



КАФЕДРА
ТЕЛЕМАТИКА

Санкт-Петербургский
Государственный
Политехнический
Университет

Институт прикладной
математики и механики

**История и методология математики и
компьютерных наук**

Лекция 8

**«Информация как атрибут
«запутанных состояний»**

12 ноября 2020 г.

Алгоритмическая
логика (закон
исключенного
третьего)
вычислений
vs
корпускулярно-
волновой дуализм
материи на
квантовом уровне

Дуальность
«требуется» памяти о
том, в каком
состоянии находится
объект

Материальный объект
в 4D пространстве-времени ... и капля – материальный объект
Минковского «превратилась» в ...волну

Дуальность проявляется там, где частица и среда имеют одно и
тоже строение. **It from bit ?**

Example 1

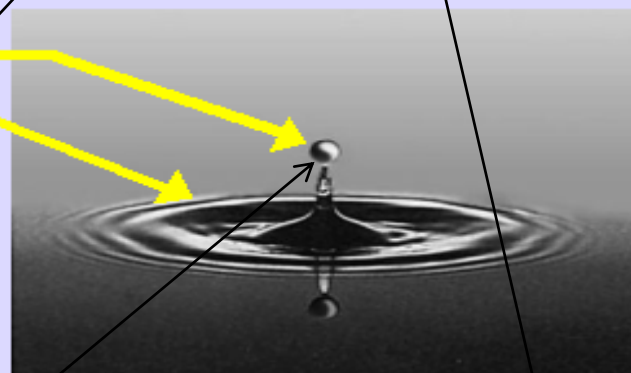
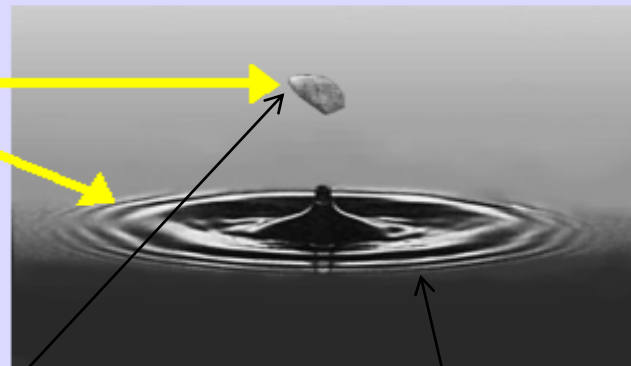
A stone and a water wave are of different matter.

In this case, the wave-particle duality remains an enigma because a stone cannot become water and conversely.

Example 2

A drop of water (corpuscle) and a water wave are of identical matter. Water has either a corpuscle behavior or a wave behavior.

In this particular situation, wave-particle duality is explained with logic and consistency.



Информация : классическая vs квантовая

Классические (не квантовые) представления о вероятности исходят из того, что случайность является «ненастоящей» (субъективной).



Считается, что объект **обладает конкретным свойством** или значением параметра и **до измерения**, Само измерение просто проявляет то, что было ранее скрыто (кубик имел определенное «состояние» и до того как его вынули из урны).

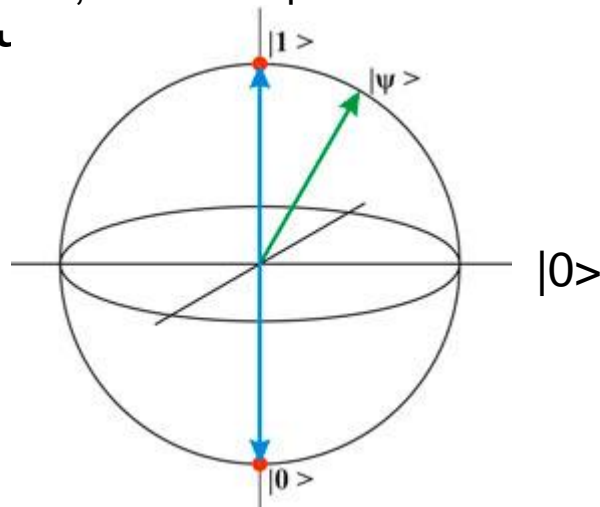
Сколько состояний у квантового объекта ?

