

# Квантовые технологии: надежды и реальность

*А.А.Горбачевич*

*ОФТТ, ФИАН*

*Научный совет РАН «Квантовые  
технологии»*

Квантовые технологии – междисциплинарная область науки и техники (физика, информационные технологии, математика, инженерия, науки о материалах и др.), в основе которой лежит возможность управления отдельными квантовыми объектами (состояниями) и их измерения.

Опирается на результаты и достижения в квантовой информатике, квантовых вычислениях, квантовой оптике, квантовой электронике, физике конденсированного состояния, физике и химии новых материалов и др.

Использует особенности квантовых состояний:  
суперпозиция, запутанность, квантовый индетерминизм

(квантовые приборы 2.0, в то время как квантовые приборы 1.0 – лазеры, транзисторы и другие п/п приборы, ЯМР сенсоры)

В состав квантовых технологий часто включают:

- квантовые вычисления (квантовые компьютеры)
- квантовое моделирование (simulation)
- квантовые коммуникации (криптографию)
- квантовые сенсоры
- квантовая метрология
- квантовое управление (quantum control)
- квантовая наномеханика
- квантовые методы формирования изображений (quantum imaging) ...

# Надежды:

- Сверхмощные квантовые компьютеры и симуляторы, обеспечивающие решение широкого класса NP проблем
- Новые возможности в моделировании и создании материалов и лекарств
- Новые возможности в предсказательном моделировании широкого круга биологических, социальных и экономических процессов
- Криптографически устойчивые квантовые коммуникационные системы, квантовый интернет
- Сенсоры электрических, магнитных и гравитационных полей с рекордной чувствительностью
- Квантовые радары и др.

# Международные и национальные программы в области КТ

- США - US National Quantum Initiative Act (2018, 1.2 млрд. USD на 5 лет)
- Китай - National Quantum Programme (100 млрд. юаней (14,8 млрд. USD))
- Европейская Quantum Technologies Flagship (год запуска - 2018, 1 млрд. евро на 10 лет)
- Национальные программы по квантовым технологиям: Великобритания, Германия, Франция, Дания

# EU Quantum Technologies Flagship projects

## Квантовые коммуникации

- CiViQ - Continuous Variable Quantum
- Quantum Internet Alliance – quant communs all over the Earth (quant memory)
- QRANGE – Quantum Random Number Generators
- UNIQORN – quantum communication for everyone (QKD chip)

## Квантовые симуляторы

- Qombs – QCL ultracold atoms
- PASQuans – neutral atoms in optical lattices

## Квантовая метрология и сенсоры

- iqClock – optical clock (ultracold Sr)
- MetaboliQs – NV diamond coherent ensembles for cardiovascular imaging
- macQsimal – исследование предельных параметров сенсоров (OPM – optically pumped magnetometers, MAC – miniature atomic clock, NMR atomic gyroscope, atomic Ghz/THz sensors, Rydberg based gas sensors)
- ASTERIOS – diamond NV center sensors (magnetic and electric fields, temperature, pressure)

# EU Quantum Technologies Flagship projects

## Квантовые вычисления

- OpenSuperQ – 100 superconducting qubits at Julich supercomp center
- AQTION – ion-trap qubits

## Фундаментальные исследования

- 2D-SIPC - new quantum device concepts based on 2D materials
- S2QUIP – Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics
- QMiCS - Quantum Microwave Communication and Sensing
- SQUARE - Scalable Rare Earth Ion Quantum Computing Nodes
- PhoG - Sub-Poissonian Photon Gun by Coherent Diffusive Photonics (source of quantum light)
- PhoQus - Photons for Quantum Simulation (BEC)
- MicroQC - Microwave-driven ion trap quantum computing

# Инфраструктура КТ в РФ

Центры Национальной Технологической Инициативы (2 из 14, кадры, лицензии) и Лидирующие Исследовательские Центры (инд. п.) (2 из 7) (РВК):

ЦНТИ– КК, КВ  
МГУ

ЦНТИ - КК  
МИСиС

ЛИЦ - КВ  
МЦКТ-РКЦ (ФИАН)

ЛИЦ - КК  
ИТМО

Три Дорожные карты (с участием госкорпораций)

ДК Квантовые вычисления  
Росатом

ДК Квантовые  
коммуникации  
РЖД

ДК Квантовые сенсоры  
Ростех

Кроме того:

Проект ФПИ «Лиман» (2016-2019)  
Миннауки РФ, Росатом,  
ВНИИА им. Духова, ИФТТ РАН, МИСиС,  
РКЦ, МФТИ, МГТУ

Проекты РНФ, РФФИ,  
Миннауки: университеты,  
институты РАН



# Квантовые вычисления

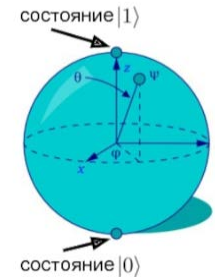
Классические вычисления

бит: «0» или «1»

N состояний

Квантовые вычисления

кубит (quantum bit - qubit)



$$|\psi_1\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

$$|\psi_2\rangle = \alpha|0_1\rangle|0_2\rangle + \beta|1_1\rangle|1_2\rangle + \gamma|0_1\rangle|1_2\rangle + \delta|1_1\rangle|0_2\rangle \Rightarrow 2^N$$

вычисление = унитарное преобразование

(алгоритмы Шора, Гровера...)

Проблемы:

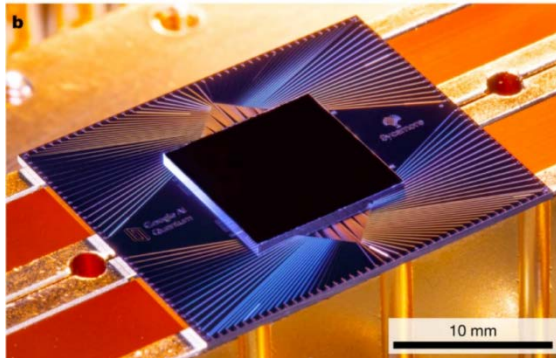
декогеренизация => топологические КВ (А.Китаев – майорановские фермионы)

ошибки => коды коррекции ошибок

логический кубит =  $10^2 - 10^4$  физических кубит

# Реальность:

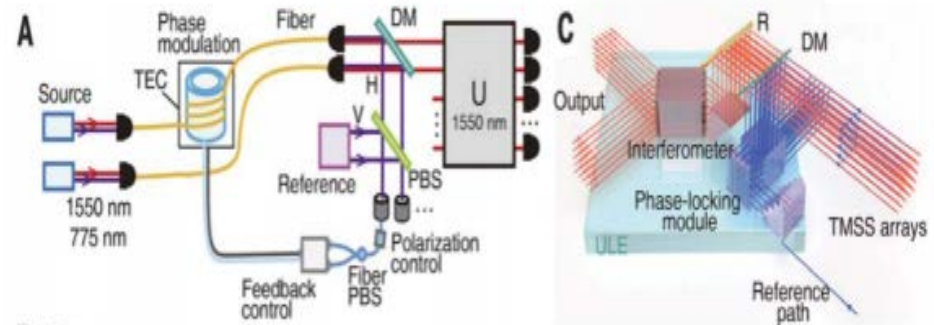
## Квантовое превосходство (Quantum Supremacy)



