

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ

Достигахме до феномена “квантово сплитане”.

Той води изключително впечатляващи неклассически ефекти и е в основата на много фундаментални квантови феномени, както и има редица важни приложения.

Квантовото сплитане се отнася до системи, състоящи се от няколко обекта, например, частици.

Всъщност, основното тук е, че можем да отделим две групи от измервания, нещо като две лаборатории, “А” и “В”, чийто измервания са две по две съвместими, тоест, измерванията от лаборатория “А” не мога да влияят на тези в лаборатория “В” и обратното.

Още веднъж казано, измерванията от лаборатории “А” и “В” са две по две взаимно комутиращи измервания и следователно, според копенхагенската интерпретация, резултатите им могат да се приписват едновременно на изследваните обекти.

На фигурата сме показали хипотетичното локализиране на електрони в атоми.

По определение, квантовото сплитане е чисто състояние на общата система, в случая на всички атоми взети заедно, при което обаче отделните съставляващи подсистеми, в случая, частиците изграждащи атомите, не се намират в определени чисти състояния.

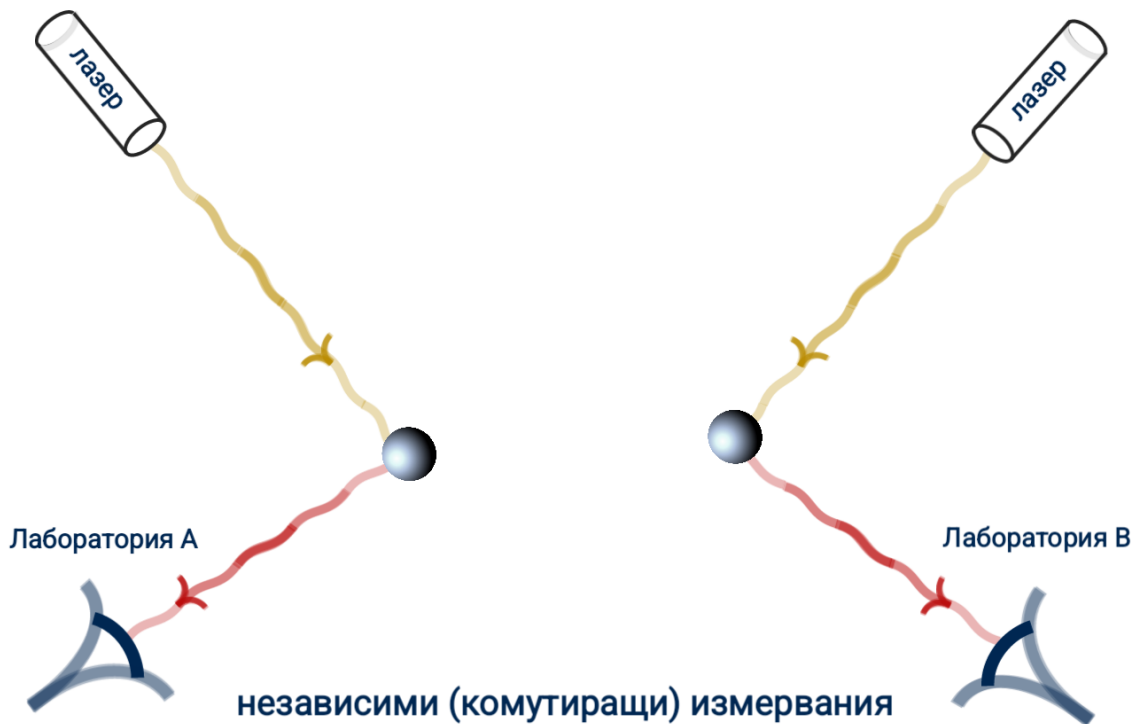
Разбира се, възможна е ситуация, когато всички градивни частици по отделно са в чисти състояния и заедно с това се оказва, че и пълната система е в общо чисто състояние.

Тогава казваме, че общото състояние е несплетено.

При квантовото сплитане обаче възниква суперпозиция на несплетени състояния и затова се оказва, че на отделните частици на системата не могат вече да се припишат самостоятелни чисти състояния.

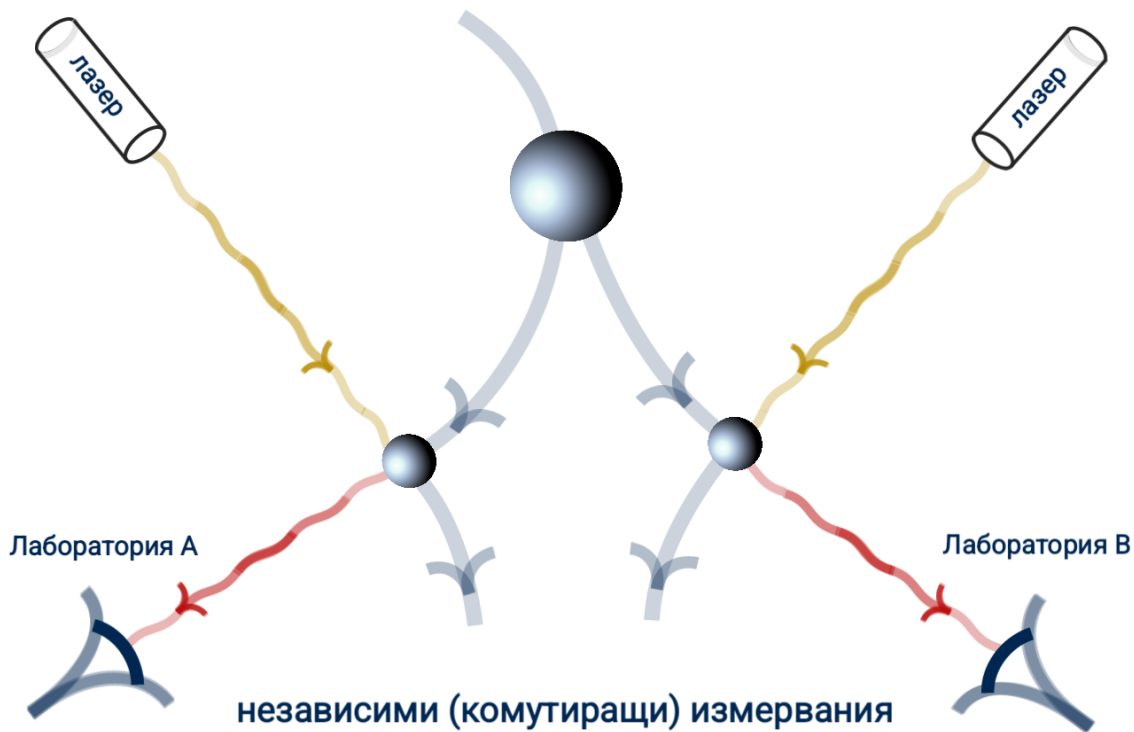


КВАНТОВО СПЛИТАНЕ



Много са механизмите, по които възниква квантовото сплитане.