4

Если квантовый объект имеет хотя бы два физически различных состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$, то мощность множества возможных векторов состояния **бесконеч**

$$|0\rangle = [1, 0]^T$$

$$|1\rangle = [0, 1]^T$$



Количеством состояний квантовой системы или **количество линейно независимых состояний** описывает число возможных исходов измерения состояния квантового объекта: $|\phi_{AB\dots C}\rangle = |\phi_A\rangle \otimes |\phi_B\rangle \otimes \dots \otimes |\phi_C\rangle = |\phi_A\rangle |\phi_B\rangle \dots |\phi_C\rangle$

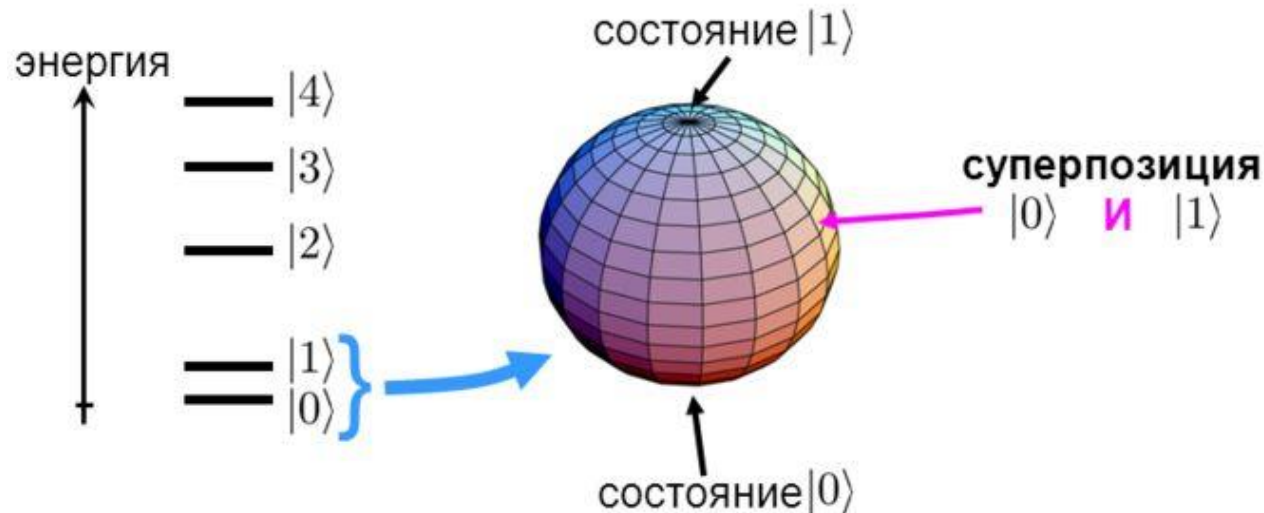
Контр пример. – «Кинореальность»

- «кинореальность» непосредственно не порождает физических явлений, так как «энергетически» не замкнута, но ... оказывает информационное воздействие на объекты, которые способны эту информацию воспринимать.
- «кинореальность» - это объекты, которые с точки зрения классической физики не образуют «состоявшуюся» реальность, поэтому являются аномальными.
- К «аномальным» относятся объекты наделенные памятью и сознанием, т.е. живые организмы, способные к целенаправленному «движению» под воздействием не только энергии, но и информации.

Суперпозиция как ... информационный феномен

Кубит

2-хуровневая квантовая система (можно различить $|0\rangle$ и $|1\rangle$)
 может существовать в бесконечном числе
 физических состояний *промежуточных* между $|0\rangle$ и $|1\rangle$.



