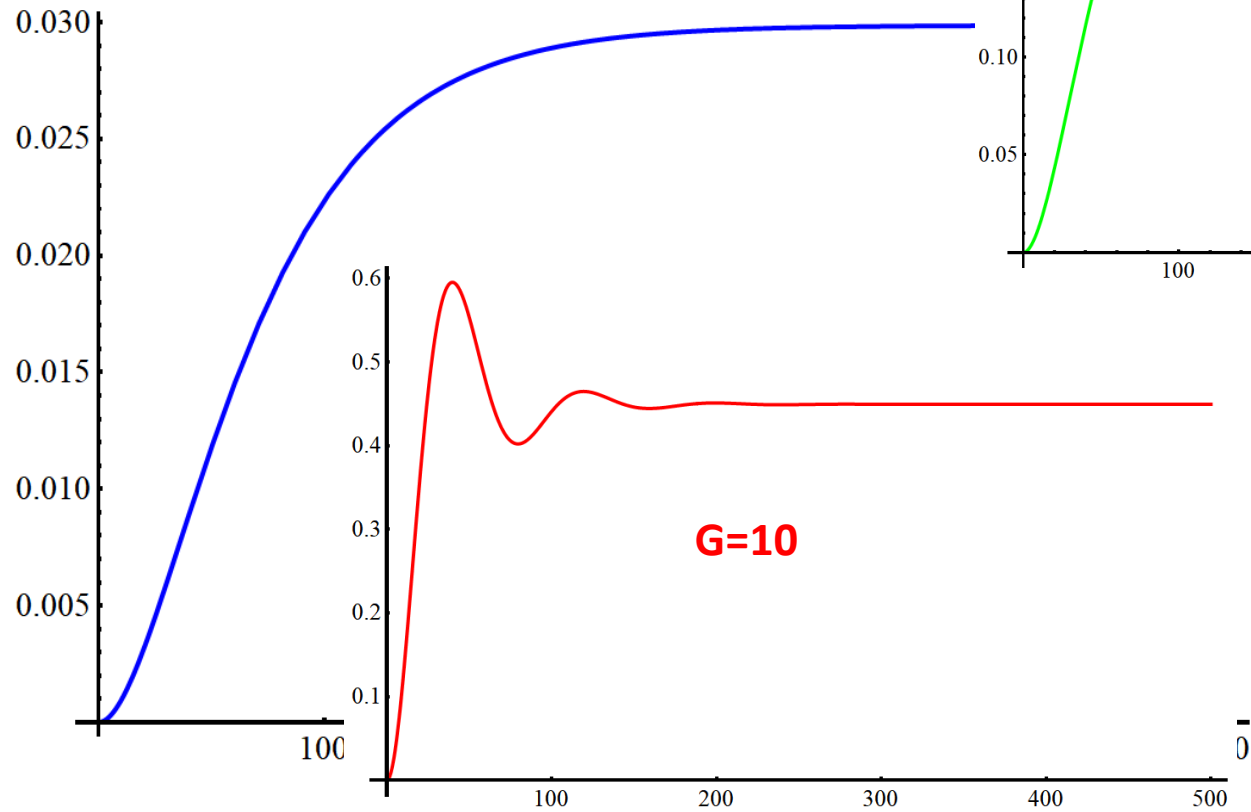
$$\varphi = \pi \quad \delta = -2\Gamma$$

