

# ПРОБЛЕМА ЗАПУТЫВАНИЯ В КВАНТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ (ПО ЛИТЕРАТУРЕ)

Д.А. Шапиро

10 июня 2018 г.



# СОДЕРЖАНИЕ

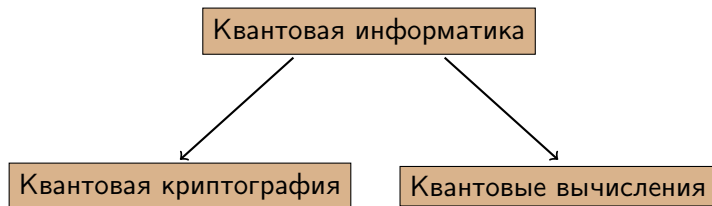
*Похоже, что законы физики не представляют никакого предела уменьшению размера компьютеров вплоть до того, что биты станут величиной с атомы и властвовать начнёт квантовое поведение*

*Р.Фейнман*

- 1 МОТИВАЦИЯ
- 2 ЗАПУТАННОСТЬ СОСТОЯНИЙ
- 3 ОПТИЧЕСКОЕ ЗАПУТЫВАНИЕ
- 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ



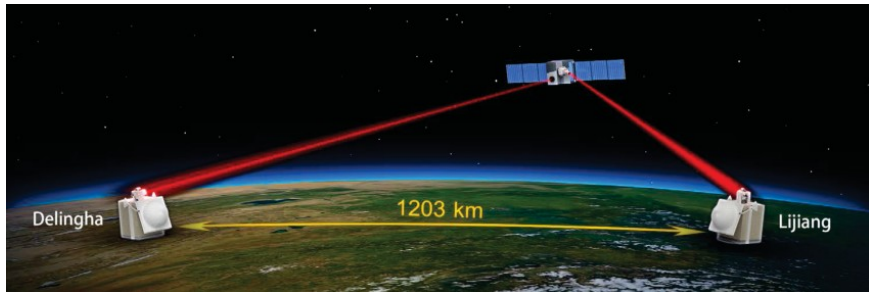
# КВАНТОВАЯ ИНФОРМАТИКА



A. Stean. Quantum computing. arxiv: quant-phys/9708022.



# КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ



Мо-цзы – первый в мире спутник для квантового распределения ключей. Транслировал «спутанные» фотоны на станции в городах Дэлинха и Лицзян (1203 км, 2017).



# ПРОСТРАНСТВО СОСТОЯНИЙ

Двухуровневая система

$$|\psi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Две ДУС

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= (\alpha_1|\uparrow\rangle + \beta_1|\downarrow\rangle) \otimes (\alpha_2|\uparrow\rangle + \beta_2|\downarrow\rangle) \\ &= c_1|\downarrow\downarrow\rangle + c_2|\downarrow\uparrow\rangle + c_3|\uparrow\downarrow\rangle + c_4|\uparrow\uparrow\rangle, \\ & \quad |c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2 + |c_4|^2 = 1 \end{aligned}$$

Размерность  $2^N$ . Векторная модель  $S_z = \frac{1}{2}(|\beta|^2 - |\alpha|^2)$   
Спин в магнитном поле, атом в резонансе с лазером.



# КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

$$|\downarrow\rangle = |0\rangle, |\uparrow\rangle = |1\rangle$$
$$|9\rangle = |1001\rangle$$

Initialization

$$\hat{V}|0\rangle \otimes |0\rangle = 2^{-n/2} \sum |x\rangle \otimes |0\rangle = |\psi\rangle$$

Quantum gate

$$\hat{U}|\psi\rangle = |x\rangle \otimes |f(x)\rangle$$



# КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО,

которое использует явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности для передачи и обработки данных

## ПРЕИМУЩЕСТВО

$2^N$  параллельных вычислений

## СЛОЖНОСТЬ

- 1) релаксация когерентности
- 2) 2-кубитовые операции (декогерентизация)



# АЛГОРИТМЫ

## ШОР 1994

Разложение  $n$ -значного числа на простые множители

$$2^{\alpha(n \log_2 n)^{1/2}} \rightarrow O(n^2 \log_2(\log_2 n))$$

## ГРОВЕР 1996

Задача перебора, то есть нахождение строки в списке

$$n \rightarrow \frac{\pi}{4} \sqrt{n}$$





# TO ENTANGLE

ЗАПУТЫВАТЬ, СЦЕПЛЯТЬ, ЗАТЯГИВАТЬ, ВОВЛЕКАТЬ, ОСЛОЖНЯТЬ

## КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ (СЦЕПЛЕННОСТЬ)

Явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми.

$$|\Psi\rangle = \sum_{jk} C_{jk} |j_A\rangle |k_B\rangle, \quad \sum_{jk} |C_{jk}|^2 = 1.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ

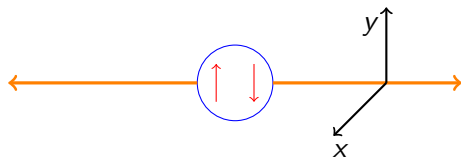
Не существует базиса, в котором  $|\Psi\rangle = |j_A\rangle |k_B\rangle$ .