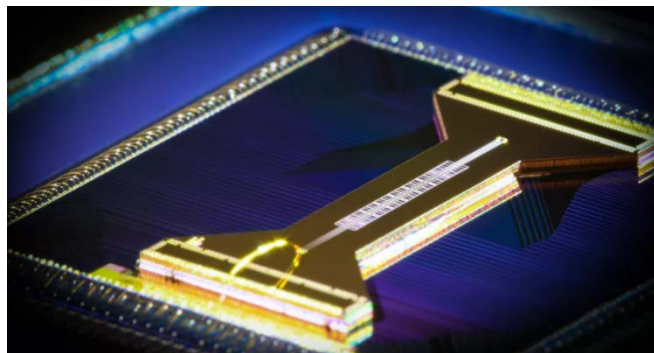
Google - Sycamore (F.Arute...J.Martinis, Nature 574, 505 (2019) – 54 кубита



Summit, IBM  
200 петафлопс



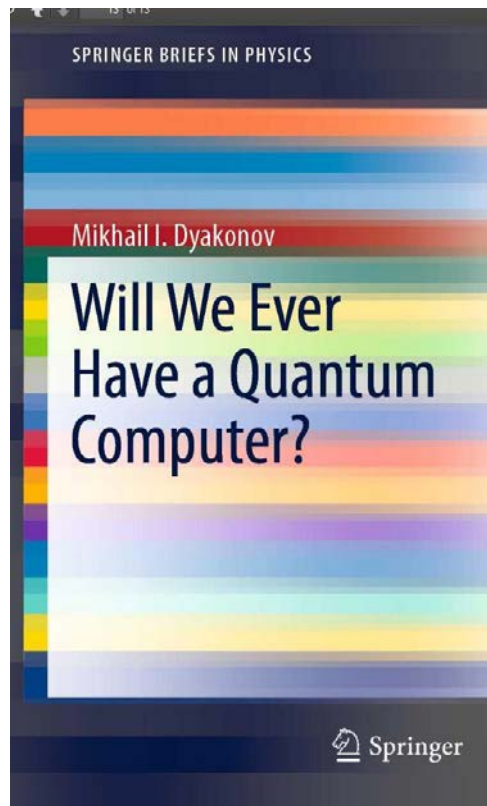
UST Hefei - Jiuzhang (H.-S. Zhong et al. Science, 370, 1460 (2020)



Ion trap chip, Noneywell, IonQ  
Квантовый объем - 64

NISQ – Noisy Intermediate-Scale Quantum computers

# Пессимистичный прогноз



“Гипотетический квантовый компьютер – это аналоговая машина с супер-астрономическим числом степеней свободы: значениями  $2^N$  квантовых амплитуд (где  $N \sim 1000$ )-непрерывных величин, подверженных осцилляциям, шумам и т.д.”

# Дорожная карта «Квантовые вычисления» (2021 -2024)

Четыре базовые технологические платформы:

- Сверхпроводниковая
- Ионная
- Нейтральные атомы
- Фотонная

Три исследовательских проекта

- Твердотельные кубиты (кремний)
- Поляритонные кубиты
- Магнонные кубиты

## **Индикаторы:**

сократить отставание до 2-3 лет,  
число кубитов – до 50 (2023), до 100 (2024)

# Сверхпроводящий кубит

Джозефсоновский контакт  $I_s = I_c \sin \varphi \quad \dot{\varphi} = \frac{2e}{\hbar} V$

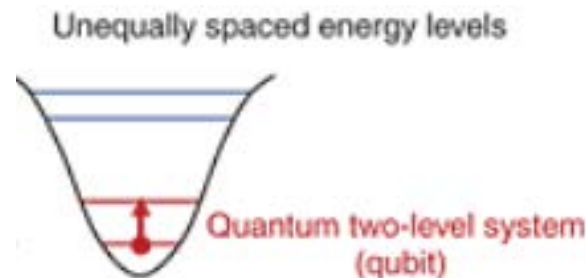
Уравнение для фазы  
(физический маятник):  $\frac{\hbar C}{2e} \ddot{\varphi} + \frac{\hbar}{2eR} \dot{\varphi} + I_c \sin \varphi = I$

Сопряженные переменные

$$\Delta\varphi\Delta M \geq \hbar \quad M = J\dot{\varphi} = \left(\frac{\hbar}{2e}\right)^2 C\dot{\varphi} = \frac{\hbar}{2e} CV = \frac{Q\hbar}{2e} \quad \Delta\varphi\Delta Q \geq 2e$$

Гамильтониан

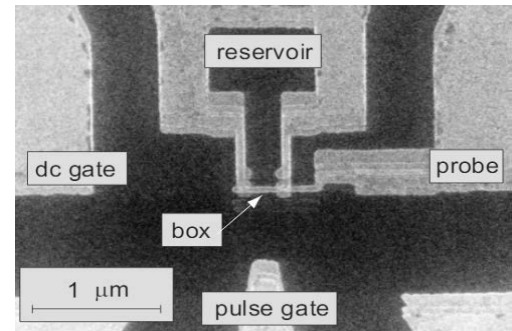
$$\hat{H} = \frac{Q^2}{2C} + U(\varphi)$$



# Сверхпроводящий кубит

## Зарядовый кубит

$$U(\varphi) = -E_J \cos \varphi \quad E_J = \frac{\hbar I_c}{2e}$$



Y. Nakamura, Yu. Pashkin, and S. Tsai,  
*Nature* **398**, 786 (1999)

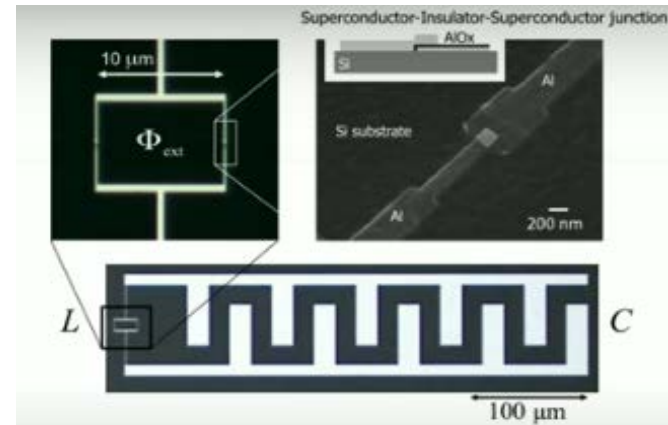
## Потоковый кубит

$$U(\varphi) = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right)^2 \frac{\varphi^2}{2L} - E_J \cos\left(\varphi - \Phi \frac{2\pi}{\Phi_0}\right) \quad \Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

