

Квантовая Теория

2021 г.

Запрягаев Сергей Александрович

Литература

- А.С.Давыдов. Квантовая механика
- Д.И.Блохинцев. Квантовая механика
- Флюгге З. Задачи по квантовой механике, том 1 (Мир, 1974)
- Флюгге З. Задачи по квантовой механике, том 2 (Мир, 1974)
- Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска. Введение в квантовые вычисления. 2009 г.
- С.А.Запрягаев. Введение в квантовые информационные системы. 2015 г.
- Лекции

История автоматизации вычислений

- **Абак** (греч. $\alpha\beta\alpha\chi$, abákion, лат. abacus – доска) – счётная доска, простейшее счётное устройство, применявшееся для арифметических вычислений приблизительно с IV века до н.э. в Древней Греции, Древнем Риме. В Европе абак применялся до XVIII века.
- В **России** ещё в средние века (16-17 вв.) на основе абака было разработано другое приспособление – **русские счёты**.



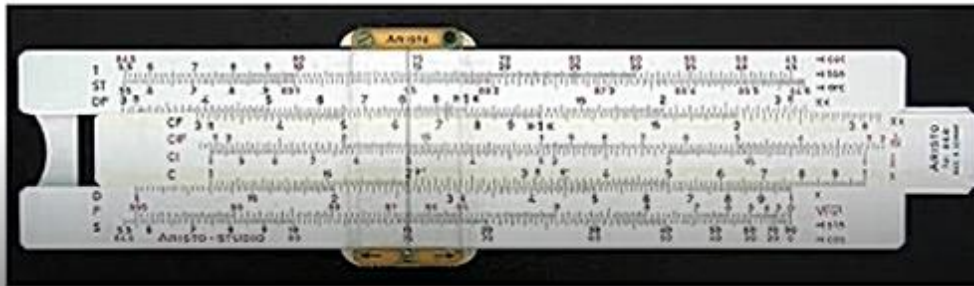
Механические приспособления

- В 1623 год – В. Шиккард нем. разработал первое в мире механическое устройство («суммирующие часы») для выполнения **операций сложения и вычитания** шестirazрядных десятичных чисел.
- В 1642 году фран.Б. Паскаль сконструировал первое в мире механическое цифровое вычислительное устройство («Паскалин»), построенное на основе зубчатых колес. Оно могло суммировать и вычитать пятиразрядные десятичные числа, а последние модели оперировали числами с восемью десятичными разрядами.
- В 1673 г. Нем. В. Лейбниц создал механический калькулятор, который при помощи двоичной системы счисления выполнял умножение, деление, сложение и вычитание. Операции умножения и деления выполнялись путём многократного повторения операций сложения и вычитания.
- Вычислительные аппараты распространились с 1820 года, когда фран. Ч. Калмар изобрёл **арифмометр**. Благодаря своей универсальности арифмометры использовались до 60-х годов XX века.

История автоматизации вычислений



С помощью логарифмической линейки можно производить умножение, деление, возведение в степень и извлечение корней, определять натуральные значения тригонометрических функций заданных углов и по заданным натуральным значениям тригонометрических функций находить соответствующие им углы, определять логарифмы и антилогарифмы чисел, находить логарифмы тригонометрических функций и производить различные вычисления.



Эволюция компьютеров

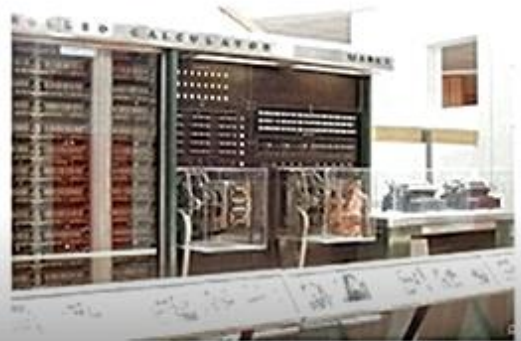


Эволюция компьютеров



Марк 1 -1941 г-1944 г.. (реле)

- 3 операции сложения в секунду
- 17 метров дина, 2.5 метра высота
- Вес 4,5 тонны. 800 километров проводов



Эниак 1946 г. (лампы)

- 5000 операций сложения в секунду
- Вес 27 тонн
- Частота 100 кГц
- 17 468 ламп
- 1 500 реле
- 70 000 сопротивлений
- 10 000 конденсаторов
- 154 кВт !!!



