

Осенняя школа по современной квантовой физике

«Введение в квантовые технологии»

11 - 15 сентября 2017 г., ИТФ им. Н.Н. Боголюбова НАНУ

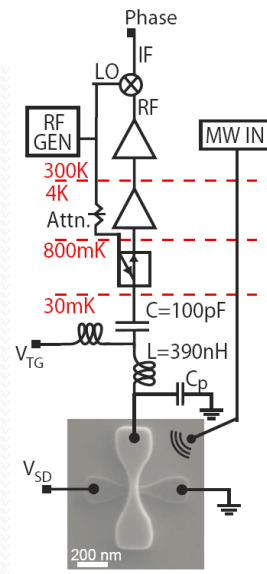
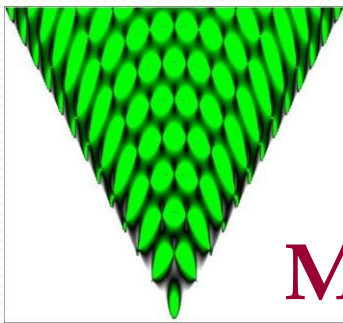
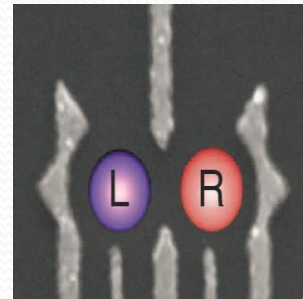
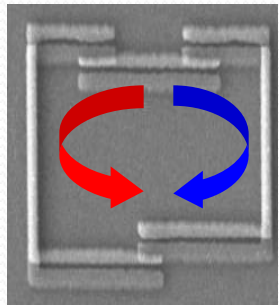
«Введение в физические основы квантовых компьютеров»

Шевченко Сергей Николаевич

ФТИНТ и ФТФ ХНУ

Вводная лекция:

**КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР –
СТИМУЛ РАЗВИТИЯ
МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**



КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР – СТИМУЛ РАЗВИТИЯ МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

- ▼ *Мезоскопика – между классикой и квантами*
- ▼ «На грани новой компьютерной революции»
- ▼ Квантовая инженерия или Как увидеть две стороны монеты одновременно?
- ▼ «И где мой квантовый компьютер?»
- ▼ Обнаружение кошки Шредингера на рубеже тысячелетий
- ▼ Квантовая электродинамика контуров
- ▼ О продолжении работы Ландау, выполненной в Харькове

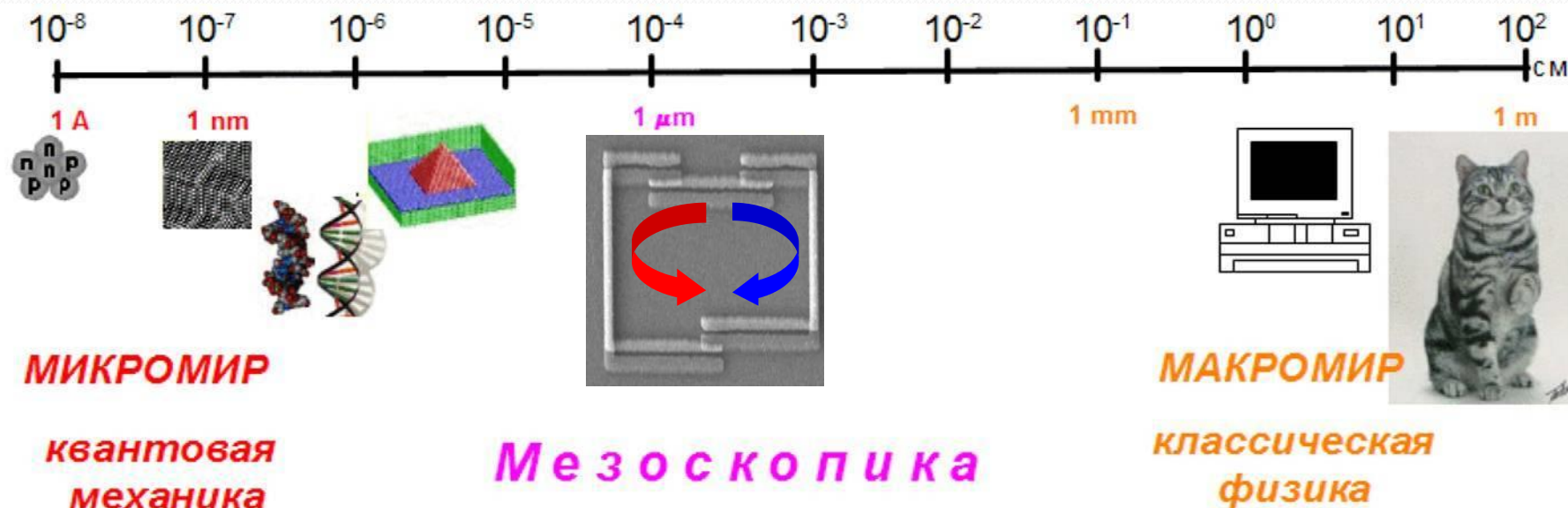
КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР –

stimulus (лат.)

СТИМУЛ РАЗВИТИЯ МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

μεσοζ (греч.)

φυση (греч.)



Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

1. INTRODUCTION

On the program it says this is a keynote speech—and I don't know what a keynote speech is. I do not intend in any way to suggest what should be in this meeting as a keynote of the subjects or anything like that. I have my own things to say and to talk about and there's no implication that anybody needs to talk about the same thing or anything like it. So what I want to talk about is what Mike Dertouzos suggested that nobody would talk about. I want to talk about the problem of simulating physics with computers and I mean that in a specific way which I am going to explain. The reason for doing this is something that I learned about from Ed Fredkin, and my entire interest in the subject has been inspired by him. It has to do with learning something about the possibilities of computers, and also something about possibilities in physics. If we suppose that we know all the physical laws perfectly, of course we don't have to pay any attention to computers. It's interesting anyway to entertain oneself with the idea that we've got something to learn about physical laws; and if I take a relaxed view here (after all I'm here and not at home) I'll admit that we don't understand everything.

The first question is, What kind of computer are we going to use to simulate physics? Computer theory has been developed to a point where it realizes that it doesn't make any difference; when you get to a *universal computer*, it doesn't matter how it's manufactured, how it's actually made. Therefore my question is, Can physics be simulated by a universal computer? I would like to have the elements of this computer *locally interconnected*, and therefore sort of think about cellular automata as an example (but I don't want to force it). But I do want something involved with the

Парадокс ЭПР



Albert Einstein

Institute of Advanced Studies, Princeton
Physics

Нет подтвержденного адреса электронной почты

Подписаться

Название 1–20

Прочитано

Год

Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?

A Einstein, B Podolsky, N Rosen
Physical review 47 (10), 777

13027

1935

Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt

A Einstein
Ann. Phys. 17, 132-148

6958 *

1905

On the movement of small particles suspended in stationary liquids required by the molecular-kinetic theory of heat

A Einstein
Annalen der Physik 17, 549-560

5537 *

1905

Zur Elektrodynamik bewegter Körper

A Einstein

3749 *

Investigations on the Theory of the Brownian Movement

A Einstein
Dover publications

3539

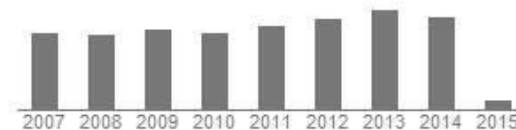
1956


Google Академия



Создать свой профиль

Индексы цитирований	Все	Начиная с 2010 г.
Статистика цитирования	86542	25564
h-индекс	103	61
i10-индекс	360	193





“В сугубо прикладной области, названной квантовой информатикой, работают как раз те принципы, которые связаны с интерпретацией квантовой механики.”

М.Б. Менский, Квантовые измерения, феномен жизни и стрела времени: связи между «тремя великими проблемами» (по терминологии Гинзбурга), УФН 2007

СУПЕРПОЗИЦИЯ И ПЕРЕПУТЫВАНИЕ

Единица информации – **бит**
может принимать одно из двух
значений (0, 1).

Кубит может существовать в
состоянии 0 и 1 одновременно:



Волновая
функция
кубита

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

R. Feynman, Simulating physics with computers (1982)

*"Nature isn't classical, and if you want to make a simulation of Nature,
you'd better make it quantum mechanical"*

Обобщение принципа суперпозиции на две квантовые системы –
возникновение квантовых корреляций между ними, что известно как
парадокс (эффект!) Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР).

Одно из приложений перепутывания – квантовая телепортация.

QUBIT = A TWO-LEVEL SYSTEM

which is a “**simplest non-simple quantum problem**”

[M. Berry, Ann. NY Acad. Sci. (1995)]

who is known for many things: Berry phase,
... shortest abstract

IOP PUBLISHING
J. Phys. A: Math. Theor. **44** (2011) 492001 (5pp)
JOURNAL OF PHYSICS A: MATHEMATICAL AND THEORETICAL
doi:10.1088/1751-8113/44/49/492001

FAST TRACK COMMUNICATION

Can apparent superluminal neutrino speeds be explained as a quantum weak measurement?

M V Berry¹, N Brunner¹, S Popescu¹ and P Shukla²

¹ H H Wills Physics Laboratory, Tyndall Avenue, Bristol BS8 1TL, UK

² Department of Physics, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India

Received 12 October 2011, in final form 27 October 2011

Published 11 November 2011

Online at stacks.iop.org/JPhysA/44/492001

Abstract

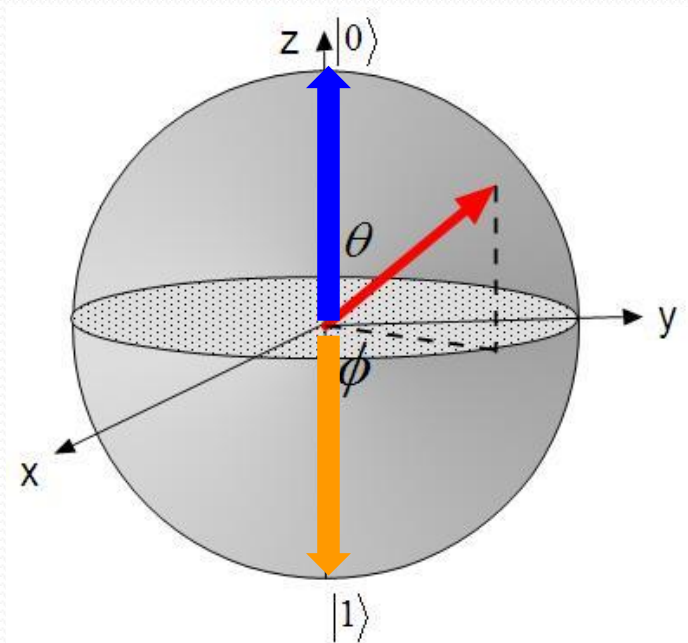
Probably not.

... IgNobel Prize
(together with future
Nobel Laureate A. Geim)



A BIT ABOUT BITS AND QUBITS

Вектор состояния кубита:



$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix},$$

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$\alpha = e^{-i\varphi/2} \cos \frac{\theta}{2},$$

$$\beta = e^{i\varphi/2} \sin \frac{\theta}{2}$$

Состояния изменяются
с помощью преобразований:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}.$$

СОСТОЯНИЯ ДВУХ КУБИТОВ

Общее
состояние:

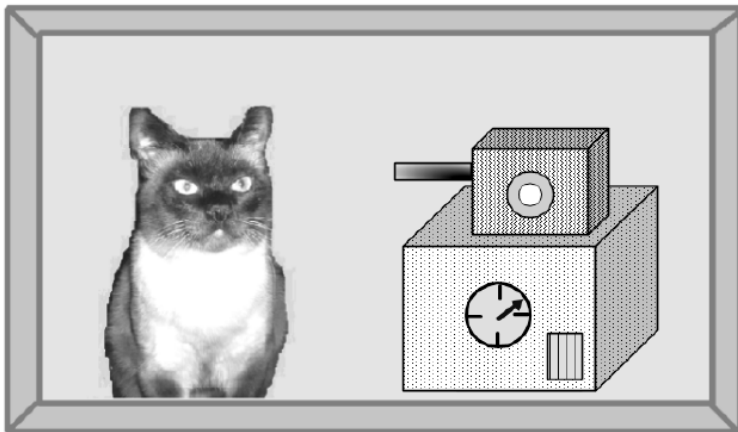
$$|\Psi\rangle = \alpha_0 |00\rangle + \alpha_1 |01\rangle + \alpha_2 |10\rangle + \alpha_3 |11\rangle, \quad |ij\rangle = |i\rangle \otimes |j\rangle$$

Сепарабельное
состояние:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

Запутанное
состояние:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \Rightarrow \text{Парадокс (эффект!) ЭПР}$$



Запутывание (перепутывание) –
ресурс для квантовых технологий

КВАНТОВЫЙ ПАРАЛЛЕЛИЗМ

или как увидеть две стороны монеты одновременно

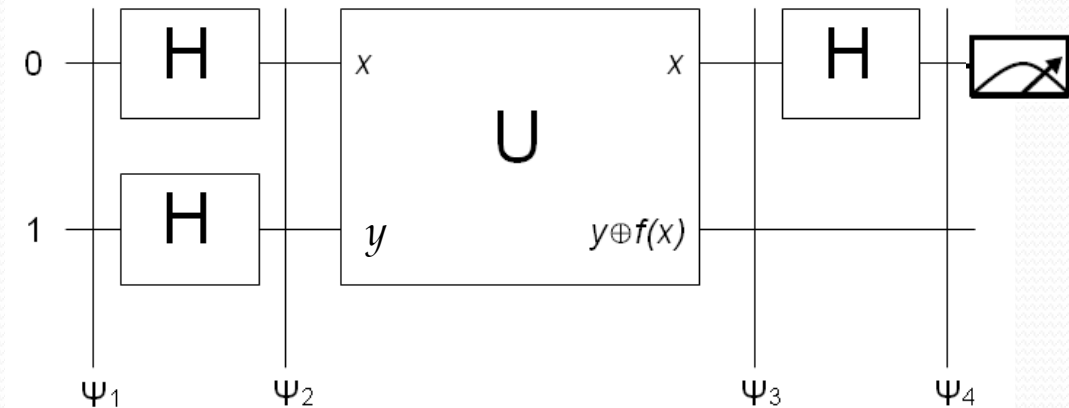
$a = (0,1)$ (сторона монеты)

$f(a) = (0,1)$ (орел/решка)

$f(a) = \text{const}$ или нет?