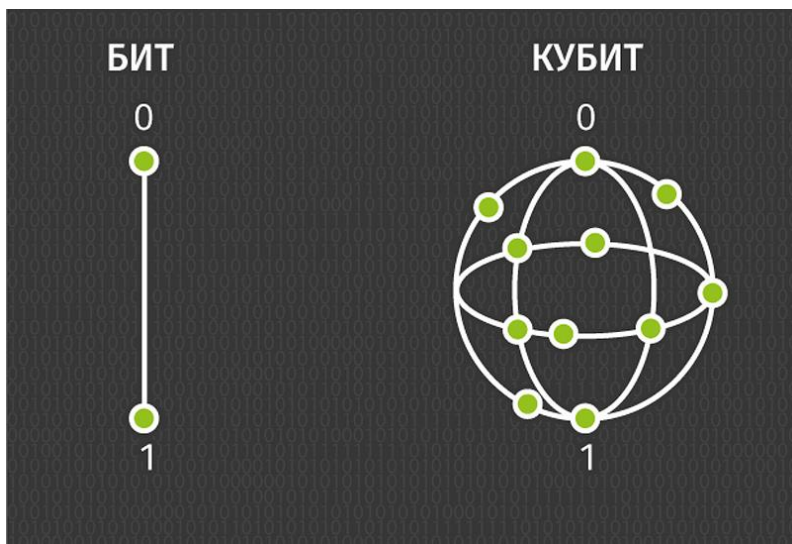
Квантовая система может существовать
 в двух состояниях *одновременно*

Квантовый формализм «комплексных» амплитуд

Когда мы образуем квадрат модуля суммы $w+z$ двух комплексных чисел w и z , мы обычно не получаем только лишь сумму квадратов модулей этих чисел; существует дополнительный «поправочный член»:

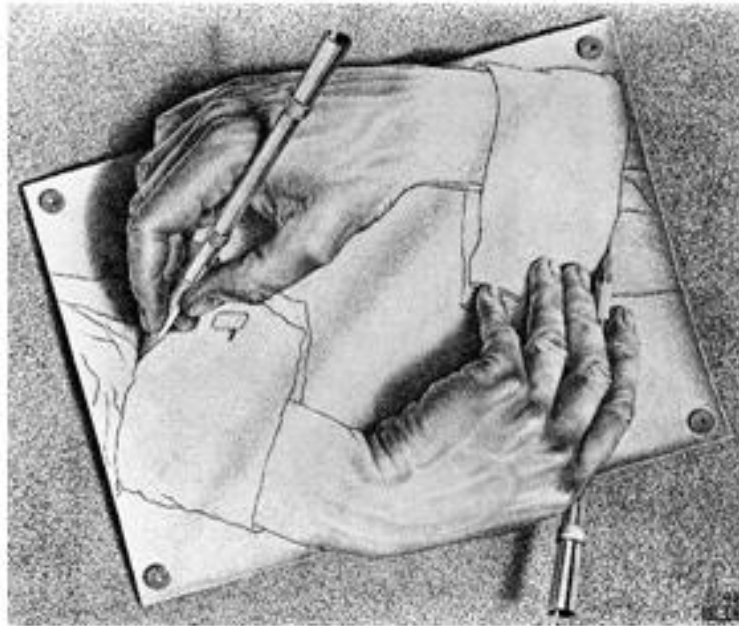
$$|w + z|^2 = |w|^2 + |z|^2 + 2|w||z|\cos(q),$$

где q – угол, образуемый направлениями на точки z и w из начала координат на плоскости Аргана...



- Поправочный член $2|w||z|\cos(q)$ описывает квантовую интерференцию между альтернативами, но интерференционное **слагаемое** не проявляется, если субъект обладает информацией («**знанием**») о траектории движения частицы.
- Такая суперпозиция не является обычным макроскопическим **физическим явлением**, а есть **информационно-вычислительный феномен**, описывающий свойства физической реальности .