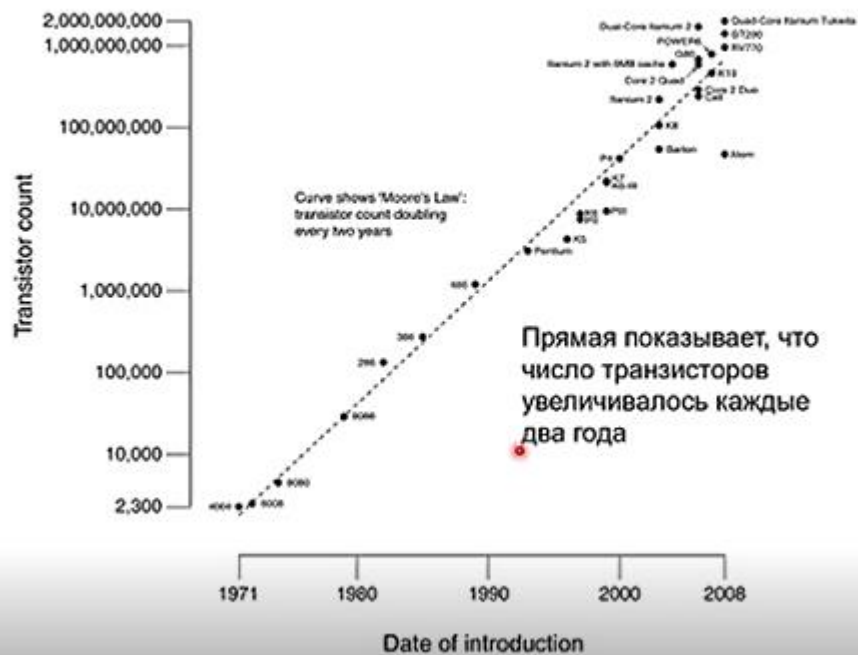
БЭСМ 1-6



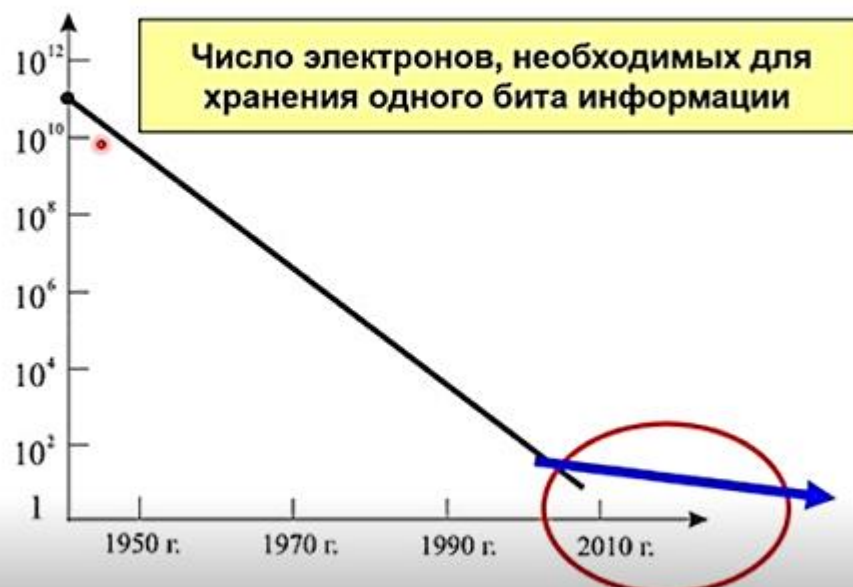
Далее



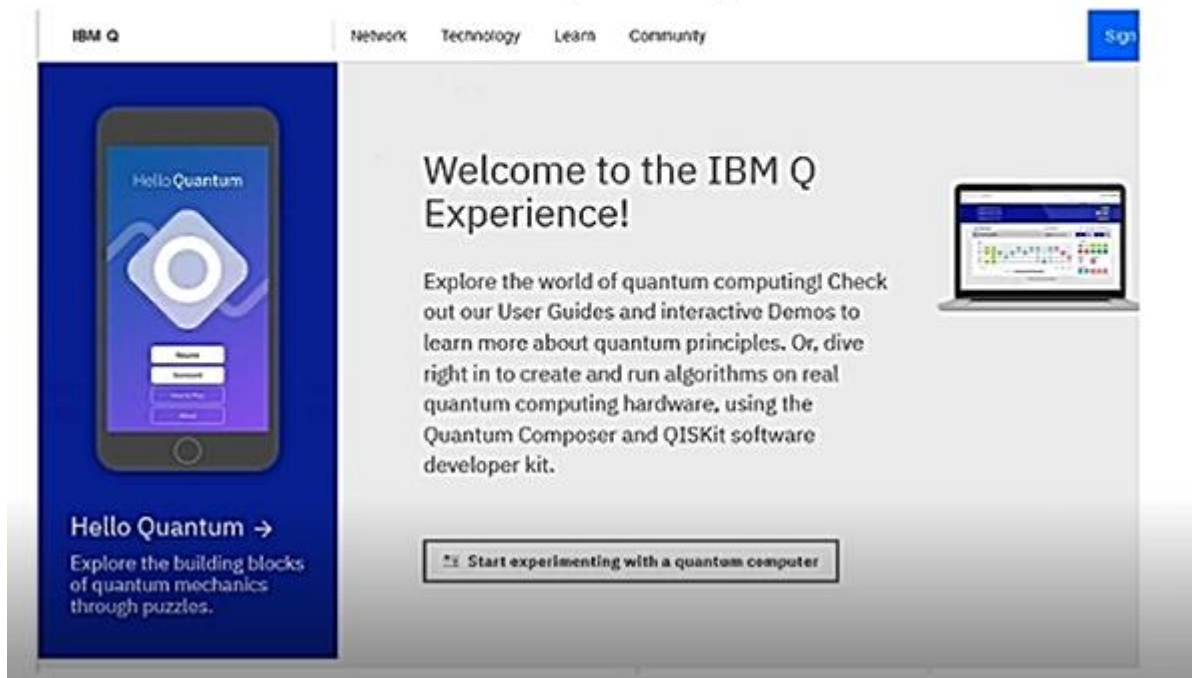
CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law



Когда состоится переход на атомный уровень?



<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/experience>



Квантовый компьютер IBM 50 кубит



<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/tutorial?sectionId=full-user-guide&page=introduction>

IBM Q-computer

- <https://www.research.ibm.com/ibm-q/>

<https://quantum-computing.ibm.com/>

На чем делать ?

Key:

- Atomic number
- Symbol
- Name
- Average atomic mass

Metals:

- Alkali metals
- Alkaline-earth metals
- Transition metals
- Other metals

Nonmetals:

- Hydrogen
- Semiconductors
- Halogens
- Noble gases
- Other nonmetals

Period

Group 1 Group 2 Group 3 Group 4 Group 5 Group 6 Group 7 Group 8 Group 9 Group 10 Group 11 Group 12 Group 13 Group 14 Group 15 Group 16 Group 17 Group 18

1 H Hydrogen 1.007 94

2 Li Lithium 6.941 Be Beryllium 9.012 182

3 Na Sodium 22.989 768 Mg Magnesium 24.305

4 K Potassium 39.098 31 Ca Calcium 40.078 Sc Scandium 44.955 909 Ti Titanium 47.867 V Vanadium 50.941 Cr Chromium 51.996 Mn Manganese 54.938 044 Fe Iron 55.845 Co Cobalt 58.933 196 Ni Nickel 58.693 4 Cu Copper 63.546 Zn Zinc 65.38