$$\Omega = \Gamma$$



Динамика возбуждения с учётом релаксации

$\Gamma = 2\pi \cdot 6 \text{ MHz}$

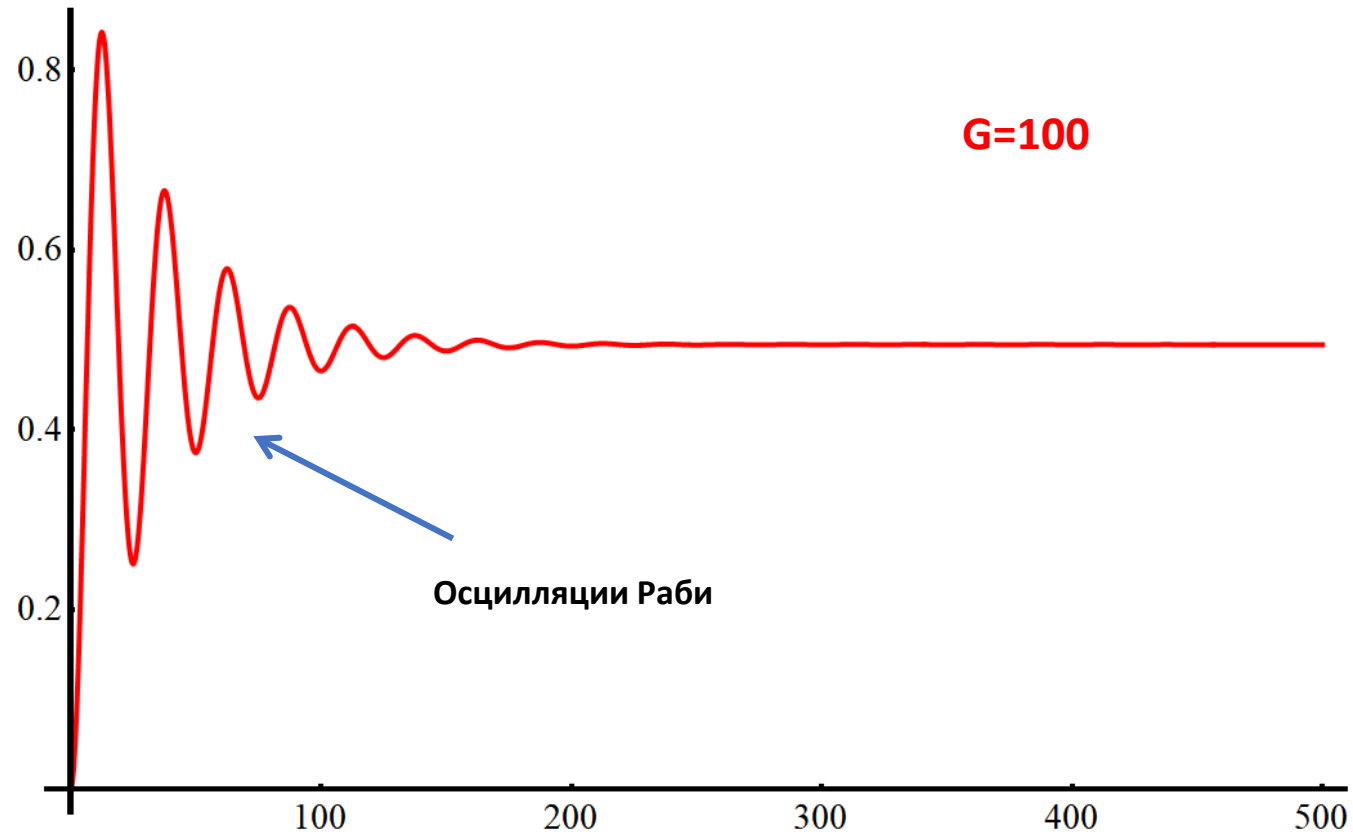


$G=1$

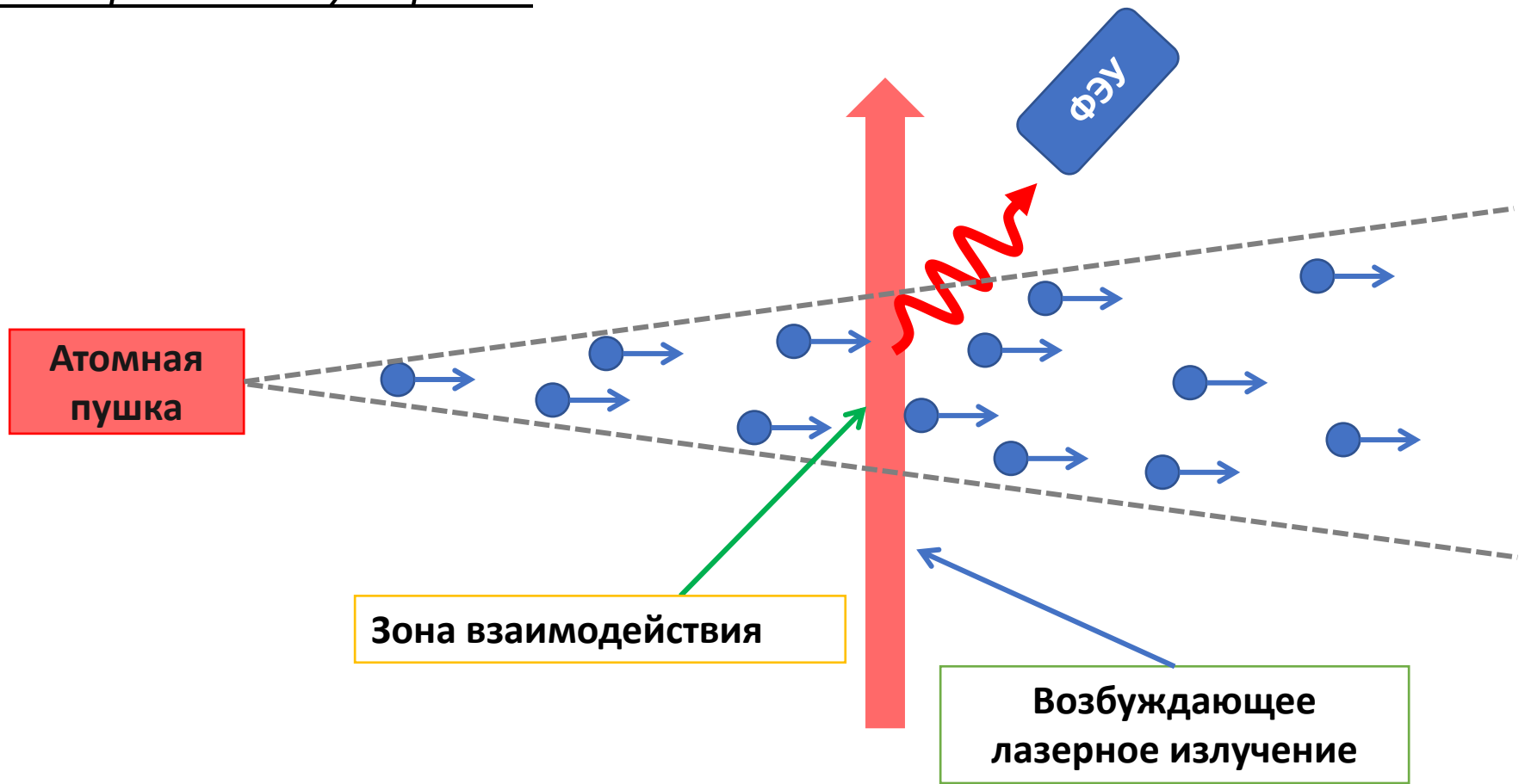
