

# Квантова информатика

## **Квантова информатика**

Това е област, в която се изучават и използват новите възможности, които предлага квантовата теория за целите на обработка и предаване на информация.

## Квантова информатика

Това е област, в която се изучават и използват новите възможности, които предлага **квантовата теория** за целите на обработка и предаване на информация.

**Квантова теория**  $\approx$  квантова физика

И все пак:      Квантовата теория  $\supset$  квантовата физика

И все пак:      Квантовата теория  $\supset$  квантовата физика



(1911 – 1996)

# THE LOGIC OF QUANTUM MECHANICS

BY GARRETT BIRKHOFF AND JOHN VON NEUMANN

(Received April 4, 1936)

ANNALS OF MATHEMATICS  
Vol. 37, No. 4, October, 1936



(1903 – 1957)



**Квантова  
информатика**

**Теоретична  
квантова  
физика**



**Квантова  
информатика**

Теоретична  
квантова  
физика

Алгебра



Квантова  
информатика

**Теоретична  
квантова  
физика**



**Алгебра**

**Вероятности  
и статистика**

Теоретична  
квантова  
физика

Алгебра



Вероятности  
и статистика

Математическа логика  
и теория на алгоритмите





## Исторически бележки

Квантовата механика и физика се оформя през първите три десетилетия на XX век.

# Исторически бележки

Квантовата механика и физика се оформя през първите три десетилетия на XX век.



Max Planck (1858 – 1947)

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Началото бележи откриването през 1900 на “елементарната порция на действието”  
= “кванта на действието”  
= “константата на Планк  $h$ ”.

## Исторически бележки

Квантовата механика и физика се оформя през първите три десетилетия на XX век.



Max Planck (1858 – 1947)

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Началото бележи откриването през 1900 на “елементарната порция на действието”  
= “кванта на действието”  
= “константата на Планк  $h$ ”.

През първите две десетилетия прилича повече на “астрология”.

Завършващ период – средата на 30те години на XX век.

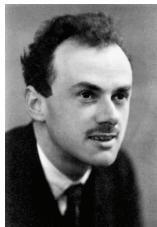


Werner Heisenberg  
(1901 – 1976)

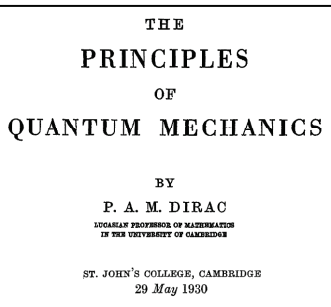


Откривателите на съвместната  
неизмеримост и некомутатив-  
ното произведение.

## Финалът: 1928 – 1930



Paul Dirac  
(1902 - 1984)

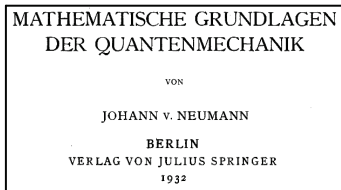


В книгата се въвежда т.нар. алгебра на наблюдаемите (“q-числа” по изразу на Дирак).

## Математическо обосноваване и аксиоматизация:

1932 – 1934 – 1936

В книгата се изгражда строго стандартния формализъм на квантовата механика.



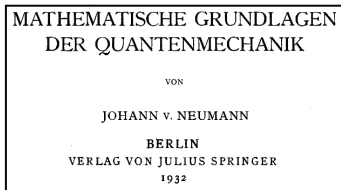
John von Neumann (1903 – 1957)

## Математическо обосноваване и аксиоматизация:

1932 – 1934 – 1936



John von Neumann (1903 – 1957)



В книгата се изгражда строго стандартния формализъм на квантовата механика.

Това е операторния формализъм над хилбертови пространства, който следва от аксиомите на алгебричния подход.

Математическо обосноваване и аксиоматизация:

1932 – 1934 – 1936

**ON AN ALGEBRAIC GENERALIZATION OF THE QUANTUM  
MECHANICAL FORMALISM**

BY P. JORDAN, J. v. NEUMANN, AND E. WIGNER

(Received November 10, 1933)

**ANNALS OF MATHEMATICS**  
**Vol. 35, No. 1, January, 1934**

Статията, която обобщава и завършва алгебричния подход.

Математическо обосноваване и аксиоматизация:

1932 – 1934 – 1936

**THE LOGIC OF QUANTUM MECHANICS**

BY GARRETT BIRKHOFF AND JOHN VON NEUMANN

(Received April 4, 1936)

ANNALS OF MATHEMATICS  
Vol. 37, No. 4, October, 1936

Статията, която въвежда квантово-логическия подход: максималното аксиоматично обобщение на квантовата теория, известно днес.

## Математическо обосноваване и аксиоматизация:

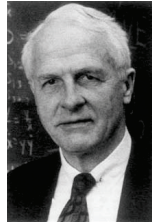
1932 – 1934 – 1936



Pascual Jordan  
(1902 – 1980)



Eugene Wigner  
(1902 – 1995)



Garrett Birkhoff  
(1911 – 1996)

Започваме с **увод**, който не е необходима логическа част от изложението на този курс от лекции.

Започваме с **увод**, който не е необходима логическа част от изложението на този курс от лекции.

Ще представим някои ключови физически експерименти, които са придружени от кратки сведения за използваните в тях физически явления.

Започваме с **увод**, който не е необходима логическа част от изложението на този курс от лекции.

Ще представим някои ключови физически експерименти, които са придружени от кратки сведения за използваните в тях физически явления.

В курса обаче няма да се предполагат, нито да се въвеждат никакви понятия и знания от физиката, собствено за излагането на квантовата информатика.

**Необходимата начална подготовка** включва единствено базисни знания от линейната алгебра (и аналитична геометрия).

**Необходимата начална подготовка** включва единствено базисни знания от линейната алгебра (и аналитична геометрия).

В изложението се използва и началната теория на вероятностите, която се отнася до крайни вероятностни разпределения и е предмет на изучаване още в училищното образование.

# УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

## УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

В класическата физика (физиката до XX век) всяка физична система се описва с множество:

*множество на (елементарните) състояния на системата  $\Omega$ .*

## УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

В класическата физика (физиката до XX век) всяка физическа система се описва с множество:

*множество на (елементарните) състояния на системата  $\Omega$ .*

Различните свойства на системата съответстват на подмножества  $A \subseteq \Omega$ :

Така, свойство = (под)множество

и те са синонимни изрази в този контекст.

Различните свойства на системата съответстват на подмножества  $A \subseteq \Omega$ :

Така, свойство = (под)множество

и те са синонимни изрази в този контекст.

Различните свойства на системата съответстват на подмножества  $A \subseteq \Omega$ :

Така, свойство = (под)множество

и те са синонимни изрази в този контекст.

В контекста на теория на вероятностите множеството  $\Omega$  се нарича също *множество на елементарните събития*, а подмножествата  $A \subseteq \Omega$  се наричат *събития*.

Различните свойства на системата съответстват на подмножества  $A \subseteq \Omega$ :

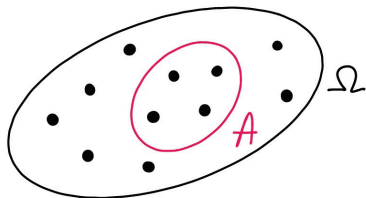
Така, свойство = (под)множество

и те са синонимни изрази в този контекст.

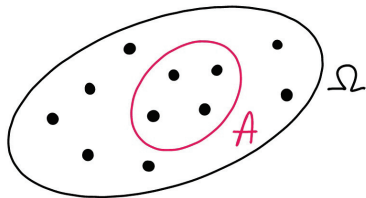
В контекста на теория на вероятностите множеството  $\Omega$  се нарича също *множество на елементарните събития*, а подмножествата  $A \subseteq \Omega$  се наричат *събития*.

И така, ние ще използваме като синоними “събитие” = “(под)множество” (= “свойство”).

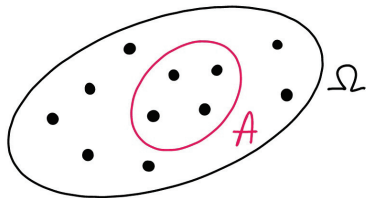
Различните свойства на системата съответстват на подмножества  $A \subseteq \Omega$ :



Множество на елементарните събития  $\Omega$  и отделяне на свойство “A”, като подмножество на  $\Omega$ .



Множество на елементарните събития  $\Omega$  и отделяне на свойство "A", като подмножество на  $\Omega$ .



Множество на елементарните събития  $\Omega$  и отделяне на свойство “ $A$ ”, като подмножество на  $\Omega$ .

Свойствата могат да се комбинират чрез логическите връзки “и” и “или”, които на езика на подмножествата отговарят на операциите *сечение*  $\cap$  и *обединение*  $\cup$ :

$$A \text{ и } B \iff A \cap B,$$

$$A \text{ или } B \iff A \cup B.$$

## Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

В класическата физика и статистика, в едно множество  $\Omega$  можем да отделим последователно две събития  $A, B \subseteq \Omega$  (т.е. подмножества, свойства) по два равносилни начина:

$$(1) \quad \Omega \rightsquigarrow A \rightsquigarrow A \text{ и } B,$$

$$(2) \quad \Omega \rightsquigarrow B \rightsquigarrow B \text{ и } A.$$

# Количествена илюстрация на класическата еквивалентност

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност –

ако означим:  $N(\Omega) :=$  брой на елементи на  $\Omega$

$N(A) :=$  брой на елементи на  $A$

$N(A \text{ и } B) :=$  брой на елементи на  $A \text{ и } B$

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност –

ако означим:  $N(\Omega) :=$  брой на елементи на  $\Omega$

$N(A) :=$  брой на елементи на  $A$

$N(A \text{ и } B) :=$  брой на елементи на  $A \text{ и } B$

то тъждеството:

$$\underbrace{\frac{N(A \text{ и } B)}{N(\Omega)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } A \text{ и } B \\ \text{в } \Omega}} = \underbrace{\frac{N(A)}{N(\Omega)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } A \\ \text{в } \Omega}} \cdot \underbrace{\frac{N(A \text{ и } B)}{N(A)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } B \\ \text{в } A}}$$

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност

ако означим:

$$N(\Omega) := \text{брой на елементи на } \Omega$$

$$N(A) := \text{брой на елементи на } A$$

$$N(A \text{ и } B) := \text{брой на елементи на } A \text{ и } B$$

то тъждеството:

$$\underbrace{\frac{N(A \text{ и } B)}{N(\Omega)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } A \text{ и } B \\ \text{в } \Omega}} = \underbrace{\frac{N(A)}{N(\Omega)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } A \\ \text{в } \Omega}} \cdot \underbrace{\frac{N(A \text{ и } B)}{N(A)}}_{\substack{\text{относителен} \\ \text{дял на } B \\ \text{в } A}}$$

съответства на

вероятностния закон:

$$\underbrace{p(A \text{ и } B)}_{\substack{\text{вероятност} \\ \text{за } A \text{ и } B}} = \underbrace{p(A)}_{\substack{\text{вероятност} \\ \text{за } A}} \cdot \underbrace{p(B|A)}_{\substack{\text{условна} \\ \text{вероятност} \\ \text{за } B \text{ при} \\ \text{условие } A}}$$

(което е всъщност е определението за *условна вероятност*).

Тогава, равенството

$$N(A \text{ и } B) = N(B \text{ и } A)$$

се изразява във вероятностния закон

$$p(A) \cdot p(B|A) = p(B) \cdot p(A|B),$$

който се нарича *закон на Бейс* (Bayes' law / theorem).

Тогава, равенството

$$N(A \text{ и } B) = N(B \text{ и } A)$$

се изразява във вероятностния закон

$$p(A) \cdot p(B|A) = p(B) \cdot p(A|B),$$

който се нарича *закон на Бейс* (Bayes' law / theorem).

Той се нарушава се в квантовата физика (и статистиката) и условната вероятност става първичен обект.

Илюстрация на това нарушение дава така неречения:

**Експеримент с *кръстосани поляризатори*<sup>1</sup>**

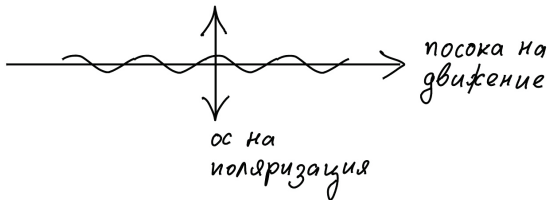
---

<sup>1</sup>crossed polarizer experiment

Илюстрация на това нарушение дава така неречения:

## Експеримент с *кръстосани поляризатори*

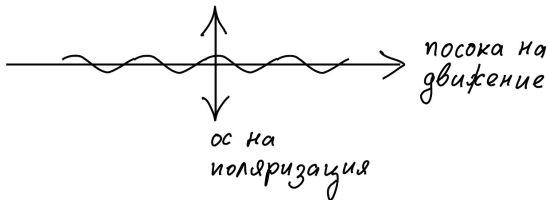
Извършва се с *фотони* - частици “пренасящи” светлината.



Състоянието на един фотон се описва от една наредена тройка (посока на движение, енергия, вътрешно състояние). Вътрешното състояние на фотона съответства на така наречената *поляризация* на фотона.

## Експеримент с *кръстосани поляризатори*

Извършва се с *фотони* - частици “пренасящи” светлината.



Състоянието на един фотон се описва от една наредена тройка (посока на движение, енергия, вътрешно състояние). Вътрешното състояние на фотона съответства на така наречената *поляризация* на фотона.

Поляризационните състояния са същите, като състоянията на най-простата квантова система наречена “*квантов бит*”. В описания експеримент се използват само фотони със специален тип вътрешни състояния: те се наричат *линейни поляризации*. Състояние на *линейна поляризация* се характеризира с *ос*, която е перпендикулярна на *посоката на движение* на фотона.

## Експеримент с *кръстосани поляризатори*

Извършва се с *фотони*  
- частици “пренасящи”  
светлината.



Така, ако група фотони се разпространяват в една и съща посока, то от тях може да бъде отделено подмножество, които имат еднаква “линейна поляризация” – вид “свойство”.

## Експеримент с *кръстосани поляризатори*

Извършва се с *фотони*  
- частици “пренасящи”  
светлината.