5 Rb Rubidium 85.4678 Sr Strontium 87.62 Y Yttrium 88.905 85 Zr Zirconium 91.224 Nb Niobium 92.906 38 Mo Molybdenum 95.94 Tc Technetium (98) Ru Ruthenium 101.07 Rh Rhodium 102.905 50 Pd Palladium 106.42 Ag Silver 107.8682 Cd Cadmium 112.411 In Indium 114.818 Sn Tin 118.710 Sb Antimony 121.757 Te Tellurium 127.60 Br Bromine 79.904 Kr Krypton 83.8

6 Cs Cesium 132.905 45 Ba Barium 137.327 La Lanthanum 138.905 Hf Hafnium 178.49 Ta Tantalum 180.9479 W Tungsten 183.84 Re Rhenium 186.207 Os Osmium 190.23 Ir Iridium 192.222 Pt Platinum 195.084 Au Gold 196.966 55 Hg Mercury 200.59 Tl Thallium 204.3835 Pb Lead 207.2 Bi Bismuth 208.980 4 Po Polonium (209) At Astatine (210) Rn Radon (222)

7 Fr Francium (223) Ra Radium (226) Ac Actinium (227) Rf Rutherfordium (261) Db Dubnium (262) Sg Seaborgium (266) Bh Bohrium (264) Hs Hassium (277) Mt Meitnerium (268) Ds Darmstadtium (271) Uun* Ununbium (272) Uub* Ununtrium (273) Uuq* Ununquadium (285) Uuq* Ununquadium (286) Uuq* Ununquadium (287) Uuq* Ununquadium (288) Uuq* Ununquadium (289) Uuq* Ununquadium (290) Uuq* Ununquadium (291) Uuq* Ununquadium (292) Uuq* Ununquadium (293) Uuq* Ununquadium (294) Uuq* Ununquadium (295) Uuq* Ununquadium (296) Uuq* Ununquadium (297) Uuq* Ununquadium (298) Uuq* Ununquadium (299) Uuq* Ununquadium (300)