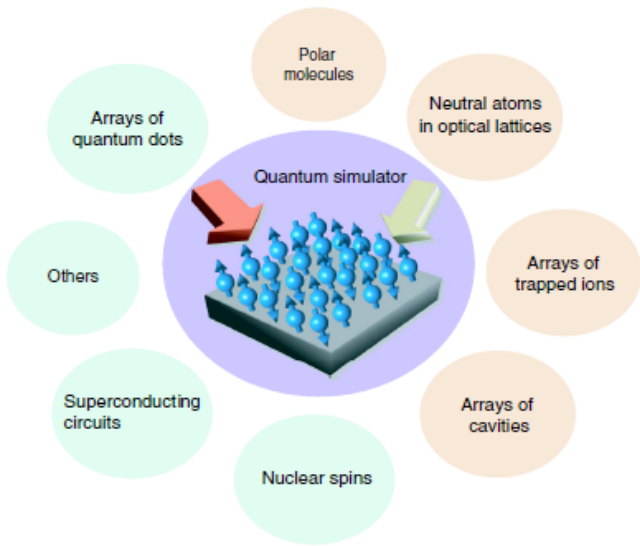
## Фазовый кубит

$$U(\varphi) = I \frac{\Phi_0}{2\pi} \varphi - E_J \cos \varphi$$

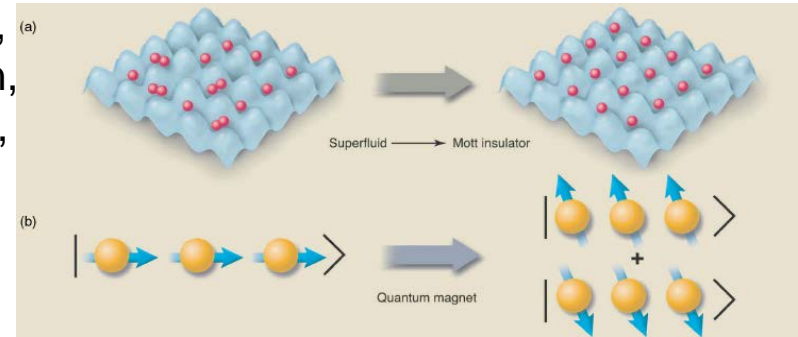
## TRANSMON – TRANSMission-line shunted plasma oscillatiON qubit



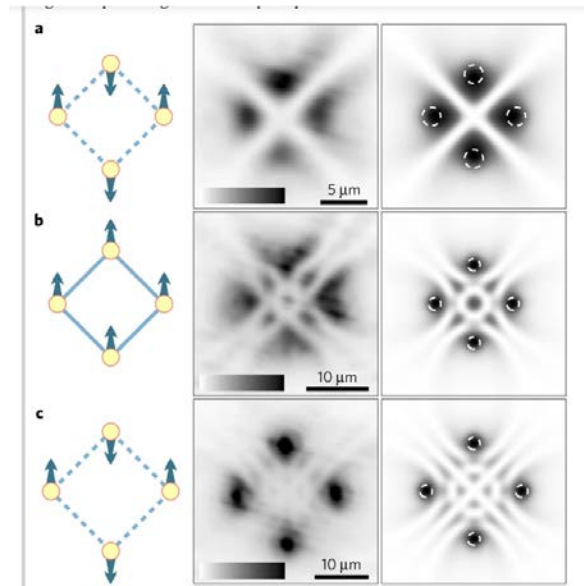
# Квантовые симуляции (simulation) – Р.Фейнман



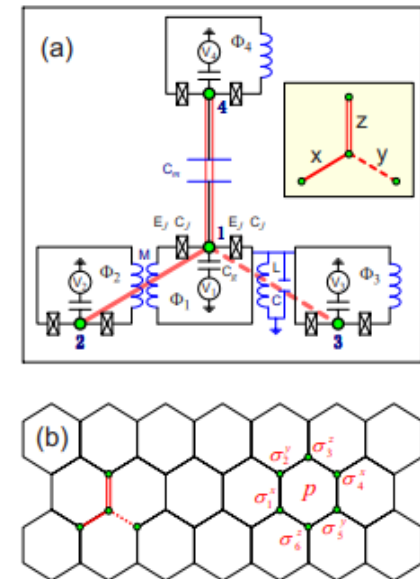
I.Georgescu, F.Nori,  
Quantum simulation,  
Rev. Mod. Phys. 86,  
153 (2014)



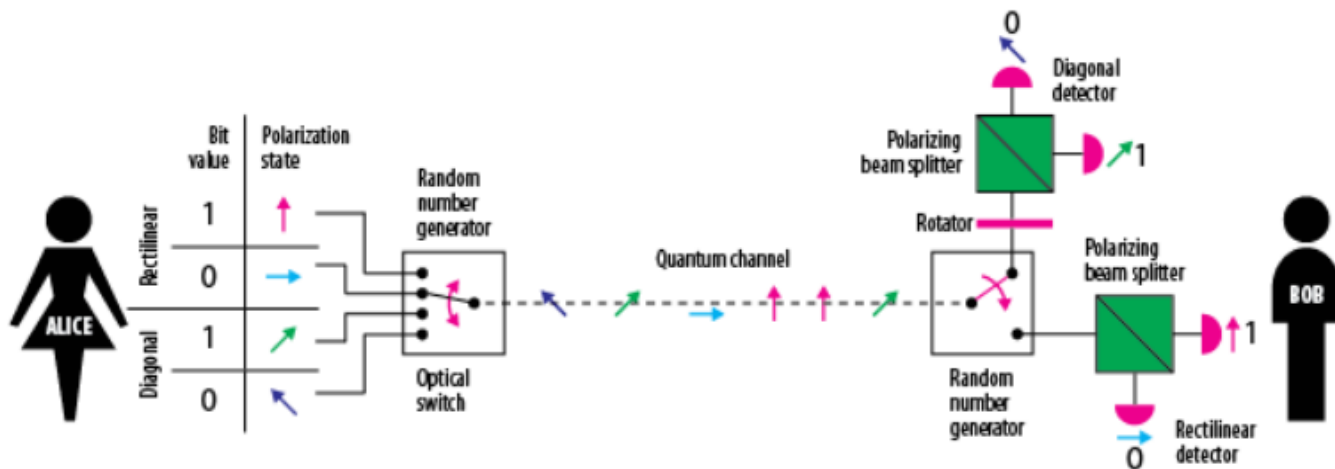
N.G.Berloff et.al.,  
Realizing the classical  
XY Hamiltonian  
in polariton simulator,  
Nature Materials 16,  
1120 (2017)



решетка Китаева



# Дорожная карта «Квантовые КОММУНИКАЦИИ»



Quantum transmission & detection	ALICE sends photons								
	ALICE's random bits	0	1	0	1	1	1	0	1
	BOB's detection events								
	BOB's detected bit values	1	1	0	1	1	1	0	0
Public discussion (i.e., sifting)	BOB tells ALICE the basis choices he made								
	ALICE tells BOB which bits to keep		✓		✓		✓	✓	
	ALICE and BOB's shared sifted key	-	1	-	1	-	1	0	-



