

ВОЛНЫ СВЕТА И ВЕЩЕСТВА

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ
Осенний семестр 2013 г.

- 1. «Разминка».**
- 2. Плоская волна и понятие волнового пакета – волны вещества.**
- 3. Системы со сферической симметрией.**
- 4. Начала теории рассеяния.**
- 5. Резонансной рассеяния и вопрос о двойных полюсах матрицы рассеяния.**
- 6. Двухуровневая система, связь лазерным полем.**
- 7. Изучение антипротония.**
- 8. Нобелевская премия по физике 2012 года. Изучение одиночной квантовой системы.**

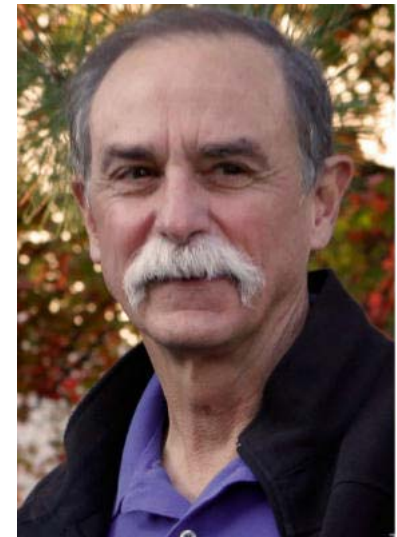


Нобелевская премия по физике 2012 года

Serge Haroche и David J. Wineland



Collège de France,
École Normale Supérieure



NIST
University of Colorado

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"*



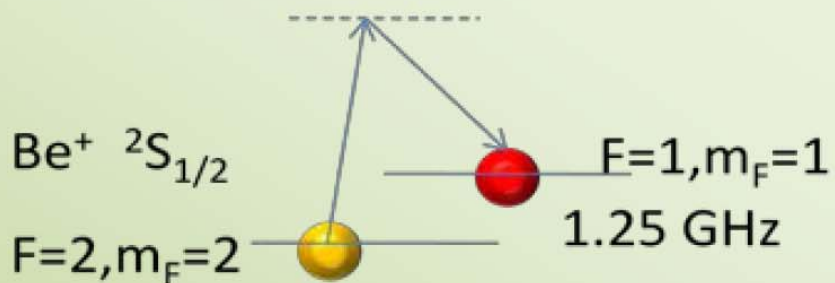
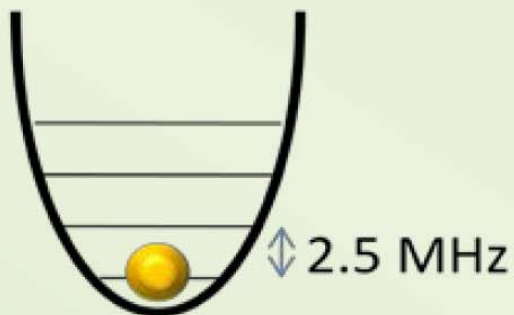
Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы

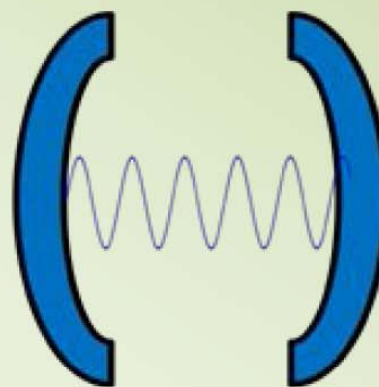
Ионы в ловушке
Сканируется фотонами

Фотоны в ячейке
Сканируется Ридберговскими атомами

Ion in a trap



Photon in a cavity



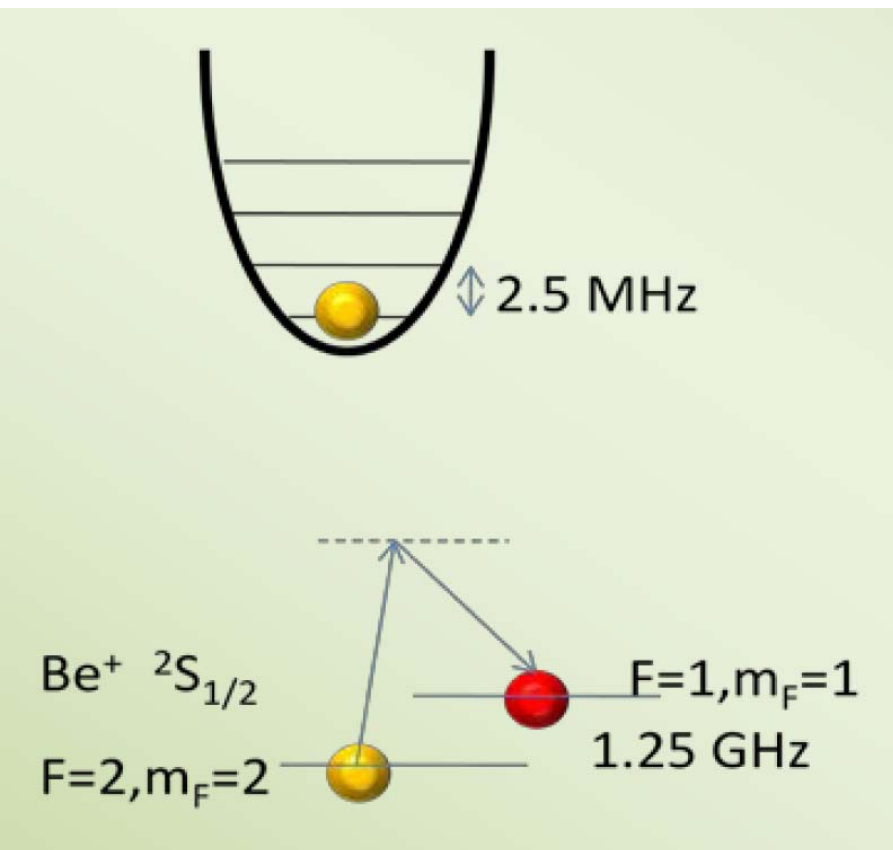
$$Q = 4 \times 10^{10}$$
$$T_c = 130 \text{ ms}$$





Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы: ион в ловушке

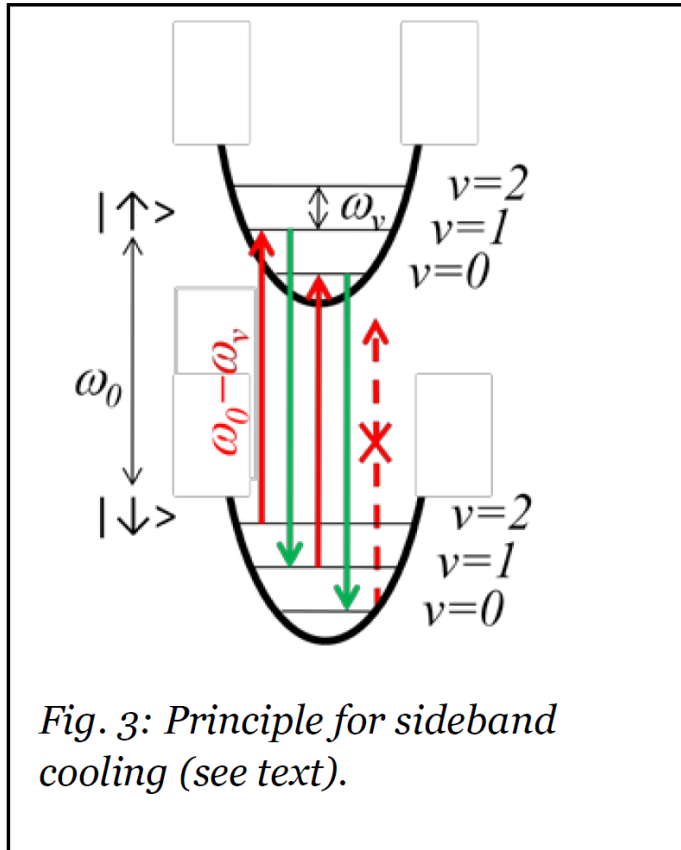


- **Trapped ion:** Paul & Dehmelt получили Нобелевскую премию по физике в 1989 “for the development of the ion trap technique”.
- **Trapped atom:** Cohen-Tannoudji Нобелевская премия по физике в 1997 «for the development of methods to cool and trap atoms with laser light».
- **Лазерное (Допплеровское охлаждение) 1975:** Hänsch and Schawlow (нейтральные атомы) и Wineland and Dehmelt (ионы). Экспериментальная реализация на Mg^+ и Ba^+ в 1978.
- Детектирование осуществляется через поглощение или испускание фотонов, двухфотонные переходы, прямое наблюдение CCD (charge-coupled device) камерой или квантовые скачки.



Нобелевская премия по физике 2012 года

Sideband cooling – охлаждение на боковых частотах



Используя лазерное излучение можно:

- Привести всю систему в состояние с минимальным v .
- Создать хорошо определенное Фоковское состояние.
- Создать когерентную контролируемую суперпозицию Фоковских состояний.
- Если два иона разделяют одну вибрационную моду, то квантовое состояние одного из них может быть скопировано на другой ион.
- Создание CNOT.

$$\psi = |\downarrow\rangle|0\rangle;$$

$$\psi_c = \alpha|\downarrow\rangle|0\rangle + \beta|\uparrow\rangle|0\rangle; \quad \text{Контролирующий импульс}$$

$$\psi_c = \alpha|\downarrow\rangle|0\rangle + \beta|\downarrow\rangle|1\rangle = |\downarrow\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$$



Нобелевская премия по физике 2012 года

Наблюдение квантовых скачков

VOLUME 57, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

6 OCTOBER 1986

Observation of Quantum Jumps in a Single Atom

J. C. Bergquist, Randall G. Hulet, Wayne M. Itano, and D. J. Wineland

Time and Frequency Division, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado 80303

(Received 23 June 1986)

