

КВАНТОВА ИНФОРМАТИКА

Николай М. Николов

Лекция 1 / 10.10.2022, версия 0

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.

**Теоретична
квантова
физика**

**Експериментална
и инженерна
квантова
физика**

Алгебра



**Компютърни
науки**

**Вероятности
и статистика**

**Математическа логика
и теория на алгоритмите**

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 Ω .

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 Ω .

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

Така, свойство = (под)множество
и те са синонимни изрази в този контекст.

УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

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

Така, свойство = (под)множество
и те са синонимни изрази в този контекст.

УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

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 Ω се нарича също *множество на елементарните събития*, а подмножествата $A \subseteq \Omega$ се наричат *събития*.

УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

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

Така, свойство = (под)множество
и те са синонимни изрази в този контекст.

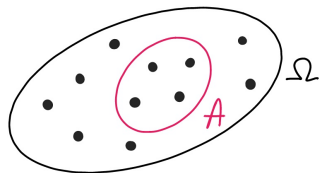
В контекста на теория на вероятностите множеството Ω се нарича също *множество на елементарните събития*, а подмножествата $A \subseteq \Omega$ се наричат *събития*.

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

УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества

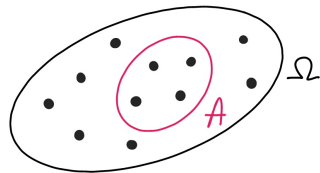
Различните свойства на системата съответстват на подмножества $A \subseteq \Omega$:



Множество на елементарните събития Ω и отделяне на свойство "A", като подмножество на Ω .

УВОД

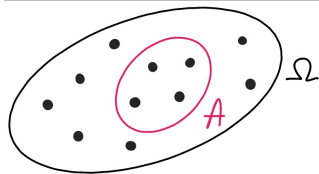
Квантови свойства, квантови събития, квантови множества



Множество на елементарните събития Ω и отделяне на свойство "A", като подмножество на Ω .

УВОД

Квантови свойства, квантови събития, квантови множества



Множество на елементарните събития Ω и отделяне на свойство "A", като подмножество на Ω .

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

$$A \text{ и } B \iff A \cap B,$$

$$A \text{ или } B \iff A \cup B.$$

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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

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

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутиativност на наблюденията

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност –

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

$N(A) :=$ брой на елементи на A

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност –

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

$N(A) :=$ брой на елементи на A

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

то тъждеството:

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутивативност на наблюденията

Количествена илюстрация на класическата еквивалентност

ако означим:

$N(\Omega) :=$ брой на елементи на Ω

$N(A) :=$ брой на елементи на A

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

то тъждеството:

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

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*).

УВОД

Квантов феномен 1: некомутивност на наблюденията

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

Илюстрация на това нарушение дава така неречения:

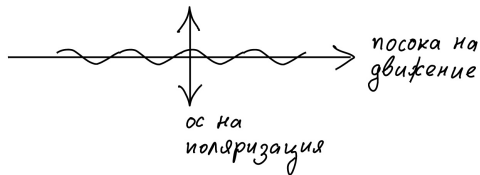
Експеримент с *кръстосани поляризатори*¹

¹crossed polarizer experiment

Илюстрация на това нарушение дава така неречения:

Експеримент с *кръстосани поляризатори*

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



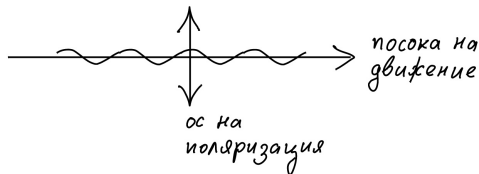
Състоянието на един фотон се описва от една наредена тройка (посока на движение, енергия, вътрешно състояние). Вътрешното състояние на фотона съответства на така наречената *поляризация* на фотона.

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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.

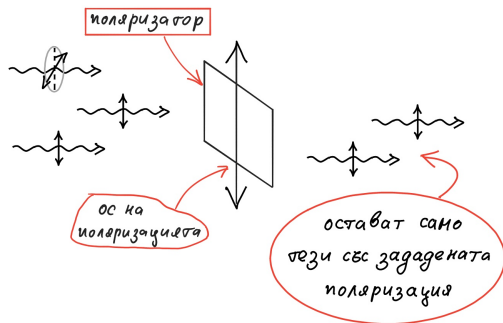


Така, ако група фотони се разпространяват в една и съща посока, то от тях може да бъде отделено подмножество, които имат еднаква “линейна поляризация” – вид “свойство”.