# Дорожная карта «Квантовые коммуникации»

Магистральные квантовые сети



QRATE – РКЦ, МИСиС,  
Сколково



«СМАРТС-Кванттелеком» - ИТМО

Космические системы  
квантовых коммуникаций

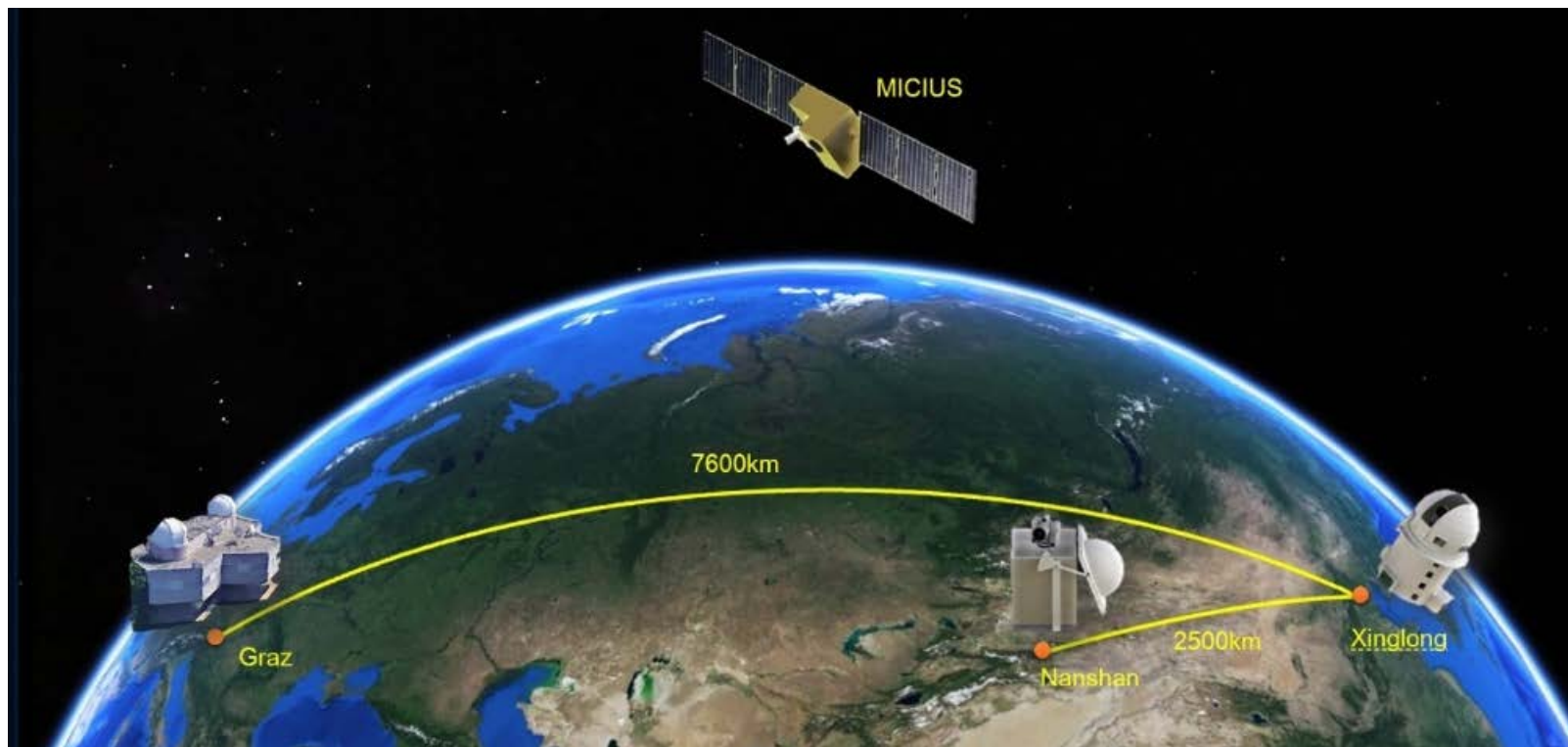


«Квантовый телефон» –  
МГУ, ИнфоТеКС

Квантовый интернет  
вещей

Квантовая оптика (память)

# Межконтинентальная передача КК через китайский спутник Micius (АНК) (2018)

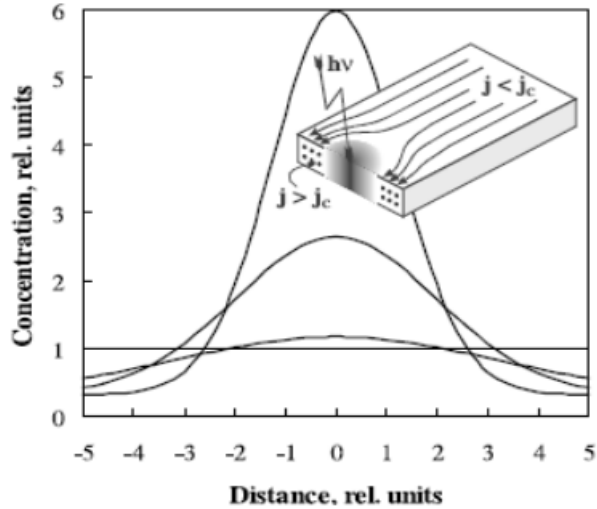


# Дорожная карта «Квантовые сенсоры»

Точность, компактность, эффективность:

- Сенсоры электрических и магнитных полей (в т.ч. спинтронные и магнитоплазмонные сенсоры, биосенсоры и сенсоры химических реакций...)
- Часы, гравиметры, гироскопы
- Квантовая метрология
  - генератор случайных чисел
  - однофотонный детектор
  - безэталоный измеритель квантовой эффективности фотодетектора ...

# Однофотонные детекторы- SSPD, МГПИ- SCONTEL

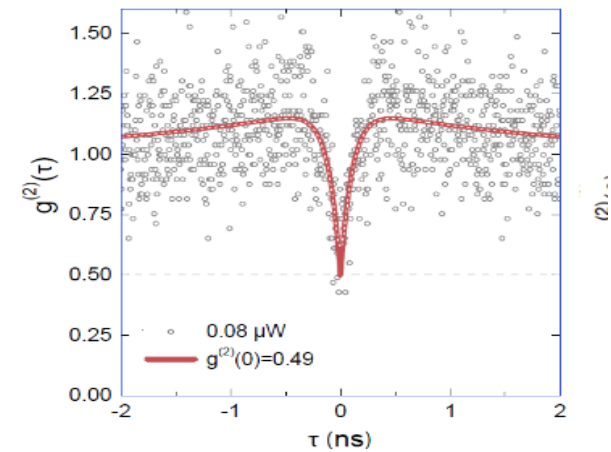


Фотонные интегральный схемы - PICs



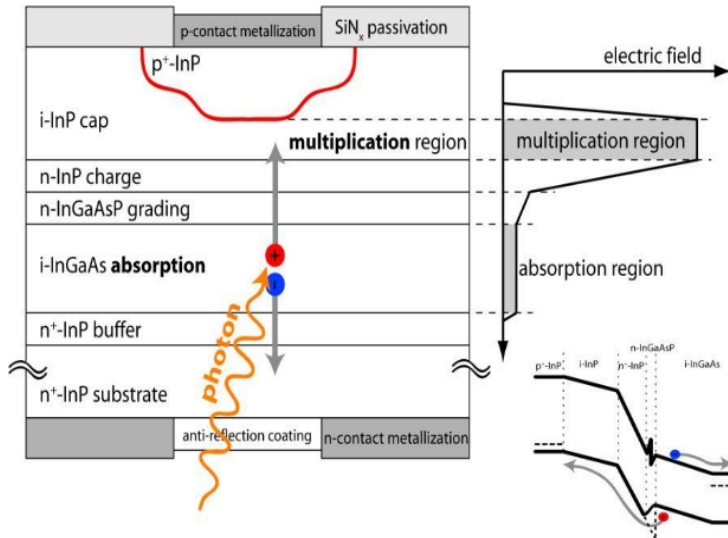
S. Khasminskaya, F. Pyatkov, K. Słowik, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, F. Hennrich, M. M. Kappes, G. Gol'tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, and W. H. P. Pernice, "Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source" Nat. Photonics, 10,727–732(2016)

