

# Квантовая механика для пешеходов

Д.ф.-м.н., профессор

Ю.И.ОЖИГОВ

<http://sqi.cs.msu.su>

# Квантовая механика для пешеходов

- Великий Закон Природы

Введение. Новый тип знания: алгоритмы

Квантовая теория как собрание простых рецептов

Свет, фотоны и интерференция

Взаимодействие вещества и света

- Великий Закон Природы для сложных систем

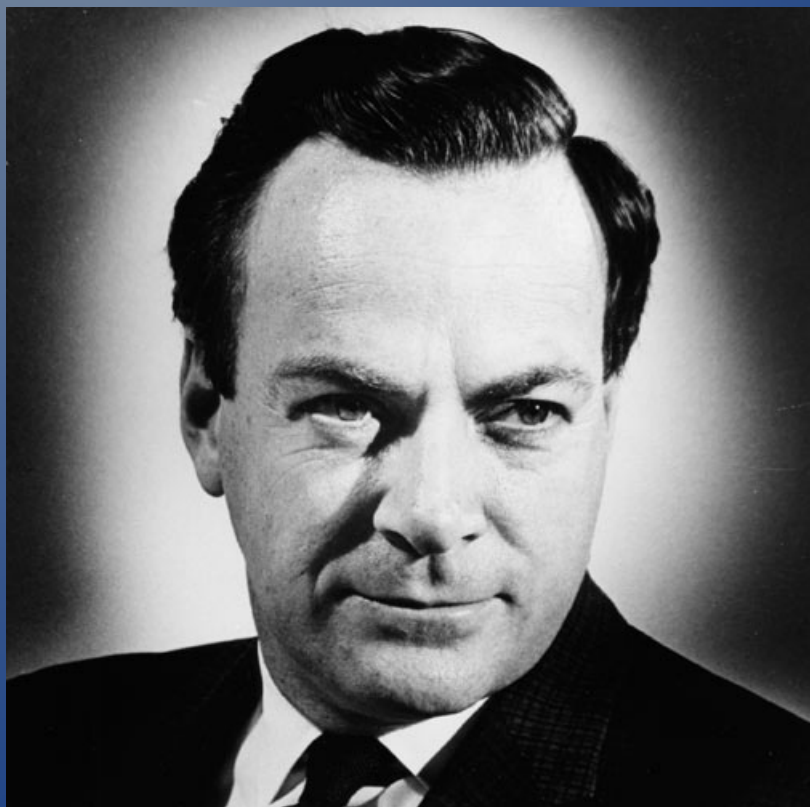
Матричная формулировка квантовой теории. Что делают физики

- Что дает нам Великий Закон Природы

Квантовый компьютер. Квантовая природа биологии

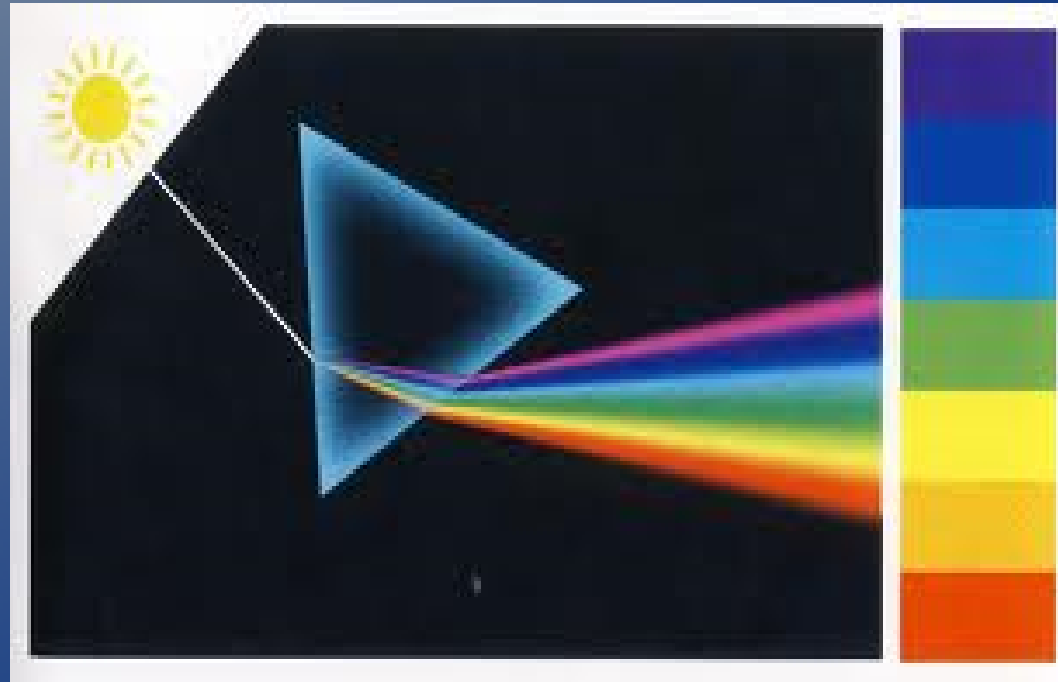
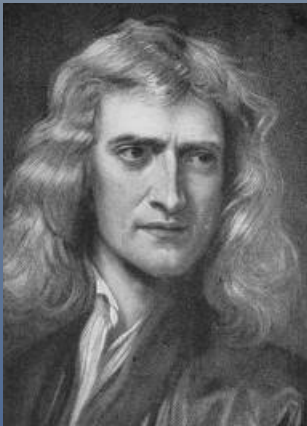
# Взаимодействие света и вещества

Ричард Фейнман



# ФОТОНЫ как корпускулы

- The light consists of point wise particles

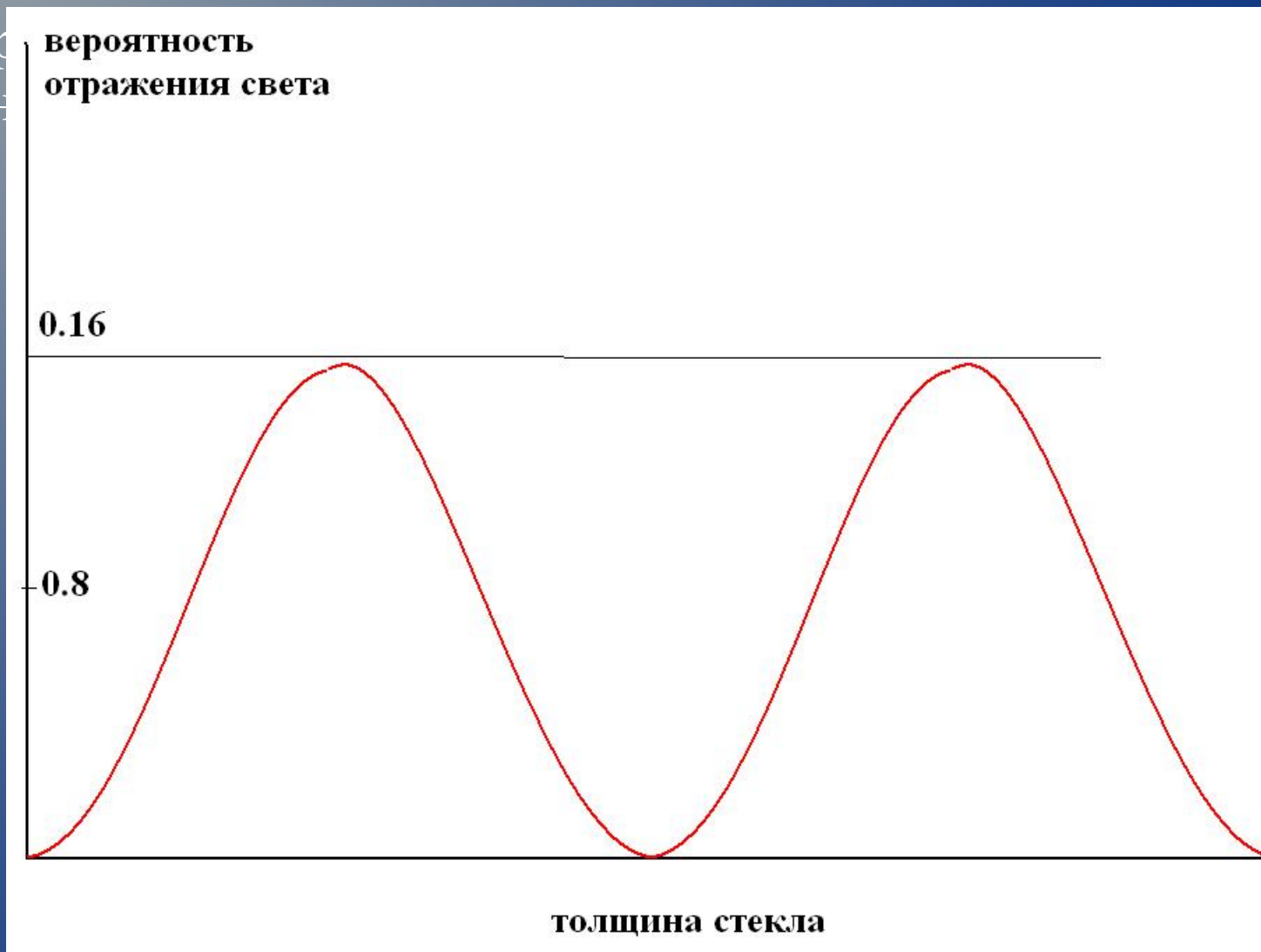


# Стекло отражает часть света



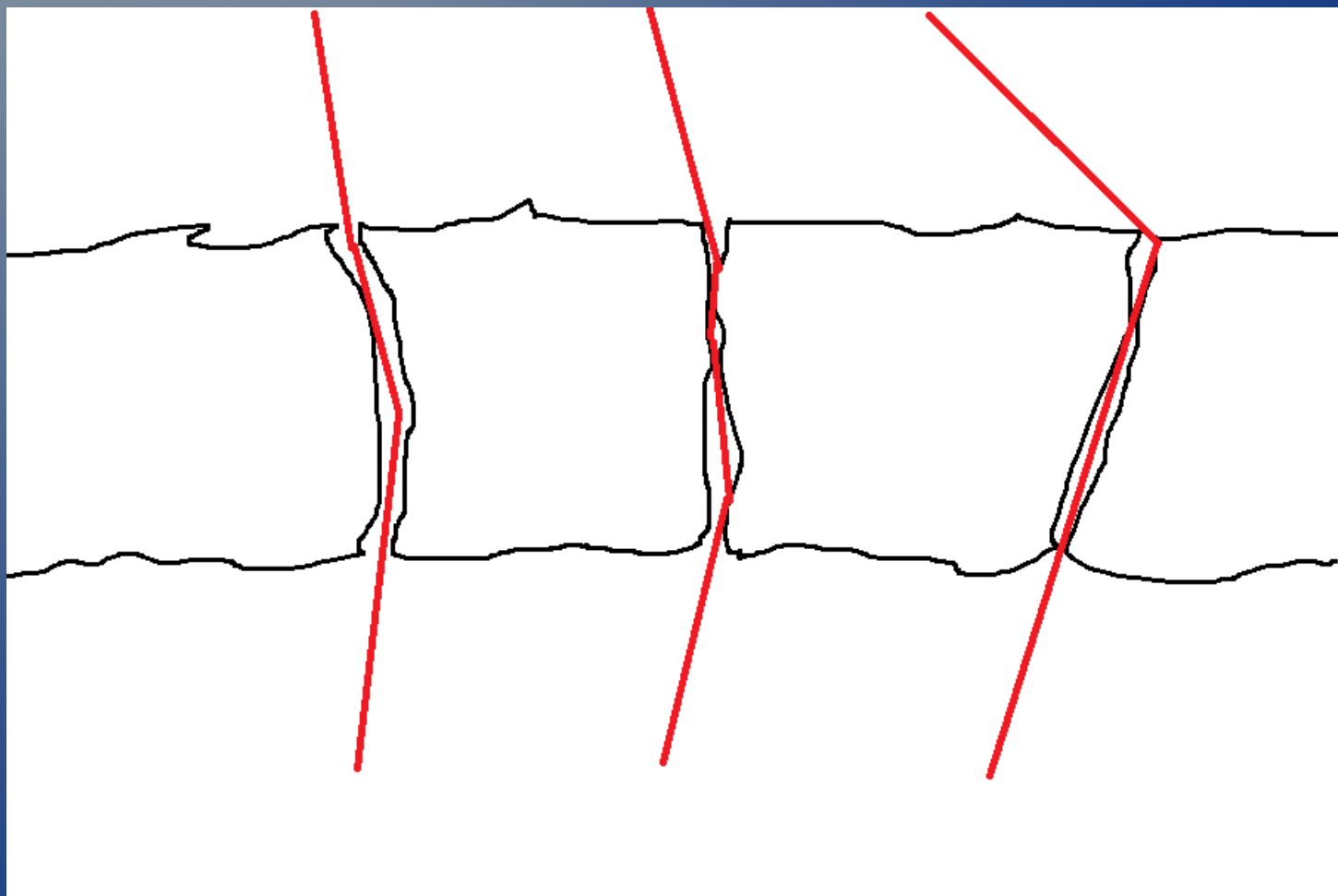
# Прохождение света через вещество

- Пар  
мен

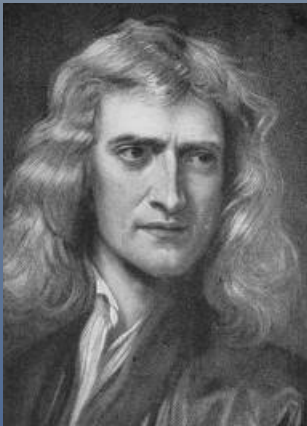


а!

А может, в стекле есть маленькие  
отверстия?



Нет, отверстия ничего не объясняют!

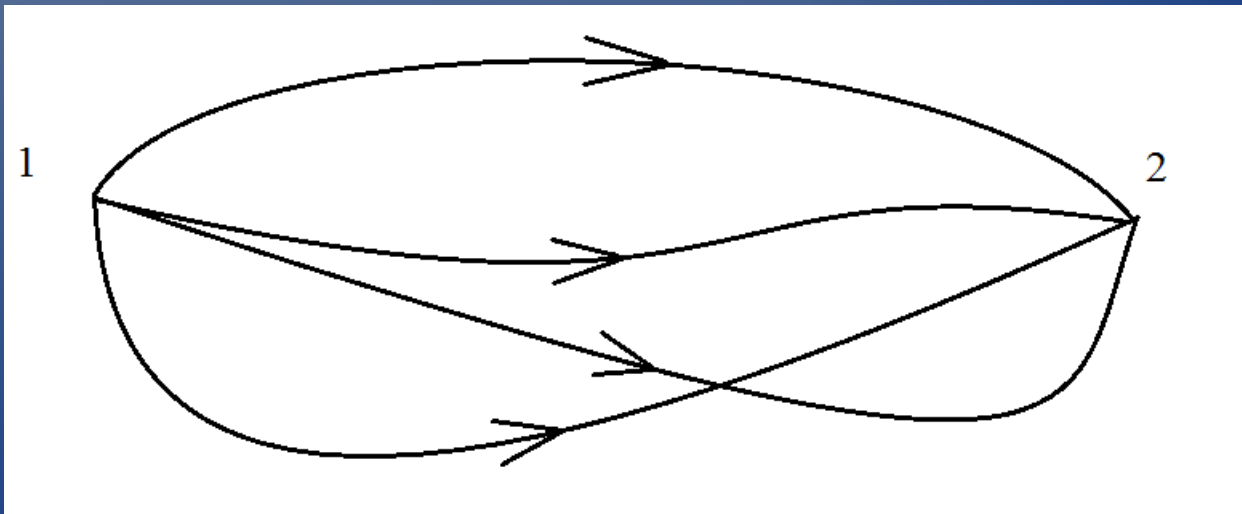


Because I can polish the glass



# Один фотон: волна или частица?

- Фотон перемещается по многим траекториям одновременно!
- Один фотон = рой воображаемых точечных частиц. Каждая из них имеет свою собственную траекторию.



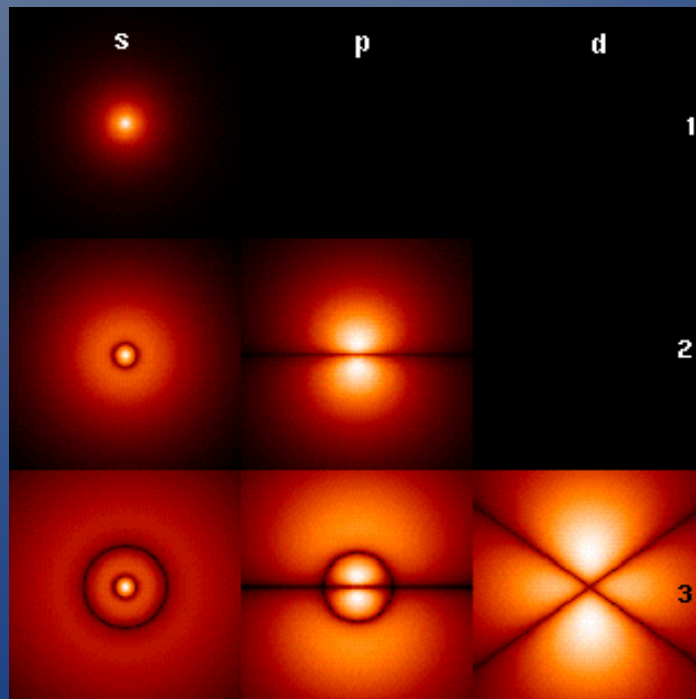
# Любая частица = рой своих экземпляров

- Но это проявляется только если величина ее действия очень мала (мала энергия или короток промежуток времени)
- Действие должно быть сравнимо с постоянной Планка (примерно  $10^{-27}$  эрг сек)

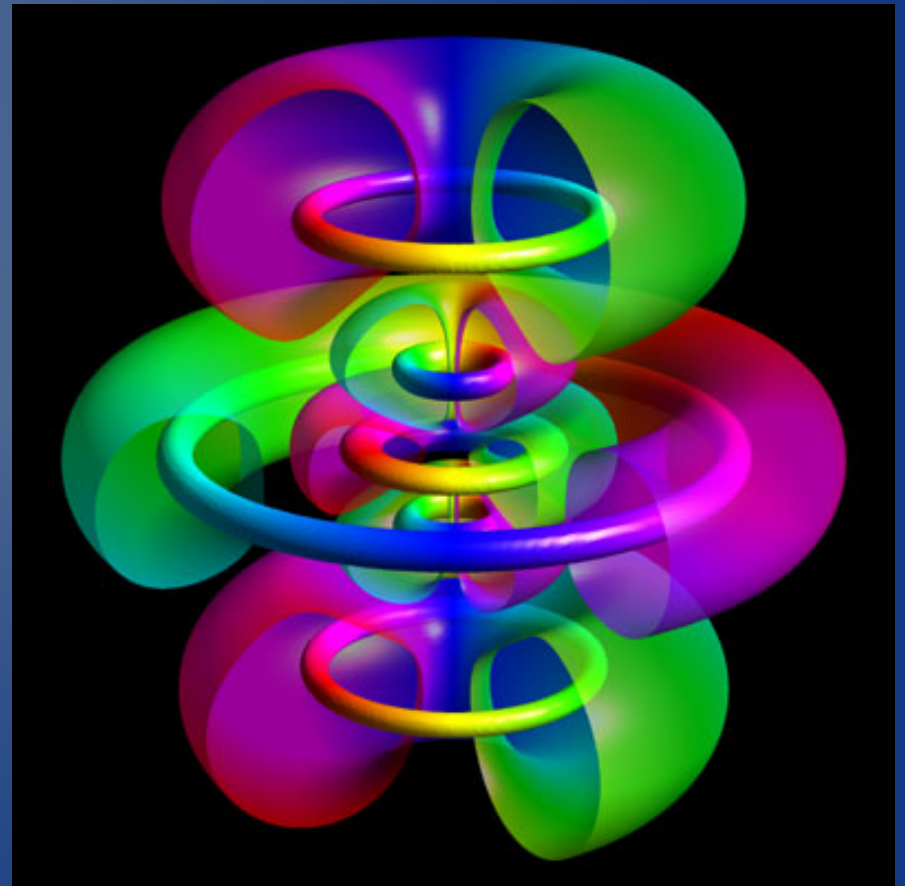
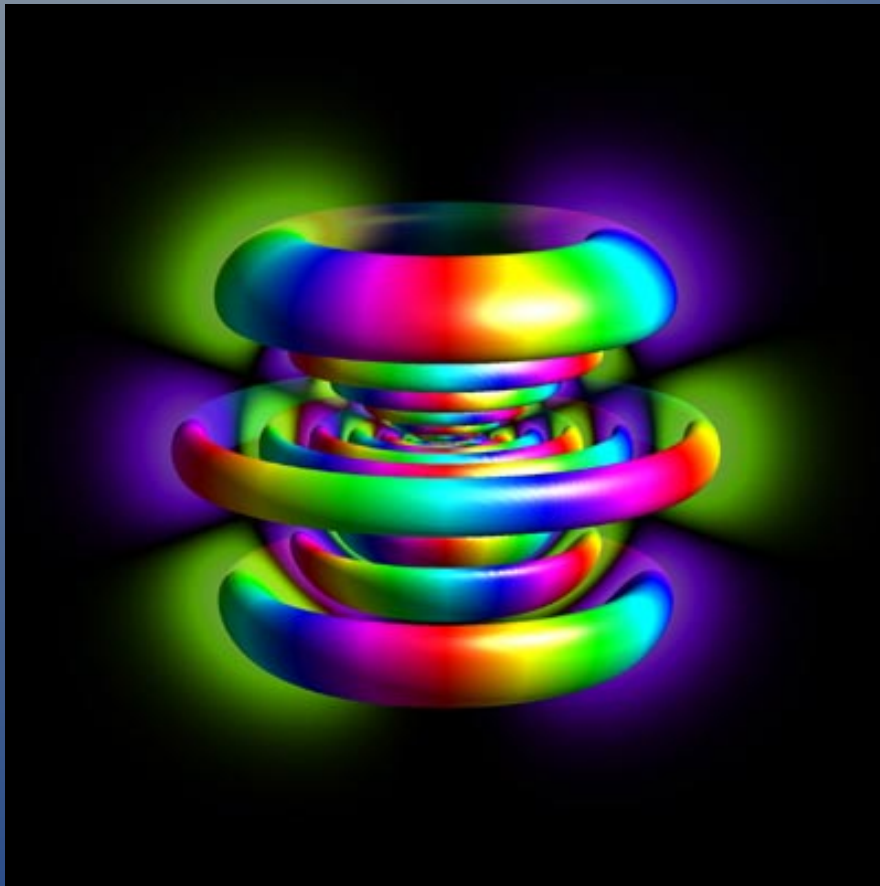
# Стационарные состояния электрона в атоме водорода $V(r)=1/r$

$\Psi_n$  - стационарное состояние с энергией  $E_n$

$$E_n \Psi_n = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi_n + v(r) \Psi_n$$



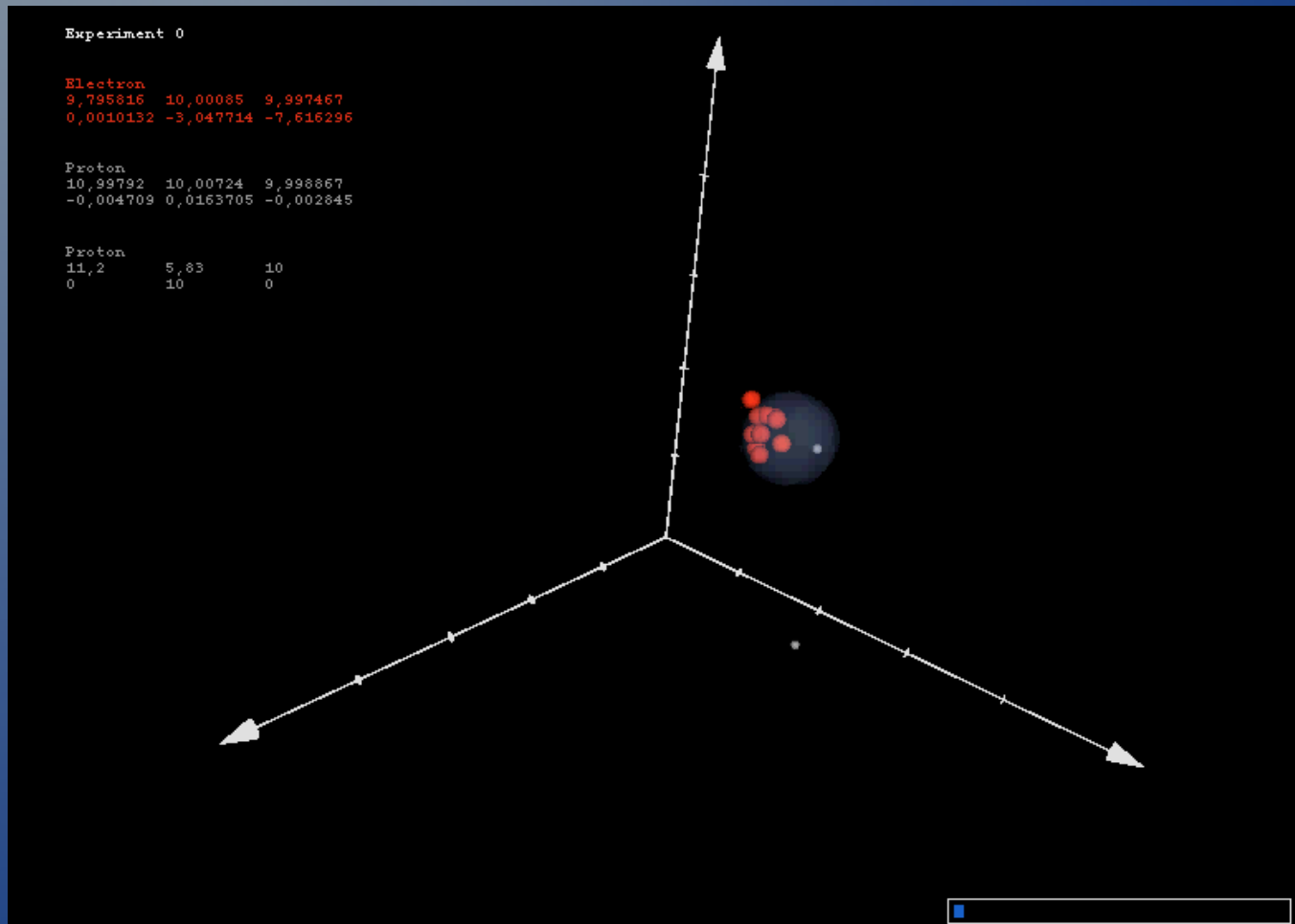
# Стационарные состояния электрона в атоме водорода