Картина Эшера рисующие руки



Пример взаимного сосоздания и циркулярной причинности.
Метафора странной петли Хофштаттера



Информация как феномен – difference that make the difference ?!

- Физические процессы – это результат взаимодействия различных объектов в псевдо эвклидовом «пространстве-времени» Минковского. «Места» для хранения информации в этом пространстве нет. Но «сложные» объекты, наделенные «памятью» могут находиться:
 - в «**смеси**» состояний, т.е. одном **конкретном состоянии**, параметры которого есть результат «измерения» всех параметров «чистых» состояний его составных частей (описываются т.н. матрицей плотности)
 - в **суперпозиции – линейной комбинации** «чистых» состояний, т.е. находиться одновременно во всех «чистых» состояниях, но ... с различной вероятностью, результат измерения «коллапс» волновой функции дает случайный результат.
 - **несепарабельной суперпозиции** «чистых» состояний, т.е. запутанной (взаимозависимой) суперпозиции, которая не факторизуется на тензорные произведения «чистых» состояний. В этих условиях возможен «обратный коллапс» волновой функции.

Принцип суперпозиции:

- Если известны волновые функции (вектора состояния) системы $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$, то система может находиться в состоянии их суперпозиции

$$a|\psi\rangle + b|\phi\rangle,$$

где коэффициенты a, b – это комплексные числа,
такие что $|a|^2 + |b|^2 = 1$.

- Если возможные численные значения «состояния» системы обозначим q , то величина q «вычисляется» как **собственные значения** (СЗ) оператора энергии Q квантовой системы (Q – это гамильтониана системы или оператор ее полной энергии). СЗ вычисляются как решение уравнения:

$$Q|\psi\rangle = q|\psi\rangle$$

- Собственный вектор оператора Q образуют базис комплексного гильбертова пространства состояний

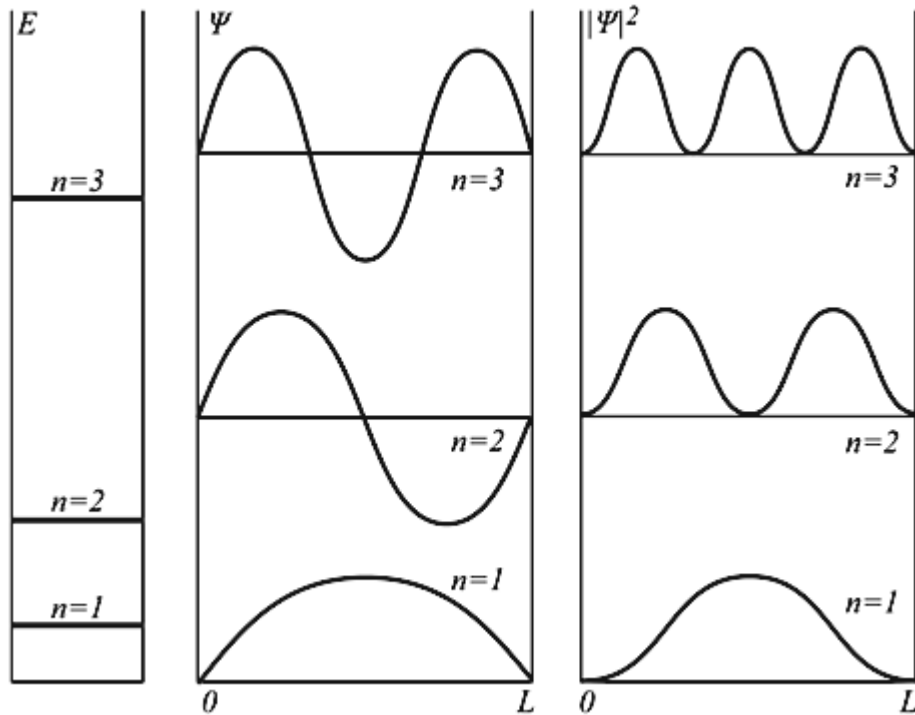
$$|\phi\rangle = \sum a_j |\psi_j\rangle \quad \sum |a_j|^2 = 1$$