$G=10$

0

Динамика возбуждения с учётом релаксации



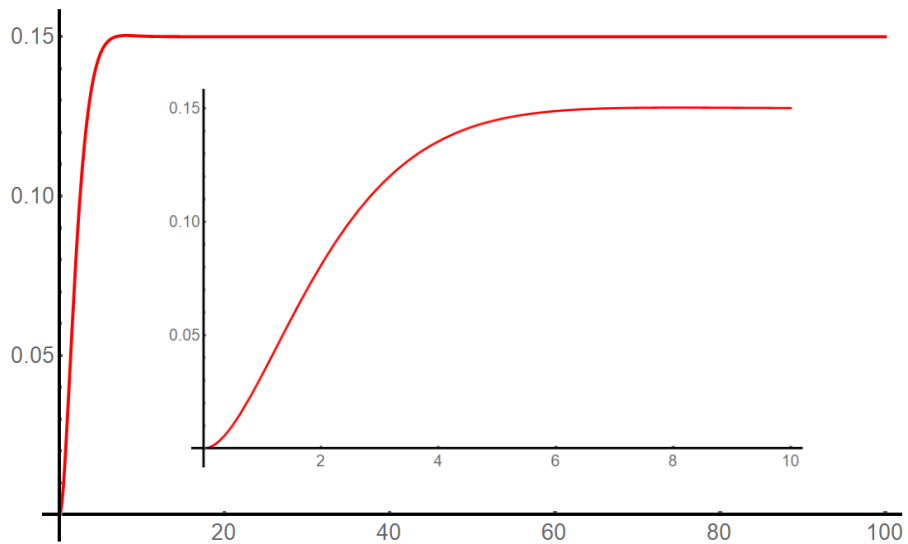
Времяпролетное уширение



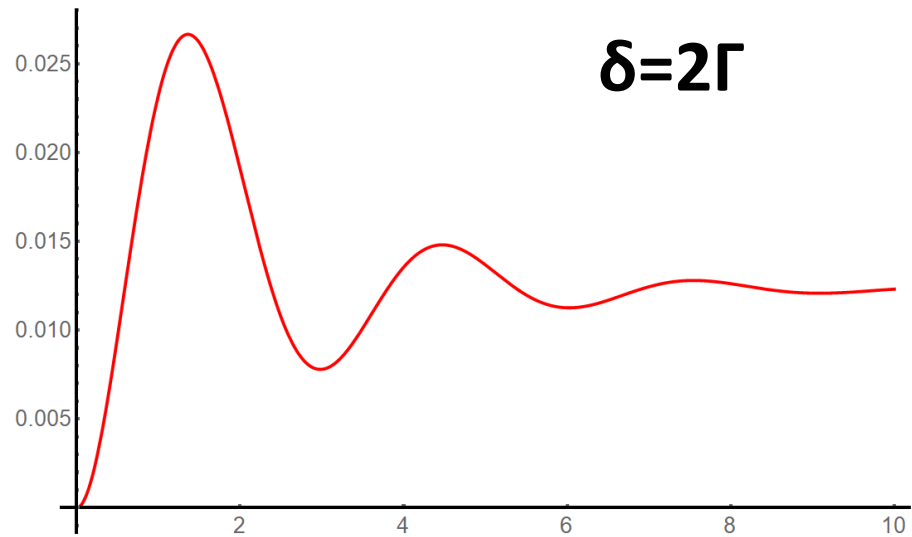