# Рой одного электрона

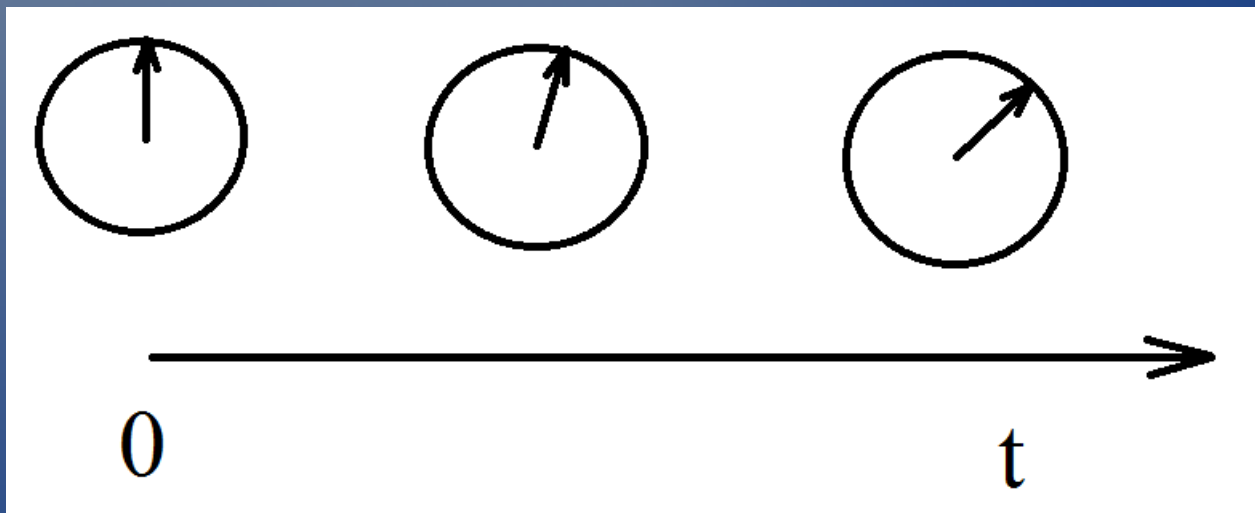


# Перезарядка



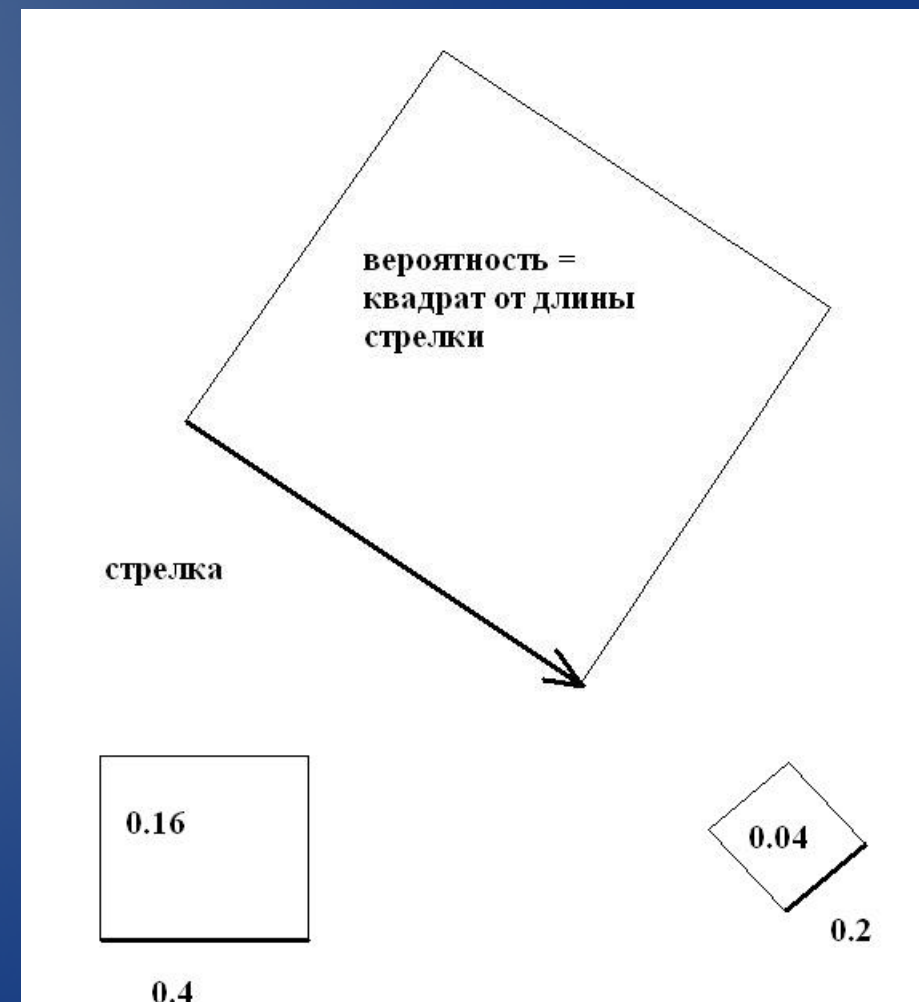
# У каждого экземпляра фотона есть свои часы со стрелкой

- Стрелка поворачивается на определенный угол  $d\varphi$  после прохождения определенного пути  $ds$



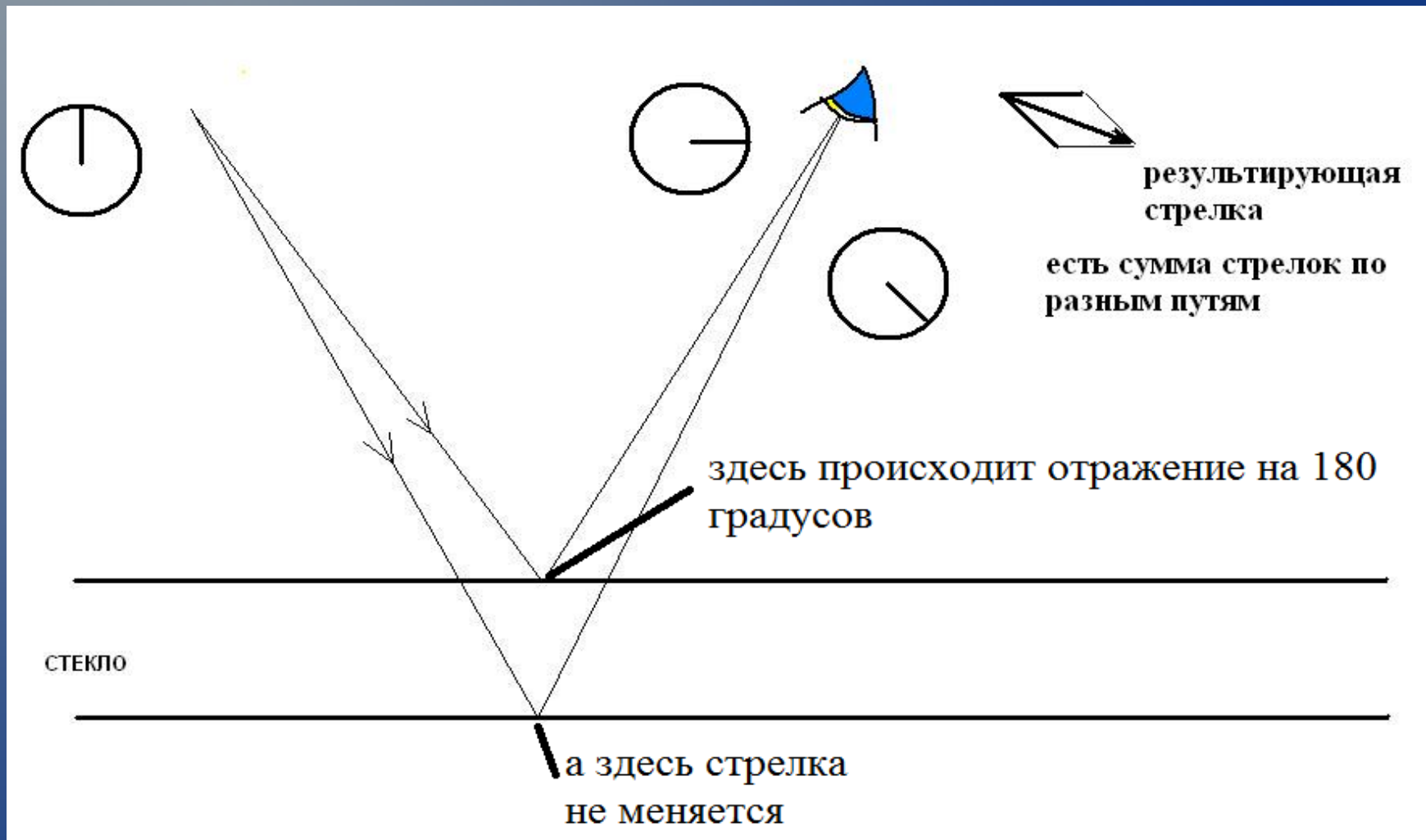
# Мы можем вычислить только вероятности событий, но не предсказать конкретное!

- Путям соответствуют стрелки
- Квадрат длины стрелки = вероятность присутствия фотона
- Когда и как в точности происходит переход от стрелок к вероятностям, мы НЕ ЗНАЕМ
- Стрелки точно складываются, когда мы видим фотон

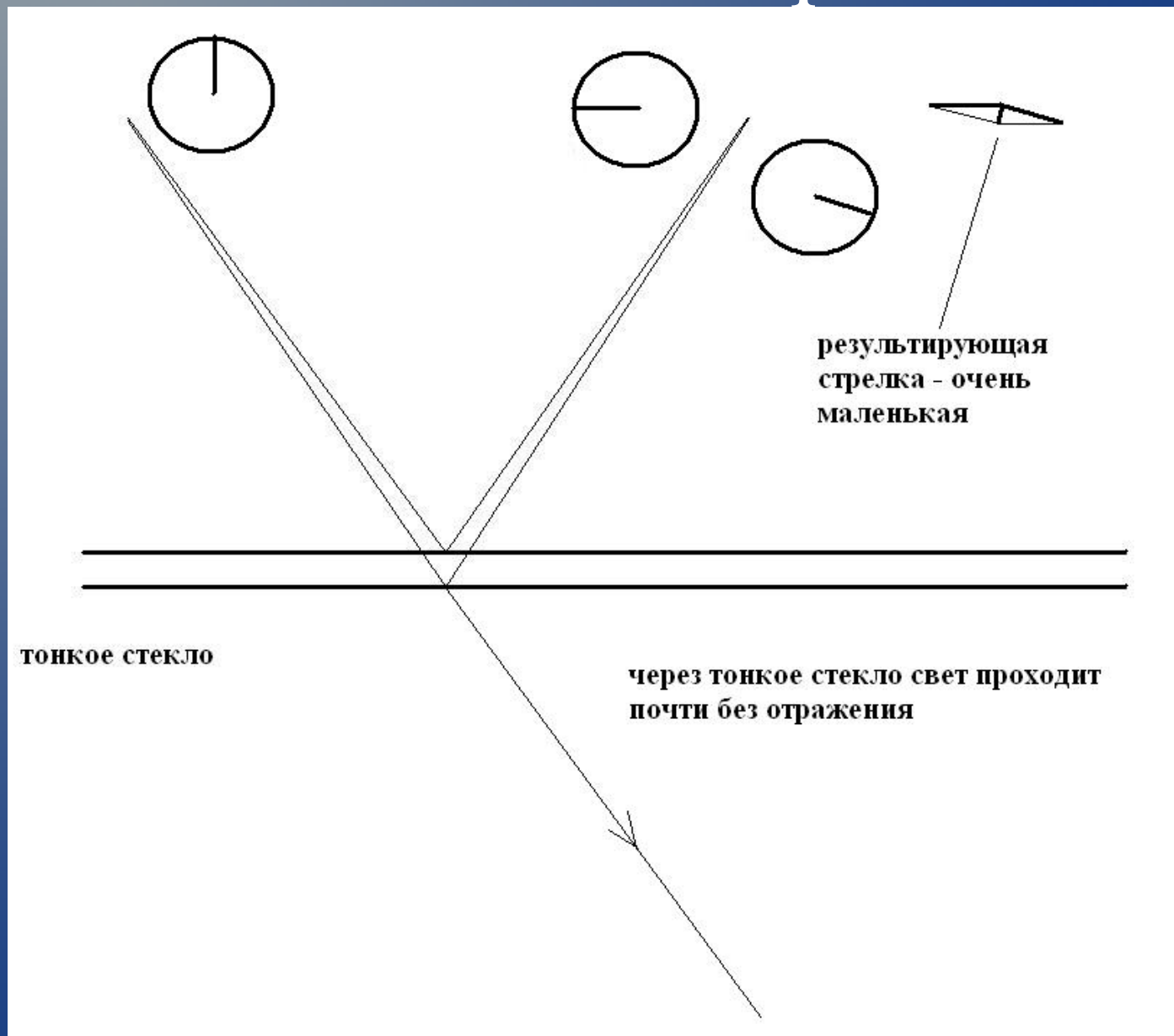




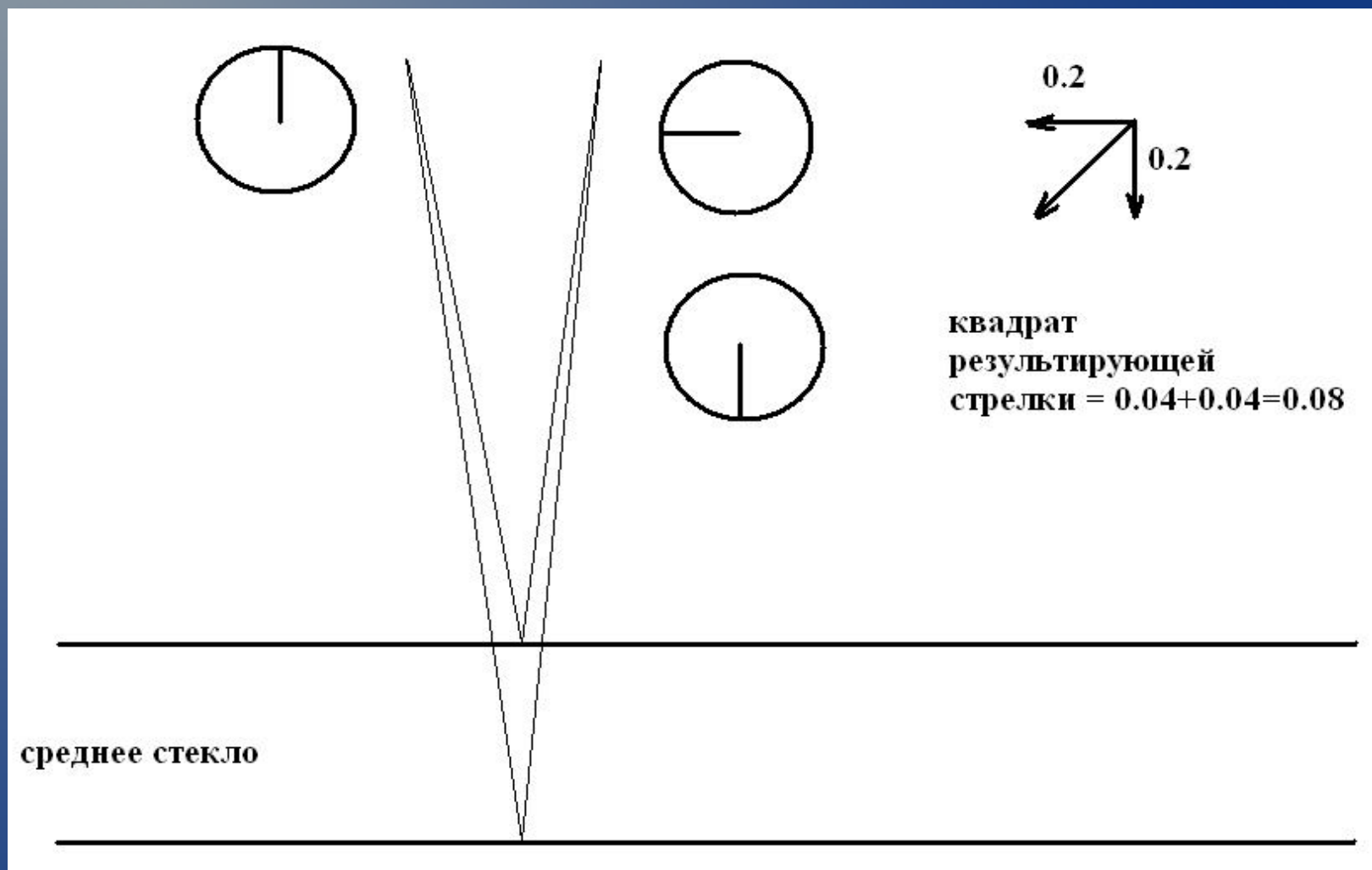
# Прохождение света через стекло



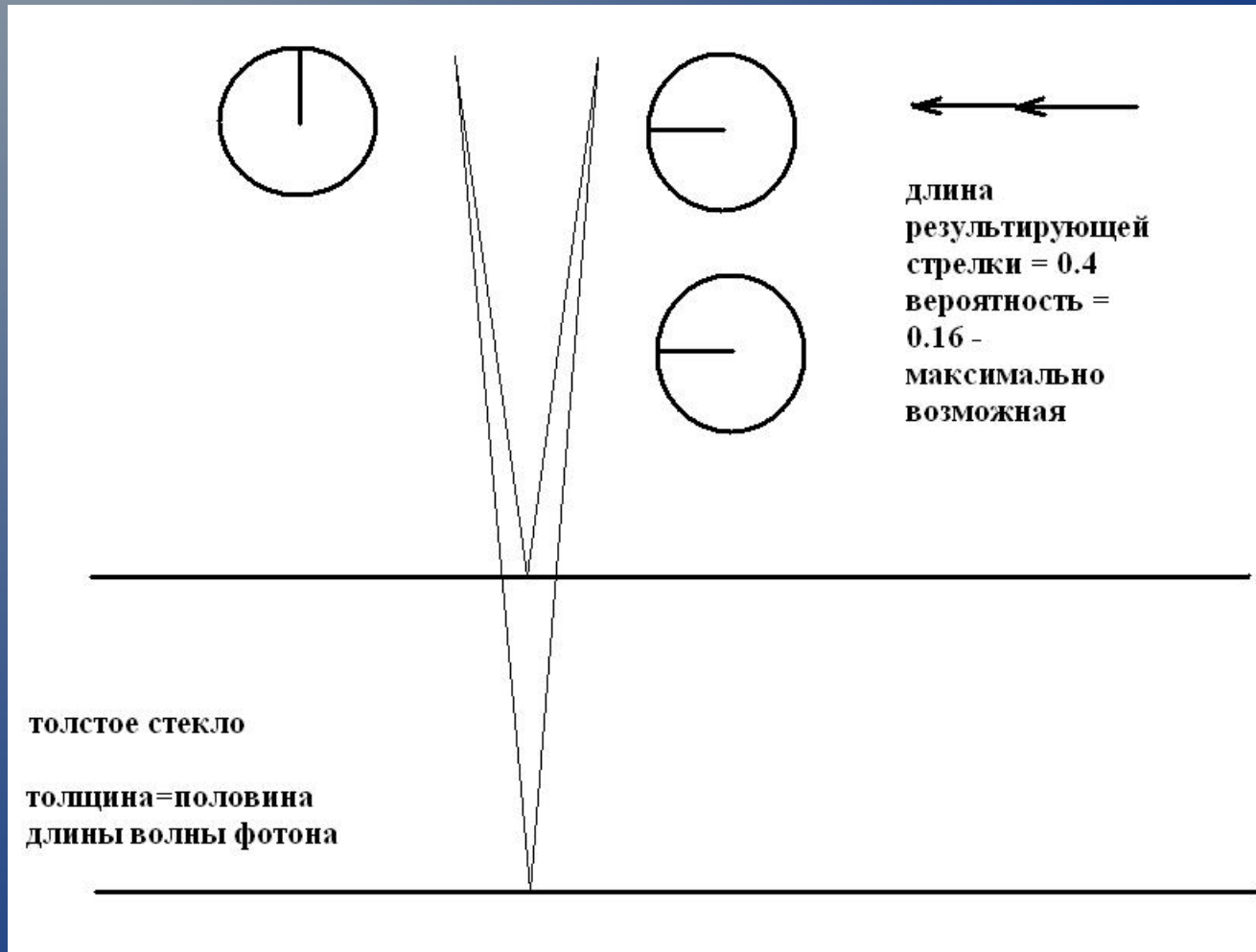
# Через тонкое стекло свет проходит почти без отражения



# Стекло потолще – отражение растёт!



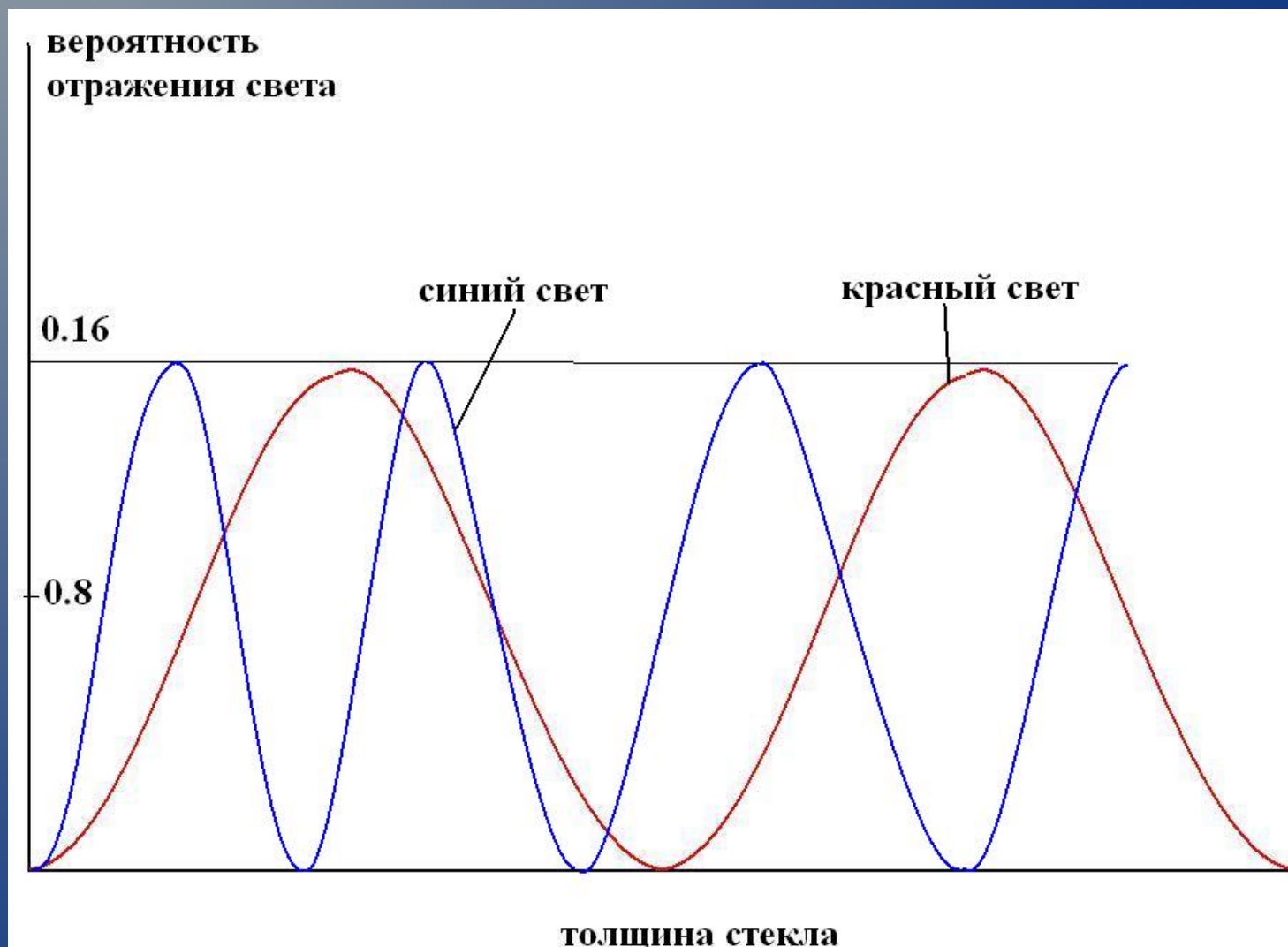
# При толщине = одна четверть длины волны фотона отражение максимально



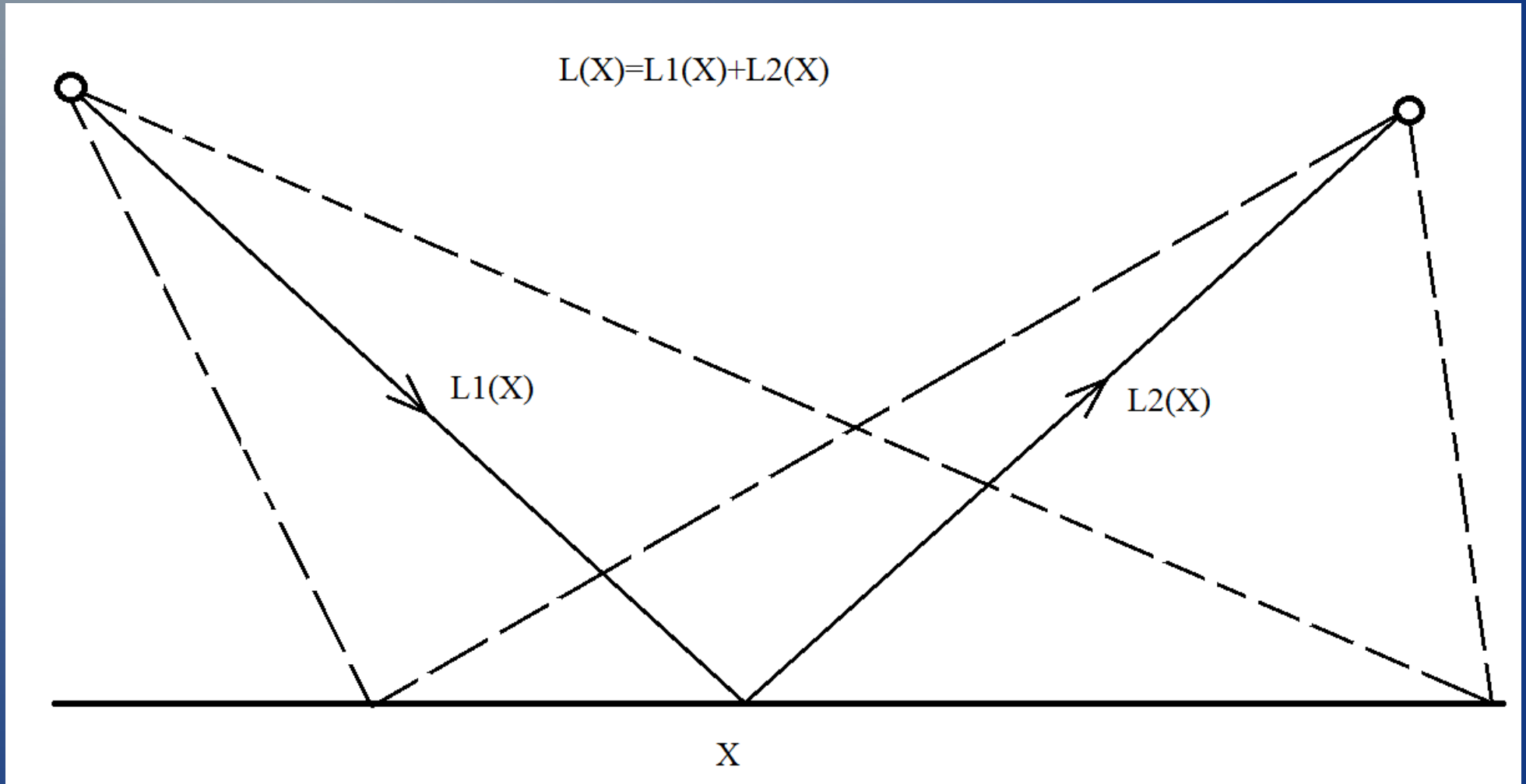
Периодическая зависимость вероятности отражения от толщины – следствие вращения стрелки каждого пути и сложений стрелок для разных путей

- Дальше отражение будет снова падать!