8 Ce Cerium 140.12 Ce Pr Praseodymium 140.907 45 Nd Neodymium 144.24 Pm Promethium (145) Sm Samarium 150.36 Eu Europium 151.964 Gd Gadolinium 157.25 Tb Terbium 158.925 34 Dy Dysprosium 162.50 Ho Holmium 164.930 32 Er Erbium 167.26 Tm Thulium 168.930 41 Yb Ytterbium 173.04 Lu Lanthanum 174.967

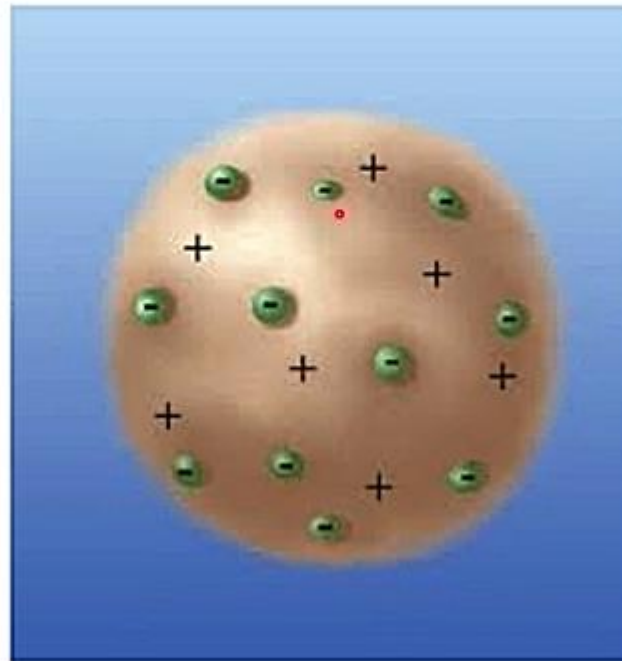
9 Th Thorium 232.037 91 Pa Protactinium 231.036 92 U Uranium 238.0289 Np Neptunium (237) Pu Plutonium (244) Am Americium (243) Cm Curium (247) Bk Berkelium (247) Cf Californium (251) Es Einsteinium (252) Fm Fermium (257) Md Mendelevium (258) No Nobelium (259) Lr Lawrencium (262)

10 Ce Cerium 140.12 Ce Pr Praseodymium 140.907 45 Nd Neodymium 144.24 Pm Promethium (145) Sm Samarium 150.36 Eu Europium 151.964 Gd Gadolinium 157.25 Tb Terbium 158.925 34 Dy Dysprosium 162.50 Ho Holmium 164.930 32 Er Erbium 167.26 Tm Thulium 168.930 41 Yb Ytterbium 173.04 Lu Lanthanum 174.967

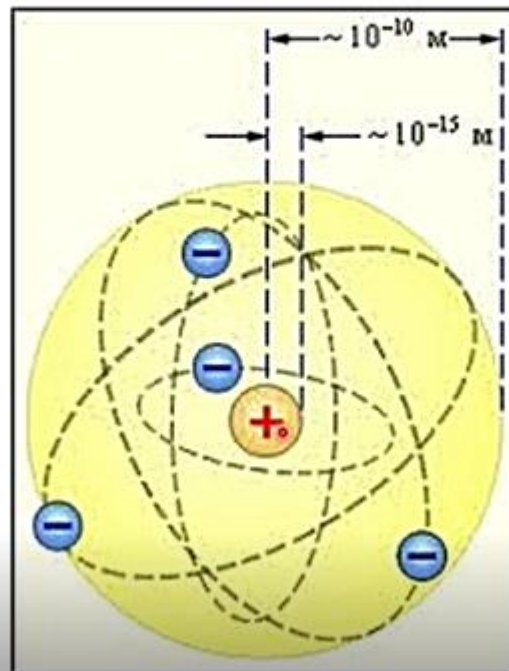
11 Th Thorium 232.037 91 Pa Protactinium 231.036 92 U Uranium 238.0289 Np Neptunium (237) Pu Plutonium (244) Am Americium (243) Cm Curium (247) Bk Berkelium (247) Cf Californium (251) Es Einsteinium (252) Fm Fermium (257) Md Mendelevium (258) No Nobelium (259) Lr Lawrencium (262)

The atomic masses listed in this table reflect the precision of current measurements. Values listed in parentheses are those of the element's most stable or most common isotope. In situations throughout the table, however, atomic masses have been rounded to two places to the right of the decimal.

