

# ***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.

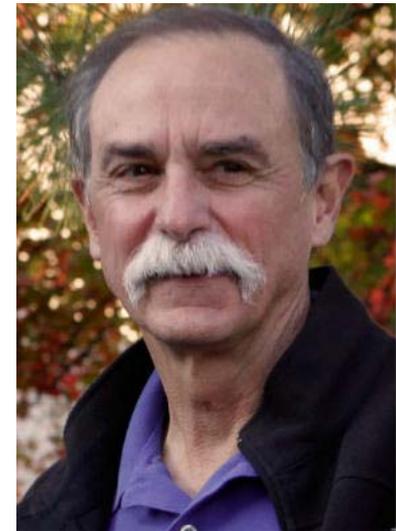


# Нобелевская премия по физике 2012 года

## 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"*



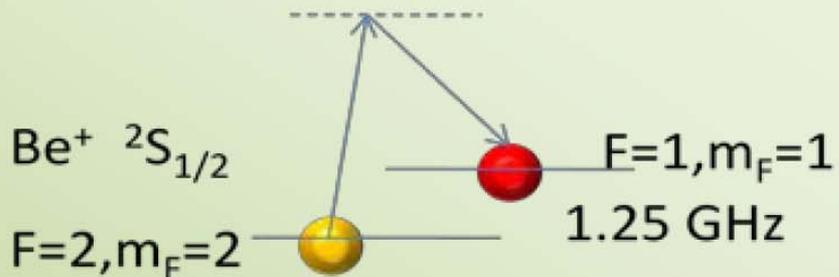
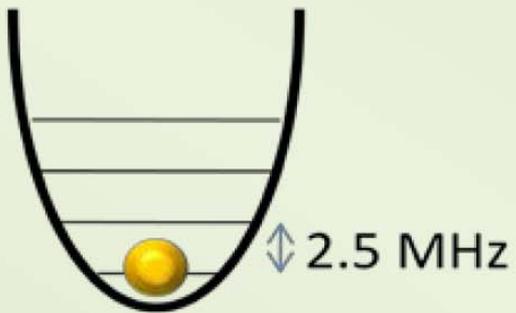
# Нобелевская премия по физике 2012 года

## Создание отдельной квантовой системы

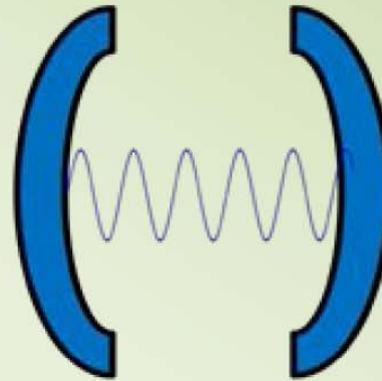
Ионы в ловушке  
Сканируется фотонами

Фотоны в ячейке  
Сканируется Ридберговскими атомами

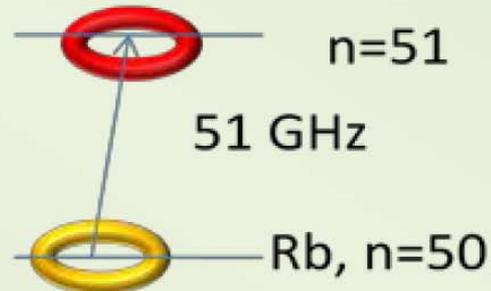
### Ion in a trap



### Photon in a cavity



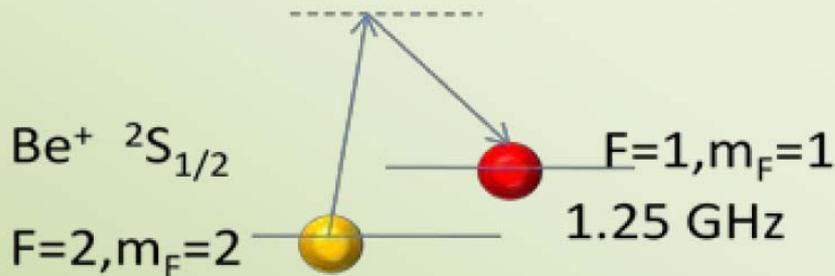
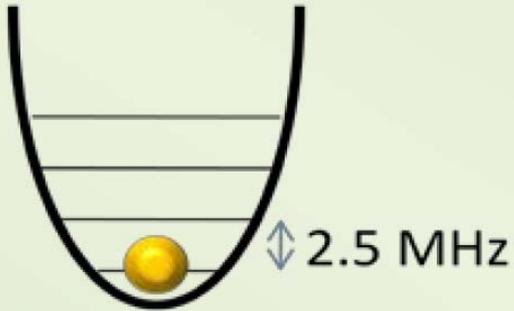
$Q=4 \times 10^{10}$   
 $T_c=130 \text{ ms}$