Предварительные выводы

- Суперпозиция это «особое» состояние материи.
- Суперпозиция является не только физическим, но и **информационно-вычислительным феноменом**.
- «Носителем» этого феномена является **«физическое» вероятностное пространство**, потенциально возможных «чистых» состояний. Для существования такого «пространства» необходимо наделить материю ресурсом памяти – механизмом переноса состояний во времени.
- Рассматривая информацию как феномен реальности, можно предложить «формулу» физической реальности :

материя= (вещество + энергия) + информация.

Физика «волновых функций» состояния



Уровни энергии и волновые функции частицы Ψ_i в бесконечной прямоугольной яме. Квадрат модуля волновой функции $|\Psi|^2$ определяет вероятность нахождения частицы в i -ом состоянии



«Запутывание» атома в силовом поле



Почему нужна «новая физика информационных процессов»:

Примеры, когда правдоподобное объяснение процессов в рамках классической физики найти невозможно:

- поведение косяка мелких рыбешек или мелких птиц перед отлетом их на юг;
- поведение толпы людей на концерте популярного ансамбля;
- явления предшествующие землетрясению: поведение животных, заряженные частицы в атмосфере, свечение воды, образование облаков и пр.;
- кооперативные явления в природе и обществе, самоорганизация, фликкер-шум и пр.;
-

Макроскопическая МНОГОЧАСТИЧНАЯ информационная ЗАПУТАННОСТЬ



Случай политическая
«полигамия»



случай
классическая
«моногамия»:



Topological order and quantum entanglement

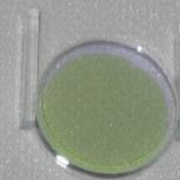
Michael Levin, Xiao-Gang Wen

MIT

<http://online.itp.ucsb.edu/online/qubit06/levin/>

LIGO

MIT Radiation Pressure Experiment Optical Coatings: Noise and Other Issues



Tim Bodiya

MIT: S. Ackley, T. Corbitt, D. Sigg, N. Smith, C. Wipf, N. Mavalvala
Caltech: Y. Chen, R. Bork, J. Heefner, S. Whitcomb, S. Danilishin
AEI: H. Ebhardt-Mueller, H. Rehbein, K. Somiya
LIGO Hanford Observatory: D. Sigg