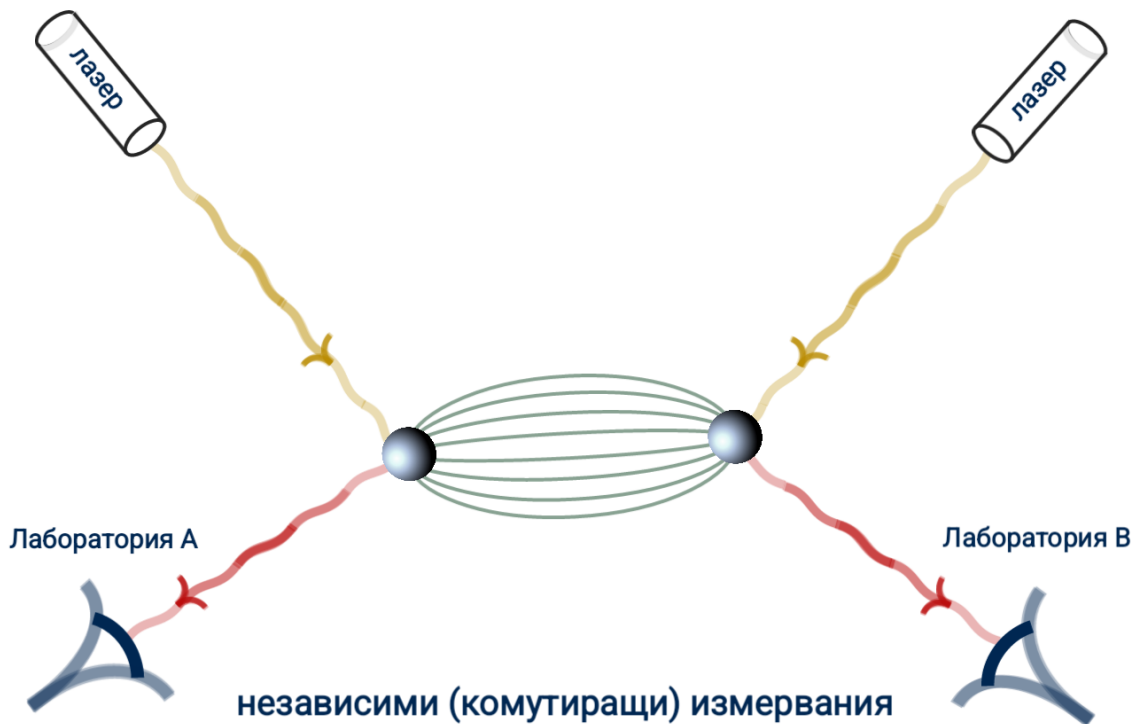
КВАНТОВО СПЛИТАНЕ



Например, това може да се получи при разпад на частица на други две.

Общият произход в случая води сплитане между родените частици

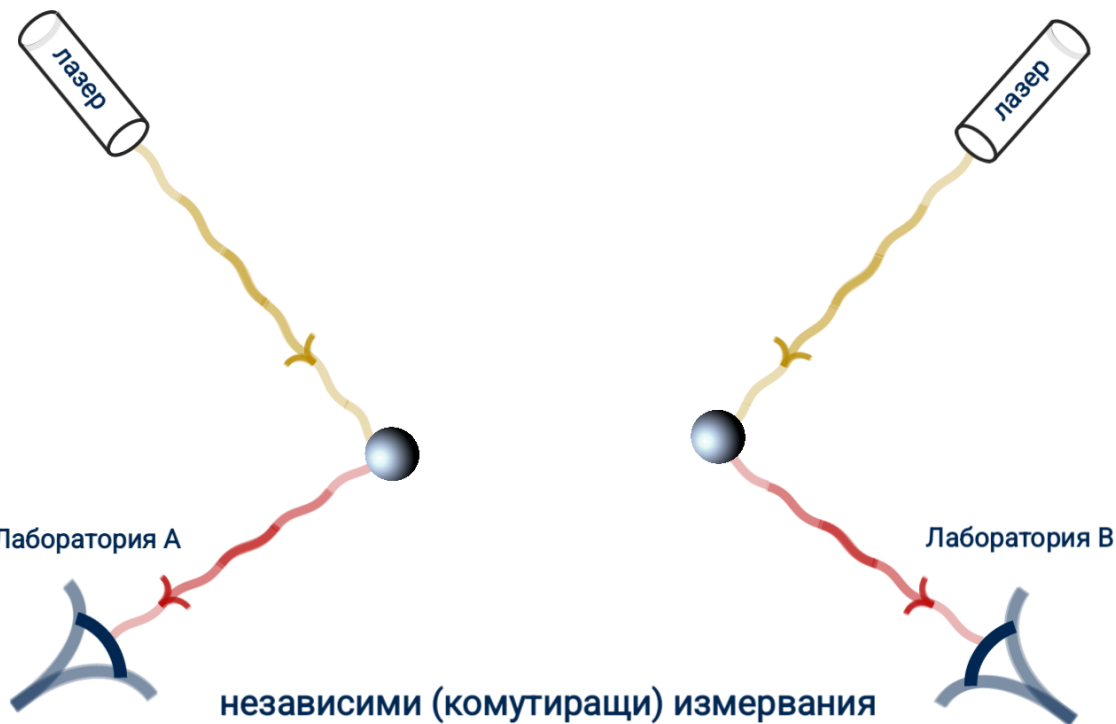
КВАНТОВО СПЛИТАНЕ



Но далеч по-често срещана причина за сплитането е просто взаимодействието между частиците.

Квантовите взаимодействия по правило водят до сплитане.

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ И НЕЛОКАЛНОСТ



Квантовото сплитане води до корелации много по-силни от класически възможните корелации, които биха възникнали при класическо вероятно смесване на несплетени състояния, а не, както е при квантовото сплитане, суперпозиция на несплетени състояния.

Тази по-силни корелации се изразяват в определена нелокалност на квантовите състояния, нещо което сега ще се постараям да обясним.

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



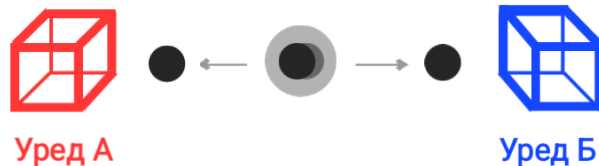
В основата на този ефект стои една постановка, предложена първоначално от Айнщайн, Подолски и Розен през 1935.

Те са представили мислен експеримент, целящ да представи една парадоксална ситуация, произтичаща от принципите на квантовата механика, в следствие на което да се заключи, че квантово-механичното описание на физичната реалност не може да бъде пълно.

Затова и този мислен експеримент, често се нарича и "парадокс на Айнщайн – Подолски – Розен", накратко, "АПР".

Разбира се, както и за котката на Шрьюдингер, тук няма никакъв парадокс, но обаче съвсем реален и силно неклассически феномен на нелокалност на квантовите състояния, който ще видим нагледно илюстриран след малко.

В крайна сметка, АПР постановката е дала, както ще видим, реална експериментална обосновка на принципите на квантовата физика и по-специално, на интерпретацията на несъвместимост на резултатите при некомутиращи измервания, за която говорихме по-рано.



MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



АПР постановката разглежда едно квантово сплитане между две частици, получено в следствие на общо рождение, което споменахме преди малко.

Примерно: частица се разпада на други две,

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



както е илюстрирано, в резултат на това общата система се намира в сплетено състояние, тоест това е чисто състояние, при което отделните частици не са в самостоятелни чисти състояния.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



Уред А



Уред Б

Накрая се прилагат определени измервания върху отделните частици.

Такива, както споменахме в началото на темата за квантовото сплитане, са възможни и се считат за взаимно комутиращи измервания, тоест, за измервания които не си влияят едно на друго и резултатите, от които могат да се вземат едновременно или по-точно казано, съвместно.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



И тук се прилага се следния трик: оказва се, че има специално сплетено състояние, което се получава в следствие на специално избрано състояние на изходната разпадаща се частица така, че ако накрая върху двете родени частици се приложат измервания от един и същи вид, то би се получил пълен, 100% синхрон на резултатите.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



Класическа аналогия

За илюстрация, може да си представим следната ситуация, която се явява пълен класически аналог на току що описания синхрон.

Налага се да изследваме определен хранителен продукт, например, сирене.

Ако вземаме проби от едно и също място и върху тях извършим еднакви тестове, това са съответно реактивите в двете епруветки, то резултатите съвсем естествено ще бъдат еднакви, поне дотолкова, доколкото тестовите са прецизно уеднаквени.

Накратко и тук, при еднакви тестове очакваме пълен, 100% синхрон на резултатите.



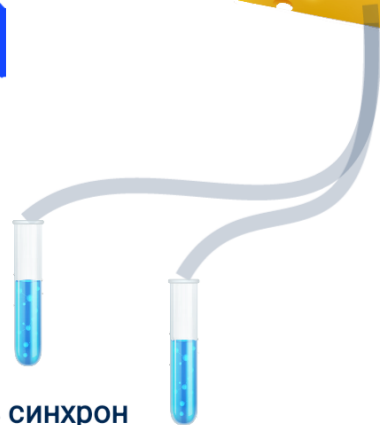
Уред А



100% синхрон



Уред Б



100% синхрон

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



Класически АВАНТАЖ

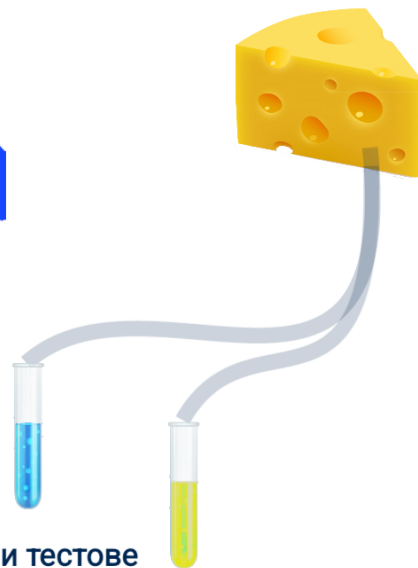
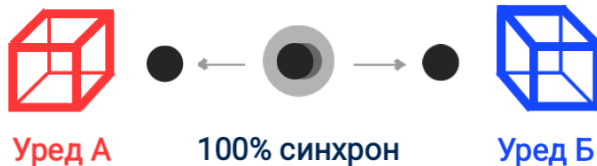
Този класически синхрон е разбира се съвсем банален, но може да се превърне в истински авантаж, ако решим вместо еднакви тестове да извършваме различни тестове: това са синия и жълтия реактиви в епруветките.

В крайна сметка, всеки реактив унищожава пробата и ако искаме да изследваме различни показатели с различни реактиви се налага да правим точно това.

И тук идва най-тънкия момент, в класическия случай, без всякакво съмнение, ние съотнасяме резултатите от двете проби и към двете взети заедно и разбира се, заедно с това и към цялото сиренето, дотолкова, доколкото го считаме за хомогенно.

Хомогенността на сиренето не е най-важната в случая, а преди всичко факта, че и на двете взети проби в класическия случай, можем да съпоставим съвместно и двата получени резултата.

Това го правим именно на основание на установения вече синхрон между пробите, независимо колкото и банален, и очевиден да ни се струва той.



КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Нека сега да се опитаме да приложим този класически авантаж от лабораторните практики в квантовия случай.

Точно това са предлага в АПР: в уредите "А" и "В" да се провеждат вече не еднакви, а различни тестове, след като вече сме се убедили експериментално, че при еднакви тестове бихме имали пълен, 100% синхрон между резултатите.

Тогава може ли да припишем резултатите от двата уреда едновременно и към двете частици?

В класическата ситуация направихме точно това, защо да не го направим и сега?

Парадокс се получава, когато двата теста в уредите "А" и "В" се избират така, че да са некомутираци, тоест несъвместими, ако биха се извършвали върху една и съща частица.

Тук е от ключово значение, че квантовата механика позволява съвместното извършване на всякакви тестове върху отделни частици, независимо дали те са съвместими или не върху една частица.

Това е така, нека да припомним, защото се предполага, че каквито и измервания да правим в уред "А" те не могат да повлияят на уред "В" и обратното.

Например, според теорията на относителността, ако уредите са толкова раздалечени един от друг в моментите на измерване, че сигнал между тези моменти може да има само, ако е със свръх-светлинна скорост, то очевидно в този случай никакво взаимно влияние не е възможно.

Последното се приема за аксиома, както в класическата, така и в квантовата физика, и не противоречи на никакви експерименти до сега.

Така, за момента ситуацията излиза наистина парадоксална.

Айнщайн Подолски Розен



Квантов АВАНТАЖ ?

Класически АВАНТАЖ



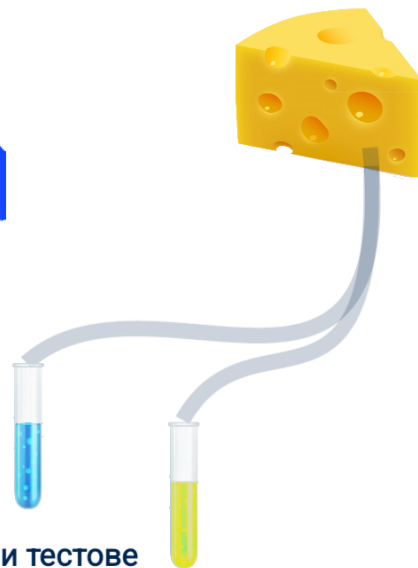
Уред А



100% синхрон



Уред Б



различни тестове

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Айнщайн Подолски Розен



Квантов АВАНТАЖ ? - да, но

Класически АВАНТАЖ

В крайна сметка, внимателният анализ показва, че няма никакъв парадокс, а вместо това се появява нова непозната в класическата физика страна на квантовите състояния: те са нелокални.

Тоест, от една страна, да, при еднакви тестове върху отделните частици ще получим еднакви резултати и от друга страна също, може да извършваме едновременно тестове върху отделните частици, които иначе не можем съвместно да извършим върху всяка една.

Но в такъв случай, ако решим да припомним резултатите от тестовете на двата уреда и върху двете частици, то това ще има определена цена: нашето описание ще стане нелокално: именно това ще се опита да илюстрираме сега.



