

ЯДЕРНЫЕ СТЕПЕНИЯ СВОБОДЫ В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ
Весенний семестр 2020 г.

- «Разминка»
- Спектры систем со сферической симметрией
- **Сжатые атомы и резонансы формы**
- **Двухуровневая система с сильно связанными состояниями**
- **Атомная спектроскопия антипротония**
- **Поляризация излучения и дихроизм**
- **Плоская волна и волновой пакет – волна вещества.**
- **Нобелевская премия по физике 2012 года.**
Изучение одиночной квантовой системы
- **Когерентные и сжатые состояния волновых пакетов**
- **Начала теории рассеяния**
- **Особенности резонансного рассеяния и неэкспоненциальный распад**
- **Ионные ловушки**

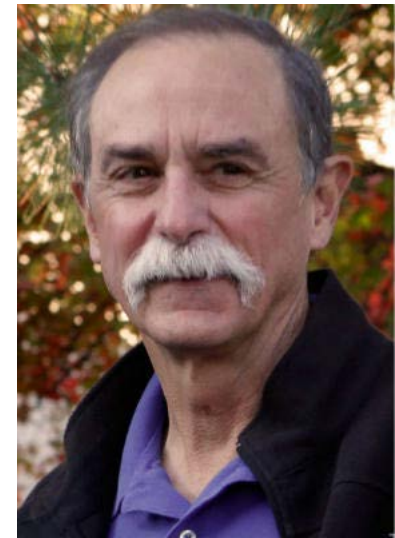


Нобелевская премия по физике 2012 года

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"*



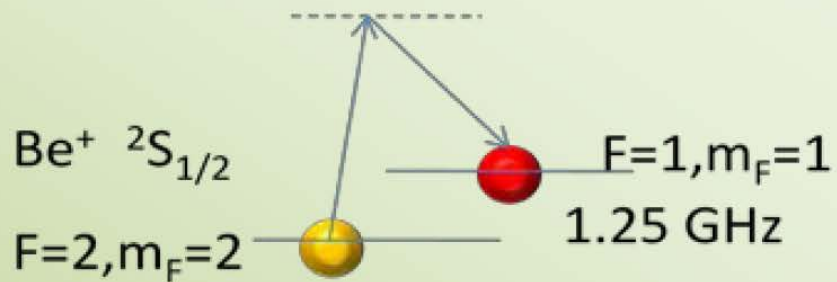
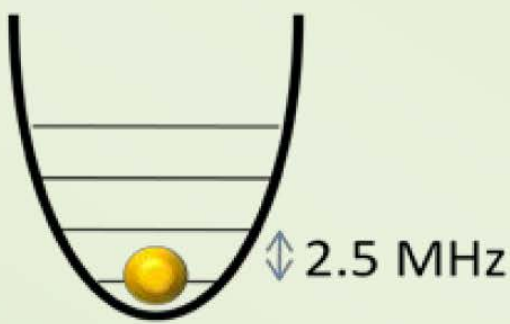
Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы

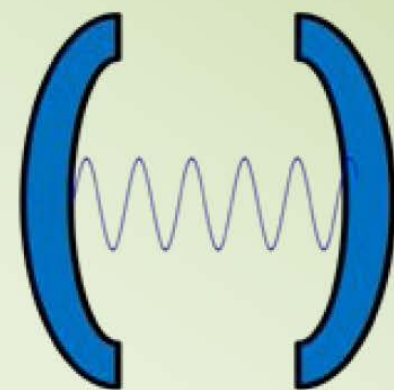
Ионы в ловушке
Сканируется фотонами

Фотоны в ячейке
Сканируется Ридберговскими атомами

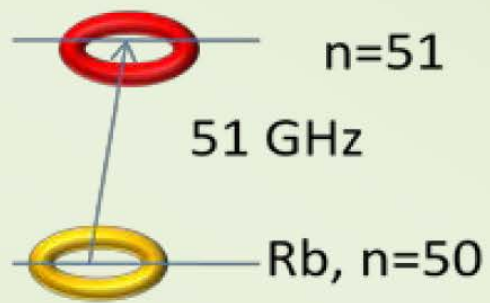
Ion in a trap



Photon in a cavity



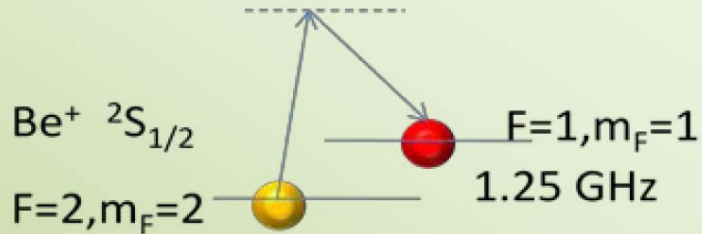
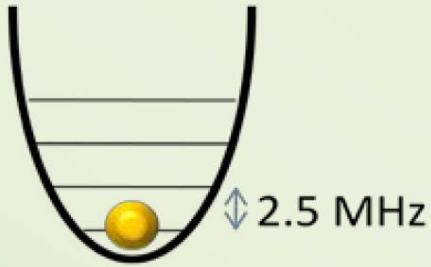
$Q=4 \times 10^{10}$
 $T_c=130 \text{ ms}$





Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы: ион в ловушке

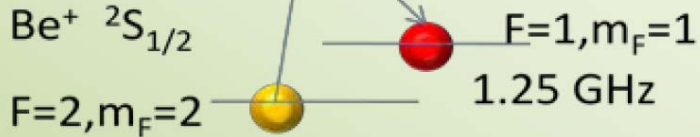
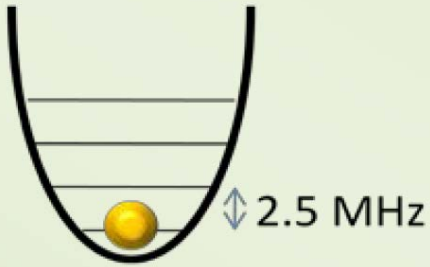


