

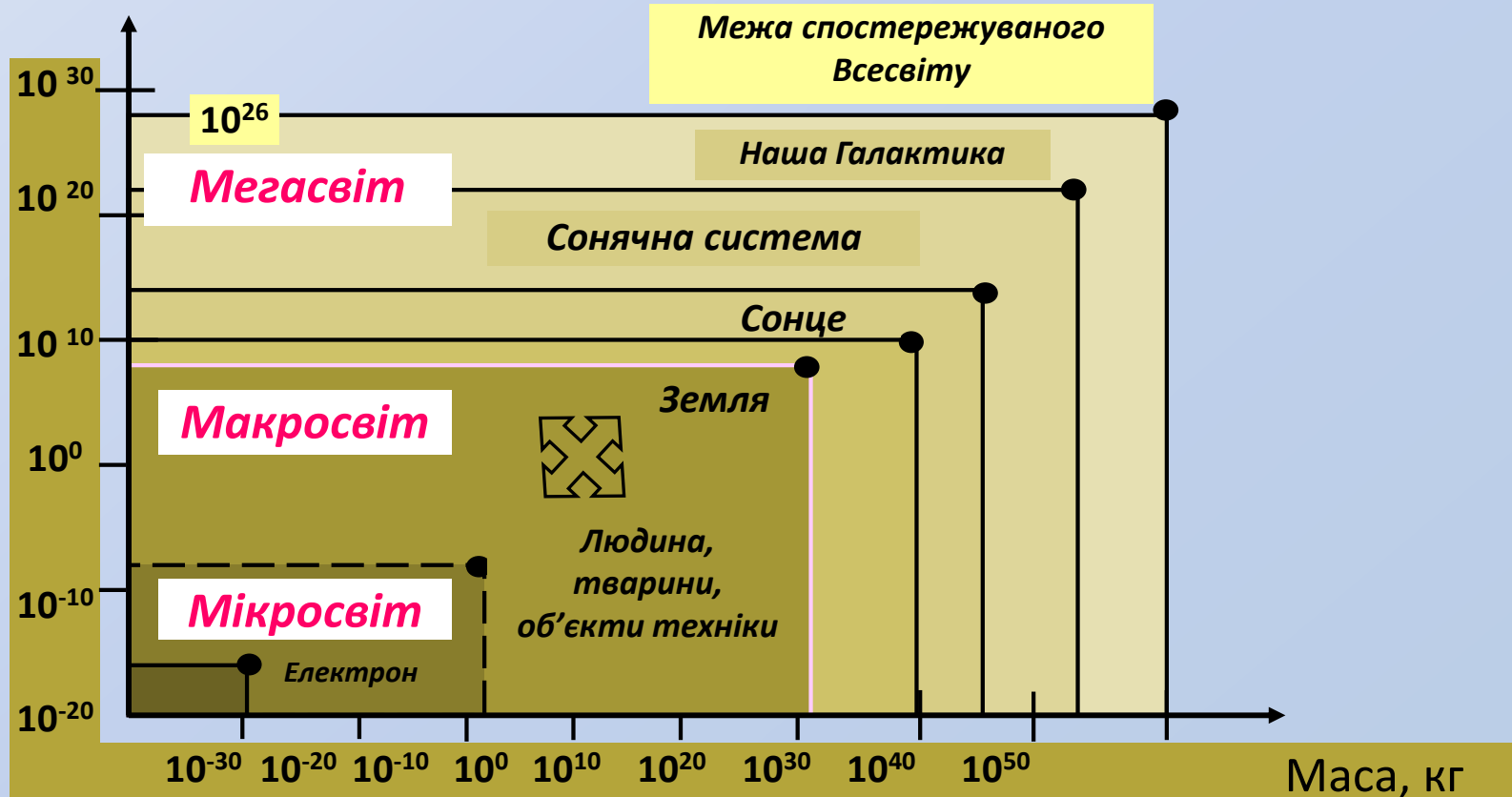
Експерименти квантової механіки, що змінюють наші уявлення про світ

Лектор доктор фіз.-мат. наук, професор,
завідувач кафедри ЕКТ
Опанасюк Анатолій Сергійович

https://ru.wikipedia.org/wiki/Двухщелевой_опыт

МАСШТАБИ МІКРО-, МАКРО- ТА МЕГАСВІТІВ

Характерний розмір, м



КАРТИНИ СВІТУ

*Наука – це або фізика,
або колекціювання марок
Ернест Резерфорд*

Фізична картина світу - це особливий самостійний вид знань – найзагальніше теоретичне знання у фізиці (система понять, принципів і гіпотез), що є основою для побудови наукових теорій.