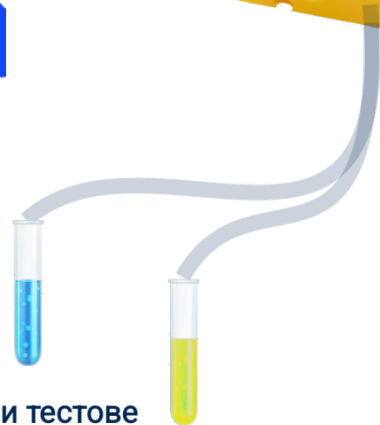
Уред А



100% синхрон



Уред Б



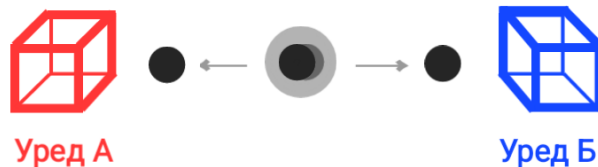
различни тестове

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

ИЛЮСТРАЦИЯ

За целта да се върнем в началната постановка на АПР и да предположим, че е налице точно това, което Айнщайн и много други са мечтали, а именно, че зад цялата тази постановка стои едно напълно класическо описание, тоест възможни са скритите параметри.

Това са параметри на състоянието на отделните частици и на уредите, които ако познаваме във всеки един момент, то те ще ни дадат точна информация за всичко, което се случва и измерва в този момент, че дори и за всичко това във всеки следващ момент.



КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

Една съвременна реализация на тази идея е всъщност компютърната симулация.

Да си представим, че разполагаме с един мощен супер-супер-компютър, който прави такава симулация.

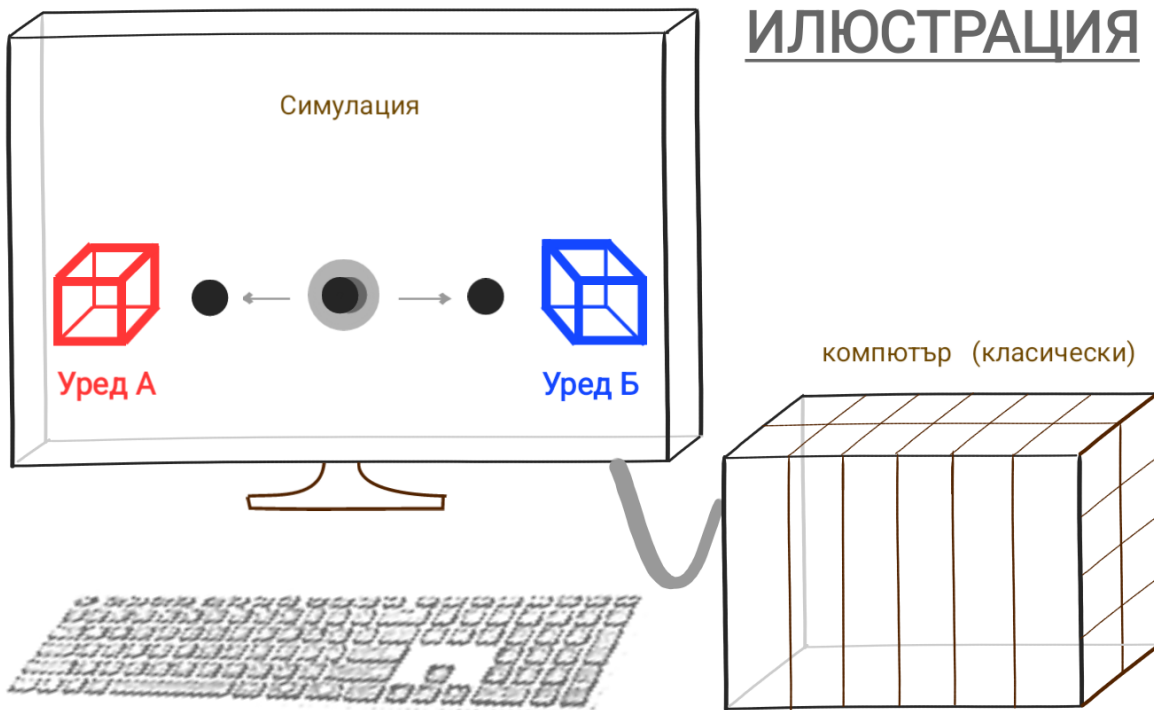
По принцип, това е напълно мислимо: в крайна сметка квантовите системи, както и всичко във физиката, подлежат на математическо описание.

А това описание е класически мислимо – друго не може и да бъде – това за което ние може да мислим и да си представяме, то по определение е класическо.

При това, днес компютърните симулации са изключително напреднали: може да се симулира например движението на цял самолет и неговите системи по време на полет, заедно с атмосферното влияние.

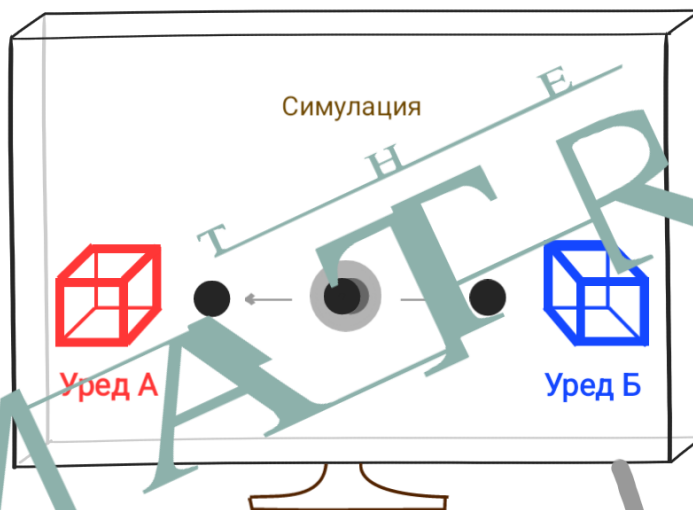
Има и много други примери на симулации, така че защо да не може да симулираме и разпад на една микро-частица на други две, заедно с последвали измервания върху родените частици?

В крайна сметка това, ако не е реално, то поне научно-фантастично може да си го представим.