- **Trapped ion:** Paul & Dehmelt получили Нобелевскую премию по физике в 1989 “for the development of the ion trap technique”.
- **Trapped atom:** Cohen-Tannoudji Нобелевская премия по физике в 1997 «for the development of methods to cool and trap atoms with laser light».
- **Лазерное (Допплеровское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

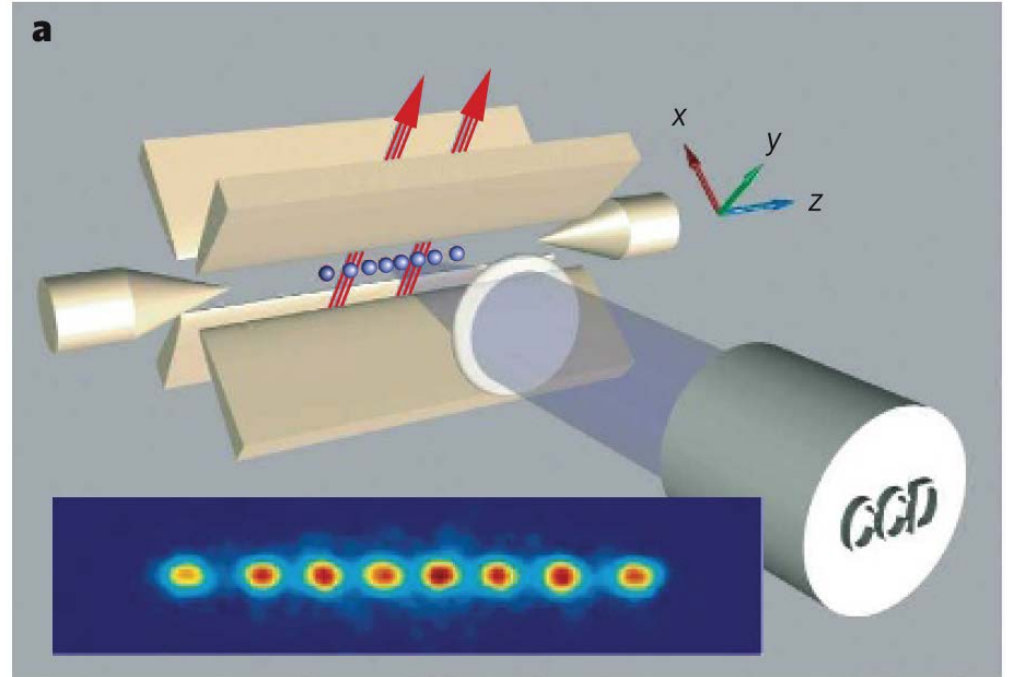


Нобелевская премия по физике 2012 года

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”.



Линейная квадрупольная ионная ловушка Paul Trap

can be localized in space to within a few nanometres.

Coherence times ~ ten minutes have been observed for superpositions of two hyperfine states



Нобелевская премия по физике 2012 года

Создание отдельной квантовой системы: ион в ловушке

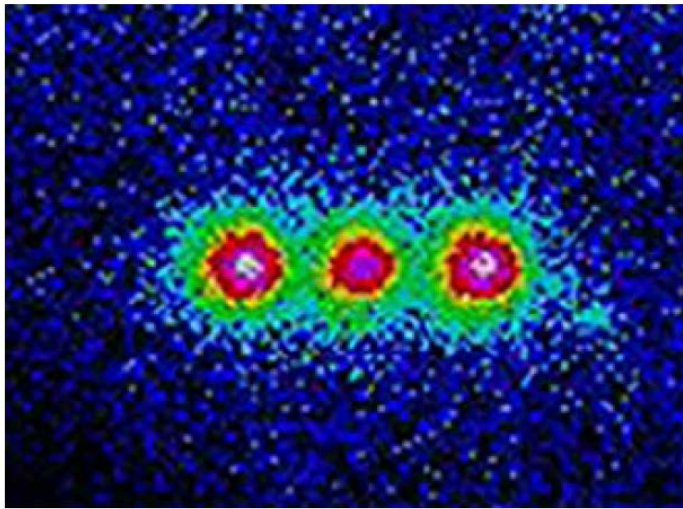


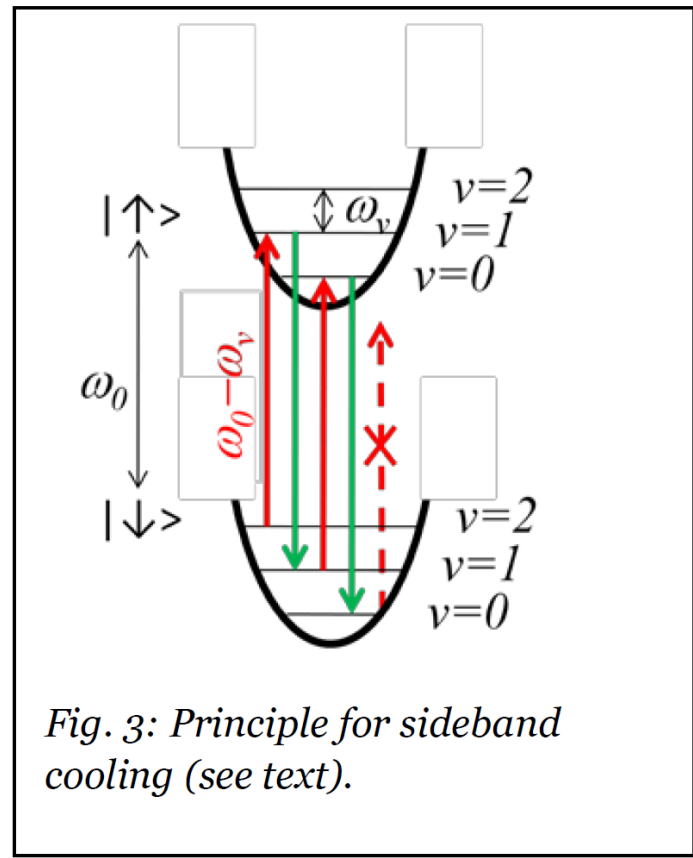
Fig. 2: Image of the fluorescence emitted by three trapped Be^+ ions (National Institute of Standards and Technology image gallery).