Розвиток **фізики** безпосередньо пов'язаний з утвердженням фізичних картин світу, що змінюють одна одну.

Побудовані картини світу

Класична наука (детермінізм)

Механістична (Галілей, Кеплер, Ньютон, XVI-XVII ст.)

Термодинамічна (Майєр, Джоуль, Гельмгольц, Клаузіус, Томсон (лорд Кельвін), Карно) сформувалася до середини XIX ст.)

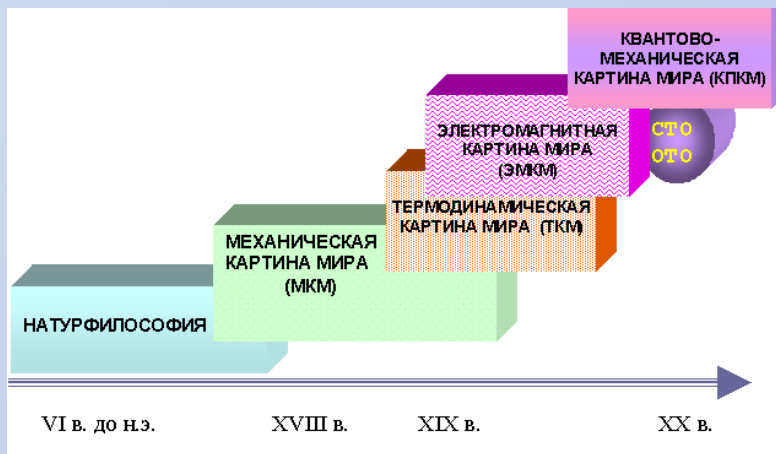
Електромагнітна (Фарадей, Максвел, друга половина XIX ст.)

Некласична наука.

Квантово-релятивістська (квантово-польова) (Ейнштейн, Планк, Бор, де Бройль, Шредингер та ін., 1-3 десятиріччя XX ст.)

Постнекласична наука

Еволюційно-синергетична (сучасність)



СТАНОВЛЕННЯ КВАНТОВО-РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ КАРТИНИ СВІТУ

Класична фізика

Засновник Ньютон,
1665-1967 рр.

L, m - великі, $v \ll c$ G

Релятивістська фізика (ЗТВ, СТВ)

Засновник Ейнштейн,
1905 р.- СТВ, 1915 р.- ЗТВ

L, m - великі, $v \sim c$ c

Квантова фізика

Планк, ле Бройль, Шредінгер,
1900-1924 рр.

L, m - малі, $v \ll c$ h

Релятивістська, квантова фізика

Дірак, 1928 р.

L, m - малі, $v \sim c$

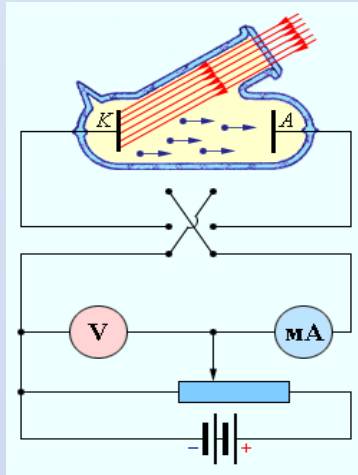
Фізика вакууму

Звичайна речовина становить 4% маси Всесвіту G, c, h

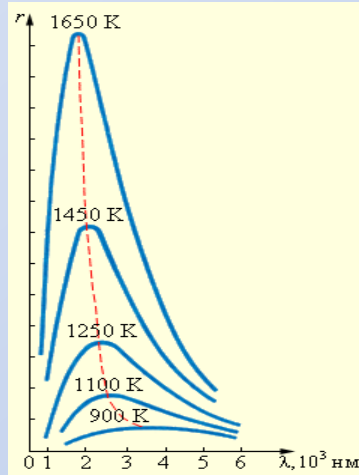
Область невідомих законів

КРИЗА ФІЗИКИ 1895-1905 рр.

