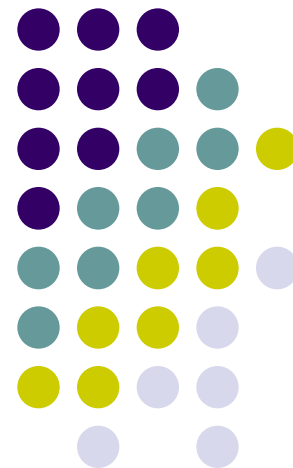
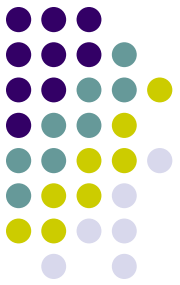
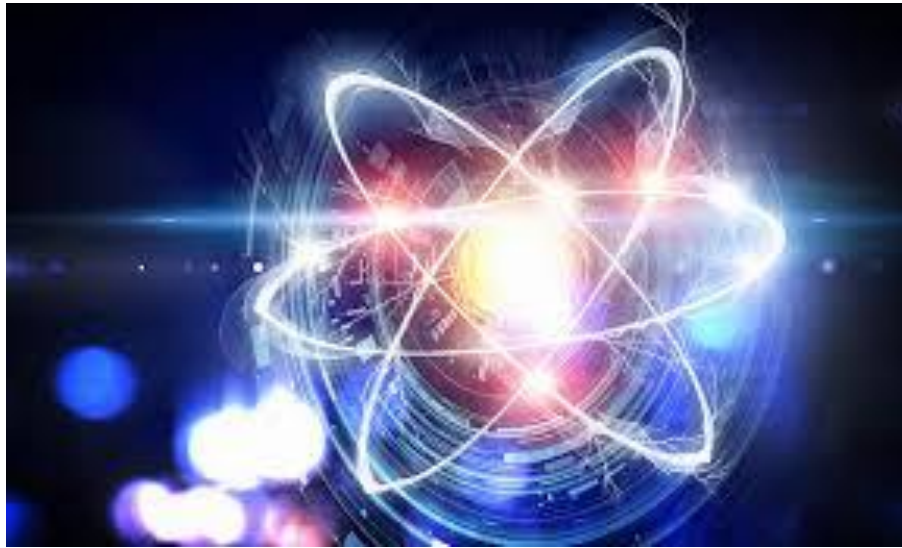


СОВРЕМЕННЫЕ КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В ВЕДУЩИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ РОССИИ

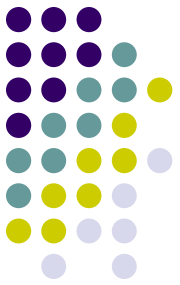


А.В. Горохов,
gorokhov.av@ssau.ru
alvgorokhov@gmail.com





Современные квантовые технологии основаны на использовании фундаментальных законов физики, открытых в XX веке. Некоторые положения квантовых технологий могут быть представлены как обобщение классической теории в тех случаях, когда информация передается и хранится с помощью квантовых состояний, а не в форме классических битов.



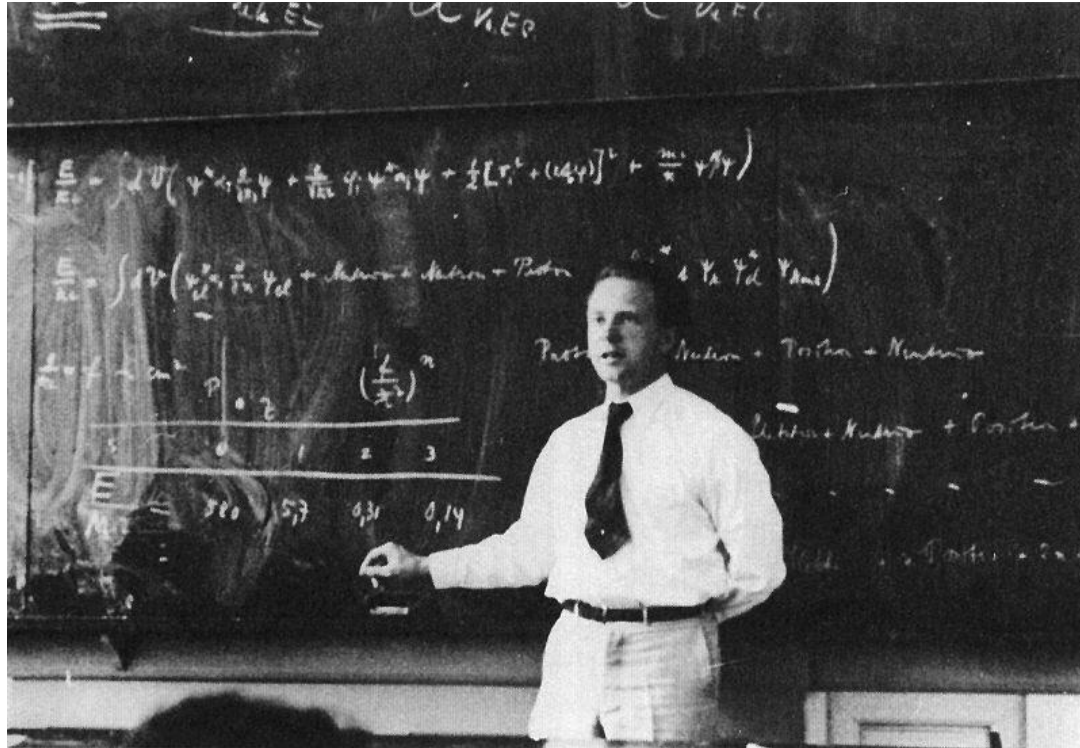
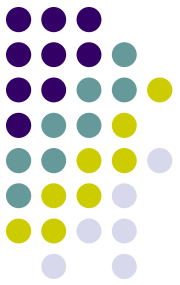
Квантовая теория в основном была создана в течение первых трёх десятилетий 20-го века благодаря работам М. Планка, А. Эйнштейна, Н. Бора, А. Комптона, Л. де Бройля, В. Паули, М. Борна, В. Гейзенберга, Э. Шредингера и П. Дирака. В честь 100-летия создания квантовой механики 2025 год был объявлен Международным Годом квантовых науки и технологий.



"... в теоретической физике нам удастся объяснить то, что мы уже не можем себе представить..." Л.Д. Ландау



Матричная квантовая механика, Гейзенберг, 1925



Werner Karl Heisenberg

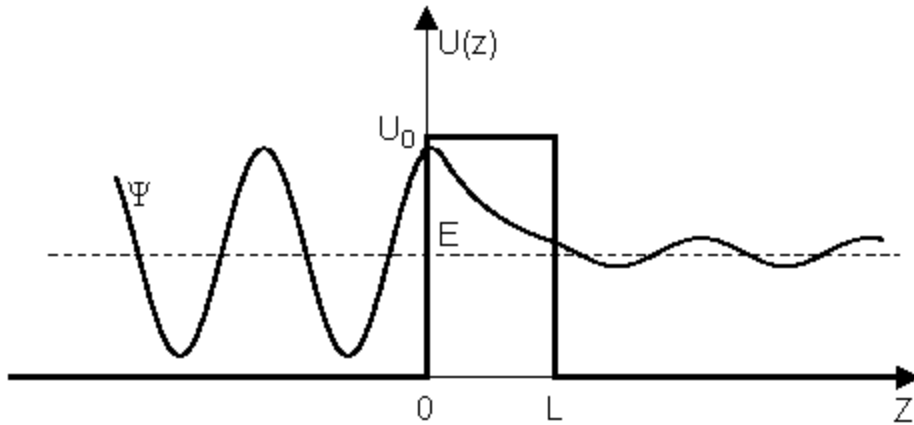
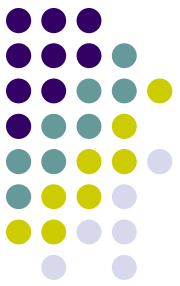
(1901-1976)

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2 \quad \text{Соотношение неопределенности}$$

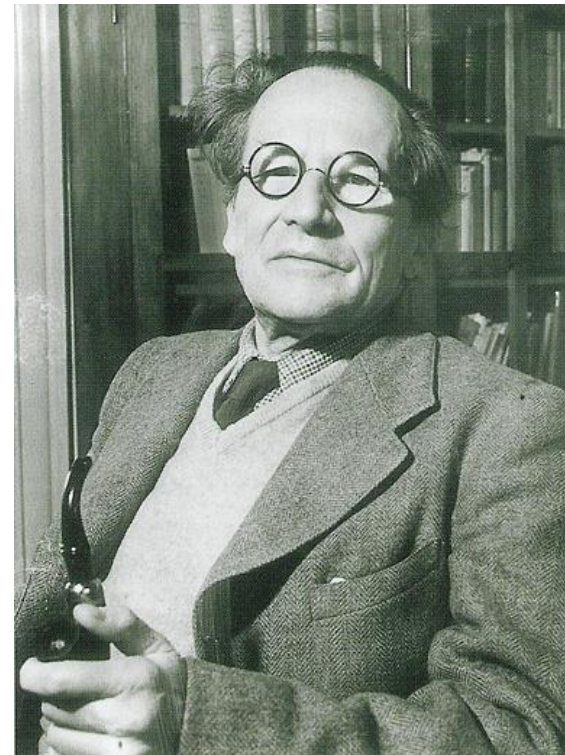
В. Паули в 1925 г., используя идеи матричной механики, вывел формулу для уровней энергии атома водорода

Волновая механика Шредингера, 1926

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$



$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi + \left(E - \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$$
$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0$$



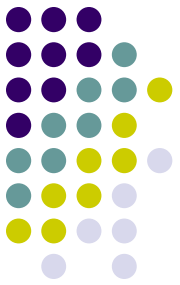
Эрвин Шредингер
(1887-1961)

Нерасплывающиеся волновые пакеты для гармонического осциллятора

Решение уравнения Шредингера для нерелятивистского Н - атома

Вероятностная интерпретация

$$P(\vec{r})dV \equiv |\psi(\vec{r})|^2 dV$$



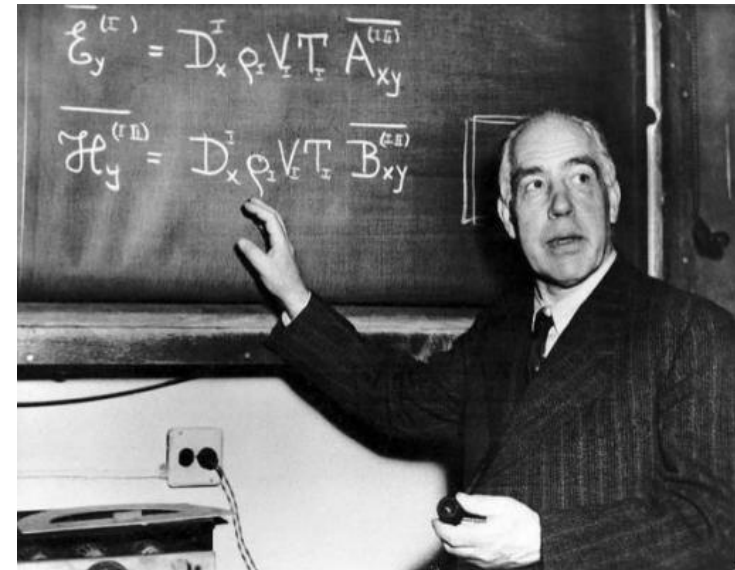
Копенгагенская интерпретация квантовой механики



Макс Борн

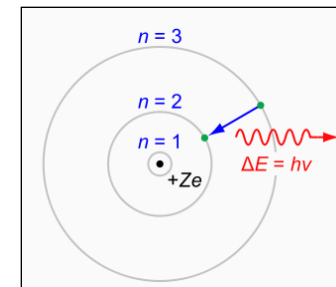


Паскуаль Иордан



Нильс Бор

“Тот, кого не потрясла квантовая теория, скорее всего не понял ни слова.” (Н. Бор)