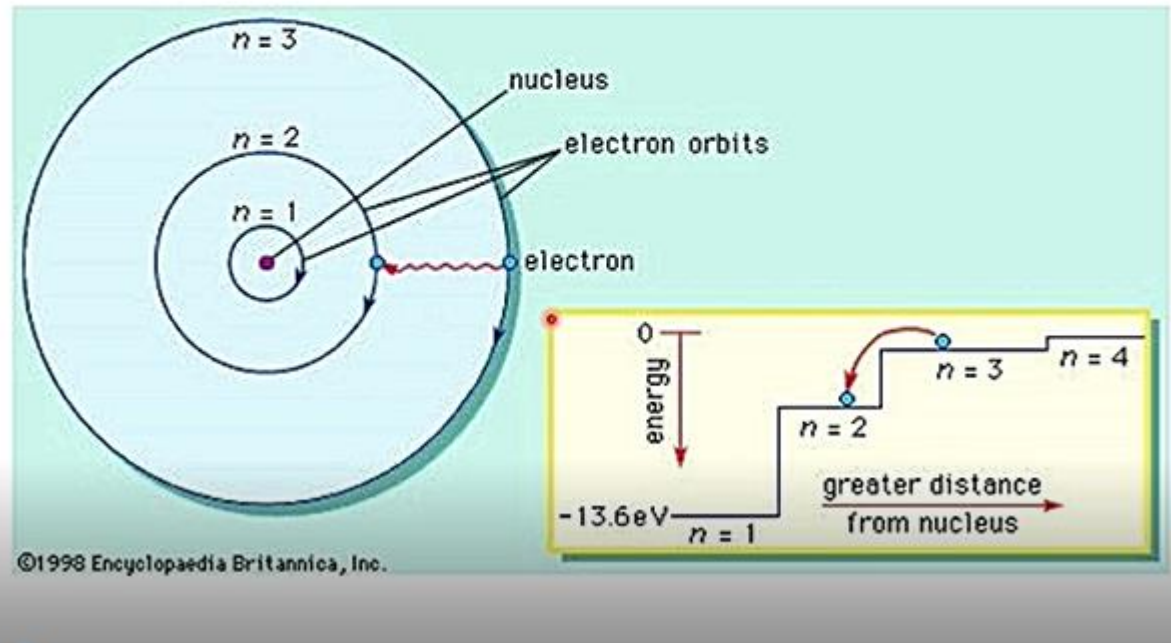
Модель Томсона



Модель Резерфорда

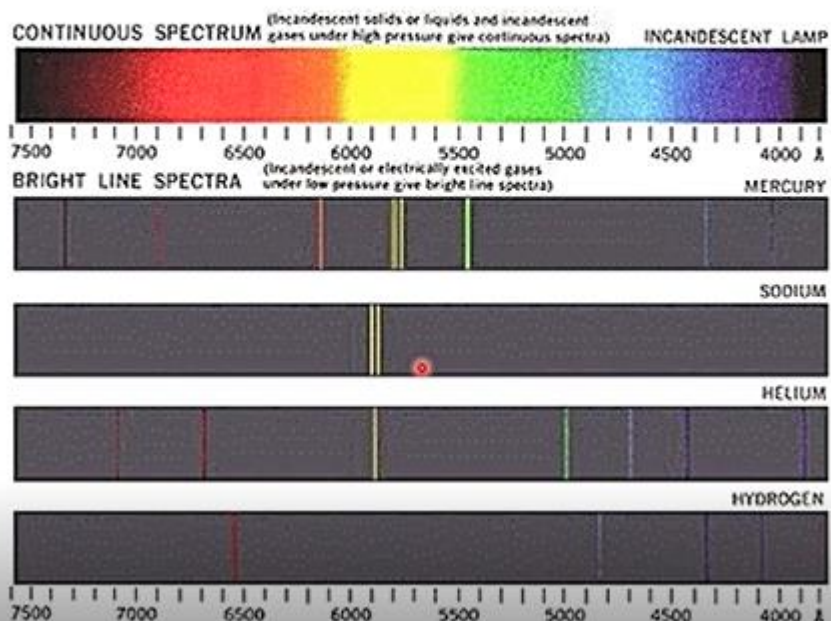


Модель атома Бора

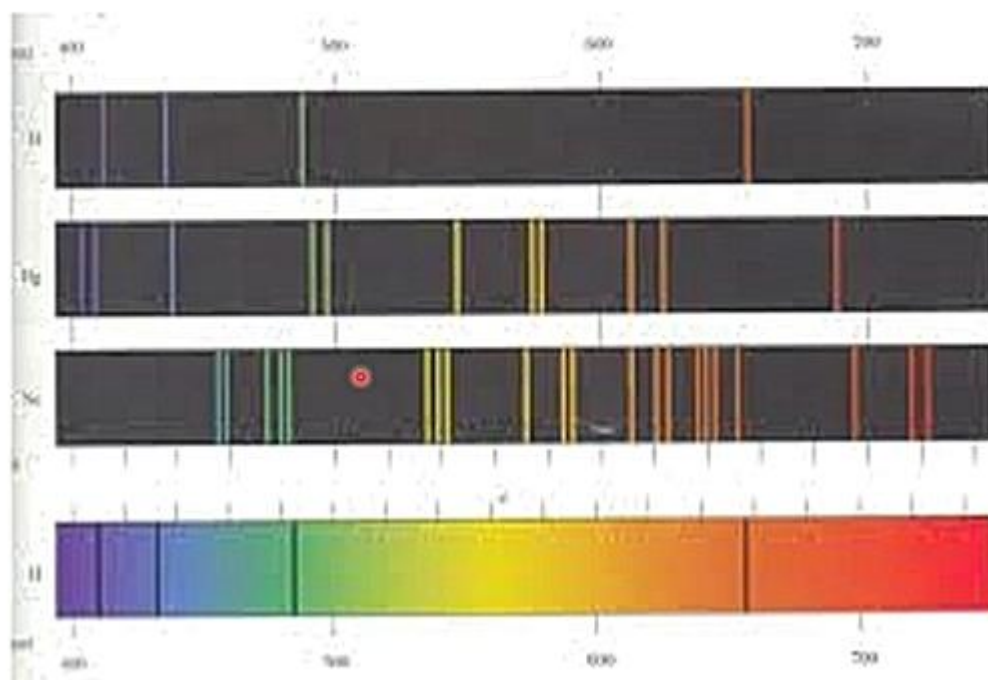


Спектры атомов объяснить не могла ни одна из моделей

EMISSION SPECTRA



© 1986 Saunders Publishing, "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 2/e" by Raymond A. Serway



Квантовый компьютер

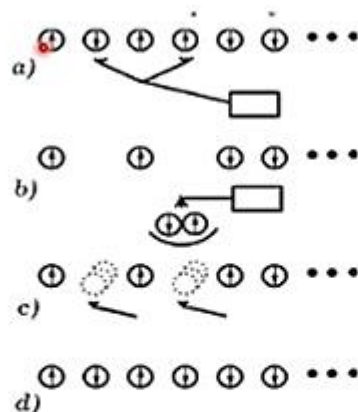
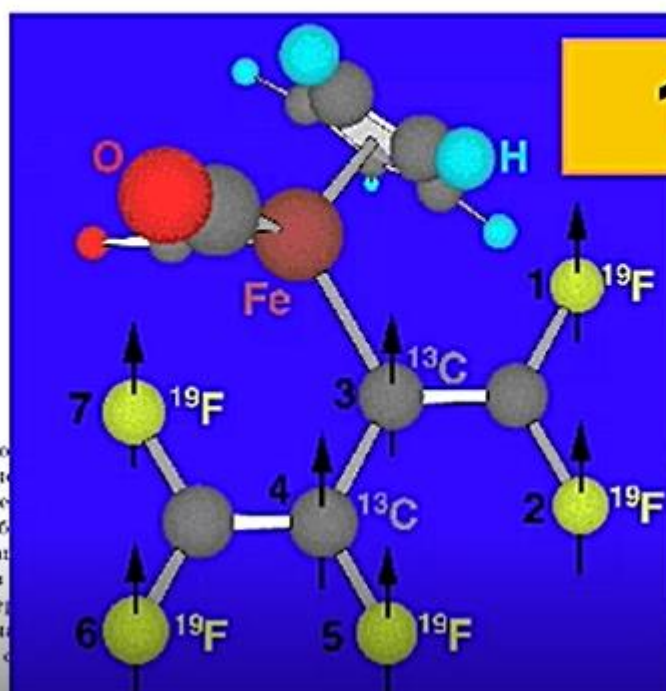


Рис. 9. Модельный квантовый компьютер в представлении Шора [21]. Первоначально все частицы имеют спины вниз. Этап *a*) классическая машина берет отдельные спины или пары спинов и на этапе *b*) производит подобранную однобитную или двубитную операцию; на этапе *c*) «скрещенные» частицы возвращаются на свои первоначальные места. Эти три этапа повторяются много раз в соответствии с командами, заданными обычным классическим компьютером. Когда этот цикл завершен, этап *d*) состоит в измерении состояния частиц (помещая их в некоторую частную двоичную строку); эта двоичная строка является результатом вычисления.