Coincidence histograms of non-classical light from sc-SWCNT

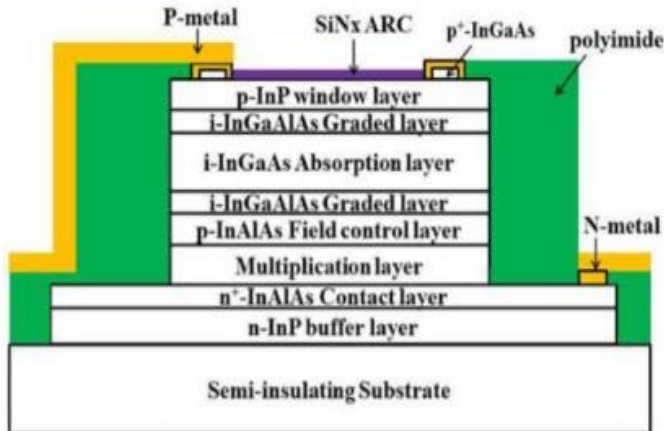


# Высокотемпературные однофотонные лавинные фотодетекторы -SPAD

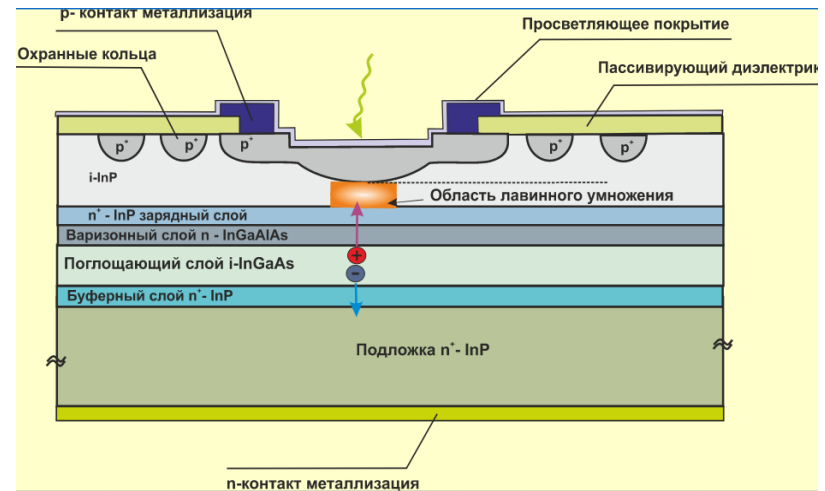
Princeton Lightwave 220K, PDE 20%



In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As absorption layer → E<sub>g</sub> ~ 0.75 eV → Cut-off 1.7μm



ИФП СО РАН



ИТМО, ФТИ им. А.Ф.Иоффе,  
Коннектор-Оптикс



# Атомная гравиметрия на Бозе-Эйнштейновском конденсате атомов Rb

PRL 117, 203003 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
11 NOVEMBER 2016



## Atom-Chip Fountain Gravimeter

S. Abend,<sup>1,\*</sup> M. Gebbe,<sup>2</sup> M. Gersemann,<sup>1</sup> H. Ahlers,<sup>1</sup> H. Müntinga,<sup>2</sup> E. Giese,<sup>3,4</sup> N. Gaaloul,<sup>1</sup>  
C. Schubert,<sup>1</sup> C. Lämmerzahl,<sup>2</sup> W. Ertmer,<sup>1</sup> W.P. Schleich,<sup>3,5</sup> and E.M. Rasel<sup>1</sup>

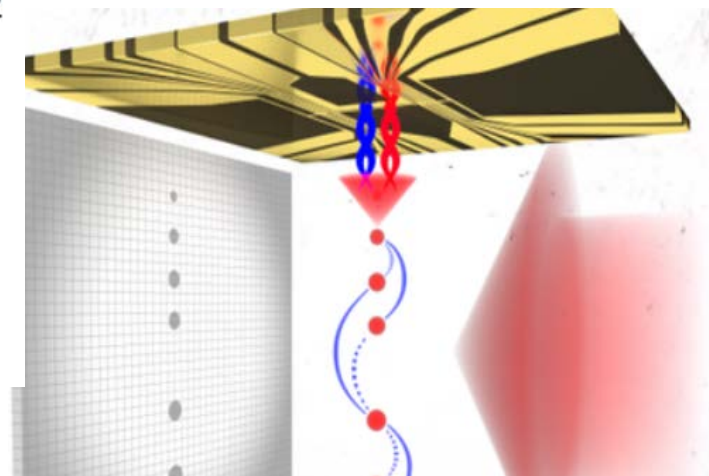
<sup>1</sup>Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, D-30167 Hannover, Germany

<sup>2</sup>ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, D-28359 Bremen, Germany

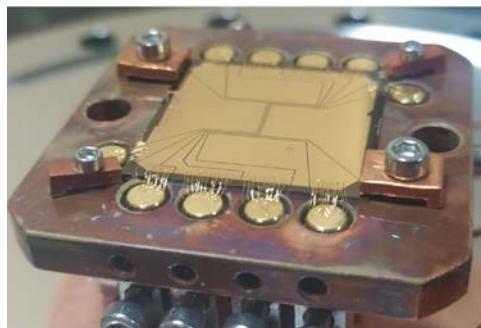
<sup>3</sup>Institut für Quantenphysik and Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQ<sup>ST</sup>),  
Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, D-89081 Ulm, Germany

<sup>4</sup>Department of Physics and Max Planck Centre for Extreme and Quantum Photonics,  
University of Ottawa, 25 Templeton Street, Ottawa, ON K1N 6N5, Canada

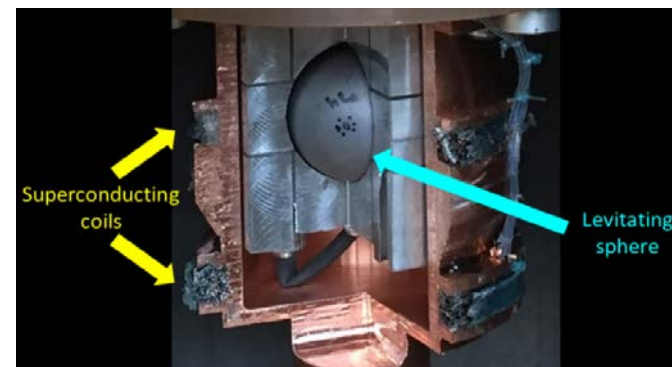
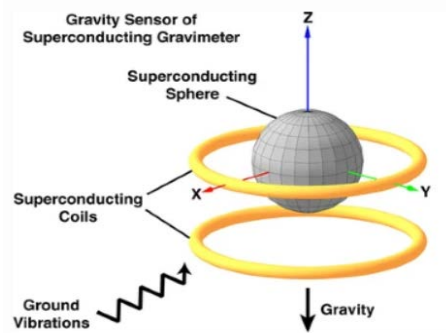
<sup>5</sup>Texas A&M University Institute for Advanced Study (TIAS), Institute for Quantum Science and Engineering (IQSE)  
and Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, Texas 77843-4242, USA