- **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). В 1978 экспериментальная реализация на Mg^+ и Ba^+ .
- 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)

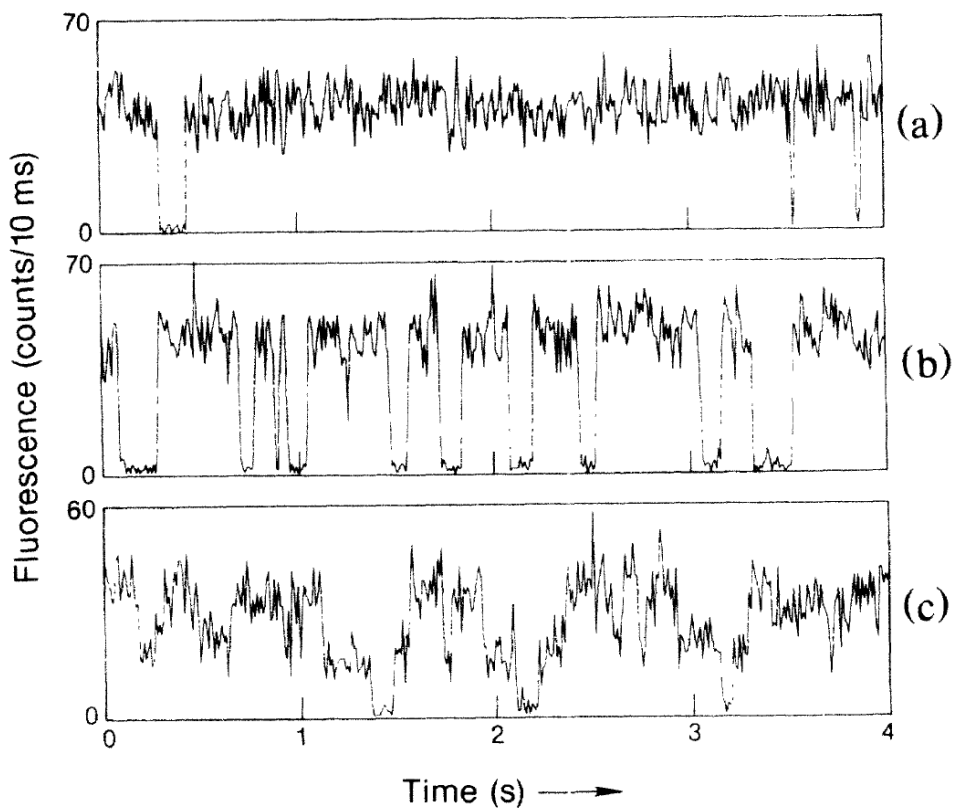
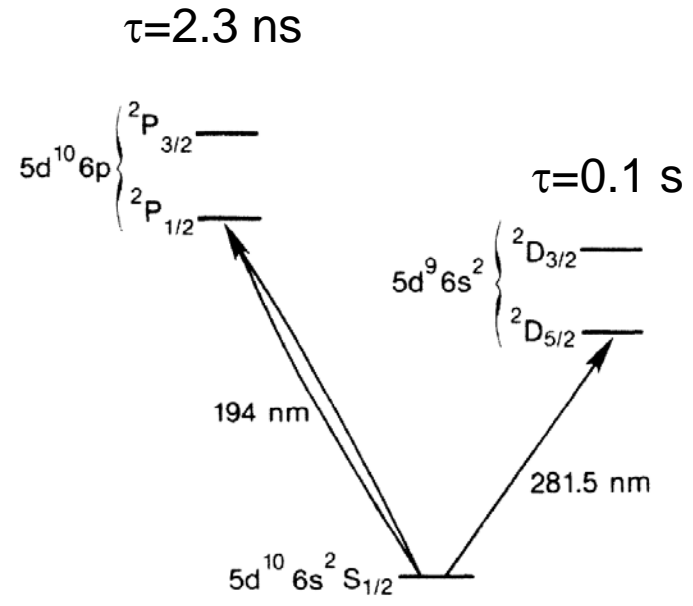