$[f(a) = 0, 1, a, \text{not}(a)]$

сколько нужно измерений?!



Алгоритм Дойча :

[I. Chuang *et al.*, Nature (1998)]

[S. Gulde *et al.*, Nature (2003)]

$$|\psi_1\rangle = |01\rangle \equiv |0\rangle|1\rangle$$

$$|\psi_2\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad \text{- суперпозиционные состояния}$$

$$|\psi_3\rangle = \frac{1}{2} \left((-1)^{f(0)} |0\rangle + (-1)^{f(1)} |1\rangle \right) (|0\rangle - |1\rangle) \quad \text{- содержит два значения функции}$$

$$|\psi_4\rangle = |f(0) \oplus f(1)\rangle \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$f(0) \oplus f(1) = 0 \Rightarrow f(a) = \text{const}$$

$$f(0) \oplus f(1) = 1 \Rightarrow f(a) \neq \text{const}$$

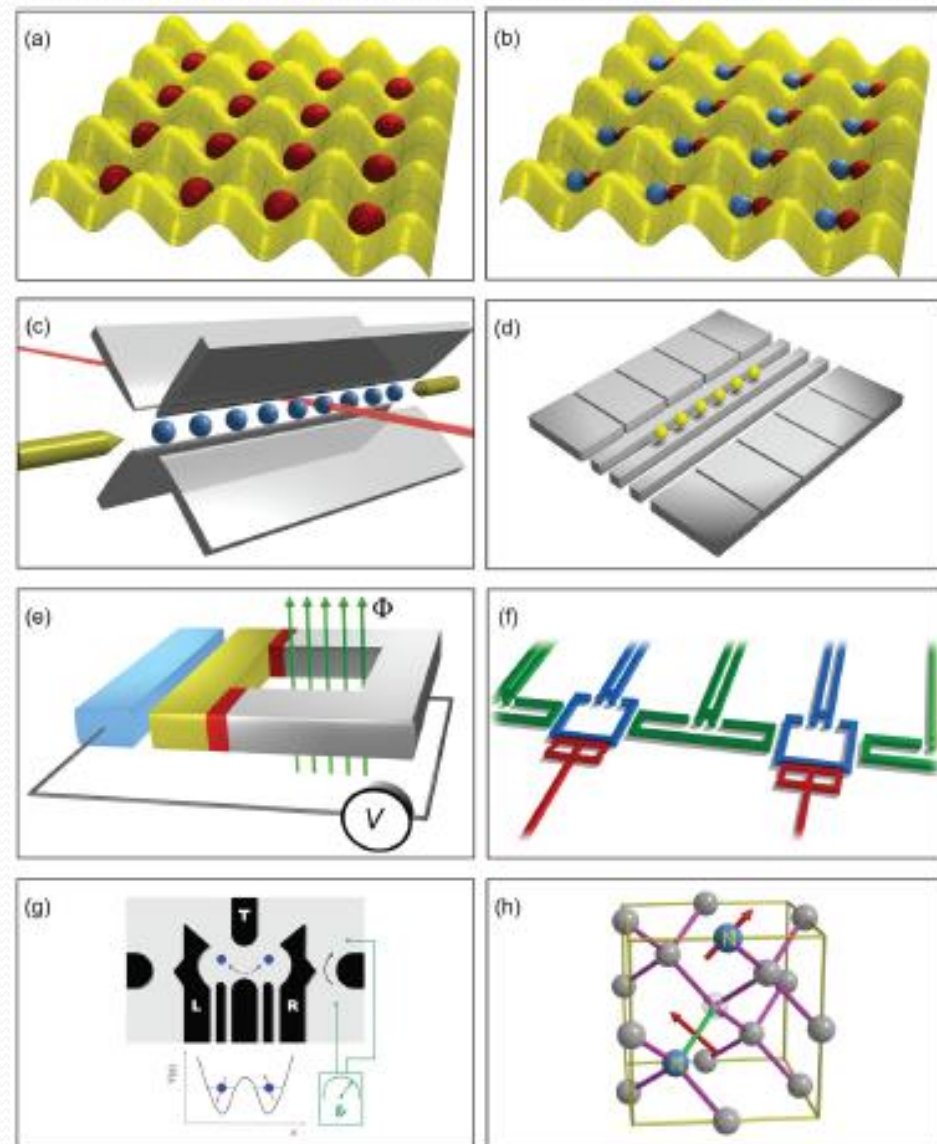
КАНДИДАТЫ В КУБИТЫ: Good things come in small packages (мал золотник, да дорог)

Микроскопические:

ИОНЫ в электромагнитных ловушках,
поляризационные состояния **фотонов** в резонаторе,
ядерные **спины** молекул,
...

Мезоскопические и макроскопические:

электронные состояния в **квантовых точках**,
магнитные **наночастицы**,
заряд или фаза в **Джозефсоновских структурах**,
...



Микроскопические:
 Могут использоваться как кубиты с большими временами декогерентности

... но их трудно интегрировать в контуры, приборы сложны и дороги

Мезоскопические:
 Существуют технологии изготовления масштабируемых и интегрируемых структур

... но трудно изолировать от диссипативного окружения

Table 1 Comparison between different systems used for qubits.

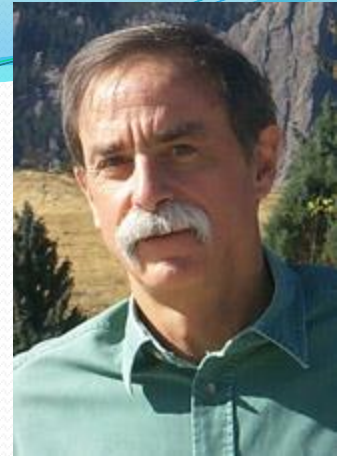
	<i>Atom, Molecule, Ion</i>	<i>Electron spin</i>	<i>Nuclear spin</i>	<i>Supercond. qubit</i>
Size	$\sim 10^{-10}$ m	$\sim 10^{-16}$ m	$\sim 10^{-15}$ m	$\sim 10^{-6}$ m
Energy gap	10^5 – 10^6 GHz, GHz (Rydberg atoms)	\sim 1–10 GHz	\sim 10 GHz	1–20 GHz
Photon	Optical, Microwave	Microwave	Microwave	Microwave
Operating temperature	nK to μ K	\sim mK	\sim mK	\sim 10 mK
Coherence time	ms to s	\sim ms	\sim s	1–10 μ s
Coupling type	Electric/Magnetic	Magnetic	Magnetic	Electric/Magnetic
Coupling strength with the cavity	$<$ kHz (B-field), \sim 10 kHz (E-field), \sim 10 MHz (Rydberg atoms)	\sim 100 Hz	\sim 0.1 Hz	0.1–1 GHz

Nobel Prize in Physics for 2012

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided

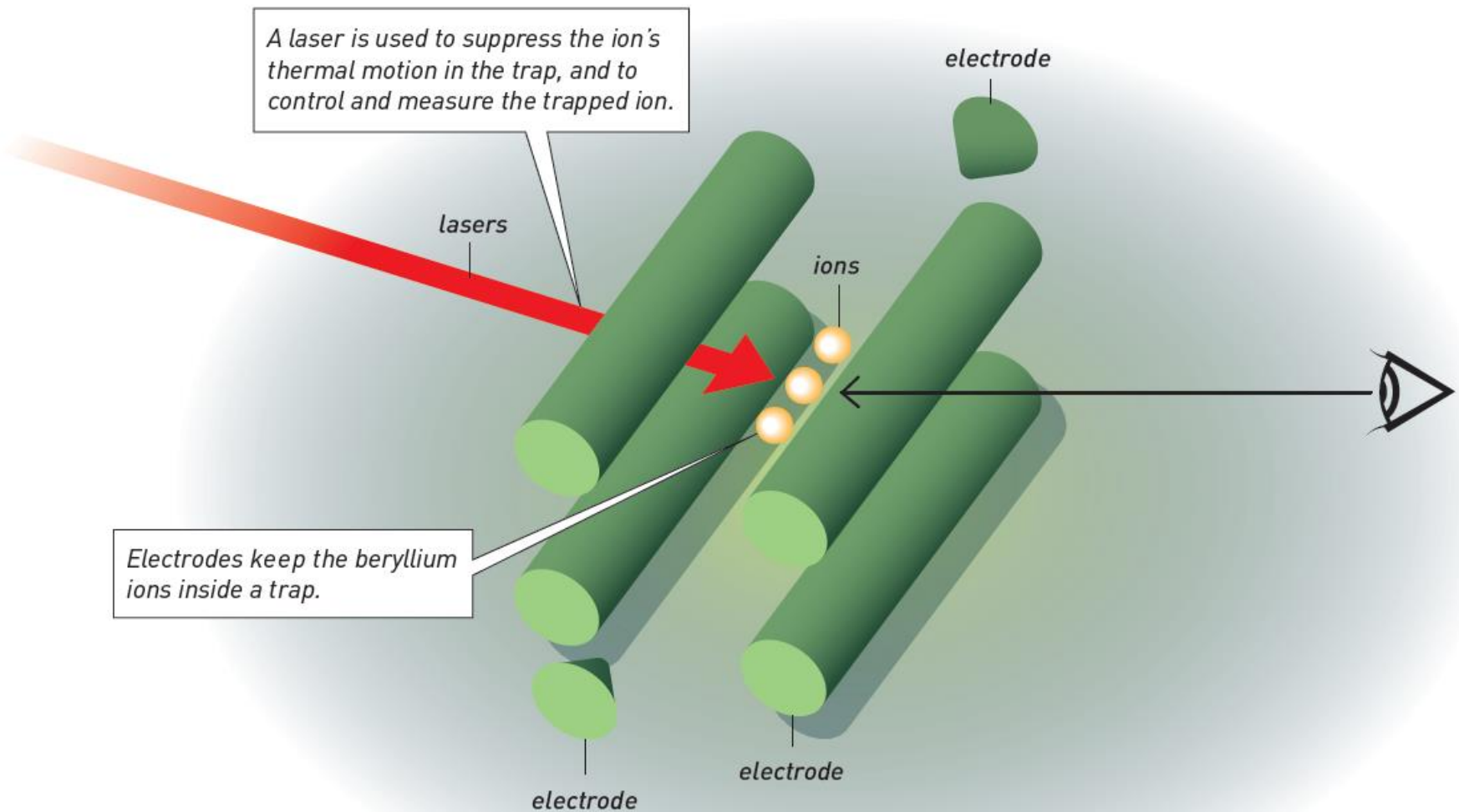
to award the Nobel Prize in Physics to **Serge Haroche** and **David J. Wineland**

"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"



Their methods have enabled this field of research to take the very first steps towards building a new type of super fast computer based on quantum physics. Perhaps the **quantum computer** will change our everyday lives in this century in the same radical way as the **classical computer** did in the last century. The research has also led to the construction of extremely **precise clocks**.