Квантовая механика, П. Дирак, 1927



Теория представлений. Эквивалентность подходов Шредингера и Гейзенберга. Бра- и кет- векторы

$$|\Psi\rangle = c_1 |\Psi_1\rangle + c_2 |\Psi_2\rangle$$

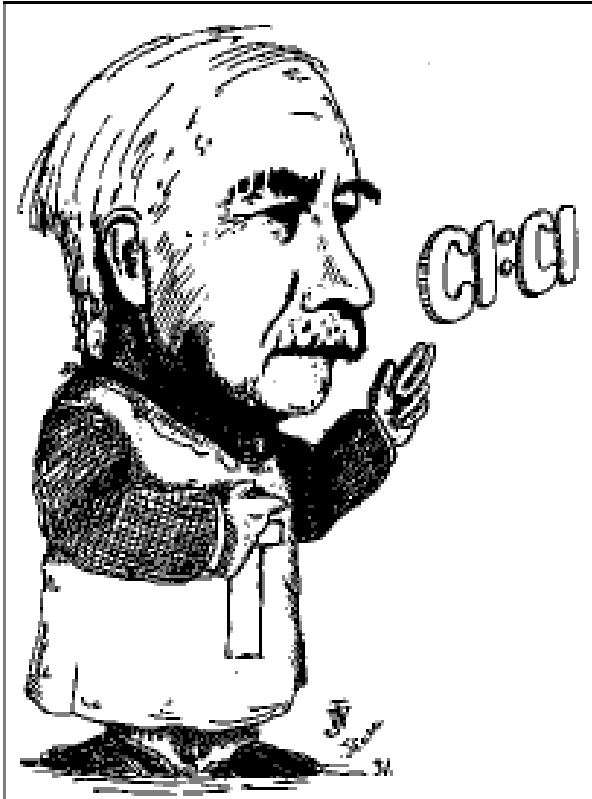
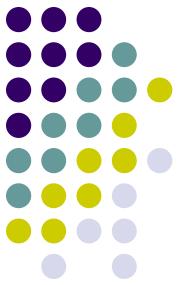
$$H = c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2$$

Релятивистская квантовая механика,
уравнение Дирака



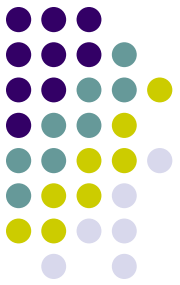
Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)

Термин «фотон» (1928)!



“Atom of light” = photon

Gilbert Newton Lewis (1875-1946)



Мазер, 1954

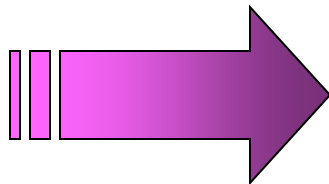
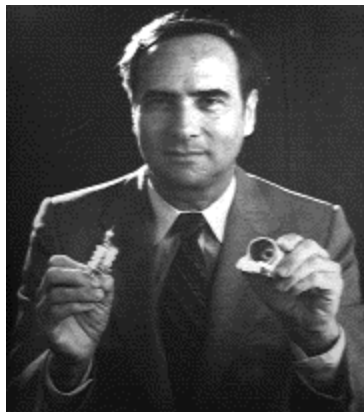


Н.Г. Басов, А.М. Прохоров, ФИАН, СССР; Ch. Townes, USA

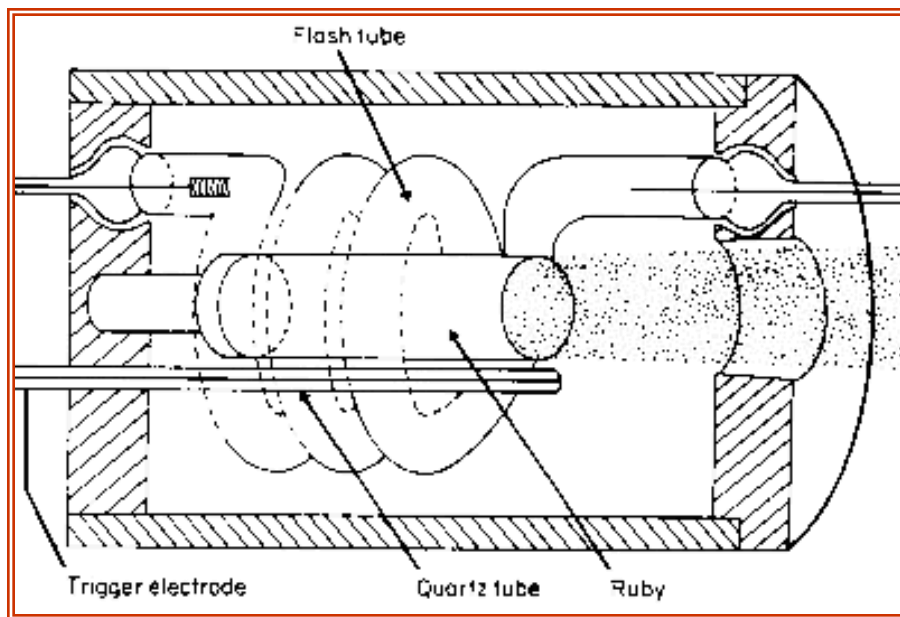
Нобелевская премия, 1964 г.



Лазер, 1960



Т. Мейман





ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Квантовая информация

С.Я. Килин

Новое направление физики — квантовая информация — возникло на стыке квантовой механики, оптики, теории информации и программирования, дискретной математики, лазерной физики и спектроскопии и включает в себя вопросы квантовых вычислений, квантовых компьютеров, квантовой телепортации и квантовой криптографии, проблемы декогеренции и спектроскопии одиночных молекул и примесных центров. Сообщается о некоторых новых результатах в этой быстро развивающейся области исследований.

PACS number: 03.67.-a

Содержание

1. Введение (507).
2. Шрёдингер и его знаменитая работа 1935 г. (508).
2.1. Суперпозиция, парадокс шрёдингеровского кота. 2.2. Перепутанные (entangled) состояния. 2.3. Невозможность клонирования квантовых состояний.
3. Квантовая телепортация (512).
4. Квантовая криптография (514).
5. Квантовые вычисления и компьютеры (516).
5.1. Обратимые и необратимые классические процессоры.
5.2. Квантовые компьютеры.
6. Проблема декогеренции (522).
6.1. Релаксация как неунитарная эволюция состояния. Конструирование квантовых резервуаров. 6.2. Релаксация как квантовый стохастический процесс. Чистота условных состояний. 6.3. Коррекция ошибок с помощью обратной связи.
7. Заключение (525).

Список литературы (525).

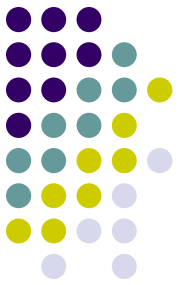
1. Введение

Развитие квантовой оптики конца XX века стремительно заставляет нас — не только ученых, работающих в области квантовой физики, но и людей далеких от этой области — переосмыслить основополагающие утверждения квантовой теории, сформулированные в период ее создания. Связано это с тем, что весьма абстрактные идеи, лежащие в основе квантовой физики, казавшиеся недавно уделом внимания только единиц, оказываются, затрагивают практически всех благодаря новым технологическим возможностям, прежде всего в области

оптических взаимодействий. Квантовые компьютеры, квантовая телепортация, квантовая криптография, возможность наблюдения отдельных атомов, ионов, молекул, в том числе биологически важных и манипулирования ими — все это объекты и явления, относящиеся к квантовому миру, который очень непросто воспринимается при оперировании понятиями из окружающего нас классического мира макроскопической физики и требует для своего описания адекватного языка — языка квантовой механики и квантовой теории поля.

Квантовая механика, основные идеи которой первыми сформулировали Нильс Бор (1885–1962 гг.), Эрвин Шрёдингер (1887–1961 гг.) и Вернер Гейзенберг (1901–1976 гг.), помимо аппарата, позволяющего рассчитывать энергетические состояния атомов и молекул и вычислять матричные элементы переходов между ними, незамедлительно востребованного практической физикой, содержала "идейную", философскую часть, обычно относимую к основаниям квантовой механики и оставшуюся практически невостребованной до недавнего времени. Именно эта часть квантовой механики объясняет необычность квантового мира. Наиболее полно и четко, порой специально доводя утверждения до парадоксальности, изложил эту часть квантовой теории Эрвин Шрёдингер в своей знаменитой работе 1935 г. [1], которую он сам не знал, как классифицировать: как "... реферат или генеральную исповедь" ("Referat oder Generalbeichte?"). В ней, употребляя современный термин, обсуждается одна из проблем квантовой информации — что мы можем узнать о состояниях объектов квантового мира и что происходит с объектами в процессе получения этого знания. Потребовалось больше полувека для того, чтобы глубина осознанного Шрёдингером стала необходимой при интерпретации экспериментов, направленных на практические приложения.

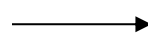
Как описать когерентное лазерное излучение на языке квантовой физики?