FIG. 1. Simplified optical energy-level diagram for Hg

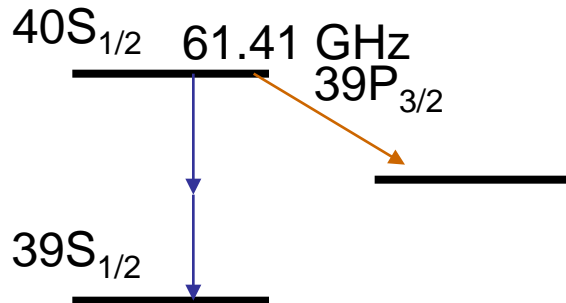
Рассеивается $5 \cdot 10^7$ фотонов/с



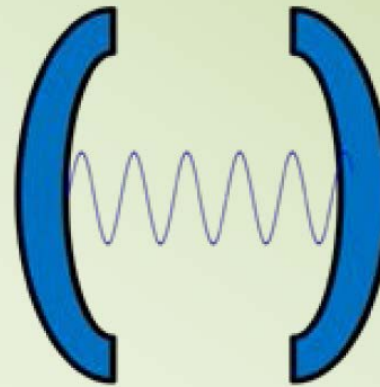
Нобелевская премия по физике 2012 года

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



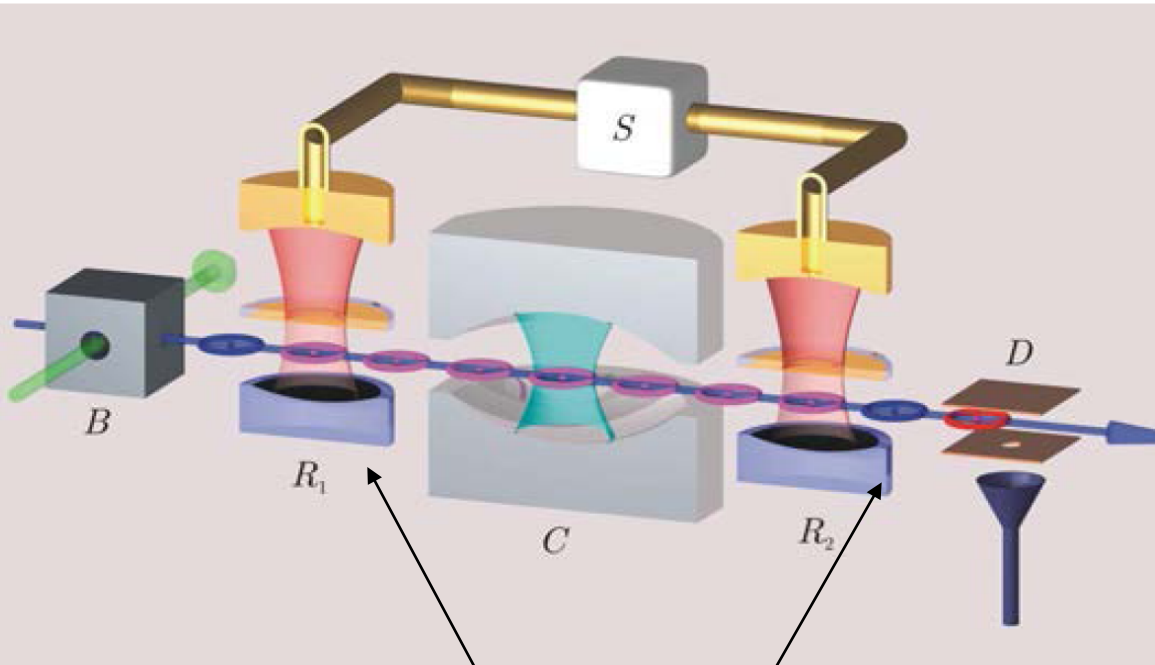
$Q = 4 \times 10^{10}$
 $T_c = 130 \text{ ms}$
Nb
2.7 cm
0.8 K





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



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)

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

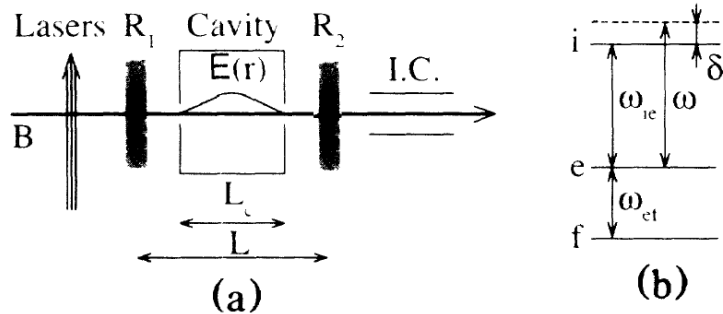


FIG. 1. (a) QND setup for measuring the photon number N in a cavity: The atomic beam B , prepared by lasers in Rydberg level f , crosses successively the field zone R_1 , the cavity, and the zone R_2 before detection by the IC counter. The variation of the field intensity along the beam path in the cavity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

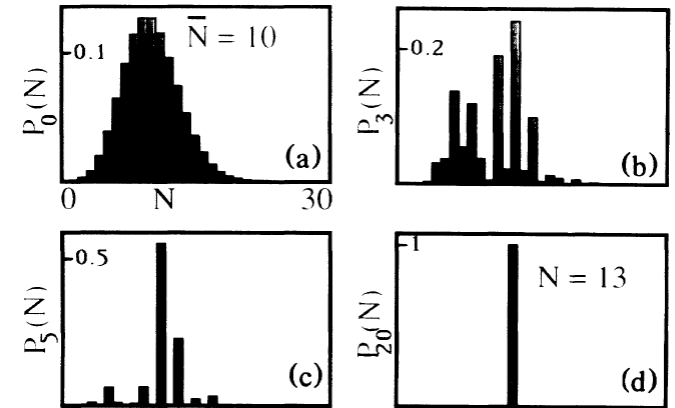
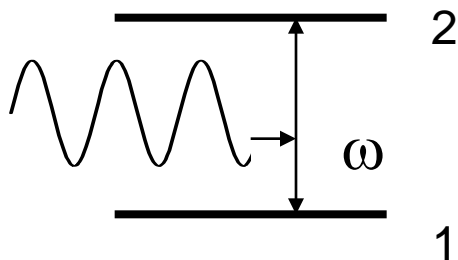