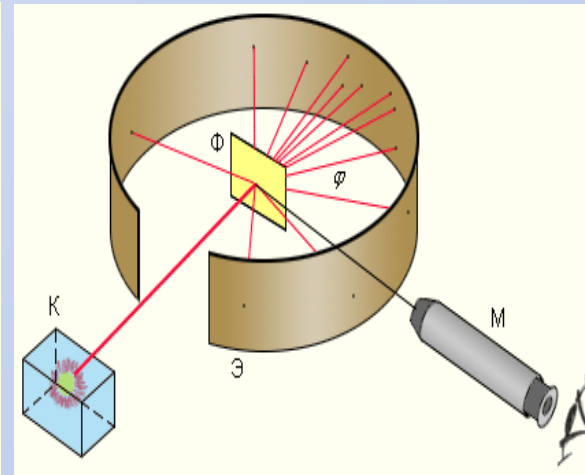
«У фізиці немає нічого нового, що підлягає відкриттю. Залишається лише виконувати все більш і більш точні вимірювання». 1900 р. Лорд Кельвін (Уїльям Томсон)



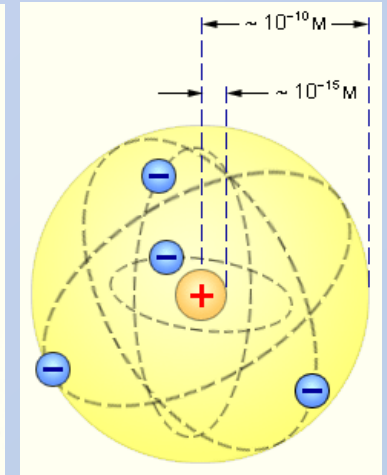
Фотоефект



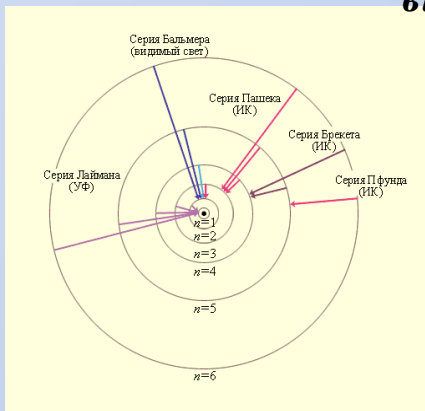
Теплове випромінювання



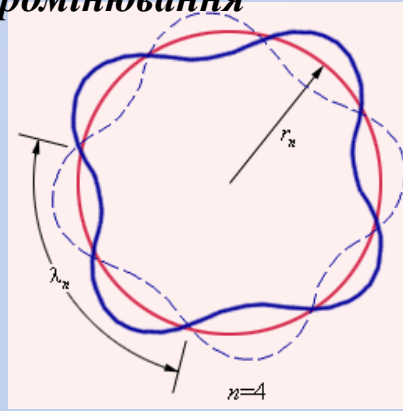
Досліди Резерфорда



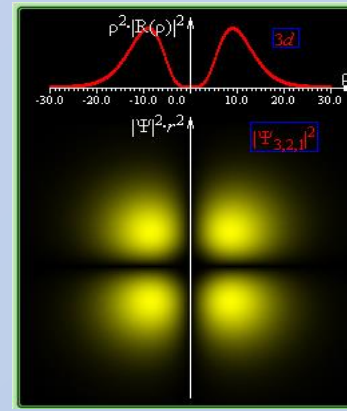
Модель атома Бора



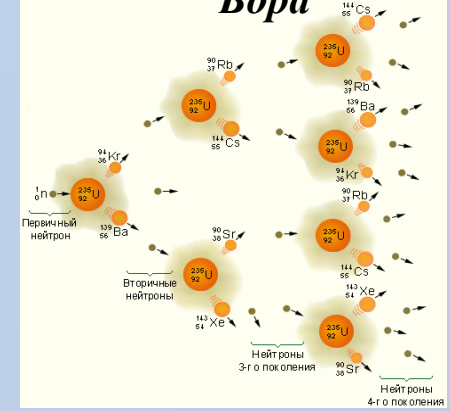
Спектри випромінювання



Корпускулярно-хвильовий дуалізм



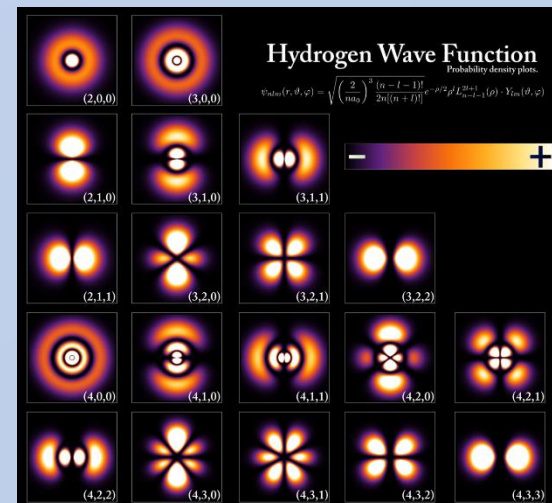
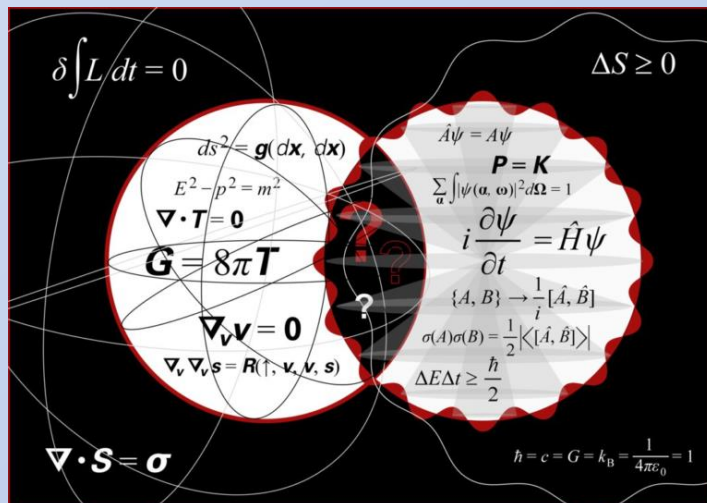
Хвильова функція



Радіоактивність

КВАНТОВО-РЕЛЯТИВІСТСЬКА КАРТИНА СВІТУ

- Основа - *релятивістська фізика* і *квантова механіка*.
 - В фізику вводиться ідея *дискретності, квантово-корпускулярного дуалізму*. *Прибирається грань між речовиною і полем.*
 - *Простір і час відносні і пов'язані як між собою так і з матерією.*
 - Виникає ідея розвитку (*діалектики*) природи.
 - *Атом є подільним. Стабільність елементарних частинок виняток, правилом є їх нестабільність.*