$$\delta\omega = 2\sqrt{2 \ln 2} \frac{v}{d} \approx 2,4 \frac{v}{d}$$

Импульсное возбуждение

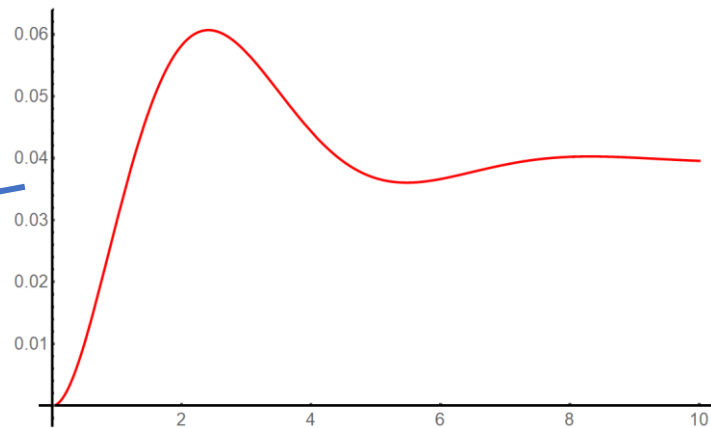
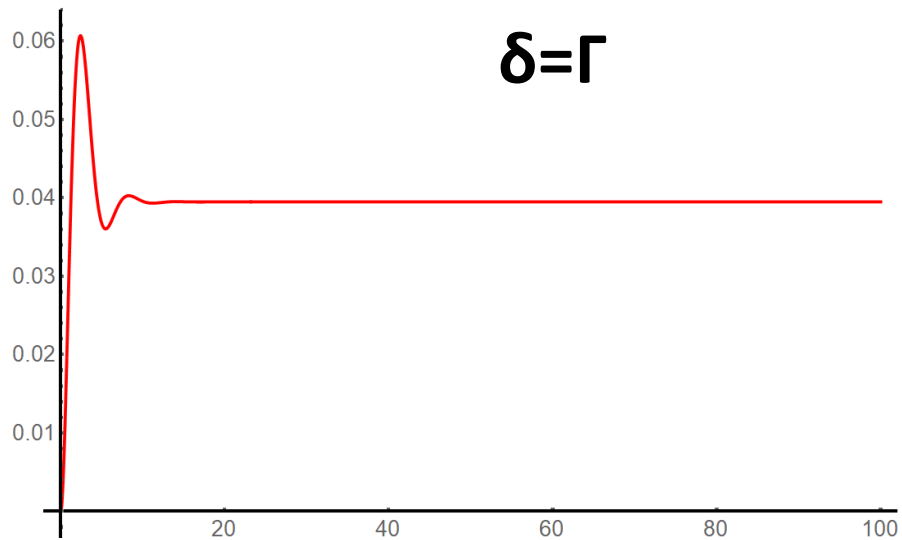
$\delta=0$