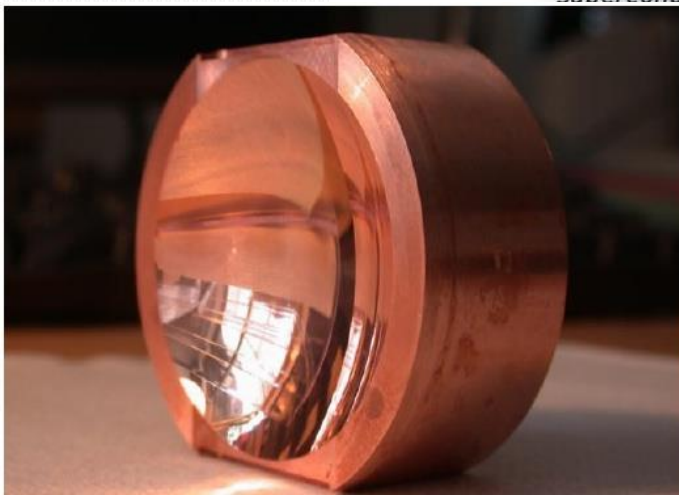
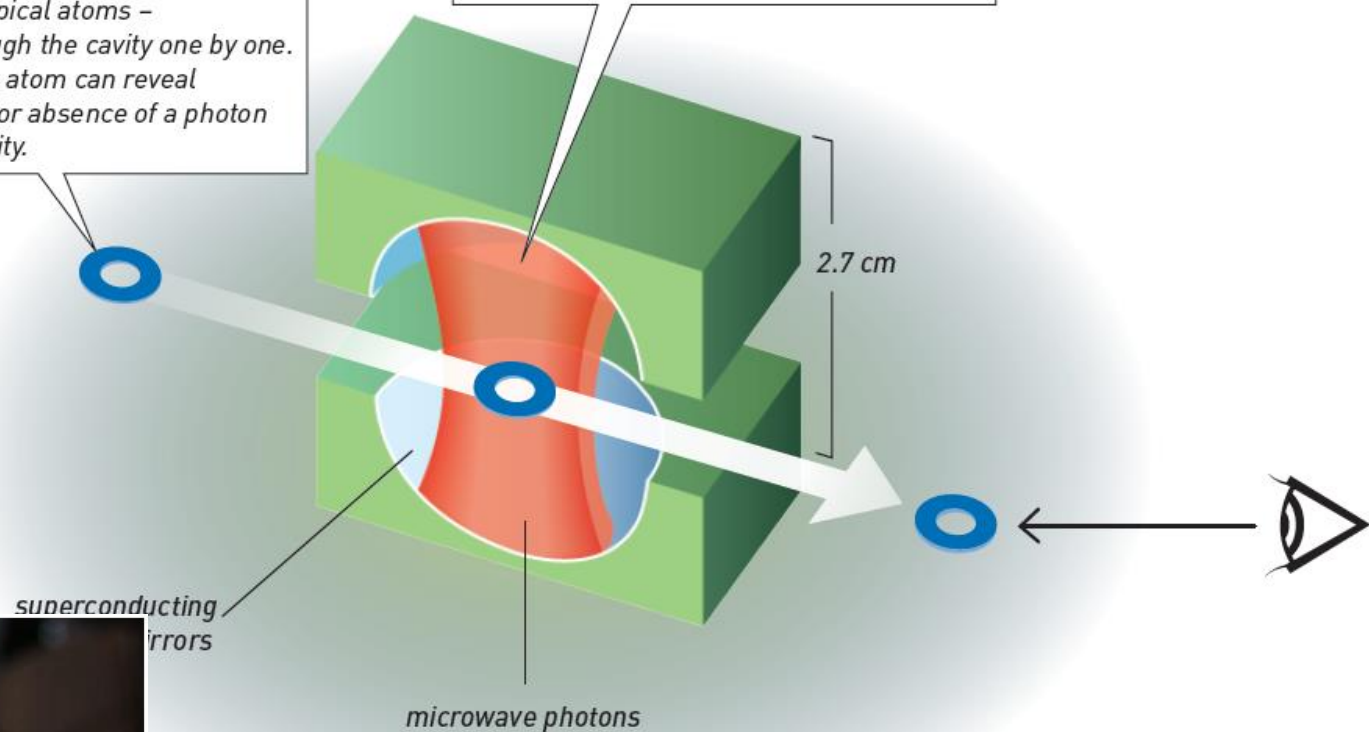
CONTROLLING SINGLE IONS IN A TRAP



CONTROLLING SINGLE PHOTONS IN A TRAP

Rydberg atoms – roughly 1,000 times larger than typical atoms – are sent through the cavity one by one. At the exit the atom can reveal the presence or absence of a photon inside the cavity.

Photons bounce back and forth inside a small cavity between two mirrors for more than a tenth of a second. Before it disappears the photon will have travelled a distance of one trip around the Earth.



CEA, Saclay

Напыление: 12 мкм ниобия

10^9 столкновений с зеркалами

Время жизни – 0.1 сек. при 0.8 К

Пробег – 40 000 км

ON THE VERGE OF A NEW COMPUTER REVOLUTION

A qubit – can be 1 and 0 at the same time.

Two qubits can *simultaneously* take on four values – 00, 01, 10 and 11.

Each additional qubit doubles the amount of possible states.

For n qubits there are 2^n possible states, and a quantum computer of only 300 qubits could hold 2^{300} values simultaneously, more than the number of atoms in the universe. (Googol: $10^{100} \approx 2^{332}$)

(Современный суперкомпьютер: терабайт оперативной памяти – 10^{12} бит)

Today, the most advanced quantum computer technology is based on trapped ions, and has been demonstrated with up to 14 qubits.

Регистр из трех битов может хранить только 3 бита информации.

Регистр из трех кубитов хранит вследствие квантовой запутанности кубитов все восемь возможных состояний трех ячеек.

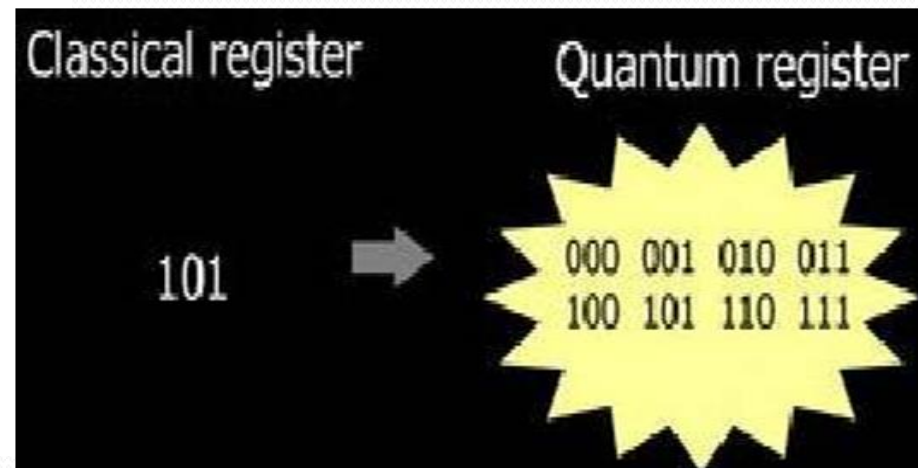


СХЕМА КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА



К. А. Валиев, *Квантовые компьютеры и квантовые вычисления*, УФН (2005)

«Оборудование» (Hardware):

кубиты

+ контролирующая электроника

+ измеритель

«Программное обеспечение» (Software):

теория вычислений, алгоритмы, криптография, телепортация, ...

Quantum computers

T. D. Ladd^{1†}, F. Jelezko², R. Laflamme^{3,4,5}, Y. Nakamura^{6,7}, C. Monroe^{8,9} & J. L. O'Brien¹⁰

Over the past several decades, quantum information science has emerged to seek answers to the question: can we gain some advantage by storing, transmitting and processing information encoded in systems that exhibit unique quantum properties? Today it is understood that the answer is yes, and many research groups around the world are working towards the highly ambitious technological goal of building a quantum computer, which would dramatically improve computational power for particular tasks. A number of physical systems, spanning much of modern physics, are being developed for quantum computation. However, it remains unclear which technology, if any, will ultimately prove successful. Here we describe the latest developments for each of the leading approaches and explain the major challenges for the future.

Приложения: специфические задачи (факторизация чисел и др.); моделирование квантовых систем; новые приборы (детекторы)

Where Is My Quantum Computer?

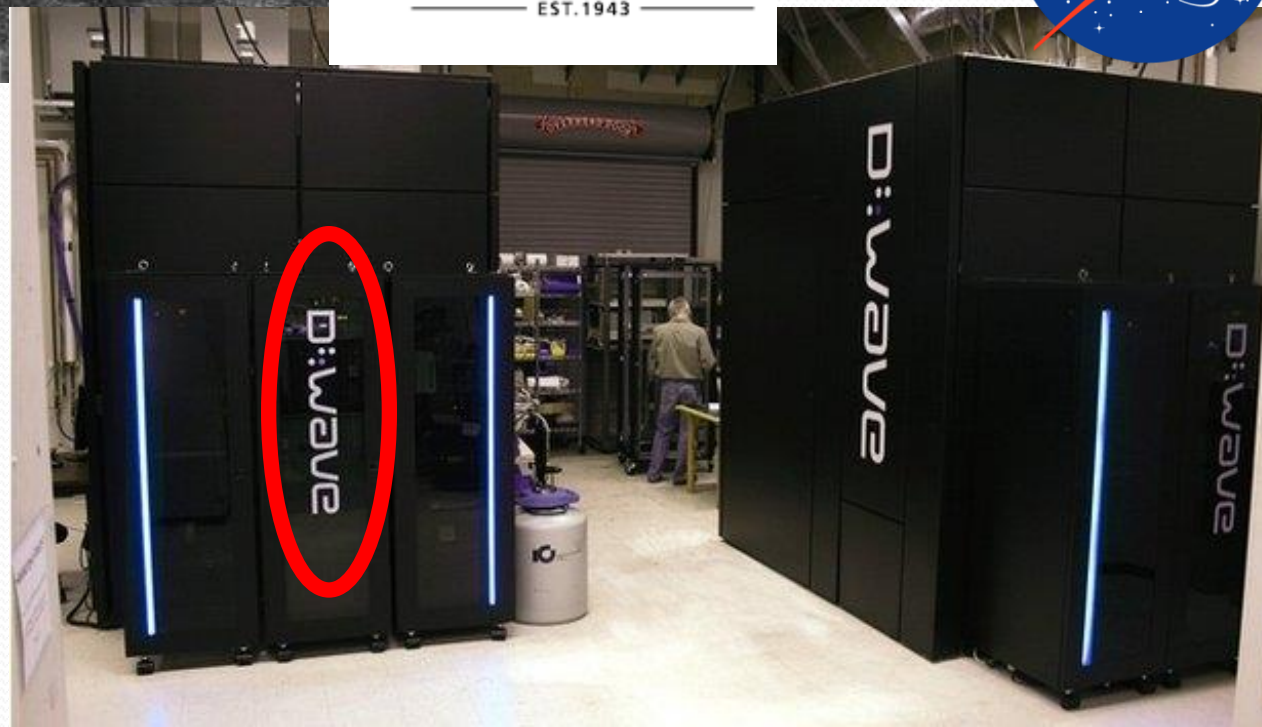
P. Hemmer¹ and J. Wrachtrup²

Science **324**, 473 (2009)

Quantum vs. “classical” computer



Компьютер
D-Wave 2000Q™
(2017 г.):
2048 связанных
джозефсоновских
кубитов из ниобия
при температуре
15 мК.



ДИСКРЕТНЫЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ

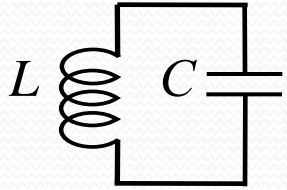
Задача о коммивояжере: найти кратчайший путь между N городами. Задача имеет экспоненциальную сложность. Например, между 10-ю городами – 180 000 возможных маршрутов, а между 12-ю – 20 000 000.

Solving optimization problems can be thought of as trying to find the lowest point on a landscape of peaks and valleys. Every possible solution is mapped to coordinates on the landscape, and the altitude of the landscape is the "energy" or "cost" of the solution at that point. The aim is to find the lowest point on the map and read the coordinates, as this gives the lowest energy, or optimal solution to the problem.

The special properties of quantum physics allow the quantum computer to explore this landscape in a novel way called quantum tunneling. It is like a layer of water that covers the entire landscape. As well as running over the surface, it can tunnel through the mountains as it looks for the lowest valley. The water is an analogy for the probability that a given solution will be returned. When the quantum computations occur, the 'water' (or probability) is pooled around the lowest valleys. The more water in a valley, the higher the probability of that solution being returned. A classical computer, on the other hand, is like a single traveler exploring the surface of a landscape one point at a time.

Задача переформулируется в виде нахождения минимума определенного потенциала. За счет квантового туннелирования – квантовый процессор сам находит этот минимум.