В.Г. Зелевинский. Квантовая физика. Новосибирск: НГУ, 2015.



# ПАРАДОКС ЭПР

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$



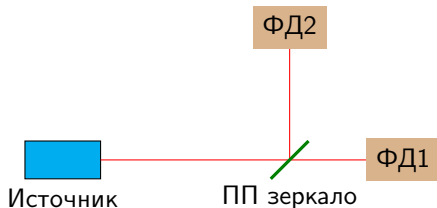
$$J_1 = J_2 = 1/2, J = 0$$

Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. — Vol. 47, Iss. 10. — P. 777-780.



# ПАРАДОКС ПЕНРОУЗА

ОДИН ИЗ НАИБОЛЕЕ СТРАННЫХ АСПЕКТОВ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ



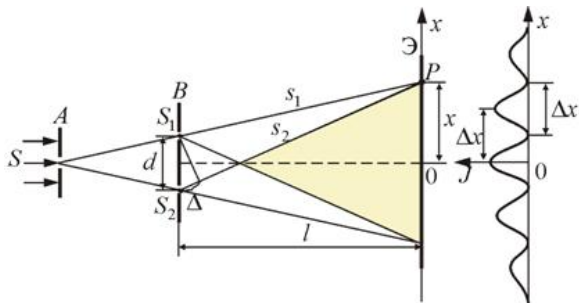
$$|\psi\rangle = |t\rangle + |r\rangle$$

Если ФД1 **не зарегистрировал** фотон, то можно сделать вывод, что фотон направился к ФД2. Волновая функция редуцирована без взаимодействия.

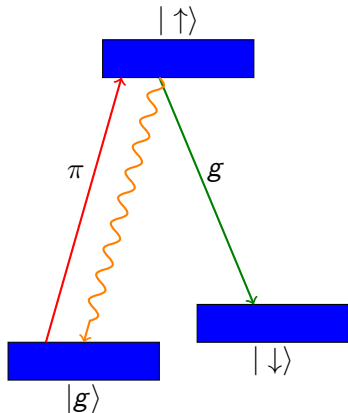
Р. Пенроуз. Путь к реальности или Законы, управляющие Вселенной. Ижевск, РХД, 2007.



# ОПЫТ ЮНГА



## ЭКСПЕРИМЕНТ

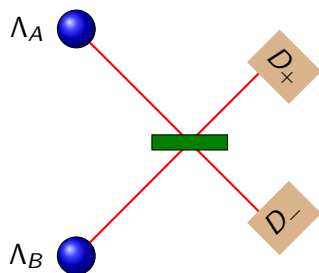


## Трехуровневая система

$\Lambda$ -конфигурация:  $\pi$ -импульс возбуждает атом  $|g\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$ ;  $g$  излучение фотона — переход  $|\uparrow; 0\rangle \rightarrow |\downarrow; 1\rangle$ .



# ПОЛУПРОЗРАЧНОЕ ЗЕРКАЛО



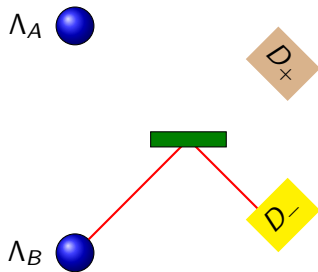
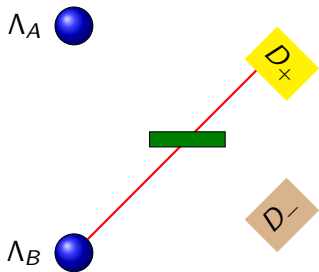
Полупрозрачное зеркало  
50:50. Состояния кубитов  
запутываются.

$$|\uparrow, 0; \uparrow, 0\rangle \rightarrow \frac{|\uparrow, 0; \downarrow, 1\rangle \pm |\downarrow, 1; \uparrow, 0\rangle}{\sqrt{2}}$$

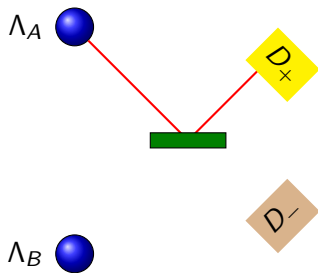
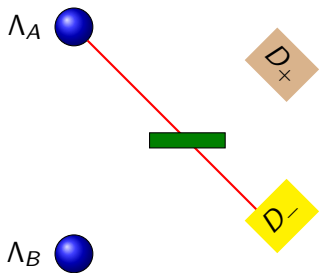
S.D.Barrett, P.Kok. Efficient high-fidelity quantum computation using matter qubits and linear optics.  
PRA 71, 060310(R) (2005).



# ЗАПУТЫВАНИЕ



# ЗАПУТЫВАНИЕ





# АЛГОРИТМ ЗАПУТЫВАНИЯ

- 1 Дождаться полной релаксации.
- 2 Подать  $\pi$ -импульс на каждый кубит.
- 3 Подождать 1 срабатывания фотодетектора. IF число срабатываний 0 или 2, THEN GOTO 1.
- 4 ELSE Запутанное состояние готово.