## Атомный чип ИСАН (г. Троицк)

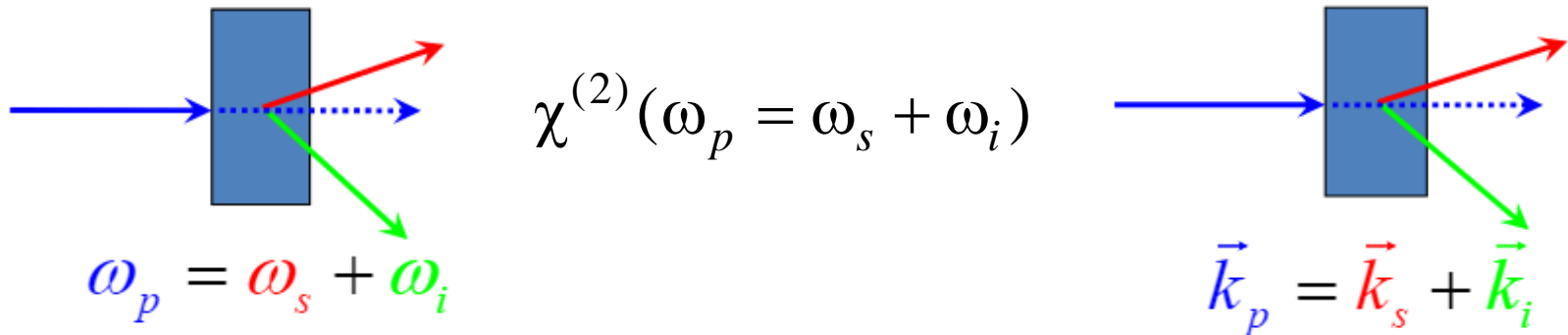


## Сверхпроводящий гравиметр

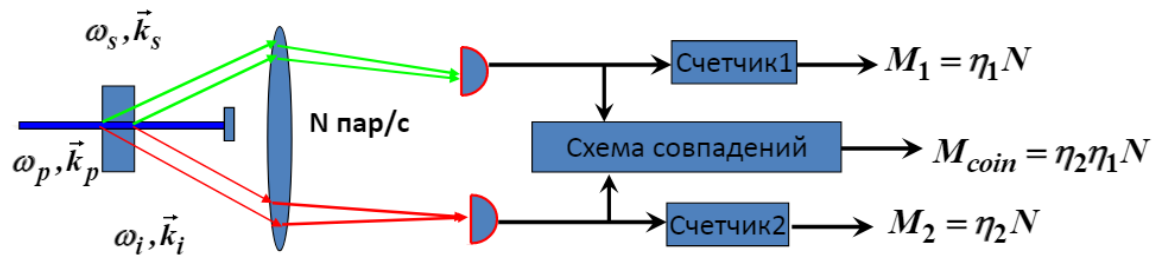


# СПР – безэталонное измерение квантовой эффективности детектора

Спонтанное параметрическое рассеяние света – Д.Н.Клышко (1966)

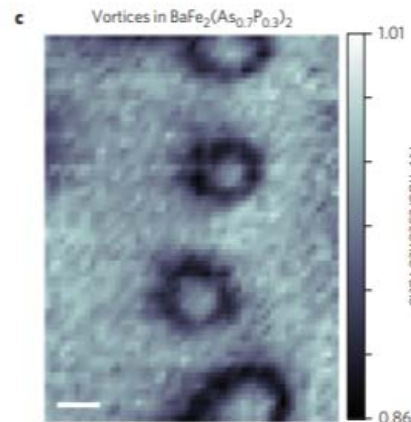
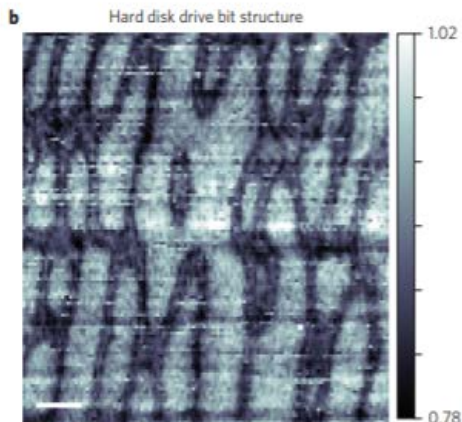
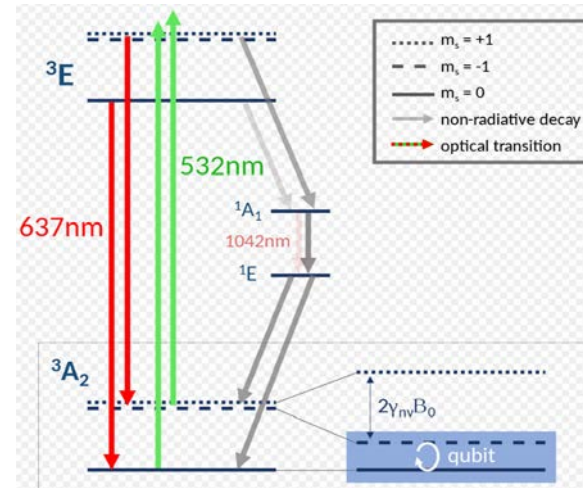
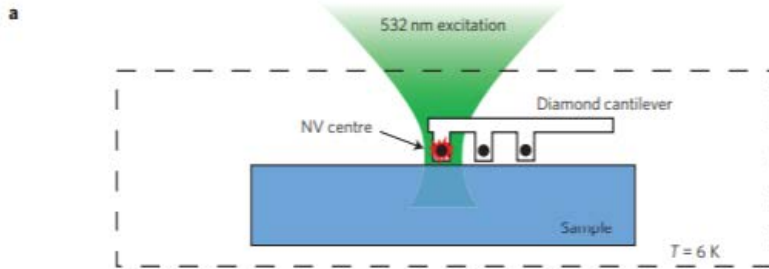
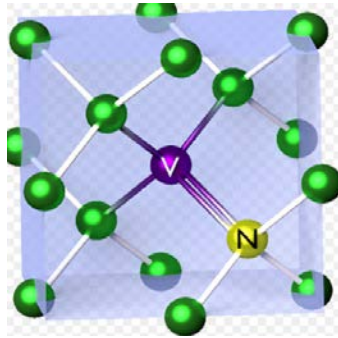


ЦКТ МГУ



$$\eta_2 = \frac{M_{coin}}{M_1} \quad \eta_1 = \frac{M_{coin}}{M_2}$$

# Сенсоры на NV-центрах

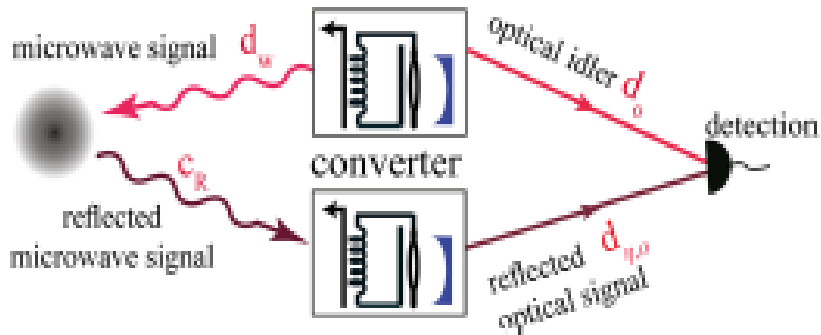


Pelliccione, M., Jenkins, A., Ovartchaiyapong, P., Reetz, C., Emmanouilidou, E., Ni, N., & Bleszynski Jayich, A. C. (2016). *Scanned probe imaging of nanoscale magnetism at cryogenic temperatures with a single-spin quantum sensor*. *Nature Nanotechnology*, 11(8), 700–705.