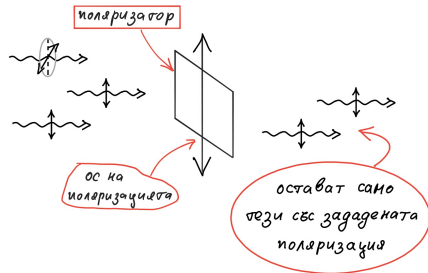
Отделянето на фотони с фиксирана линейна поляризация се извършва чрез филтри, наречени *поляризатори*.

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 α спрямо първия.

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

Експеримент с кръстосани поляризатори

резултат от теорията и експеримента



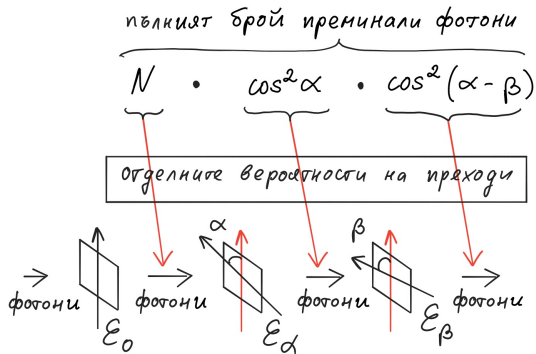
Важно е да се отбележи, че ние може да пускаме фотоните един по един и в този случай един фотон преминава или напълно не преминава през всеки поляризатор.

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:

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

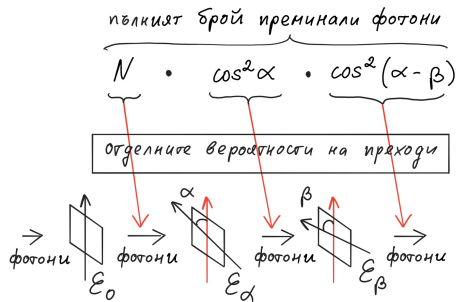
Следователно е разлика възможна, например при $\alpha = 45^\circ$ и $\beta = 90^\circ$:

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутиativност на наблюденията

Експеримент с кръстосани поляризатори



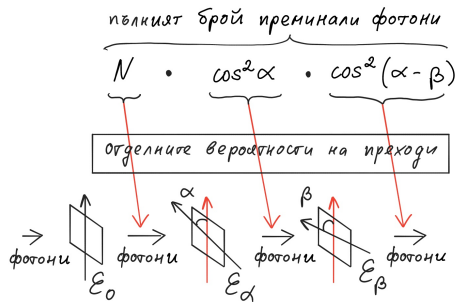
В разгледания експеримент, свойството (събитието) A отговаря на поляризация под ъгъл α (E_α), а B на поляризация под ъгъл β .

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

Експеримент с кръстосани поляризатори



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

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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*).

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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.

УВОД

Квантов феномен 1: некомутиративност на наблюденията

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

УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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



УВОД

Квантов феномен 1: некомутативност на наблюденията

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”.

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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

УВОД

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* ”.

УВОД

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).

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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**.

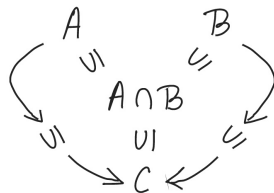
УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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



УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

Логическите операции при тази конструкция остават винаги комутативни:

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

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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?

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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

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

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

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

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

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

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

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

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

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

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

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

В квантови системи дистрибутивните закони се нарушават:

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

УВОД

Квантово-логическите операции и тяхната недистрибутивност

В квантови системи дистрибутивните закони се нарушават:

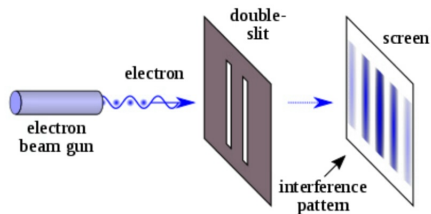
имаме, $(A \text{ или } B) \text{ и } C \neq (A \text{ и } C) \text{ или } (B \text{ и } C)$,
 $(A \text{ и } B) \text{ или } C \neq (A \text{ или } C) \text{ и } (B \text{ или } C)$.