Workshop on Optical Coatings in Precision Measurements
March 20-21

<http://www.ge.infn.it/~gemme/virgo/CoatingWorkshop/bodiya.pdf>



Quantum Information Technology: Entanglement, Teleportation and Quantum Memory

October 23, 2002

Applications of Entanglement

Seth Lloyd

MIT Department of Mechanical Engineering

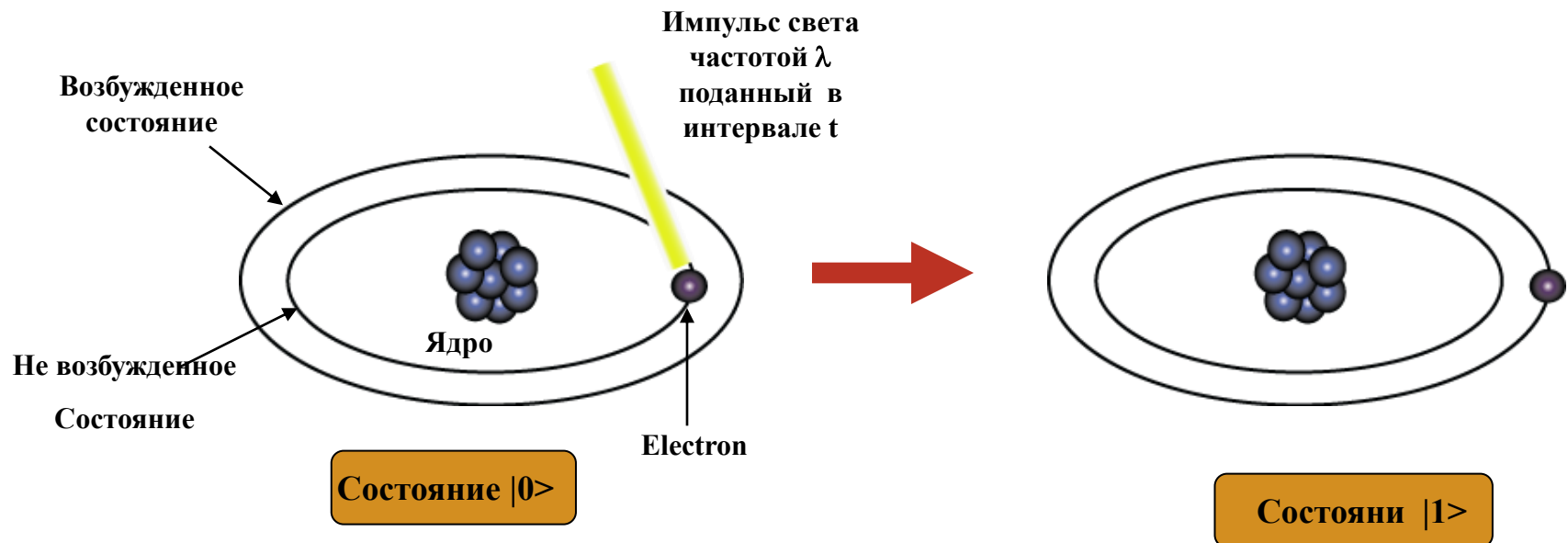
Пример носителя «особого состояния материи» - квантовый бит или - Qubits

Чистое состояние атома, имеющего два различных энергетических уровней, может быть вектором. «Возбужденное» состояние обозначим вектором