FIG. 3. Evolution of photon-number distribution $P_n(N)$ in a simulation of the $\{a_k, v_k\}$ measuring sequence. (a) Initial distribution ($n=0$, coherent field with $\bar{N}=10$); (b)-(d) $P_n(N)$ after $n=3, 5$, and 20 detected atoms, respectively ($\varepsilon=\pi$, $\varphi_0=0.15\pi$). Note the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



Эффект Ауслера-Таунса

$$\dot{c}'_1(t) = i/2 \cdot d_{12} E_0 c'_2(t) \exp(-i(E_2 - E_1 - \omega)t);$$

$$\dot{c}'_2(t) = i/2 \cdot d_{21} E_0 c'_1(t) \exp(i(E_2 - E_1 - \omega)t).$$

Введем **частоту Раби и расстройку**

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

Ищем решение в следующем виде

$$c'_1(t) = (a_1 \exp(i\Omega t/2) + b_1 \exp(-i\Omega t/2)) \exp(-i\Delta t/2);$$

$$c'_2(t) = (a_2 \exp(i\Omega t/2) + b_2 \exp(-i\Omega t/2)) \exp(i\Delta t/2);$$

Начальные условия

Решение

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

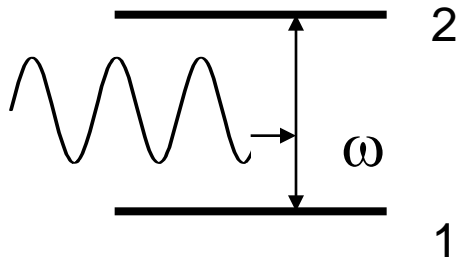
$$c'_2(t) = \left(c'_2(0) \left\{ \cos(\Omega t/2) - i \frac{\Delta}{\Omega} \sin(\Omega t/2) \right\} + c'_1(0) i \frac{d_{21} E_0}{\Omega} \sin(\Omega t/2) \right) \exp(i\Delta t/2);$$

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 $c'_1(0) = 0$; $c'_2(0) = 1$.

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

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

Инверсия заселенности и индуцированный момент

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

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

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

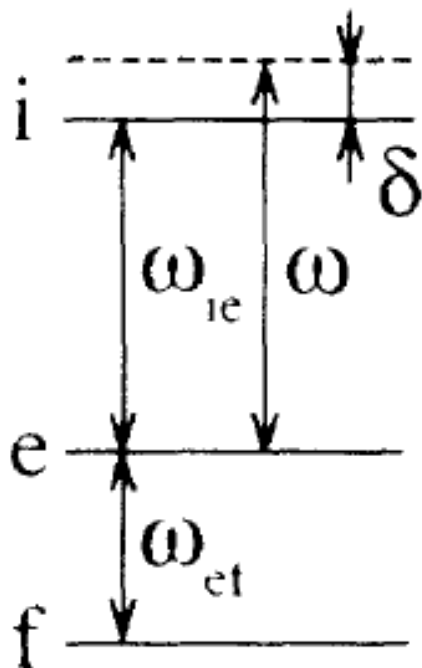


Измерение числа фотонов через атомно-полевую связь

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

Phys. Rev. Lett. **65**, 976 (1990)



(b)

$$\dot{c}_e(t) = c_f(t) i \frac{\Omega}{2};$$

$$\dot{c}_f(t) = c_e(t) i \frac{\Omega}{2};$$



$$c_e(t) = \cos\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right);$$

$$c_f(t) = i \sin\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right);$$

После прохождения ячейки с числом фотонов n , предполагая, что ячейка является 2π для данной скорости

$$c_e(t) = \cos\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right) \exp\left(-i \frac{g^2 t n}{\Delta}\right);$$

$$c_f(t) = i \sin\left(\frac{\Omega t_0}{2}\right);$$

$$|c_e(t)|^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{g^2 t n}{\Delta}\right) \right);$$

$$|c_f(t)|^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{g^2 t n}{\Delta}\right) \right);$$



Нобелевская премия по физике 2012 года

Измерение числа фотонов в осцилляторе

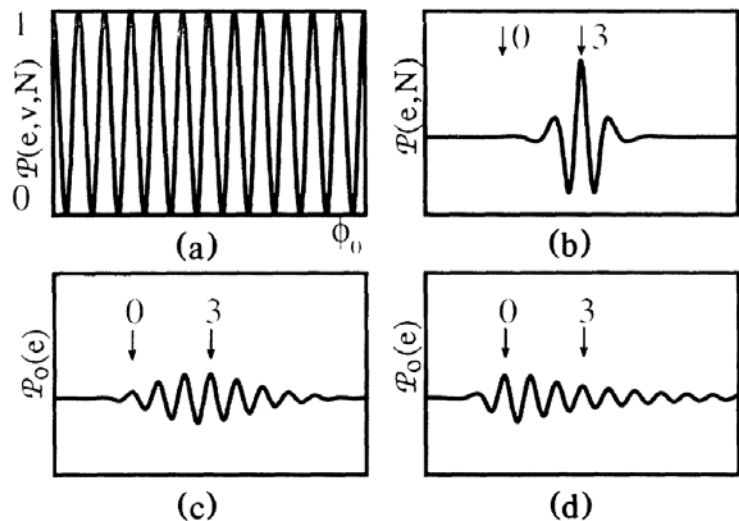


FIG. 2. Transition probability from f to e plotted vs ϕ_0 for $\phi_0 = 2\pi$: (a) Monokinetic atomic beam (velocity v_0) and field in $|N\rangle$ state. (b)–(d) Transition probability averaged over the atomic velocity distribution, the cavity sustaining (b) a Fock state, (c) a coherent, or (d) a thermal field. Mean photon number in all cases: $\bar{N} = 3$. Arrows indicate values $\phi_0 = N\epsilon$ for $N = 0$ and 3. In each part, the full vertical scale is from 0 to 1 and the full horizontal scale is 24π .