$$|n\rangle = (\hat{a}^+)^n / \sqrt{n!} |0\rangle$$

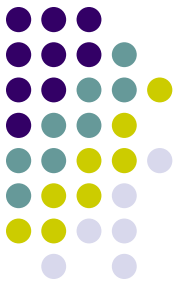
n – фотонное состояние

П. Дирак, 1932



$$\Delta n \Delta \phi \geq 1$$

Нелинейная оптика

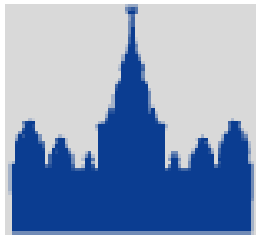


На семинаре кафедры волновых процессов, 70-ые годы



Р.В. Хохлов, А.С. Ахманов

МГУ, кафедра физики волновых процессов



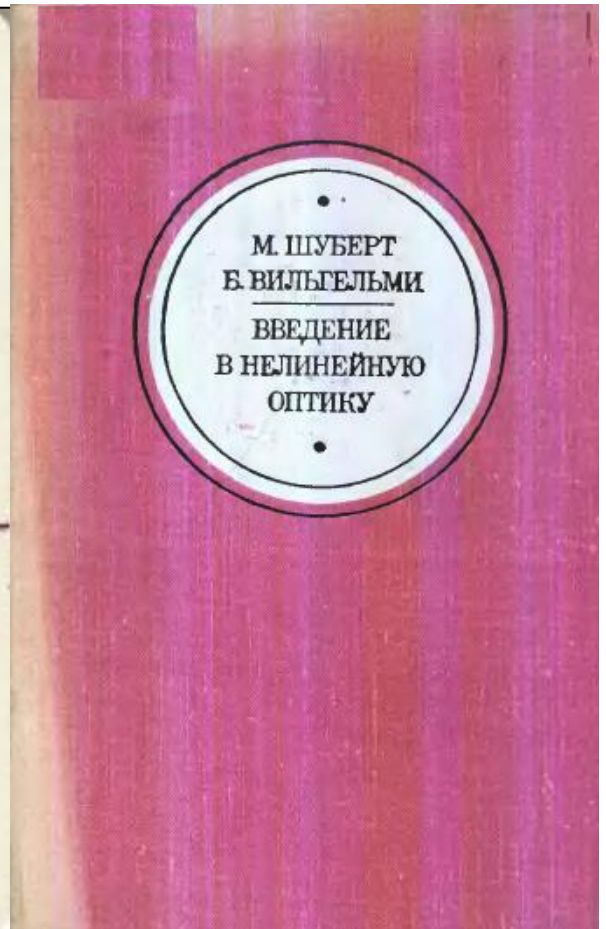
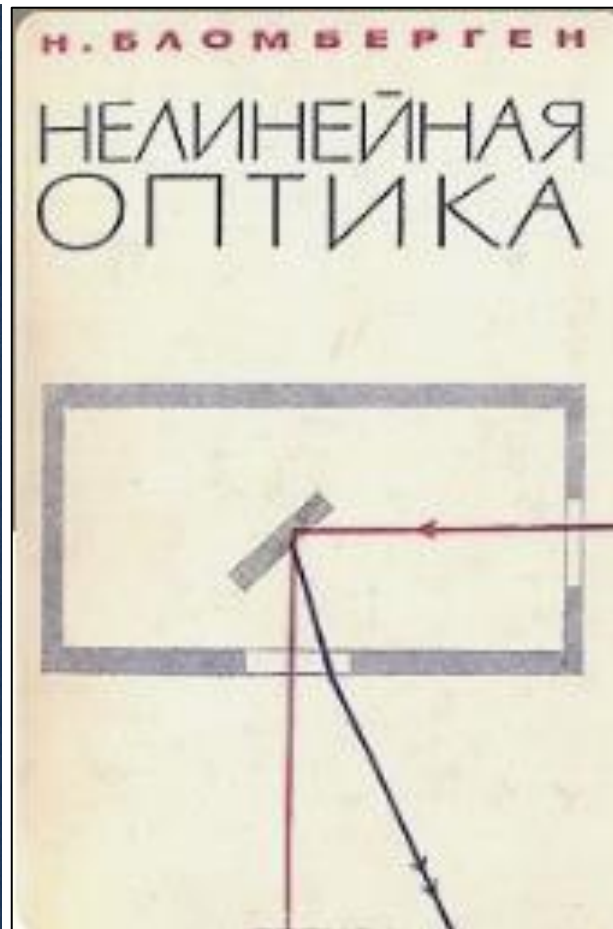
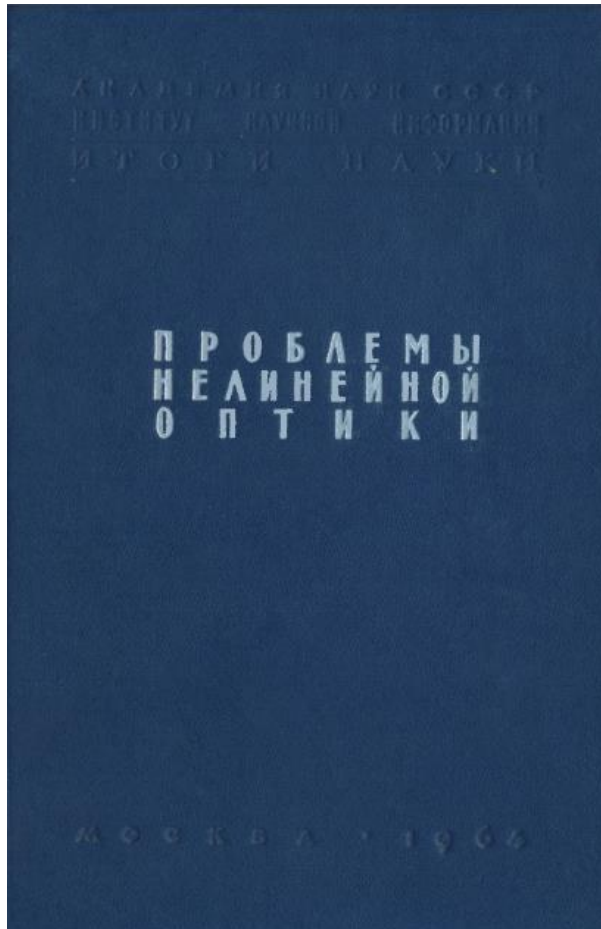
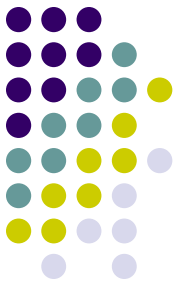
Н. Бломберген



Нобелевская
премия 1982 г.

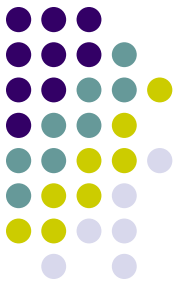
Когерентные нелинейные явления – нелинейная оптика

Нелинейная оптика, первые книги



Когерентные состояния в квантовой оптике

Эта проблема была решена в 1963 г. Р. Глаубером, который построил квантовую теорию когерентности. Были использованы когерентные состояния моды поля (гармонического осциллятора) и введены квантовые корреляционные тензоры, обобщающие классические величины $J_{\alpha\beta}$



R. Glauber, J.R. Klauder, E.C.G. Sudarshan

the canonical 4-momentum or gives infinite results. In our case of point charges in circular motion, the right-

corrections for retardation and other relativistic effects and, in the case of hydrogen, with small corrections for the motion of the nucleus.

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 131, NUMBER 6

15 SEPTEMBER 1963

Coherent and Incoherent States of the Radiation Field*

ROY J. GLAUBER

Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

(Received 29 April 1963)

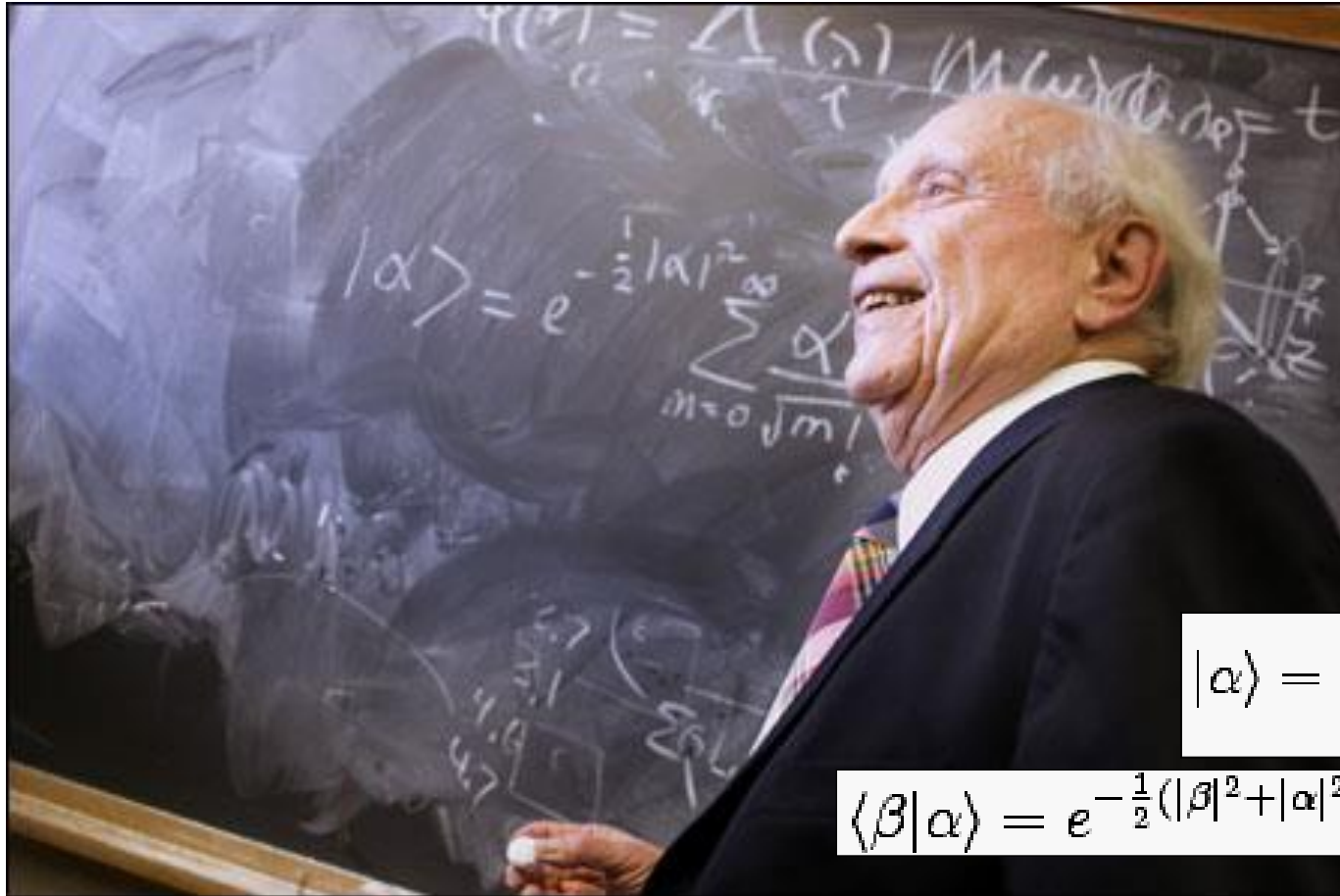
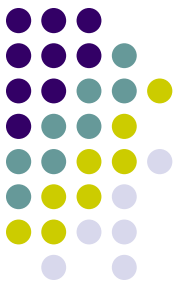
Methods are developed for discussing the photon statistics of arbitrary radiation fields in fully quantum-mechanical terms. In order to keep the classical limit of quantum electrodynamics plainly in view, extensive use is made of the coherent states of the field. These states, which reduce the field correlation functions to factorized forms, are shown to offer a convenient basis for the description of fields of all types. Although they are not orthogonal to one another, the coherent states form a complete set. It is shown that any quantum state of the field may be expanded in terms of them in a unique way. Expansions are also developed for arbitrary operators in terms of products of the coherent state vectors. These expansions are discussed as a general method of representing the density operator for the field. A particular form is exhibited for the density operator which makes it possible to carry out many quantum-mechanical calculations by methods resembling those of classical theory. This representation permits clear insights into the essential distinction between the quantum and classical descriptions of the field. It leads, in addition, to a simple formulation of a superposition law for photon fields. Detailed discussions are given of the incoherent fields which are generated by superposing the outputs of many stationary sources. These fields are all shown to have intimately related properties, some of which have been known for the particular case of blackbody radiation.

I. INTRODUCTION

FEW problems of physics have received more attention in the past than those posed by the dual wave-particle properties of light. The story of the solution of these problems is a familiar one. It has culminated in the development of a remarkably versatile quantum theory of the electromagnetic field. Yet, for reasons which are partly mathematical and partly, perhaps, the

to begin the development of a fully quantum-mechanical approach to the problems of photon statistics. We have quoted several of the results of this work in a recent note,¹ and shall devote much of the present paper to explaining the background of the material reported there.