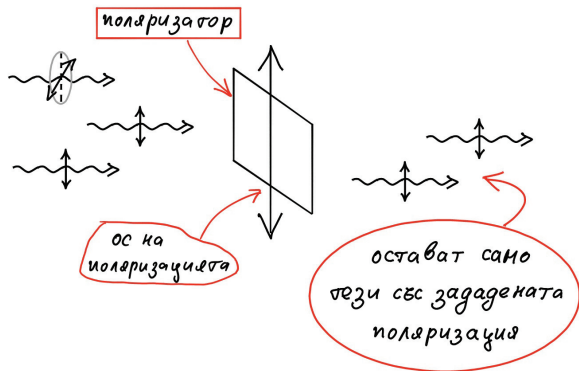


Така, ако група фотони се разпространяват в една и съща посока, то от тях може да бъде отделено подмножество, които имат еднаква “линейна поляризация” – вид “свойство”.

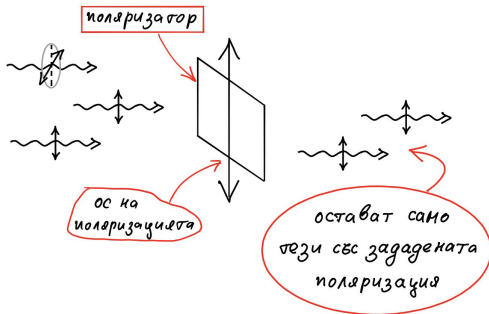
Отделянето на фотони с фиксирана линейна поляризация се извършва чрез филтри, наречени *поляризатори*.

## Експеримент с *кръстосани* поляризатори

Експериментът започва със селекция на фотони с фиксирана поляризация:



## Експеримент с кръстосани поляризатори



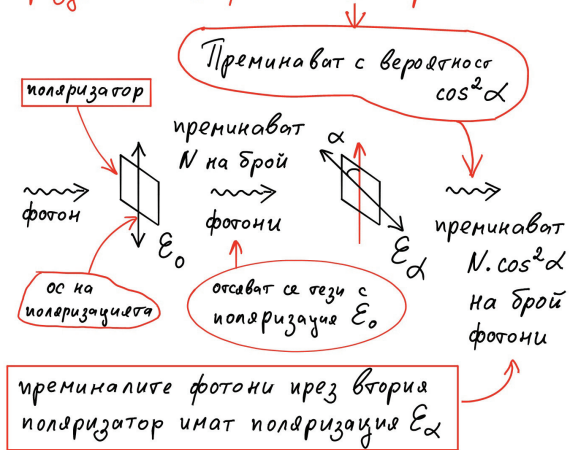
Ако сега поставим втори поляризатор след първия, който е идентичен, тогава всички фотони, които са преминали през първия, ще преминат и през втория.

Фотони ще продължават да преминават дори и ако завъртим оста на поляризация на втория поляризатор на ъгъл  $\alpha$  спрямо първия.

Преминава обаче само част  $\cos^2 \alpha$  ( $\in [0, 1]$ ) от фотоните.

# Експеримент с кръстосани поляризатори

резултат от теорията и експеримента



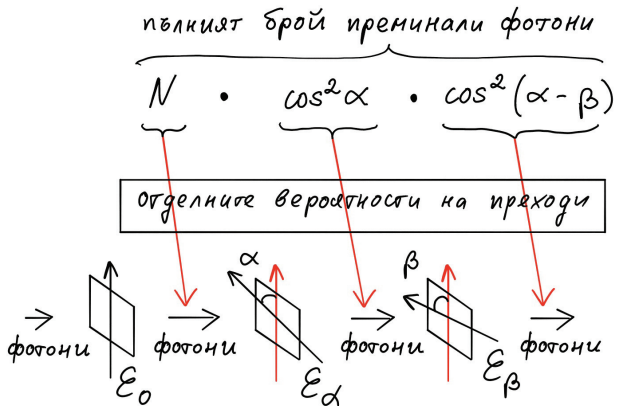
Важно е да се отбележи, че ние може да пускаме фотоните един по един и в този случай един фотон преминава или напълно не преминава през всеки поляризатор.

Числото  $\cos^2 \alpha$  в този случай представлява вероятността за преминаване на фотон през втория поляризатор след, като е бил пропуснат от първия.

## Експеримент с *кръстосани* поляризатори

Нека сега допълним опита и с трети поляризатор:

Статистика на преминалите фотони през два последователни поляризатора след първоначалната селекция



## Експеримент с *кръстосани поляризатори*

Ако сравним резултатите при размяната  $\alpha \leftrightarrow \beta$ , то ще получим:

$$\begin{aligned} & N \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2(\alpha - \beta) \\ & \stackrel{?}{=} N \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos^2(\beta - \alpha). \end{aligned}$$

# Експеримент с *кръстосани поляризатори*

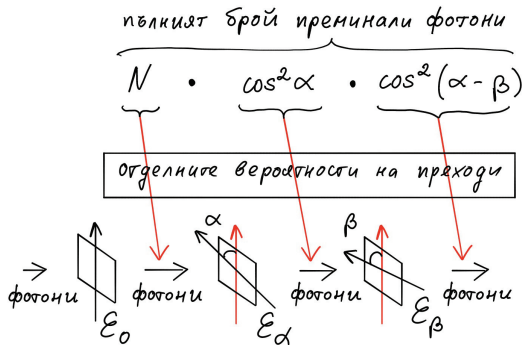
Ако сравним резултатите при размяната  $\alpha \leftrightarrow \beta$ , то ще получим:

$$\begin{aligned} N \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2(\alpha - \beta) \\ \stackrel{?}{=} N \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos^2(\beta - \alpha). \end{aligned}$$

Следователно е разлика възможна, например при  $\alpha = 45^\circ$  и  $\beta = 90^\circ$ :

$$\underbrace{N("A \text{ и } B")}_{N \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}} \neq \underbrace{N("B \text{ и } A")}_{N \cdot 0 \cdot \frac{1}{2}} .$$

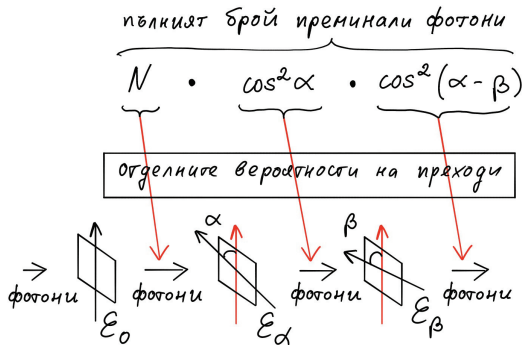
## Експеримент с кръстосани поляризатори



В разгледания експеримент, свойството (събитието)  $A$  отговаря на поляризация под ъгъл  $\alpha$  ( $E_\alpha$ ), а  $B$  на поляризация под ъгъл  $\beta$ .

В частност виждаме, че поляризиациите под ъгъл  $0^\circ$  и  $90^\circ$  отговарят на взаимно изключващи се събития (свойства), но ако между тях стои поляризатор  $E_{45^\circ}$  под ъгъл  $45^\circ$ , то прехода между  $E_{0^\circ}$  и  $E_{90^\circ}$  става възможен!

## Експеримент с кръстосани поляризатори



Нека обърнем внимание, че в някои от формулите по-горе сме поставили в кавички “ $A$  и  $B$ ”, понеже броя нито в лявата страна, нито в дясната има смисъл на брой на обектите със свойство  $A$  и  $B$ .

В квантовата логика, която ще споменем след малко, се оказва, че логическите операции остават комутативни и в горния експеримент събитието  $A$  и  $B$  се оказва нулево събитие (т.е., празното или още, невъзможното събитие).

По определение, две квантови събития  $A$  и  $B$ , за които винаги е изпълнен закона на Бейс

$$p(A) p(B \mid A) = p(B) p(A \mid B)$$

се наричат *взаимно комутиращи* или също *съвместно проверяеми* (*съвместно измерими*).

По определение, две квантови събития  $A$  и  $B$ , за които винаги е изпълнен закона на Бейс

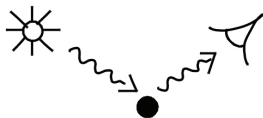
$$p(A) p(B \mid A) = p(B) p(A \mid B)$$

се наричат *взаимно комутиращи* или също *съвместно проверяеми* (*съвместно измерими*).

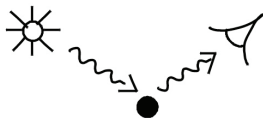
По такъв начин, квантовата теория допуска, че има събития които **не могат** съвместно да се проверяват (измерват) – това именно наблюдаваме в представения по-горе квантов феномен 1.

Физическото обяснение на квантовия феномен 1 е, че всяко наблюдение и измерване в природата е активен процес.

Физическото обяснение на квантовия феномен 1 е, че всяко наблюдение и измерване в природата е активен процес.



Физическото обяснение на квантовия феномен 1 е, че всяко наблюдение и измерване в природата е активен процес.



То е свързано с неотстранимо смущение върху наблюдавания обект и това смущение има минимален праг, който се нарича “елементарна порция / квант (quantum) на действието”.

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

Квантовите свойства, както и класическите свойства се намират в отношение (релация) на *мажориране*:

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

Квантовите свойства, както и класическите свойства се намират в отношение (релация) на *мажориране*:

това изразяваме с израза “*свойство  $A$  влече свойство  $B$* ”.

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

Квантовите свойства, както и класическите свойства се намират в отношение (релация) на *мажориране*:

това изразяваме с израза “*свойство  $A$  влече свойство  $B$* ”.

На езика на множествата:

$$A \subseteq B$$

( $A$  е подмножество /включва се/ в  $B$ ).

Това води до т.нар. **квантово–логически подход** към обосноваването (аксиоматизацията) на квантовата теория.

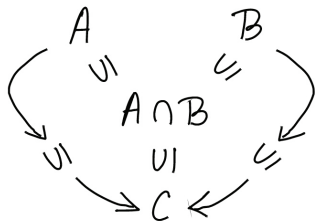
Това води до т.нар. **квантово–логически подход** към обосноваването (аксиоматизацията) на квантовата теория.

В основата му стои предположението, че множеството на квантовите събития е **частично наредено множество**.

Това води до т.нар. **квантово–логически подход** към обосноваването (аксиоматизацията) на квантовата теория.

В основата му стои предположението, че множеството на квантовите събития е **частично наредено множество**.

Това поражда по-нататък  
логически операции



Логическите операции при тази конструкция остават винаги комутативни:

$$A \text{ и } B = B \text{ и } A, \quad A \text{ или } B = B \text{ или } A.$$

Логическите операции при тази конструкция остават винаги комутативни:

$$A \text{ и } B = B \text{ и } A, \quad A \text{ или } B = B \text{ или } A.$$

При квантовите системи обаче условната вероятност:

$$p(B | A) \neq \frac{p(A \text{ и } B)}{p(A)},$$

тъй като в противен случай, както видяхме, няма да се нарушава закона на Бейс.

Защо?

Условните вероятности, както и пълните вероятности трябва да изпълняват *адитивния закон*:

$$p((A \text{ или } B) \mid C) = p(A \mid C) + p(B \mid C), \quad (*)$$

$$p(A \text{ или } B) = p(A) + p(B), \quad (**)$$

ако  $A$  и  $B = \emptyset$  – празното (невъзможното) събитие.

Условните вероятности, както и пълните вероятности трябва да изпълняват *адитивния закон*:

$$p((A \text{ или } B) \mid C) = p(A \mid C) + p(B \mid C), \quad (*)$$

$$p(A \text{ или } B) = p(A) + p(B), \quad (**)$$

ако  $A \text{ и } B = \emptyset$  – празното (невъзможното) събитие.

От закона на Бейс би следвало  $(**) \implies (*)$ , ако е в сила

$$(A \text{ или } B) \text{ и } C = (A \text{ и } C) \text{ или } (B \text{ и } C) \quad (\text{дистрибутивност})$$

В квантови системи дистрибутивните закони се нарушават:

имаме,  $(A \text{ или } B) \text{ и } C \neq (A \text{ и } C) \text{ или } (B \text{ и } C)$  ,  
 $(A \text{ и } B) \text{ или } C \neq (A \text{ или } C) \text{ и } (B \text{ или } C)$  .

В квантови системи дистрибутивните закони се нарушават:

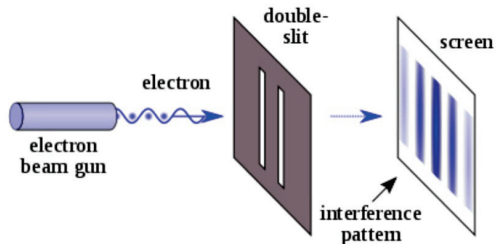
имаме,  $(A \text{ или } B) \text{ и } C \neq (A \text{ и } C) \text{ или } (B \text{ и } C)$  ,  
 $(A \text{ и } B) \text{ или } C \neq (A \text{ или } C) \text{ и } (B \text{ или } C)$  .

Това следва от:

Квантов феномен 2: интерференция на вероятността

## Експеримент с *двоен процеп*<sup>2</sup>

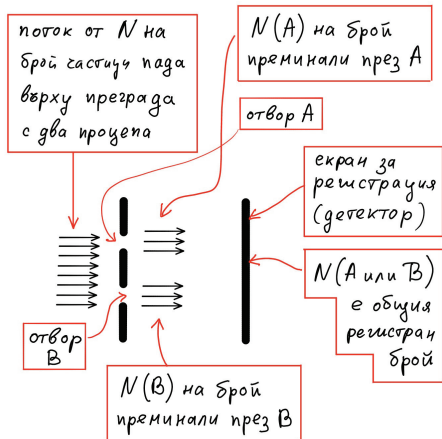
Опитната постановка  
в реалистичен вид



---

<sup>2</sup>double-slit experiment

## Експеримент с двоен процеп



поток от  $N$  на  
брой частиц пада  
върху преграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

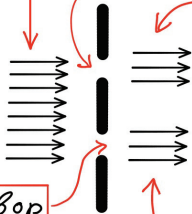
отвор  $A$

екран за  
решстрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
регистран  
брой

отвор  
 $B$

$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$



поток от  $N$  на  
брой частици пада  
върху преграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

отвор  $A$

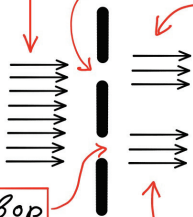
екран за  
решстрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
регистран  
брой

отвор  
 $B$

$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$

Случай (1): изследва се  
общото количество на пре-  
миналите частици



поток от  $N$  на  
брой частици пада  
върху презграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

отвор  $A$

екран за  
решстрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
регистран  
брой

отвор  
 $B$

$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$

Случай (1): изследва се  
общото количество на пре-  
миналите частици:

(1<sub>A</sub>) отворен е само про-  
цеп  $A$ , при което  
определяме  $N(A)$ ;

поток от  $N$  на  
брой частици пада  
върху преграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

отвор  $A$

екран за  
решстрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
регистран  
брой

отвор  
 $B$

$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$

Случай (1): изследва се  
общото количество на пре-  
миналите частици:

- (1<sub>A</sub>) отворен е само про-  
цеп  $A$ , при което  
определяме  $N(A)$ ;
- (1<sub>B</sub>) отворен е само про-  
цеп  $B$ , при което  
определяме  $N(B)$ ;

поток от  $N$  на  
брой частици пада  
върху преграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

отвор  $A$

екран за  
решетрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
регистран  
брой

отвор  
 $B$

$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$

Случай (1): изследва се  
общото количество на пре-  
миналите частици:

(1<sub>A</sub>) отворен е само про-  
цеп  $A$ , при което  
определяме  $N(A)$ ;

(1<sub>B</sub>) отворен е само про-  
цеп  $B$ , при което  
определяме  $N(B)$ ;

(1<sub>A или B</sub>) отворени са  $A$   
и  $B$ , т.е. всяка части-  
ца преминава през  $A$   
или  $B$  и следовател-  
но, така определяме  
 $N(A \text{ или } B)$ .