$\delta=2\Gamma$



$\delta=\Gamma$



Осцилляции Раби в ИСАН

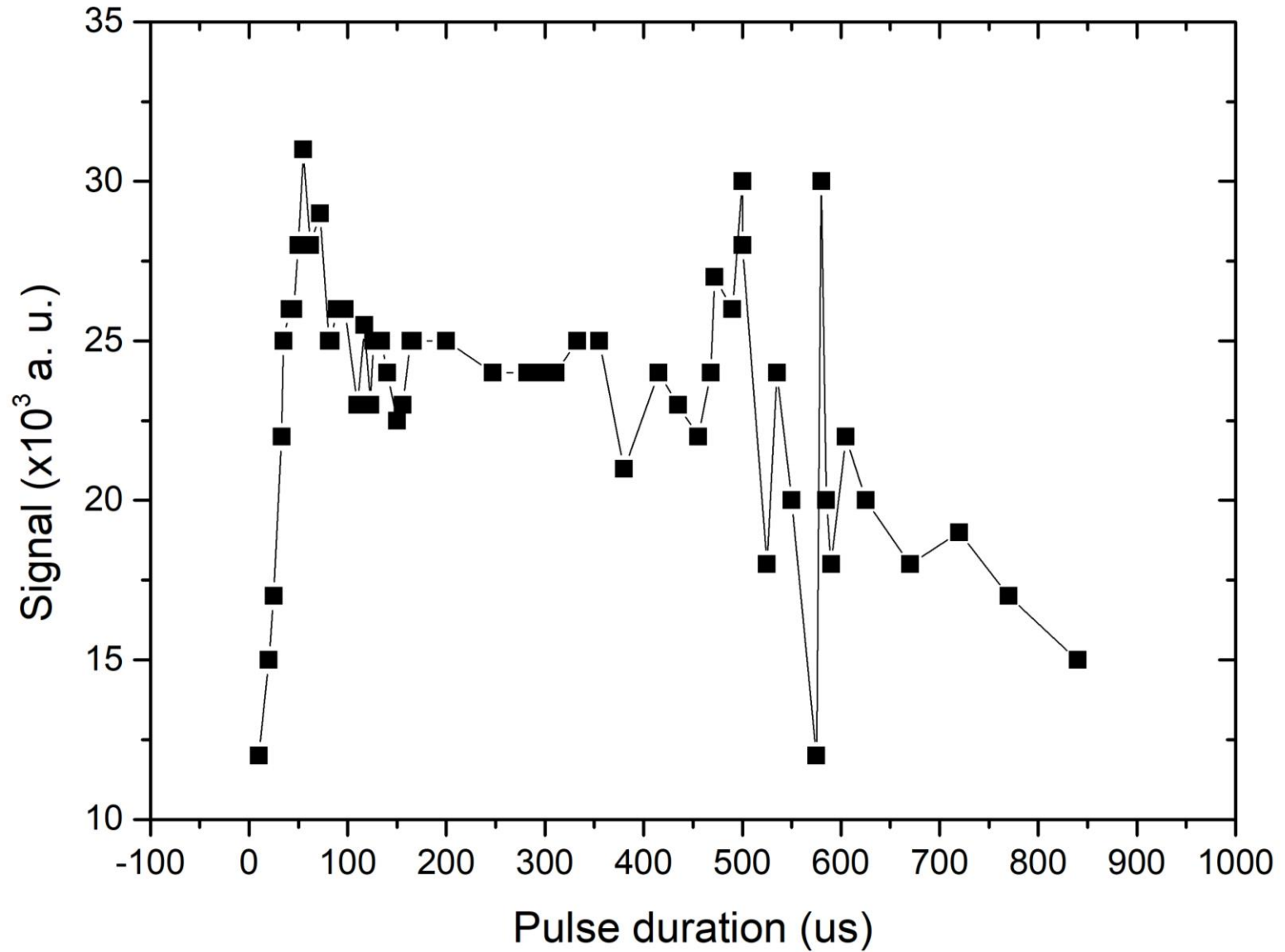
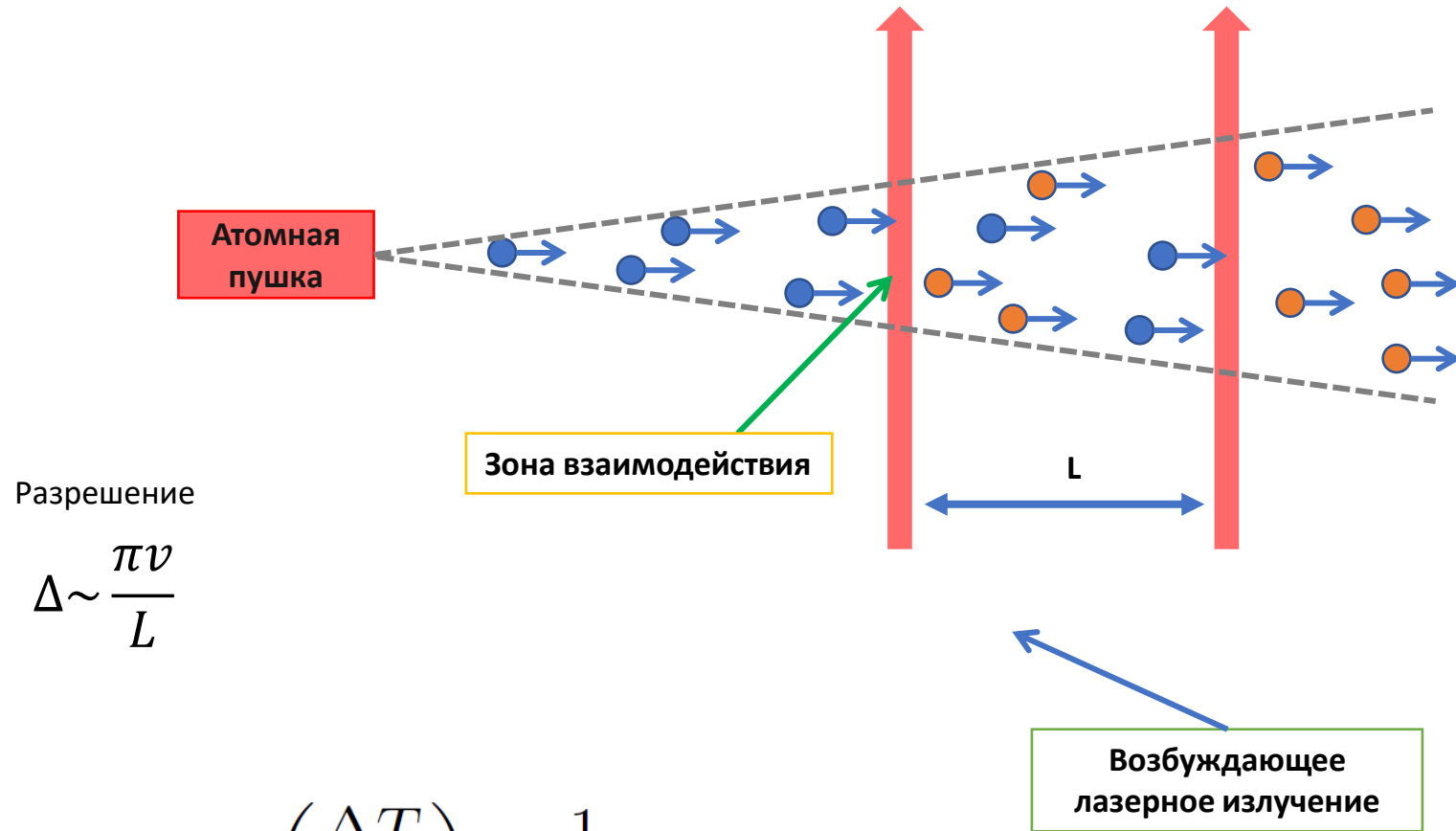