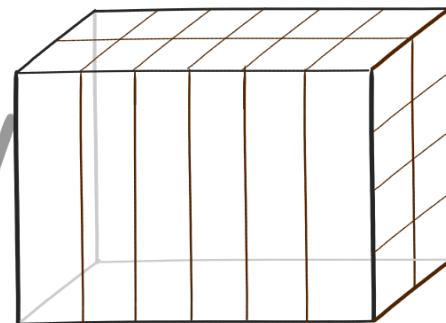
ИЛЮСТРАЦИЯ

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

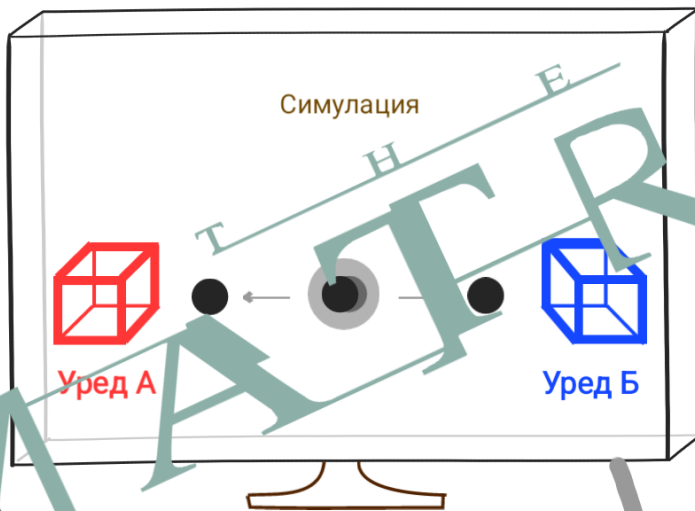


ИЛЮСТРАЦИЯ

компютър (класически)

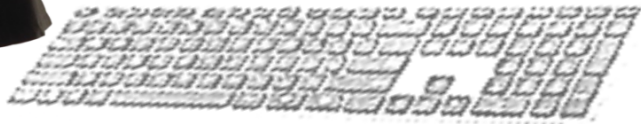
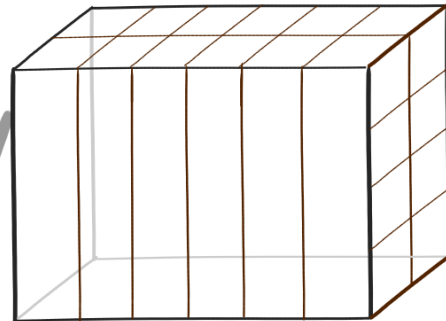


КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

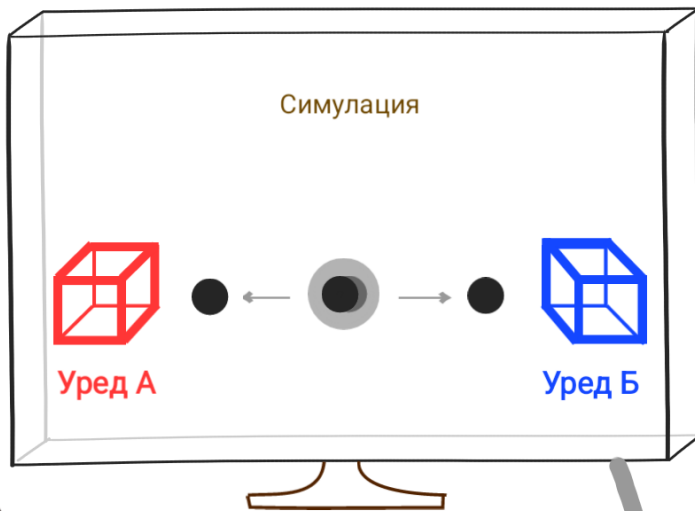


ИЛЮСТРАЦИЯ

компютър (класически)

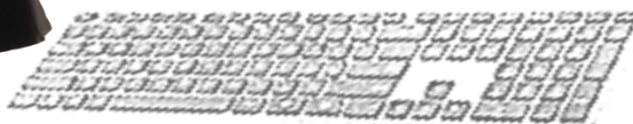
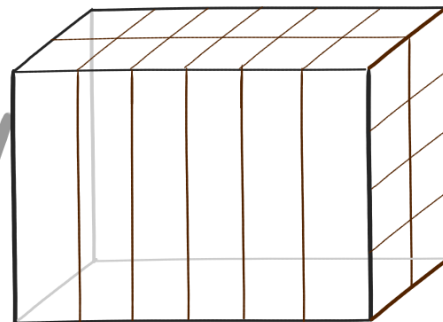


КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ



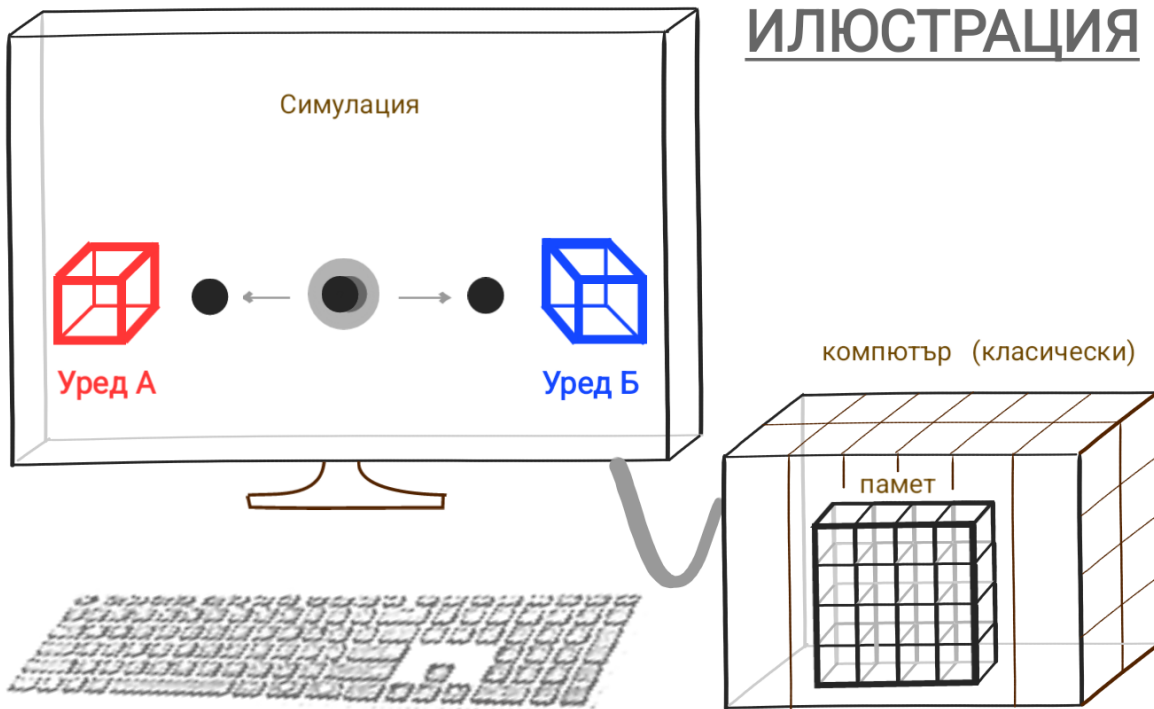
ИЛЮСТРАЦИЯ

компютър (класически)



КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

ИЛЮСТРАЦИЯ



И така, вече наблюдаваме явлениято не в реалността, а на екрана на един компютър и във всеки един момент от време, това което се случва на този екран се определя от това, какво е записано в паметта на този компютър в дадения момент.