Most of the mathematical development of quantum electrodynamics to date has been carried out through the use of a particular set of quantum states for the

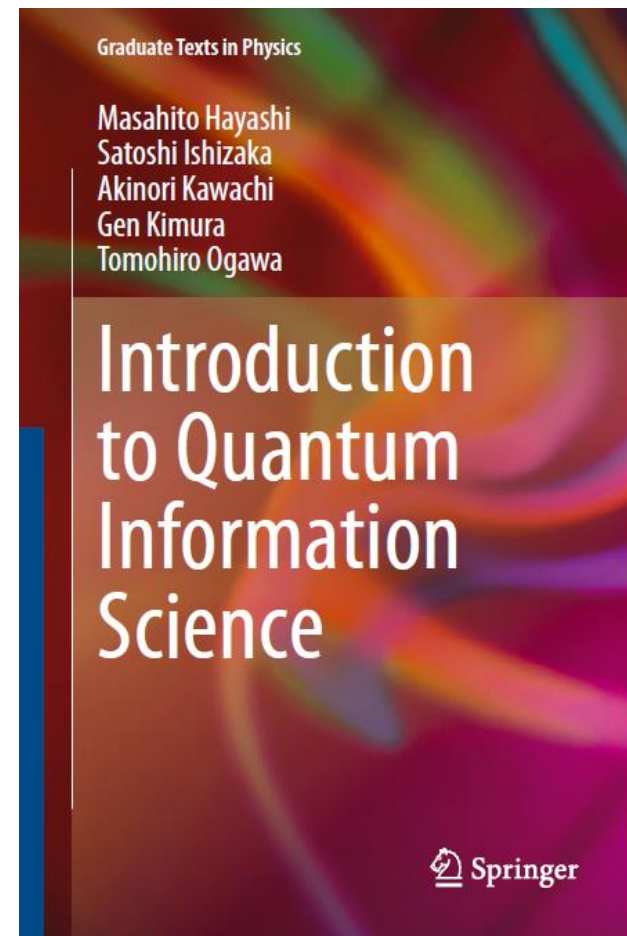
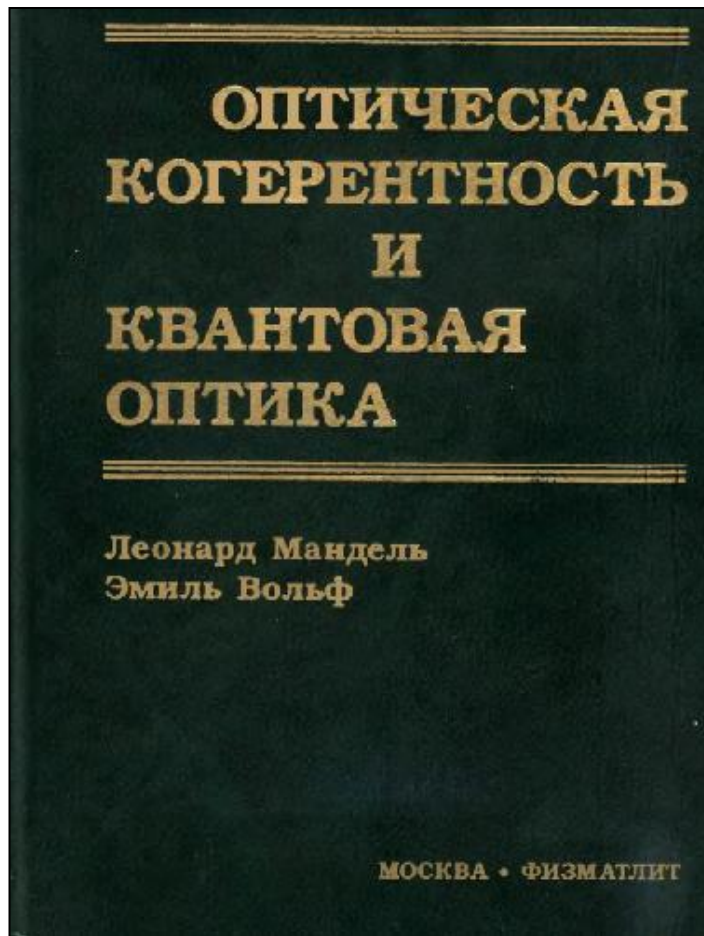
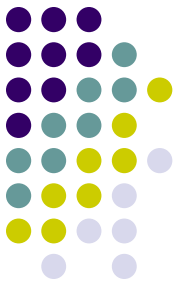


$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

$$\langle \beta | \alpha \rangle = e^{-\frac{1}{2}(|\beta|^2 + |\alpha|^2 - 2\beta^* \alpha)} \neq \delta(\alpha - \beta)$$

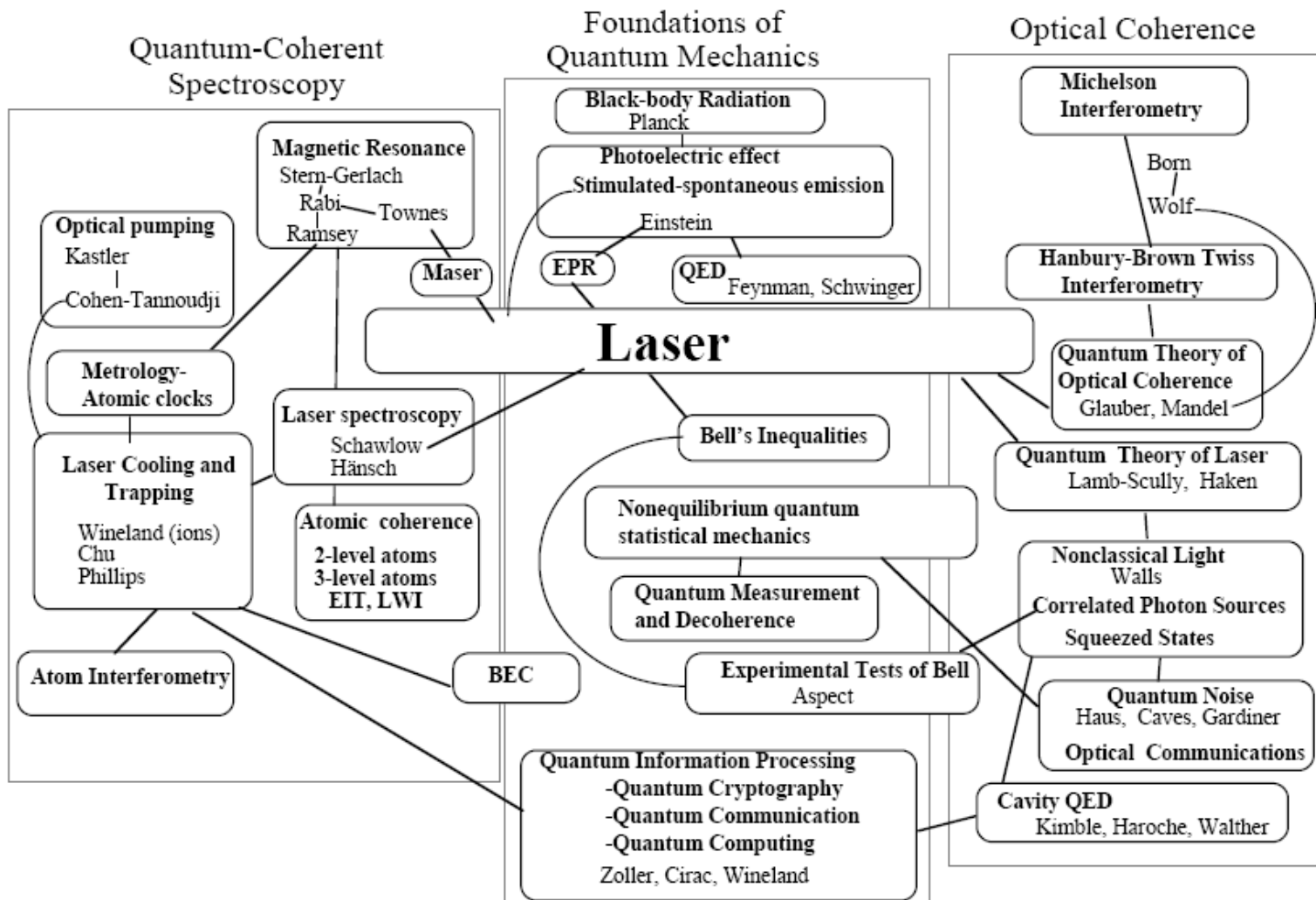
Когерентные состояния осциллятора (моды электромагнитного поля), 1963

Квантовая оптика

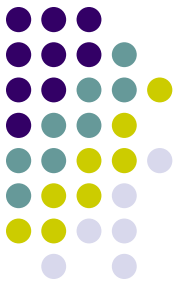




Quantum-Coherent Spectroscopy



Исследования по квантовой оптике активно развивались в СССР



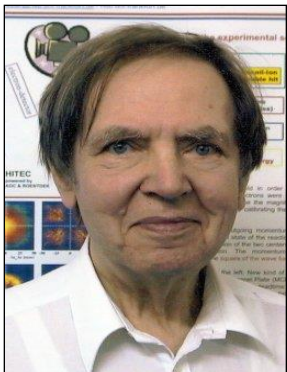
- Нелинейная оптика
- Сверхизлучение
- Сжатый свет
- Двух- и многоуровневые атомы
- Cavity QED, micromaser
- Диссипативные квантовые системы



В.А. Фок



Я.А. Смородинский



Ю.Н. Демков



В.И. Манько



Л.А. Шелепин



У.Х. Копвиллем

Новые явления и новые проблемы



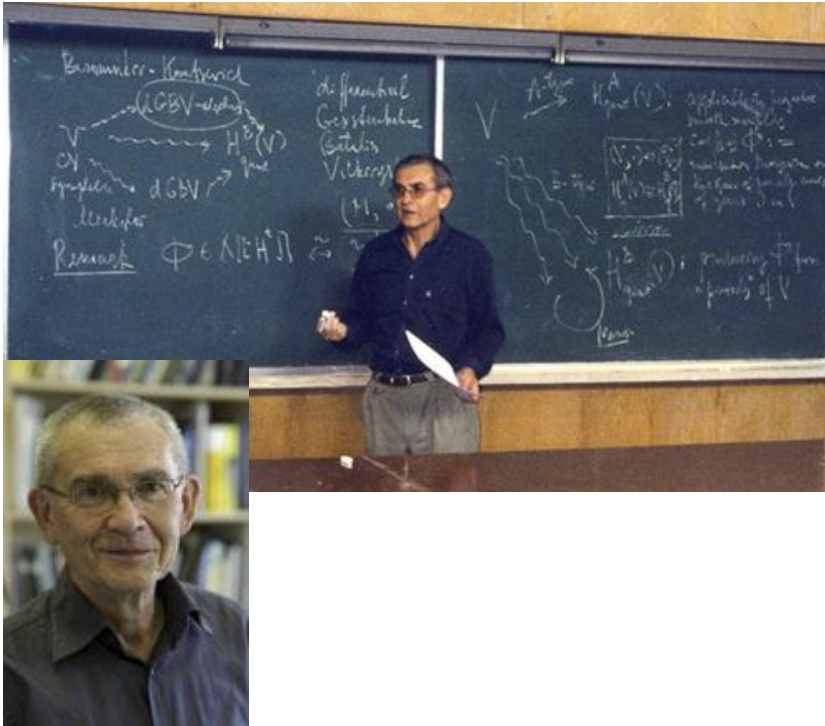
- Атомные пучки и квантовая электродинамика резонаторов
- Атомные конденсаты, атомный лазер
- Лазерное охлаждение
- **Квантовая теория информации**
- Запутанные состояния, декогеренция
- Квантовые вычисления и квантовые компьютеры
- Квантовая криптография
- Квантовая телепортация, парадокс ЭПР
- Квантовые чипы



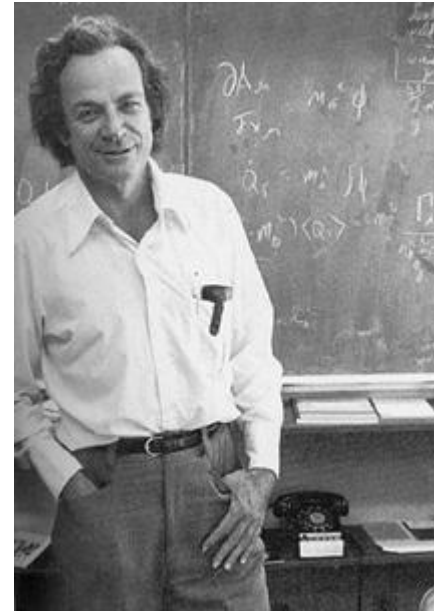
В.С. Летохов

*Институт спектроскопии РАН,
г. Троицк, Моск. обл.*

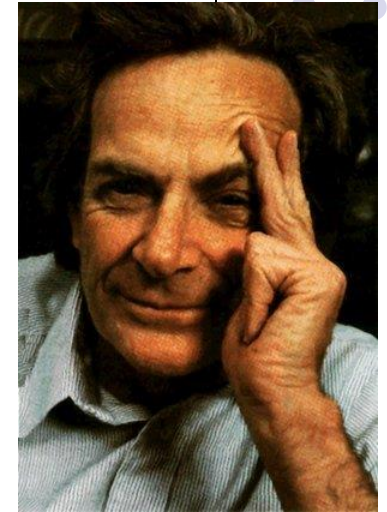
Квантовая информатика



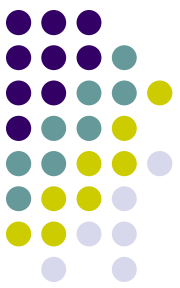
Ю.И. Манин, Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. Радио, 1980