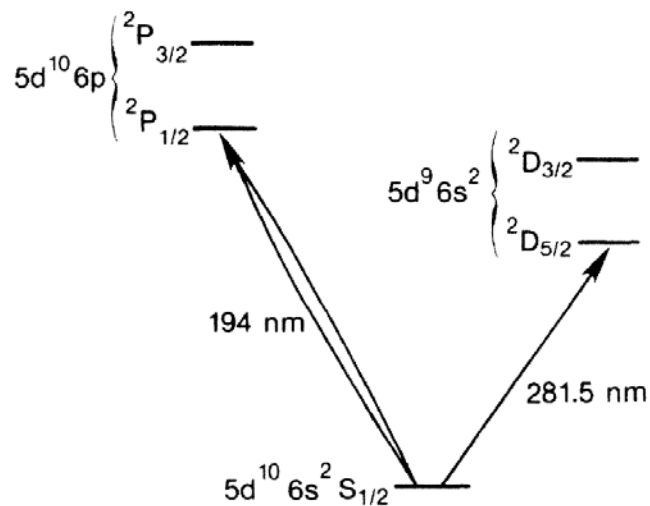
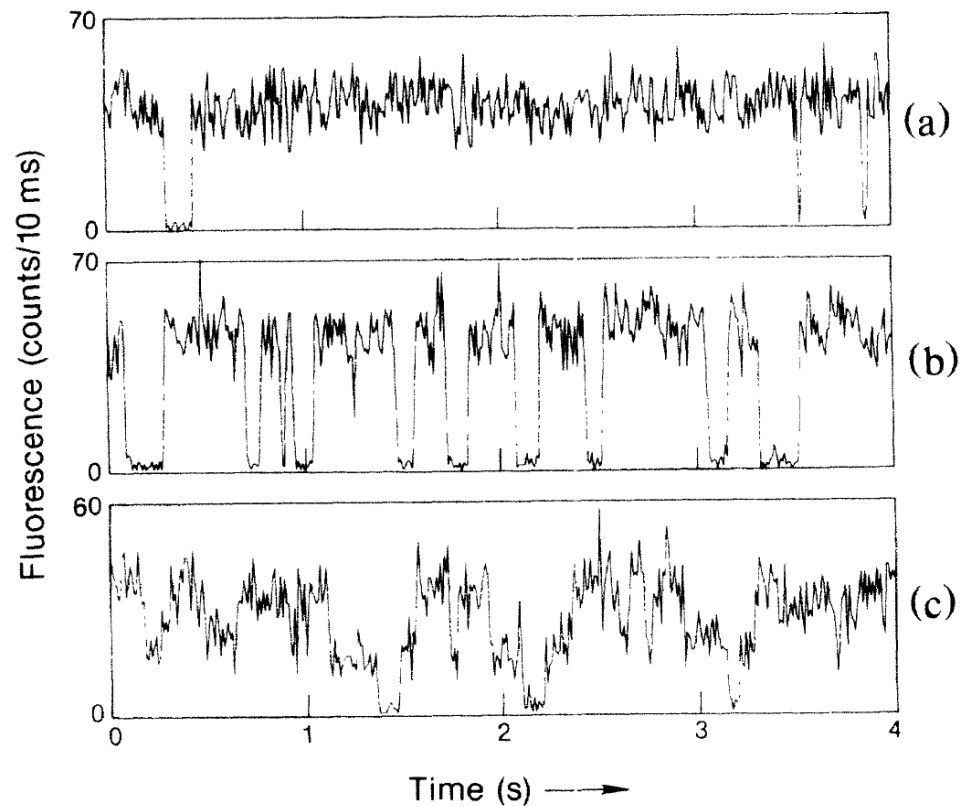


FIG. 1. Simplified optical energy-level diagram for Hg

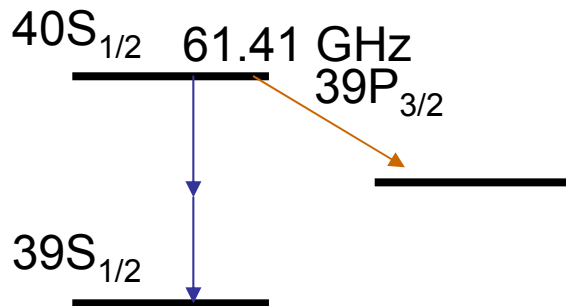




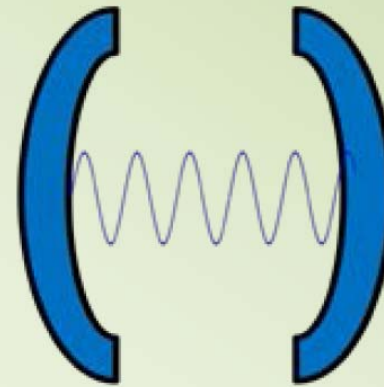
Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы: фотон в ячейке

- Подавление излучения, когда размер ячейки приближается к длине волны излучения (1983) Kleppner; DeMartini; Haroche;
- Резонансное усиление излучения (1983)
- Мазер на одиночном атоме Walther (1985)
- Мазер на двух фотонах Haroche (1987)
- Способ измерять число фотонов в ячейке, не разрушая квантовое состояние (1990)