поток от  $N$  на  
брой частици пада  
върху преграда  
с два прозема

$N(A)$  на брой  
преминали през  $A$

отвор  $A$

екран за  
решетрация  
(детектор)

$N(A \text{ или } B)$   
е общия  
решетрация  
брой

отвор  
 $B$

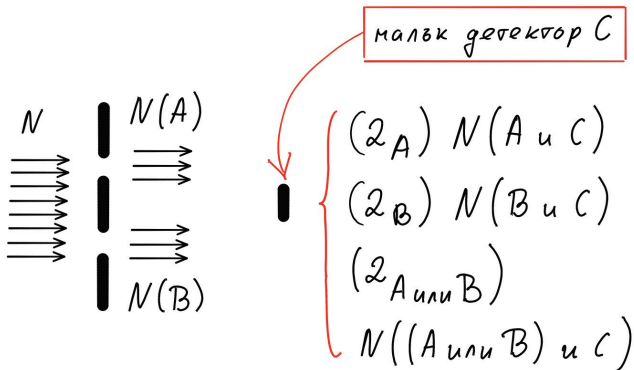
$N(B)$  на брой  
преминали през  $B$

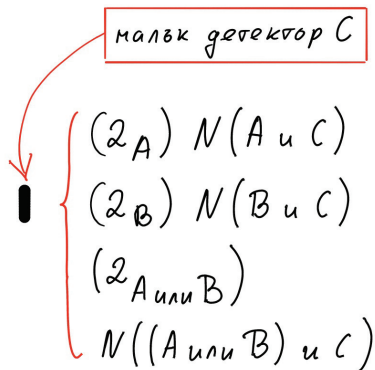
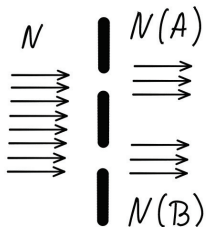
Случай (1): изследва се  
общото количество на пре-  
миналите частици.

Резултат:

$$N(A \text{ или } B) \\ = N(A) + N(B).$$

Случай (2): зад процепите  
е поставен малък екран  
(детектор)  $C$





Случай (2): зад процепите е поставен малък екран (детектор)  $C$ :

$(2_A)$  отворен е само процеп  $A$ . В  $C$  се регистрират  $N(A \text{ и } C)$  на брой частици.

$(2_B)$  отворен е само процеп  $B$ . В  $C$  се регистрират  $N(B \text{ и } C)$  на брой частици.

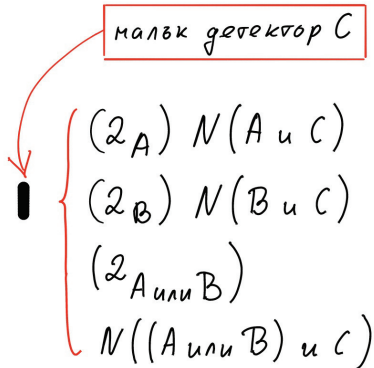
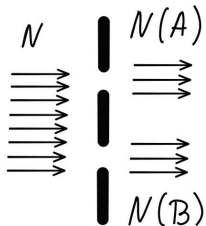
$(2_{A \text{ или } B})$  отворени са  $A$  и  $B$ .

В  $C$  се регистрират  $N((A \text{ или } B) \text{ и } C)$  на брой частици.

Случай (2): зад процепите  
е поставен малък екран  
(детектор)  $C$ :

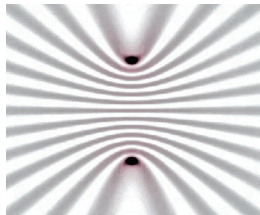
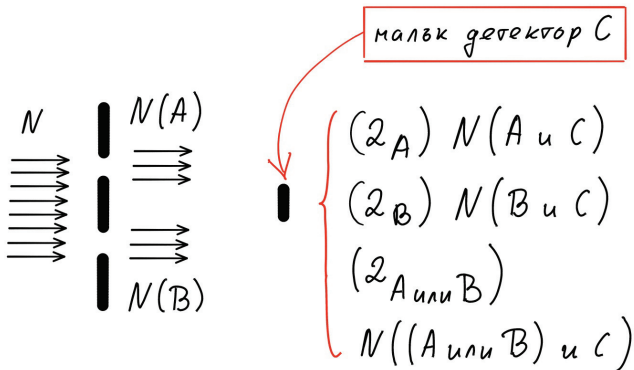
Резултат:

$$N((A \text{ или } B) \text{ и } C) \\ \neq N(A \text{ и } C) \\ + N(B \text{ и } C).$$

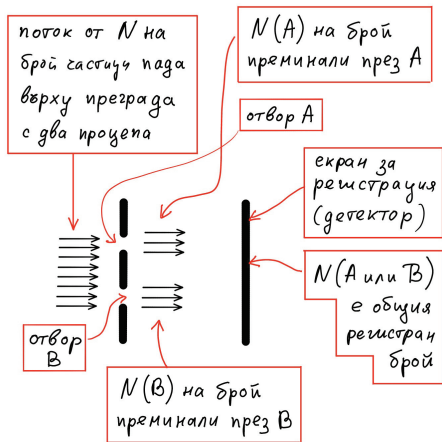


Случай (2): зад процепите  
е поставен малък екран  
(детектор)  $C$ :

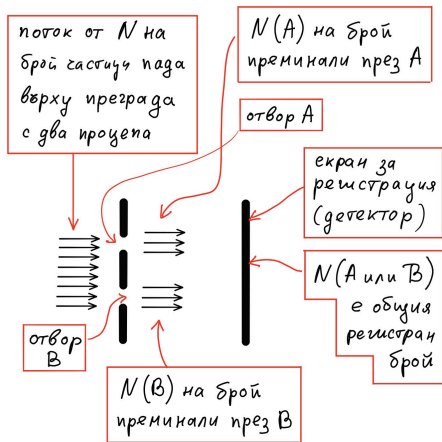
Резултат:



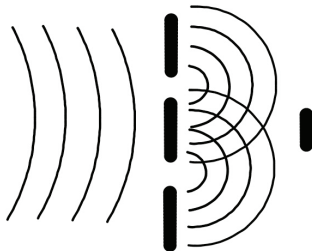
## Експеримент с двоен процеп



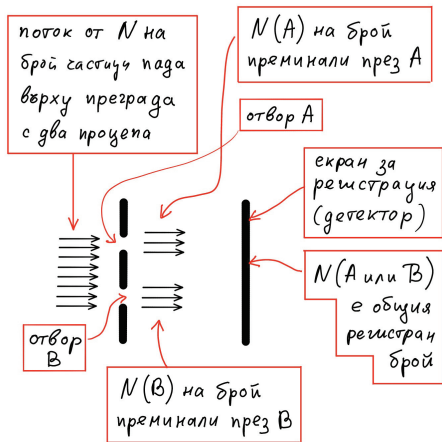
## Експеримент с двоен процеп



Първи опит за интерпретация: имаме работа не с частици, а с вълни, и наблюдаваме явлението *интерференция*

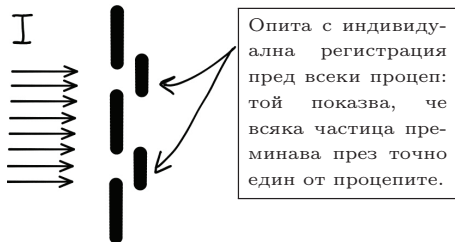


## Експеримент с двоен процеп

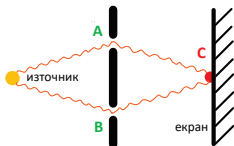


Първи опит за интерпретация: имаме работа не с частици, а с вълни, и наблюдаваме явлението *интерференция*

Опровергава се от:



## Експеримент с *двоен процеп*



И така, констатирахме, че за една частица

да премине през  $A$  и да попадне в  $C$

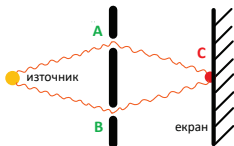
или да премине през  $B$  и да попадне в  $C$

не е същото, като

да премине без проследяване през

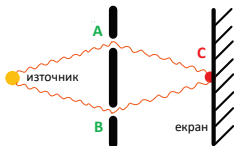
$A$  или  $B$  и да попадне в  $C$ .

# Експеримент с двоен процеп



$$\begin{aligned}
 & \left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през A} \end{array} \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в C} \end{array} \right) \right) \text{ или } \left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през B} \end{array} \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в C} \end{array} \right) \right) \\
 & \neq \left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през A} \end{array} \right) \text{ или } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през B} \end{array} \right) \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в C} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

## Експеримент с *двоен процеп*



$$\left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през } \mathbf{A} \end{array} \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в } \mathbf{C} \end{array} \right) \right) \text{ или } \left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през } \mathbf{B} \end{array} \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в } \mathbf{C} \end{array} \right) \right) \\ \neq \left( \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през } \mathbf{A} \end{array} \right) \text{ или } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през } \mathbf{B} \end{array} \right) \right) \text{ и } \left( \begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в } \mathbf{C} \end{array} \right)$$

Констатирахме нарушение на дистрибутивността при квантовите събития:

$$(A \cap C) \cup (B \cap C) \neq (A \cap B) \cup C,$$

$$(A \cup C) \cap (B \cup C) \neq (A \cup B) \cap C,$$

спрямо логическите операции произтичащи от подредба им.

# Амплитуди вместо вероятности

## Амплитуди вместо вероятности

Експериментът по-горе в малко по-абстрактен вариант:

## Амплитуди вместо вероятности

Експериментът по-горе в малко по-абстрактен вариант:

преход на система между две състояния,

начално “i” (initial) и крайно “f” (final), през

две алтернативни междинни състояния: “1” и “2”.

## Амплитуди вместо вероятности

Експериментът по-горе в малко по-абстрактен вариант:

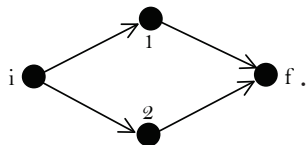
преход на система между две състояния,

начално “i” (initial) и крайно “f” (final), през

две алтернативни междинни състояния: “1” и “2”.

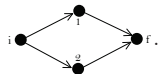
Два канала за переход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :



Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :

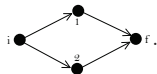


В класическата статистика, ако вероятностите за преходи  $i \rightarrow 1$ ,  $i \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow f$  и  $2 \rightarrow f$  са  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , съответно, то прехода  $i \rightarrow f$  се извършва с вероятност

$$p_{i,f} = p_{i,1} p_{1,f} + p_{i,2} p_{2,f}$$

Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :



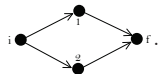
В класическата статистика, ако вероятностите за преходи  $i \rightarrow 1$ ,  $i \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow f$  и  $2 \rightarrow f$  са  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , съответно, то прехода  $i \rightarrow f$  се извършва с вероятност

$$p_{i,f} = p_{i,1} p_{1,f} + p_{i,2} p_{2,f}$$

В този случай обаче не се наблюдава “интерференцията” (т.е., погасяването) на вероятността от експеримента по-горе.

Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :

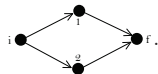


В класическата статистика, ако вероятностите за преходи  $i \rightarrow 1$ ,  $i \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow f$  и  $2 \rightarrow f$  са  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , съответно, то прехода  $i \rightarrow f$  се извършва с вероятност

$$p_{i,f} = p_{i,1} p_{1,f} + p_{i,2} p_{2,f}$$

Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :

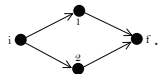


Оказва се, че в квантовата статистика, заедно с вероятностите за преход  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , са определени и *комплексни числа*  $a_{i,1}$ ,  $a_{i,2}$ ,  $a_{1,f}$  и  $a_{2,f}$ , за които

$$a_{i,f} = a_{i,1} a_{1,f} + a_{i,2} a_{2,f}$$

Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :



Оказва се, че в квантовата статистика, заедно с вероятностите за преход  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , са определени и *комплексни числа*  $a_{i,1}$ ,  $a_{i,2}$ ,  $a_{1,f}$  и  $a_{2,f}$ , за които

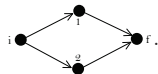
$$a_{i,f} = a_{i,1} a_{1,f} + a_{i,2} a_{2,f}$$

които са свързани с отношенията

$$\begin{aligned} p_{i,1} &= |a_{i,1}|^2, & p_{i,2} &= |a_{i,2}|^2, \\ p_{1,f} &= |a_{1,f}|^2, & p_{2,f} &= |a_{2,f}|^2, & p_{i,f} &= |a_{i,f}|^2. \end{aligned}$$

Два канала за преход:

$i \rightarrow 1 \rightarrow f$  и  $i \rightarrow 2 \rightarrow f$ :



Оказва се, че в квантовата статистика, заедно с вероятностите за преход  $p_{i,1}$ ,  $p_{i,2}$ ,  $p_{1,f}$  и  $p_{2,f}$ , са определени и *комплексни числа*  $a_{i,1}$ ,  $a_{i,2}$ ,  $a_{1,f}$  и  $a_{2,f}$ , за които

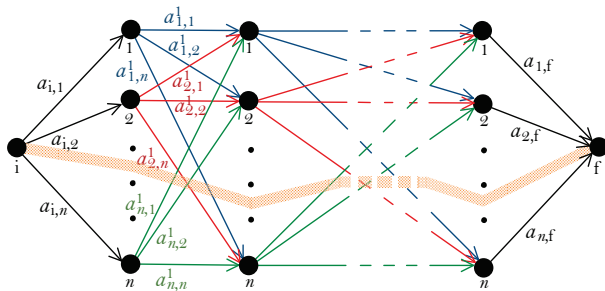
$$a_{i,f} = a_{i,1} a_{1,f} + a_{i,2} a_{2,f}$$

които са свързани с отношенията

$$\begin{aligned} p_{i,1} &= |a_{i,1}|^2, & p_{i,2} &= |a_{i,2}|^2, \\ p_{1,f} &= |a_{1,f}|^2, & p_{2,f} &= |a_{2,f}|^2, & p_{i,f} &= |a_{i,f}|^2. \end{aligned}$$

Наричат се: *амплитуди на вероятността*.