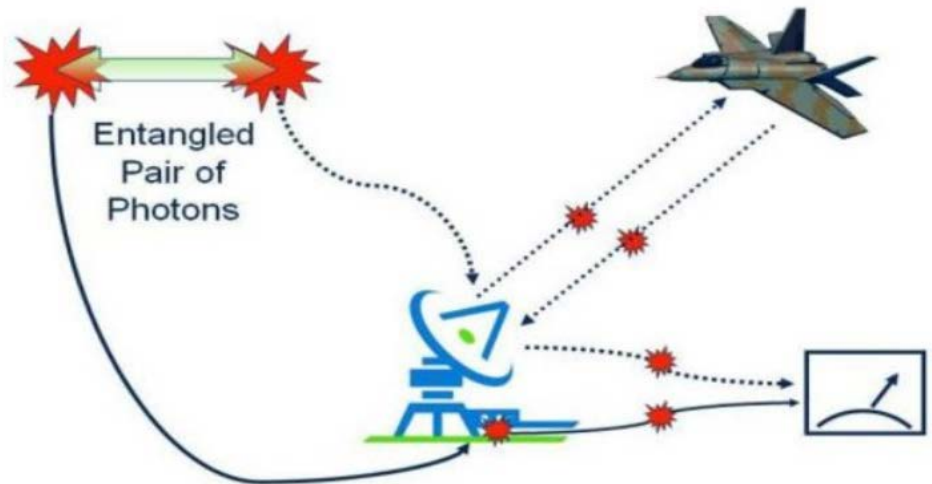


# Квантовый радар

Lloyd, S. (2008). *Enhanced Sensitivity of Photodetection via Quantum Illumination*. *Science*, 321(5895), 1463–1465.



Barzanjeh, S., ...& Pirandola, S. (2015). *Microwave Quantum Illumination*. *Physical Review Letters*, 114(8).



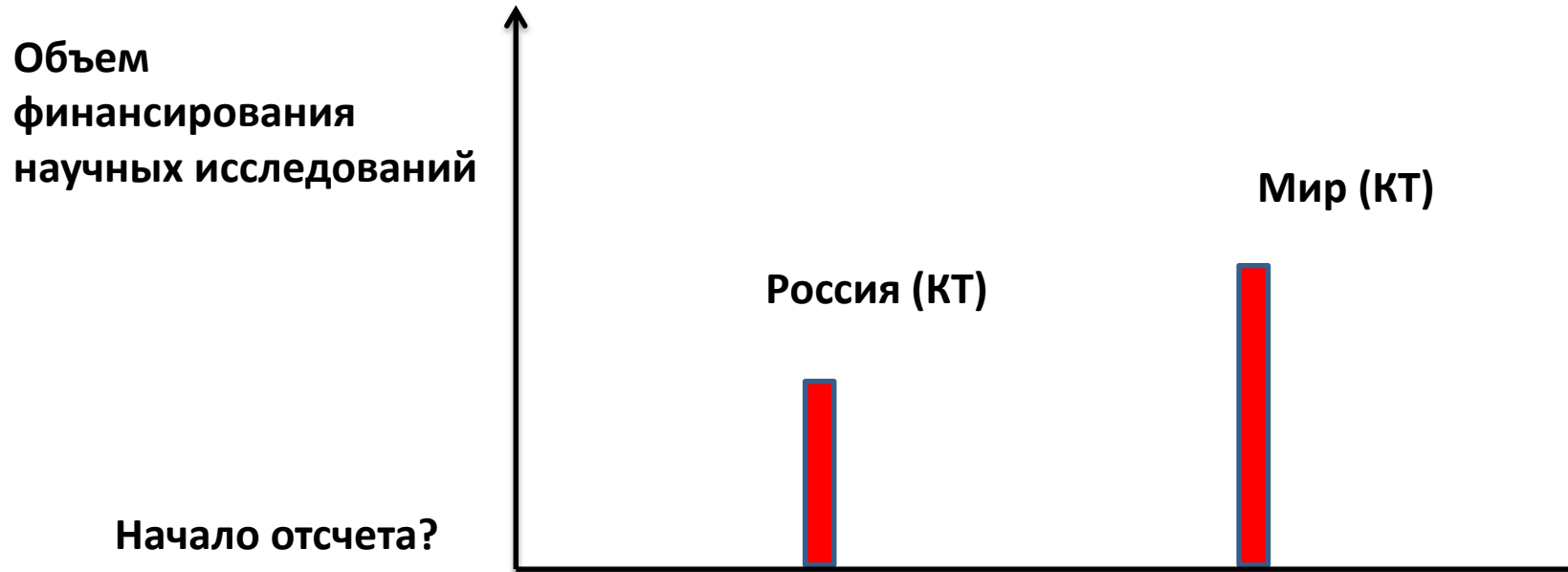
# Прогресс науки или хайп (hype)

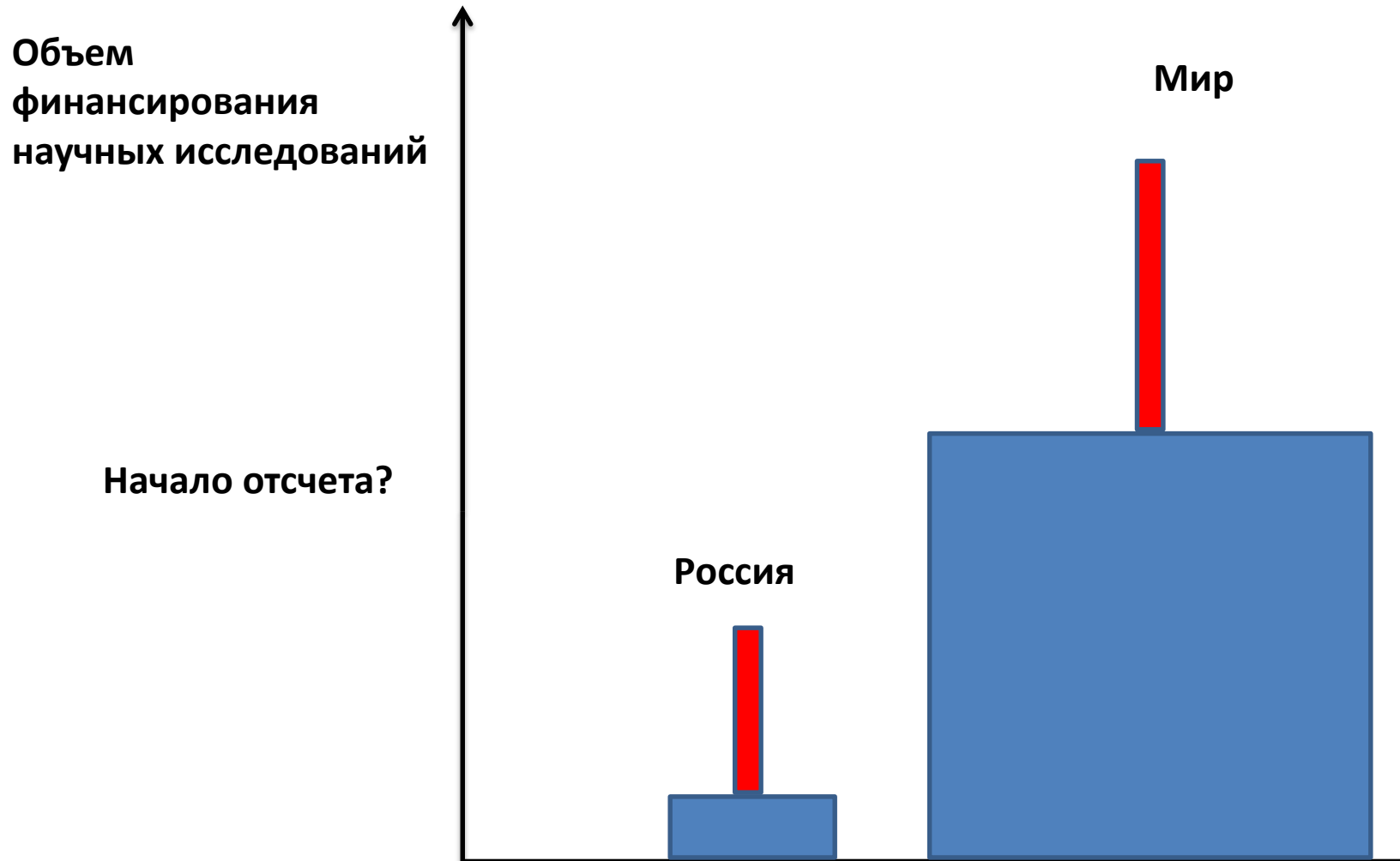
- Высокотемпературная сверхпроводимость (1987)
- Пористый кремний (1990)
- Нанотехнологии (1999, США)
- Графен
- Искусственный интеллект