Photon in a cavity



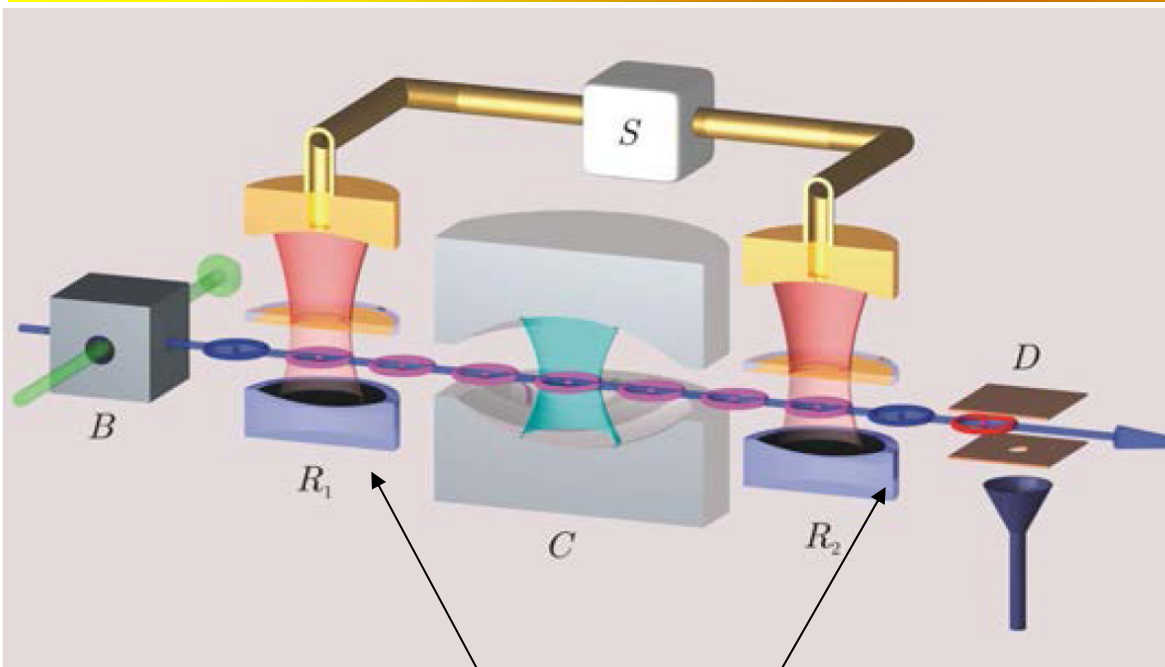
$Q = 4 \times 10^{10}$
 $T_c = 130 \text{ ms}$
Nb
2.7 cm
0.8 K





Нобелевская премия по физике 2012 года

Микроволновая ячейка



Nb
2.7 cm
0.8 K
 $Q=4 \cdot 10^{10}$
130 ms
40 000 km
 $\nu=51$ HGz

Fig. 4: Experimental setup to study microwave field states with the help of circular Rydberg atoms (see text).

$l=50$ $m=49$ Rb 125 nm

Создание и детектирование $|\downarrow\rangle(l=50)$ и $|\uparrow\rangle(l=51)$

Дипольный момент атома изменяется из-за динамического эффекта Штарка



Нобелевская премия по физике 2012 года

Оптические часы

- Оптические часы могут создавать два вида выходного сигнала: Последовательность (гребенку) импульсов с частотами от видимого до инфракрасного диапазонов или импульсный сигнал при 1 ГГц фазовокогерентный с оптической гребенкой.
- Оптические часы на ионе $^{199}\text{Hg}^+$ или на паре ионов $^{27}\text{Al}^+$ ($^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1 \sim 267\text{nm}$) & $^9\text{Be}^+$
- Используется метод создания частотной гребенки, предложенный Hänsch и Hall (Нобелевская премия 2005).

Используя оптический стандарт частоты удалось измерить:

- Замедление времени при скорости несколько километров в час
- Изменение гравитационного потенциала на расстоянии в 30 см.