Схема Рамзея



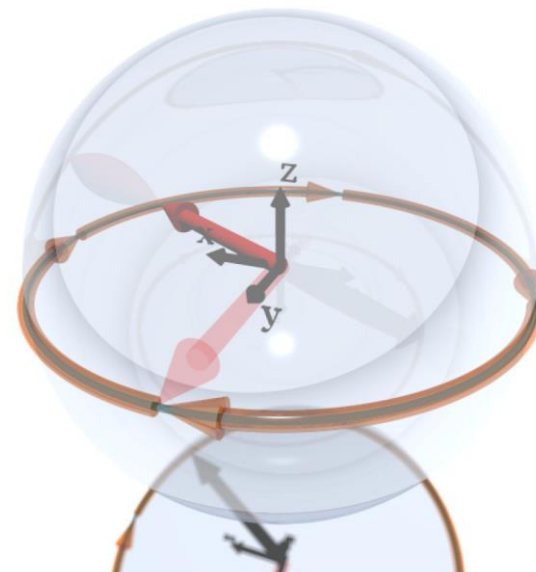
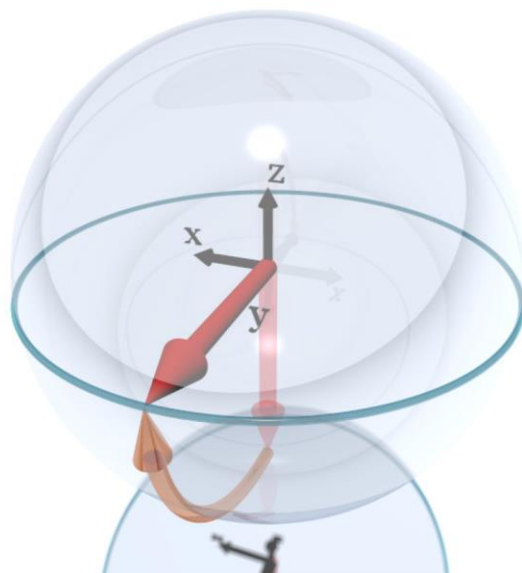
$$\Delta \sim \frac{\pi \nu}{L}$$