# Нобелевская премия по физике 2012 года

## Создание отдельной квантовой системы: ион в ловушке

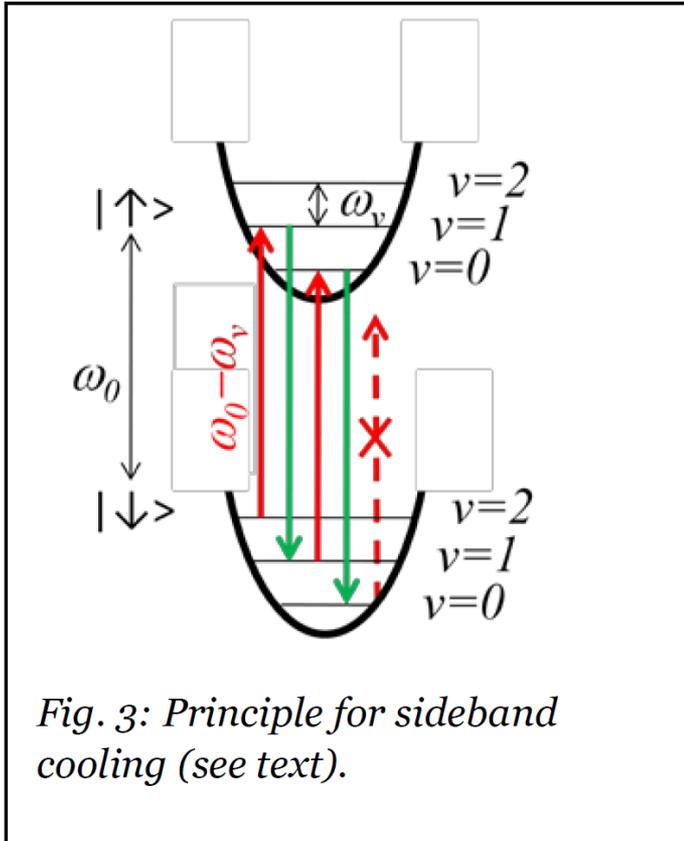


- **Trapped ion:** Paul & Dehmelt получили Нобелевскую премию по физике в 1989 “for the development of the ion trap technique”.
- **Trapped atom:** Cohen-Tannoudji Нобелевская премия по физике в 1997 «for the development of methods to cool and trap atoms with laser light».
- **Лазерное (Допплеровское 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)

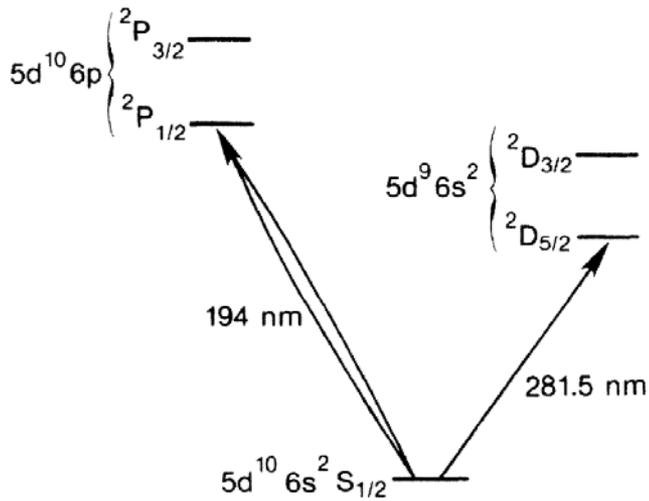
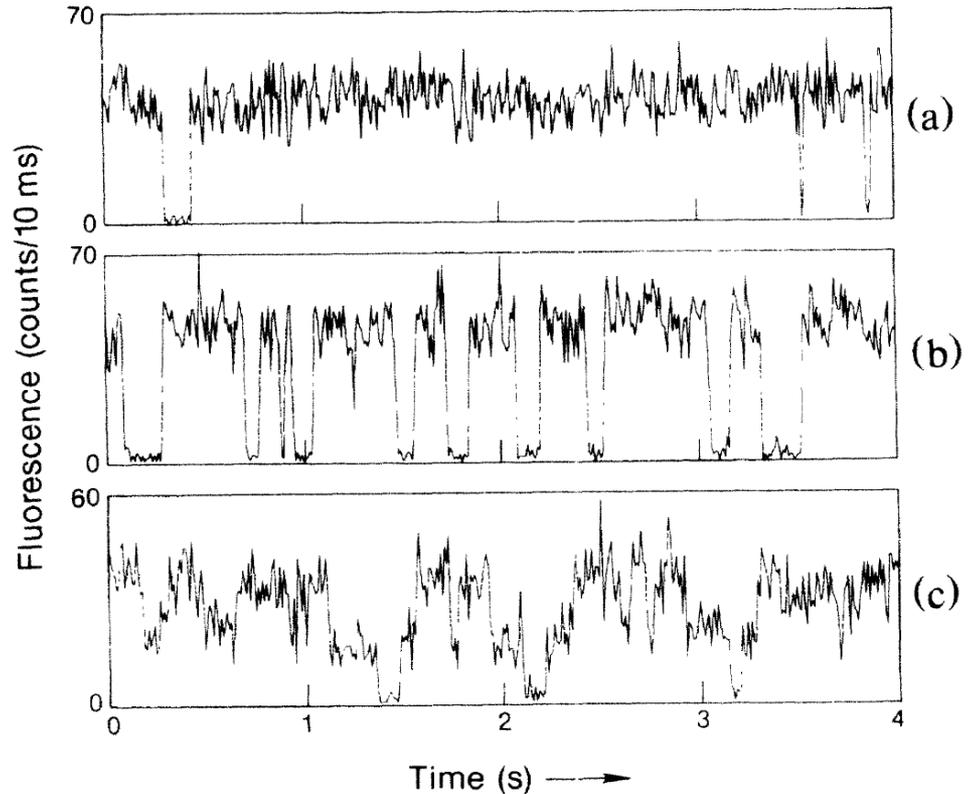