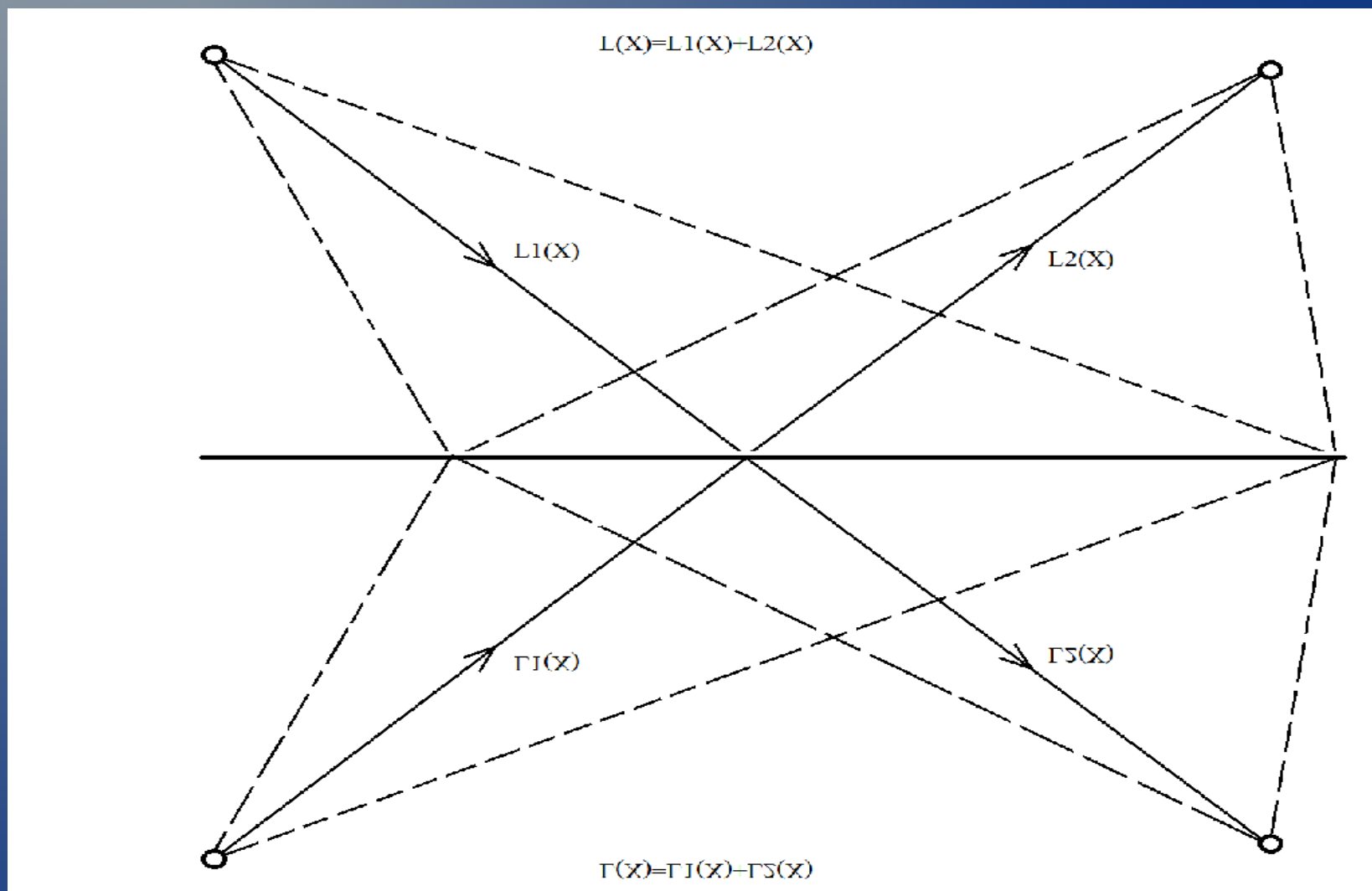
# Зависимость вероятности отражения от толщины стекла



# Почему угол падения равен углу отражения?

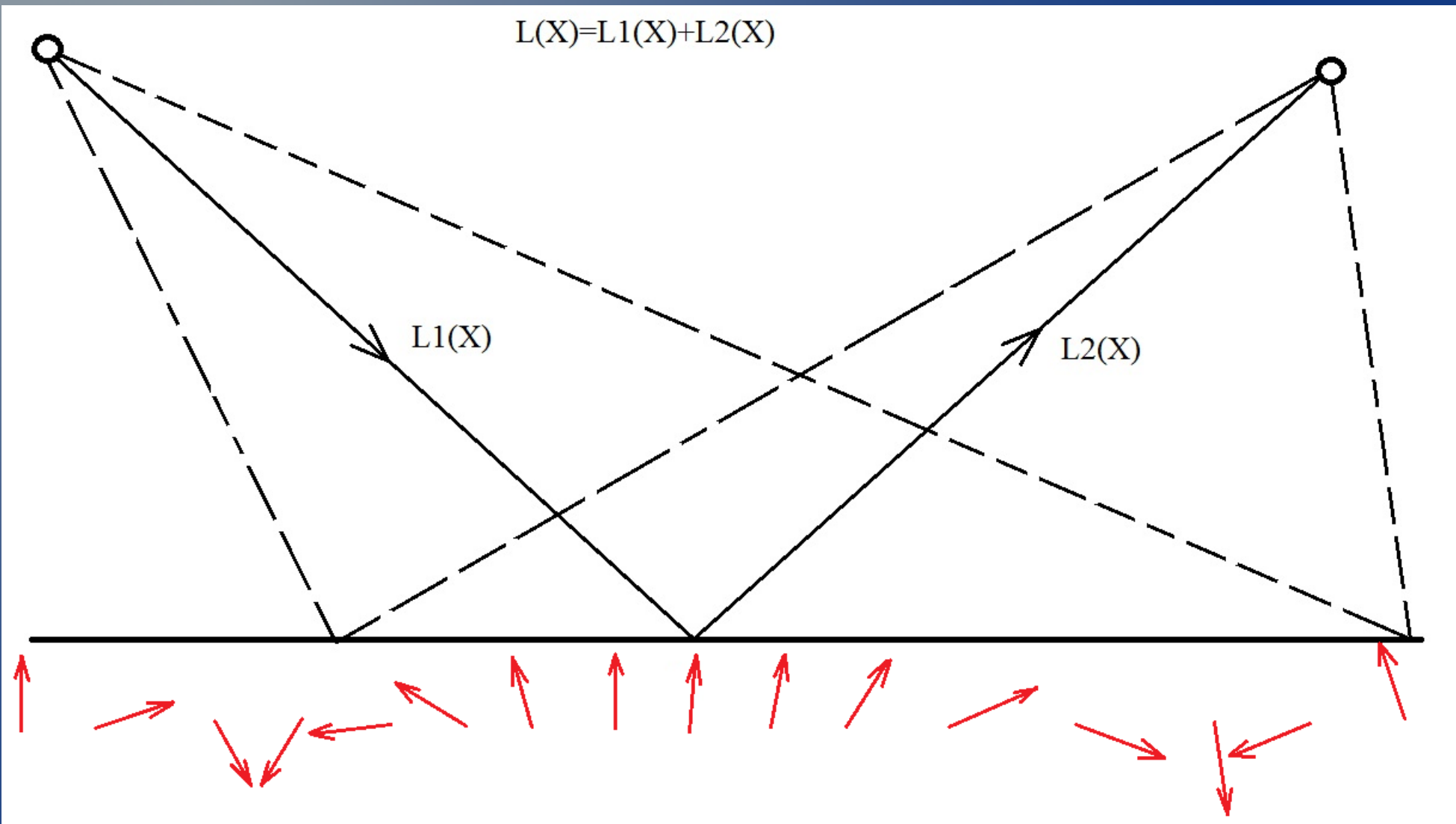


# Канонический путь – кратчайший, но как свет об этом узнает?

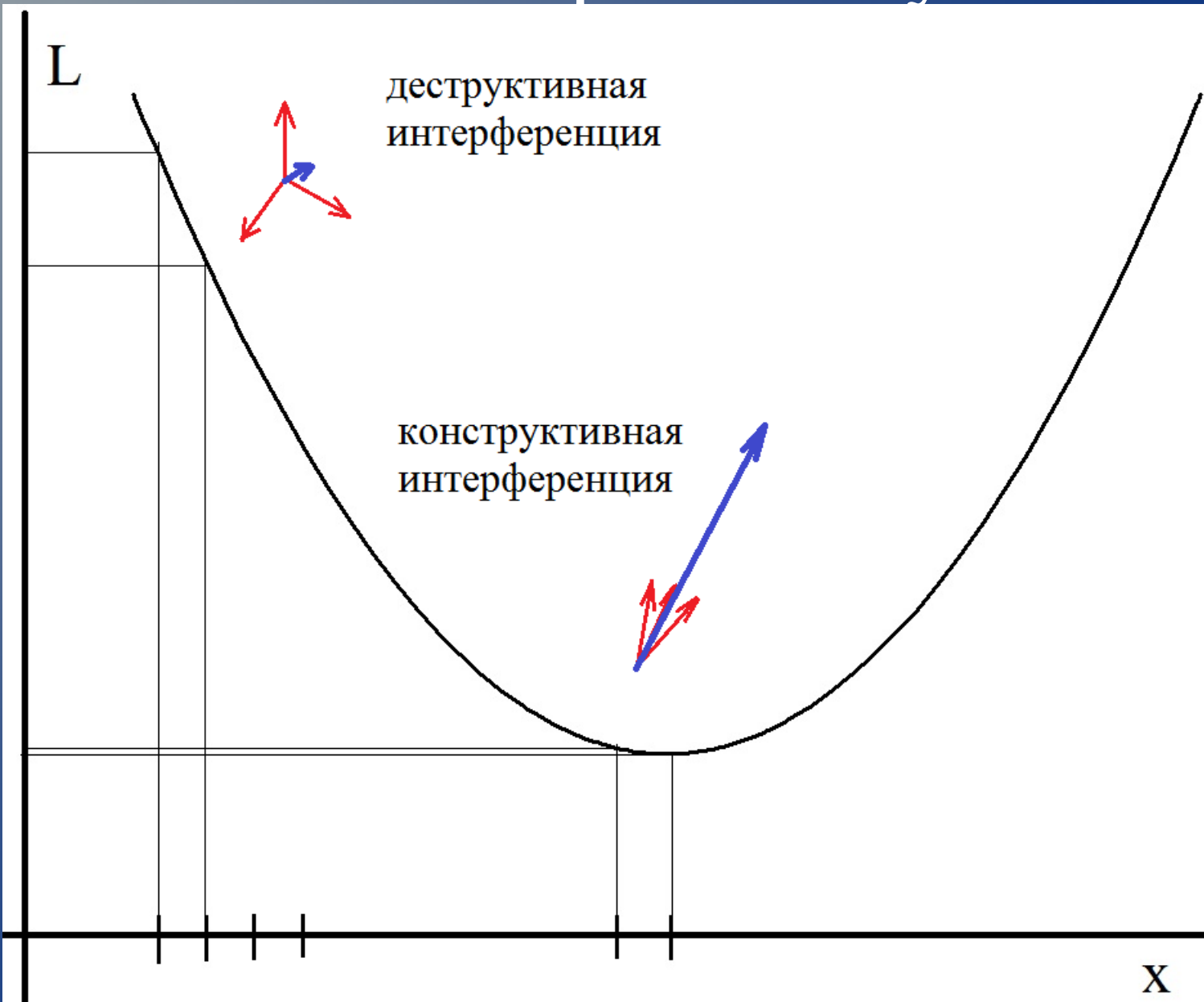




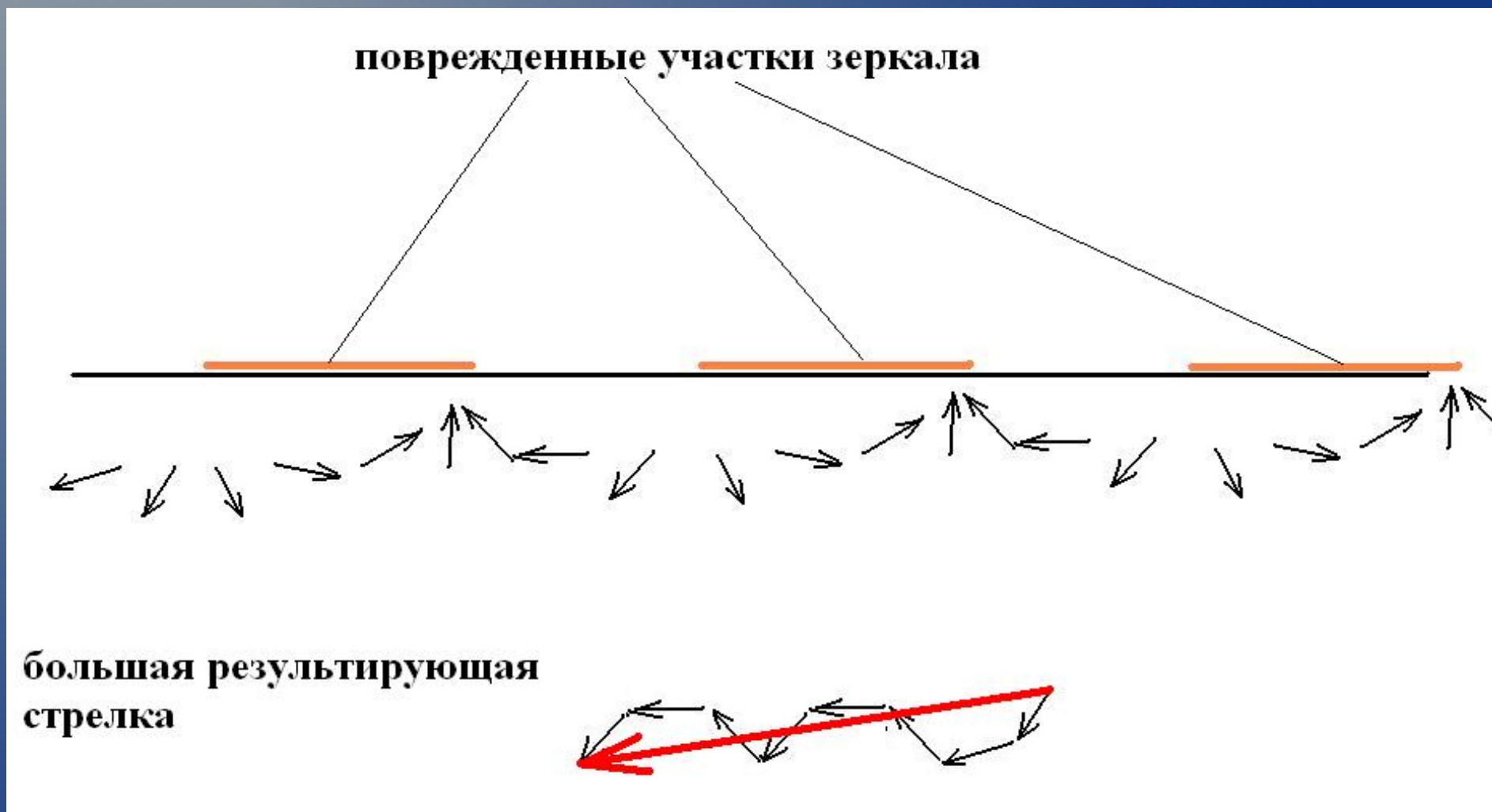
# Как происходит отражение от разных частей зеркала?



# Разобьем рой на пучки



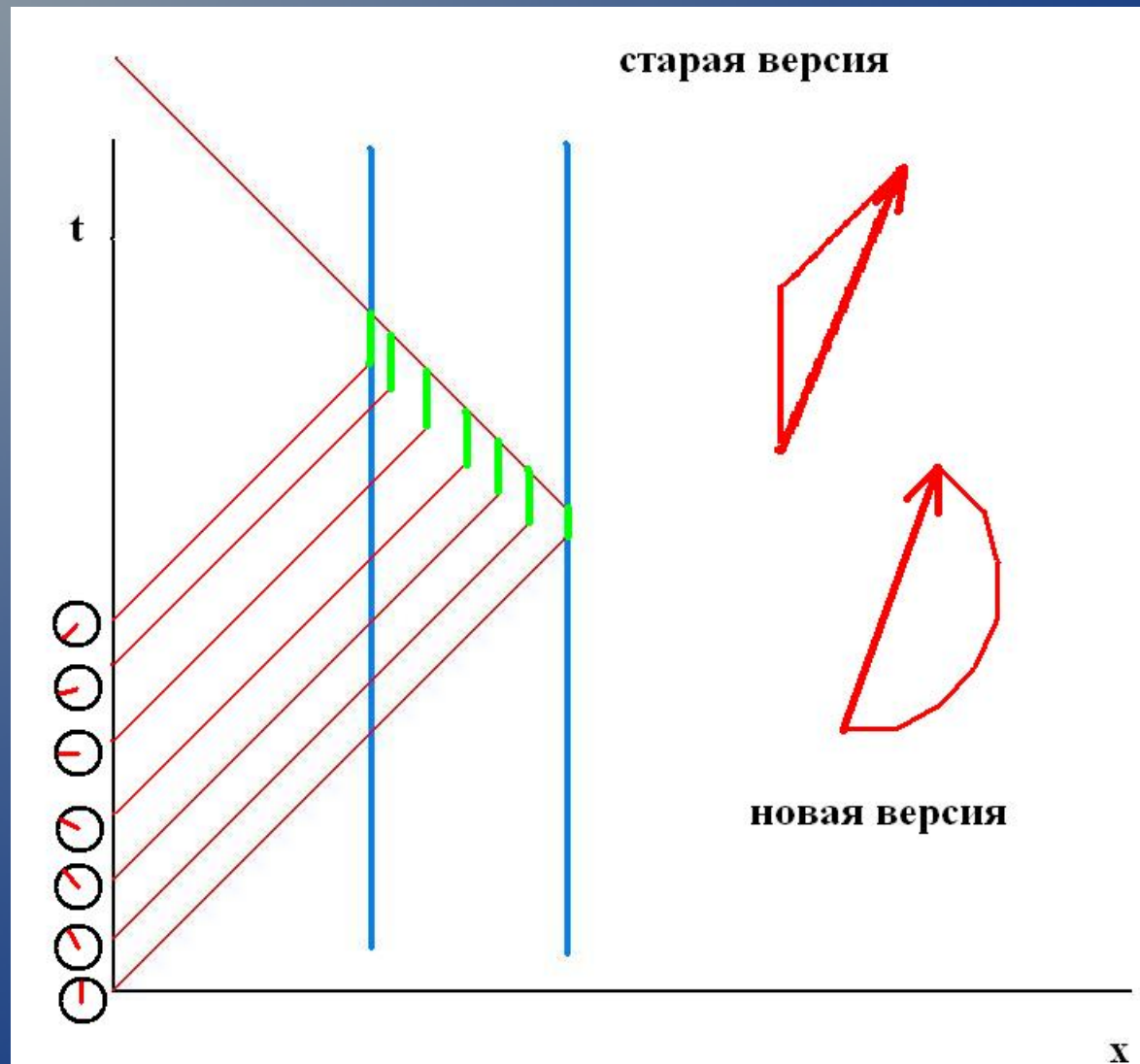
Можно добиться отражения от разных частей  
зеркала, процарапав его



# Монохроматический свет

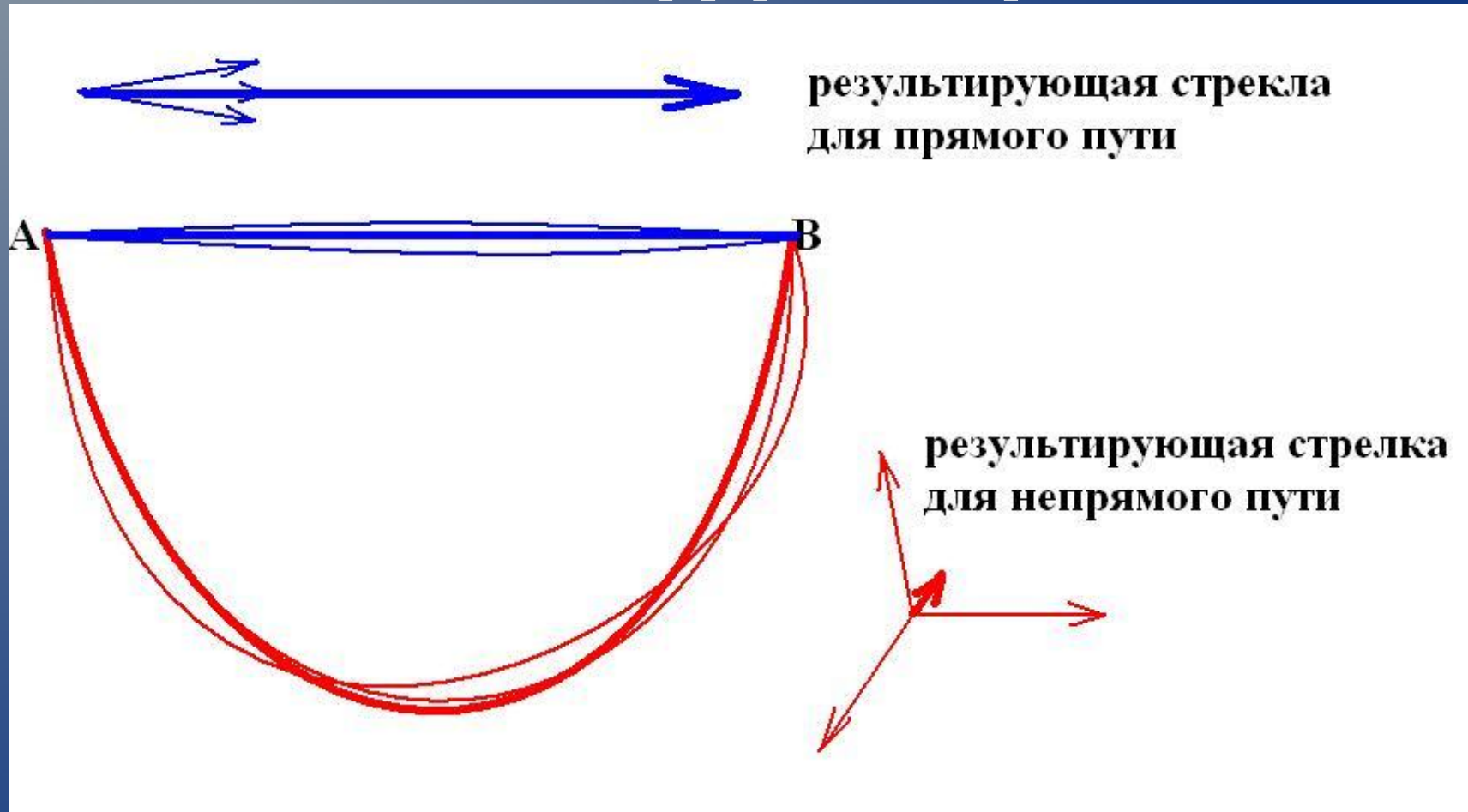
- Можно не вращать стрелку, а устанавливать ее фиксированное положение в зависимости от времени вылета фотона из источника: раньше вылет – большее время она показывает.
- Взаимодействие фотона с электронами стекла – поворот стрелки на 90 градусов.
- Эффект будет таким же, как и при старом методе, но мы избавляемся от искусственного приема: поворота стрелки на 180 градусов при отражении только от передней поверхности стекла.