Това следва от:

Квантов феномен 2: интерференция на вероятността

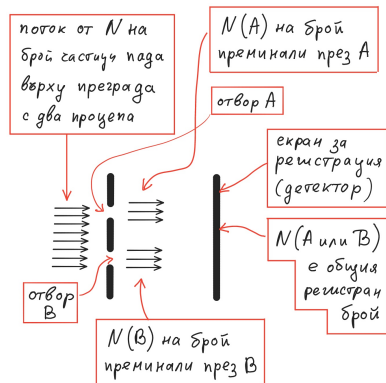
Експеримент с *двоен процен*²

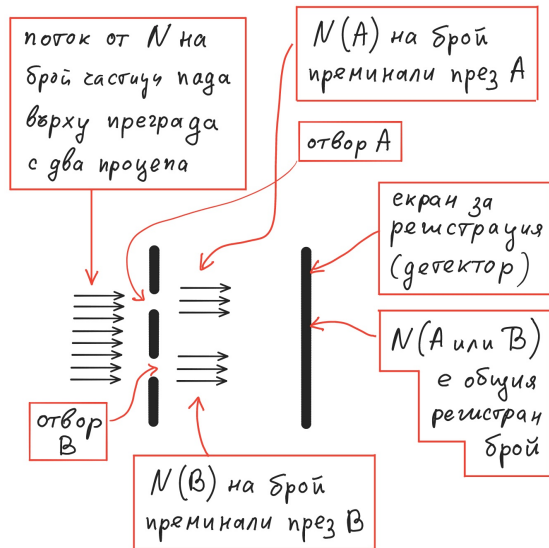
Опитната постановка
в реалистичен вид



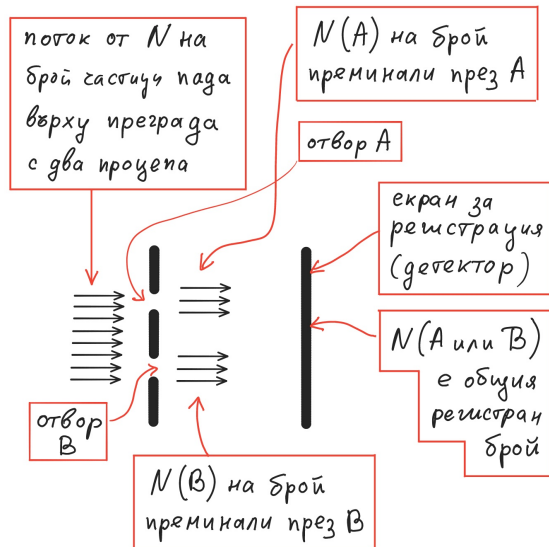
²double-slit experiment

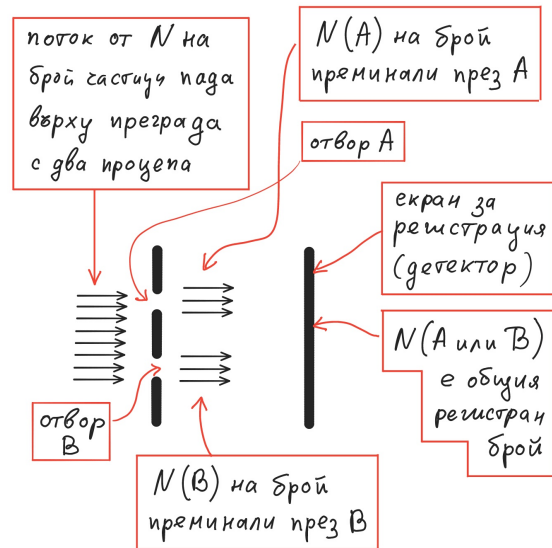
Експеримент с двоен процеп





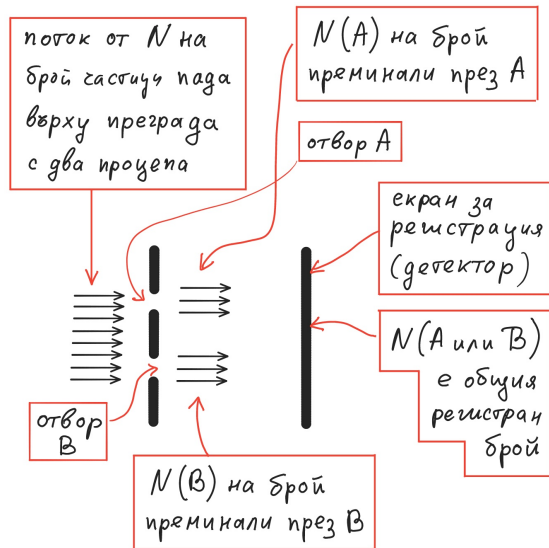
Случай (1): изследва се общото количество на преминалите частици





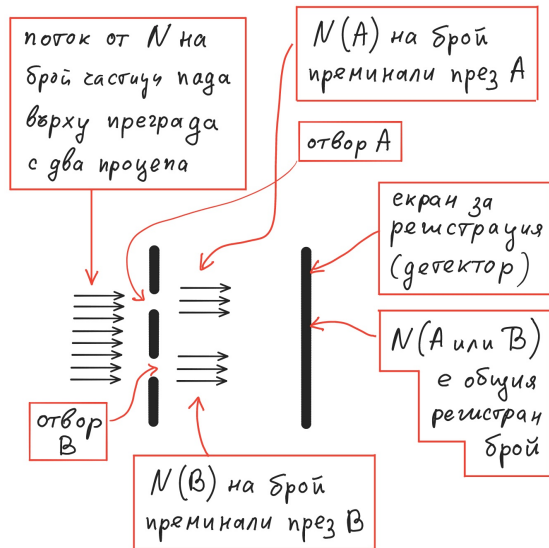
Случай (1): изследва се общото количество на преминалите частици:

(1_A) отворен е само процес A , при което определяме $N(A)$;