FIG. 1. Simplified optical energy-level diagram for Hg

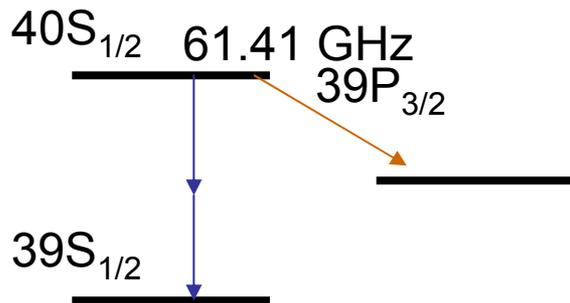




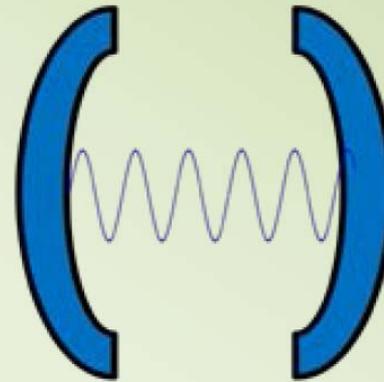
# Нобелевская премия по физике 2012 года

## Создание отдельной квантовой системы: фотон в ячейке

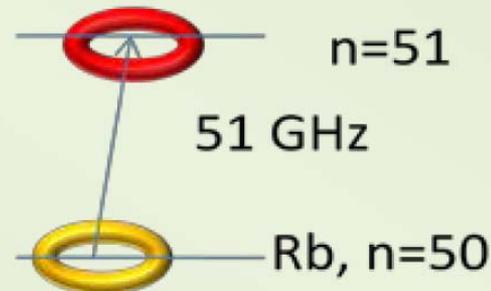
- Подавление излучения, когда размер ячейки приближается к длине волны излучения (1983) Kleppner; DeMartini; Haroche;
- Резонансное усиление излучения (1983)
- Мазер на одиночном атоме Walther (1965)
- Мазер на двух фотонах Haroche (1987)
- Способ измерять число фотонов в ячейке, не разрушая квантовое состояние (1990)