# Учет взаимодействия фотонов с электронами в стекле

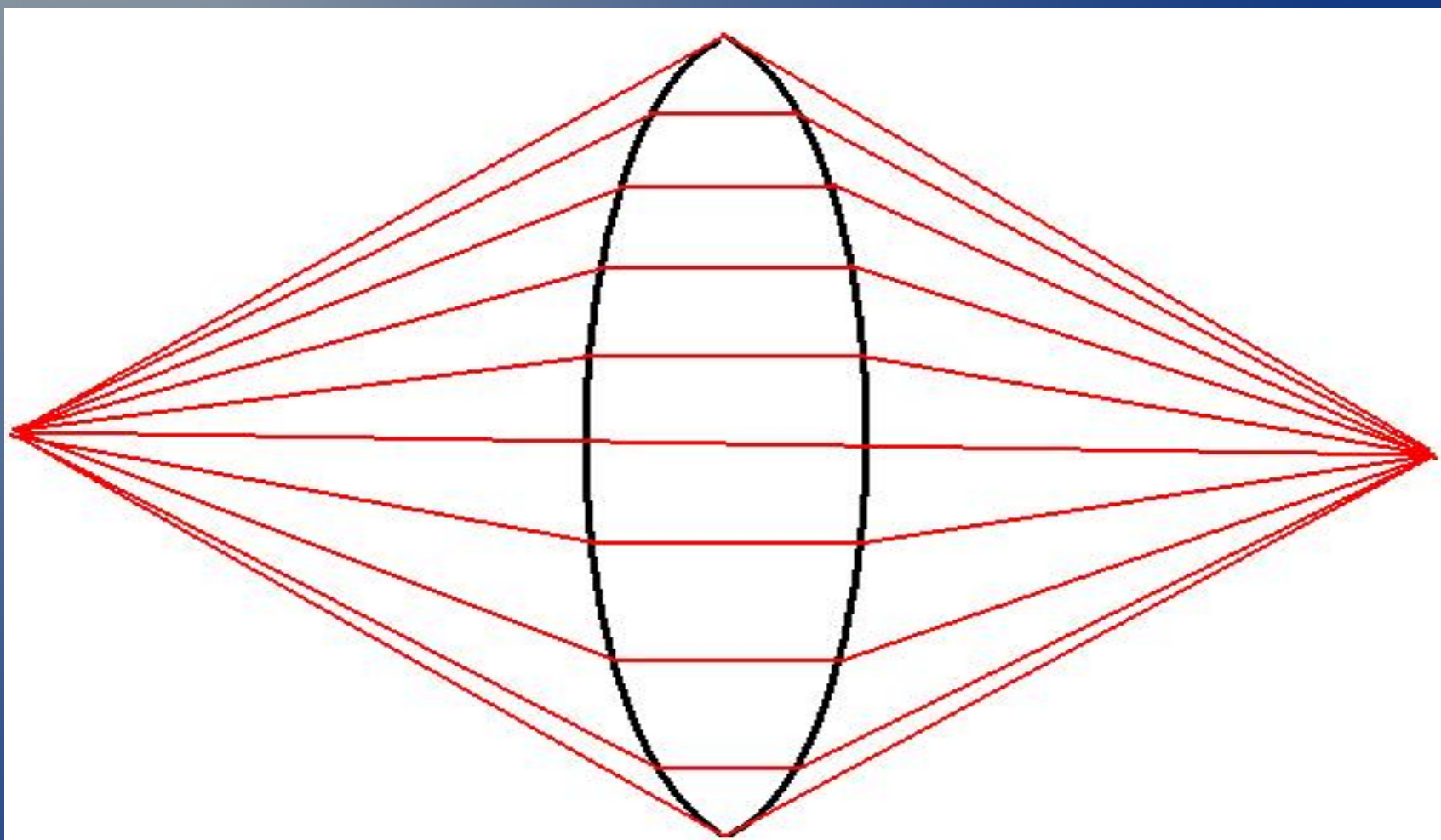


# А почему фотон летит по прямой?

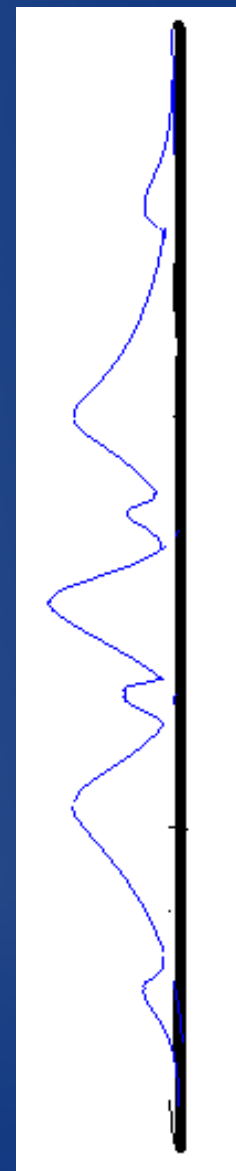
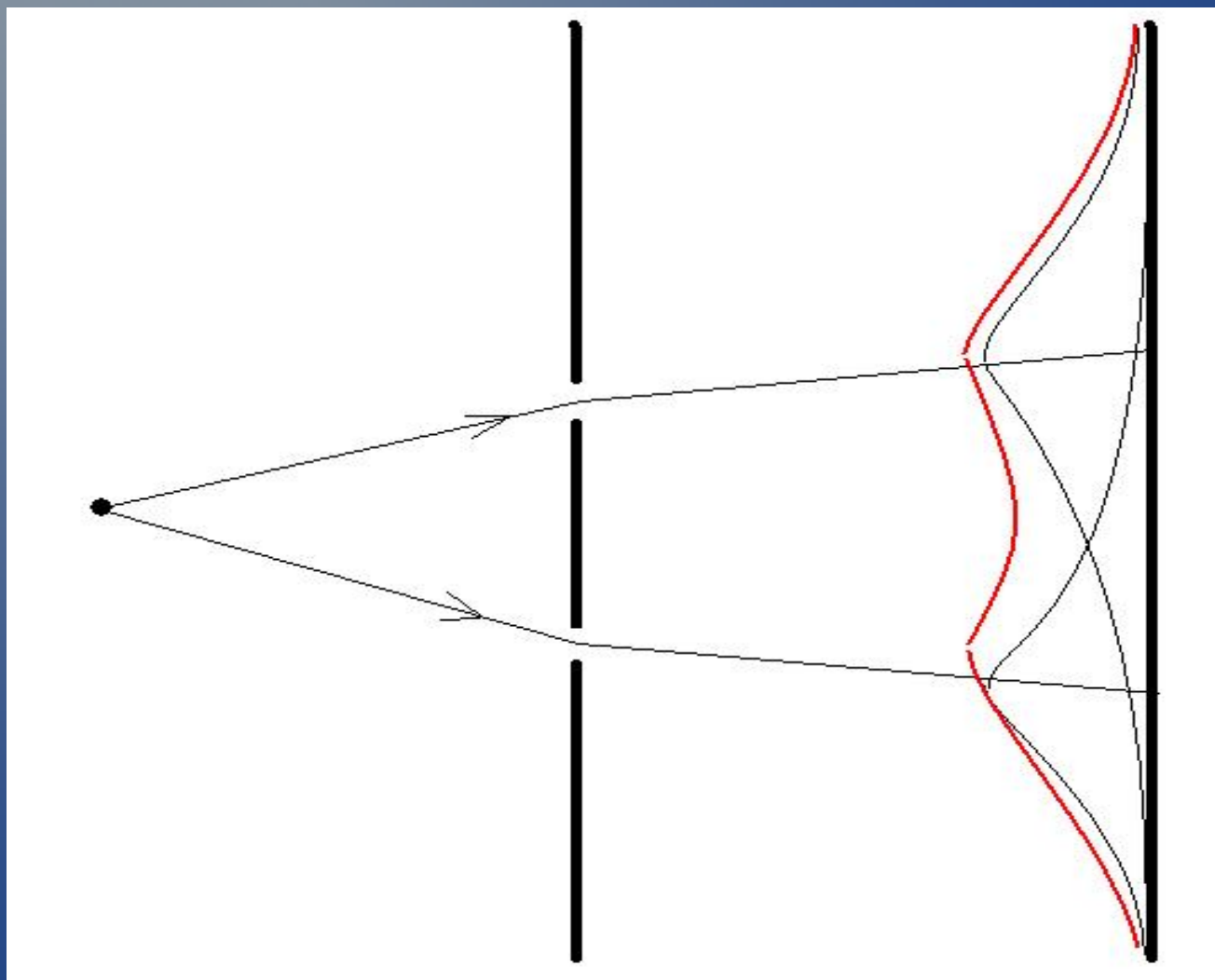
- Это – тоже следствие интерференции стрелок!



Можно ли "обмануть" фотон?



# Прохождение частицы через 2 щели



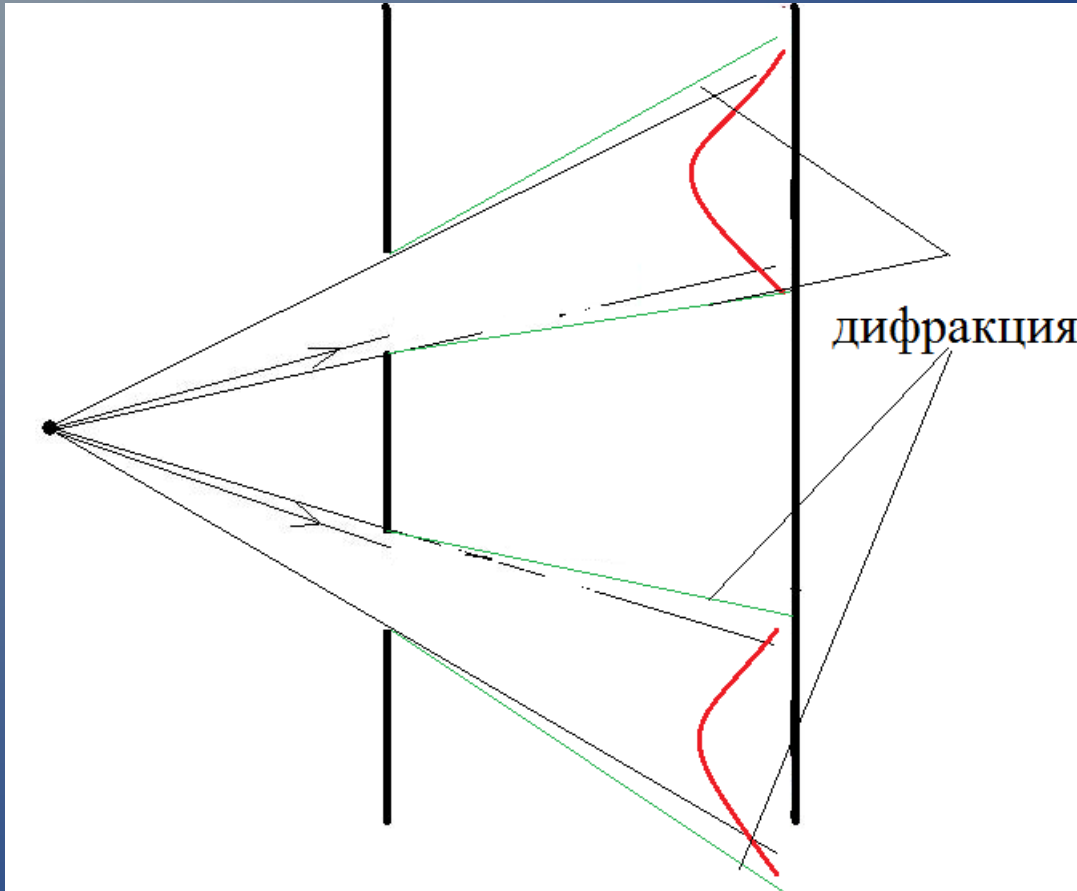


# Интерференция на щелях

- На одной щели
- На двух щелях
- На двух щелях

# Зависимость от ширины щелей

- Щель широкая – интерференция мала



# Зависимость от ширины щели



# Принцип неопределенности – следствие "свободной воли" экземпляров роя

- $\Delta x \Delta p = h$  – чем точнее известна координата, тем меньше мы знаем об импульсе (Бор, Гейзенберг).

*Это следует из более общего закона:*

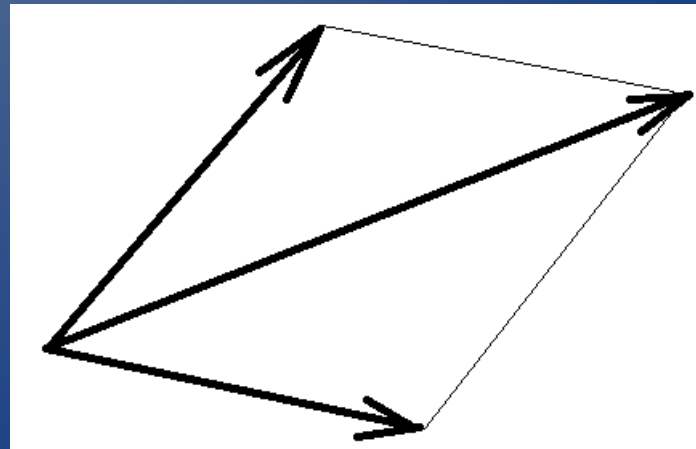
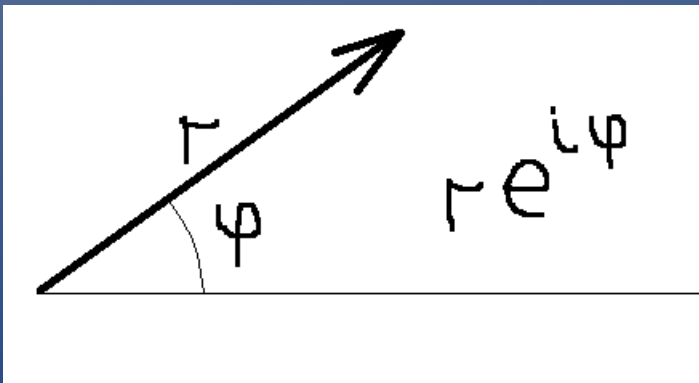
- Экземпляры роя не могут находиться в одной клетке пространства.
- У каждого экземпляра есть "свобода воли": его путь известен только ему самому.

# Великий закон Природы

- В каждой клетке пространства – не более одного экземпляра реальной частицы
- Стрелка для каждого экземпляра реальной частицы при движении вдоль своего пути последовательно поворачивается и сжимается.
- Стрелки для разных экземпляров, оказавшиеся в одной клетке пространства, складываются.
- Вероятность частицы попасть в данную клетку есть квадрат длины стрелки.

# Стрелки как комплексные числа

- Стрелка = комплексное число
- Поворот стрелки на угол  $\varphi$  и сжатие в  $r$  раз = умножение на комплексное число  $r e^{i\varphi}$ .
- Сложение стрелок = сложение комплексных чисел.
- Все алгебраические правила справедливы и для комплексных чисел (там нет только отношения порядка).

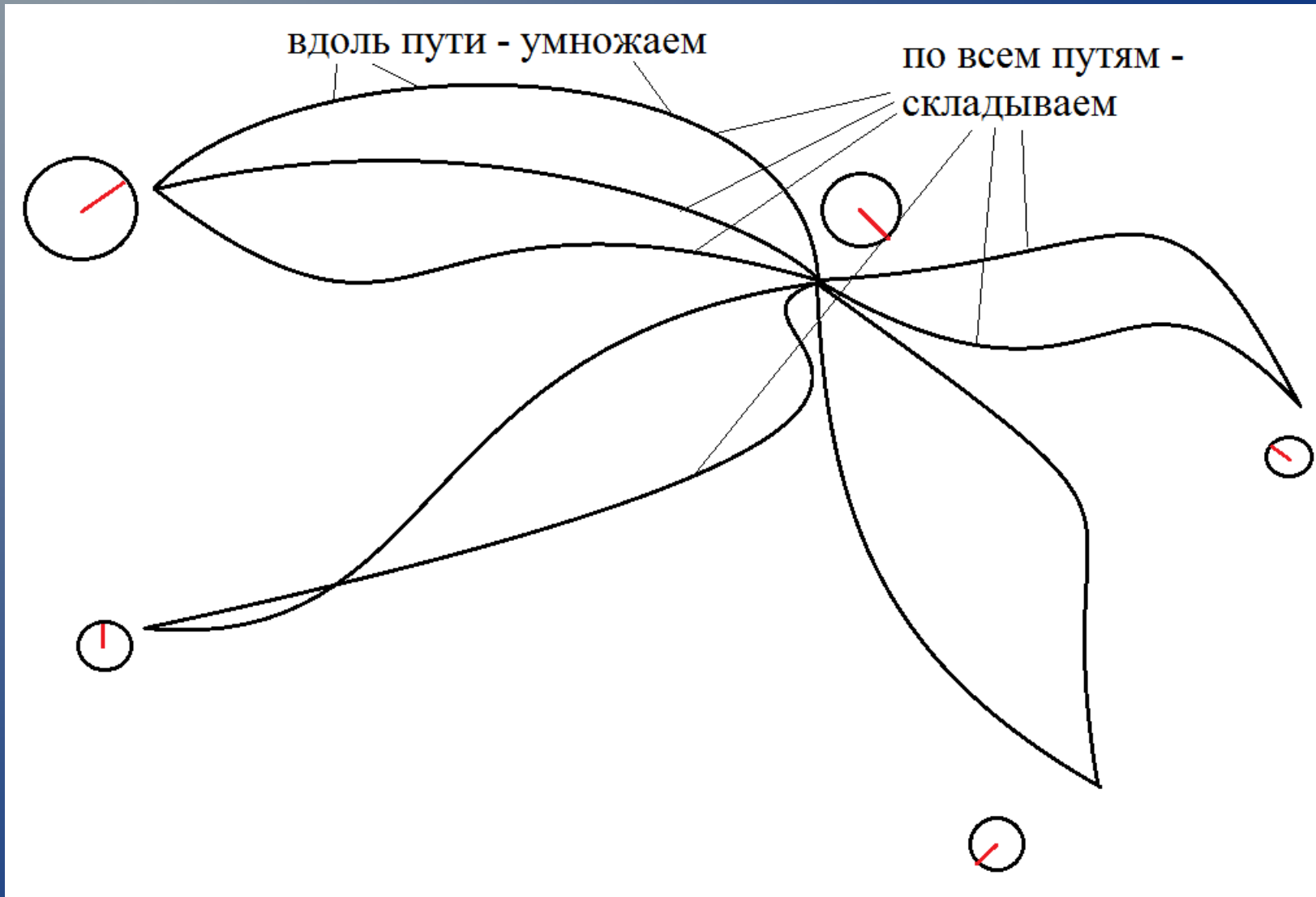


# Великий закон Природы

- Состояние частицы = распределение амплитуд ее нахождения в разных точках – это называется волновой функцией или  $\Psi$  – функцией.
- Амплитуды вдоль одного пути перемножаются (последовательные сжатия и повороты стрелки)
- Амплитуды вдоль всевозможных путей, ведущих в одну точку, складываются

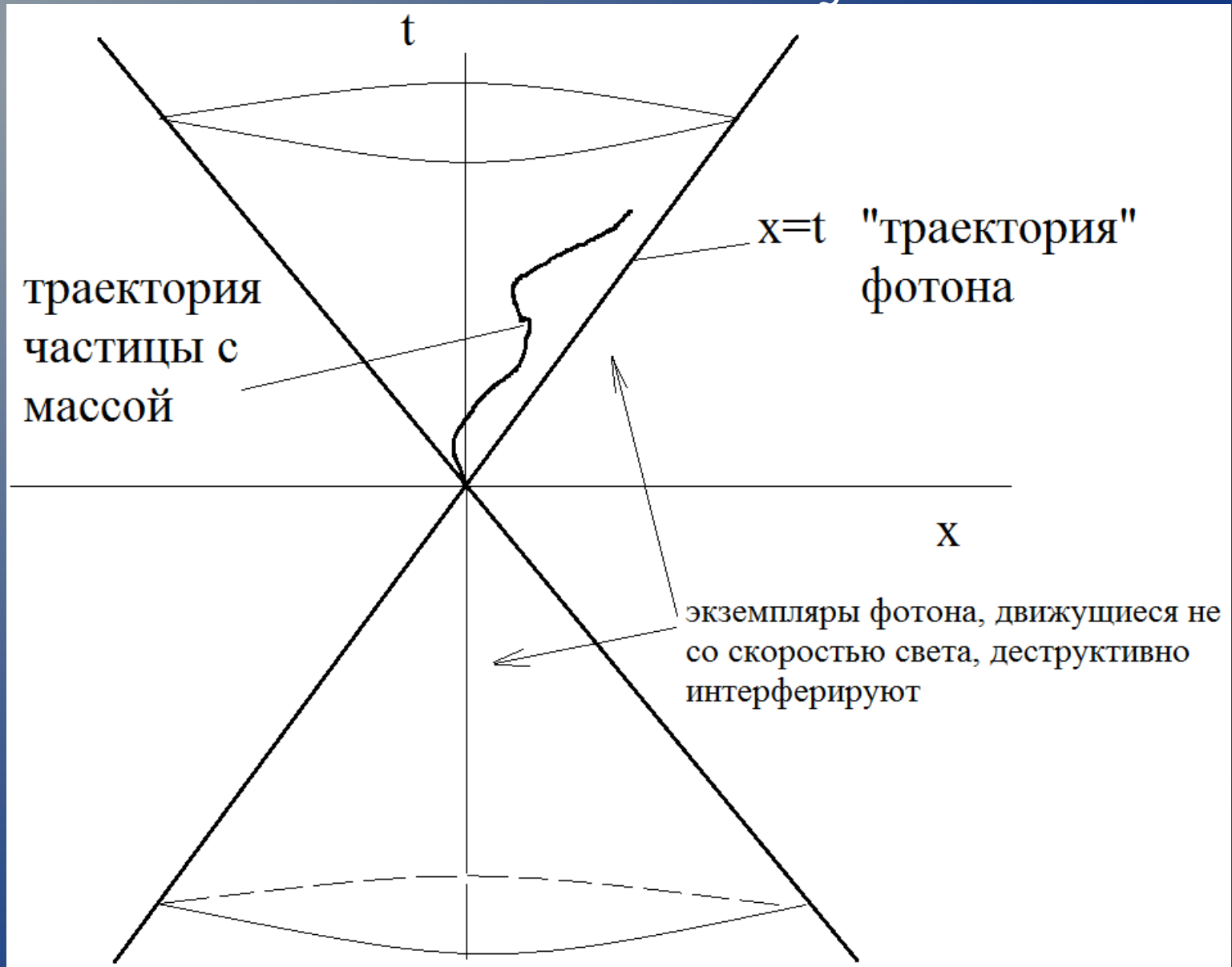
Это называют принципом интерференции или принципом суперпозиции

# Великий закон Природы





# Световой конус

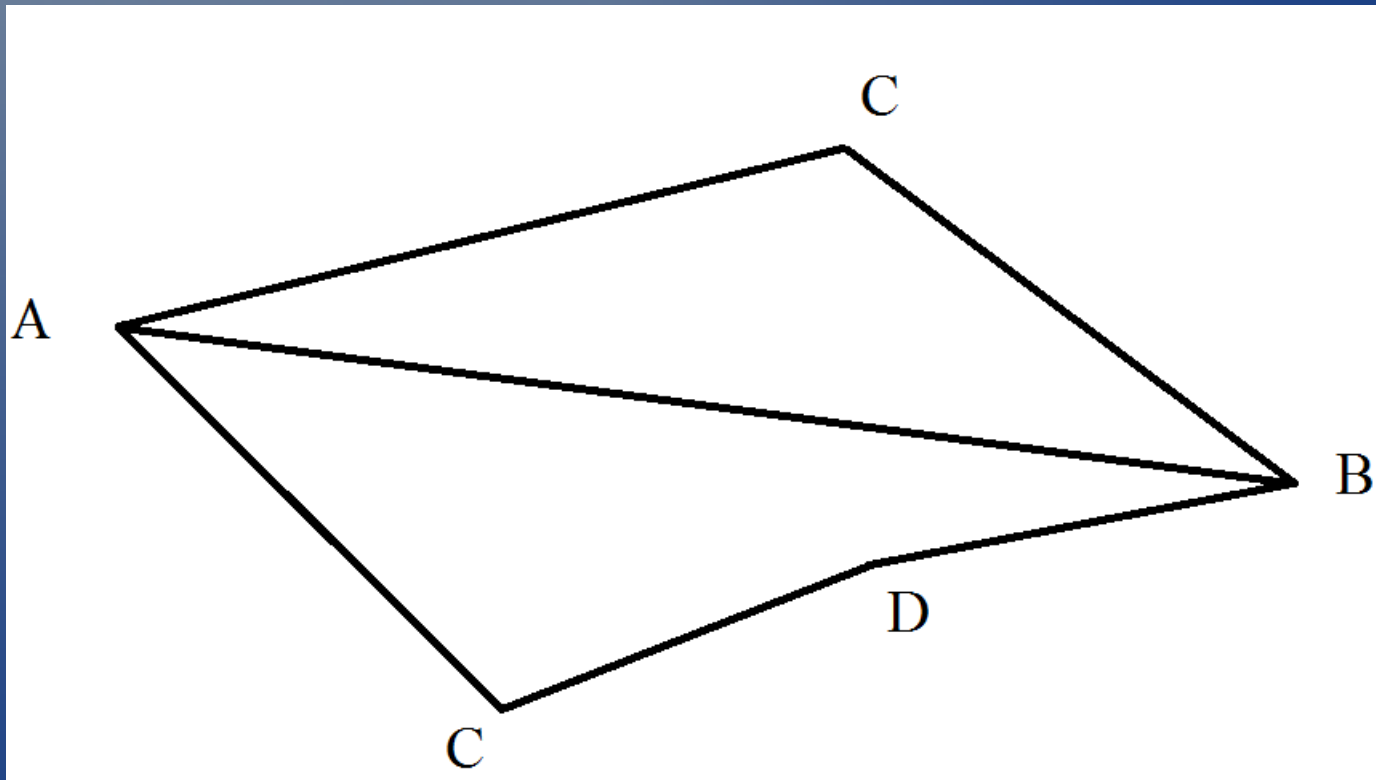


# Переход фотона из точки в точку в пространстве-времени

- $P(A \rightarrow B) = 1/I$ , где
- $I = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 - (t_A - t_B)^2$  — квази-расстояние в пространстве-времени.  
(скорость света  $c=1$ )
- $1/I$  обращается в бесконечность на поверхности светового конуса!
- Причина в том, что мы предполагаем пространство непрерывным.
- Надо ввести зерно разрешения  $d$  по пространству, чтобы устранить особенность в нуле.