Случай (1): изследва се общото количество на преминалите частици:

- (1_A) отворен е само процеп A , при което определяме $N(A)$;
- (1_B) отворен е само процеп B , при което определяме $N(B)$;



Случай (1): изследва се общото количество на преминалите частици:

(1_A) отворен е само процеп A , при което определяме $N(A)$;

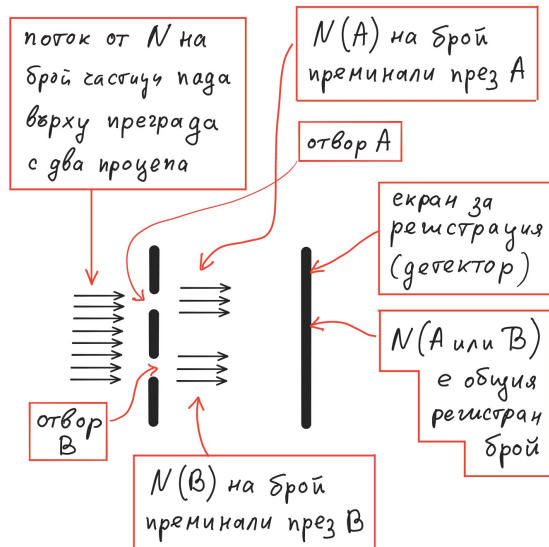
(1_B) отворен е само процеп B , при което определяме $N(B)$;

(1_{A или B}) отворени са A и B , т.е. всяка частица преминава през A или B и следователно, така определяме $N(A \text{ или } B)$.

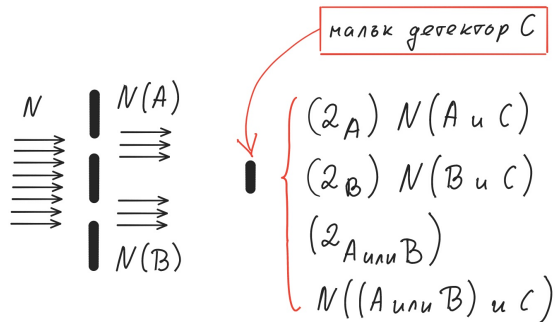
Случай (1): изследва се общото количество на преминалите частици.