 - *Фундаментальними є закономірності ймовірності, що не зводяться до динамічних.* Природа речей ґрунтується на *випадковості і невизначеності*. Опис природи на рівні мікросвіту та ансамблю частинок *ймовірностний*.
 - *Принципово неможливо відокремити спостерігача від об'єкта досліджень.*
- Звідси картина світу є *суб'єктивною*.
- *Принцип локальності*, введений Ейнштейном разом з Подільським і Розеном в 1935 році, полягає в тому, що *фізичну реальність не можна змінити якимись діями на віддаленому об'єкті, не взаємодіючи з нашим.* *Зараз доведено, що в квантових системах він не працює.*
 - *Принцип фізичної реальності (сформульований Ейнштейном)* - результат експерименту (або ймовірності можливих результатів) можна передбачити до проведення експерименту.



МІКРОСВІТ

*Все суще во все века без
счета верст
Невидимый связует мост,
И не сорвать тебе цветка,
Не стронув звезд.*

Френсис Томпсон

•Закони Всесвіту на мікрорівні вивчає **фізика елементарних частинок** - або, як її зараз частіше називають, **фізика високих енергій**. Фізика високих енергій - одна з областей, що знаходиться зараз на передньому фронті фундаментальної науки. Історично вона утворилася, як наука, що вивчає будову речовини на найглибшому структурному рівні.