# «Нано» журналы

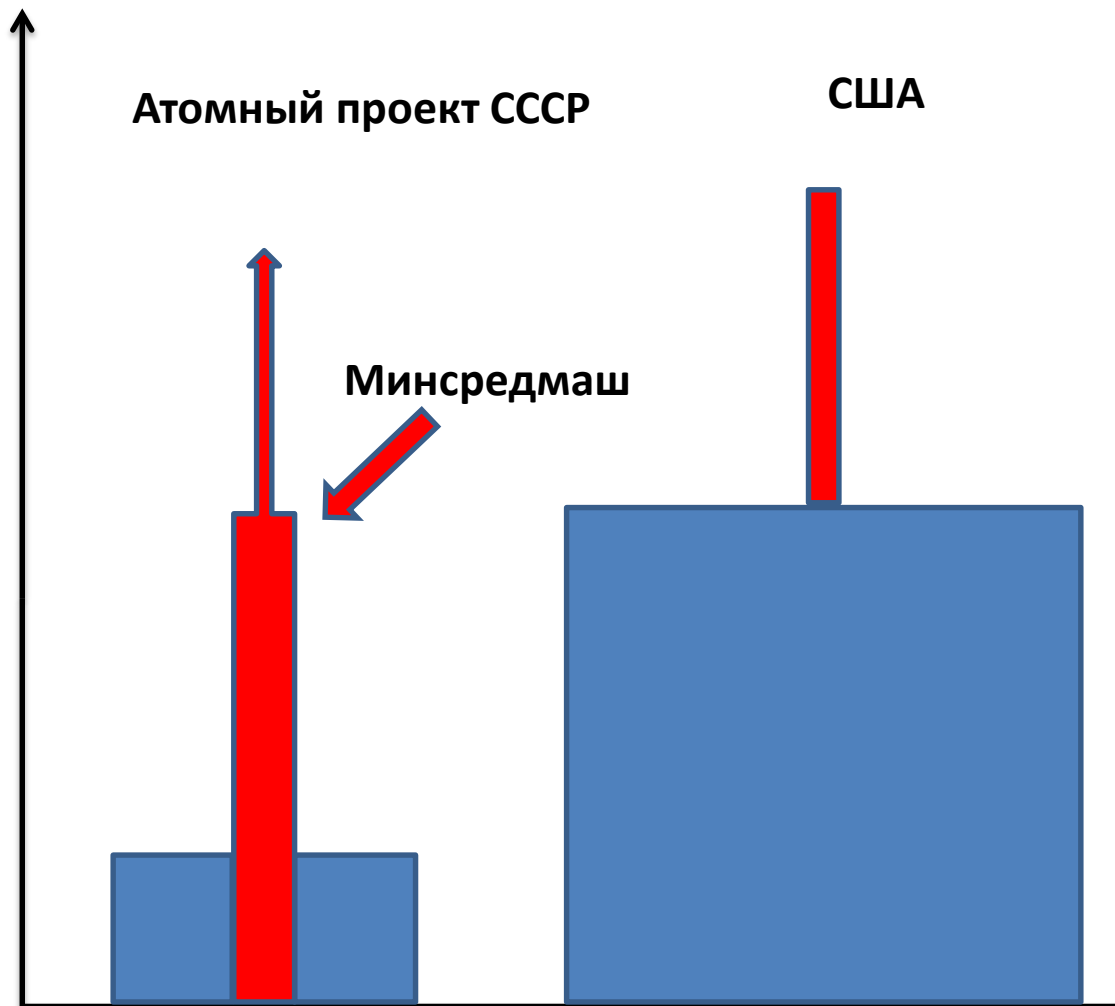
Название журнала	Год первого выпуска	Импакт-фактор
Nature Nanotechnology	2006	31.538
Nature Photonics	2007	31.241
Nature Materials	2002	38.663
ACS Nano	2007	14.588
Nano Letters	2001	11.238
Nature Electronics	2018	27.5
Small	2005	11.459
2D Materials	2014	9.324
Small Methods	2017	12.13
npj 2D Materials and Applications	2017	9.324
npj Quantum Information	2015	7.286
npj Quantum Materials	2016	6.562
Nano Futures	2017	2.982

# КТ – паритет близок?



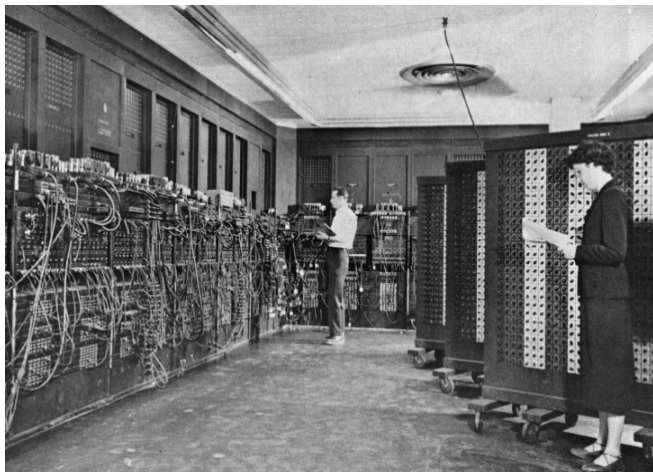


Объем  
финансирования



# Квантово-классические аналогии

Тьюринг (1936) → фон Нейман (1944) → ЭНИАК → транзистор, ИС → iPhone

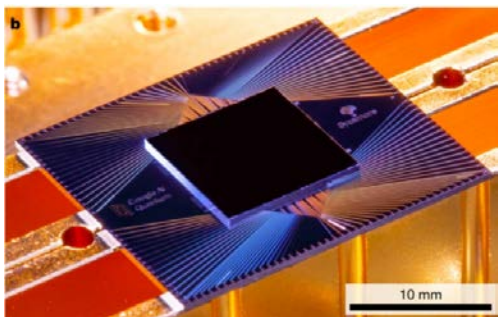


ЭНИАК (18 тыс. вак. ламп,  
вес 30 т, 150 кВт)

транзистор, ИС



Apple A14 Bionic  
5 нм, 11.8 млрд. транзисторов



?



?

***Спасибо за внимание!***