Резултат:

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



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



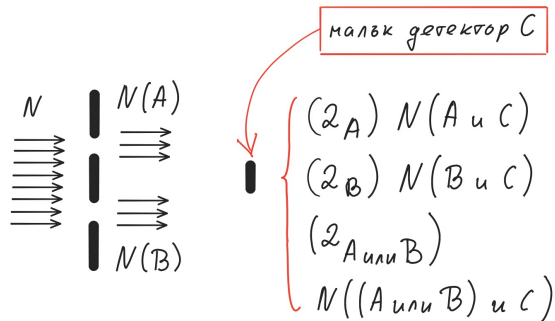
Случай (2): зад процепите е поставен малък екран (детектор) C :

(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 или B}) отворени са A и B .

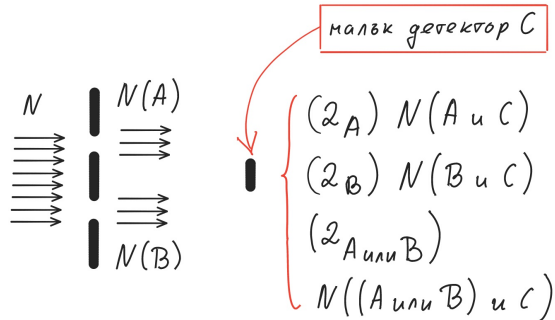
В C се регистрират $N((A \text{ или } B) \text{ и } C)$ на брой частици.



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

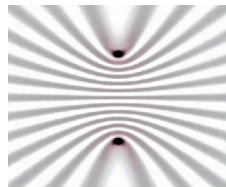
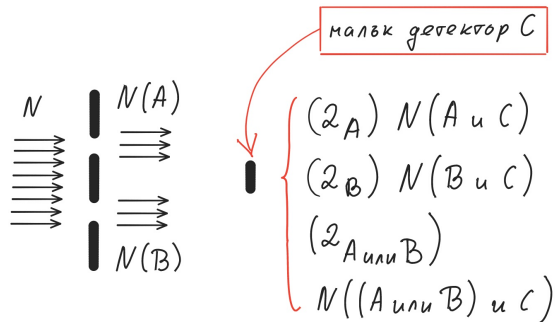
Резултат:

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

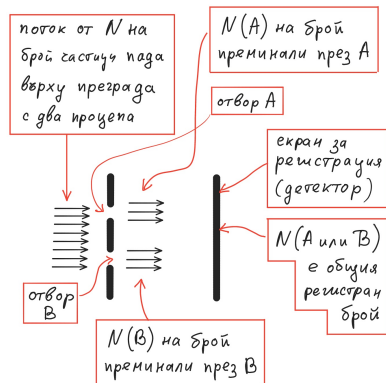


Случай (2): зад процепите
е поставен малък екран
(детектор) C :

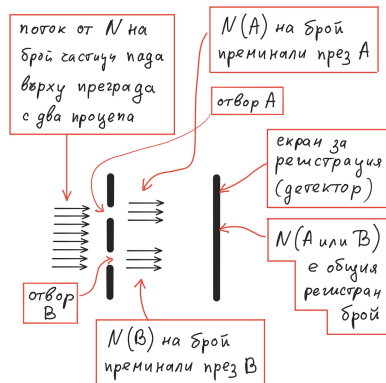
Резултат:



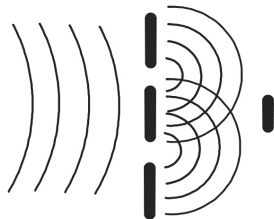
Експеримент с двоен процеп



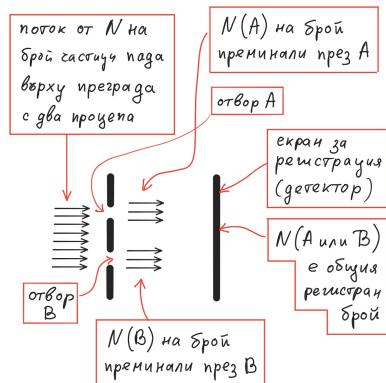
Експеримент с двоен процеп



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

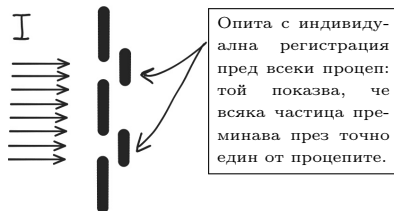


Експеримент с двоен процеп

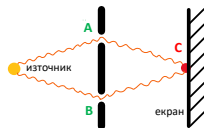


Първи опит за интерпретация: имаме работа не с частици, а с вълни, и наблюдаваме явлението *интерференция*

Опровергава се от:



Експеримент с двоен процеп

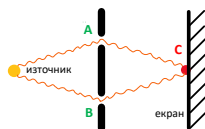


И така, констатирахме, че за една частица
да премине през A и да попадне в C
или да премине през B и да попадне в C

не е същото, като

да премине без проследяване през
 A или B и да попадне в C .