R. Feynman, Simulating Physics with Computers // Int. Jour. Theor. Phys. 1982. V. 21. № 6/7. P. 467



S.Wiesner, "Квантовые" деньги, 1970



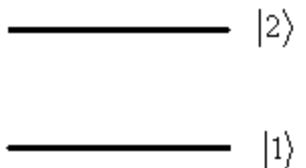
Квантовая информация

- **Квантовые состояния, матрица плотности (чистые и смешанные состояния)**

$$\hat{\rho} = |\Psi\rangle\langle\Psi|, \quad \hat{\rho} = \sum_s w_s |\psi_s\rangle\langle\psi_s|$$

- **Квантовая энтропия**

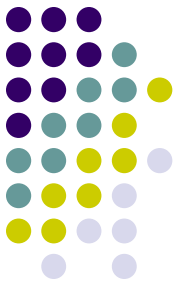
$$S(\rho) = - \text{Sp } \rho \log \rho$$

- **Кубиты** $|\Psi\rangle = c_1|1\rangle + c_2|2\rangle, \quad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$ 

- **Вычисление как физический процесс, квантовый параллелизм**

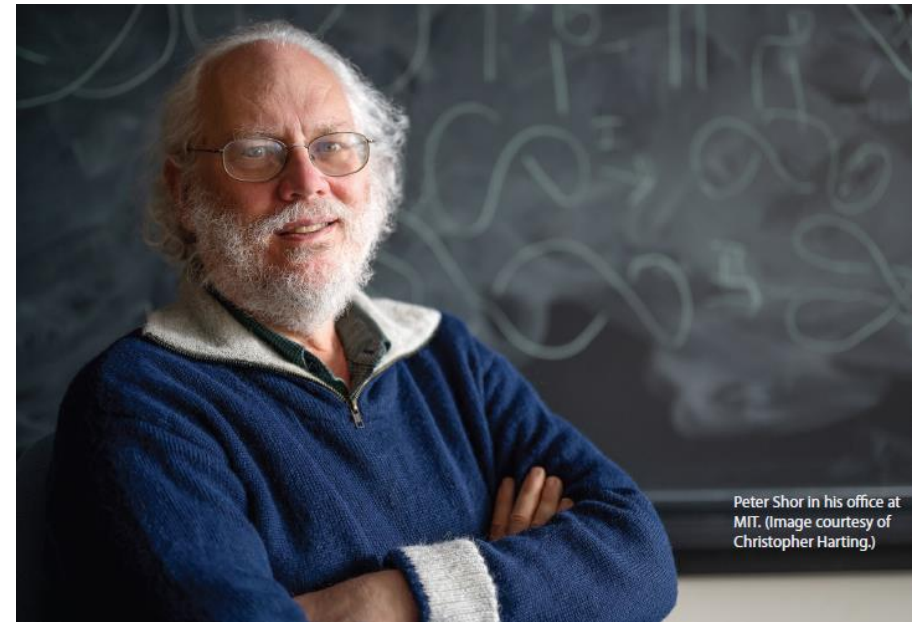
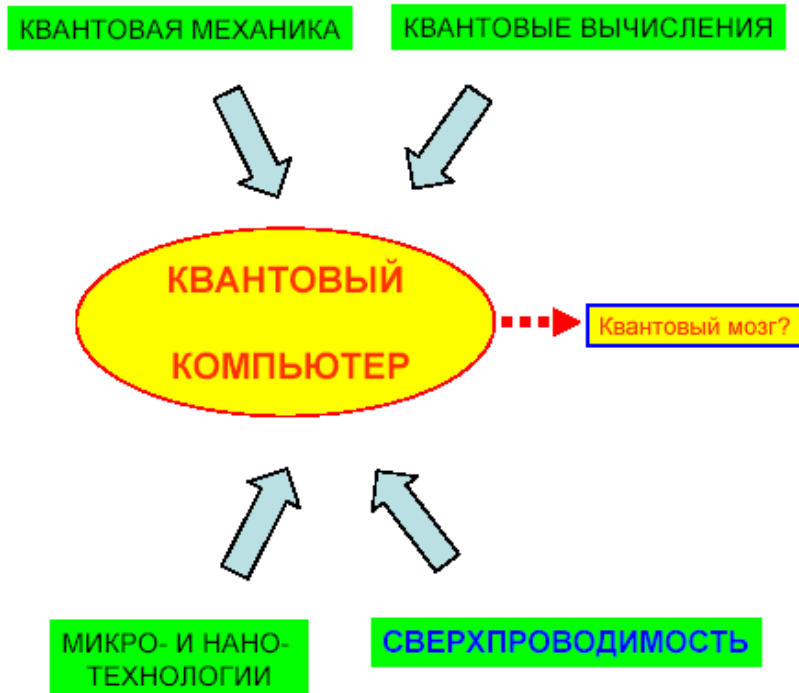
$$|\Psi(t)\rangle = \hat{U}(t) |\Psi(0)\rangle$$

КВАНТОВЫЙ КОГЕРЕНТНЫЙ КОМПЬЮТЕР



qbit = квантовый бит $|\Psi\rangle = \alpha_1 |1\rangle + \alpha_2 |2\rangle, |\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = 1.$

Суперпозиция и интерференция квантовых состояний = параллелизм квантовых вычислений

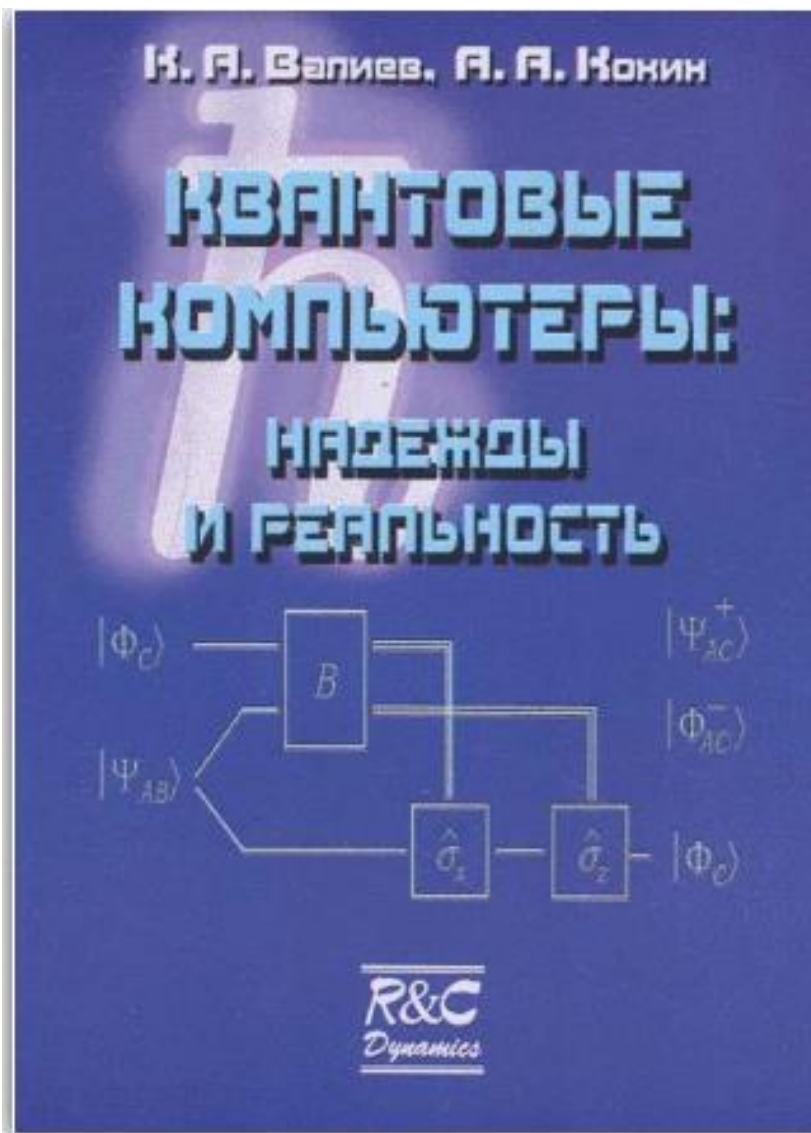


Питер Шор

Факторизация (разбиение на простые сомножители) 250-значного числа:

Классический компьютер $t \approx 2^N$ 800000 лет

Квантовый компьютер $t \approx N^2$ секунды



Январь 2005 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 175, № 1

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Квантовые компьютеры и квантовые вычисления

К.А. Валиев

Обзор посвящен изложению принципов работы квантовых компьютеров и их элементов. Представлена теория идеальных компьютеров, не взаимодействующих с окружением и не подверженных процессам квантовой декогерентизации. Исследованы процессы декогерентизации в квантовых компьютерах. Рассмотрены методы коррекции ошибок в квантовых вычислениях, обусловленных декогерентизацией состояния квантового компьютера, а также возможные методы подавления процессов декогерентизации. Обзор завершается кратким перечислением предложенных по реализации квантовых компьютеров.

PACS numbers: 03.65.Yz, 03.67.-a, 03.67.Lx

Содержание

1. Введение (3).
 - 1.1. Классические и квантовые приборы. 1.2. Алгоритмы: классы их сложности.
2. Кубиты: свойства и математическое описание состояний (5).
 - 2.1. Биты и кубиты. 2.2. Кубит в гильбертовом векторном пространстве состояний. 2.3. Квантовая когерентность векторов состояний.
3. Принципы построения и работы идеального квантового компьютера (10).
 - 3.1. Идеальный квантовый компьютер. 3.2. Квантовый компьютер — цифровой компьютер с аналоговым управлением. 3.3. Классическая и квантовая информация в квантовой системе. 3.4. Как реализовать квантовый алгоритм? 3.5. Универсальные наборы элементарных операций. 3.6. Осцилляция Раби между состояниями кубита и однокубитовые операции. 3.7. Кубит, управляемый рамановскими переходами Λ -типа.
4. Смешанные и запутанные состояния квантовых систем (15).
 - 4.1. Смешанные состояния квантовых систем. 4.2. Смешанные состояния квантовых систем. 4.3. Запутанные состояния квантовых систем. 4.4. Преобразования запутанных состояний. 4.5. Запутанность в смешанных состояниях составных систем. 4.6. Экспериментальные методы получения запутанных состояний.
5. Проблемы измерений состояния кубита (18).
 - 5.1. Измерение состояния кубита. 5.2. Томография квантового состояния.
6. Квантовые алгоритмы (20).
 - 6.1. Квантовые алгоритмы факторизации чисел и поиска в базе данных. 6.2. Алгоритм телепортации неизвестного квантового состояния. 6.3. Моделирование квантовых систем на квантовом компьютере. 6.4. Моделирование динамики квантовых систем на квантовом компьютере.
7. Процессы декогерентизации состояний кубитов и квантовых компьютеров (23).
 - 7.1. Декогерентизация состояний квантовых систем. 7.2. Фазовая декогерентизация кубита. 7.3. Оператор декогерентизации кубита. 7.4. Микроскопическая теория процесса амплитудной декогерентизации. 7.5. Фазовая и амплитудная декогерентизация спинного кубита в случайном классическом поле. 7.6. Декогерентизация вследствие межкубитовых взаимодействий: квантовый хаос. 7.7. Декогерентизация, обусловленная ошибками управления кубитами. 7.8. Декогерентизация кубитов в многоуровневых системах. 7.9. Декогерентизация в квантовых операциях. 7.10. Зависимость скорости декогерентизации от числа кубитов в компьютере.
8. Методы преодоления эффектов декогерентизации в квантовых компьютерах (30).
 - 8.1. Кодирование информации и коррекция ошибок в классическом канале. 8.2. Трехкубитовый квантовый код. 8.3. Коррекция фазовых ошибок. 8.4. Помехоустойчивые квантовые вычисления. 8.5. Свободные от декогерентизации состояния квантового компьютера. 8.6. Устойчивые к декогерентизации кубиты. 8.7. Методы предотвращения ошибок: квантовый эффект Зенона. 8.8. Динамические методы подавления декогерентизации. 8.9. Квантовая коррекция ошибок методом слабых непрерывных измерений и обратной связи. 8.10. Помехоустойчивые топологические квантовые вычисления. 8.11. О возможности комбинированного применения различных методов коррекции ошибок.
9. Понски путей реализации квантовых компьютеров: экспериментальные исследования (37).
10. Заключение (38).
 - 10.1. Квантовые компьютеры: мечта или реальность? 10.2. Что дальше? 10.3. О содержании и структуре современного курса квантовой механики.