Нобелевская премия по физике 2012 года

Оптические часы

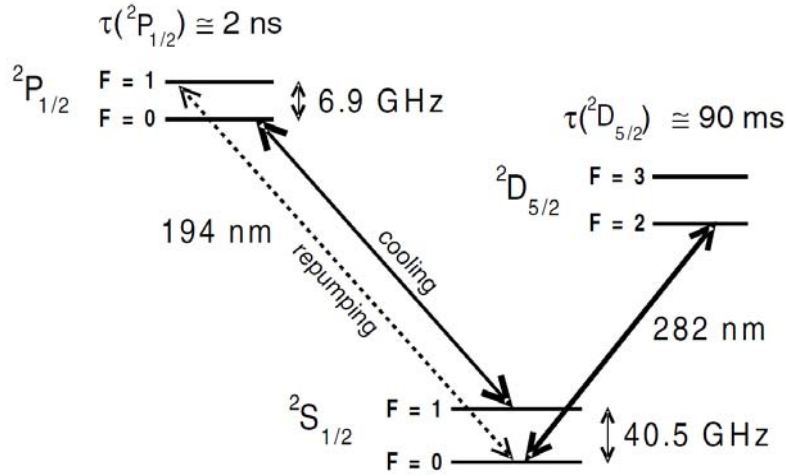


FIG. 1. Partial energy level diagram of $^{199}\text{Hg}^+$ with the transitions of interest indicated.

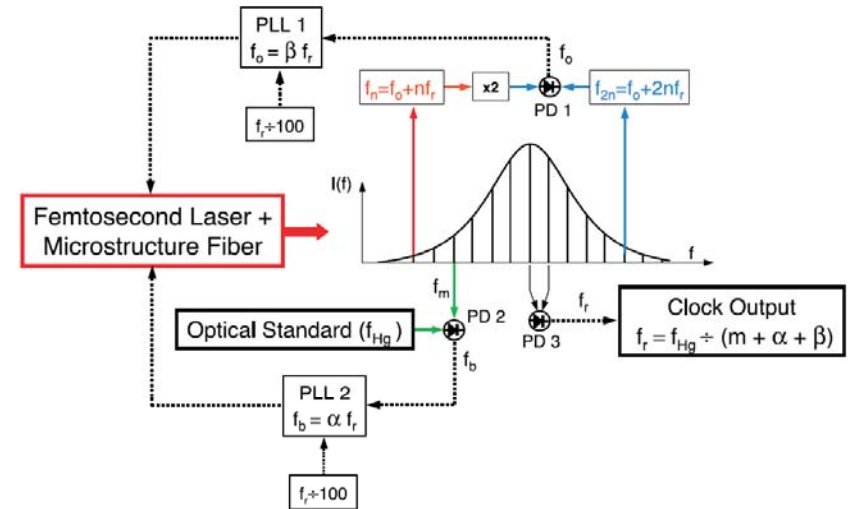
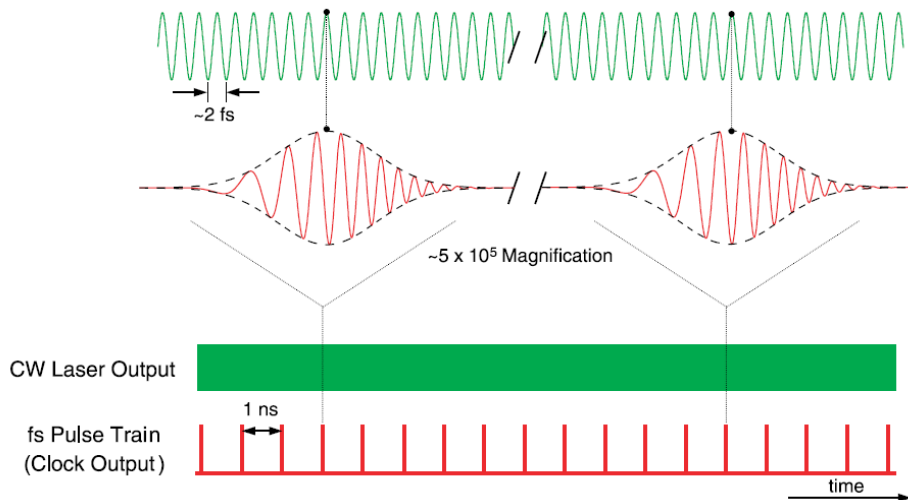