# Амплитуда перехода электрона

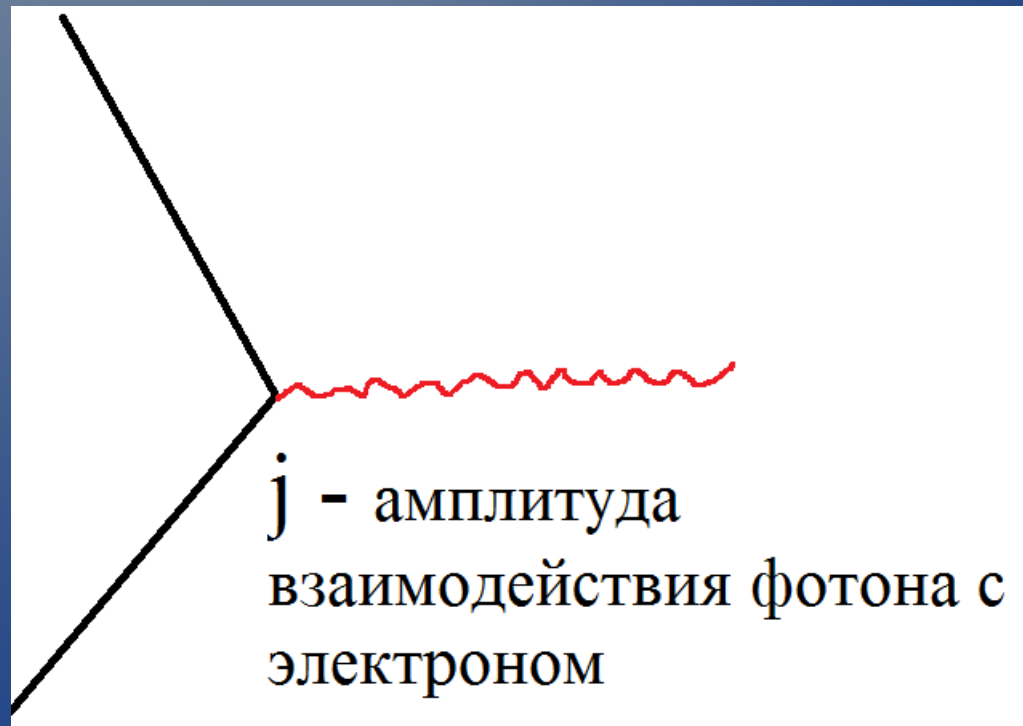
- $E(A \rightarrow B) = P(A \rightarrow B) + \sum_C P(A \rightarrow C)v^2P(C \rightarrow B) + \sum_{C,D} P(A \rightarrow C)v^2P(C \rightarrow D)v^2P(D \rightarrow B) + \dots$



# Взаимодействие электрона с фотоном

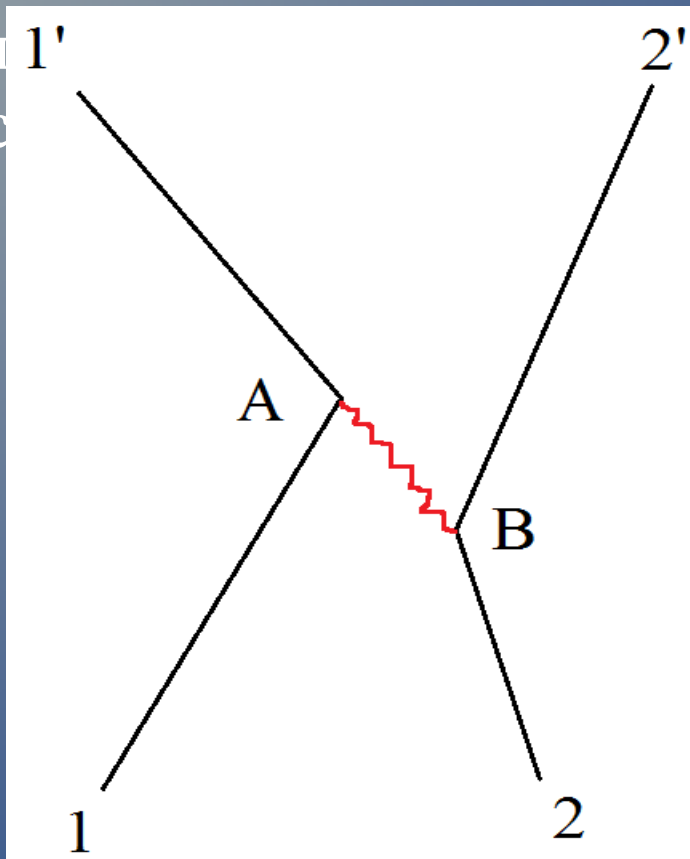
$\nu$  – масса “голого” электрона

$j$  – заряд “голого” электрона



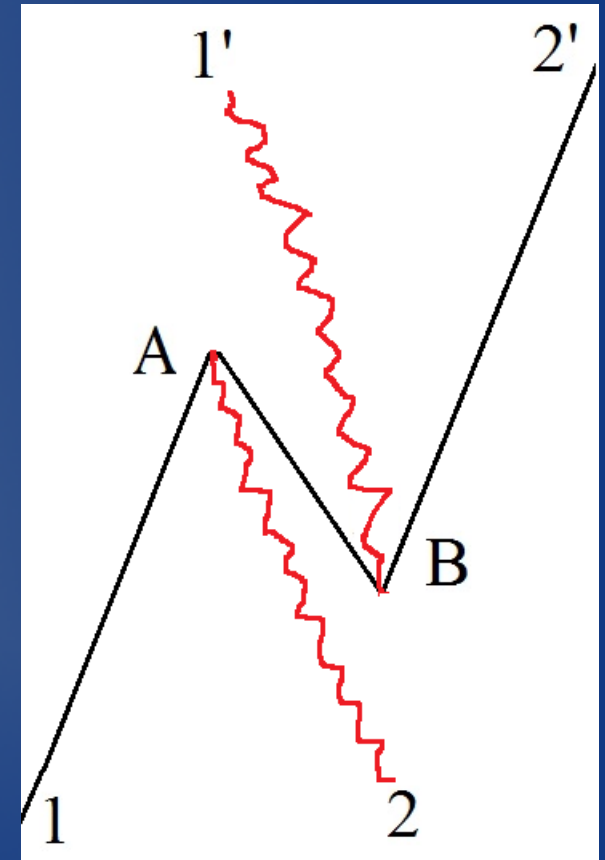
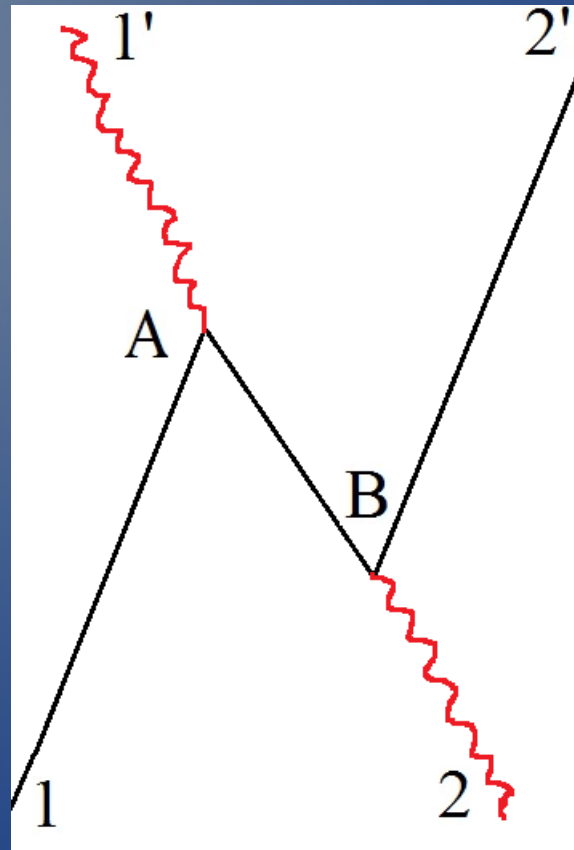
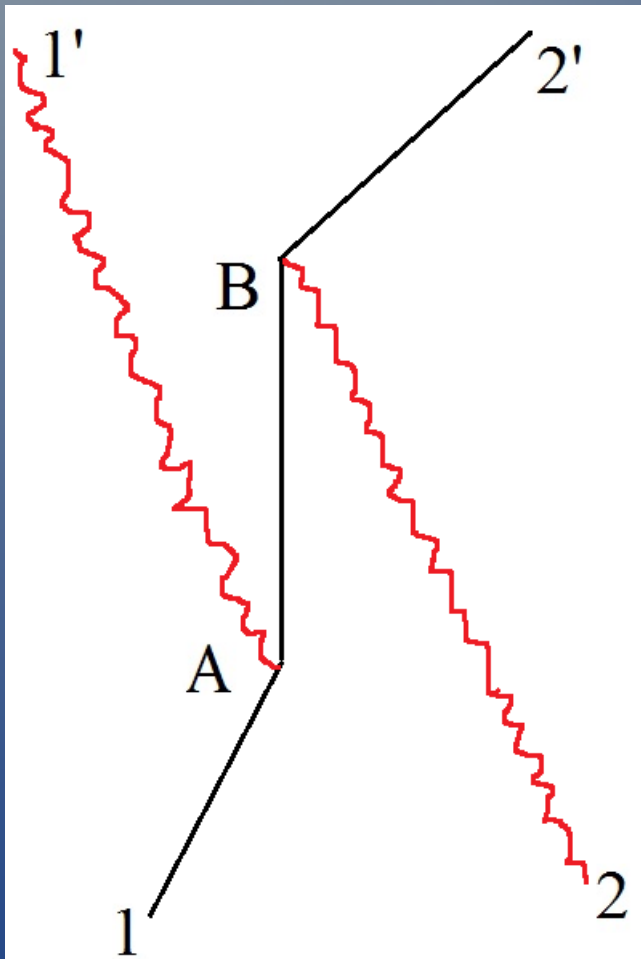
# Диаграммы Фейнмана

- Амплитуда — это произведение амплитуд всех ее частей

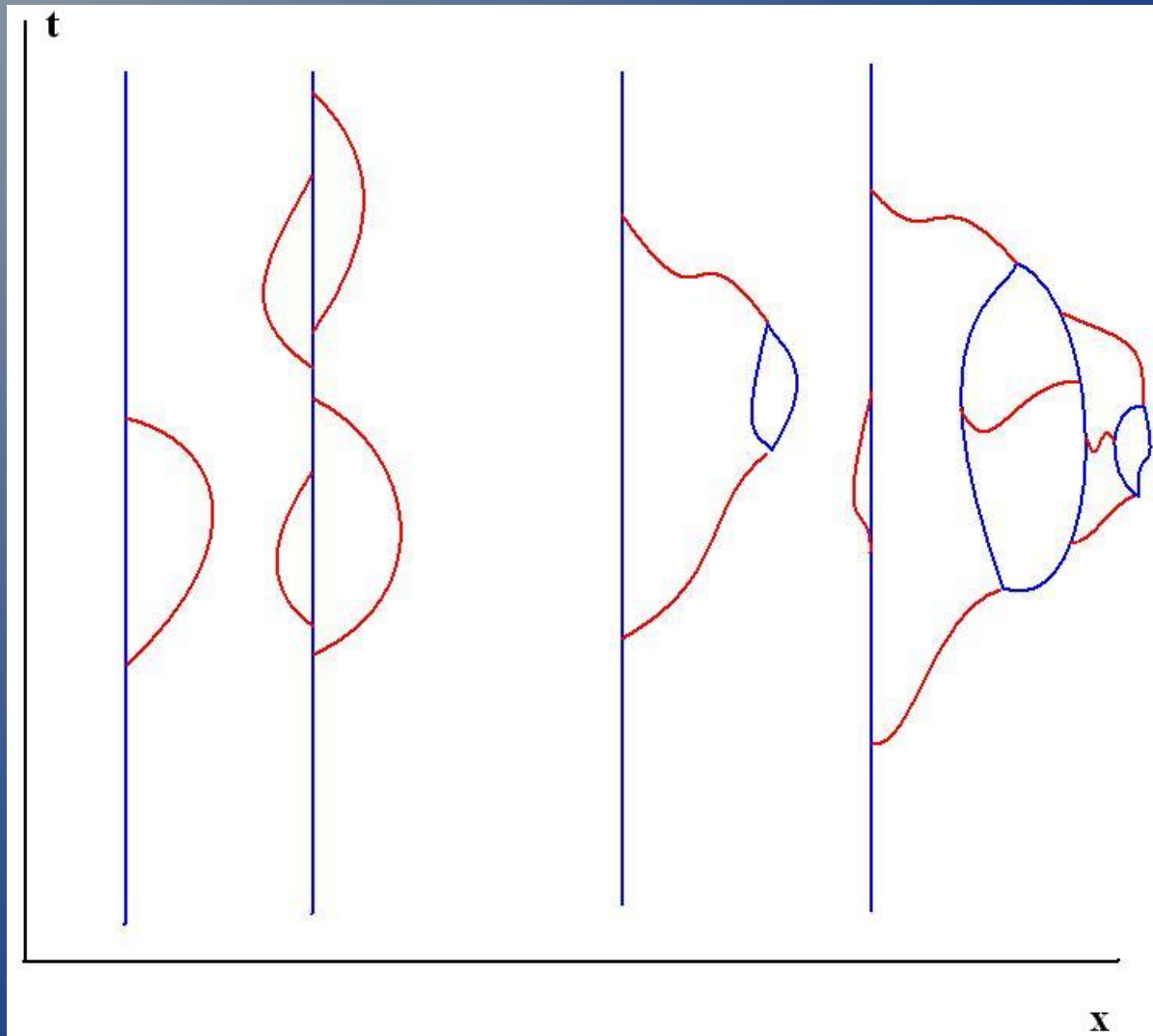


$$P(A \rightarrow B)E(1 \rightarrow A)E(A \rightarrow 1')E(2 \rightarrow B)E(B \rightarrow 2')$$

В диаграммах время может течь вспять, а энергия должна сохраняться только во всей диаграмме, но не в каждой ее части.

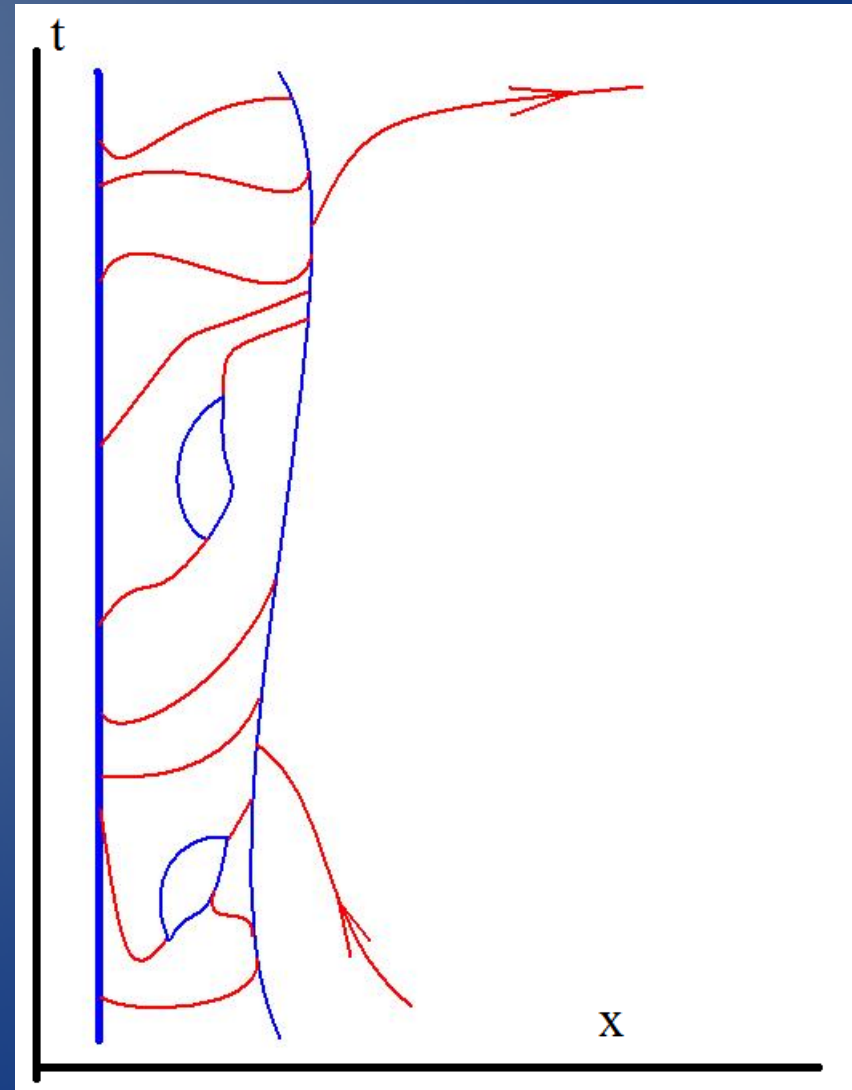


Реальный электрон – всегда "одет" в облако из виртуальных частиц



# Каждый шаг в "пути" сложной системы — фейнмановская диаграмма

- Рассеяние фотона атомом водорода

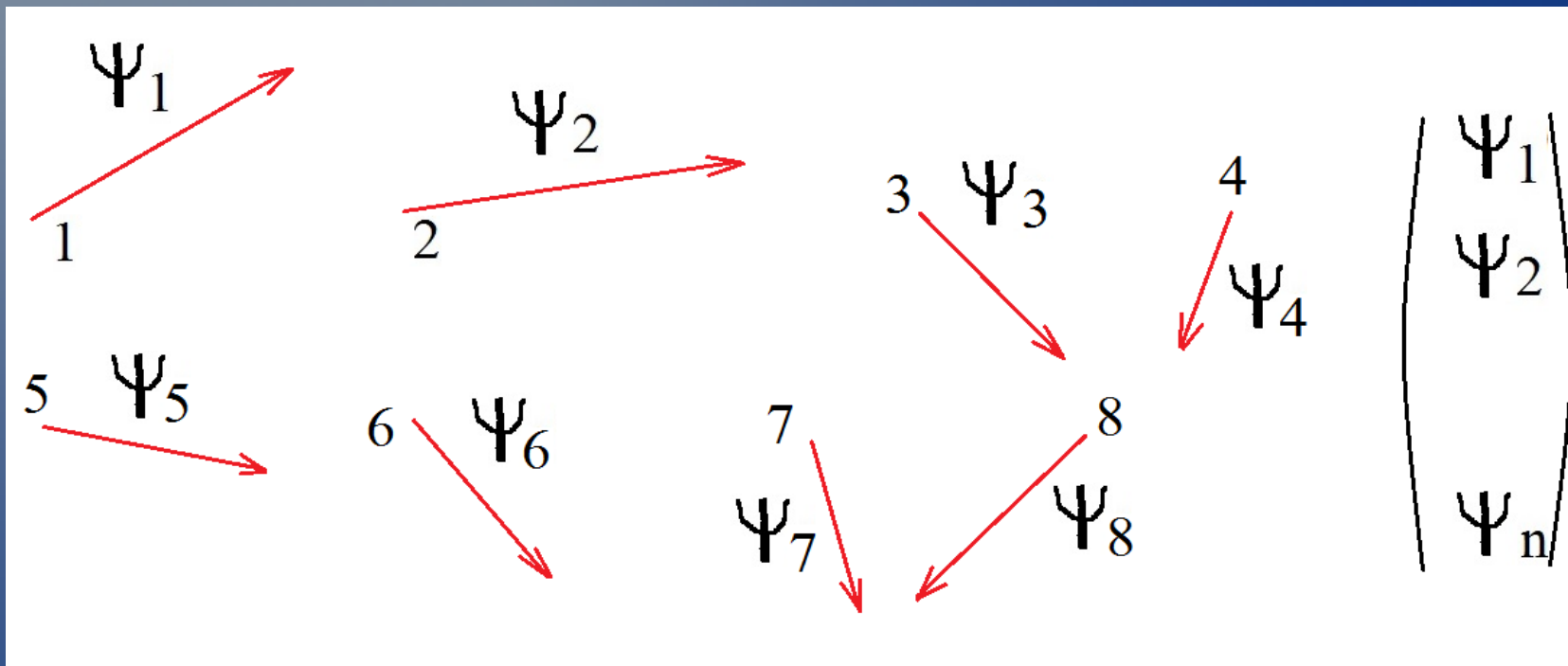




# Квантовая электродинамика способна дать ответ с точностью около десяти знаков после запятой

- Задаем значение зерна  $d$  пространственного разрешения.
- Подбираем массу и заряд  $v$  и  $j$  "голового" электрона, вычисляем вероятности процесса и сравниваем с экспериментом.
- Бете, Вайскопф (1949): при уменьшении  $d$  параметры  $v$  и  $j$  изменятся, но амплитуды — только уточнятся!
- Фейнман, Швингер, Томонага: вычисления фундаментальных процессов и характеристик элементарных частиц с помощью КЭД.

# Состояние роя как столбец амплитуд



# Великий закон Природы в матричной форме

$u_{ij}$  амплитуда перехода из  $j$  в  $i$

положение  
стрелки в клетке 1  
в момент  $t$

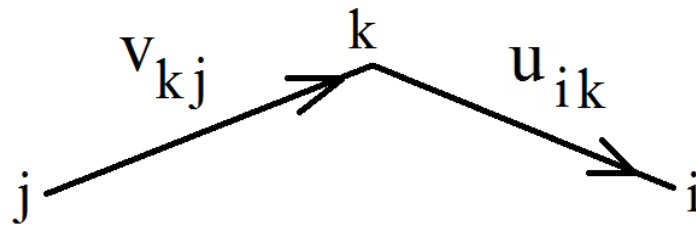
$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ & & \dots & \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_1(0) \\ \Psi_2(0) \\ \\ \Psi_n(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_1(t) \\ \Psi_2(t) \\ \\ \Psi_n(t) \end{pmatrix}$$

$$\Psi_1(t) = \Psi_1(0) u_{11} + \Psi_2(0) u_{12} + \dots + \Psi_n(0) u_{1n}$$

# Великий закон Природы в матричной форме

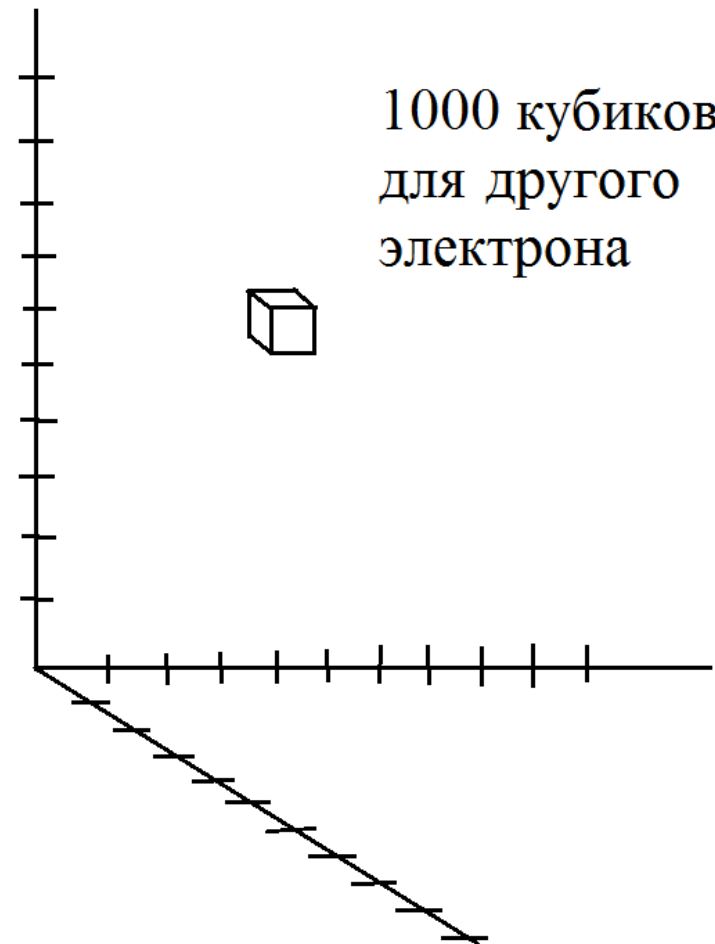
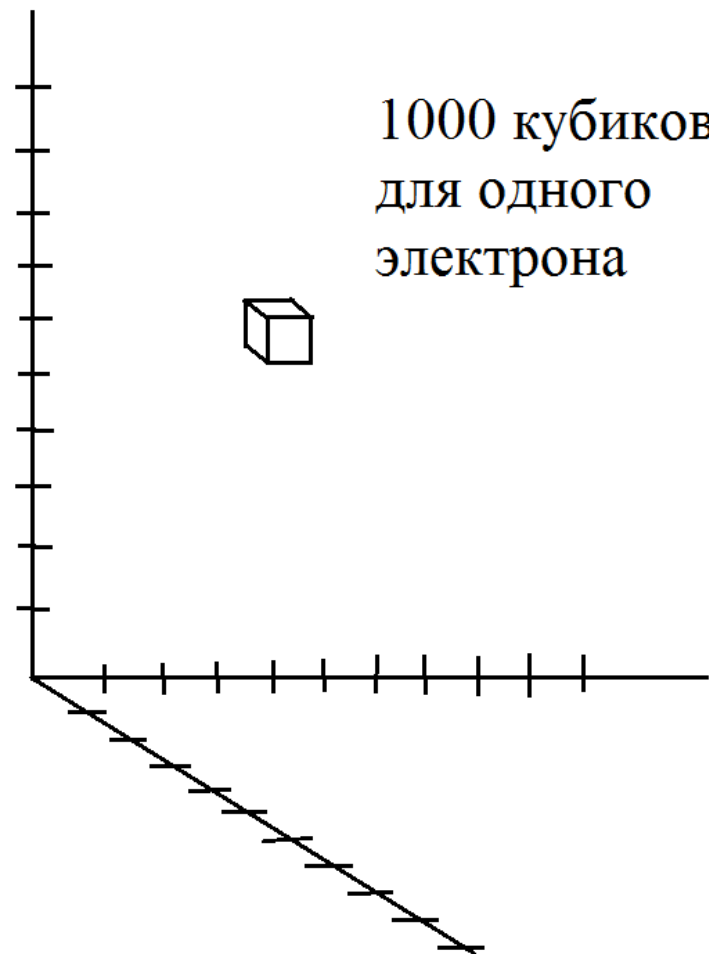
$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ & & \dots & \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ & & \dots & \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ & & \dots & \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{pmatrix}$$

$$w_{ij} = \sum_k u_{ik} v_{kj}$$



# Что будет, если частиц много?

- Размерность пространства состояний будет расти как экспонента от числа частиц



всего 1000 000  
состояний для  
пары электронов

# А может быть, обойдемся отдельными частицами?

- Тогда экспоненты не будет.
- Но не будет и главного квантового явления: запутанных состояний!
- Запутанность состояния  $\Psi$  двух частиц означает, что  $\Psi$  нельзя представить как произведение состояний первой и второй частиц:  $\Psi = \Psi_1 \Psi_2$ . Например, пусть каждая частица может находиться только в двух точках: 0 (состояние  $|0\rangle$ ) и 1 (состояние  $|1\rangle$ ).