В по-обща ситуация, прехода  $i \rightarrow f$  може се извърши през  $n$  алтернативни междинни състояния на  $k$  брой стъпки:



В определени условия, наречени във физиката “класическа граница” амплитудите на повечето пътища се погасяват взаимно и остава един доминиращ път – оцветения с плътна оранжева линия – това е “класическата траектория” на системата.

Други теми от курса:

- Квантови изчисления.
- Квантова логика и квантови категории.
- Неотстраним индетерминизъм на наблюденията върху квантовите системи.
- Квантово сплитане и неговите приложения.

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

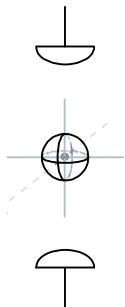
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

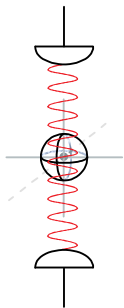
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

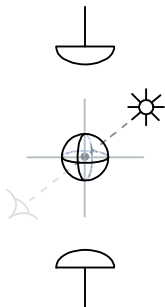
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

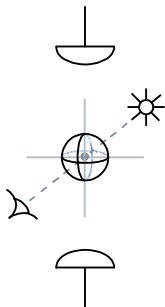
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

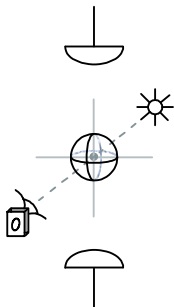
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

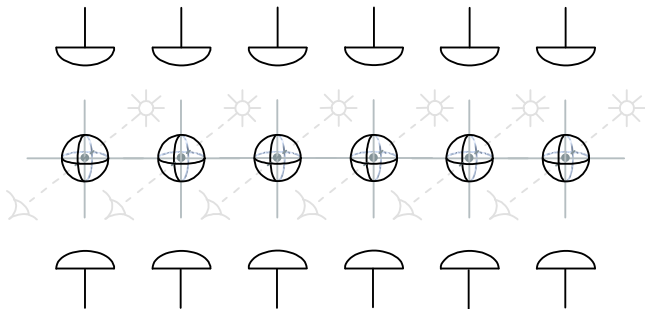
## 0) Сглобяване - квантов бит



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

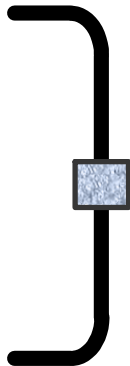
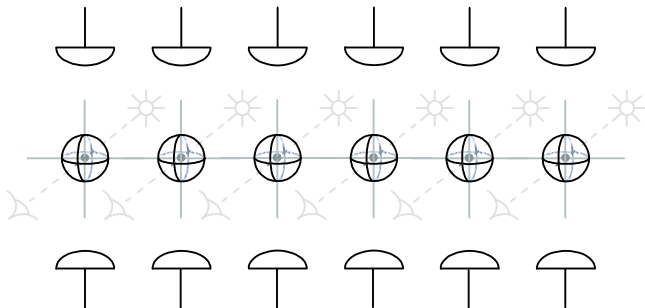
## 0) Сглобяване - система от квантови битове



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

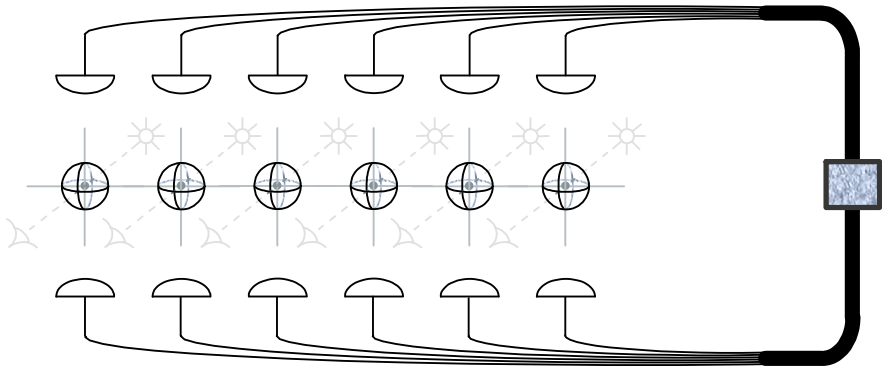
## 0) Сглобяване



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

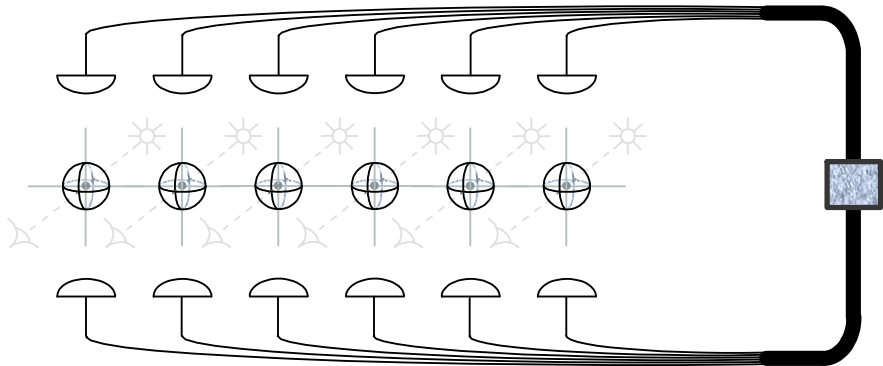
## 0) Сглобяване



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

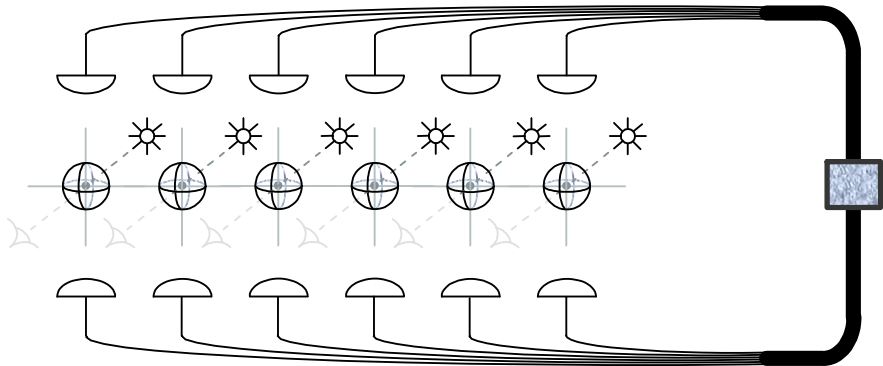
## 1) Инициализация



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

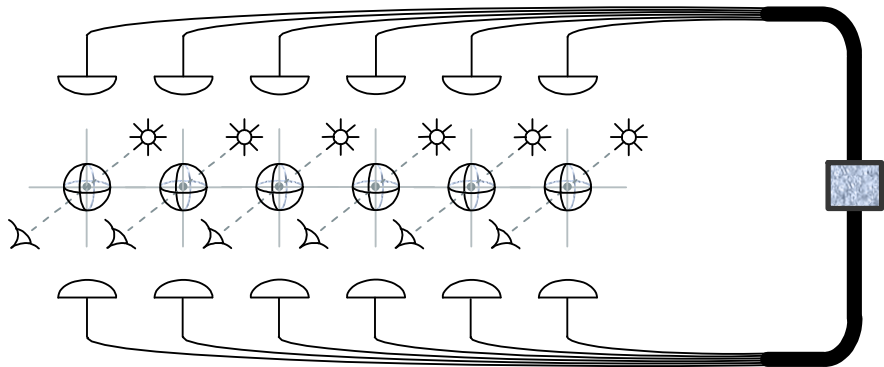
## 1) Инициализация



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

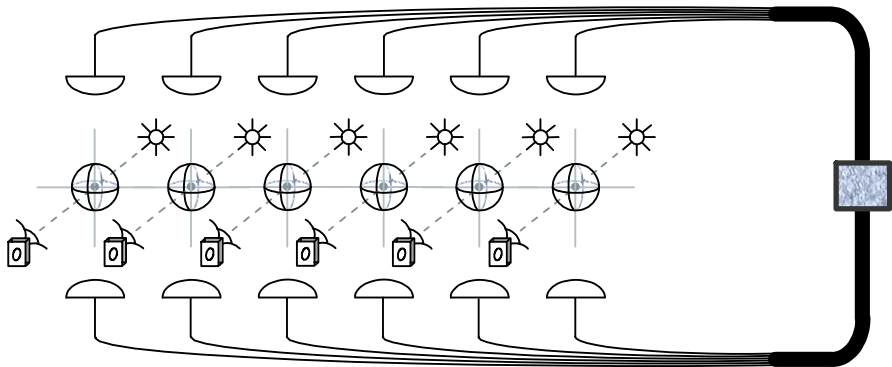
## 1) Инициализация



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

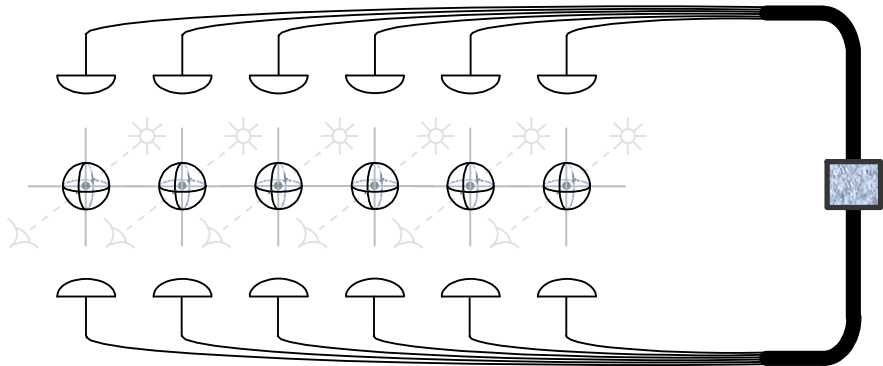
## 1) Инициализация



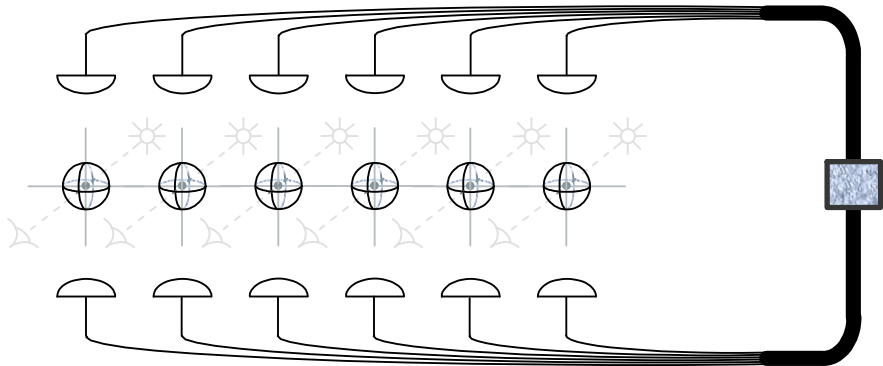
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