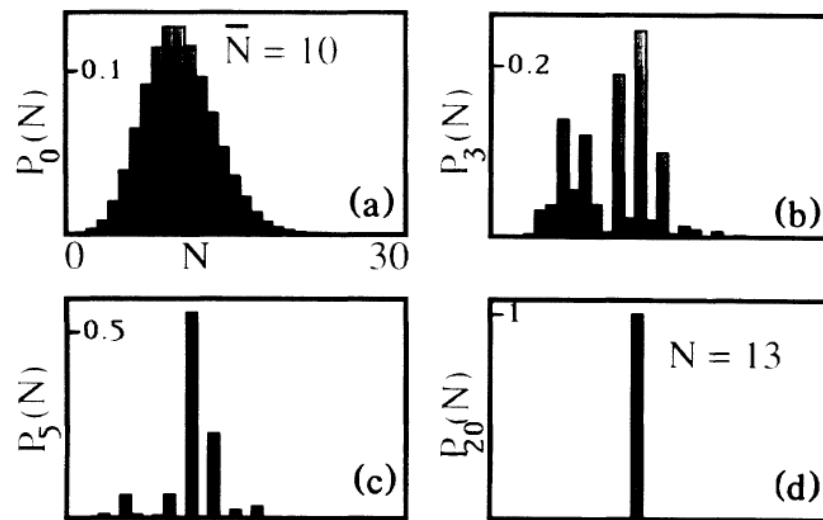


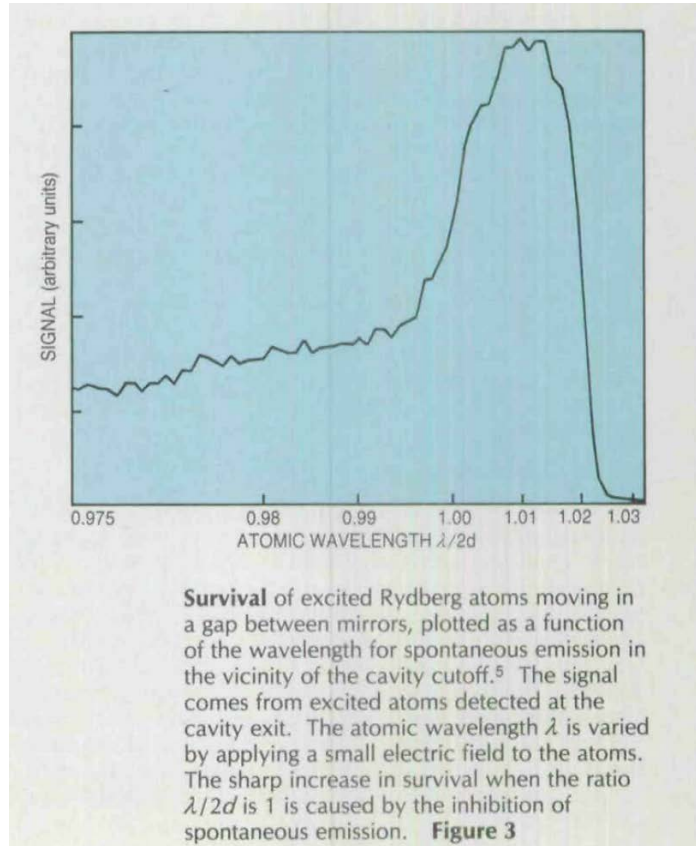
FIG. 3. Evolution of photon-number distribution $P_n(N)$ in a simulation of the $\{a_k, v_k\}$ measuring sequence. (a) Initial distribution ($n = 0$, coherent field with $\bar{N} = 10$); (b)–(d) $P_n(N)$ after $n = 3, 5$, and 20 detected atoms, respectively ($\epsilon = \pi$, $\phi_0 = 0.15\pi$). Note 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.

$$|\psi\rangle = \sum_n \frac{e^{-\alpha^2/2} \alpha^n}{n!} |n\rangle \quad - \text{Когерентное состояние}$$

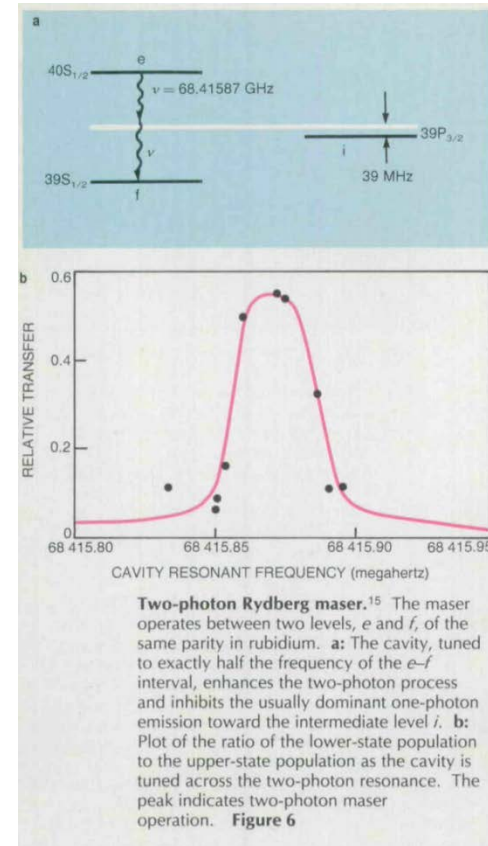


Нобелевская премия по физике 2012 года

Однофотонный и двухфотонный мазер



R. G. Hulet, E. S. Hilfer, D. Kleppner, Phys. Rev. Lett. 55, 2137 (1985).



M. Brune, J. M. Raimond, P. Goy, L. Davidovich, S. Harcweh, Phys. Rev. Lett, 59, 1899 (1987).

Physics today 6 26 (1989)
S. Haroch and D. Kleppner



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 фазово-когерентный 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