Тогда состояния вида  $|00\rangle$  или вида  $|11\rangle$  или вида

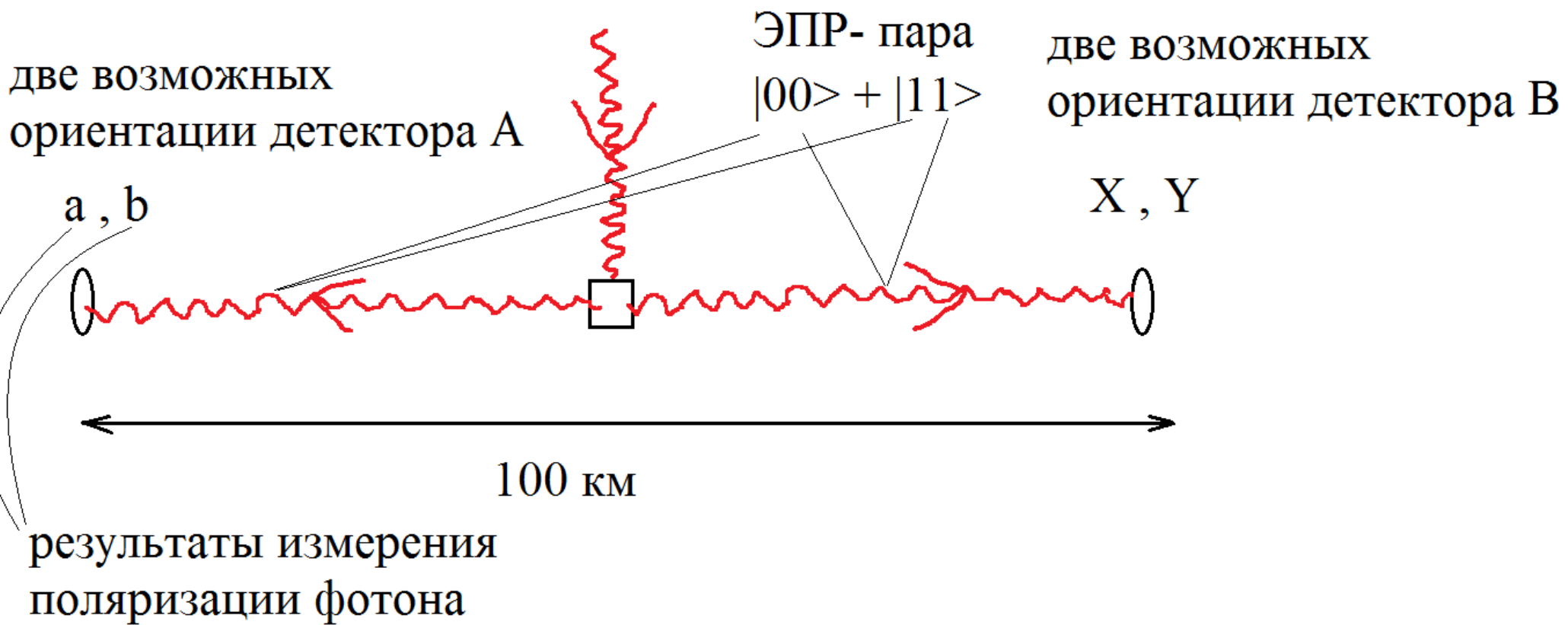
$(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)/2$  будут не запутанными, потому что они раскладываются в произведение одно-частичных (например, последнее есть  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ ).

- А состояние  $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$  - будет запутанным!

# Квантовая запутанность – особый физический феномен

- Его регистрируют в экспериментах
- Запутанность означает корреляцию в поведении нескольких частиц, зависящую от их окружения.
- Частицы, находящиеся за сотни километров друг от друга, могут быть в запутанном состоянии.
- Запутанность невозможно воспроизвести, снабжая частицы внутренней памятью.
- Запутанность означает наличие внутренней связи между удаленными объектами, которая обладает практически мгновенным действием. Ее невозможно воспроизвести в рамках классической физики.
- Запутанность означает нелокальность мира.
- Мы не можем использовать запутанность для передачи задуманной нами информации со сверхсветовой скоростью. Природа удивительным образом согласована!

# Квантовая нелокальность





# Регистрация нелокальности

- Среднее значение величины

$aX + bX + aY - bY$  не может быть больше 2 (неравенство Белла), потому что эта величина есть

$X(a+b) + Y(a-b)$  и одна из скобок  $=0$

$(X, Y, a \text{ и } b = \pm 1)$ .

- Ее измерение дает  $2\sqrt{2}$  в точном соответствии с квантовым расчетом!

- Вывод: величина в действительности есть

$$aX + bX + a'Y - b'Y$$

детектор А (или фотон ?) как-то "узнает" об ориентации детектора В!

- Это "узнавание" происходит мгновенно, а не распространяется со скоростью света, как фотон!

# Recent result

- Entanglement at room temperature



*Science* 2 December 2011:  
Vol. 334 no. 6060 pp. 1253-1256  
DOI: 10.1126/science.1211914

[< Prev](#) | [Table of Contents](#) | [Next >](#)

 [Read Full Text to Comment \(0\)](#)

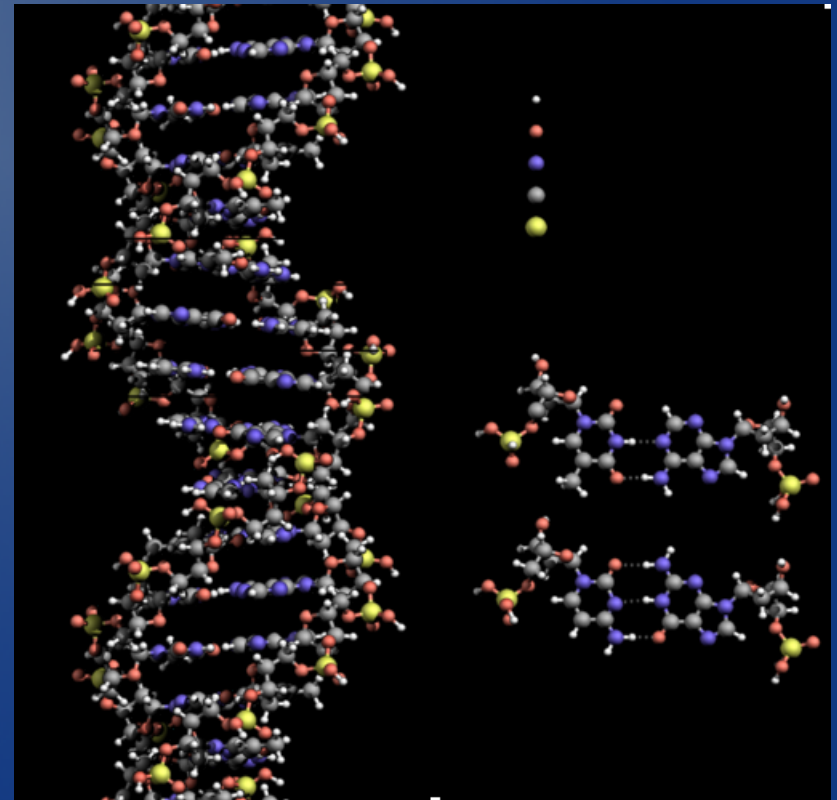
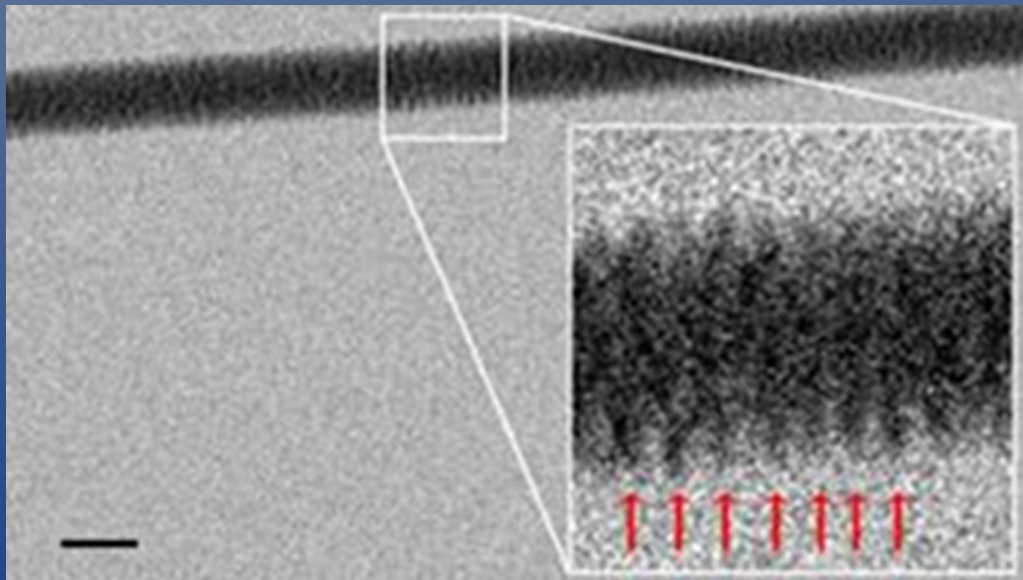
REPORT

## Entangling Macroscopic Diamonds at Room Temperature

K. C. Lee<sup>1,\*</sup>, M. R. Sprague<sup>1,\*</sup>, B. J. Sussman<sup>2</sup>, J. Nunn<sup>1</sup>, N. K. Langford<sup>1</sup>, X.-M. Jin<sup>1,3</sup>, T. Champion<sup>1</sup>, P. Michelberger<sup>1</sup>,  
K. F. Reim<sup>1</sup>, D. England<sup>1</sup>, D. Jaksch<sup>1,3</sup>, I. A. Walmsley<sup>1,†</sup>

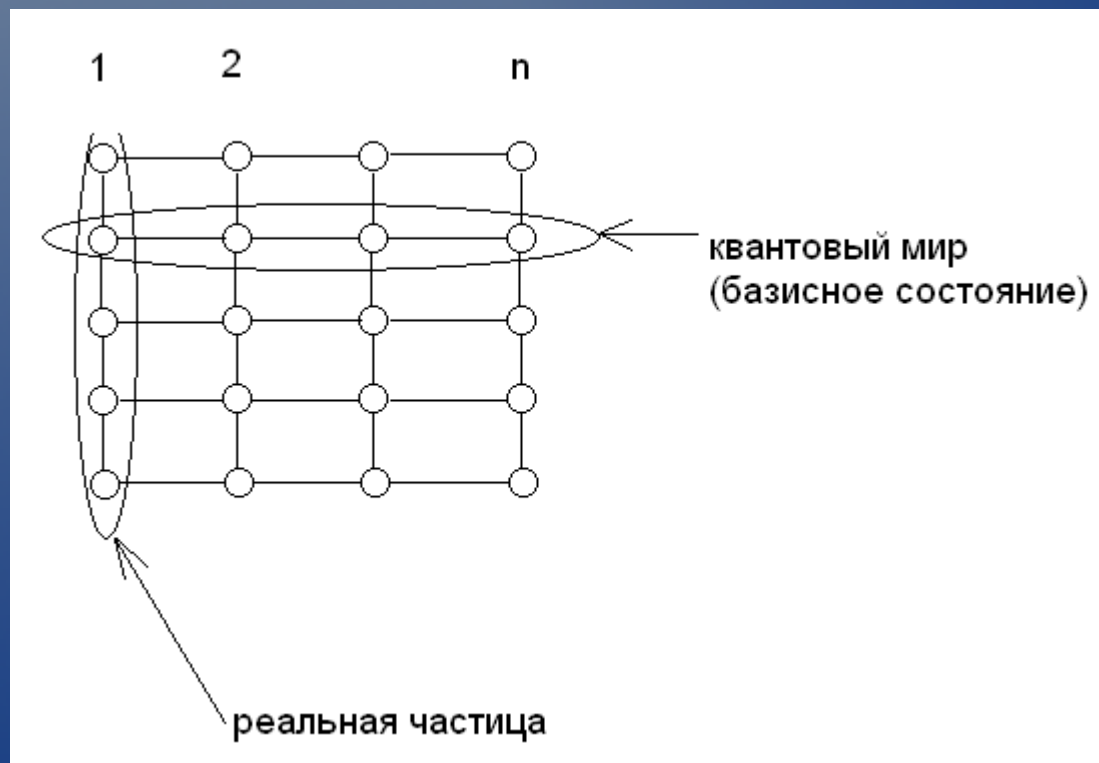
# Гильбертово пространство квантовых состояний – физическая реальность!

- Никакой классический компьютер не сможет оперировать с такими состояниями.
- Экспоненциальный рост требуемых вычислительных ресурсов – непреодолимое препятствие для классических вычислений.



# Великий закон Природы для сложных систем: как его применять?

- Реальная частица = система многих частиц
- Рой экземпляров = всевозможные пространственные расположения системы



# Принцип интерференции: как его применять практически?

- Критически важно изолировать систему от окружения.
- Но как тогда ей управлять?
- Контакт с окружением не должен приводить к включению окружения в рассматриваемую систему!

# В сложной системе интерференция миров невероятна



Упорядоченность системы ведет к  
повышению вероятности встречи  
миров







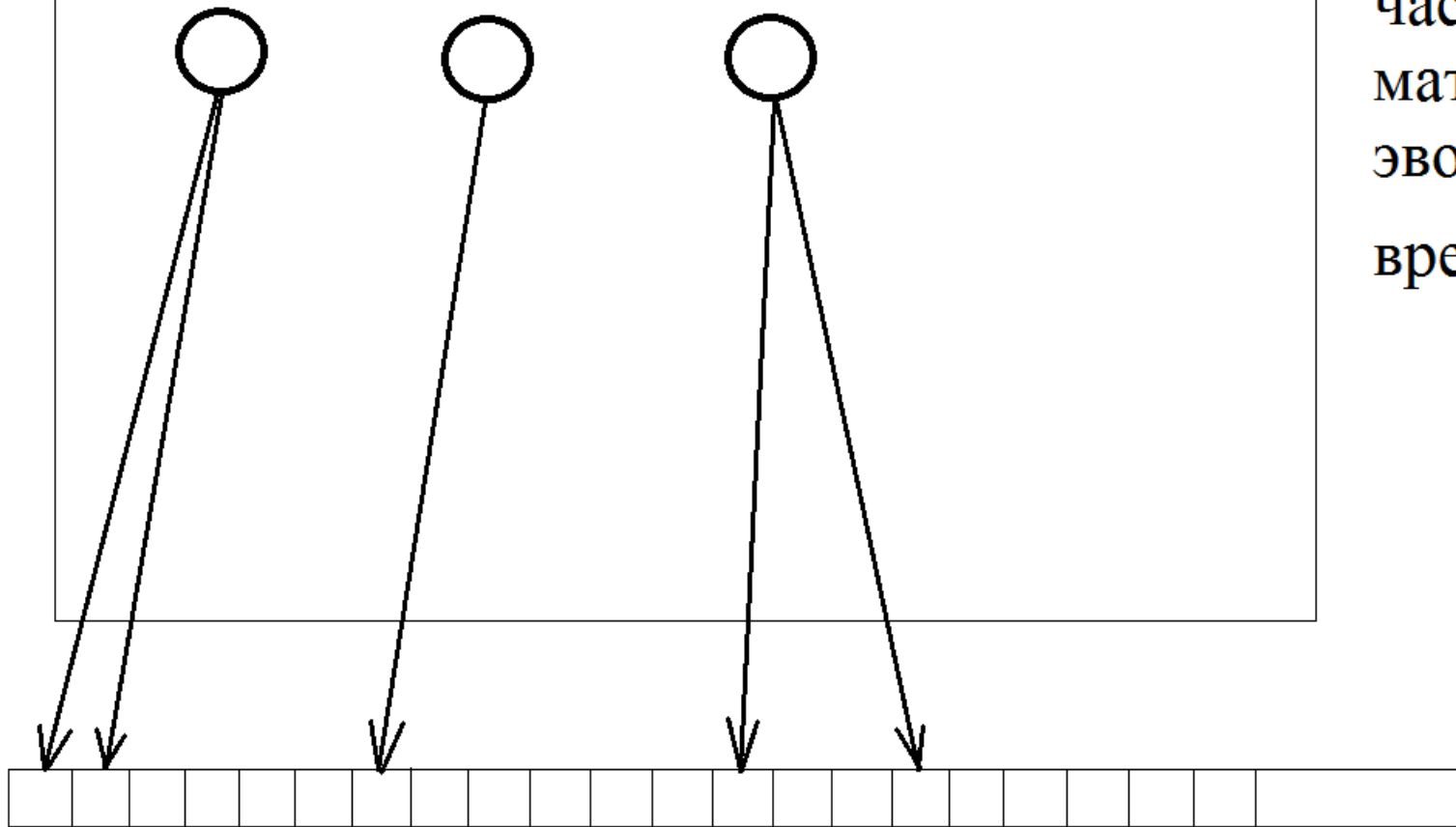
# Надо создать квантовый компьютер!

- Запутанные состояния реальны, их нельзя игнорировать.
- Надо моделировать полную  $\Psi$  – функцию всей системы  $n$  частиц.
- Для этого не хватит памяти никакого суперкомпьютера.
- Заставим работать саму квантовую механику!
- Создадим квантовый компьютер: квантовое устройство под классическим управлением (Р.Фейнман)

# Схема квантового компьютера

управляющие классические регистры

Классическая часть (задает матрицу эволюции во времени  $U_{ij}$ )

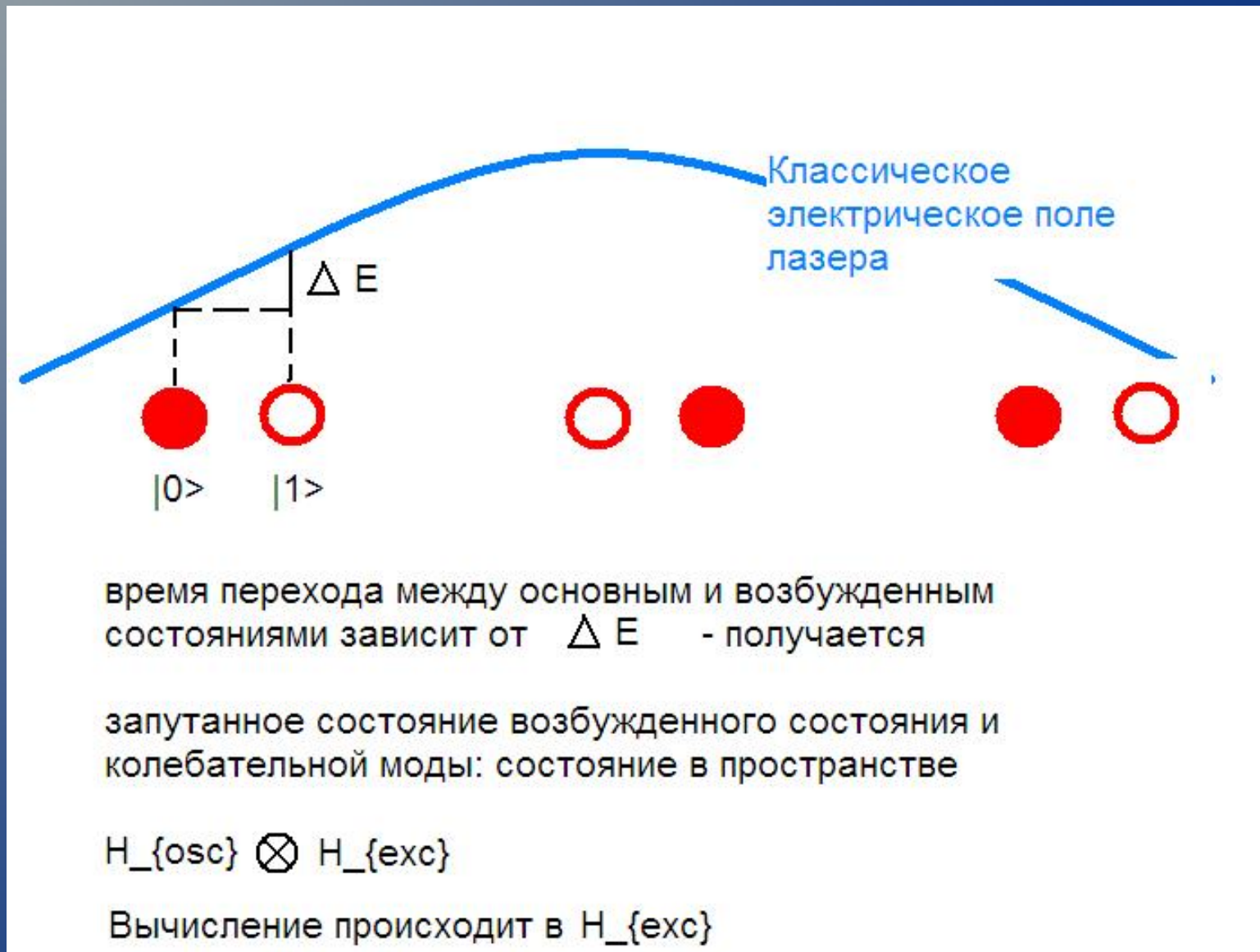


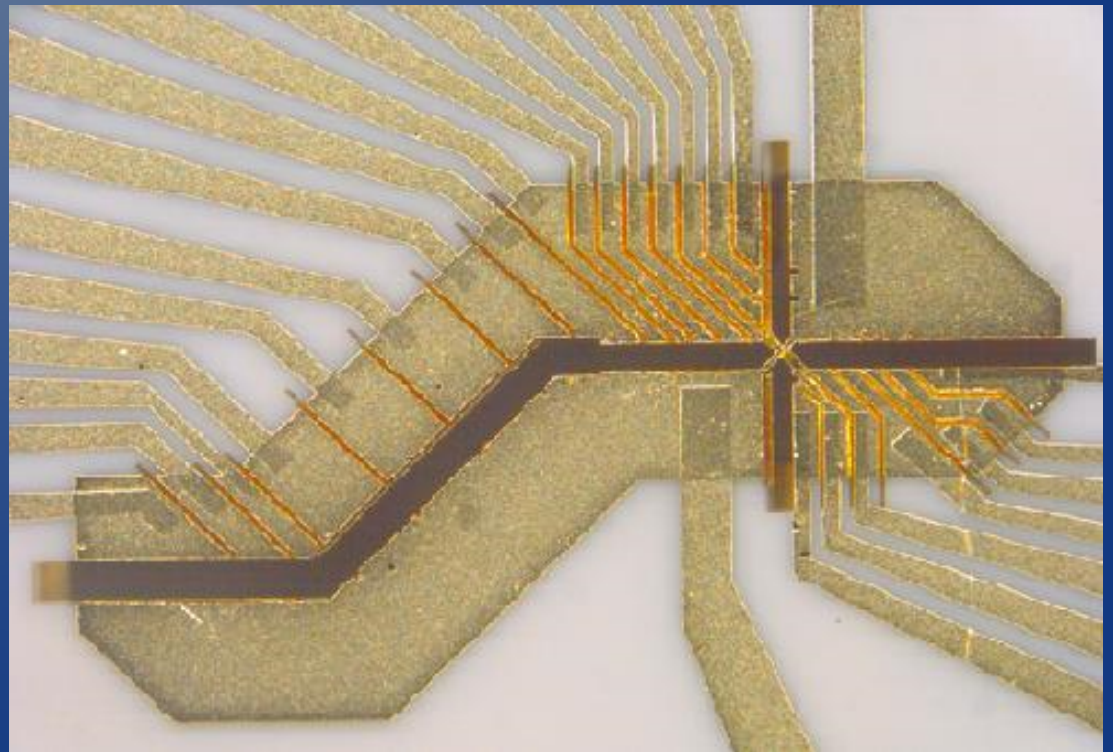
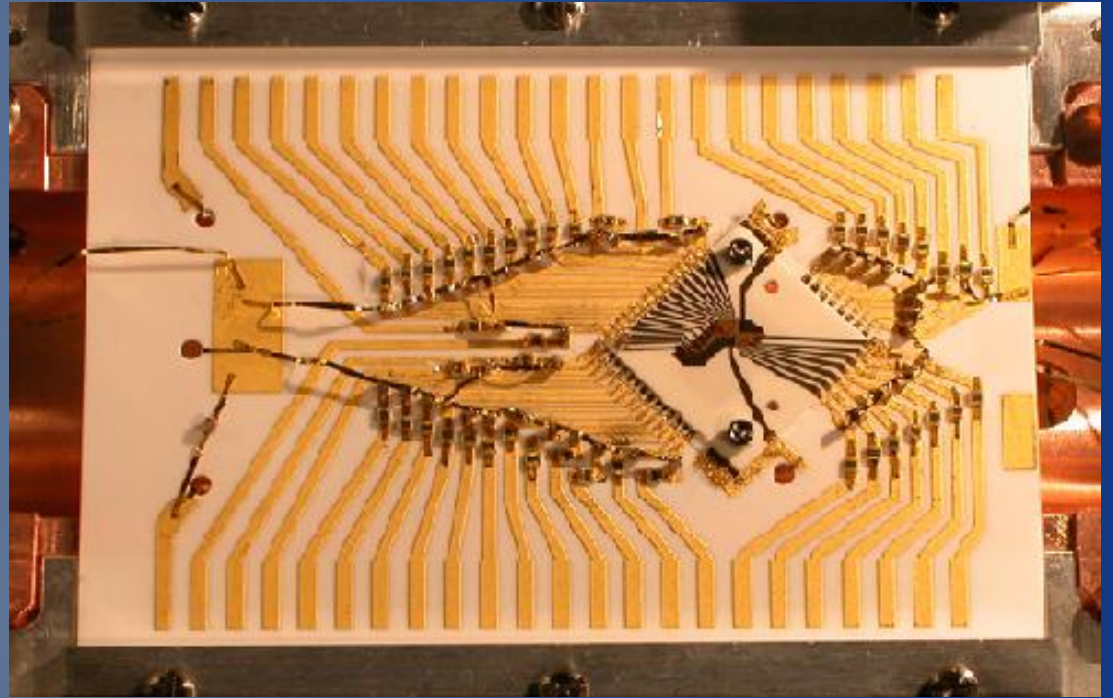
Квантовая часть - рабочее состояние  $\Psi$