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КУБИТЫ: НУЖНА НЕЛИНЕЙНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ



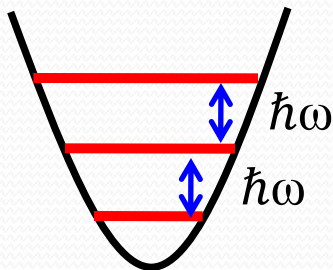
Линейная
индуктивность
 $L = \Phi / I$

$$H = \frac{1}{2} CV^2 + \frac{1}{2} LI^2$$

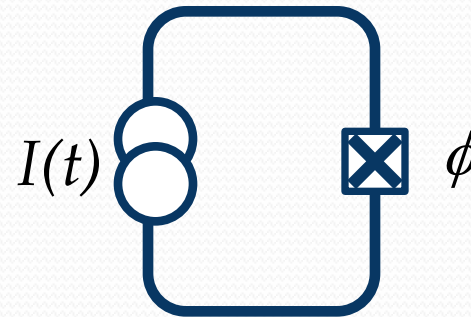
$$(V = \dot{\Phi}, I = \Phi / L)$$

$$x = V, m = C, \omega^2 = 1 / LC$$

$$H = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$



Единственным бездиссипативным
нелинейным элементом является
контакт Джозефсона



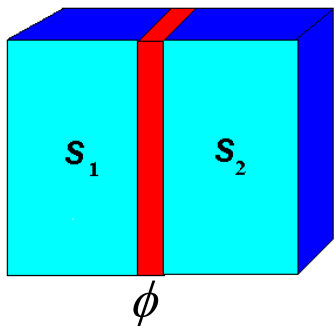
$$I = I_c \sin \phi$$

Нелинейная индуктивность

$$L_J = \frac{d\Phi}{dI} = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c \cos \phi}$$

$$\phi = 2\pi\Phi / \Phi_0$$

ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА



В кольце с потоком Φ :

$$\phi = 2\pi\Phi / \Phi_0$$

$$\Phi_0 = h / 2e$$

Итак, контакт Джозефсона ведет себя как нелинейная индуктивность

Кстати, важное приложение – СКВИД: чувствительный измеритель магнитного поля – позволяет измерять поля в 10^{11} раз слабее магнитного поля Земли.

Используются для измерения тока, напряжения, температуры и т.д. в медицине, дефектоскопии, геофизике.

Стационарный эффект Джозефсона:

$$I = I_c \sin \phi$$

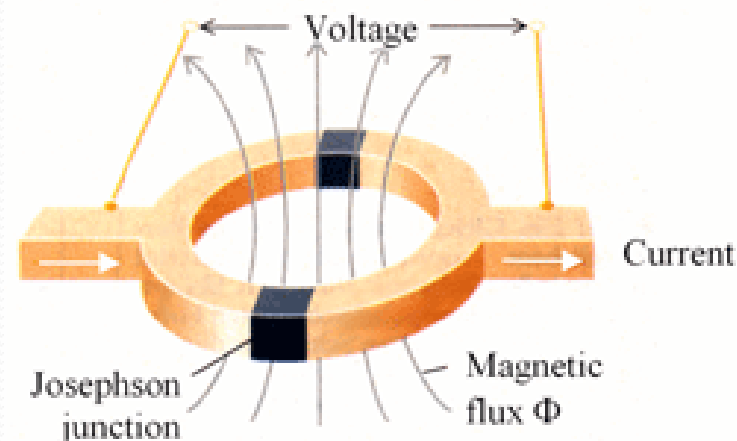
Если через контакт пропускают ток больше I_c , то кроме сверхпроводящего тока I_J через контакт протекает диссипативный ток, а на контакте возникает

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Из определения индуктивности $V = L(dI / dt)$:

$$\frac{dI}{dt} = I_c \cos \phi \frac{d\phi}{dt} = \frac{2eI_c}{\hbar} \cos \phi \cdot V(t)$$

$$L_J = \frac{\hbar}{2eI_c \cos \phi}.$$



1962:

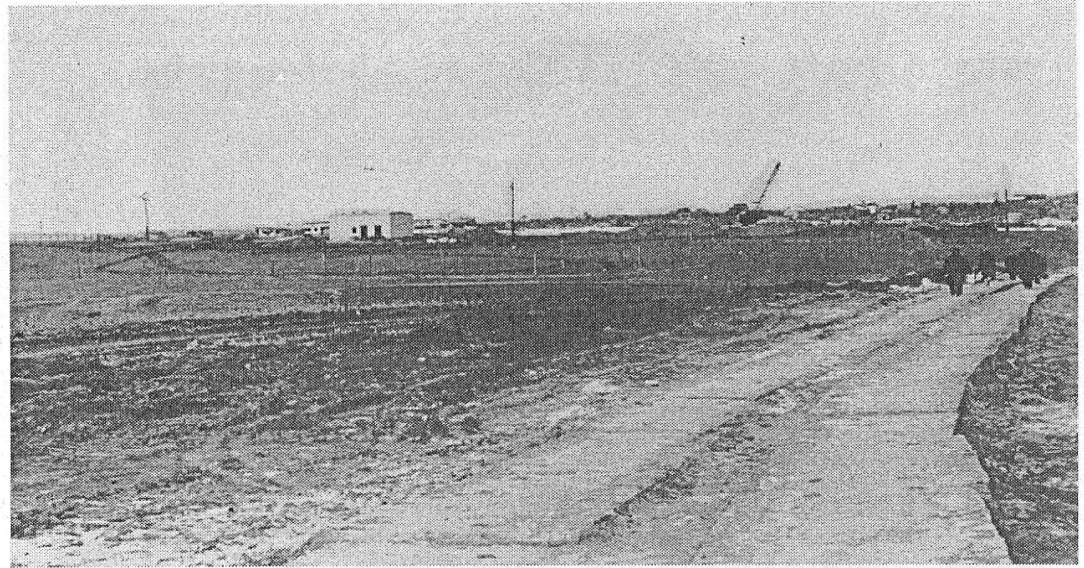
Б. Джозефсон предсказал протекание dc и ac тока через сверхпроводящий туннельный контакты

1963:

Первое наблюдение dc эффекта Джозефсона Андерсоном и Рауэллом

1964:

Первое прямое наблюдение Джозефсоновской генерации (нестационарного эффекта Джозефсона) Янсоном, Свистуновым и Дмитренко

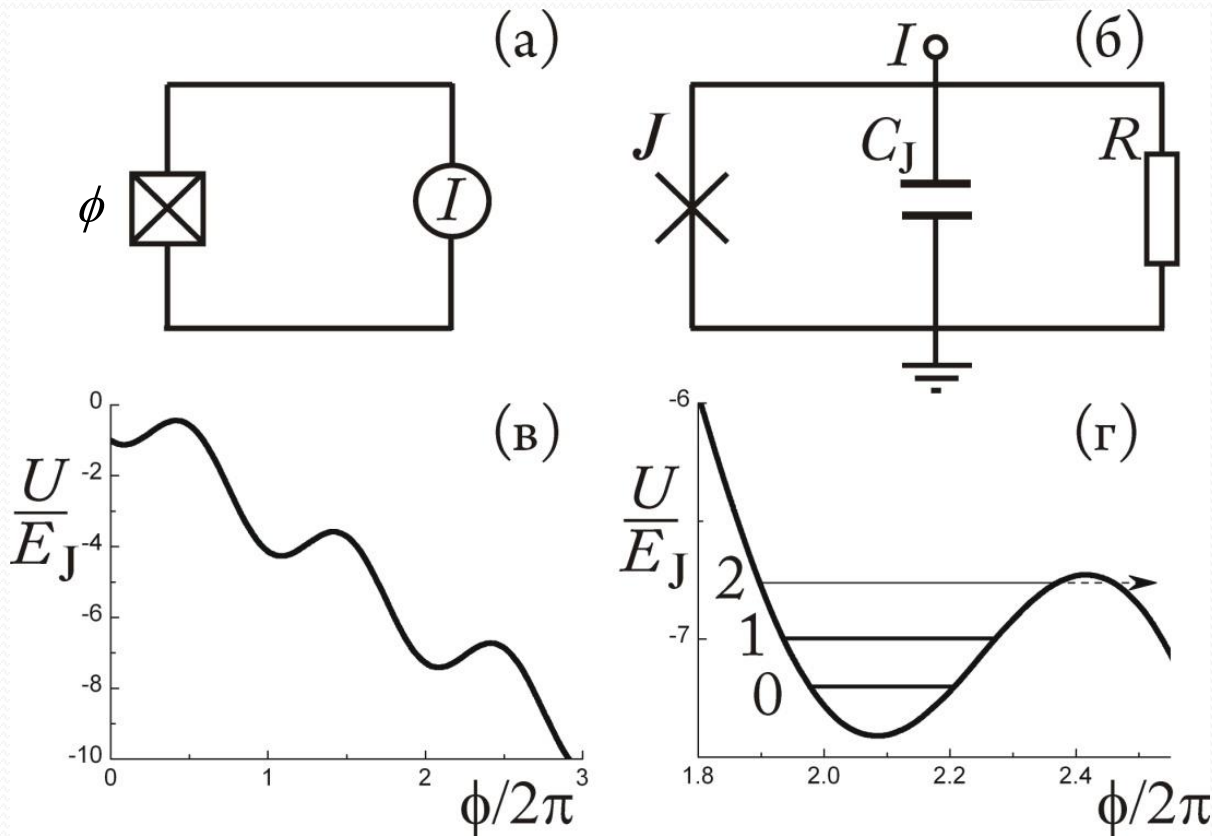


1960: ФТИНТ



1962

КОНТАКТ С ТОКОМ - ФАЗОВЫЙ КУБИТ



(а) Схема.

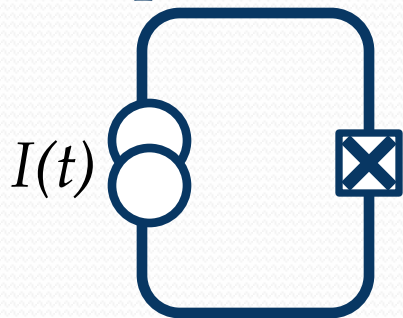
(б) Эквивалентная электрическая схема.

(в) Потенциальная энергия как функция разности фаз п.п. ϕ на контакте.

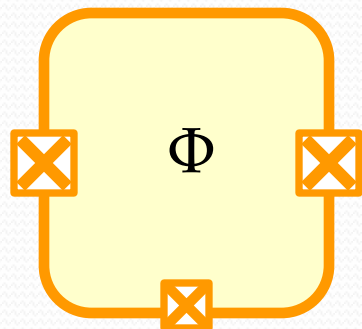
(г) То же - вблизи локального минимума.

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ КУБИТЫ

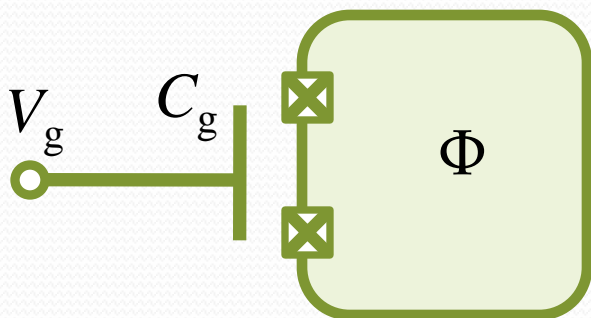
фазовый



ПОТОКОВЫЙ



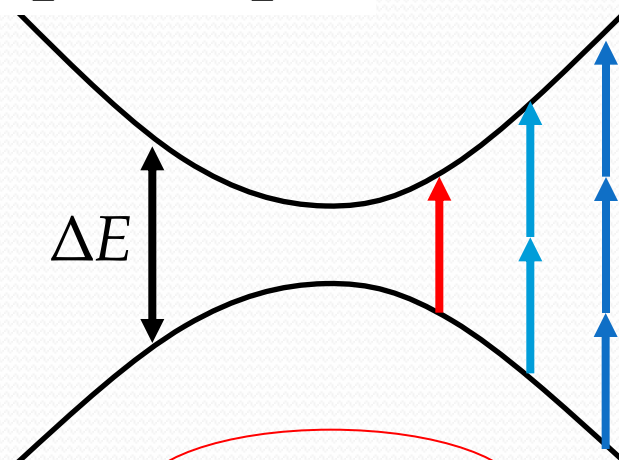
зарядовый



изменяемые
параметры

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + A \sin \omega t$$

$$H = -\frac{\Delta}{2} \sigma_x - \frac{\varepsilon(t)}{2} \sigma_z \quad \Delta E = \sqrt{\Delta^2 + \varepsilon_0^2}$$



$$\Delta E \approx n \cdot \hbar \omega$$

характеристика
(спектроскопия)