Fig. 2. Schematic of the self-referenced all-optical atomic clock. Solid lines represent optical beams, and dashed lines represent electrical paths. Photodiodes are designated by PD. The femtosecond laser, having repetition rate f_r , combined with the spectral broadening microstructure fiber produces an octave-spanning comb of frequencies in the visible/near infrared, represented by the array of vertical lines in the center of the figure. As shown above this comb, the low-frequency portion of the comb is frequency-doubled and heterodyned against the high-frequency portion in PD 1, yielding the offset frequency f_o that is common to all modes of the comb. Additionally, an individual element of the comb is heterodyned with the optical standard laser oscillator ($f_{\text{Hg}} = 532 \text{ THz}$) that is locked to the clock transition frequency of a single $^{199}\text{Hg}^+$ ion. When detected on PD 2, this yields the beat frequency f_b . Two phase-locked loops (PLL) control f_o and f_b with the result that the spacing (f_r) of the frequency comb is phase-locked to the Hg^+ optical standard. Thus, f_r is the countable microwave output of the clock, which is readily detected by illuminating PD 3 with the broadband spectrum from the frequency comb. See the text for further details.



Quantum Nondemolition Measurement of Small Photon Numbers by Rydberg-Atom Phase-Sensitive Detection

M. Brune, S. Haroche, V. Lefevre, J. M. Raimond, and N. Zagury^(a)

*Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne,
24 rue Lhomond, F-75231 Paris CEDEX 05, France*

(Received 18 April 1990)

$$\Delta(\mathbf{r}, N) = (\delta/2) \{ [1 + 4E^2(\mathbf{r})d^2N/\hbar^2\delta^2]^{1/2} - 1 \}$$

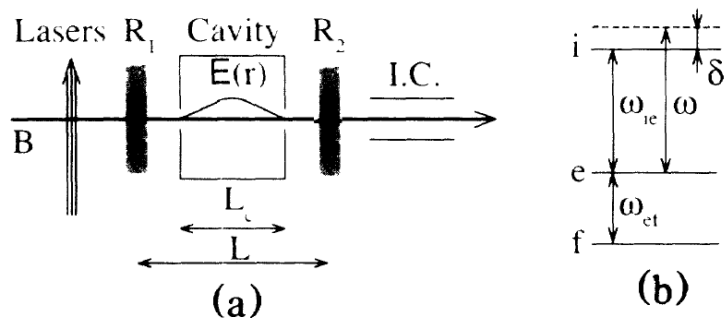


FIG. 1. (a) QND setup for measuring the photon number N in a cavity: The atomic beam B , prepared by lasers in Rydberg level f , crosses successively the field zone R_1 , the cavity, and the zone R_2 before detection by the IC counter. The variation of the field intensity along the beam path in the cavity is shown. (b) Diagram of levels e , f , and i : The cavity field, detuned by δ from the $e \rightarrow i$ transition, shifts e by an amount proportional to N . The R_1 - R_2 fields induce an $f \rightarrow e$ transition.