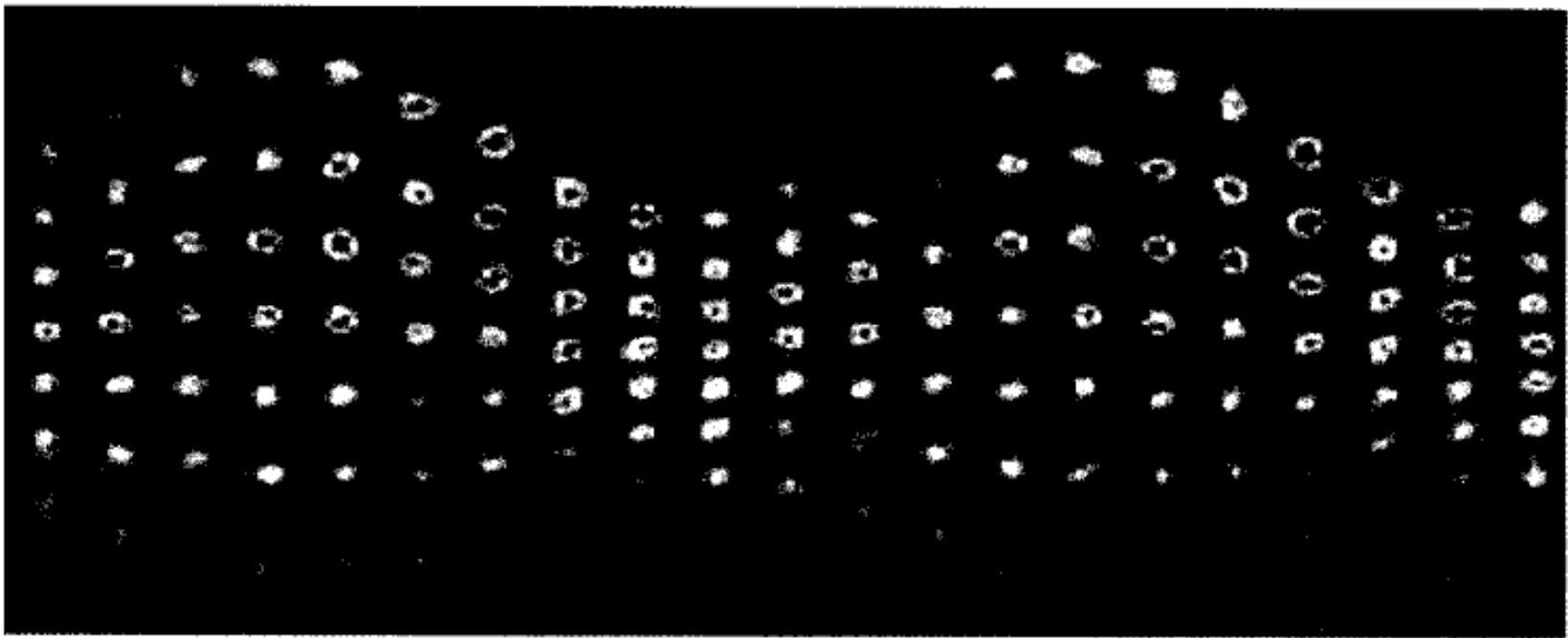
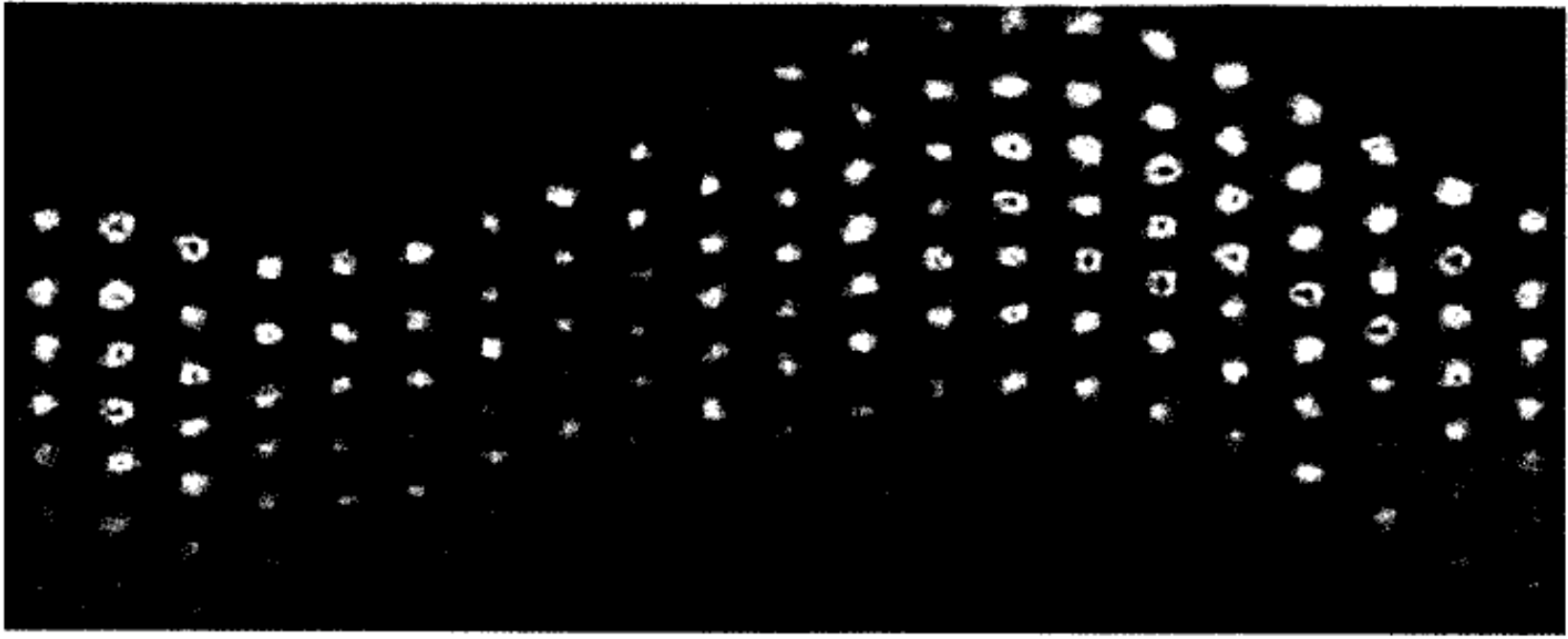
# Технологии квантового компьютера

- Ионы в ловушке Пауля
- Сверхпроводящие джозефсоновские переходы
- ЯМР в жидкости и твердом теле
- Электронные спины примесных атомов в полупроводниках

# • Квантовый компьютер на ионах в ловушке Пауля







# А может, все же обойдемся отдельными частицами?

- Почему нельзя просто хранить в памяти компьютера состояние всех атомов живого существа, ведь суперкомпьютеры скоро позволят это сделать, тем более, что хранить в памяти надо далеко не все. *Escherichia Coli* состоит из не более чем нескольких триллионов ( $10^{12}$ ) а человек из  $10^{29}$  атомов?
- А запутанные состояния – тоже хранить отдельно, как редкие феномены?
- И тогда – мы обречем полную власть над живым! Вместе со всей его свободой воли!
- Слишком просто, чтобы быть правдой...

# Система n частиц – это не корзина с фруктами!

- Состояние коллектива не есть просто набор состояний его членов, потому что есть квантовые запутанные состояния.

$|00\rangle + |11\rangle$  или  $|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle$  или другие, более сложные.

- Если учитывать все квантовые состояния, не хватит никакого суперкомпьютера.
- Мы претендуем на описание живого?

Может ли оно находиться в суперпозиции?



# Квантовое состояние удивительно напоминает живое существо

- Не существует способа клонирования произвольного квантового состояния  $\Psi$
- Есть схема, позволяющая передавать на расстояние состояние  $\Psi$ , не узнавая его. Это — телепортация.
- Чтобы у Алисы возникло состояние  $\Psi$ , оно должно быть уничтожено Бобом в результате измерения.

$$\Psi = a|0\rangle + b|1\rangle$$

Боб

это - не провод    это - ЭПР-пара  $|00\rangle + |11\rangle$

Алиса

$\Psi$

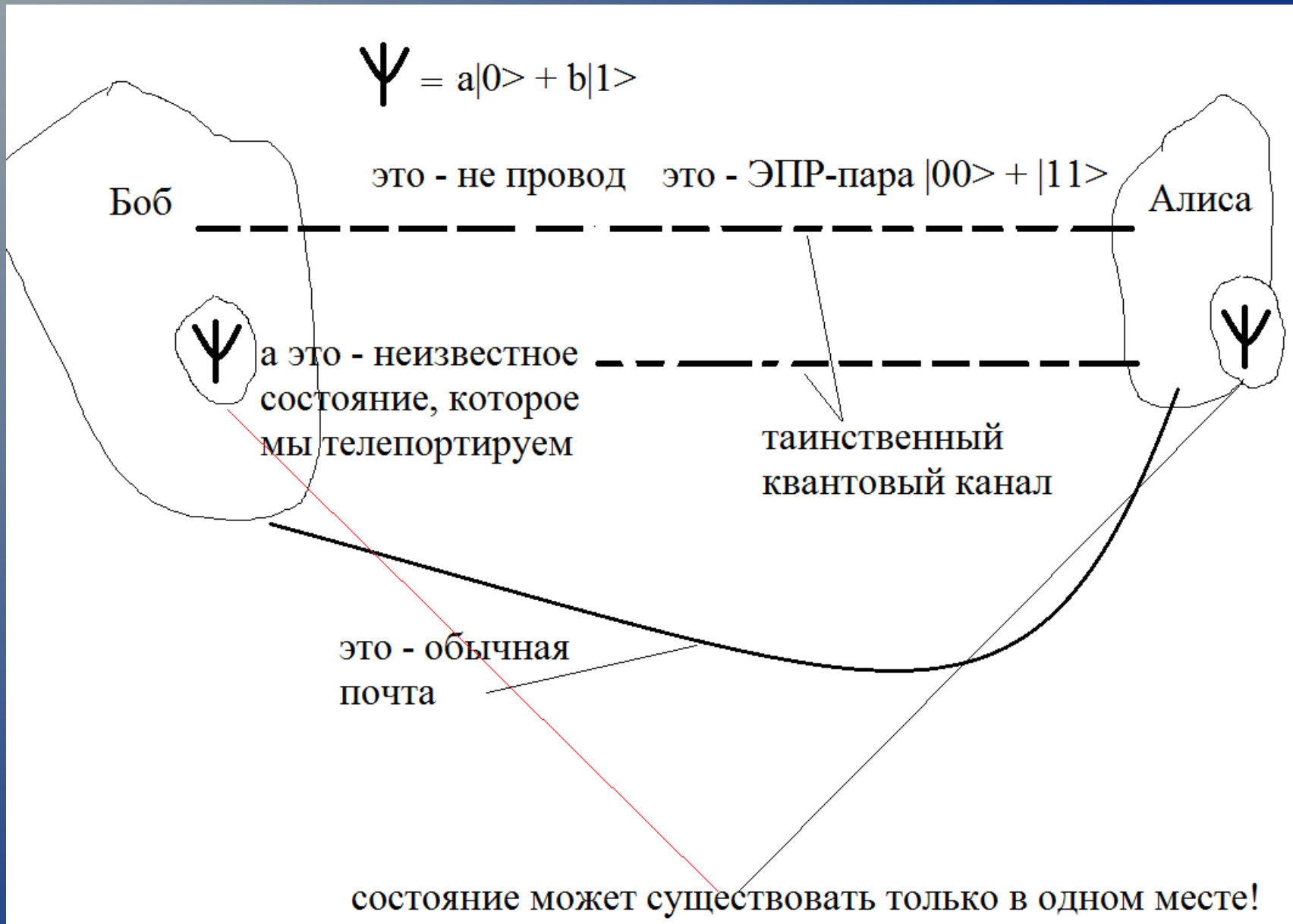
а это - неизвестное состояние, которое мы телепортируем

таинственный квантовый канал

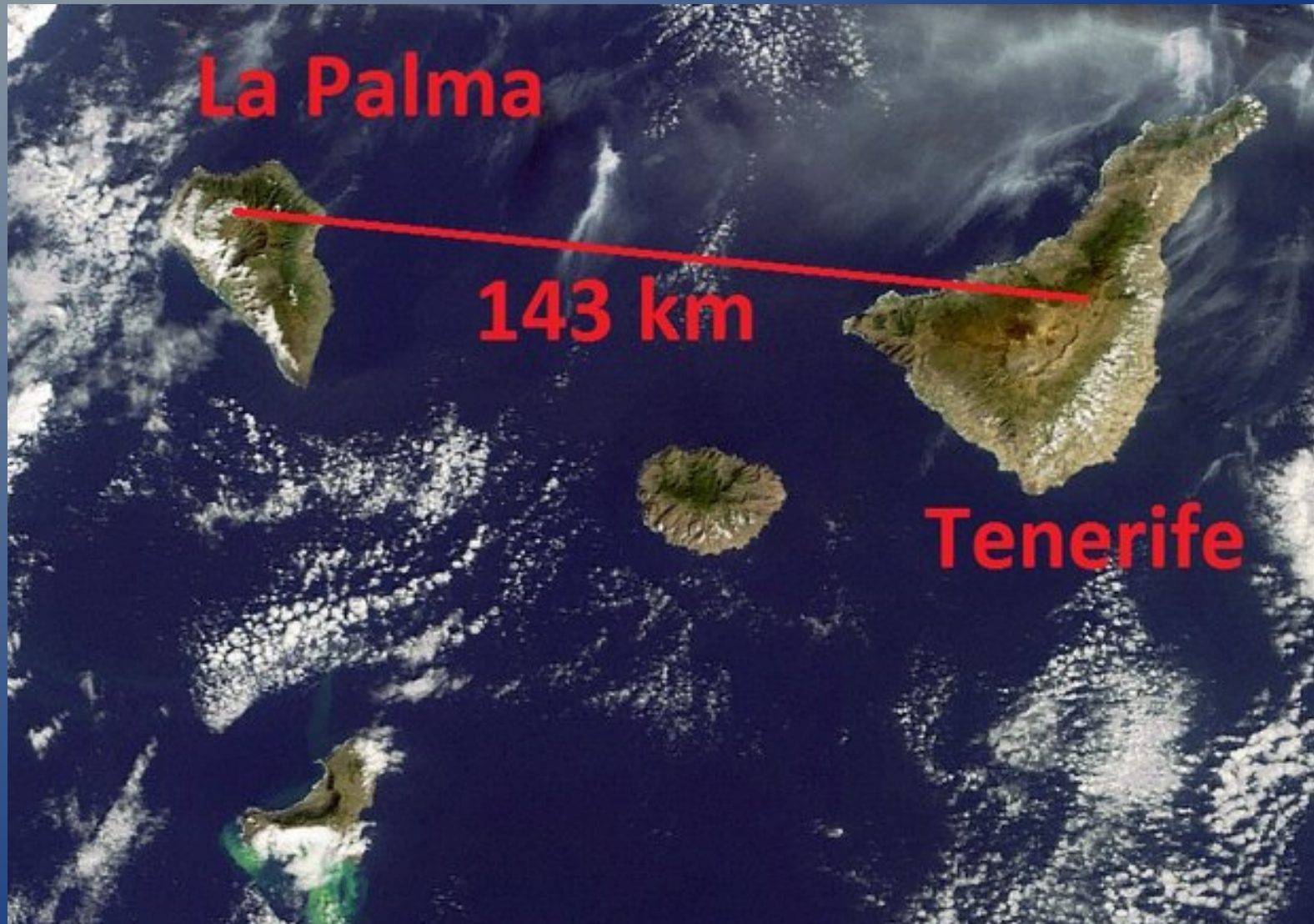
$\Psi$

это - обычная почта

состояние может существовать только в одном месте!



# Телепортация между островами в Атлантике



# Сложные системы требуют иной математики

- Мы не сможем набрать статистики для квантовых состояний многих тел в общем случае. Как ставить эксперименты?
- Из того, что сейчас известно, лучше всего подходят алгоритмы, но не формулы
- Алгоритмизм предполагает индивидуальное написание кода программы; могу ли я считать чужой код своим, так же, как математическую формулу?

# Что мы умеем моделировать

- Простейшие химические реакции
- Химические реакции посложнее  
– с небольшой точностью

# Квантовый компьютер – неизбежность!

- Нам не удастся получить власть над Природой, строя классические алгоритмические модели, потому что возможны процессы, не укладывающиеся в них.
- Эти процессы – быстрые квантовые алгоритмы.
- Их уникальность доказана только для моделей с "черным ящиком"; в абсолютной модели вычислений все сводится к нерешенным проблемам, типа  $P = NP$  (?).

Квантовый компьютер работает в голове  
каждого из нас, надо только понять, как!  
(К.А.Валиев)



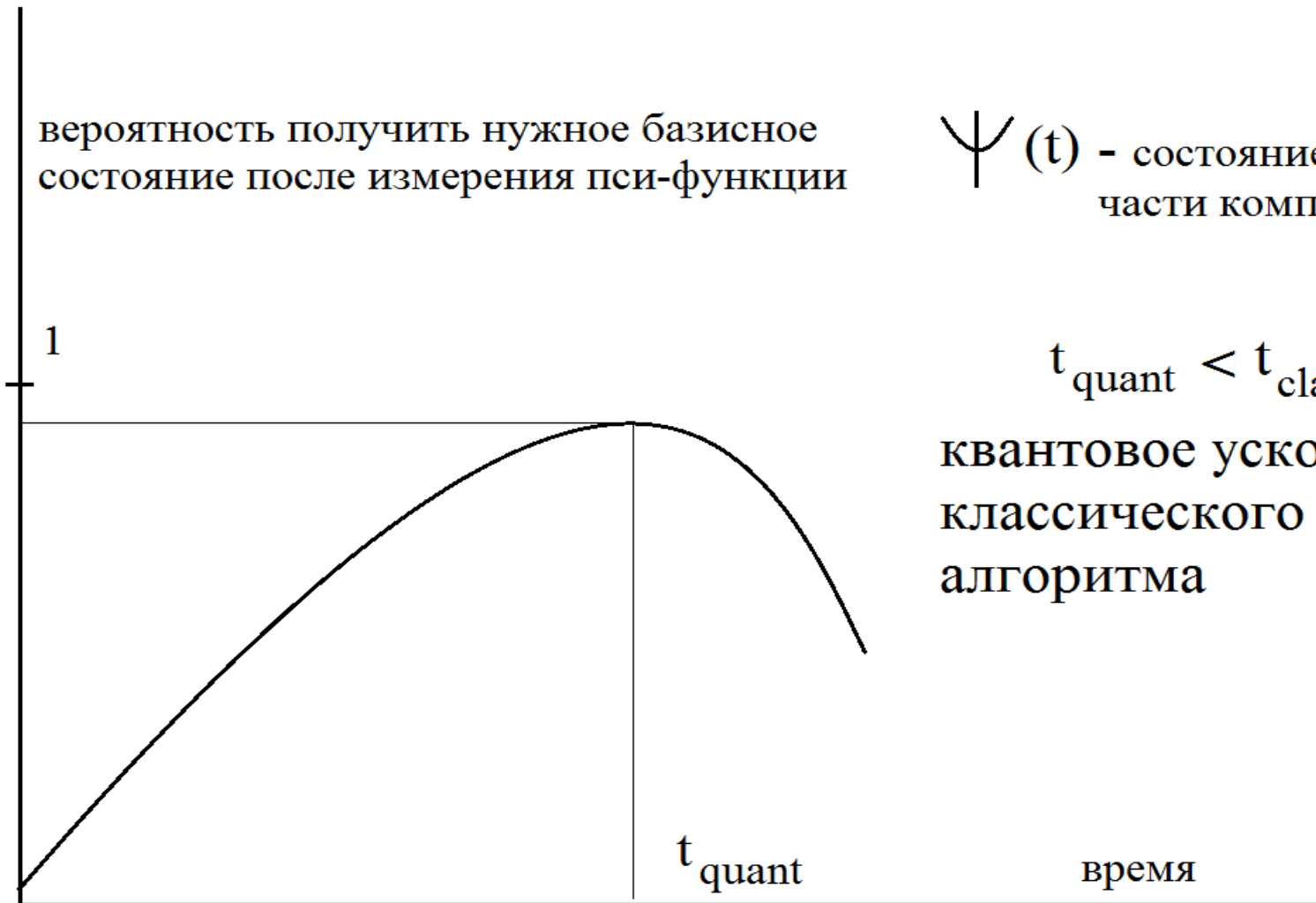
# Что такое быстрый квантовый алгоритм

вероятность получить нужное базисное состояние после измерения пси-функции

$\Psi(t)$  - состояние квантовой части компьютера

$$t_{\text{quant}} < t_{\text{class}}$$

квантовое ускорение  
классического  
алгоритма





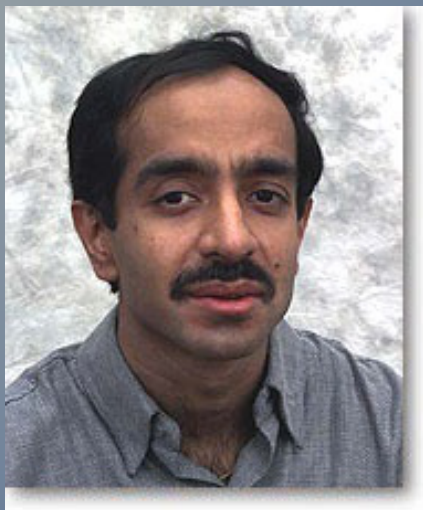
# Быстрые квантовые алгоритмы

- Разложение чисел на простые множители (П.Шор, 1994)
- Задача перебора (Л.Гровер, 1996)
- Моделирование эволюции состояния квантовой системы (К.Залка, С.Визнер, 1999)