### Photon in a cavity



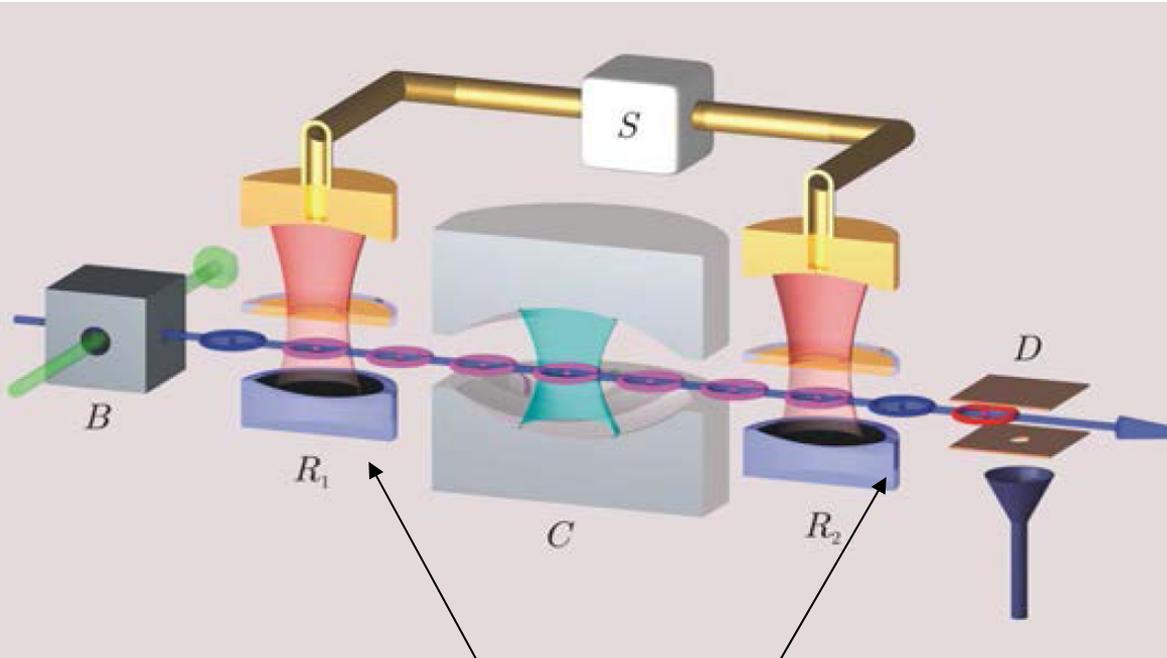
$Q = 4 \times 10^{10}$   
 $T_c = 130 \text{ ms}$   
Nb  
2.7 cm  
0.8 K





# 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

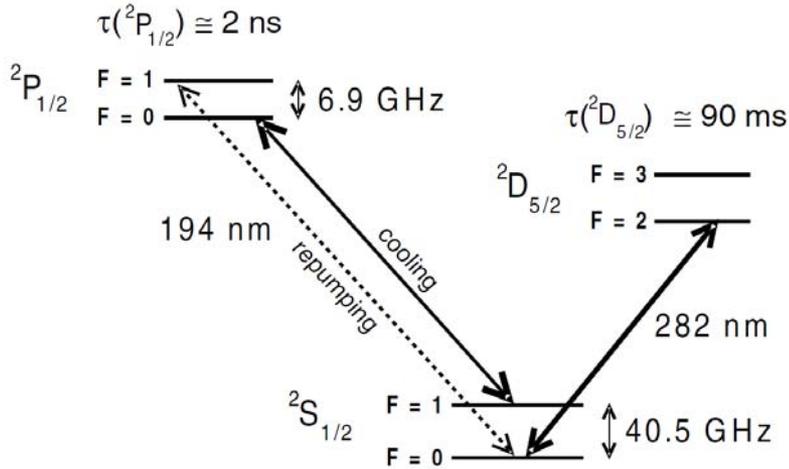


FIG. 1. Partial energy level diagram of  $^{199}\text{Hg}^+$  with the transitions of interest indicated.

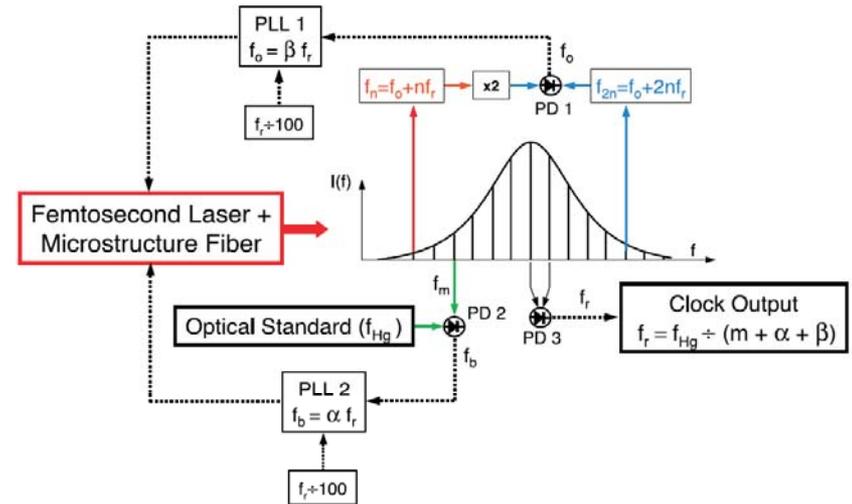
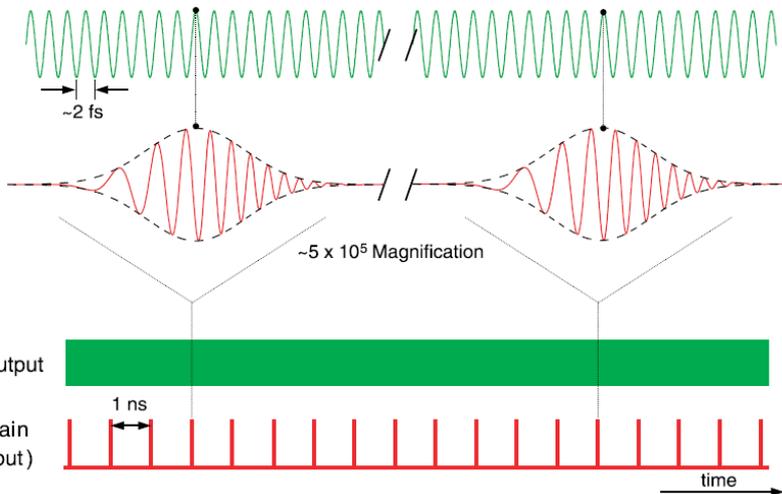