Квантовый компьютер



$$15 = 5 \times 3$$

Рис. 9. Молекула, которая берет отдельные кубиты и возвращает их много раз. Компьютер должен справиться с двойной

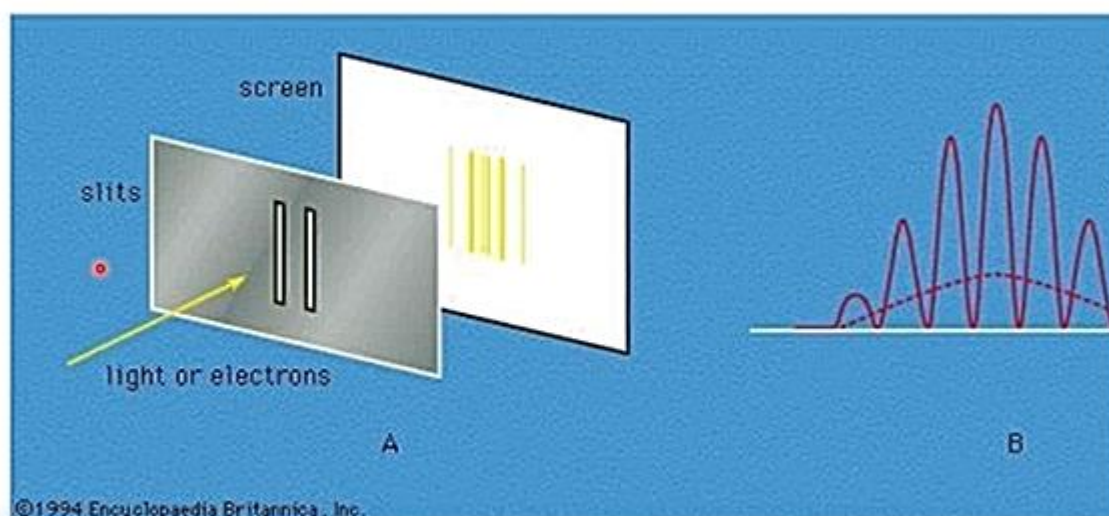
1). Перемещение информации в выбранной части системы происходит в классическом состоянии (сообщение); эта

Квантовая криптография



№	Действия									Секретность
1	A → B	1	0	0	1	0	0	1	1	секретно
		↓	/	↔	\	↔	↔	↓	↓	квант. канал
2	B измеряет	+	+	×	×	+	×	×	+	открытый канал
		↓	↓	/	\	↔	/	/	↓	секретно
3	A → B: тип изм. A → B: верно	✓			✓	✓			✓	открытый канал
4	A и B создают код	↓			\	↔			↓	секретно
		1			1	0			1	

Волновые свойства электрона



Волновые свойства

- Электромагнитное поле

- Векторный потенциал

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \vec{A}_0 \exp(-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}))$$

- Волна де Бройля

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp\left(-i\left(\frac{\varepsilon}{\hbar} t - \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{\hbar}\right)\right)$$

§1 Алгебра операторов

- $y=F(x)$; $y = F \rightarrow x$;
- **Оператор == символическое изображение математической операции**
- **Обозначение**
- **Равенство операторов**
- **Число – частный случай оператора**

§1 Алгебра операторов

Оператор == символическое изображение математической операции

Обозначение

Равенство операторов

Число – частный случай оператора

§ Алгебра операторов ...

- Сложение (вычитание) операторов
- Произведение операторов !!
- Коммутатор двух операторов
- Целая положительная степень
- Обратный оператор
- Функция от оператора
- Линейный оператор
- Эрмитовский оператор

\$ Алгебра операторов ...

Сложение (вычитание) операторов

Произведение операторов !!

Коммутатор двух операторов

Целая положительная степень

Обратный оператор

Функция от оператора

Линейный оператор

Эрмитовский оператор

Определение понятия оператор

$$\begin{array}{l}
 \sqrt{\varphi} \rightarrow \sqrt{\cdot} \cdot \varphi \\
 \sin \varphi \rightarrow \sin \cdot \varphi \\
 \frac{d\varphi}{dx} \rightarrow \frac{d}{dx} \cdot \varphi \\
 \varphi^* \rightarrow \text{компл.с.}\varphi \\
 P_{12}(\varphi_{12}) \rightarrow \varphi(2,1) - \text{кет}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \sqrt{\varphi} \\ \sin \varphi \\ \frac{d\varphi}{dx} \\ \varphi^* \\ P_{12}(\varphi_{12}) \end{array}} \right\} \Rightarrow \hat{F} \cdot \varphi$$