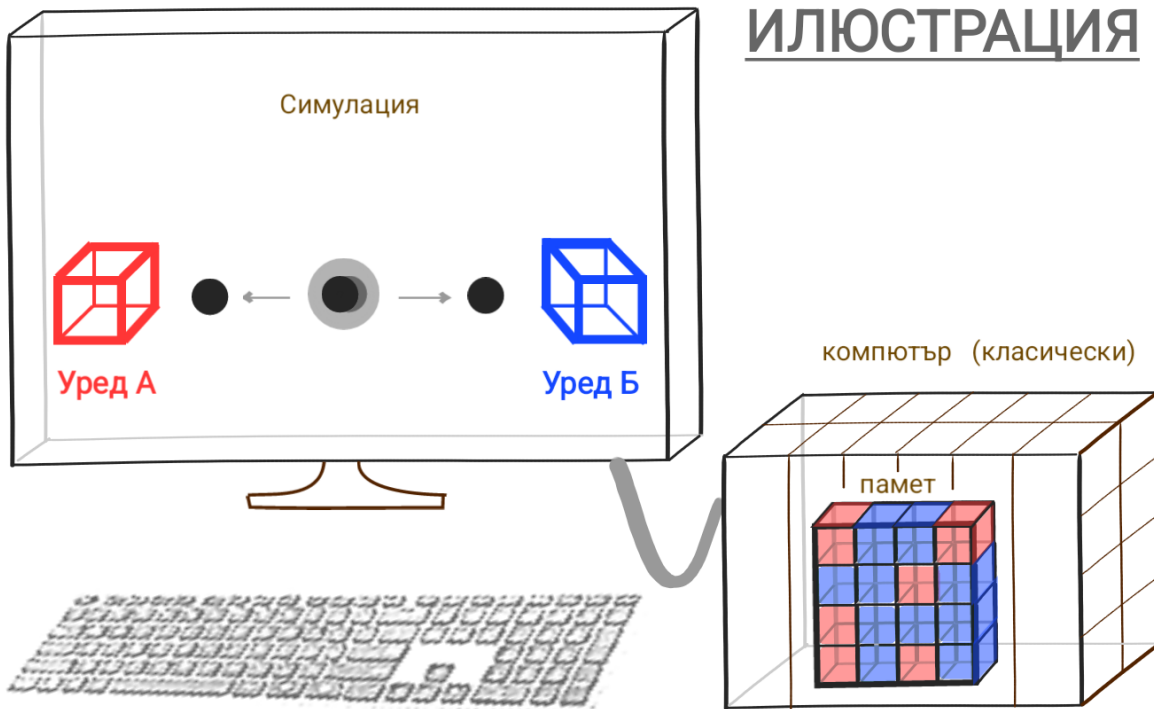
Всъщност, паметта на компютъра и нейните данни: това са именно мечтаните от Айнщайн и други скрити параметри.

Това са клетките, регистрите на паметта, които на фигурата символично са нарисувани като кубчета.

Те стоят в определени състояния на нули или единици – това са и данните на паметта.

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

ИЛЮСТРАЦИЯ



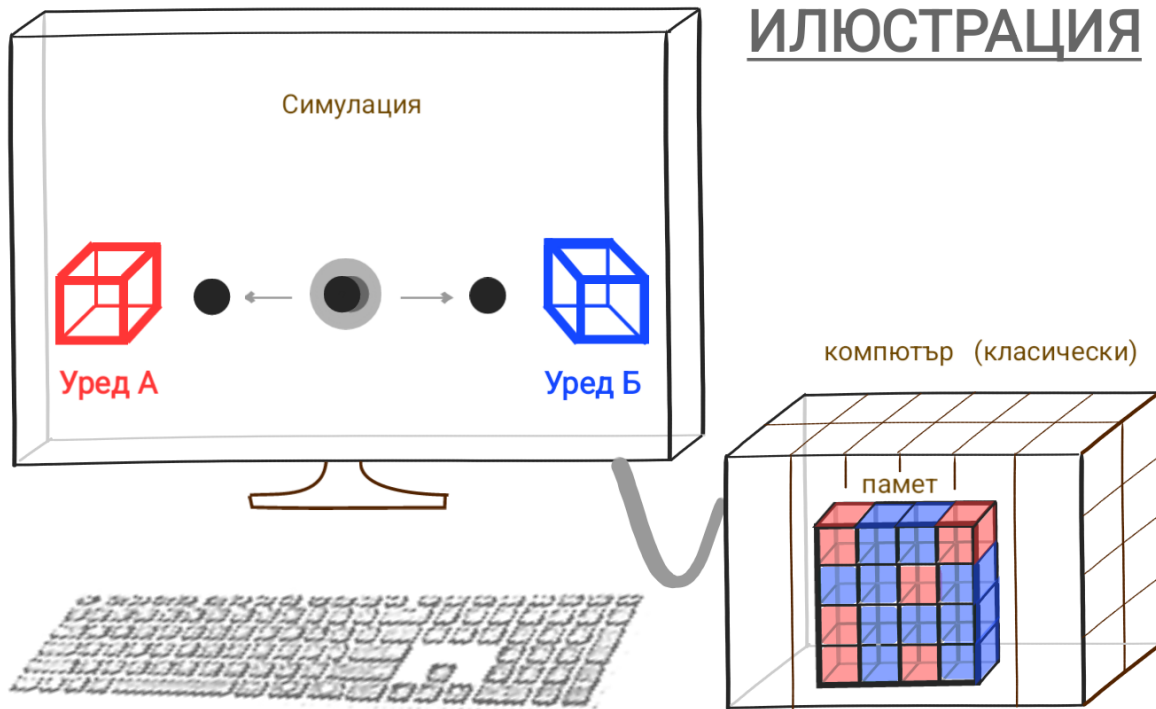
Естествено е да предположим и във всеки случай, точно това биха предположили в случая Айнщайн, Подолски и Розен, че за това което се случва със всяка частица във всеки един от уредите, отговарят определени, различни области от паметта на компютъра.

На фигурата клетките са оцветени в два различни цвята: червен и син, в съответствие с това за кой уред отговарят.

При това, може да се окаже в различните моменти, това кои клетки са сини или червени се променя, това обаче няма да има никакво значение за нашия анализ: важното е че, във всеки един момент има някакво разделяне на паметта.