•**На мікрорівня світ описує квантова фізика.**

•Квантова фізика поступово виникла з теорій, що пояснюють *спостереження, які не могли бути узгоджені з поняттями класичної фізики*, такі як розв'язок Максом Планком в 1900 р. *проблеми випромінювання абсолютно чорного тіла і відповідність між енергією і частотою кванта світла* в статті Альберта Ейнштейна 1905 р., яка пояснила фотоелектричний ефект. Ці ранні спроби зрозуміти мікроскопічні явища, тепер відомі як **«стара квантова теорія»**, призвели до стрімкого розвитку квантової механіки в середині 1920-х років у роботах **Нільса Бора, Ервіна Шредінгера, Вернера Гейзенберга, Макса Борна** та інших. *Сучасна теорія* формулюється за допомогою різних спеціально розроблених математичних формалізмів. В одному з них математична сутність, яка називається **хвильовою функцією**, надає **інформацію у вигляді амплітуд ймовірності** про те, до чого призводять виміри енергії, імпульсу та інших фізичних властивостей частинки.

КВАНТОВА ФІЗИКА

• **Квантова фізика** - розділ теоретичної фізики, в якому вивчаються квантово-механічні та квантово-польові системи і закони їх руху. Основні закони квантової фізики вивчаються в рамках квантової механіки і квантової теорії поля і застосовуються в інших розділах фізики. **Всі сучасні космологічні теорії** також спираються на квантову механіку, яка описує поведінку атомних і субатомних частинок.

• **Квантова фізика зосереджена тільки на математичному описі процесів спостереження і вимірювання.**

• Основними поняттями квантової кінематики є поняття спостережності і стану. **Основні рівняння квантової динаміки - рівняння Шредінгера, рівняння фон Неймана, рівняння Ліндблада, рівняння Гейзенберга і рівняння Паулі.**

• **Існує кілька різних еквівалентних математичних описів (подань) квантової механіки:**

• **За допомогою рівняння Шредінгера;**

• **За допомогою операторних рівнянь фон Неймана і рівнянь Ліндблада;**

• **За допомогою операторних рівнянь Гейзенберга; За допомогою методу вторинного квантування;**

• **За допомогою інтеграла за траєкторіями;**

• **За допомогою операторних алгебр;**

• **За допомогою квантової логіки.**

• **Згідно з припущенням де Бройля, мікрооб'єкти мають як корпускулярні так і хвильові властивості.**

• **Рівняння Шредінгера** призначене для опису особливостей руху квантових об'єктів в полях зовнішніх сил. Воно описує еволюцію системи в часі, тобто пов'язує набір амплітуд ймовірності, що відносяться до одного моменту часу, з набором амплітуд ймовірностей, що відносяться до іншого моменту часу.

• Найчастіше частинка пересувається крізь силове поле, яке не залежить від часу. Для цього випадку записується стаціонарне рівняння Шредінгера:

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U \Psi &= E \Psi ; \\ \nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi &= 0. \end{aligned} \quad (2.4.10)$$

ОСОБЛИВОСТІ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

• **Реальний фізичний сенс мають такі розв'язки рівняння Шредінгера, які виражаються хвильовими функціями (які не мають фізичного змісту!!!), що задовольняють умови кінцевості, однозначності та безперервності. Це має місце не при будь-яких значеннях параметрів E , а лише при визначеному їх наборі, характерному для даної задачі. Ці значення енергії називаються **власними**. Розв'язки, які відповідають цим значенням, називаються **власними функціями**. **Власне значення E може утворювати безперервний ряд (суцільний спектр) чи дискретний ряд (дискретний спектр).****

• **Розв'язання рівняння Шредінгера і є основне завдання квантової механіки. **Стан будь-якого квантового об'єкта є суперпозицією всіх можливих станів.****

• **Квантова механіка відрізняється від класичної фізики тим, що **енергія, імпульс, кутовий момент та інші величини зв'язаного стану системи не можуть набувати довільних значень, вони обмежені дискретними значеннями (квантуються).** При цьому об'єкти мають характеристики як частинок, так і хвиль (**корпускулярно-хвильовий дуалізм**), і **неможливо точно передбачити значення фізичної величини мікрооб'єкта до її вимірювання** при заданому повному наборі початкових умов (**принцип невизначеності Гейзенберга**). **Завдяки принципу невизначеності розрізнити квантові частинки НЕМОЖЛИВО.****