# ЭКСПЕРИМЕНТ

## 1 МЕТР: ПЕРВЫЙ ШАГ НА ПУТИ К БУДУЩЕМУ «КВАНТОВОМУ ИНТЕРНЕТУ»

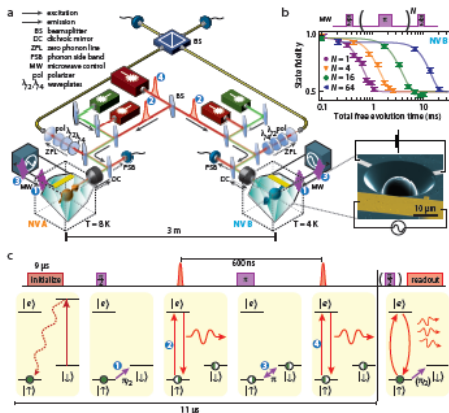
Оба фотона улавливались и направлялись в лучерасщепитель, где они (в некоторых случаях) интерферировали. Фиксируя свойства фотонов на выходе из расщепителя, наблюдатели узнавали, в каких состояниях находятся ионы, но не знали, какой в каком. Таким образом, ионы оказывались «запутаны». Пока что открытие не имеет практических приложений. Из-за несовершенства аппарата вероятность запутывания равняется примерно одной миллиардной, поэтому, хотя эксперимент повторяется миллионы раз в секунду, успешным он оказывается лишь раз в несколько минут.

D. L. Moehring, P. Maunz, S. Olmschenk, K. C. Younge, D. N. Matsukevich, L.-M. Duan, C. Monroe. Entanglement of single-atom quantum bits at a distance. Nature 449, 68-71 (2007).



# СХЕМА НА NV-ЦЕНТРАХ (NITROGEN VACANCY)

3 МЕТРА, 14 МС, ONE ENTANGLEMENT PER 10 MIN



Long-distance  
entanglement

- Резонансное возбуждение
- Нерезонансное возбуждение
- СВЧ-импульсы
- Магнитное поле 17.5 Гс
- Электрическое поле

H. Bernien, B. Hensen, W. Pfaff, G. Koolstra, M. S. Blok, L. Robledo, T. H. Taminiau, M. Markham, D. J. Twitchen, L. Childres, R. Hanson. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres. *Nature*, 497, 86–90 (2013).



# РЕАЛИЗАЦИЯ

- Джозефсоновские контакты.
- Ядерный магнитный резонанс.
- Ионы в ловушке.
- Охлажденные атомы.
- Одиночные фотоны.
- Квантовые точки.
- NV центры (nitrogen vacancy).



## УСПЕХИ



Год	Исп.	Qb	Реал.	Примечание
2001	IBM	7	MR	Найдены сомнож. числа 15
2005	Мск	2	JC	Япония
2009	NIST	2		
2017	США	51	NV	Лукин
2017	–	53	IOT	
2017	IBM	50		
2018	Intel	49	JC	Tangle Lake
2018	Google	72		Квантовое превосходство > 50
2007	DWave	16 — 2000	JC	M\$10-15. Lockheed, NASA, LANL, Google. Дискретная оптимизация (8)



# АРГУМЕНТЫ ПРОТИВ



- КК не нужен, так как решает быстро всего 5 задач.
- КК — аналоговая машина, которую трудно реализовать.
- Природа не избрала квантовый метод вычисления.

К.А. Валиев. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. УФН 175 (1) 3–39 (2005).

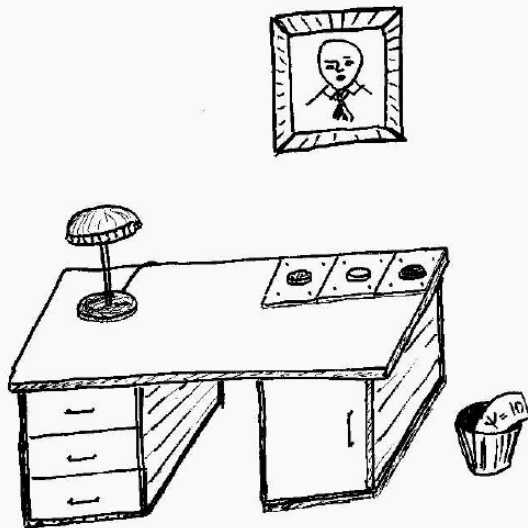


# FEASIBILITY

- Оператор  $\hat{V}$  должен перевести все спины в основное состояние с точностью  $10^{-5}$ .
- Надо одновременно измерить состояния  $10^3 - 10^5$  спинов.
- Универсальный вычислитель должен переводить произвольное состояние в произвольное.
- Ошибка  $10^{-13}$ , с квантовой коррекцией  $10^{-5}$ . В модели шумы считались некоррелированными.
- Большая нелинейная система демонстрирует неустойчивость и хаотическое поведение.

M.I. Dyakonov. Quantum Computing: A View from the Enemy Camp. Arxiv: cond-mat/0110326







# Вывод

To build a universal quantum computer is well beyond the abilities of current technology. However, the principles of quantum information physics can be tested on smaller devices.

A. Stean



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