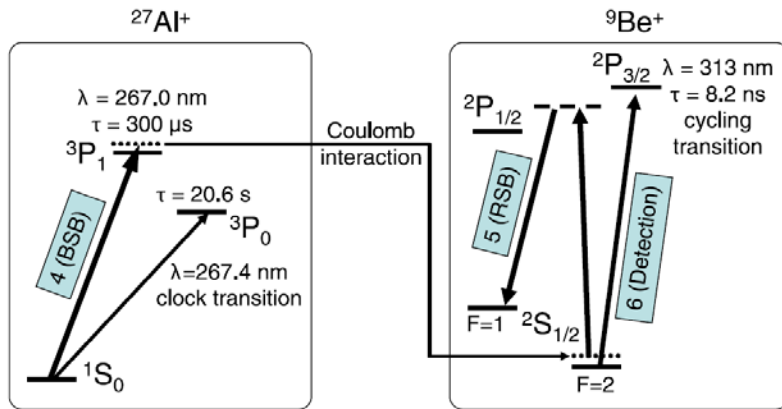


FIG. 1 (color online). Transfer of the $^{27}\text{Al}^+$ clock state to $^9\text{Be}^+$ for detection. Quantum state transfer proceeds according to numbers 4, 5, and 6 in shaded boxes, which denote corresponding steps in the text. Dotted lines denote the first vibrational excitation of the in-phase axial mode. The dashed line represents the virtual level of the $^9\text{Be}^+$ stimulated Raman transition.

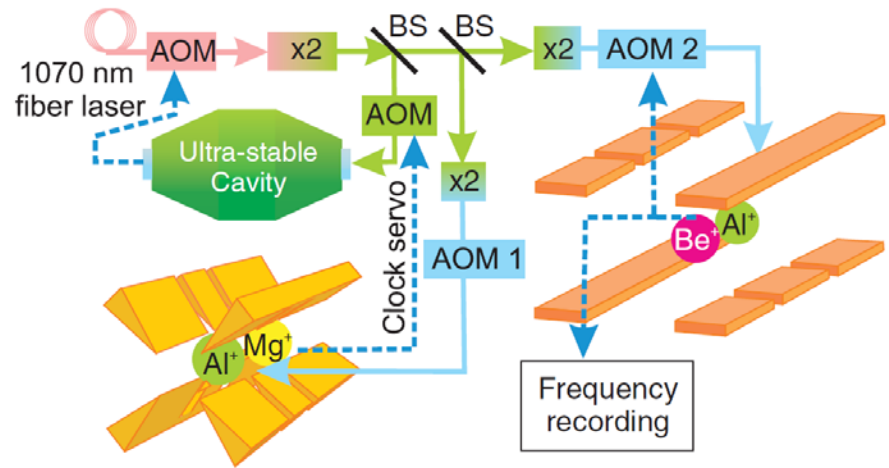


FIG. 1 (color). Setup for comparing the frequencies of the two Al^+ clocks. The 4th harmonic of a fiber laser is locked to the Al^+ $1S_0 \leftrightarrow 3P_0$ clock transition in the Al-Mg apparatus with a fixed offset frequency (applied to AOM1). Another laser beam derived from the same laser probes the clock transition in the Al-Be apparatus, where the laser frequency is locked to the clock transition in a separate digital feedback loop that controls AOM2. The record of frequencies applied to AOM2 represents the difference in clock frequencies. Beam splitter (BS); acousto-optic modulator (AOM); frequency doubler (x2).



Нобелевская премия по физике 2012 года

Оптические часы

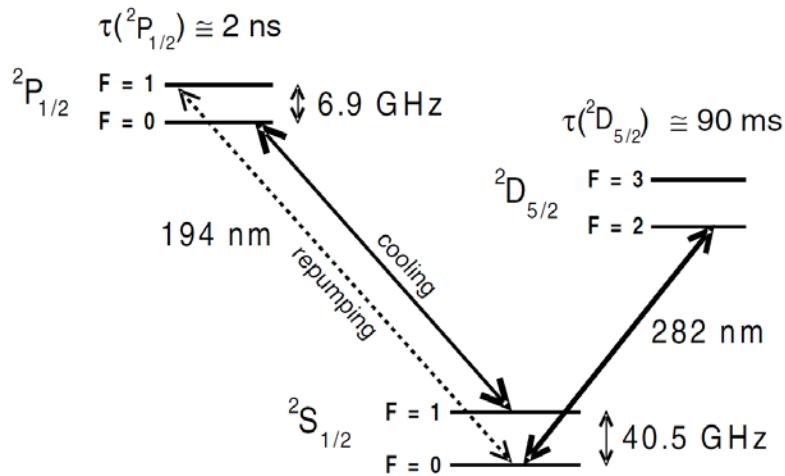


FIG. 1. Partial energy level diagram of $^{199}\text{Hg}^+$ with the transitions of interest indicated.