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

ИЛЮСТРАЦИЯ



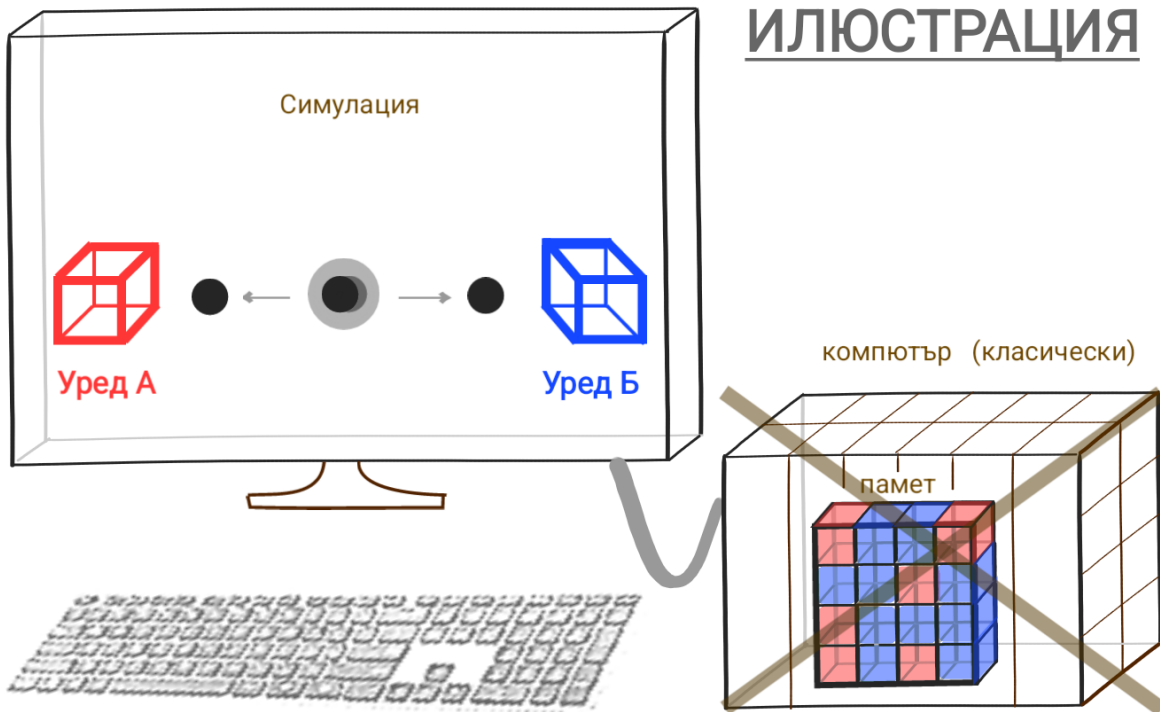
И така, направеното предположение за разделяне на паметта, макар и да е съвсем естествено, далеч не е задължително.

Когато то е налице, ние ще казваме, че имаме “локалност” или по-точно, че нашата симулация е “локална”.

Ако говорим на езика на скритите параметри, то бихме казали, че нашето описание е с “локални скрити параметри”.

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

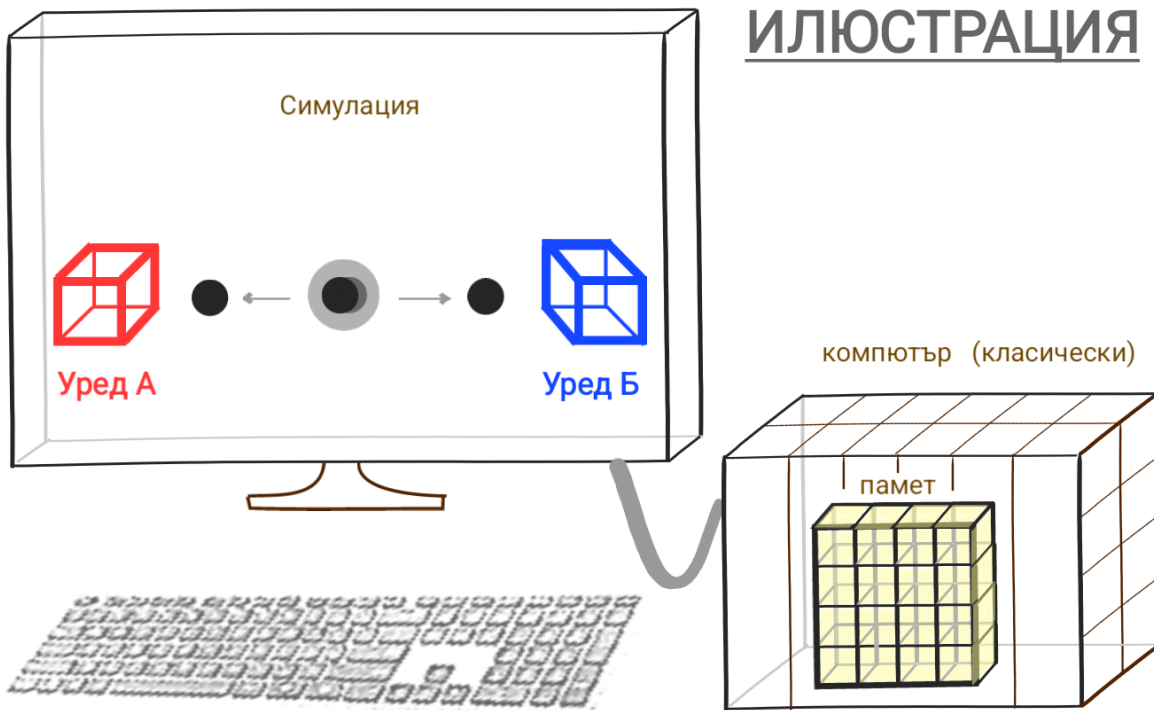
ИЛЮСТРАЦИЯ



В противен случай, ако не е възможно разделяне на паметта, то ще казваме че имаме "нелокалност" или също, "нелокална симулация", "нелокални скрити параметри".

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ

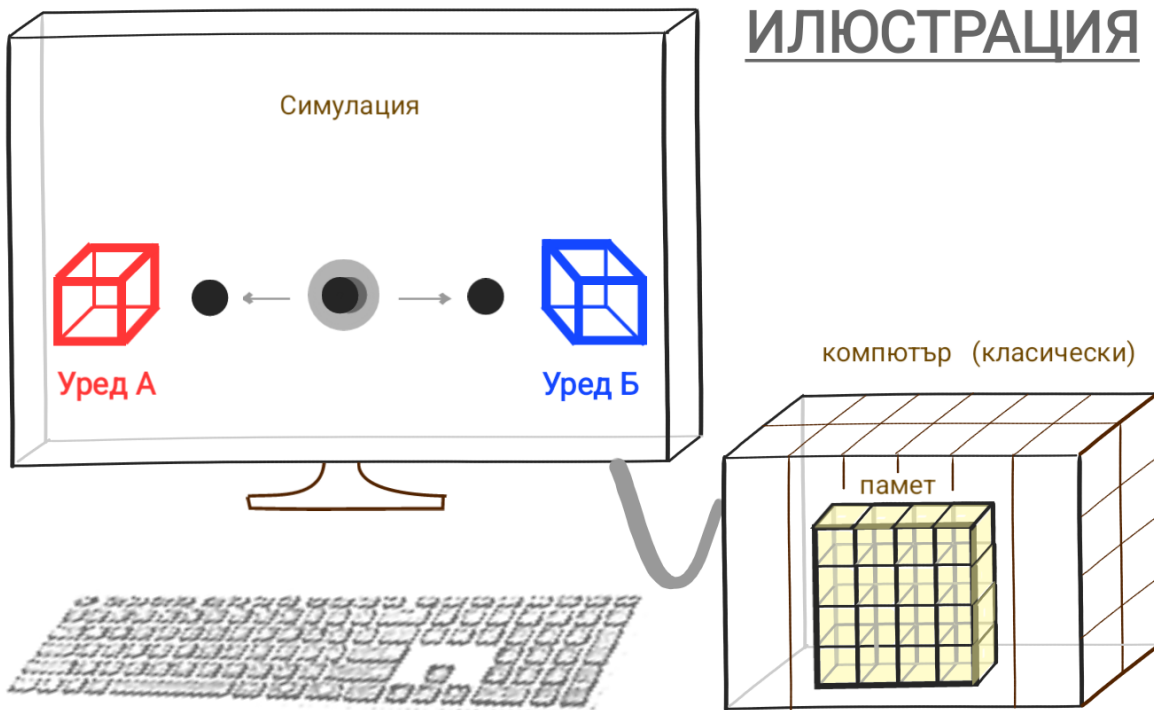
ИЛЮСТРАЦИЯ



В този втори случай, всяка клетка от паметта отговаря и за двете частици, и паметта не може да се подели между тях.