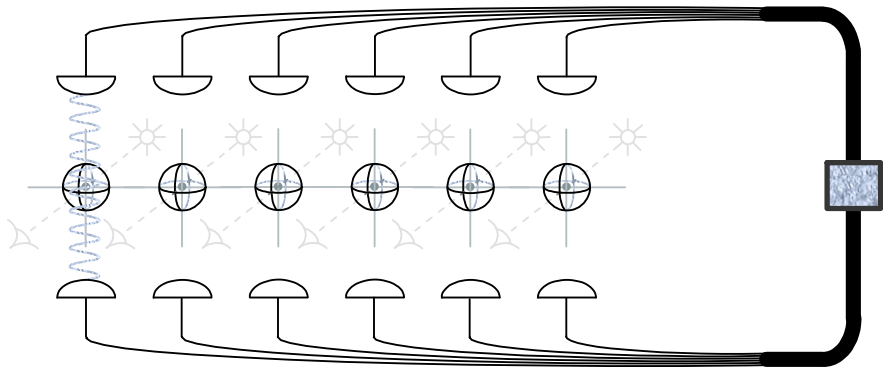
## 1) Инициализация



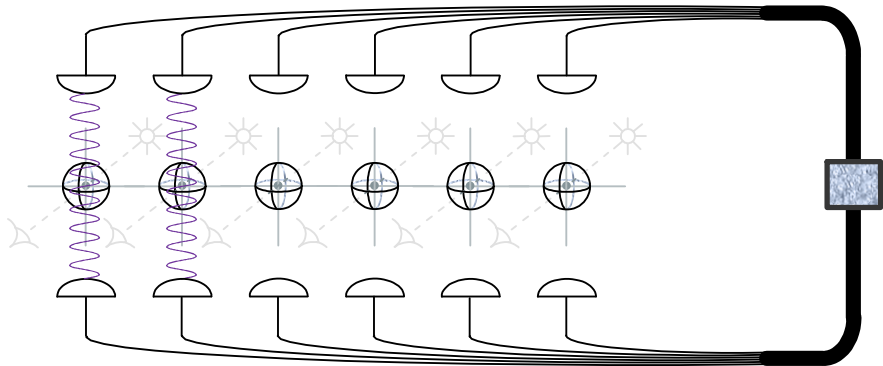
## 2) Квантово изчисление



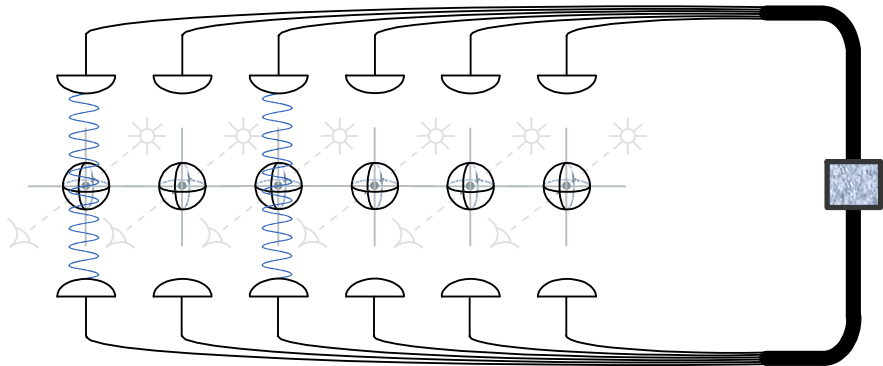
## 2) Квантово изчисление



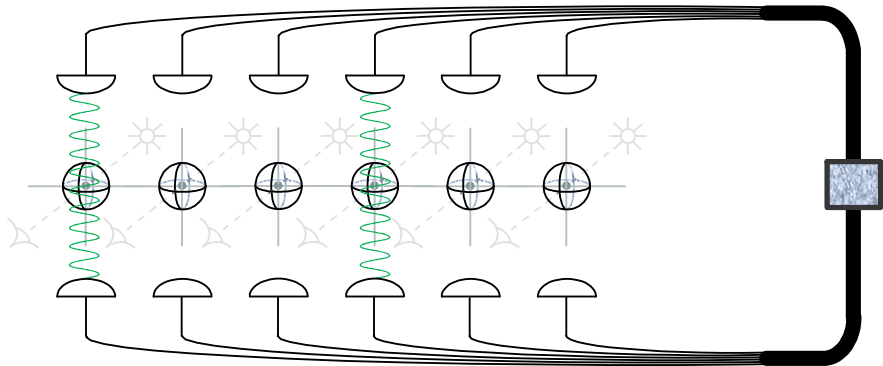
## 2) Квантово изчисление



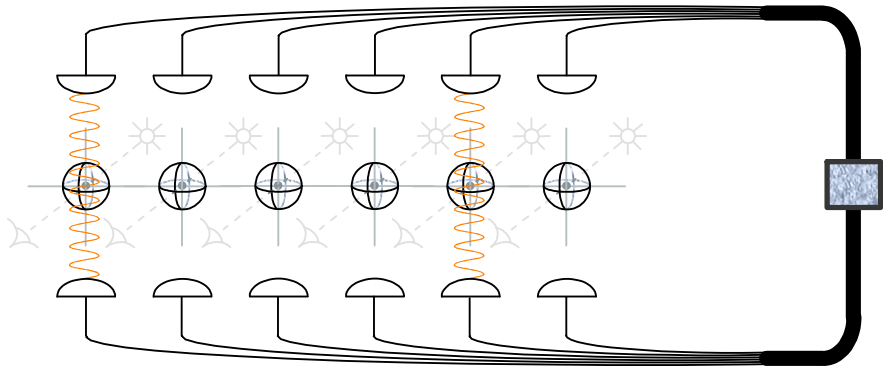
## 2) Квантово изчисление



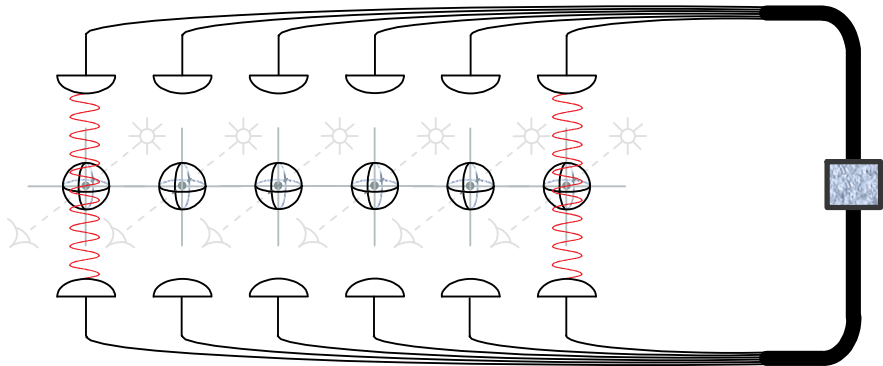
## 2) Квантово изчисление



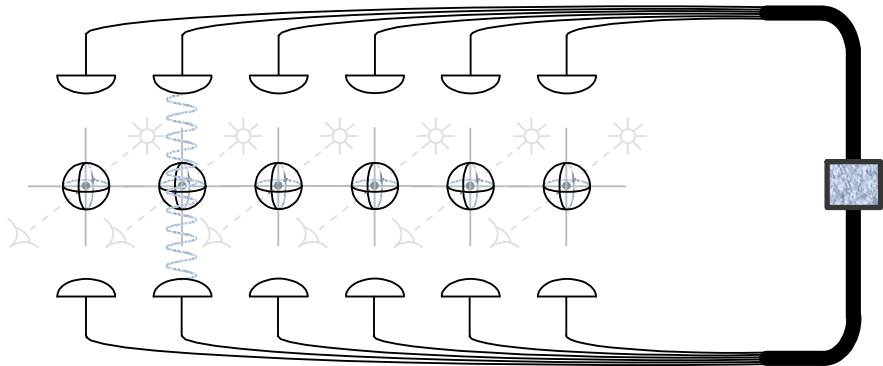
## 2) Квантово изчисление



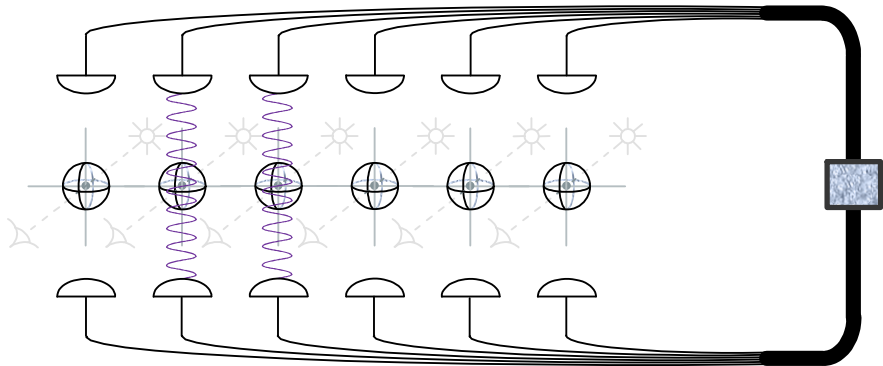
## 2) Квантово изчисление



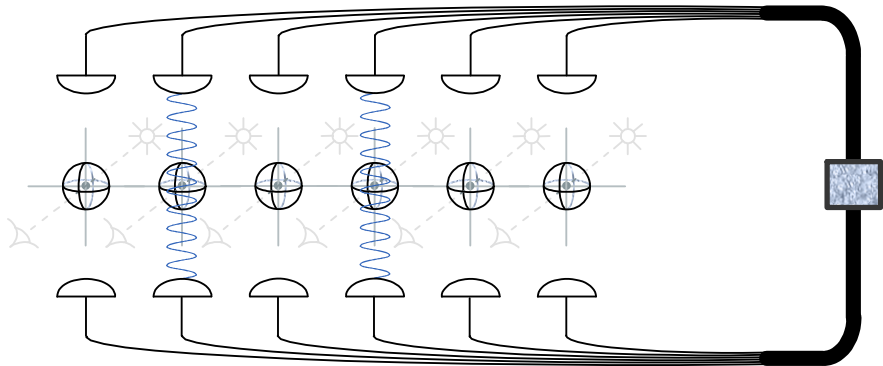
## 2) Квантово изчисление



## 2) Квантово изчисление



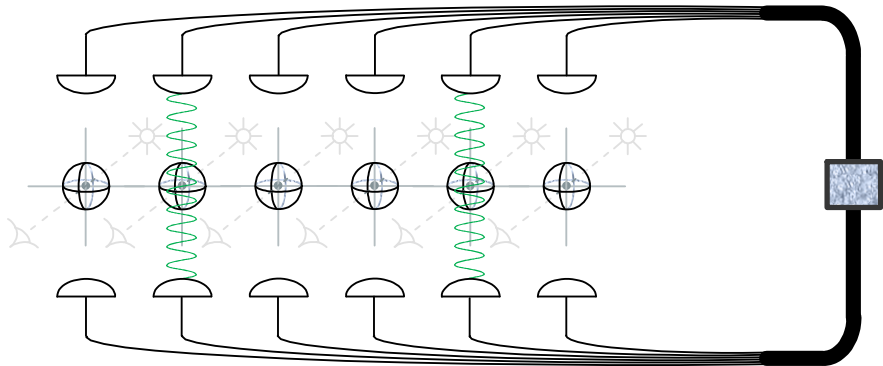
## 2) Квантово изчисление



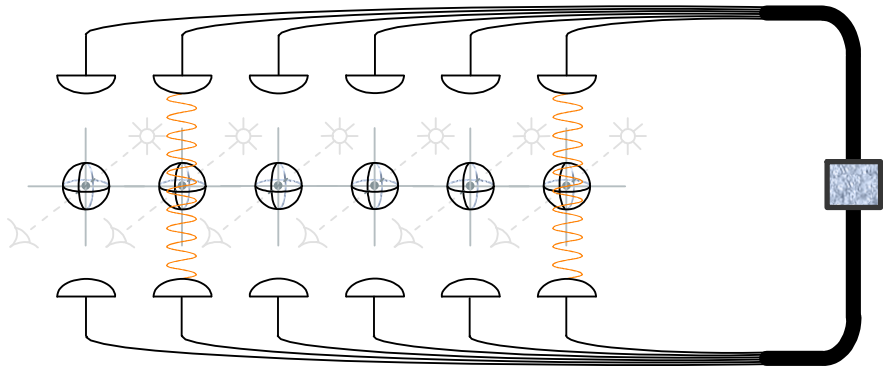
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

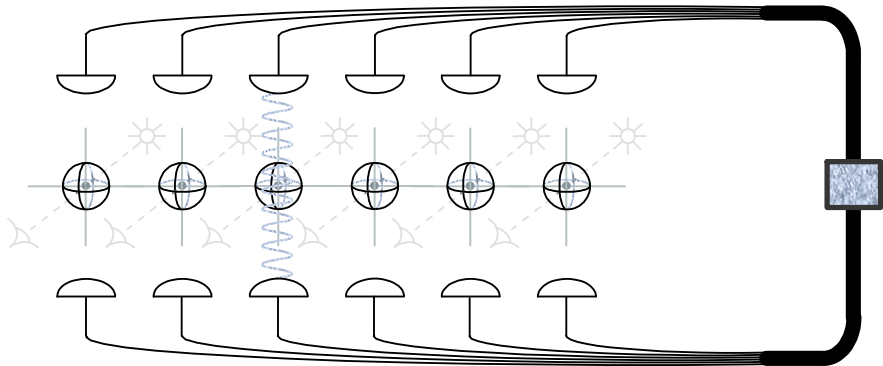
## 2) Квантово изчисление



## 2) Квантово изчисление



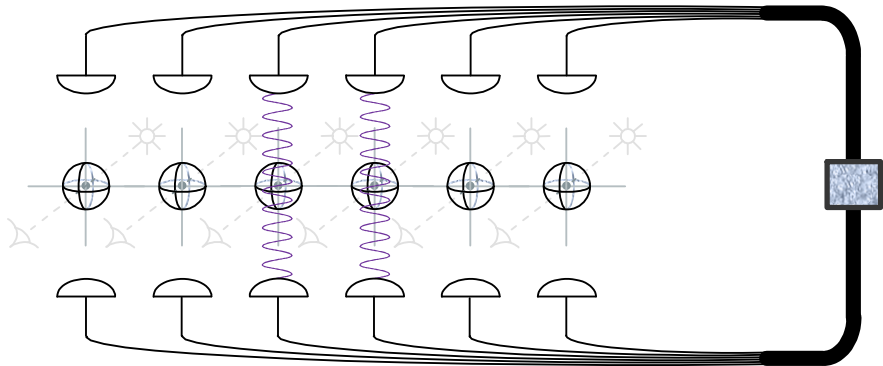
## 2) Квантово изчисление



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

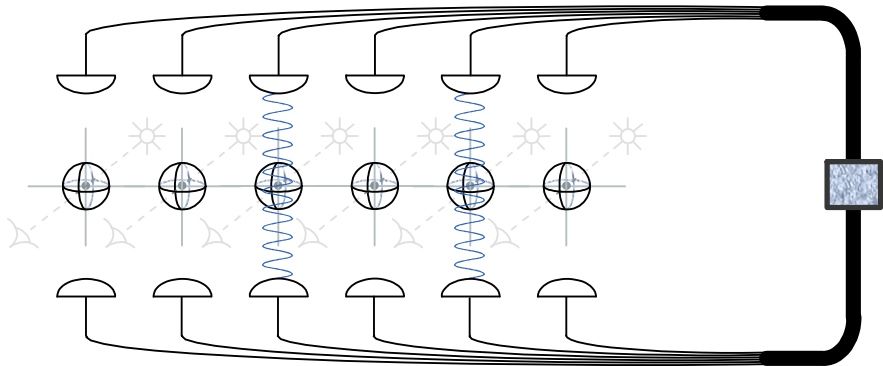
## 2) Квантово изчисление



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

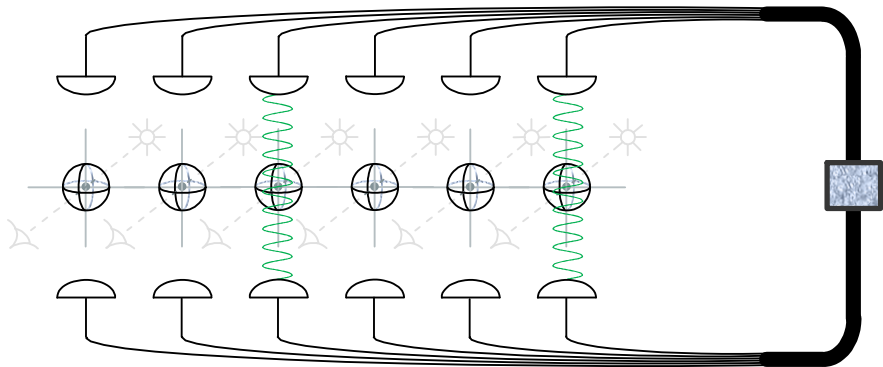
## 2) Квантово изчисление



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

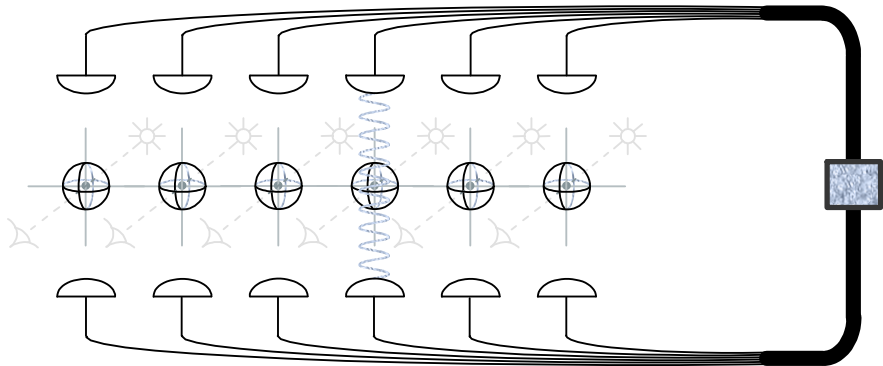
## 2) Квантово изчисление



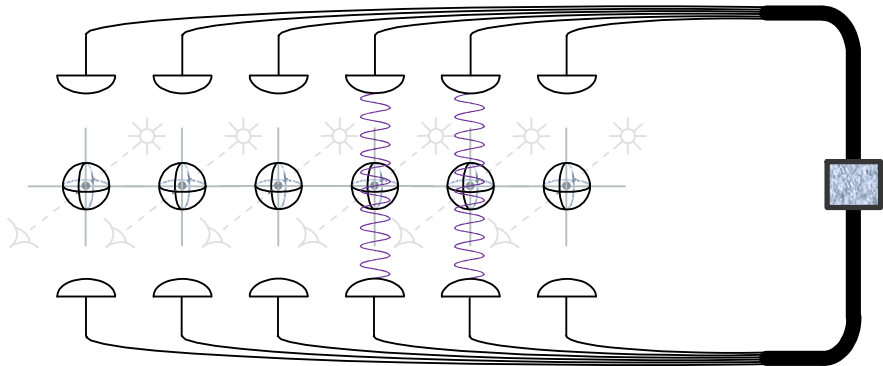
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