Определение понятия оператор

Определение понятия оператор

$$\begin{array}{l}
 \sqrt{\varphi} \rightarrow \sqrt{\cdot} \cdot \varphi \\
 \sin \varphi \rightarrow \sin \cdot \varphi \\
 \frac{d\varphi}{dx} \rightarrow \frac{d}{dx} \cdot \varphi \\
 \varphi^* \rightarrow \text{компл.с.}\varphi \\
 P_{12}(\varphi_{12}) \rightarrow \varphi(2,1) - \text{кет}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \sqrt{\varphi} \\ \sin \varphi \\ \frac{d\varphi}{dx} \\ \varphi^* \\ P_{12}(\varphi_{12}) \end{array}} \right\} \Rightarrow \hat{F} \cdot \varphi$$

Определение понятия оператор

Свойства

1. Равенство операторов $\hat{A} = \hat{B}$
 $\hat{A}\psi = \hat{B}\psi$

2. Число $\hat{A}\psi = 2\psi$. $\hat{A} = 2$.

3. Сложение – Вычитание
 $\hat{C} = \hat{A} \pm \hat{B}$ $\hat{C}\psi = (\hat{A} + \hat{B})\psi =$
 $= \hat{A}\psi + \hat{B}\psi$

4. Произведение
 $\hat{C} = \hat{A} \cdot \hat{B} \rightarrow \hat{C}\psi = \hat{A}(\hat{B}\psi) = \hat{A}\psi = f$

Свойства

1. Равенство операторов
2. Число
3. Сложение – Вычитание
4. Произведение

свойства/определения

5 Коммутатор $\hat{C} \equiv [\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A} \cdot \hat{B} - \hat{B} \cdot \hat{A}$

6 $\hat{A}^n = \underbrace{\hat{A} \cdot \hat{A} \cdot \hat{A} \dots \hat{A}}_{n \text{ раз}}$ степени

7 \hat{A}^{-1} обратный $\hat{A}^{-1} \cdot \hat{A} = \mathbb{I}$

8. $\varphi(\hat{A}) \rightarrow \varphi(x) = \sum_n \frac{1}{n!} x^n \frac{d^n \varphi}{dx^n} \Big|_{x=0}$

$\varphi(\hat{A}) = \sum_n \frac{1}{n!} \hat{A}^n \cdot \frac{d^n \varphi}{dx^n} \Big|_{x=0}$

свойства/определения

5 Коммутатор

6 степень

7 обратный

Линейный и Эрмитовский оператор

$$\text{Линейный } \hat{F}(c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2) = c_1 \hat{F} \psi_1 + c_2 \hat{F} \psi_2$$

$$10. \int \varphi^* \hat{F} \psi dv = \int \psi \hat{F}^* \varphi^* dv$$

$$\hat{F} = \hat{F}^+$$

Пример для функции $f(x)=f(x+2\pi i)$

Линейный и Эрмитовский оператор

9 Линейный

Пример для функции

Алгебра операторов

1. Равенство операторов $\hat{A} = \hat{E}$
2. Число – частный случай оператора $\hat{A} = 2$
3. Сложение – вычитание операторов $\hat{A} = \hat{E} \pm \hat{O}$
4. Произведение $\hat{A} = \hat{E} \cdot \hat{O}$
5. Коммутатор $\hat{A} = [\hat{E}, \hat{O}] = \hat{E} \cdot \hat{O} - \hat{O} \cdot \hat{E}$
6. Степень $\hat{A}^n = \hat{A} \cdot \hat{A} \dots \hat{A}$
7. Обратный оператор $\hat{A}^{-1} \cdot \hat{A} = 1$
8. Функция от оператора $f(\hat{A}) = \sum \frac{1}{n!} A^n \frac{d^n f(x)}{dx^n} \Big|_{x=0}$
9. Линейный $\hat{A}(c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2) = c_1 \hat{A} \varphi_1 + c_2 \hat{A} \varphi_2$
10. Эрмитовский $\int \varphi_1^* \hat{A} \varphi_2 dx = \int \varphi_2 \hat{A}^* \varphi_1^* dx ; \quad \hat{A} = \hat{A}^\dagger$

Алгебра операторов

1. Равенство операторов
2. Число – частный случай оператора
3. Сложение – вычитание операторов
4. Произведение
5. Коммутатор
6. Степень
7. Обратный оператор
8. Функция от оператора
9. Линейный
10. Эрмитовский