Експеримент с двоен процеп



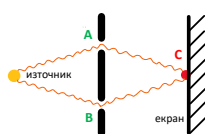
$$\left(\left(\begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\ \text{през A} \end{array} \right) \text{ и } \left(\begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{пристига} \\ \text{в C} \end{array} \right) \right) \text{ или } \left(\left(\begin{array}{c} \text{Частичката} \\ \text{преминава} \\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

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

УВОД

Квантов феномен 2: интерференция на вероятността

Експеримент с двоен процеп



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

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

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.

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Експериментът по-горе в малко по-абстрактен вариант:

УВОД

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”.

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Експериментът по-горе в малко по-абстрактен вариант:

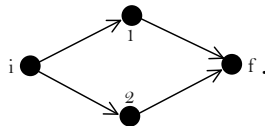
преход на система между две състояния,

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 $i \rightarrow 2 \rightarrow f$:

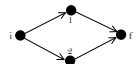


УВОД

Амплитуди вместо вероятности

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

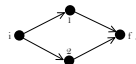
$$p_{i,f} = p_{i,1} p_{1,f} + p_{i,2} p_{2,f}$$

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Два канала за преход:

$$i \rightarrow 1 \rightarrow f \text{ и } i \rightarrow 2 \rightarrow f:$$



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

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

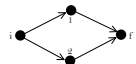
В този случай обаче не се наблюдава “интерференцията” (т.е., погасяването) на вероятността от експеримента по-горе.

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

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

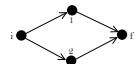
$$p_{i,f} = p_{i,1} p_{1,f} + p_{i,2} p_{2,f}$$

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Два канала за преход:

$$i \rightarrow 1 \rightarrow f \text{ и } i \rightarrow 2 \rightarrow f:$$



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

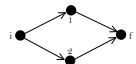
$$a_{i,f} = a_{i,1} a_{1,f} + a_{i,2} a_{2,f}$$

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Два канала за преход:

$$i \rightarrow 1 \rightarrow f \text{ и } i \rightarrow 2 \rightarrow f:$$



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

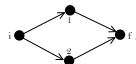
$$\begin{aligned} p_{i,1} &= |a_{i,1}|^2, & p_{i,2} &= |a_{i,2}|^2, \\ p_{1,f} &= |a_{1,f}|^2, & p_{2,f} &= |a_{2,f}|^2, & p_{i,f} &= |a_{i,f}|^2. \end{aligned}$$

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

Два канала за преход:

$$i \rightarrow 1 \rightarrow f \text{ и } i \rightarrow 2 \rightarrow f:$$



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

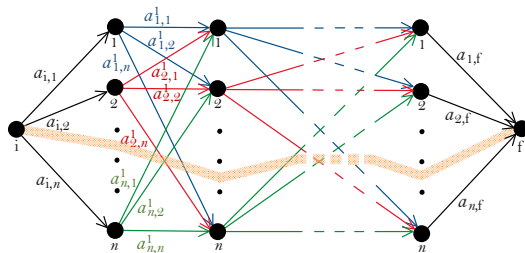
$$p_{i,1} = |a_{i,1}|^2, \quad p_{i,2} = |a_{i,2}|^2, \\ p_{1,f} = |a_{1,f}|^2, \quad p_{2,f} = |a_{2,f}|^2, \quad p_{i,f} = |a_{i,f}|^2.$$

Наричат се: *амплитуди на вероятността*.

УВОД

Амплитуди вместо вероятности

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.

УВОД

Други теми от курса:

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

Теоретична
квантова
физика

Алгебра

Експериментална
и инженерна
квантова
физика



Компютърни
науки

Вероятности
и статистика

Математическа логика
и теория на алгоритмите