П. Шор



# Алгоритм Гровера



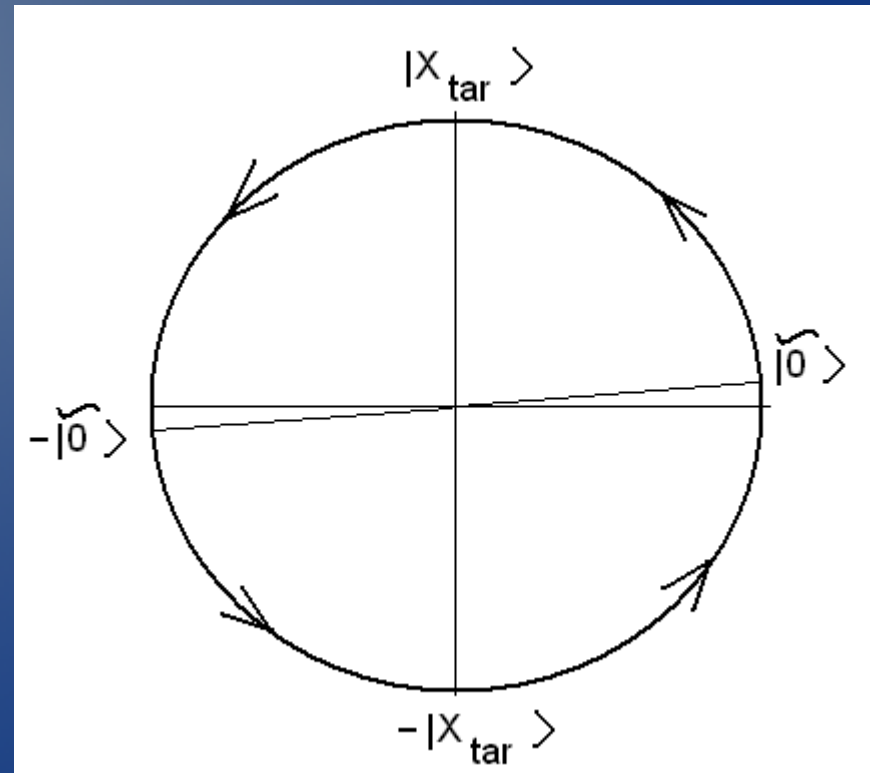
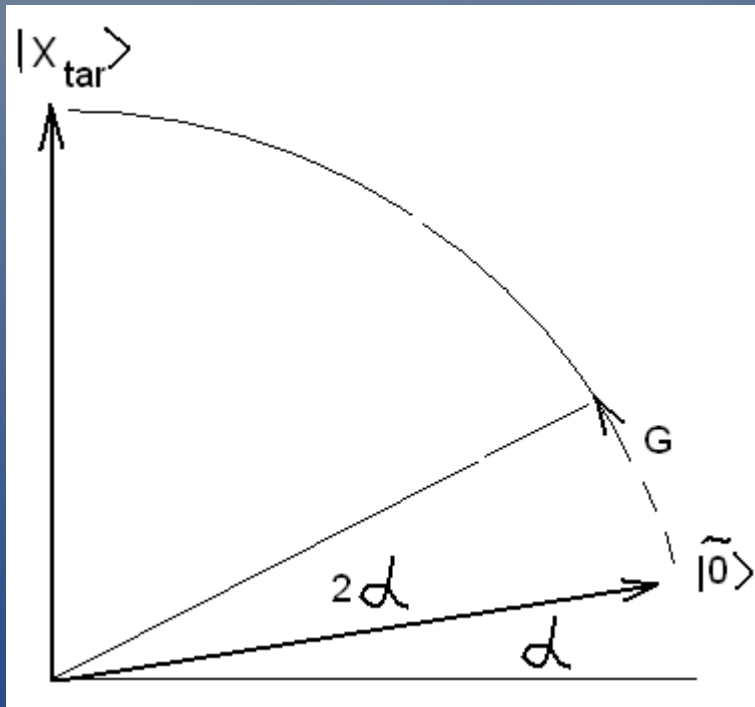
Алгоритм GSA (Grover search algorithm) предназначен для поиска корней уравнения  $f(x)=1$  булевской функции  $f$  от  $n$  переменных. Он имеет сложность

Алгоритм  $\frac{\pi}{4} 2^{n/2}$  - корень из классического времени

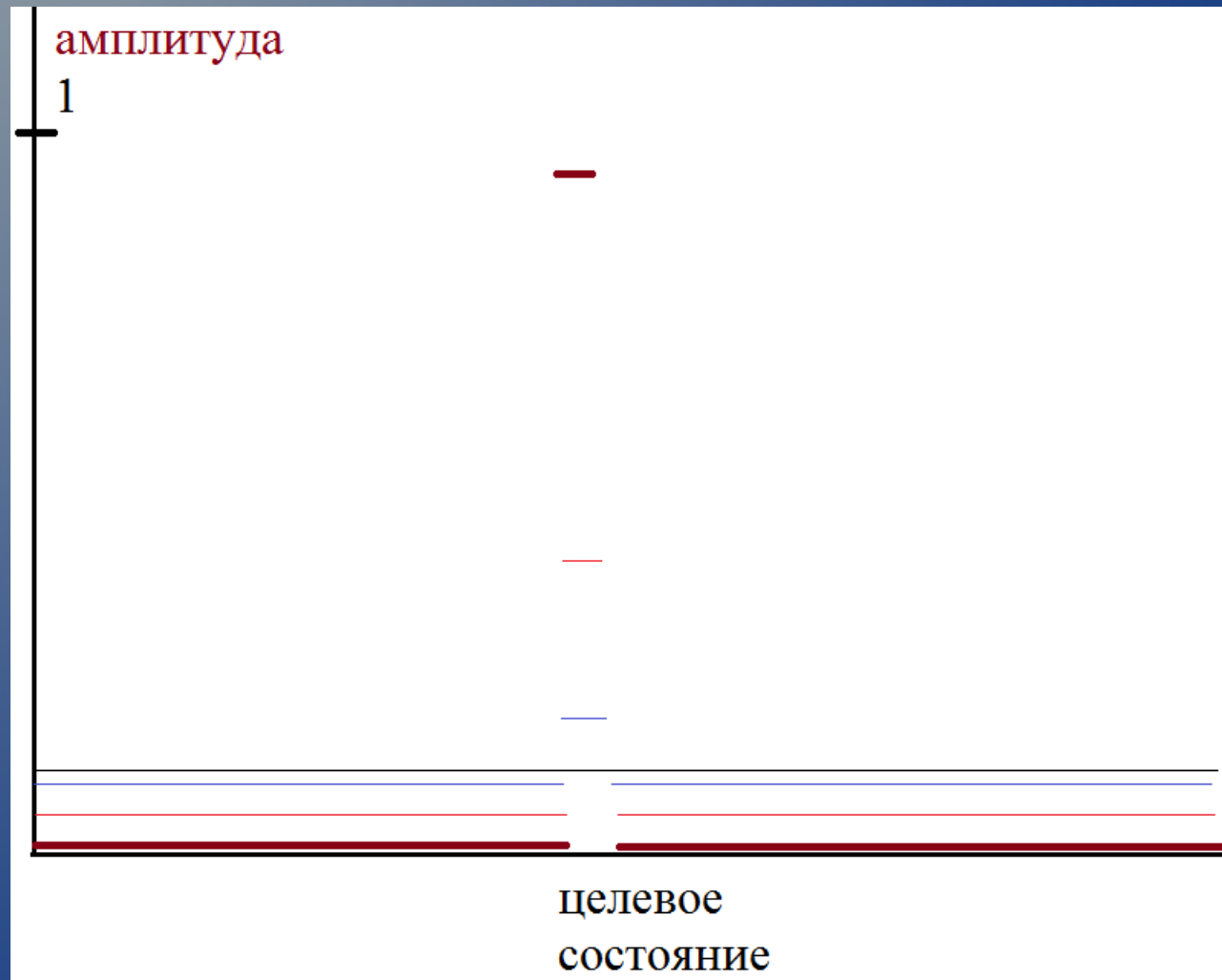
Алгоритм Функция  $f$  может быть задана в виде схемы классических вентилях.

# GSA (схема)

- $|\tilde{0}\rangle$  - состояние, у которого амплитуда распределена равномерно по всем базисным состояниям



# Рост амплитуды целевого состояния за счет всех других



# Быстрые квантовые алгоритмы

- Разложение чисел на простые множители (П.Шор, 1994)
- Задача перебора (Л.Гровер, 1996)
- Моделирование эволюции состояния квантовой системы (К.Залка, С.Визнер, 1999)

# Квантовый алгоритм – произведение искусства!

- Большинство классических алгоритмов не допускает квантового ускорения, большего чем гроверовское.
- Большинство коротких классических алгоритмов вообще не допускает квантового ускорения!
- Алгоритм Гровера нельзя улучшить ни для какого, хоть сколько-нибудь "весомого" класса "черных ящиков"  $f$ . Константу нельзя улучшить более чем на 3%.

# Мистика GSA

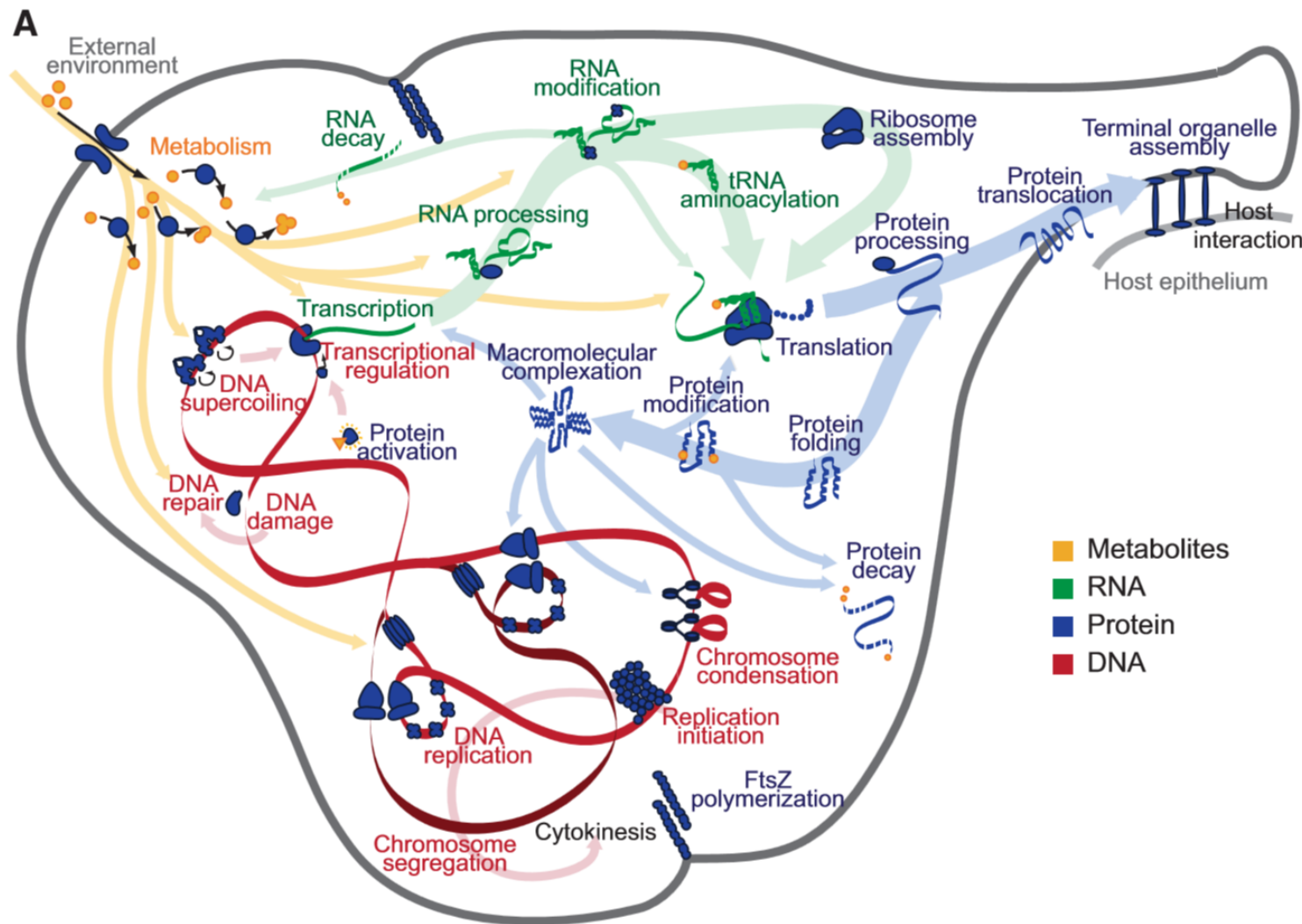
- Преимущество GSA в отсутствии черного ящика не доказано! Дело сводится к нерешенной проблеме  $P=NP$  (?)
- Физика вторгается в область "чистой" математики?
- Квантовый компьютер способен моделировать реальность — на квантовом уровне.



# Декогерентность

- Спонтанное разрушение сложных квантовых состояний для многих частиц – главное препятствие на пути создания КК, не зависимо от технологии.
- Квантовые коды коррекции начинают работать только с 1000 кубитов или больше.
- Декогерентность связана с коллапсом волновой функции
- А враг ли декогерентность?

# Computer classical models of Life do not work as its prototype



**Figure 1. *M. genitalium* Whole-Integrates 28 Submodels of Diverse Processes**

(A) Diagram schematically depicts models as colored words—grouped as metabolic (orange), RNA (green), protein (blue), and DNA (red)—in the context of a *M. genitalium* cell with its characteristic pear-like shape. Submodels are connected by common metabolites, RNA, proteins, and chromosomes, which are depicted by green, blue, and red arrows, respectively. (B) The model integrates cellular function models through 16 cell variables. First, variables are randomly initialized to the beginning of the cell cycle (left gray arrow). Next, for each time step (dark black arrows), the submodels update their current values of the cellular variables based on their contributions to the temporal evolution of the cell variables, and update the values of the cell variables. This is repeated thousands of times during the course of each simulation. The cell functions and variables are grouped into physiologic categories: DNA (red), Protein (blue), metabolite (orange), and host interaction (black). Colored lines between the v

# Do we understand the Life?

- Enormous complexity of living matter:

Genetically scaled computer model of living cell (GEM), by [1] illustrate the modern level in computer modelling of living; though its capabilities are still very far from predictive power

C:\Users\Юрий\Desktop\Documents\biology\mmc5.mp4

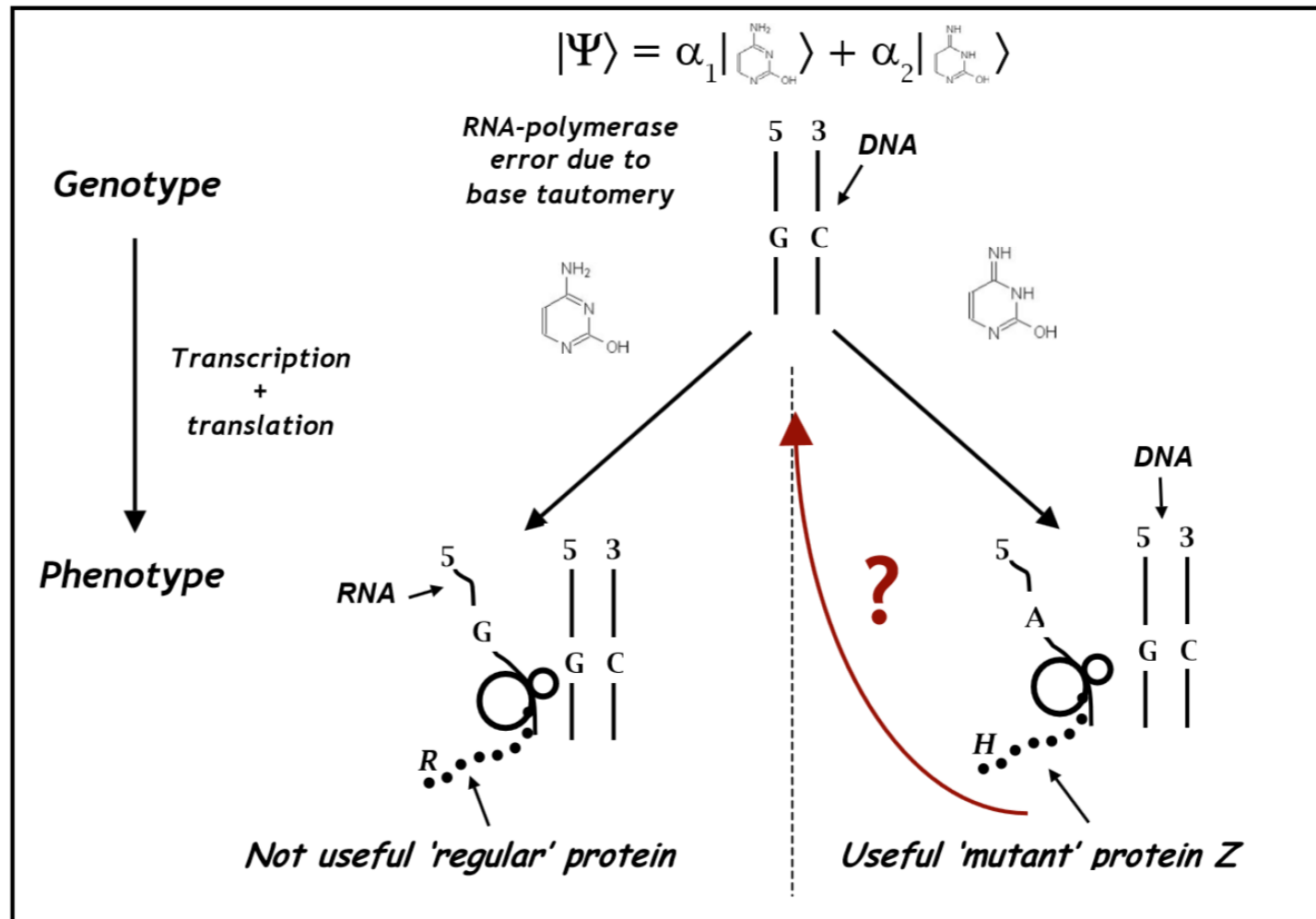
*[1] J.Förster et al, Genome-Scale Reconstruction of the Saccharomyces cerevisiae Metabolic Network, Genome Res. Feb 1, 2003; 13(2): 244–253.*

# Do we understand the quantum computer?



What I cannot create, I do not understand.  
(Richard Feynman)

# How this superposition can survive?



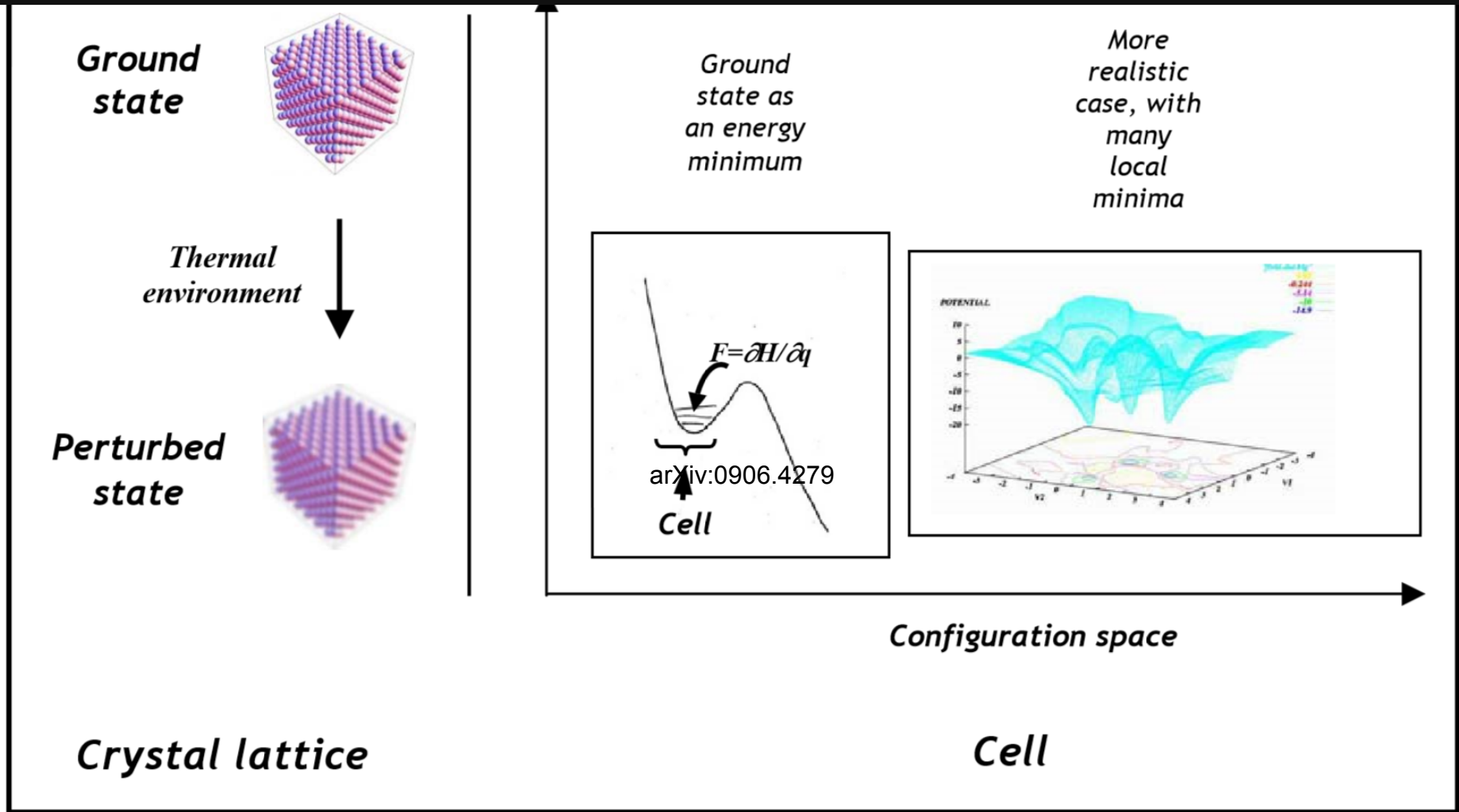
41. Central Dogma implies physical irreversibility

Our dreams, however, might not be all in vain. Let's take another look at the 'Central Dogma of Molecular

- Vasily Ogryzko, *Quantum information processing at the cellular level. Euclidean approach* arXiv:0906.4279

# Life as the metastable state

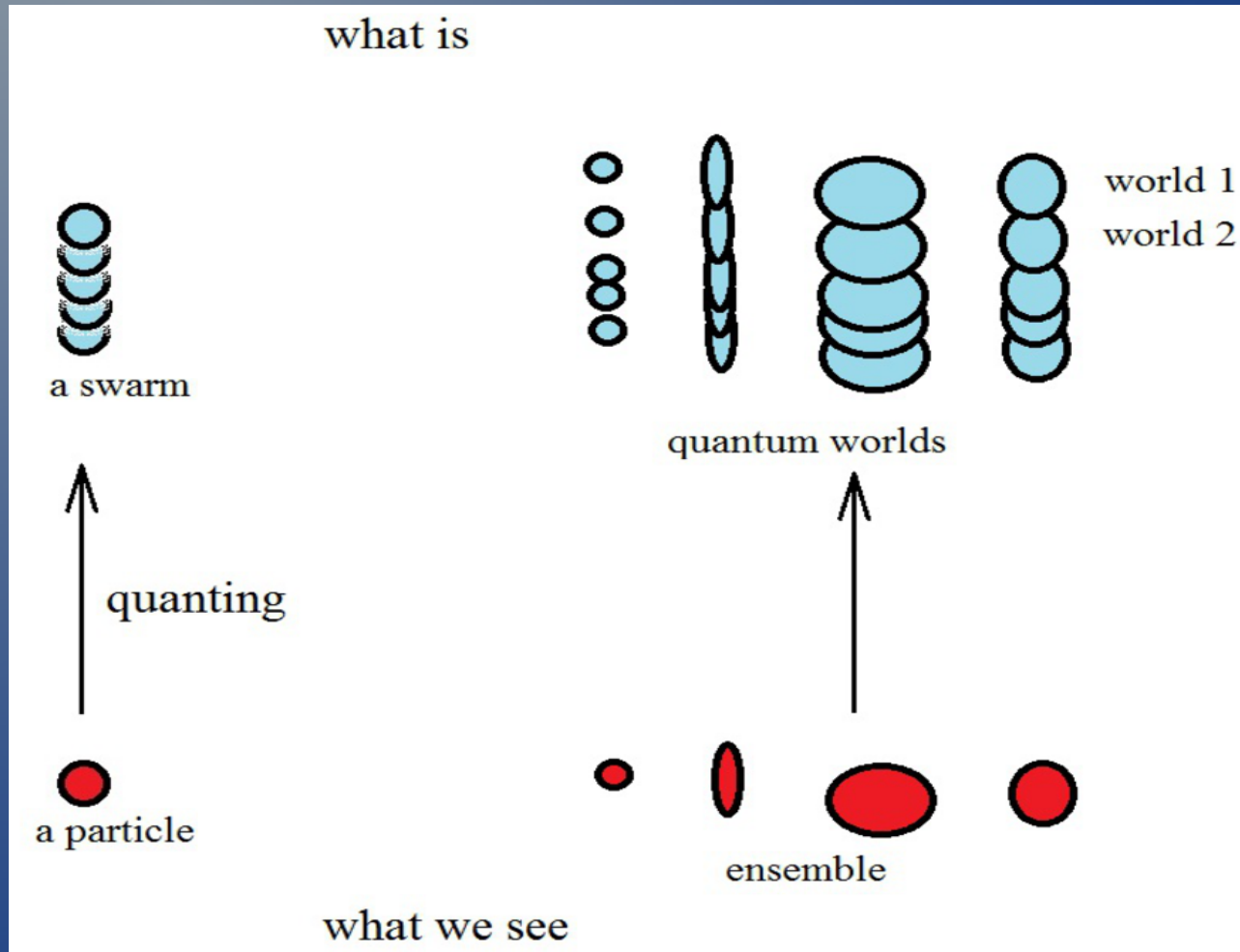
0906.4279.pdf - Средство просмотра



## 14. Ground state

- *Vasily Ogryzko, Quantum information processing at the cellular level. Euclidean approach arXiv:0906.4279*

# Quantum worlds can meet in living because the Life can be realized by huge number of ways



# Selfish gene

- Gene-centric view of evolution: gene is the subject of evolution, organisms are machines serving for gene replication (R.Dawkins)





# Quantum selfish gene

- Varying part of the genome  $\xi_{\text{varying}}$  must be the argument of bio-psi function  $\Psi(\xi_{\text{varying}}) = |\Psi| \exp(i\phi)$
- $|\Psi(\xi_{\text{varying}})|^2$  is the number of creatures with v.p. of the genome  $\xi_{\text{varying}}$ ,  $\nabla\phi$  is the intention of the genome to change itself

*arXiv: 1402.4713 Y.I.Ozhigov, Quantum selfish gene  
(biological evolution in terms of quantum mechanics)*

# Квантовая мистика

- Как рой экземпляров превращается в одну единственную точку? (коллапс волновой функции)
- Р. Пенроуз: коллапс волновой функции = акт самосознания



- С. Хамерофф: коллапс волновой функции происходит в микротубулах нервных клеток!

# Декогерентность как ограниченность памяти классического компьютера

- Мы можем представлять декогерентность как ограниченность памяти классического компьютера, моделирующего квантовую динамику.
- Такая трактовка декогерентности открывает совершенно новые возможности для понимания живого
- Нужно программирование нового типа