Список литературы (38).

К.А. Валиев, Физико-технологический институт РАН

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

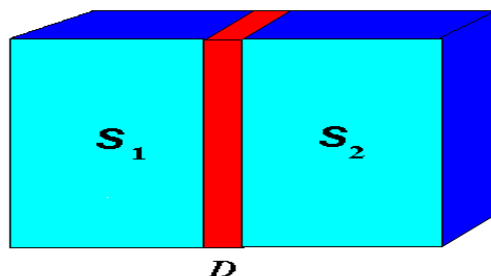


Сверхпроводник имеет нулевое электрическое сопротивление ниже некоторой критической температуры T_c
Ток в сверхпроводящем кольце течет не затухая без потерь.
Магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (идеальный диамагнетизм).

Сверхпроводимость – макроскопическое квантовое когерентное явление

$$\Psi = \Psi_0 e^{i\phi}$$

Эффект Джозефсона



Б. Джозефсон

$$I = I_c \sin \phi$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\phi}{dt}$$

$$\omega = \frac{2e}{\hbar} V = 483.6 \text{ МГц} / \text{микровольт.}$$

Любая квантово-механическая когерентная система может быть использована для реализации идей квантовых вычислений.

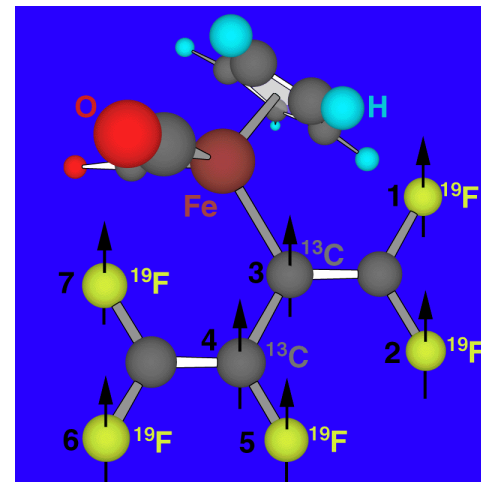
одиночные фотоны

ядерные спины

ионы в ловушках

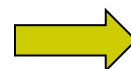
электроны в квантовых точках

сверхпроводящие квантовые цепи



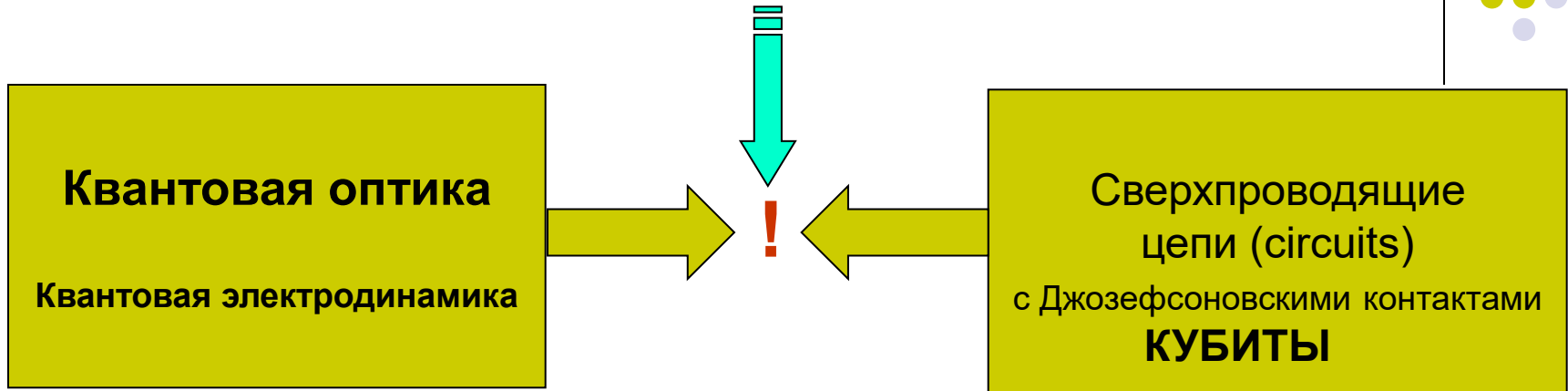
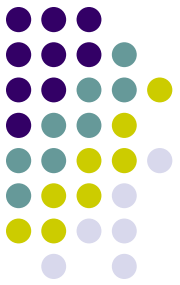
Преимущества твердотельных реализаций

- масштабируемость
- использование современной литографии



**ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ
КУБИТЫ**

Circuit Quantum Electrodynamics (CQE)



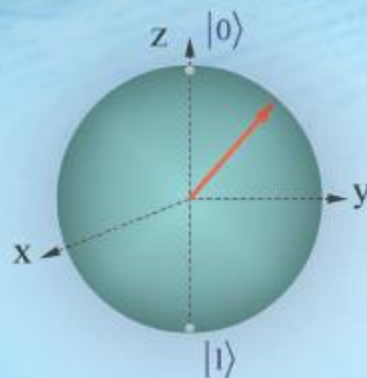
Джозефсоновский КУБИТ, содержащий миллиарды атомов, может вести себя как один – искусственный атом. Свойства таких кубитов замечательны и позволяют изучать новые режимы квантовой оптики, недостижимые с обычными атомами.

В настоящее время большой интерес привлекает проблема “квантовой оптики искусственных атомов” - поведения джозефсоновских кубитов в квантованном электромагнитном поле. Макроскопическая двухуровневая система помещается в высокодобротную СВЧ-квантовый резонатор и изучаются эффекты фотон-кубитного взаимодействия. Большой дипольный электрический или магнитный момент кубита, в отличие от микро атома, позволяет изучать эффекты сильной связи квантовой системы с квантованным электромагнитным полем.

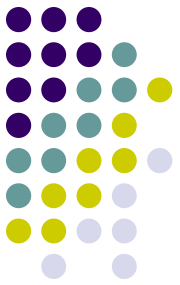


А. Н. ОМЕЛЬЯНЧУК
Е. В. ИЛЬЧЕВ
С. Н. ШЕВЧЕНКО

КВАНТОВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КУБИТАХ



Квантовая криптография



Чарльз Беннет



Жиль Брассар

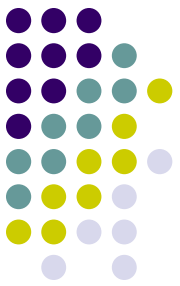


Артур Экерт



Николас Жизэн

The Nobel Prize in Physics 2022



III. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

Alain Aspect

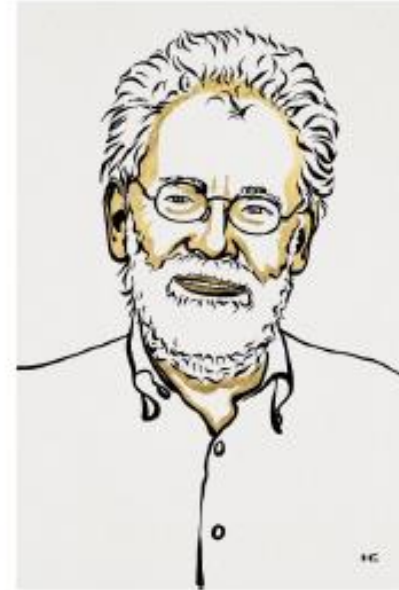
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

John F. Clauser

Prize share: 1/3



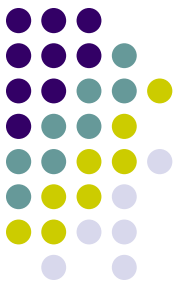
III. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

Anton Zeilinger

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded jointly to Alain Aspect, John F. Clauser and Anton Zeilinger "for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

Сжатые состояния и сжатый свет, D. Stoler, 1970



$$|\alpha, \zeta\rangle = \hat{D}(\alpha)\hat{S}(\zeta)|0\rangle$$

$$\hat{S}(\zeta) = \exp \left[\frac{1}{2}(\zeta^* \hat{a}^2 - \zeta \hat{a}^{+2}) \right]$$

Преобразование
Боголюбова, $SU(1,1)$,
1946 г.



Н.Н. Боголюбов

$$\begin{aligned}\hat{S}^+(\zeta)\hat{a}\hat{S}(\zeta) &= \hat{a} \cosh r - \hat{a}^+ e^{-i2\phi} \sinh r \\ \hat{S}^+(\zeta)\hat{a}^+\hat{S}(\zeta) &= \hat{a}^+ \cosh r - \hat{a} e^{i2\phi} \sinh r\end{aligned}$$

$$\zeta = r e^{-i2\phi}$$

$$\hat{X}_1 = \hat{\xi} \cos \phi - \hat{\pi} \sin \phi, \quad \hat{X}_2 = \hat{\pi} \cos \phi + \hat{\xi} \sin \phi$$

$$\begin{aligned}\hat{S}^+(\zeta)(\hat{X}_1 + i\hat{X}_2)\hat{S}(\zeta) &= \hat{X}_1 e^{-r} + i\hat{X}_2 e^r \\ \Delta X_1 &= e^{-r}/\sqrt{2}, \quad \Delta X_2 = e^r/\sqrt{2}\end{aligned}$$

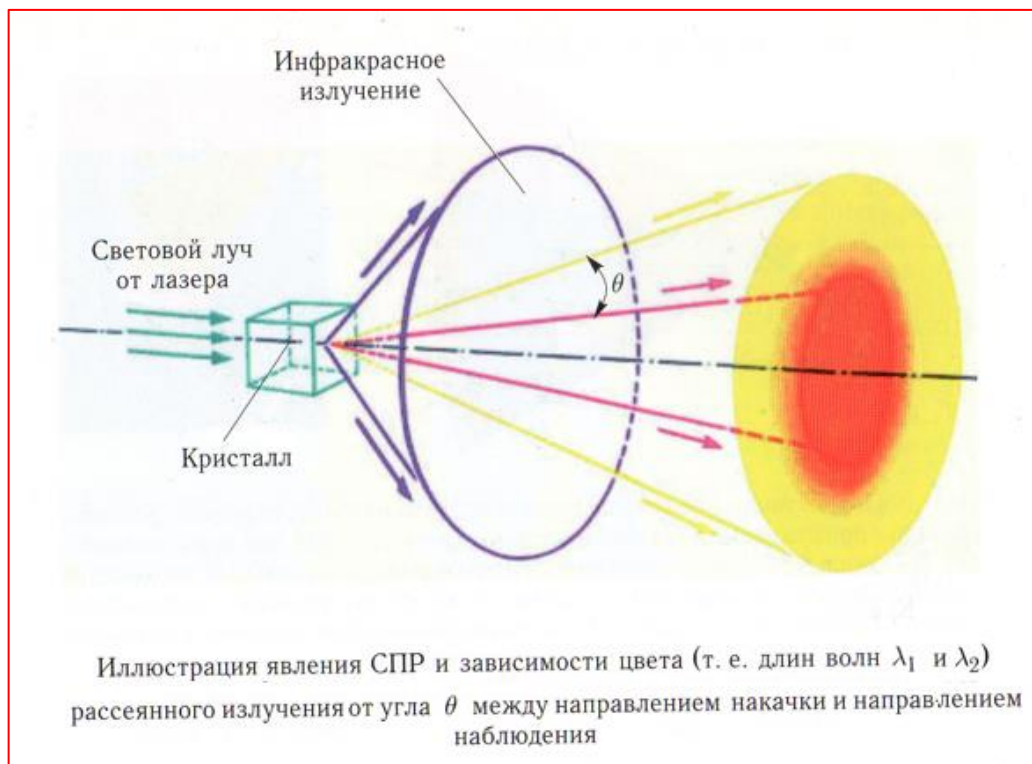
Сжатие
(squeezing)

$$\begin{pmatrix} u & v \\ v^* & u^* \end{pmatrix}, \quad |u|^2 - |v|^2 = 1.$$

$$u = \cosh r, \quad v = e^{-i2\phi} \sinh r$$

Квантовый параметрический усилитель

Спонтанное параметрическое рассеяние света (СПР)



СПР света предсказано в 1967 г. Д.Н. Клышко

(кафедра волновых процессов, физфак МГУ).