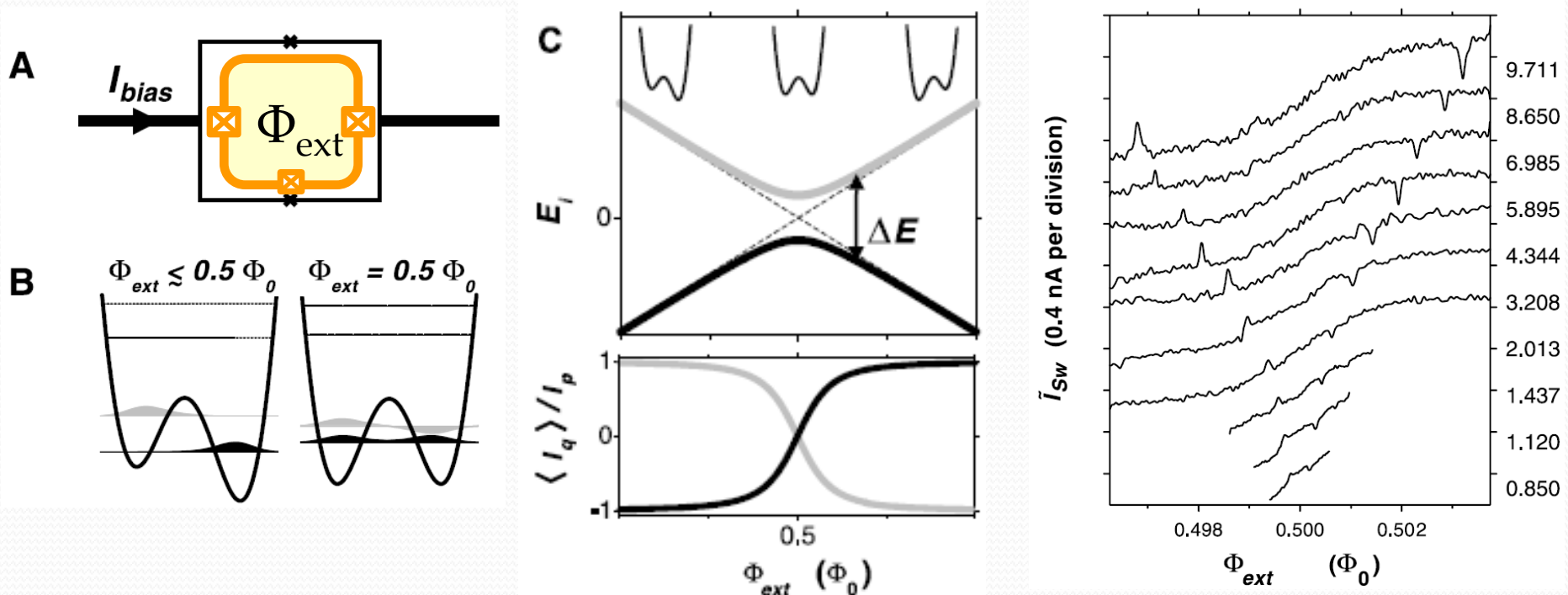
контроль

[Омельянчук, Ильичев, Шевченко,
Квантовые когерентные явления в
джозефсоновских кубитах, Киев,
изд. Наукова думка (2013)]

КВАНТОВАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Суперпозиция макроскопических состояний в таких системах была впервые продемонстрирована в 1999-2000 гг.

Nakamura et al., Nature (1999)
Friedman et al., Nature (2000)
van der Wal et al., Science (2000)

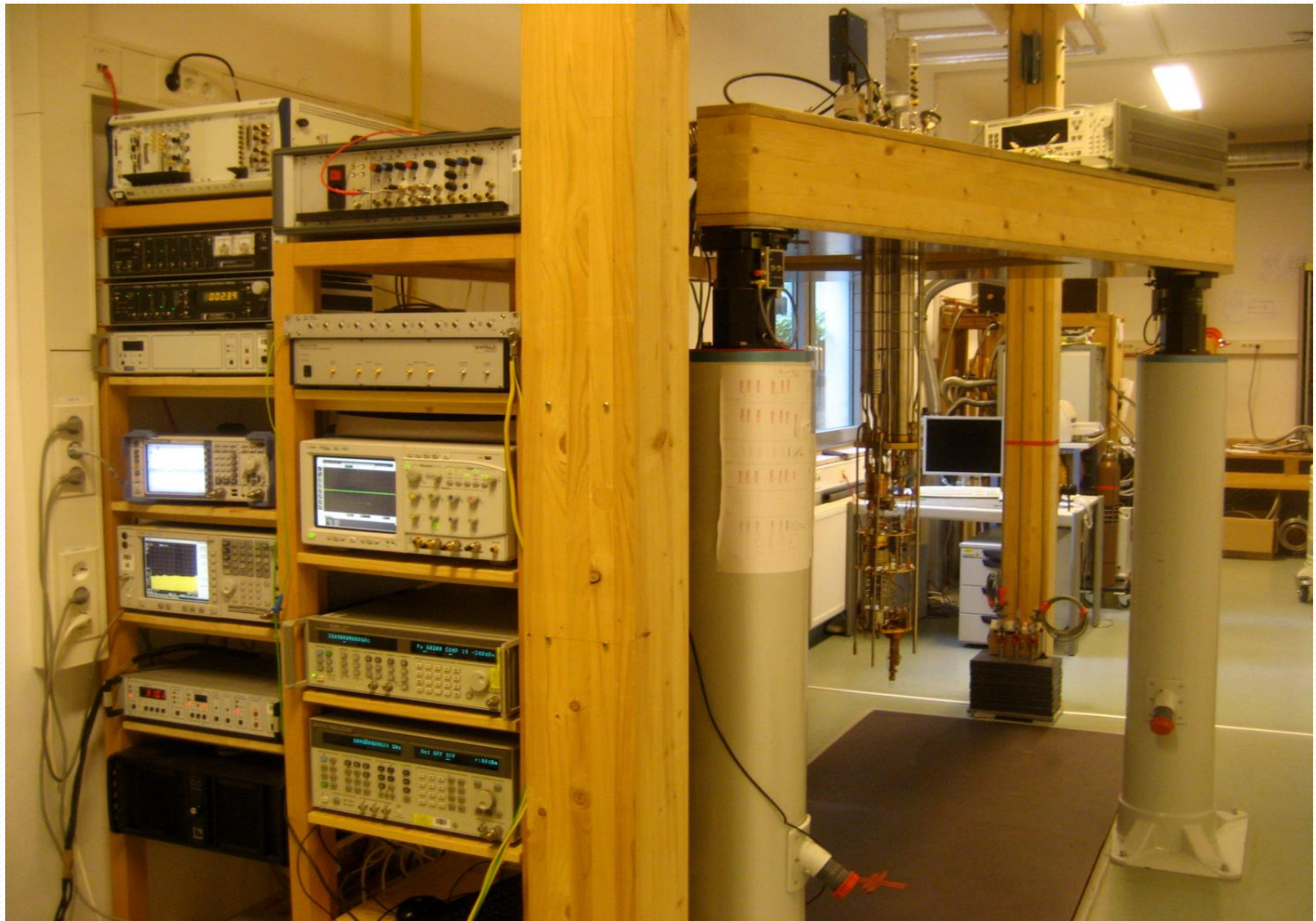


The two classical states have persistent currents of 0.5 microampere and correspond to the center-of-mass motion of millions of Cooper pairs.

Microwave spectroscopy demonstrates superpositions of two macroscopic persistent-current states in a loop

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

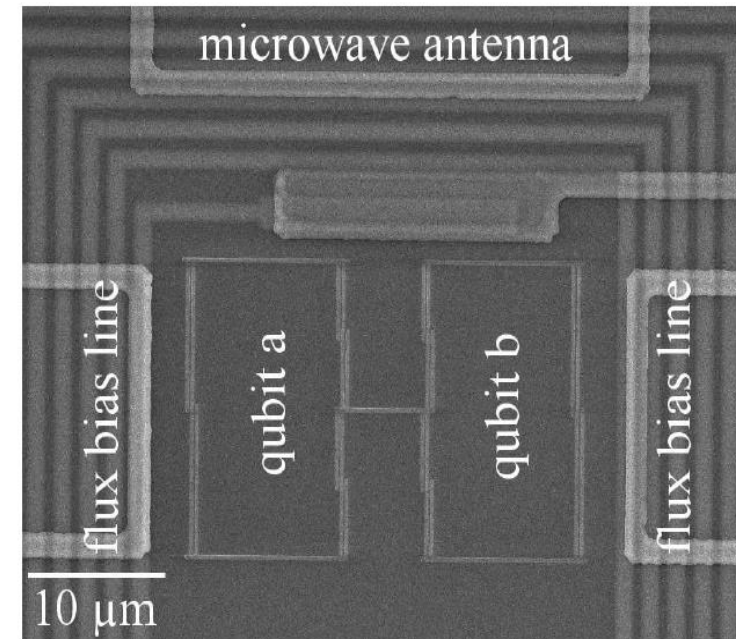
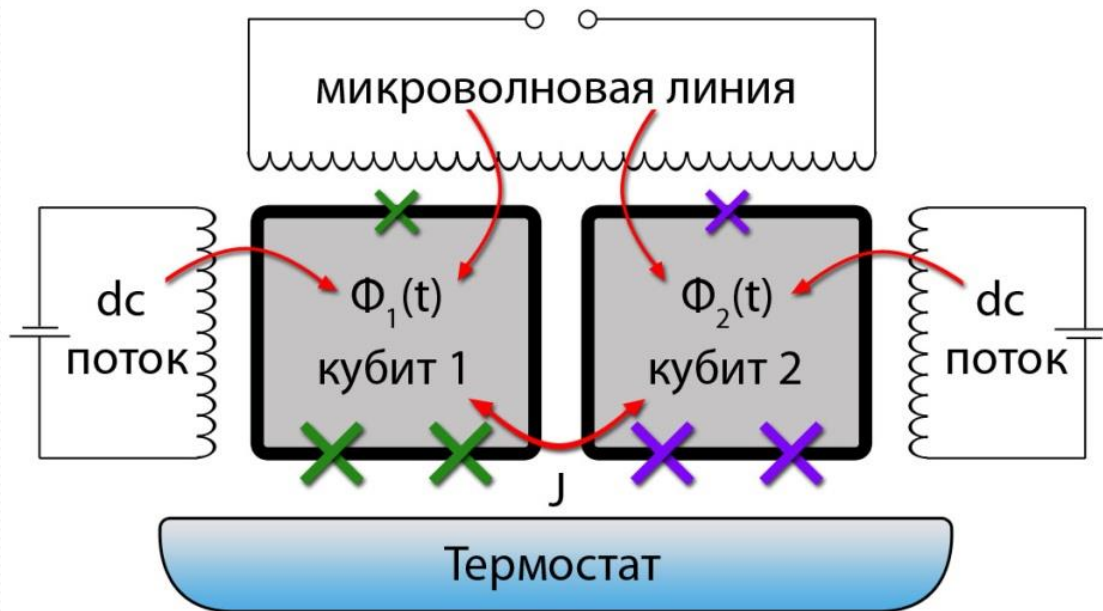
(Институт Фотонных Технологий, Йена, Германия)



СИСТЕМА ДВУХ КУБИТОВ

Аналогия: 1 кубит – атом; 2 кубита – молекула:

$$\hat{H} = \sum_{i=a,b} \left(-\frac{\Delta_i}{2} \hat{\sigma}_x^{(i)} - \frac{\epsilon_i(t)}{2} \hat{\sigma}_z^{(i)} \right) + \frac{J}{2} \hat{\sigma}_z^{(a)} \hat{\sigma}_z^{(b)}$$



Эксперимент: IPHT, Jena

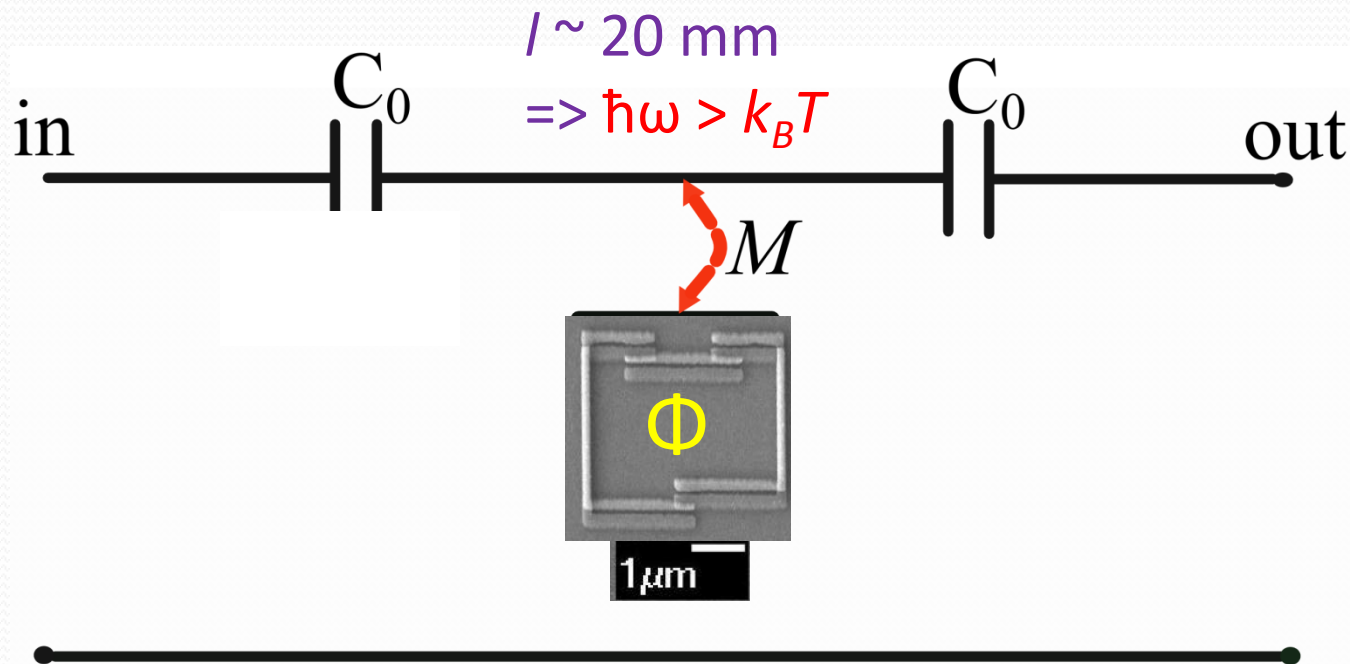
Характерные параметры:

число электронов:	10^9 ,	температура:	50 мК,
частоты (энергии):	1-10 ГГц,	операционное время:	1 нс,
времена декогеренции:	0.1-1 мксек,	токи:	0.01-1 мкА

Квантовая электродинамика контуров (**Circuit** Quantum Electrodynamics, cQED)

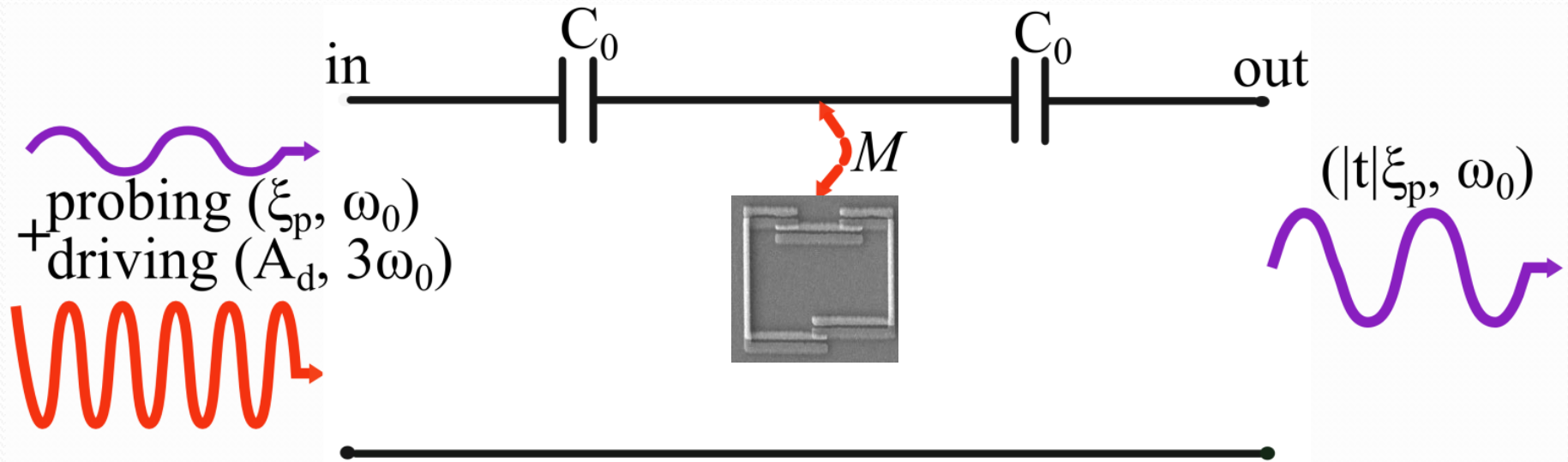
КЭД (оптических) резонаторов (cavity QED): отдельные атомы взаимодействуют с небольшим числом фотонных мод.

Характерная система cQED: твердотельный кубит связанный с резонатором на линии передач



СИСТЕМА КУБИТ + РЕЗОНАТОР

На резонатор подают сильный сигнал на **третьей гармонике** и слабый пробный на **основной гармонике**:



Можно ли **один сигнал** использовать, чтобы изменить **другой**?
Без кубита: нет. С кубитом: да.

Рассмотрим сначала режим слабого возбуждения:

Возбуждение с амплитудой A_d на третьей гармонике индуцирует осцилляции заселенности уровней кубита с частотой Раби Ω_R .

Когда $\Omega_R \sim \omega_0$, пробный сигнал может быть усилен или ослаблен.

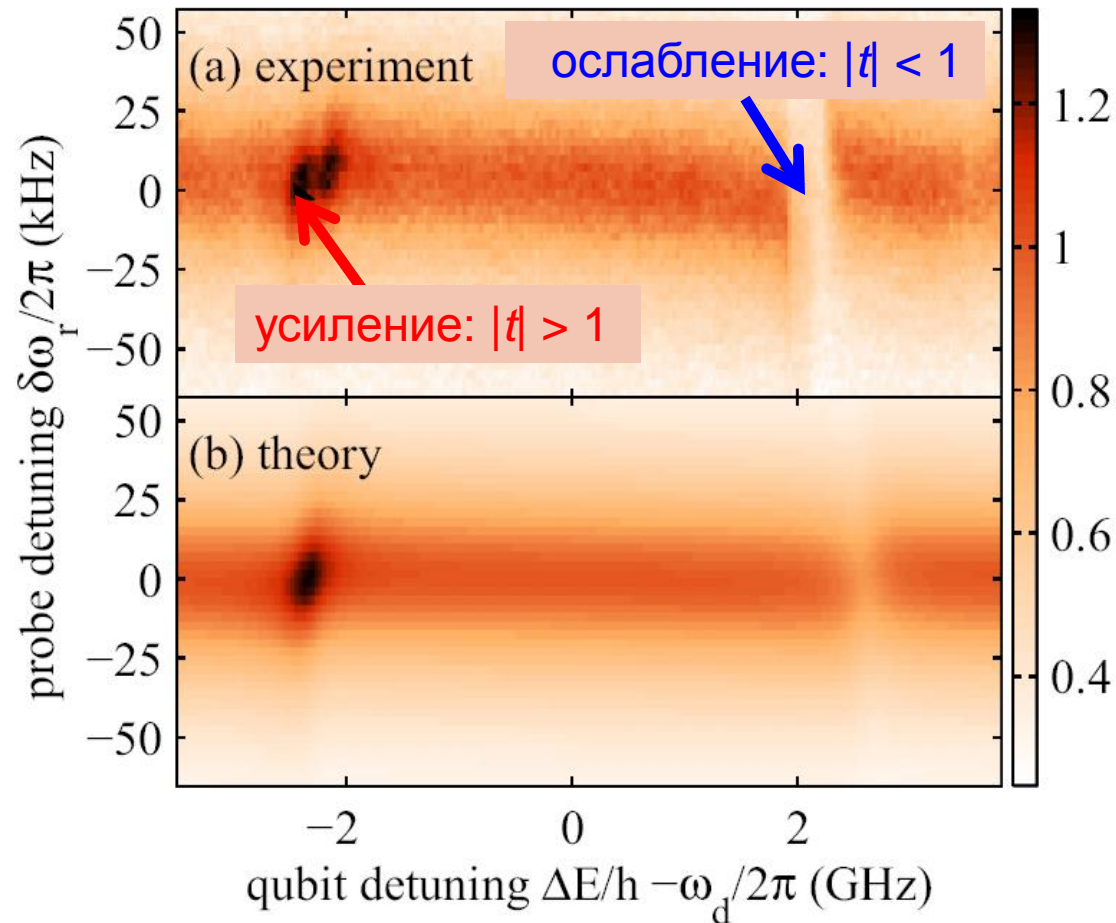
УСИЛЕНИЕ И ОСЛАБЛЕНИЕ СИГНАЛА

Shevchenko, Oelsner, Greenberg, Macha, Karpov, Grajcar, Hübner, Omelyanchouk, E. Il'ichev, PRB (2014)

Мы решали уравнение Линдблада
(аналитически и численно)

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] + \sum_{\alpha} \mathcal{L}_{\alpha}[\rho]$$

и посчитали
нормированный
коэффициент
прохождения $|t|$ как
функцию энергетического
смещения (зависит от
магнитного потока) и
частоты пробного сигнала.



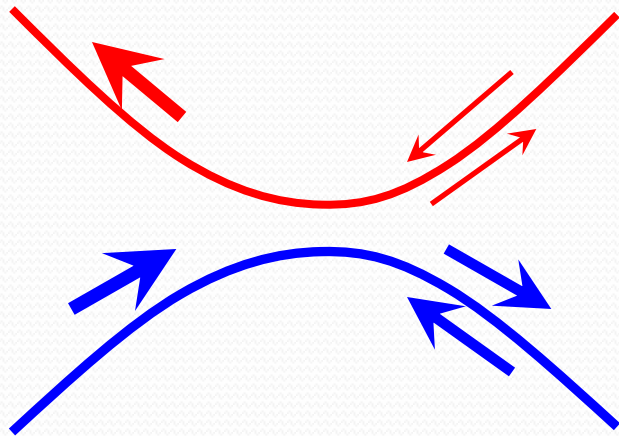
Рассмотрим далее
режим сильного возбуждения

Переход Ландау-Зинера-Штюкельберга-Майораны

1932 г.



Эти четверо ученых, моложе 30ти, из четырех разных стран, в 1932 году выполнили близкие работы о переходах в двухуровневых системах.



При изменении параметров происходит переход с основного на возбужденное состояние (с вероятностью Ландау-Зинера).

При повторном процессе, определенная фаза (Штюкельберга) набирается волновой функцией, что приводит к интерференции состояний.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Гамильтониан двухуровневой системы:

$$H = -\frac{\Delta}{2} \sigma_x - \frac{\varepsilon(t)}{2} \sigma_z$$

с зависящим от времени смещением:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + A \sin \omega t.$$

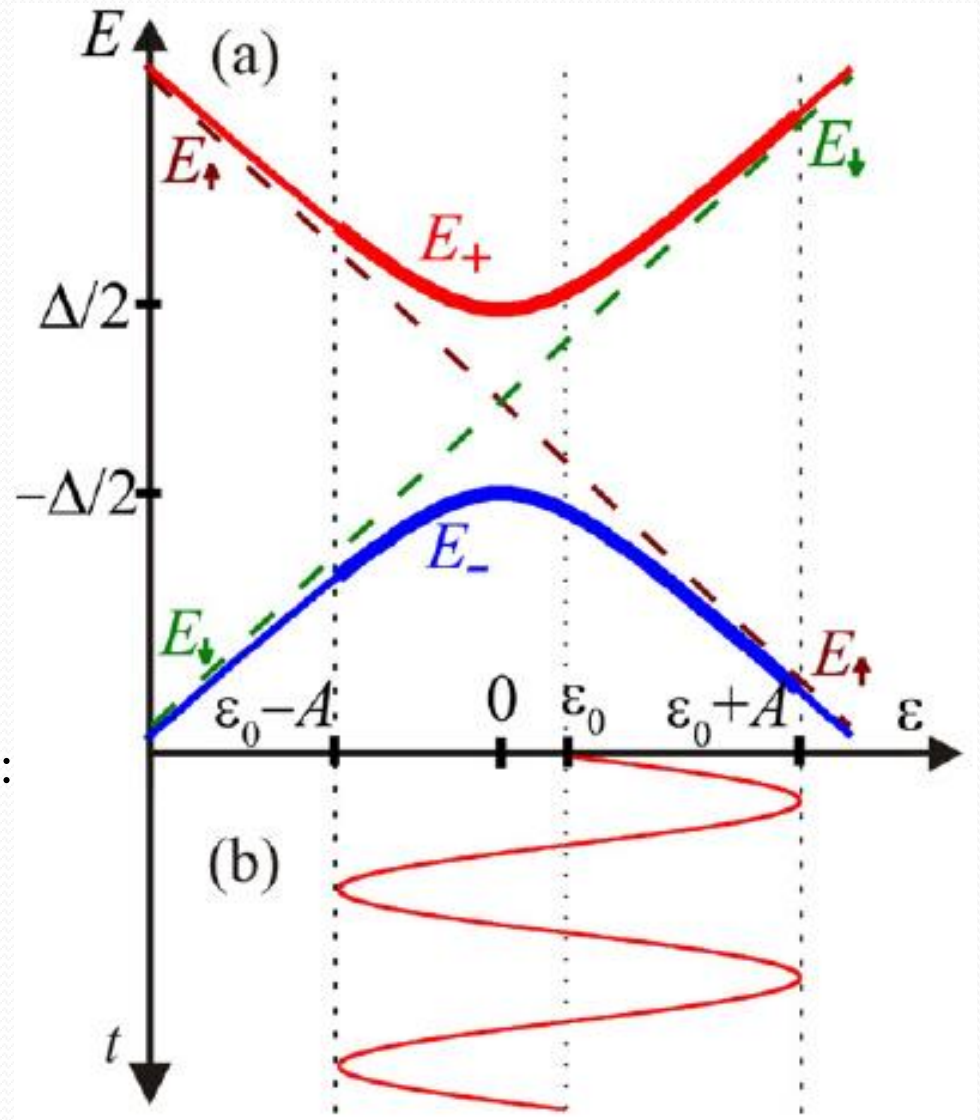
Адиабатические уровни энергии:

$$E_{\downarrow\uparrow} = \pm \frac{1}{2} \varepsilon_0$$

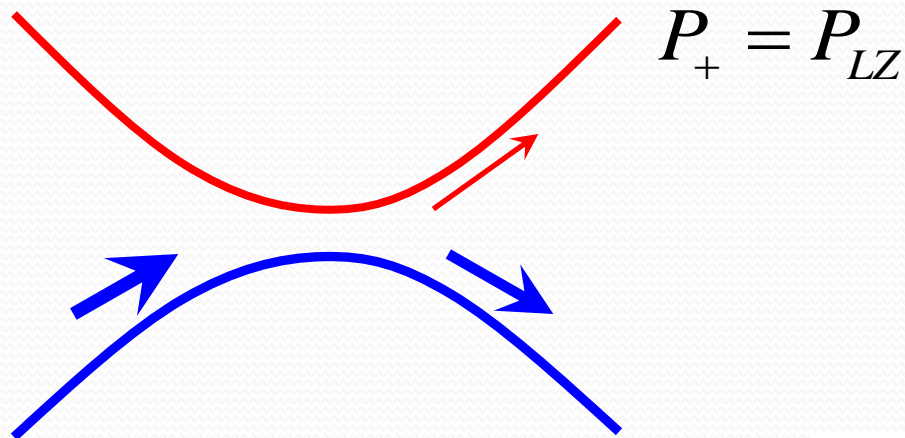
А-адиабатические уровни энергии:

$$E_{\pm} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon(t)^2 + \Delta^2}$$

Задача: найти вероятность заселенности верхнего уровня.



ОДНОКРАТНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ: ПЕРЕХОД Л.-З.



$$P_+ = P_{LZ}$$

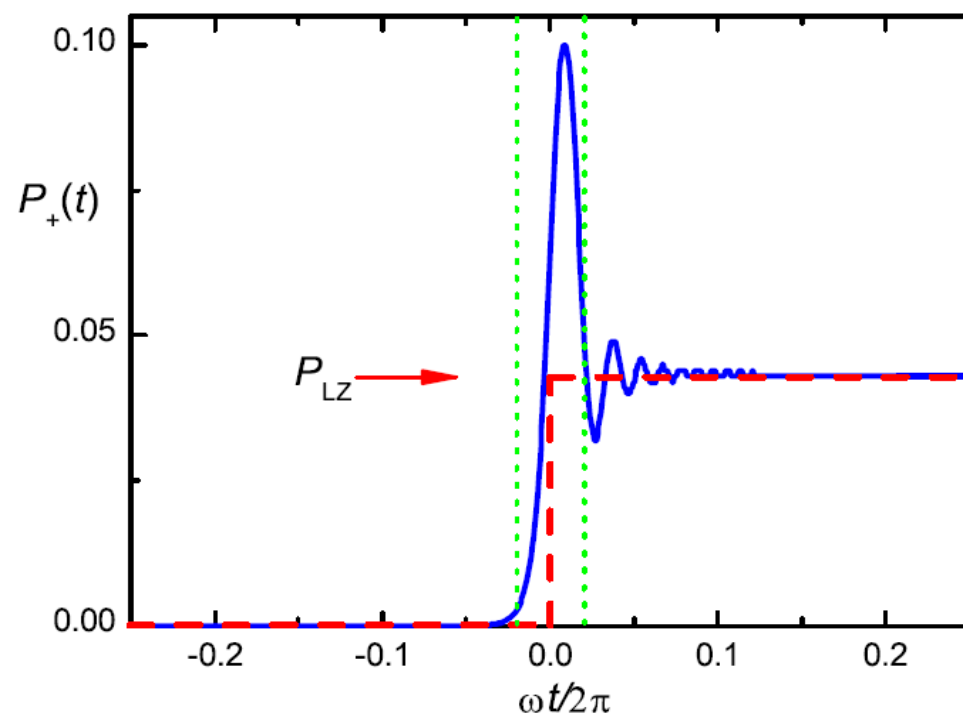
Формула Ландау-Зинера (ЛЗ):

$$P_{LZ} = \exp(-2\pi\delta)$$

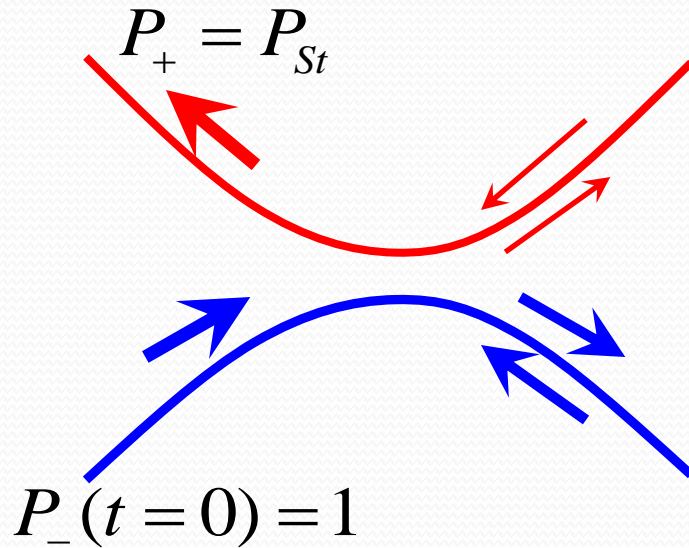
$$\delta = \frac{\Delta^2}{4A\hbar\omega}, \quad A = A\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_0}{A}\right)^2}$$

$$P_-(t=0) = 1$$

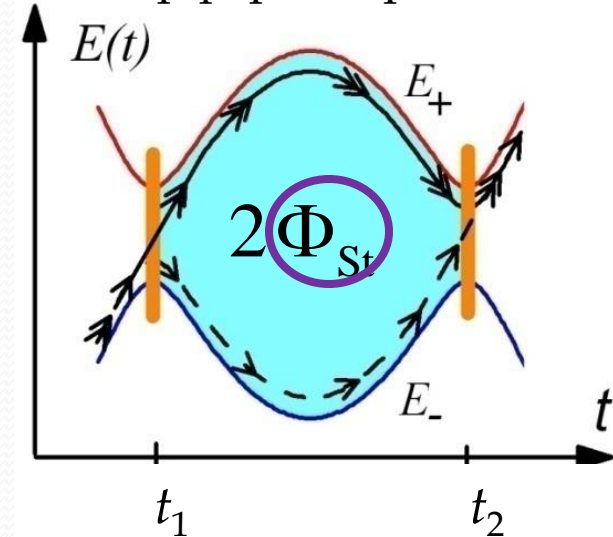
В этом случае можно решить
уравнение Шредингера
аналитически,
и **численно**



ДВУКРАТНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ: ОСЦИЛЛЯЦИИ ШТЮКЕЛЬБЕРГА



Временная эволюция – аналогична схеме интерферометра Маха-Цендера:



Конечная вероятность заселенности:

$$P_{St} = 4P_{LZ}(1 - P_{LZ}) \sin^2 \Phi_{St},$$

где $\Phi_{St} \approx \frac{1}{2\hbar} \int_{t_1}^{t_2} dt \sqrt{\varepsilon(t)^2 + \Delta^2} = \frac{1}{2\hbar} \int_{t_1}^{t_2} dt (E_+ - E_-).$

В большинстве задач микроскопической физики эта фаза усредняется:

$$\bar{P}_{St} = 2P_{LZ}(1 - P_{LZ}) = P_{LZ} \times (1 - P_{LZ}) + (1 - P_{LZ}) \times P_{LZ}.$$

Для мезоскопических же систем эта фаза важна. NB: $\Phi_{St} = \Phi_{St}(\Delta, \varepsilon_0, A, \omega).$

МНОГОКРАТНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ: ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

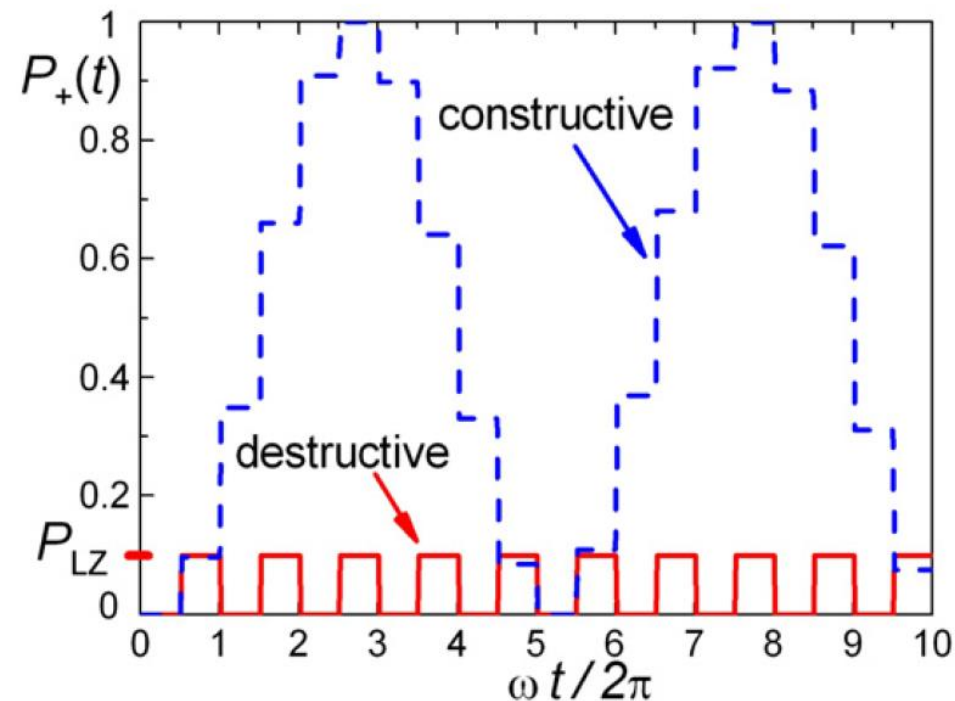
В частности, при $\varepsilon_0 = 0$ (когда $\zeta_1 = \zeta_2$), простые выражения демонстрируют **конструктивную** и **деструктивную** интерференцию после n периодов эволюции:

$$\Phi_{\text{St}} = \pi / 2 + k\pi$$

$$P_+(t) = \sin^2 \left(\sqrt{P_{LZ}} n \right)$$

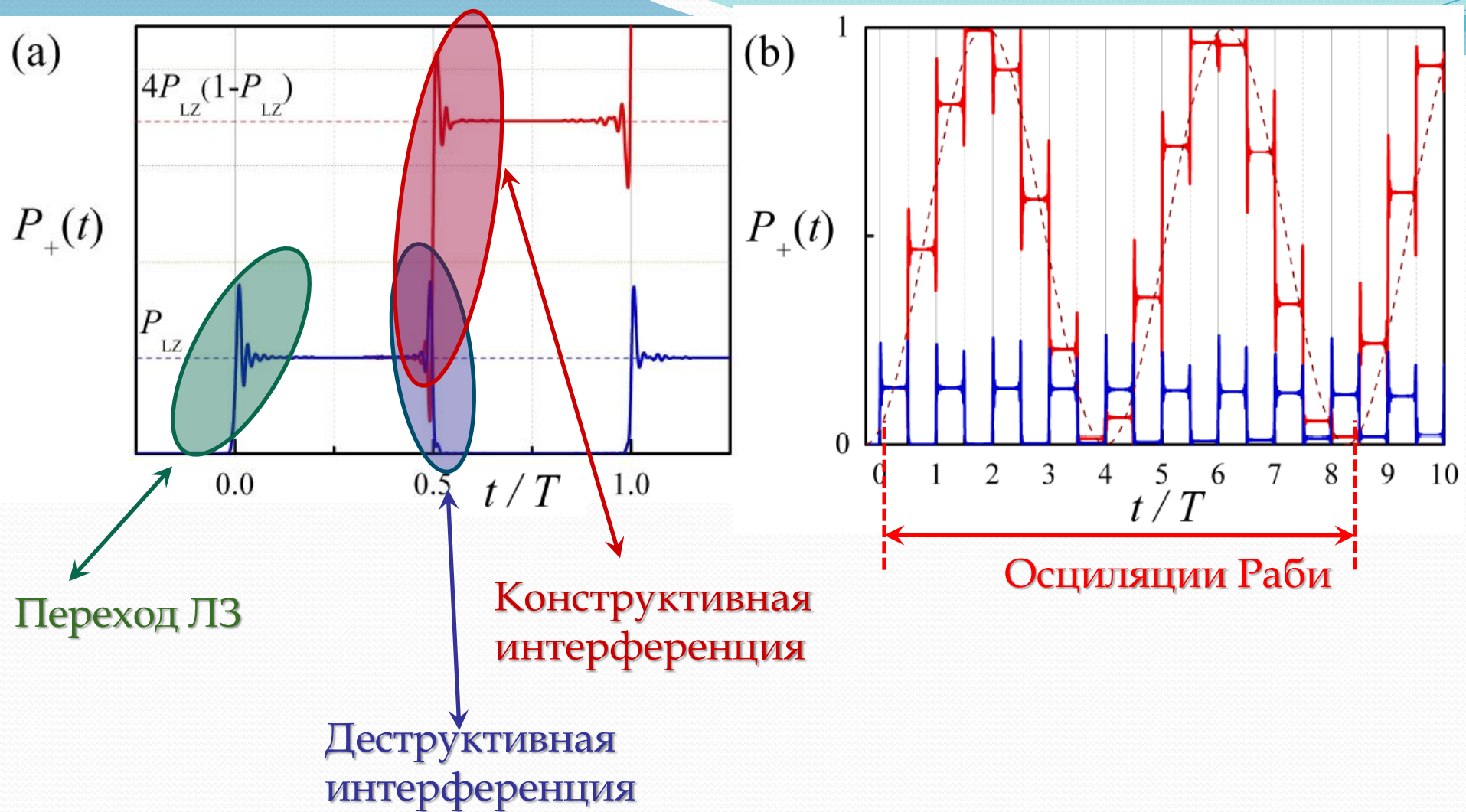
$$\Phi_{\text{St}} = k\pi$$

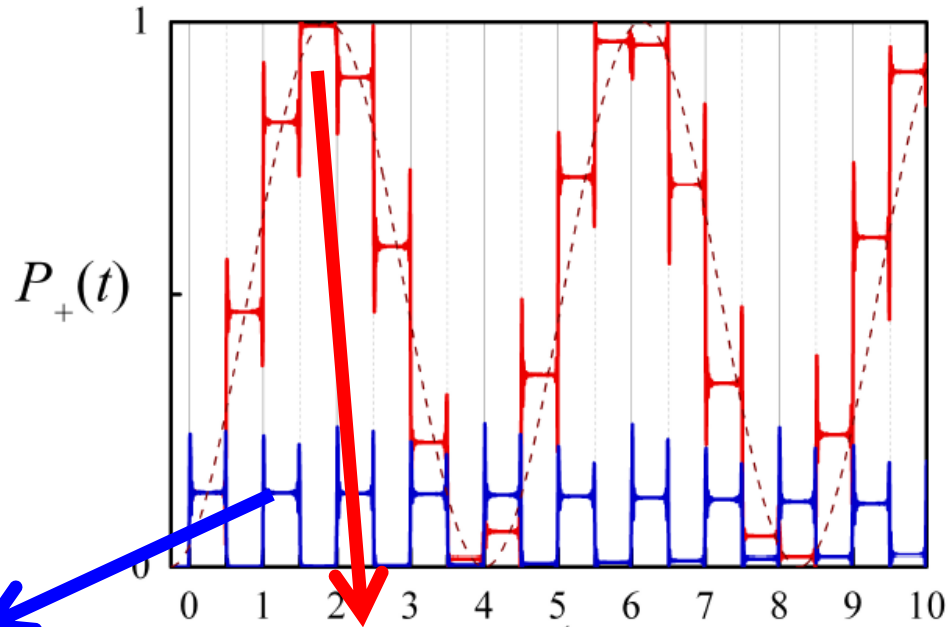
$$P_+(t) = P_{LZ} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} n \right)$$



В общем случае, при $\varepsilon_0 \neq 0$ интерференция описывается: $\Phi_{\text{St}} = \Phi_{\text{St}}(\varepsilon_0, A)$.

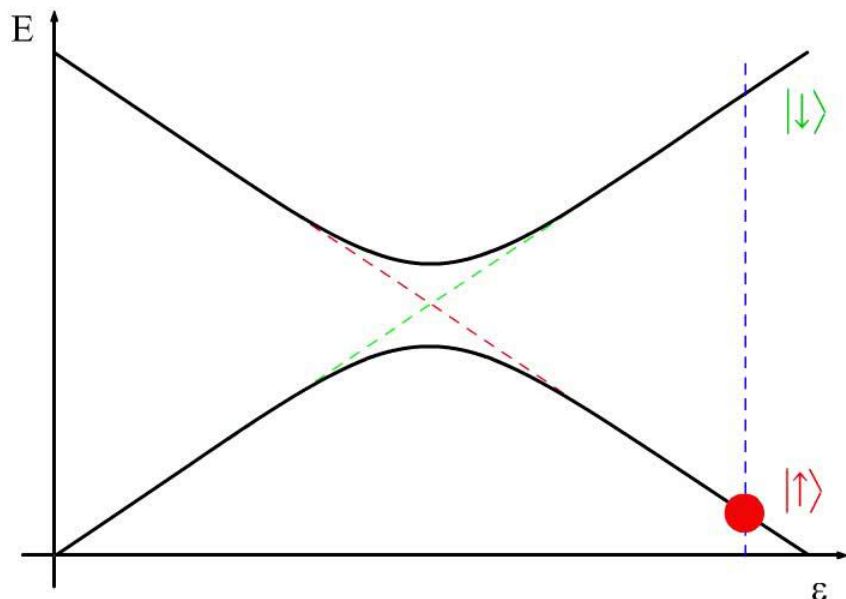
Такая зависимость демонстрируется как функция наблюдаемой величины от **амплитуды возбуждения** A и **смещения** ε_0 , т.н. **интерферограмма ЛЗШ**



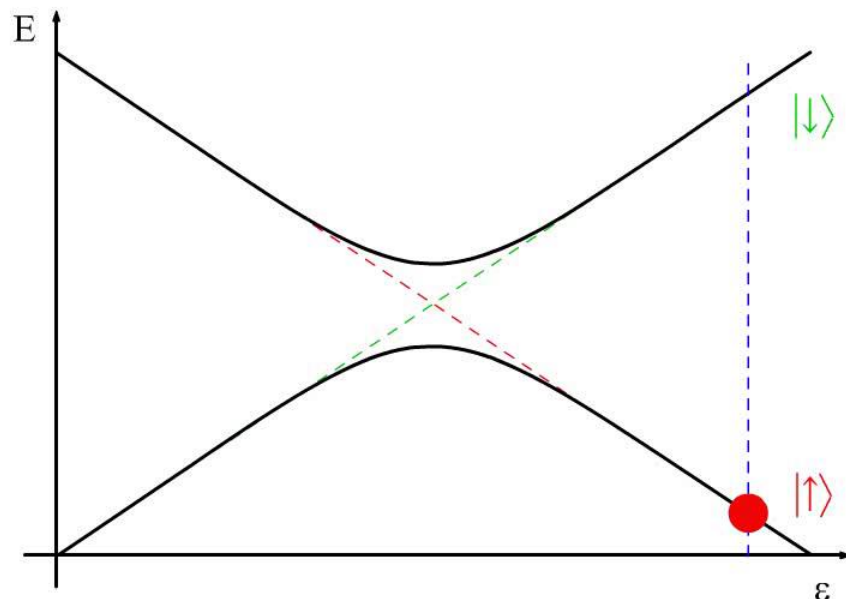


Деструктивная интерференция

Конструктивная интерференция



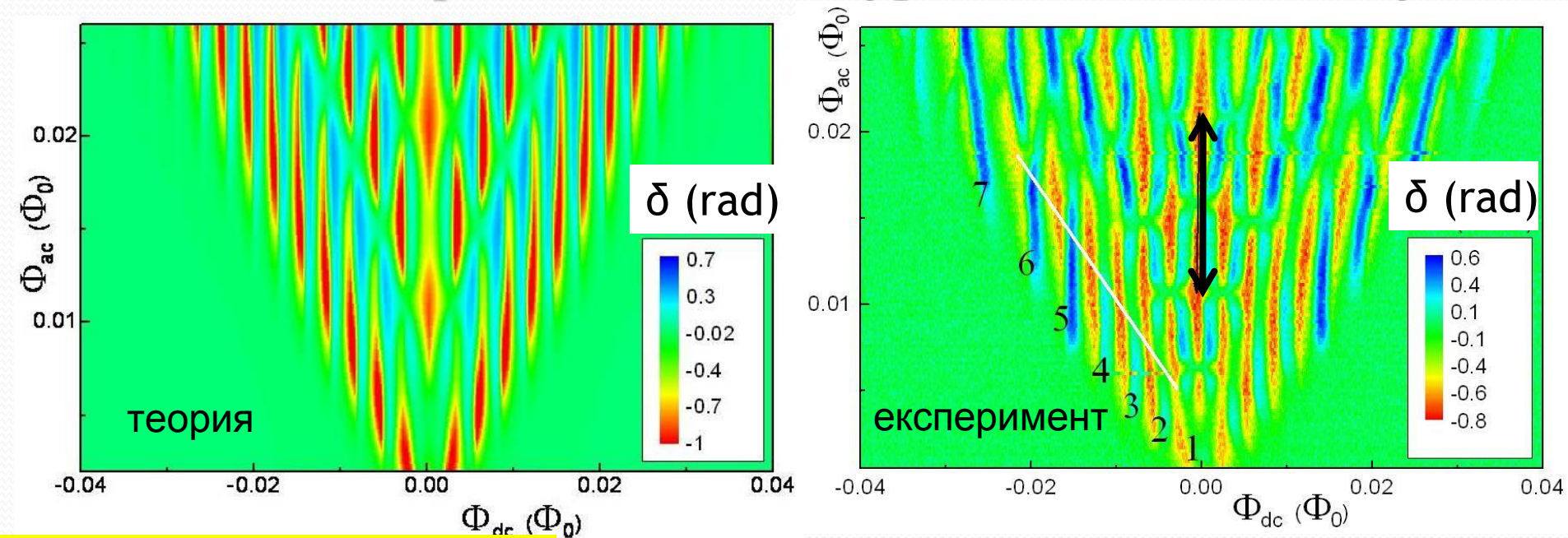
▶ play ◻ stop ◀ rew



▶ play ◻ stop ◀ rew

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ЛАНДАУ-ЗИНЕРА-ШТЮКЕЛЬБЕРГА

Фазовый сдвиг в резонансном контуре зависит от сост-я кубита:



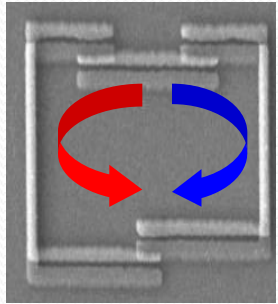
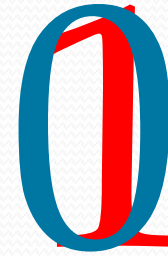
Интерферометрия:

Можно получить: (1) параметры кубитов (спектроскопия), (2) калибровку мощности и (3) параметры релаксации, температуру.

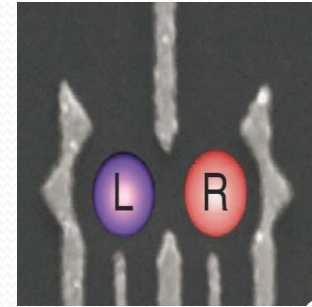
Можно также перевести систему из состояния $|0\rangle$ в любое состояние – манипуляция индивидуальной квантовой системой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квантовые технологии основаны на законах квантовой механики



Изучаются разные реализации кубитов (*микро*скопические и *мезо*скопические), в т.ч. кубиты на джозефсоновских контактах и квантовых точках.



«Сегодня в физической картине мира есть существенное белое пятно, а именно: отсутствует мостик между субмикроскопическим уровнем квантовой механики и макромиром классической физики.»

Теория, которая восполнит этот пробел должна будет помочь понять физические основы феномена сознания»

[Р. Пенроуз, «Новый ум короля: о компьютерах, мышлении, и законах физики», М.: УРСС, 2003]

План лекций

- 0. ВВЕДЕНИЕ: КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И КУБИТЫ
 - 0.1. Квантовый компьютер
 - 0.2. Кубиты и суперпозиция
 - 0.3. Физические реализации кубитов
- 1. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА КУБИТОВ
 - 1.1. Двухуровневая система
 - 1.2. Осцилляции Раби
 - 1.3. Многофотонные возбуждения
 - 1.4. Переходы Ландау-Зинера и осцилляции Штюкельберга
- 2. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ КОНТУРЫ
 - 2.1. Эффект Джозефсона
 - 2.2. Контакт с током
 - 2.3. Сверхпроводниковый островок
 - 2.4. Кольцо с контактами
 - 2.5. Квантовая электродинамика контуров
- 3. НОРМАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ КОНТУРЫ
 - 3.1. Низкоразмерные структуры
 - 3.2. Квантование проводимости
 - 3.3. Эффект Ааронова-Бома и осцилляции проводимости
 - 3.4. Кулоновская блокада