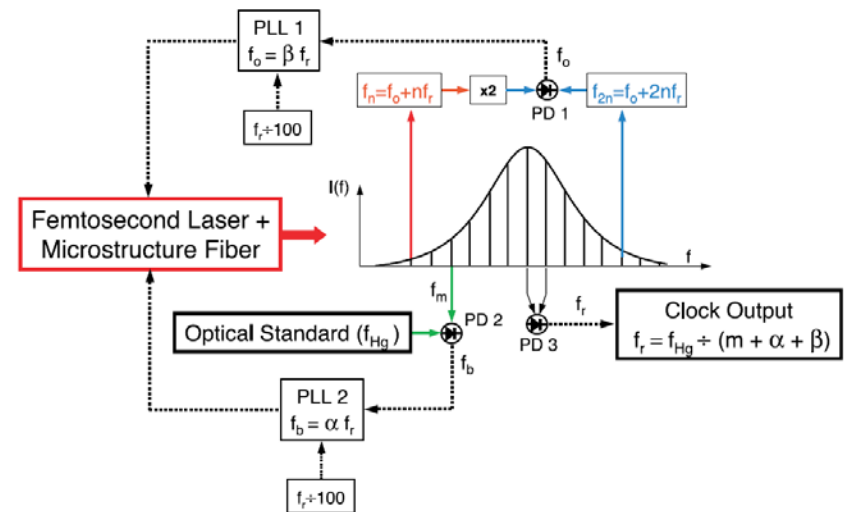
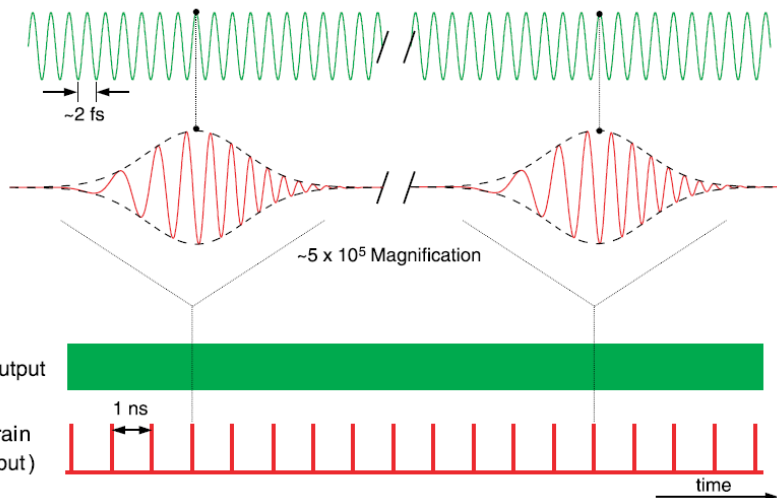


Fig. 2. Schematic of the self-referenced all-optical atomic clock. Solid lines represent optical beams, and dashed lines represent electrical paths. Photodiodes are designated by PD. The femtosecond laser, having repetition rate f_r , combined with the spectral broadening microstructure fiber produces 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.

Нобелевская премия по физике 2012 года

Брагинский В. Б.

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 26, NUMBER 4

CLASSICAL AND QUANTUM RESTRICTIONS ON THE DETECTION OF WEAK D.

BANCES OF A MACROSCOPIC OSCILLATOR

V. B. BRAGINSKIĬ

Moscow State University

Submitted May 3, 1967

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53, 1434–1441 (October, 1967)

SOVIET PHYSICS

JETP

A Translation of Zhurnal Éksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki

Editor in Chief—P. L. Kapitza. Associate Editors—M. A. Leontovich, E. M. Lifshitz, S. Yu. Luk'yanov
Editorial Board—É. L. Andronikashvili, K. P. Belov, A. S. Borovik-Romanov (Editor, JETP Letters), V. P. Dzhelepov, N. V. Fedorenko, E. L. Feinberg, V. A. Fock, V. N. Gribov, R. V. Khokhlov, I. M. Lifshitz, S. Yu. Luk'yanov, A. M. Prokhorov, D. V. Shirkov, G. F. Zharkov (Secretary)

Vol. 34, No. 3, pp. 463-676

(Russian Original Vol. 61, No. 3, pp. 873-1272)

March 1972

VERIFICATION OF THE EQUIVALENCE OF INERTIAL AND GRAVITATIONAL

MASS

V. B. BRAGINSKIĬ and V. I. PANOV

Moscow State University

Submitted April 5, 1971

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 61, 873–879 (September, 1971)

An experiment is described which establishes with 0.9×10^{-12} accuracy (95% confidence) that the ratio of the inertial to the gravitational mass is identical for aluminum and platinum. A torsion balance with characteristic oscillation period of 5 hours and 20 minutes and relaxation time exceeding 6×10^7 sec was used. Simulative effects which limited the achieved resolution were analyzed. The result 0.9×10^{-12} is close to the ratio of the strengths of the weak and strong interactions.

Unperturbed measurements of the n -quantum state of an harmonic oscillator

V. B. Braginskii, Yu. I. Vorontsov, and V. D. Krivchenkov

Moscow State University
(Submitted August 1, 1974)
Zh. Eksp. Teor. Fiz. 68, 55–60 (January 1975)

The fundamental conditions of an essentially unperturbed measurement of the n -quantum state of an harmonic oscillator with the aid of an electron beam are analyzed. The limits of sensitivity of the measurements and the probability of perturbing the oscillator are determined.

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 30, NUMBER 4

APRIL 1970

QUANTUM PROPERTIES OF A MACROSCOPIC OSCILLATOR

V. B. BRAGINSKIĬ and V. S. NAZARENKO

Moscow State University

Submitted May 5, 1969

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 57, 1421–1424 (October, 1969)

The behavior of a macroscopic mechanical oscillator having a long relaxation time, located in a gas thermostat or in a light beam, is considered. It is shown that under certain conditions such an oscillator behaves like a quantum system. Relations are obtained for the lifetime of the oscillator in the allowed energy levels. It is shown that the action of a directed light beam on the oscillator leads to a "heating" of the vibrational degrees of freedom. A theoretical limit is found for the Q of a macroscopic mechanical oscillator.