Некоторые анизотропные кристаллы, облучаемые светом с длиной волны λ_0 , переизлучают свет с большими длинами волн. Клышко привёл пример с кристаллом ниобата лития (LiNbO_3), освещаемого аргоновым лазером на длине волны 500 нм. Этот кристалл светится зеленым, желтым и красным светом (в интервале длин волн $\lambda_1 = 550\text{--}750$ нм) и, кроме того, кристалл излучает инфракрасные волны (на длине волны λ_2 в интервале 1,5–4 мкм).

Принципиальные проблемы квантовой оптики



Сентябрь 1998 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 168, № 9

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения

Д.Н. Клышко

Смысл основных понятий нерелятивистской квантовой физики — волновая функция, редукция, приготовление и измерение состояния, проекционный постулат, соотношение неопределенностей — поясняется с помощью реалистических экспериментальных процедур. По мере возможности привлекаются классические аналогии. В качестве примеров рассматриваются измерения поляризации фотонов, координаты и импульса частиц, а также корреляции Эйнштейна–Подольского–Розена, эффекты Ааронова–Бома, "квантовой телепортации" и др. Обсуждаются различные признаки неклассичности квантовых моделей типа антигруппировки фотонов и нарушения неравенств Белла.

PACS number: 03.65.Bz

Содержание

1. Введение (975).
2. Операциональный подход (977).
3. Классические вероятности (978).

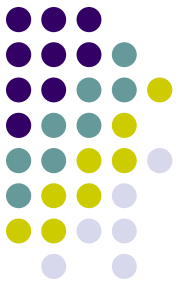
7. Заключение (1010).
8. Приложения (1012).
I. Собственные векторы операторов Стокса и парадокс Гринбергера–Хорна–Цайлингера. II. К теории "квантовой телепортации".



Д.Н. Клышко

1929-2000

Запутанные (entangled) состояния и квантовая телепортация



$$|\Psi\rangle = |\phi_1\rangle |\phi_2\rangle$$

факторизованное
состояние

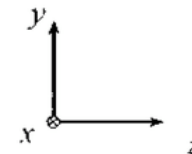
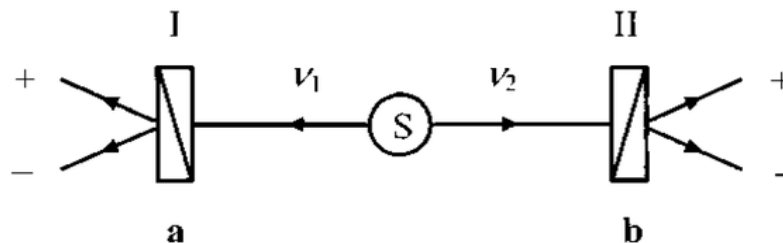
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle |\phi_1\rangle + |\psi_2\rangle |\phi_2\rangle)$$

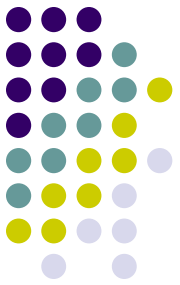
Запутанное состояние: состояние
всей системы не может быть
выражено через состояния
отдельных подсистем



Существует **корреляция** между состояниями подсистем

Парадокс Эйнштейна, Подольского, Розена, 1935 г.





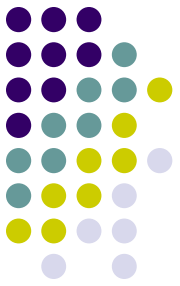
В современной России проблема разработки передовых квантовых технологий поручены разным организациям...

- Квантовый компьютер создает «Росатом».
- Квантовые коммуникации -- Российские железные дороги (РЖД).
- Квантовые сенсоры разрабатывает Ростех.

Остановлюсь далее на тех организациях, в которых ведутся как экспериментальные, так и теоретические исследования.



В Российской Федерации предпринимаются значительные усилия для интенсификации работ в области квантовых технологий. Работы по квантовым технологиям широко представлены в тематических планах по государственному заданию институтов РАН (ФИАН, МИАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИОФ РАН, ИПФ РАН, ИФП СО РАН, ИЛФ СО РАН, ИСАН, ИФТТ РАН, ИТФ РАН, ИПТМ РАН, ФИЦ КазНЦ РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова, ФТИАН им. К.А. Валиева, ИПХФ РАН и др.). Сформирован, утвержден и функционирует целый ряд крупных проектов и научно-технических программ. В том числе два центра НТИ: Центр квантовых технологий на базе МГУ имени М.В. Ломоносова и Центр квантовых коммуникаций на базе НИТУ «МИСиС», а также два лидирующих исследовательских центра: по квантовым коммуникациям на базе ИТМО (индустриальный партнер – ОАО «РЖД») и по квантовым вычислениям на базе ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий» (индустриальный партнер – Госкорпорация «Росатом»).



Quantum Teleportation of a Polarization State with a Complete Bell State Measurement

Yoon-Ho Kim,^{*} Sergei P. Kulik,[†] and Yanhua Shih



Compensators C-1, C-2, and C-3

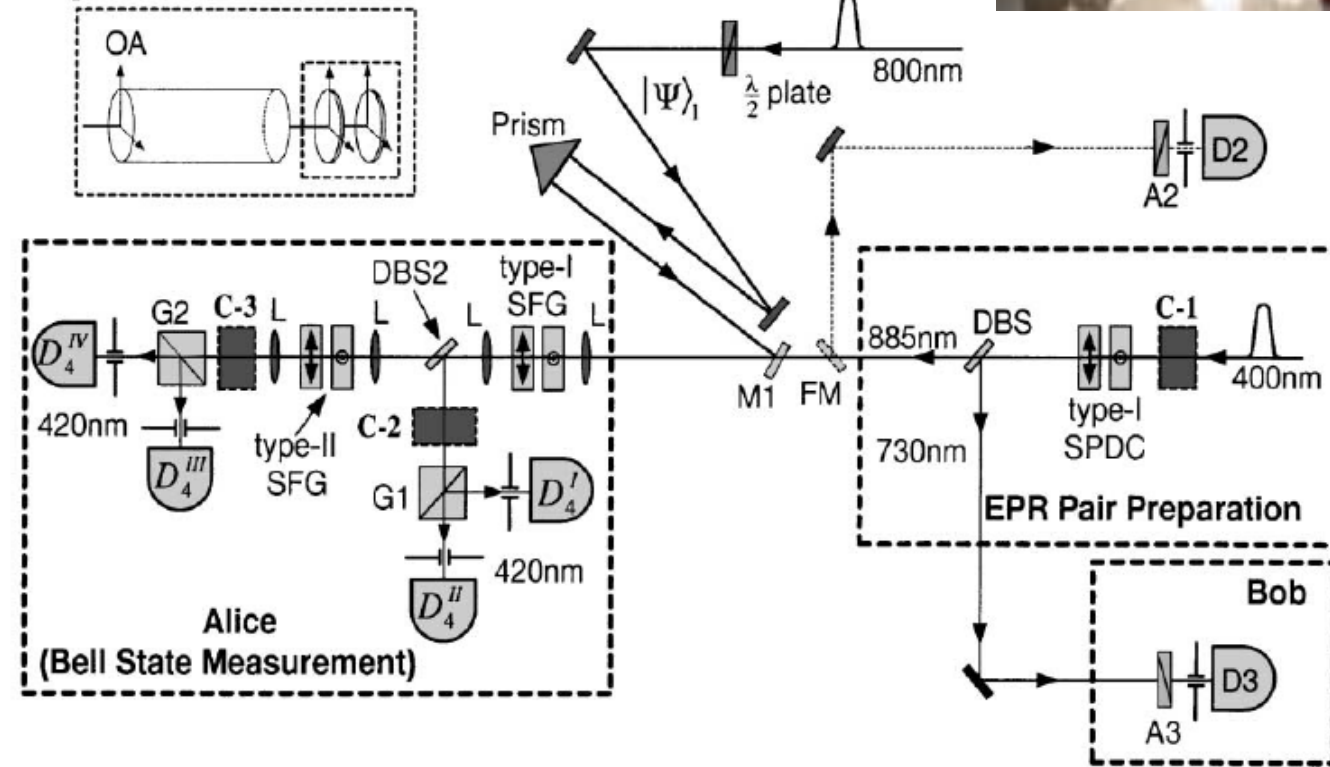
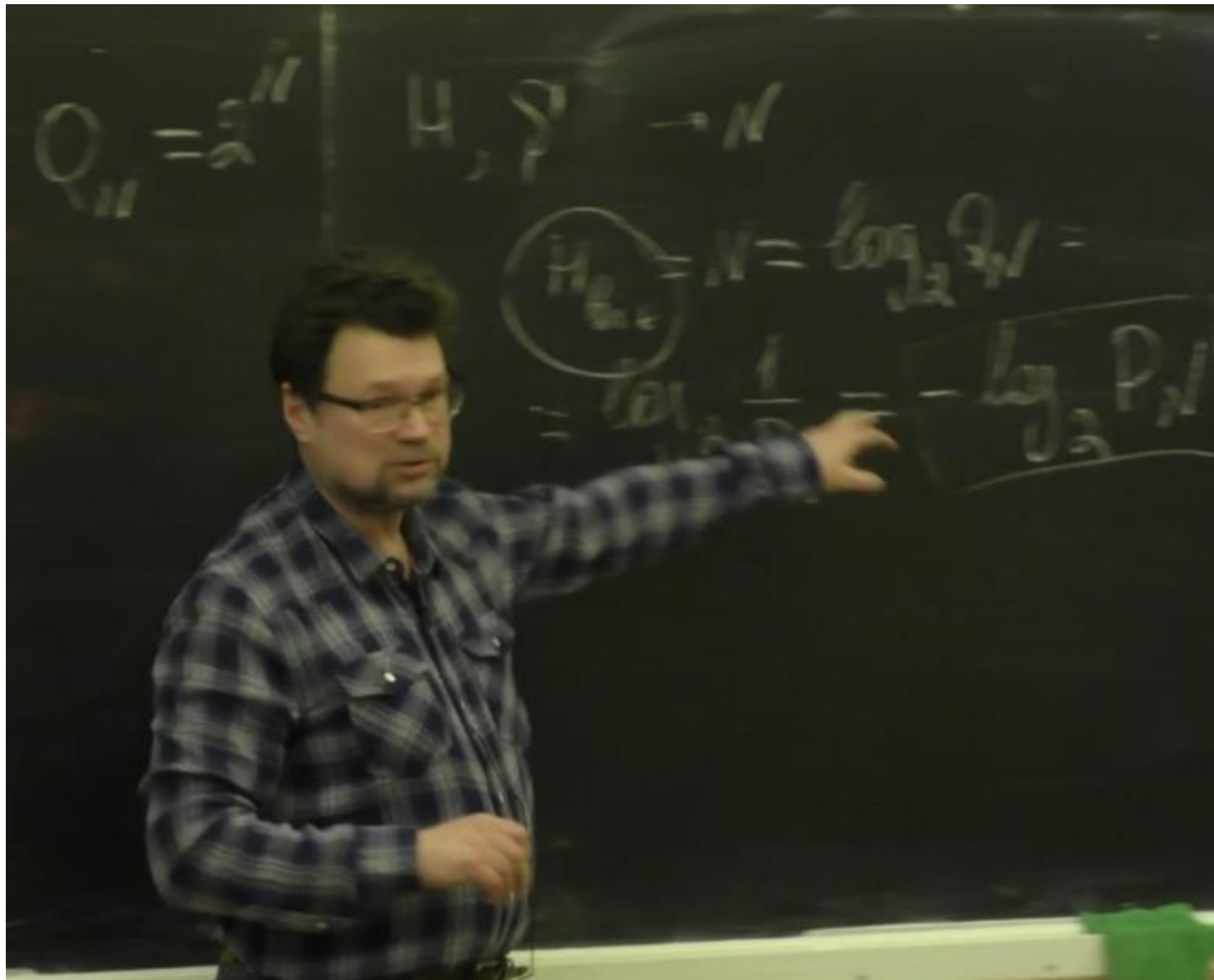


FIG. 4. Diagram of the experimental setup. The inset shows the details of the compensators. See text for details.