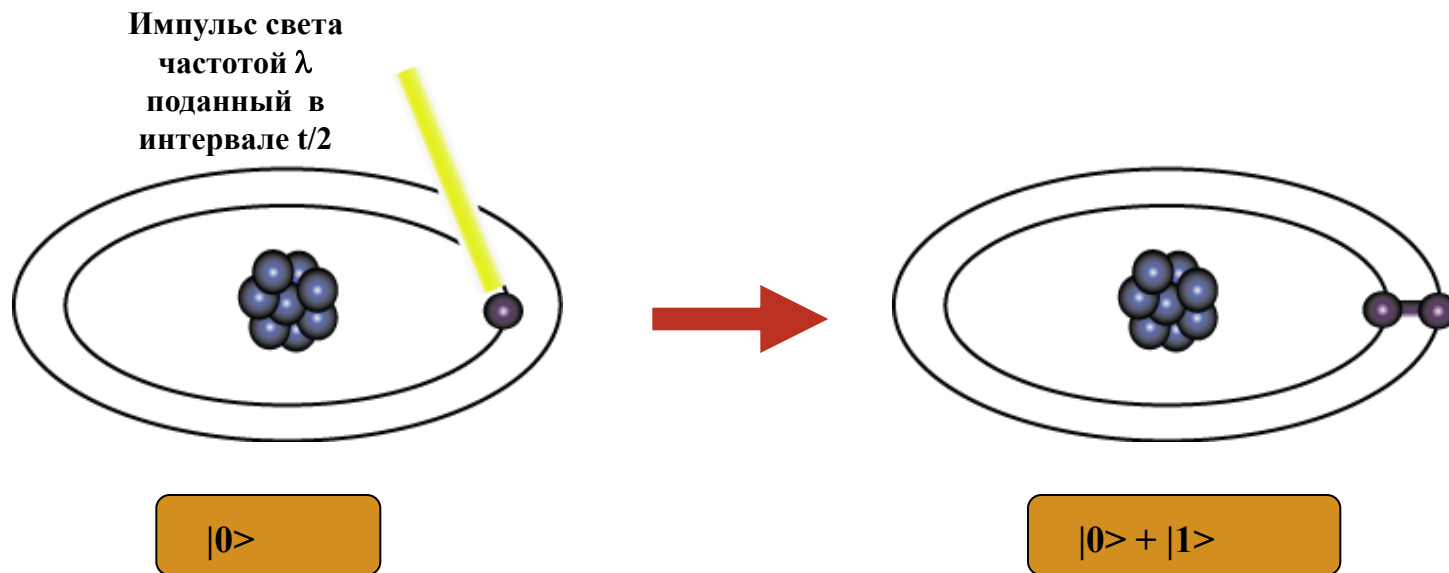
$$|1\rangle = (0, 1)^T,$$

а не возбужденное вектором

$$|0\rangle = (1, 0)^T$$



Как возникает суперпозиция



В случае, когда кубитов 3, то суперпозицию всех 8 возможных состояний можно записать как:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} |000\rangle + \frac{1}{\sqrt{8}} |001\rangle + \dots + \frac{1}{\sqrt{8}} |111\rangle$$

Эволюция вектора состояний как информационный процесс

Оператор U порождает «движение» в соответствии с формулой :

$$|\phi(t)\rangle = U|\phi(0)\rangle,$$

где U отвечает уравнению Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\phi\rangle = H |\phi\rangle \quad U = \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int H dt\right)$$

Подробности: описание единичного кубита

2-мерное гильбертово пространство с базисом $|e\rangle, |g\rangle$

$$|e\rangle = 1 \cdot |e\rangle + 0 \cdot |g\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |g\rangle = 0 \cdot |e\rangle + 1 \cdot |g\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Волновая функция кубита эволюционирует в 2-мерном гильбертовом пространстве

$$|\phi\rangle = a|e\rangle + b|g\rangle = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

Скалярное произведение $\langle \phi_k | \phi_l \rangle = \begin{pmatrix} a_k^* & b_k^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_l \\ b_l \end{pmatrix} = a_k^* a_l + b_k^* b_l$

Операторы, действующие на состояния кубита – 2×2 матрицы $Q|\phi\rangle = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11}a + q_{12}b \\ q_{21}a + q_{22}b \end{pmatrix}$

Все возможные состояния связаны унитарными преобразованиями

$$|\phi\rangle \rightarrow U|\phi\rangle \quad U = \begin{pmatrix} c \exp(-i\alpha) & -t \exp(i\beta) \\ t \exp(-i\beta) & c \exp(i\alpha) \end{pmatrix}, \quad c^2 + t^2 = 1$$

Разные состояния кубита не всегда различимы.

При измерении состояния $|\phi_1\rangle = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}$ есть возможность обнаружить другое состояние $|\phi_2\rangle = \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}$ с вероятностью $P = |\langle \phi_2 | \phi_1 \rangle|^2$

Различимы только ортогональные состояния, например, собственные состояния эрмитовых операторов.

- Физика запрещает передачу информации «в пространстве-времени» со сверхсветовой скоростью. Это объясняется принципиально вероятностным характером измерений и теоремой о запрете клонирования.
- Вероятностная природа измерений (результат того, куда перейдет суперпозиция – случаен) открывает новые возможности не только описания, но и формирования реальности за счет т.н. слабых квантовых измерений (англ. weak quantum measurement), когда заданная последовательность таких измерений прерывается, когда достигнуто «желаемое» состояние.
- Стабильные и самоподдерживающимся суперпозиции могут существовать как на квантовом уровне (в «пространстве-времени» так и на макроскопическом уровне (информационно-вычислительное пространство)