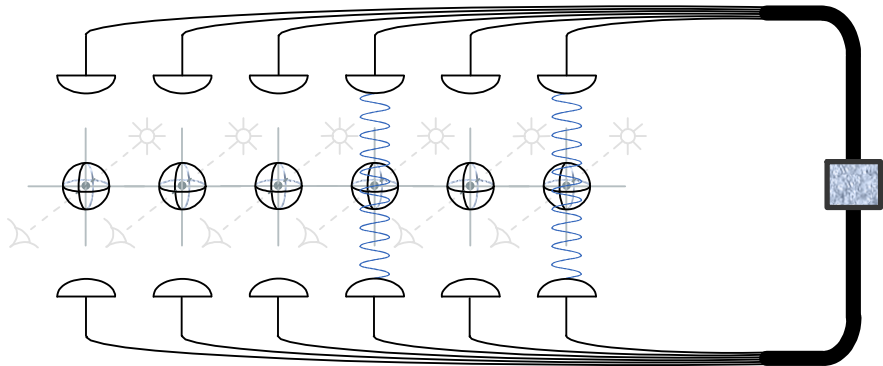
## 2) Квантово изчисление



## 2) Квантово изчисление



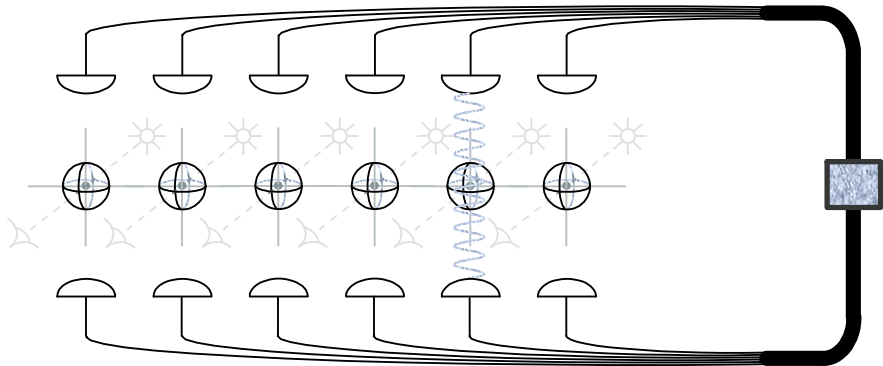
## 2) Квантово изчисление



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

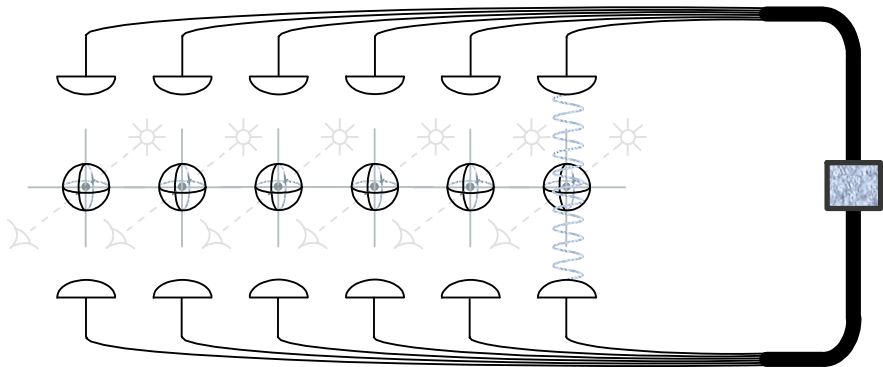
Николай Митов

## 2) Квантово изчисление

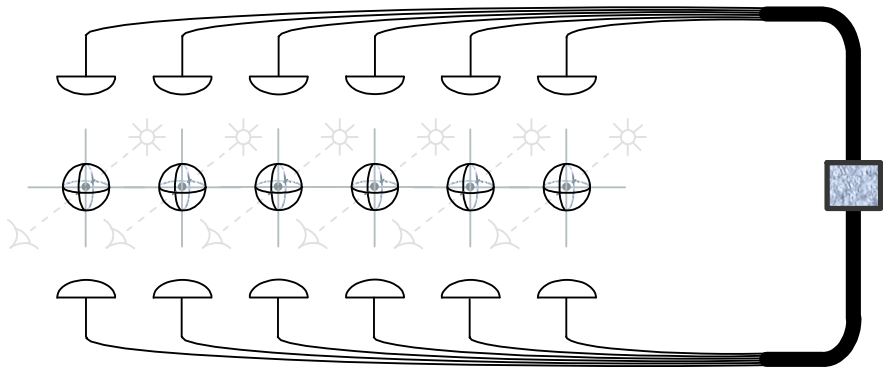




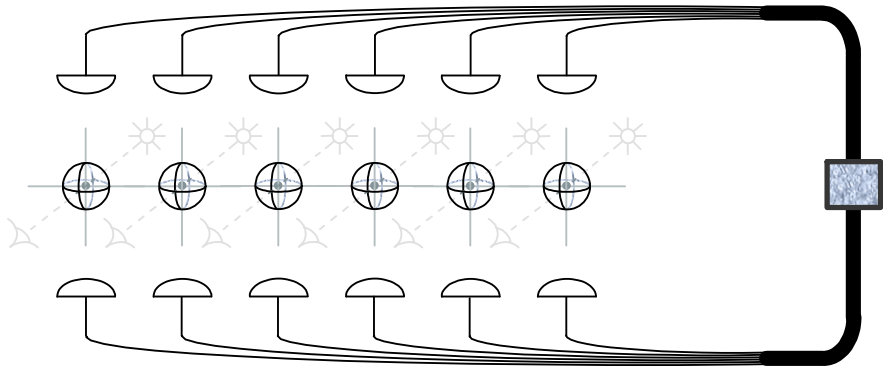
## 2) Квантово изчисление



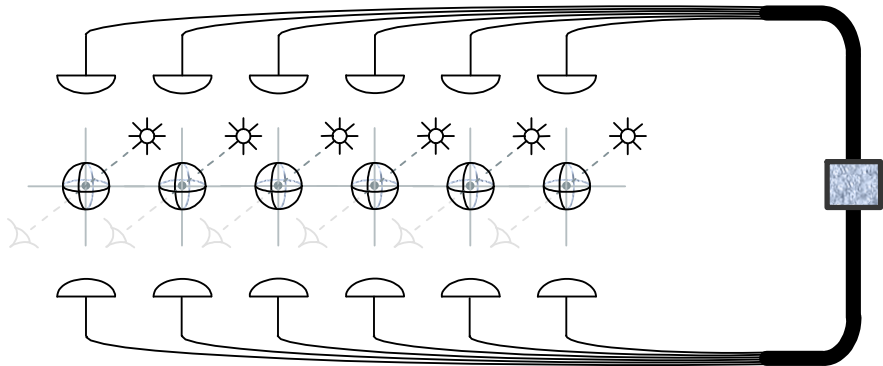
## 2) Квантово изчисление



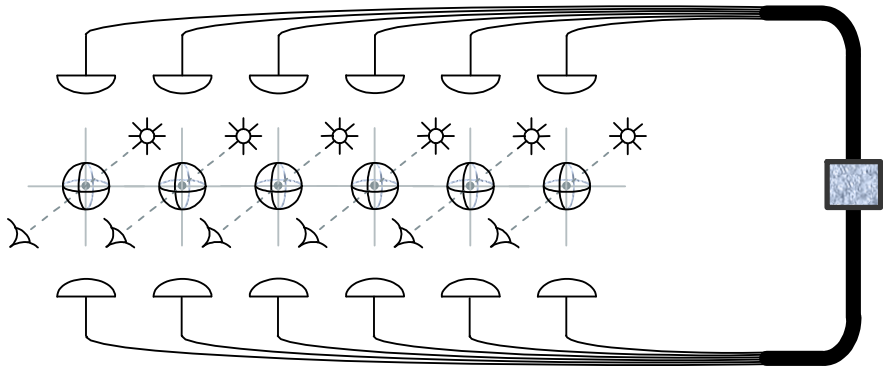
## 3) Измерване на резултата



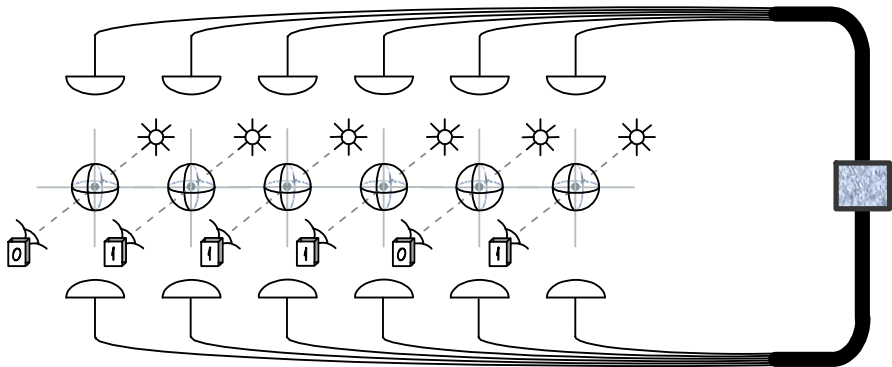
## 3) Измерване на резултата



## 3) Измерване на резултата

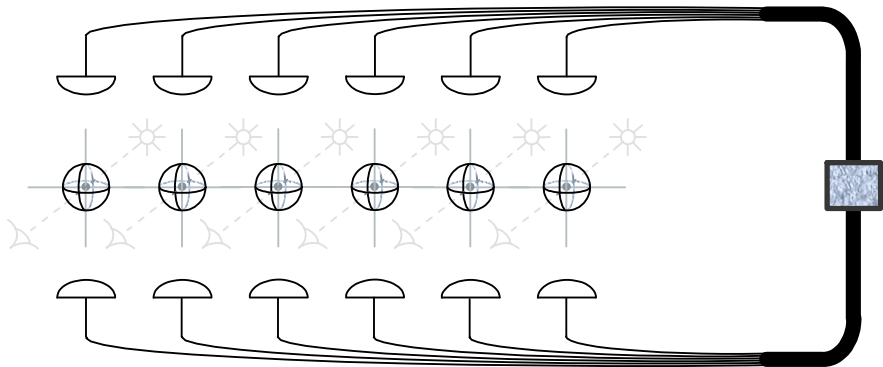


## 3) Измерване на резултата



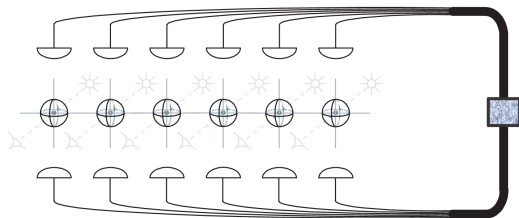
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



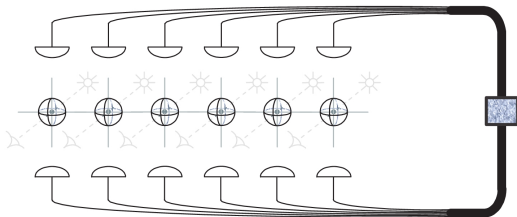
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

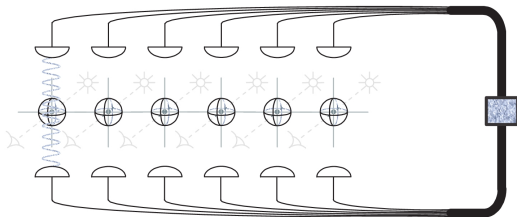
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

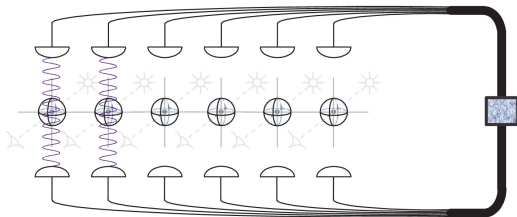
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

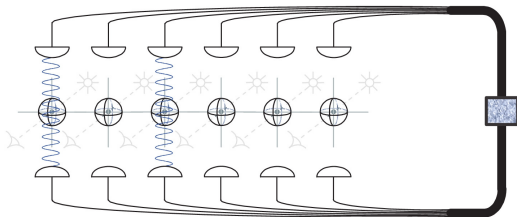
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

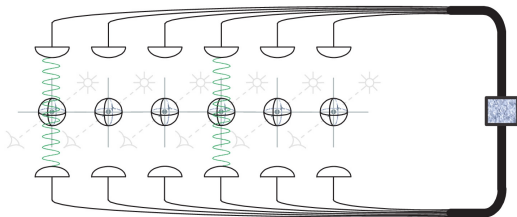
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

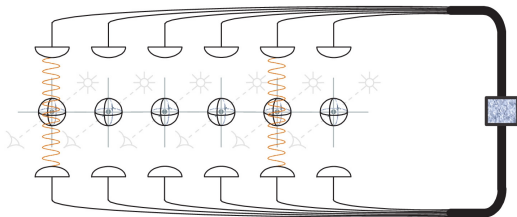
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

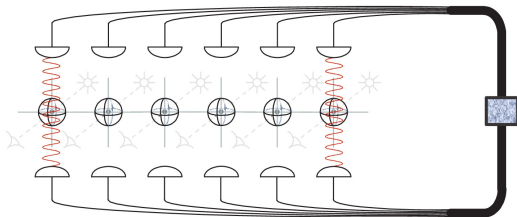
Николай Митов



Гравивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

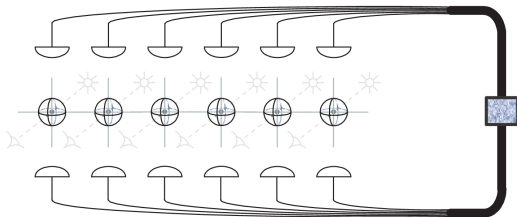
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

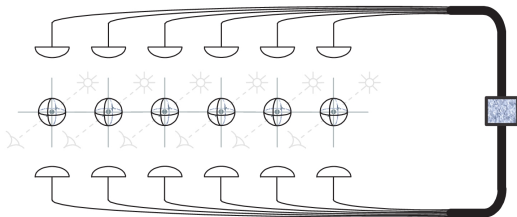
Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

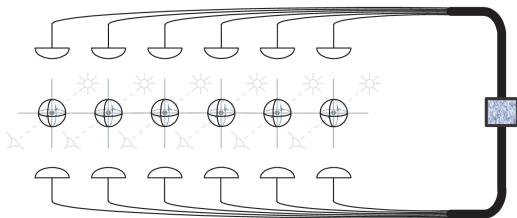


Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).