Кулик Сергей Павлович, профессор кафедры квантовой электроники МГУ, научный руководитель Центра квантовых технологий МГУ



Калачев Алексей Алексеевич,
член-корреспондент РАН.
Директор ФГБУН «ФИЦ «Казанский
научный центр РАН» (г. Казань)

Казанский (Приволжский) федеральный университет

А.А. Калачёв

КВАНТОВАЯ ИНФОРМАТИКА В ЗАДАЧАХ

Учебно-методическое пособие

Казанский университет
2012

К 90-ЛЕТИЮ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН (ФИАН)

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Вычислимое и невычислимое в квантовом мире: утверждения и гипотезы

А.К. Федоров, Е.О. Киктенко, Н.Н. Колачевский

Значительные успехи в разработке вычислительных устройств, использующих квантовые эффекты, и демонстрация решения с их помощью различных задач стимулировали новую волну интереса к вопросу о природе "квантового вычислительного преимущества" (quantum computational advantage). Хотя различные попытки количественно оценить и охарактеризовать природу квантового вычислительного преимущества предпринимались и раньше, в широком контексте данный вопрос остается открытым. В самом деле, не существует универсального подхода, помогающего определить круг задач, решение которых квантовые компьютеры способны ускорить, теоретически и на практике. В настоящей работе мы рассмотрим подход к этому вопросу, основанный на концепции сложности и достижимости квантовых состояний. С одной стороны, класс квантовых состояний, представляющий интерес для квантовых вычислений, должен быть сложным, т.е. не поддающимся моделированию с помощью классических компьютеров с менее чем экспоненциальными ресурсами. С другой стороны, такие квантовые состояния должны быть достижимы на практическом квантовом компьютере. Последнее означает, что унитарная операция, соответствующая преобразованию квантовых состояний от исходного к желаемому, может быть декомпозирована в не более чем полиномиальную по числу кубитов последовательность одно- и двухкубитных вентилей. Формулируя ряд утверждений и гипотез, мы рассматриваем вопрос об описании класса задач, решение которых может быть ускорено с помощью квантового компьютера.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовая сложность, квантовые алгоритмы

PACS numbers: 03.67.Ac, 03.67.Lx, 42.50.Dv

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039.721>

Содержание

1. Введение (960).
 2. Картина квантовых состояний и универсальная вентильная модель квантовых вычислений (962).
 3. Классификация состояний (962).
 4. Соотношения между классами состояний (963).
 5. Заключение (965).
- Список литературы (965).

А.К. Федоров^[1,2,3,4], Е.О. Киктенко^[2,5,6], Н.Н. Колачевский^[1,2,4]^[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация

^[2] Российский квантовый центр, Инновационный центр "Сколково",

Большой бульвар 30, стр. 1, 121205 Москва,

Российская Федерация

^[3] Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",

Ленинский просп. 4, 119049 Москва, Российская Федерация

E-mail: ^[4] lex1026@gmail.com, ^[5] evgeniy.kiktenko@gmail.com,^[6] kolachevsky@lebedev.ru

Статья поступила 17 мая 2024 г.,

после доработки 19 июля 2024 г.

1. Введение

Развитие технологии производства процессоров на основе полупроводниковой микроэлектроники [1] позволило в течение последних десятилетий постоянно наращивать вычислительную мощность и привело к тому, что вычислительные устройства используются практически повсеместно и ежедневно. Однако некоторые вычислительные задачи по-прежнему представляют исключительно высокую вычислительную сложность для имеющихся в нашем распоряжении вычислительных устройств. Примеры таких задач — это, во-первых, разложение целых чисел на простые множители (так называемая факторизация), при которой для заданного составного числа N необходимо найти его нетривиальные множители p и q (такие, что $N = p \times q$). Такая задача имеет непосредственные приложения в криптографии, поскольку на предположении о сложности решения задачи факторизации для больших N строится анализ стойкости алгоритмов криптографии с открытым ключом [2]. Во-вторых, это моделирование сложных квантовых систем, в частности, вычисление энергетических состояний "больших" молекул. Изучение свойств молекул и химических реакций важно для различных приложений, например, создания материалов с заданными



Колачевский Николай Николаевич,
академик РАН, директор Физического
института им. П.Н. Лебедева с 2015 г.

© А.К. Федоров, Е.О. Киктенко, Н.Н. Колачевский 2024





КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Квантовые вычисления на ионах в ловушках: принципы, достижения и перспективы*

И.В. Заливако, Н.В. Семенов, Н.О. Жаднов, К.П. Галстян, П.А. Каменских,
В.Н. Смирнов, А.Е. Корольков, П.Л. Сидоров, А.С. Борисенко, Ю.П. Аносов,
И.А. Семериков, К.Ю. Хабарова, Н.Н. Колачевский

Ультрахолодные ионы являются одной из наиболее успешно развивающихся физических платформ в области квантовых вычислений: высокое время когерентности и качество операций обеспечили на сегодняшний день лидерство по показателю квантового объема (2^{21}) по сравнению с другими системами, например сверхпроводниковой платформой (максимально продемонстрированный квантовый объем 2^9). На ионных квантовых вычислителях выполнены самые глубокие на сегодняшний день бенчмаркировые алгоритмы и успешно продемонстрированы алгоритмы коррекции ошибок, что открывает перспективу перехода из сегодняшней эры "шумных квантовых процессоров" (NISQ) в следующую эпоху. В России направление ионных квантовых компьютеров начало активно развиваться с появлением Дорожной карты "Квантовые вычисления", стартовавшей в 2020 г. В данном обзоре представлены основные принципы работы ионного квантового компьютера, обзор современных мировых достижений в этой области, а также основные результаты нашей группы, полученные в ходе реализации Дорожной карты.

Ключевые слова: квантовые вычисления, ионы, ловушка Пауля, кудиты, квантовый компьютер, поверхностные ловушки

PACS numbers: 03.67.-a, 03.67.Lx, 32.30.-r, 37.10.De, 37.10.Ty, 42.62.Fi DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039884>

Содержание

1. Введение (585).
2. Захват ионов (590).
 - 2.1. Движение ионов в ловушке Пауля. 2.2. Разновидности ловушек Пауля. 2.3. Загрузка ионов.
3. Инициализация, охлаждение и считывание состояния ионов (595).
 - 3.1. Кодирование квантовой информации в ионах. 3.2. Инициализация квантовых состояний. 3.3. Охлаждение ионов. 3.4. Считывание состояний ионов.
4. Реализация квантовых гейтов на ионах в ловушке (601).
 - 4.1. Способы проведения квантовых операций. 4.2. Однокубитные и двухкубитные гейты. 4.3. Двухкубитные гейты.
5. Пятидесятикубитный ионный квантовый вычислитель на ионах литерия (609).

5.1. Квантовый вычислитель на ионах $^{171}\text{Yb}^+$. 5.2. Реализация базовых квантовых алгоритмов.

6. Заключение (617).

Список литературы (617).

1. Введение

В основе метода квантовых вычислений лежит возможность когерентного управления состоянием двухуровневой квантовой системы (однокубитные операции) и возможность перепутывания двух физических квантовых систем (двухкубитные операции). Естественно, что для обеспечения качественных вычислений требуется идентичность квантовых объектов и максимально высокое качество операций над ними, т.е. контролируемого перевода начального квантового состояния в требуемое $|\psi_0\rangle \rightarrow |\psi\rangle$. Одноичные атомы и ионы являются естественными квантовыми объектами, что обеспечивает их полную идентичность в отсутствие внешних возмущений. Квантовая информация может быть записана в состоянии электронных уровней, а управление состояниями обеспечивается хорошо развитыми методами лазерной или радиочастотной спектроскопии. Методы адресации одиночных атомов и ионов, недоступные до появления лазерного охлаждения и ультрастабильных лазеров, сегодня являются весьма проработанными и не

И.В. Заливако^(1,2), Н.В. Семенов^(1,2), Н.О. Жаднов^(1,2),
К.П. Галстян^(1,2), П.А. Каменских^(1,2), В.Н. Смирнов^(1,2),
А.Е. Корольков^(1,2), П.Л. Сидоров^(1,2), А.С. Борисенко^(1,2),
Ю.П. Аносов^(1,2), И.А. Семериков^(1,2), К.Ю. Хабарова^(1,2),
Н.Н. Колачевский^(1,2,*)

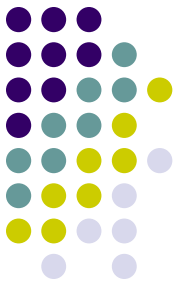
⁽¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва,
Российская Федерация

⁽²⁾ Российский квантовый центр, Инновационный центр "Сколково",
Большой бульвар 30, стр. 1, 121205 Москва,
Российская Федерация
E-mail: ^(*) kolachevsky@lebedev.ru

Статья поступила 9 декабря 2024 г.

* Обзор написан на основе доклада, представленного на Научной сессии Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук 9 декабря 2024 г. (см. УФН 195 (6) S84 (2025)).

© И.В. Заливако, Н.В. Семенов, Н.О. Жаднов, К.П. Галстян, П.А. Каменских, В.Н. Смирнов, А.Е. Корольков, П.Л. Сидоров, А.С. Борисенко, Ю.П. Аносов, И.А. Семериков, К.Ю. Хабарова, Н.Н. Колачевский 2025



Литература

- Р. Глаубер. *Оптическая когерентность и статистика фотонов*. Квантовая оптика и квантовая радиофизика. М.: Мир, 1966.
- Ulf Leonhardt. *Measuring the quantum state of light*, Cambridge, 1997.
- Л. Мандель, Э. Вольф. *Оптическая когерентность и квантовая оптика*. М.: Физматлит, 2000.
- Е.К. Башкиров, А.В. Горохов. *Когерентные процессы в квантовой оптике*, Самара, СамНЦ РАН, 2015
- А.В. Горохов. *Принципы симметрии и квантовая динамика*. Самара, 2015
- Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска. *Введение в квантовые вычисления*. Ижевск: РХД, 2009.
- R. H. Hadfield, G. Johansson - *Superconducting Devices in Quantum Optics*. Springer. NY. (2016).
- Н. Жизан, *Квантовая случайность. Нелокальность, телепортация и другие квантовые чудеса*. М. 2016.