$$P_e = \cos^2 \left(\frac{\Delta T}{2} \right) = \frac{1}{2} (1 + \cos \Delta T)$$

Сфера Блоха

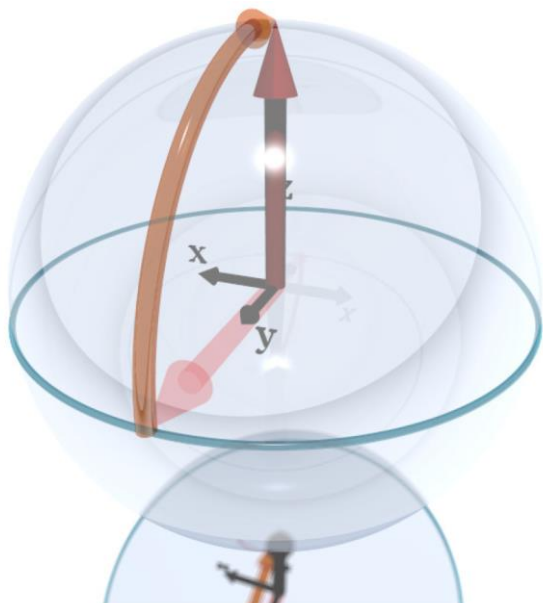
$\pi/2$ -импульс

Эволюция

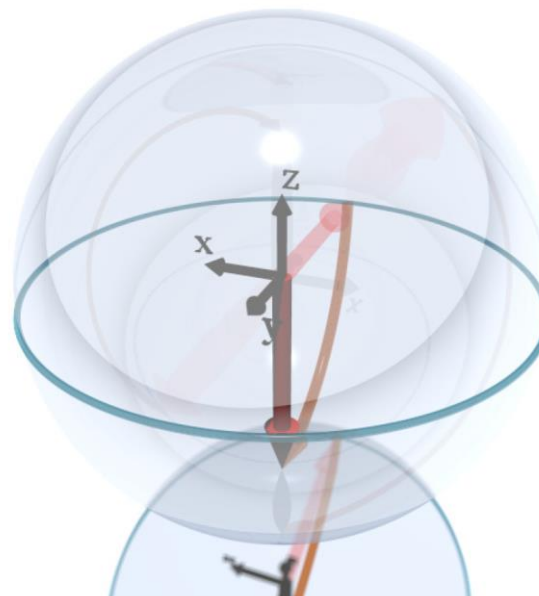


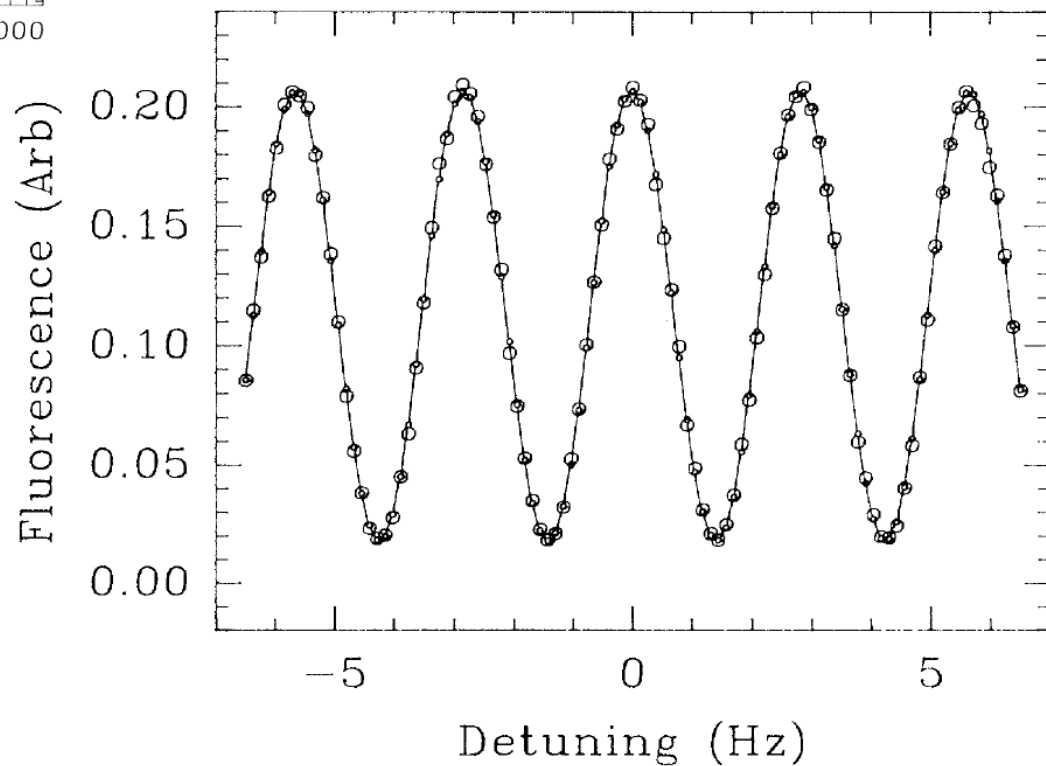