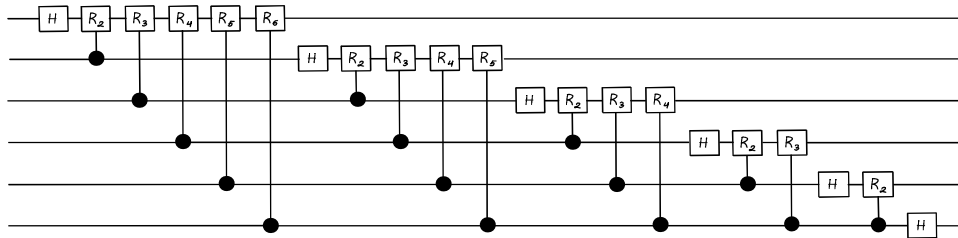
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



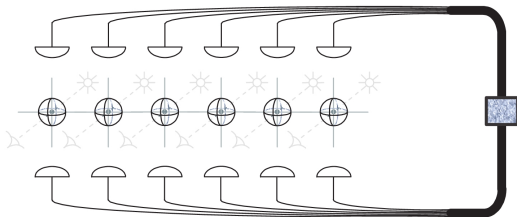
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



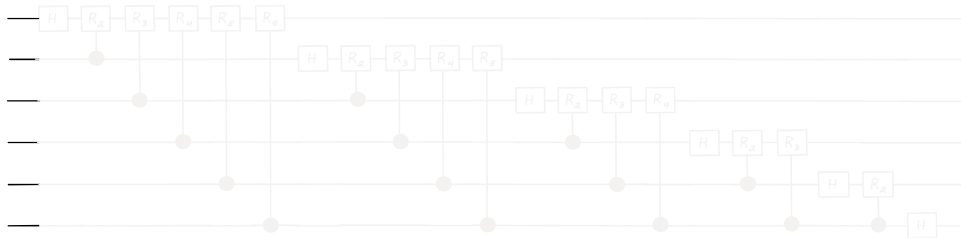
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



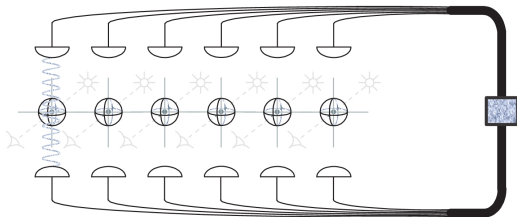
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



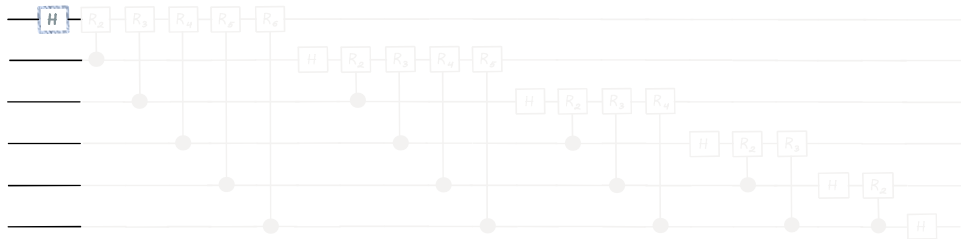
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



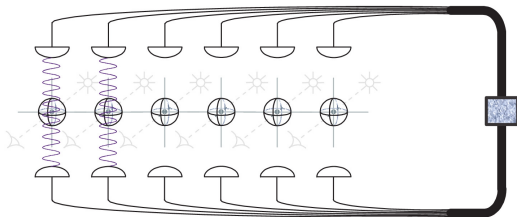
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



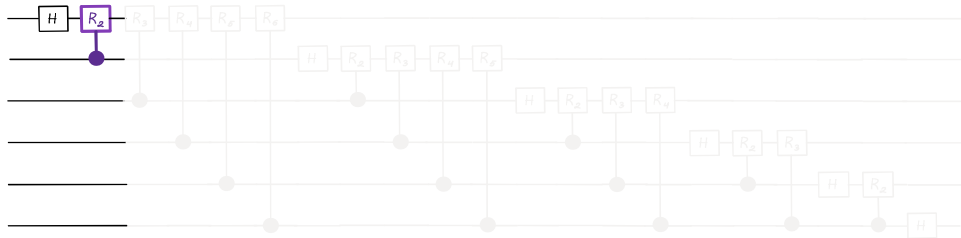
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



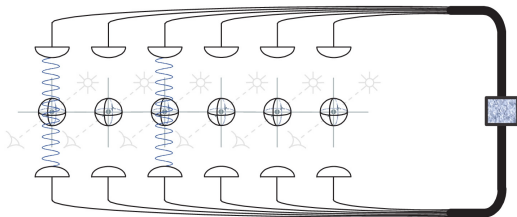
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



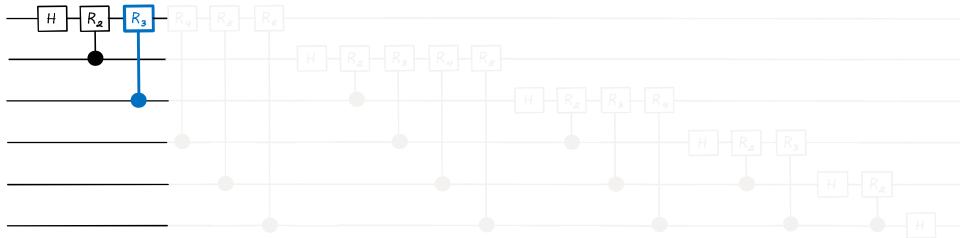
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



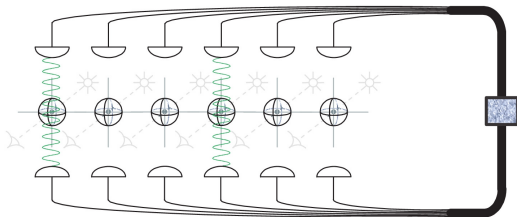
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



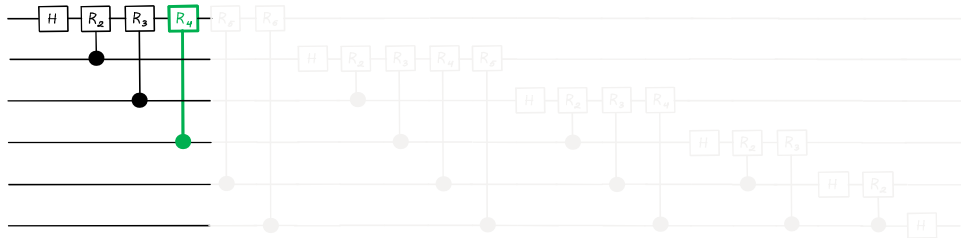
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



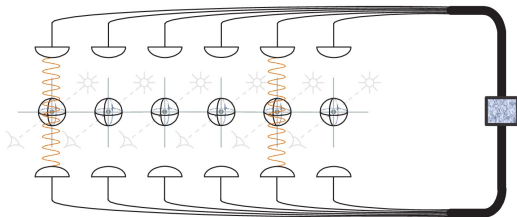
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



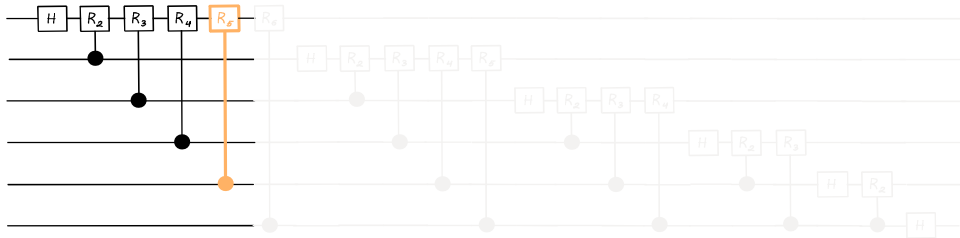
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



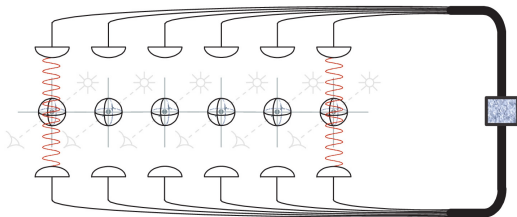
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



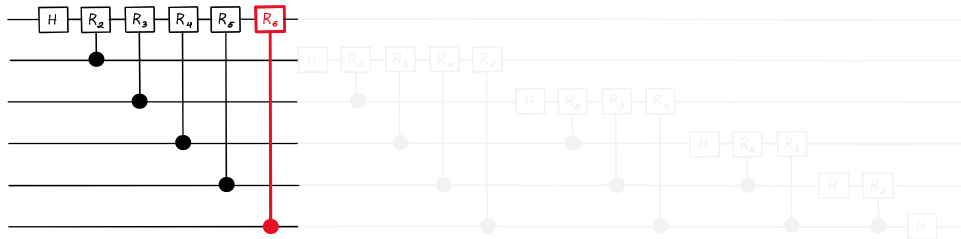
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



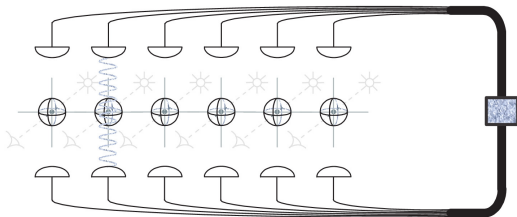
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



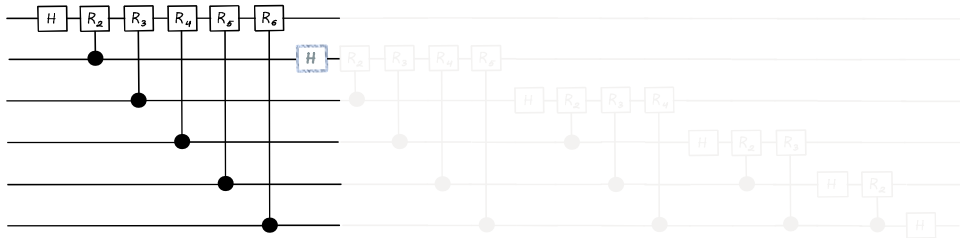
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов

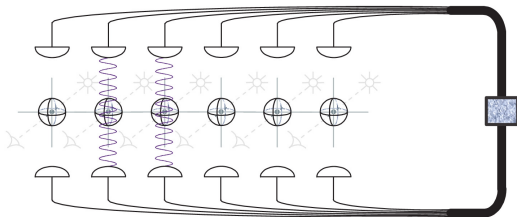


Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

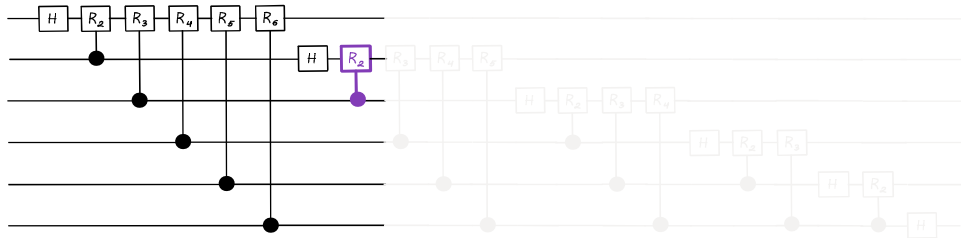
Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



Николай Митов

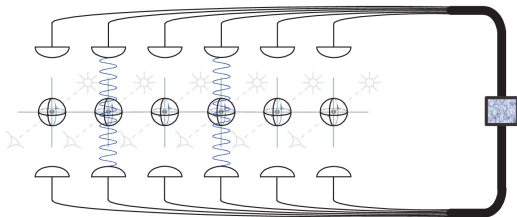


Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



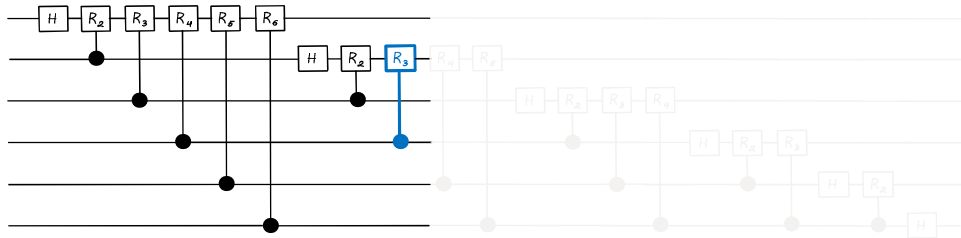
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