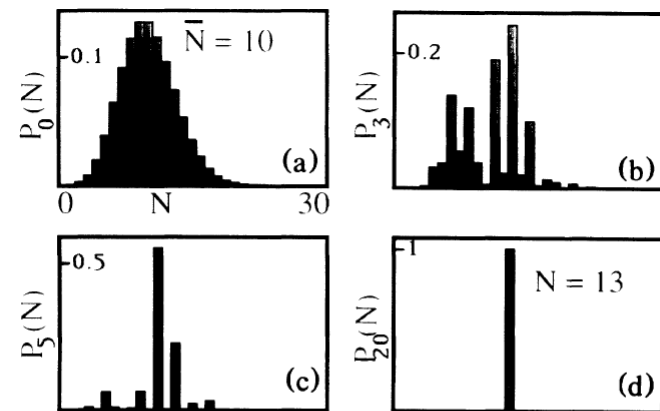


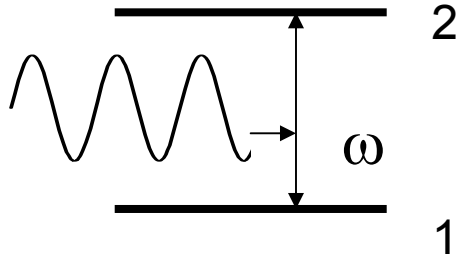
FIG. 3. Evolution of photon-number distribution $P_n(N)$ in a simulation of the $\{a_k, v_k\}$ measuring sequence. (a) Initial distribution ($n=0$, coherent field with $\bar{N}=10$); (b)-(d) $P_n(N)$ after $n=3, 5$, and 20 detected atoms, respectively ($\epsilon=\pi$, $\phi_0=0.15\pi$). Note the different vertical axis scale in each part. The full horizontal scale in each part is from $N=0$ to 30 . Collapse into the $N=13$ Fock state is clearly observable.

Двухуровневая система в лазерном поле

Осцилляции Раби

частота Раби и расстройка

$$\Omega = \sqrt{|d_{12}E_0|^2 + \Delta^2}, \quad \Delta = E_2 - E_1 - \omega.$$



Решение при начальных условиях $\dot{c}'_1(0) = 0$; $\dot{c}'_2(0) = 1$.

$$\dot{c}'_1(t) = c'_2(0) i \frac{d_{12}E_0}{2\Omega} \sin(\Omega t/2) \exp(-i\Delta t/2);$$

$$\dot{c}'_1(t) = c'_2(0) \left\{ \cos(\Omega t/2) - i \frac{\Delta}{\Omega} \sin(\Omega t/2) \right\} \exp(i\Delta t/2);$$

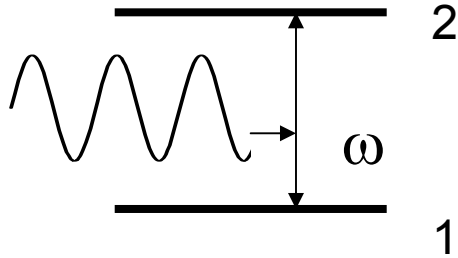
Инверсия заселенности и индуцированный момент

$$W(t) = |\dot{c}'_2(t)|^2 - |\dot{c}'_1(t)|^2 = \left(\frac{\Delta^2 - |d_{12}E_0/2|^2}{\Omega^2} \right) \sin^2(\Omega t/2) + \cos^2(\Omega t/2);$$

$$P(t) = c_1^* c_2 d_{12} + \text{к.с.} = c_1'^* c_2' d_{12} \exp(-i(E_2 - E_1)t) + \text{к.с.} =$$

$$2 \operatorname{Re} \left(\frac{id_{12}E_0}{2\Omega} d_{12} \left(\cos(\Omega t/2) + i \frac{\Delta}{\Omega} \sin(\Omega t/2) \right) \sin(\Omega t/2) \exp(i\omega t) \right)$$

Двухуровневая система в лазерном поле



Осцилляции Раби

частота Раби и расстройка

$$\Omega = \sqrt{|d_{12}E_0|^2 + \Delta^2}, \quad \Delta = E_2 - E_1 - \omega.$$

Инверсия заселенности и индуцированный момент