Fig. 2. Schematic of the self-referenced all-optical atomic clock. Solid lines represent optical beams, and dashed lines represent electrical paths. Photodiodes are designated by PD. The femtosecond laser, having repetition rate  $f_r$ , combined with the spectral broadening microstructure fiber produces 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  $\text{Hg}^+$  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<sup>(a)</sup>

*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)

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

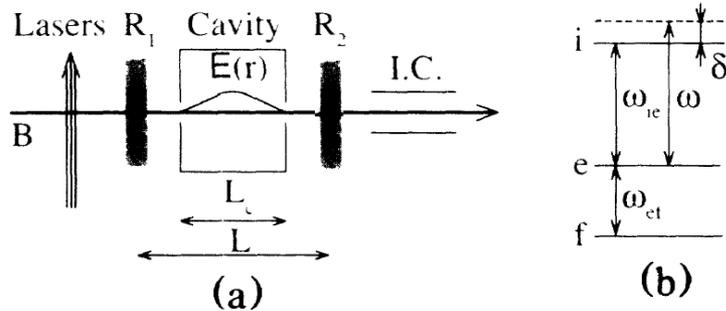


FIG. 1. (a) QND setup for measuring the photon number  $N$  in a cavity: The atomic beam  $B$ , prepared by lasers in Rydberg level  $f$ , crosses successively the field zone  $R_1$ , the cavity, and the zone  $R_2$  before detection by the IC counter. The variation of the field intensity along the beam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

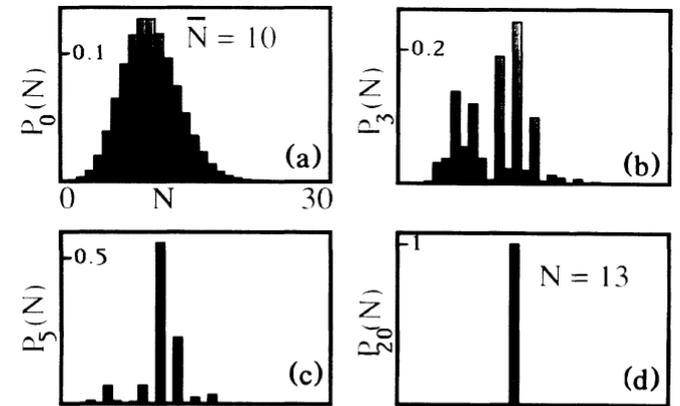


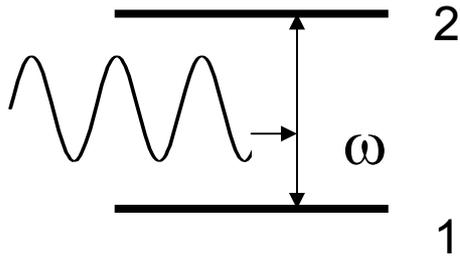
FIG. 3. Evolution of photon-number distribution  $P_n(N)$  in a simulation of the  $\{a_k, v_k\}$  measuring sequence. (a) Initial distribution ( $n=0$ , coherent field with  $\bar{N}=10$ ); (b)-(d)  $P_n(N)$  after  $n=3, 5$ , and  $20$  detected atoms, respectively ( $\varepsilon=\pi$ ,  $\varphi_0=0.15\pi$ ). 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