• **Квантова механіка дозволяє розраховувати властивості та поведінку мікроскопічних фізичних систем, таких як: молекули, атоми та субатомні частинки. Також було показано, що квантова механіка чітко визначає поведінку складних молекул з тисячами атомів, хоча при спробі застосувати її до людей виникають філософські питання та парадокси, такі як друг Вігнера, її застосування до Всесвіту в цілому також залишається спекулятивним. **Передбачення квантової механіки були підтверджені експериментально з надзвичайно високим ступенем точності.****

• **Фундаментальною особливістю квантової теорії є те, що зазвичай, **вона не може з певністю передбачити значення фізичних величин (динамічних змінних), а лише дає ймовірності їх виміру. Математично ймовірність знаходиться шляхом зведення у квадрат абсолютного значення комплексного числа, відомого як амплітуда ймовірності.** Це твердження відоме як **правило Борна**, і назване на честь фізика Макса Борна. Наприклад, така квантова частинка, як електрон, описується хвильової функцією, яка задає для кожної точки простору **амплітуду ймовірності**. Застосування **правила Борна до цих амплітуд визначає функцію густини ймовірності для координати частинки, коли буде проведений експеримент з її вимірювання. Це найкраще, що може дати теорія; **не можна точно сказати, де буде знайдено електрон.******

• **Хвильова функція частинки не спостерігається, це чиста математика, а чи не фізика.**

ІНТЕРПРЕТАЦІЇ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

Інтерпретації квантової механіки - різні філософські погляди на сутність квантової механіки як фізичної теорії, що описує матеріальний світ. Вони вирішують такі філософські проблеми, як питання про природу фізичної реальності і способі її пізнання, про характер детермінізму і причинності, про сутність і місце статистики в квантовій механіці. Квантова механіка вважається «найбільш перевіреною і найбільш успішною теорією в історії науки», але консенсусу в розумінні «її глибинного сенсу» все ще немає.

Існує кілька інтерпретацій квантової механіки. Найбільш поширеними з них є: «Ніяка» інтерпретація (Як висловився Девід Мермін: «Заткнись і рахуй!»)

Копенгагенська інтерпретація (підтримують 13% вчених за опитуванням 1997 р.)

Теорія де Бройля - Бома (4%)

Багатосвітова інтерпретація Хью Еверетта (8%)

Існують також малопоширені інтерпретації

Інтерпретація Блохінцева

Об'єктивна редукація

Транзакційна інтерпретація

Інтерпретація Фока

Реляційна квантова механіка

Згідно з [Копенгагенською інтерпретацією](#) квантової механіки, одним з авторів якої був той же Бор, квантовий стан об'єкта (у цьому випадку — [корпускулярно-хвильовий дуалізм](#)) порушується, коли він взаємодіє з атомами вимірювального приладу. Простіше кажучи, спостерігач зупиняє суперпозицію, лясаючи по руці однієї з двох сторін монети, яка постійно обертається у повітрі. Найяскравіший приклад спостерігача — відкриття коробки з котом Шредингера, після чого ми можемо дізнатися, живий кіт або мертвий, адже до цього уявна тварина перебуває у стані невизначеності або суперпозиції.

•Неповнота Копенгагенської інтерпретації проявляється у тому, що її автори не змогли пояснити, що саме можна назвати процесом вимірювання і як конкретно спостерігач порушує квантову систему.

•Заповнити цю прогалину в теорії Бора в середині 1980-х спробували італійські фізики **Джанкарло Гіранді, Альберто Ріміні і Туліо Вебер**, які описали свою **теорію об'єктивного колапсу хвильової функції (теорія ГРВ)**. Згідно ГРВ, суперпозиція квантового об'єкта порушується спонтанно, і факт вимірювання тут не має ніякого значення. Вчені припустили, що ймовірність колапсу суперпозиції буде збільшуватися при переході до макроскопічних систем. Тобто чим більший об'єкт - тим більш ймовірно, що він буде перебувати у суперпозиції дуже короткий час, і відразу ж перейде до однозначного стану. Ось чому люди та інші великі об'єкти перебувають лише в одному стані у будь-який час, а елементарні частинки можуть проявляти описану вище суперпозицію. «Якщо фізики зможуть виміряти **колапс хвильової функції** в дії - це означає, що модель правильна. Можна сказати, що на цьому моменті закінчується квантова механіка і почнеться класична механіка.