КВАНТОВАТА РЕАЛНОСТ Е НЕЛОКАЛНА

ИЛЮСТРАЦИЯ



Именно такава е квантовата реалност(!) – нелокална.

КВАНТОВАТА РЕАЛНОСТ Е НЕЛОКАЛНА

При това може да се намери количествен критерий, коя от двете хипотези е налице: локалността или нелокалността.

Мотивиран от АПР постановката, Джон Бел намира прости неравенства, които е необходимо да се изпълняват във всяка ситуация на локална симулация.

Съществуват различни варианти на такива необходими неравенства, общо известни като "неравенства на Бел".

Тук е даден вариант, при който са отделени три типа тестове, условно наречени "X", "Y" и "Z" и тези тестове могат да дават два резултата "a₊" и "a₋".

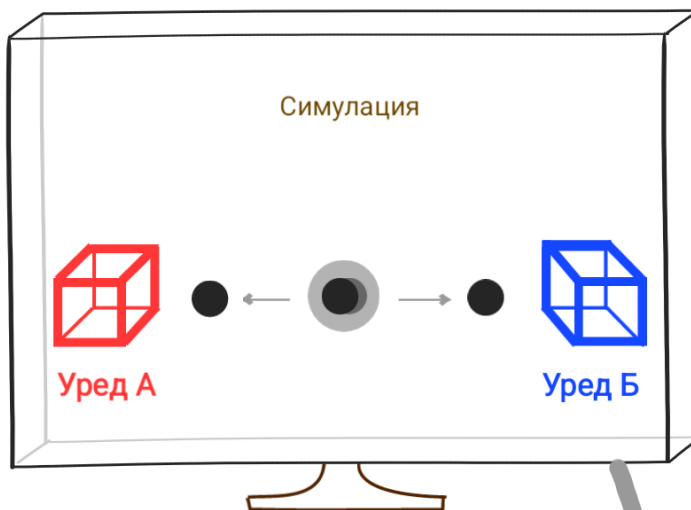
Например, пишем "X+", ако теста "X" е дал резултат "+" и така нататък.

Неравенствата са формирани от броевете или може също и вероятностите за определени двойки тестове и резултати получени върху двата уреда.

Тук играе ключова роля, че тестовете "X", "Y" и "Z" са подбрани така, че да не могат в квантовия случай да се извършат едновременно върху една и съща частица: те са некомутиращи по между си.

В такъв случай, апарата на квантовата теория предсказва нарушение на неравенствата на Бел и то доста отчетливо: с цели 40%.

В следствие, това нарушение е наблюдавано и експериментално и затова беше дадена нобелова награда по физика за 2022.



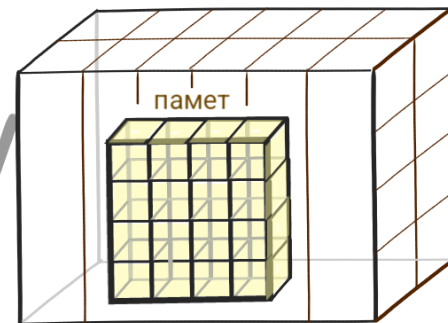
ИЛЮСТРАЦИЯ

Неравенствата на Бел

$$P(X+|Y-) + P(Y+|Z-) - P(X+|Z-) \geq 0$$

са критерий за локалност.

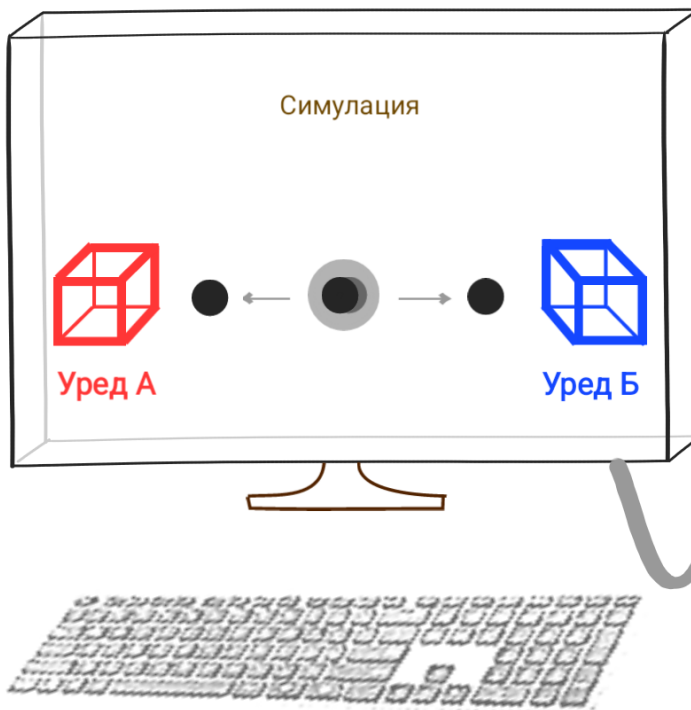
компютър (класически)



КВАНТОВАТА РЕАЛНОСТ Е НЕЛОКАЛНА



John Bell
1928 – 1990



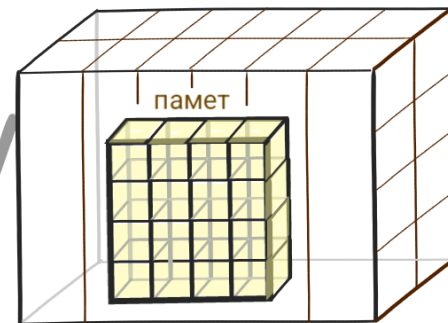
ИЛЮСТРАЦИЯ

Неравенствата на Бел

$$P(X+|Y-) + P(Y+|Z-) - P(X+|Z-) \geq 0$$

са критерий за локалност.

компютър (класически)



КВАНТОВАТА РЕАЛНОСТ Е НЕЛОКАЛНА



John Bell

1928 – 1990



NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022

KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Photo: Royal Society

Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France



Photo: Peter Linde

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA



Photo: Egge Drenthinger

Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

"för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap"

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

#nobelprize

THE
NOBEL
PRIZE

КВАНТОВО СПЛИТАНЕ и НЕЛОКАЛНОСТ



John Bell

1928 – 1990



NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Photo: Royal Society

Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France



Photo: Peter L. Lee

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA



Photo: Egge Drenthinger

Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

"för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap"

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

#nobelprize

THE
NOBEL
PRIZE