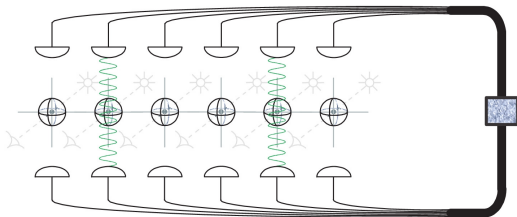
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



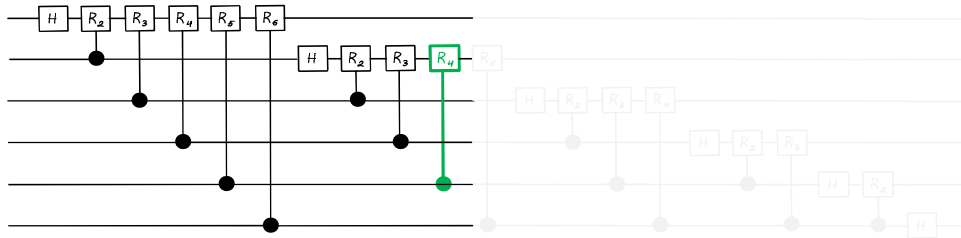
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



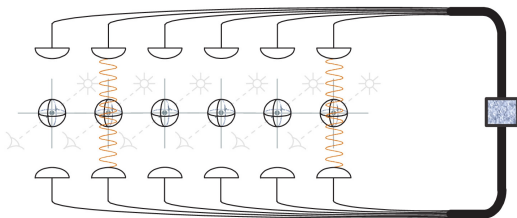
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



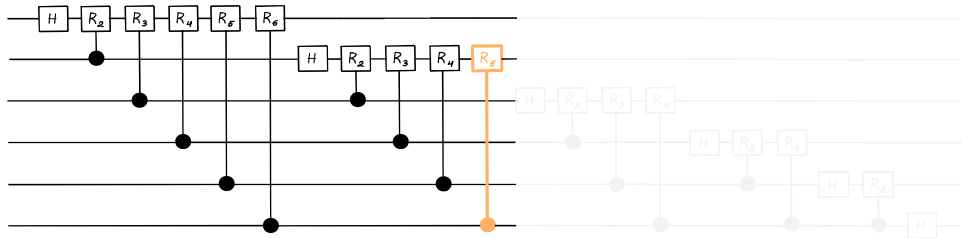
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



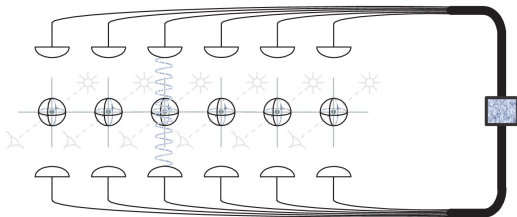
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



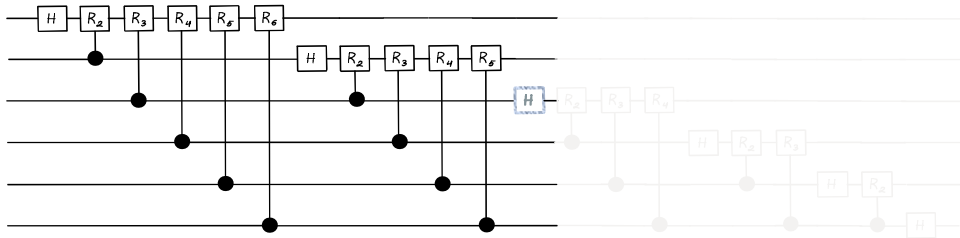
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



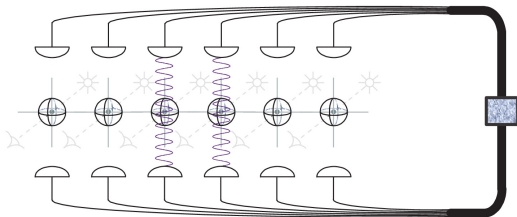
Гравитните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



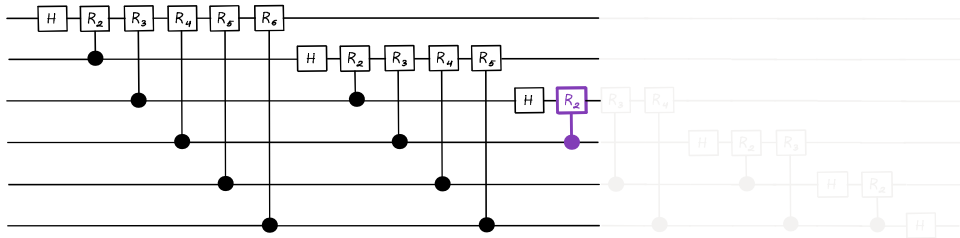
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



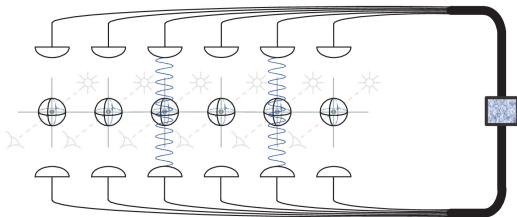
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



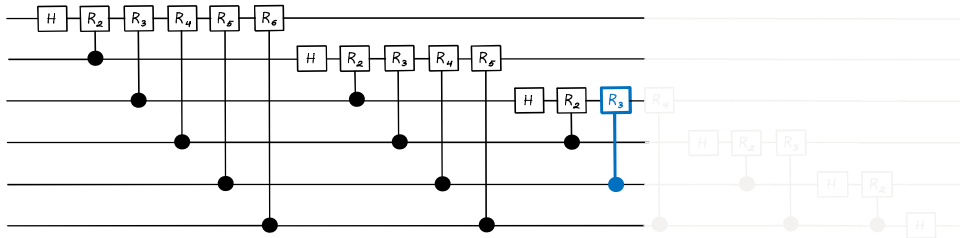
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



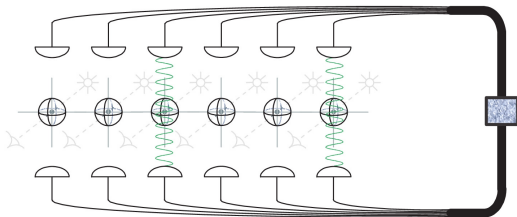
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



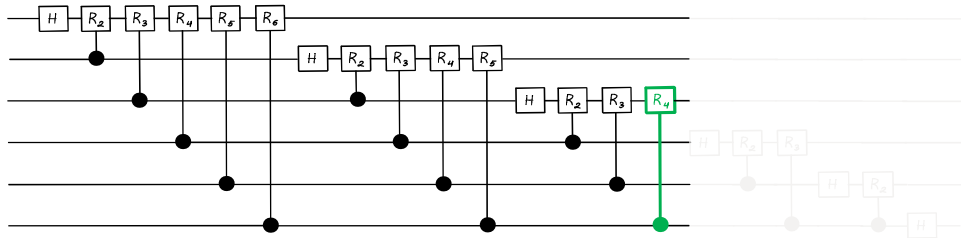
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



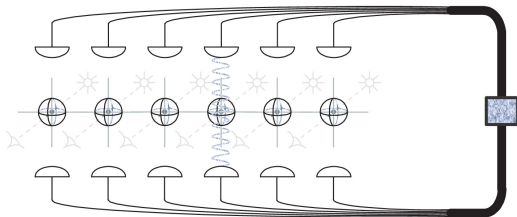
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



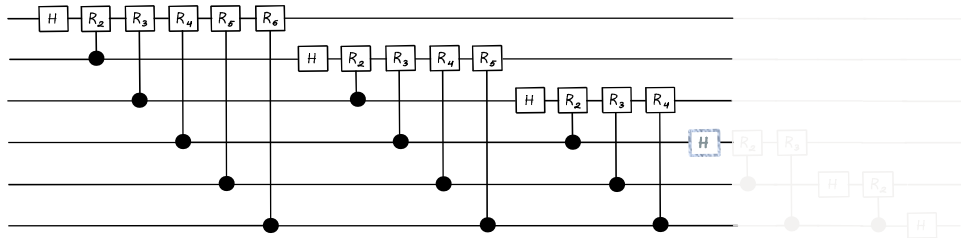
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



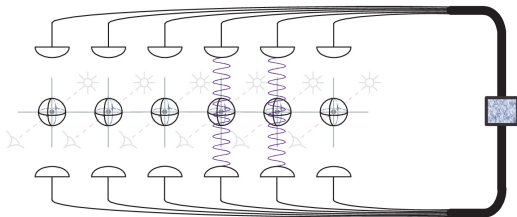
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



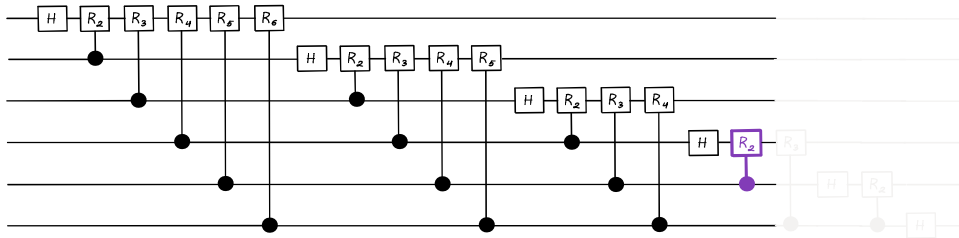
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



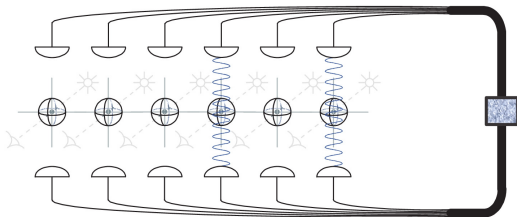
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



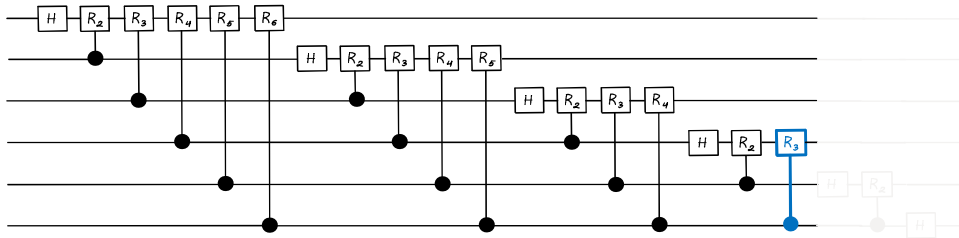
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



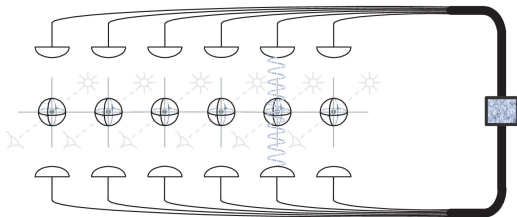
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



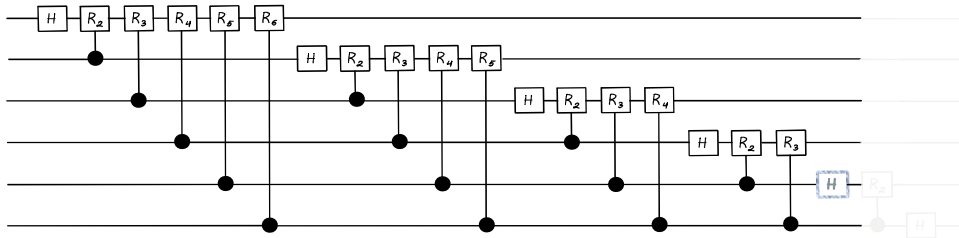
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



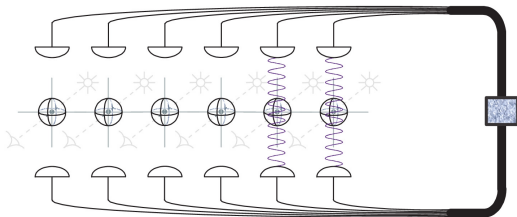
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



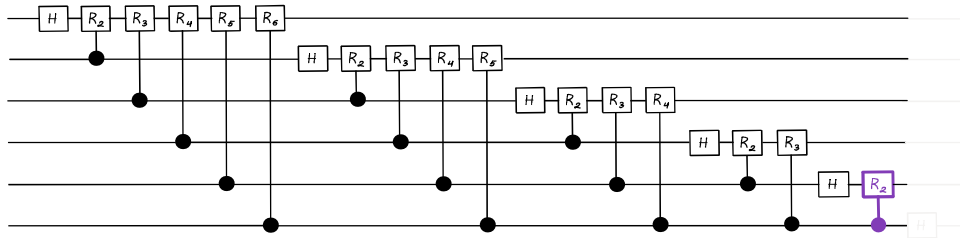
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



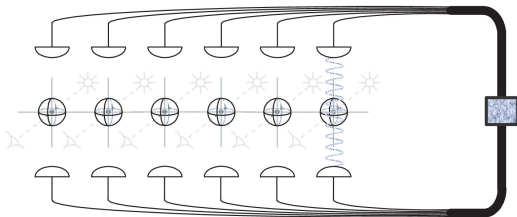
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



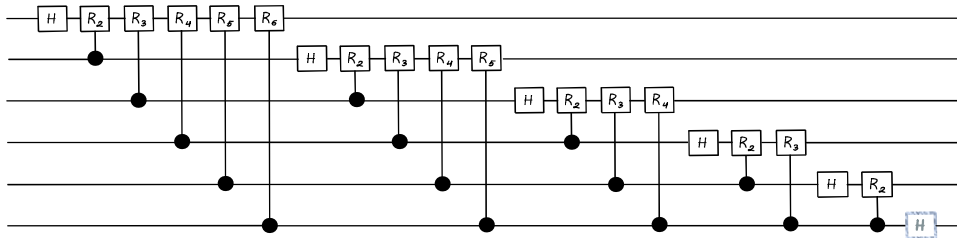
# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



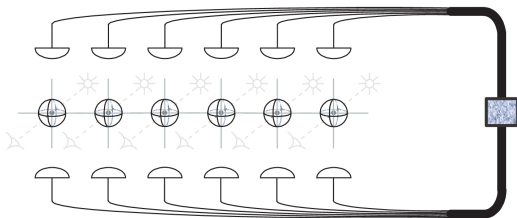
Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).



# Как работи квантовият компютър - илюстрация

Николай Митов



Градивните квантови трансформации, които задават елементарните стъпки, се наричат "квантови операции" (quantum gates).

Тяхната последователност образува "квантова верига" (quantum circuit).