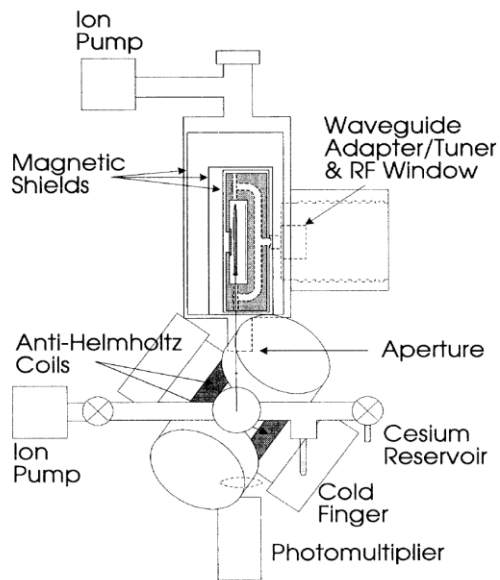
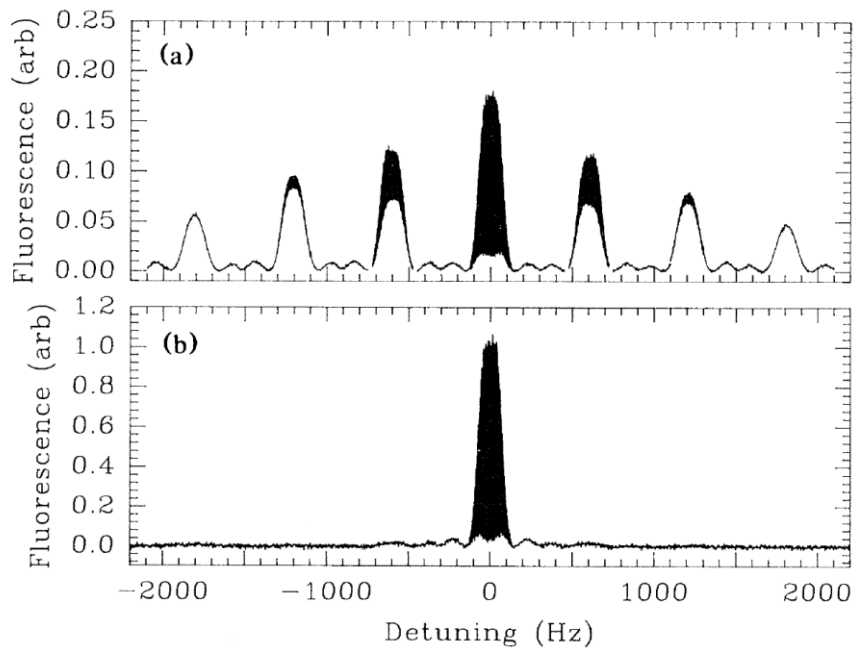
$$P_e = \cos^2\left(\frac{\Delta T}{2}\right) = \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta T)$$

Если $\Delta T = 2m\pi$



Если $\Delta T = (2m+1)\pi$





Как должно быть