Мікросвіт - ймовірністний

Макросвіт – детерміністичний

Коли відбувається колапс???

ПРИНЦИП НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ГЕЙЗЕНБЕРГА

• Найзнаменитішим із парадоксів світу елементарних частинок можна назвати **принцип невизначеності Гейзенберга**, за яким **неможливо точно визначити величину обох «парних» характеристик квантової системи.**

Співвідношення невизначеності - фундаментальні співвідношення квантової механіки, що встановлюють межу точності одночасного визначення додаткових фізичних величин, що характеризують систему (наприклад, координати та імпульсу). У спрощеному формулюванні ці співвідношення стверджують, що **додаткові фізичні величини неможливо знайти точно одночасно.** Співвідношення невизначеності є наслідком **двоїстої, корпускулярно-хвильової природи частинок матерії, відображенням імовірнісної (статистичної) суті квантової механіки.** Співвідношення невизначеності мають вигляд нерівності, наприклад,

$$\Delta x \Delta p > \hbar = h/2\pi,$$

де Δx – невизначеність координати (частинки або системи), Δp – невизначеність її імпульсу, а $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка. Звідси видно, що **добуток невизначеності координати та імпульсу не може бути меншим за \hbar , і ніяким удосконаленням методів спостереження не можна подолати цей рубіж.** **Збільшення точності визначення координат неминуче веде до втрати точності визначення імпульсу.**

Інша важлива пара додаткових фізичних величин – енергія E та час t . Співвідношення невизначеності для них має вигляд

$$\Delta E \cdot \Delta t > \hbar.$$

• Колись саме **принцип невизначеності викликав нерозуміння Ейнштейна** та його знамените скептичне заперечення **"Бог не грає в кости"**. Проте, схоже, грає: всі відомі експерименти, непрямі та прямі спостереження та розрахунки вказують, що **принцип невизначеності є наслідком фундаментальної недетерменованості нашого світу.** І знову ми приходимо до **непоєднання масштабів і рівнів реальності, мікро- та макрорівнів:** в макросвіті, де ми існуємо, все цілком визначене: якщо розтиснути пальці і відпустити яблуко, воно впаде, притягнуте гравітацією Землі. Але на мікрорівні **більш глибоких причин і наслідків просто немає**, а існує лише танець ймовірностей.

• **Ефект називають «порушенням реалізму» квантовою механікою.**

СУПЕРЕЧКА ЕЙНШТЕЙНА ТА БОРА

Ви дійсно вважаєте, що Місяць існує тільки коли ви на нього дивитесь?

А. Ейнштейн



*Суперечка
Ейнштейна та Бора
Перший виявився НЕПРАВИМ*

• Питання реальності квантової механіки було порушено **суперечкою Альберта Ейнштейна і Нільса Бора** 1927 року на п'ятому Сольвеевском конгресі.

• До квантової механіки, **всесвіт фізики був безмежно передбачуваний**: варто дізнатися закон природи та початкові умови, як вченому стає відомо майбутнє та минуле об'єкта у будь-який момент часу. Початкові умови можуть бути виміряні також у будь-який момент часу: дізнавшись про умови на старті всесвіту можна отримати всю його історію до самого кінця (**детермінізм**).

• **Теорії прихованих параметрів (Ейнштейн)** - теорії, запропоновані для вирішення проблеми квантовомеханічного вимірювання шляхом **введення гіпотетичних внутрішніх параметрів, властивих системам, що вимірюються**. Значення таких параметрів не можуть бути виміряні експериментально, але визначають результат вимірювання інших параметрів системи, що описуються в квантовій механіці хвильовими функціями та векторами стану.

• У 1932 році Джон фон Нейман довів, що **квантову механіку неможливо доповнити прихованими параметрами**, як пропонував Ейнштейн, а також написав «Математичні основи квантової механіки»;

• 1957 року **Х'ю Еверетт** запропонував «багатометрову інтерпретацію» квантової механіки, в якій частинка взаємодіє не сама з собою, а з двійниками з інших всесвітів;

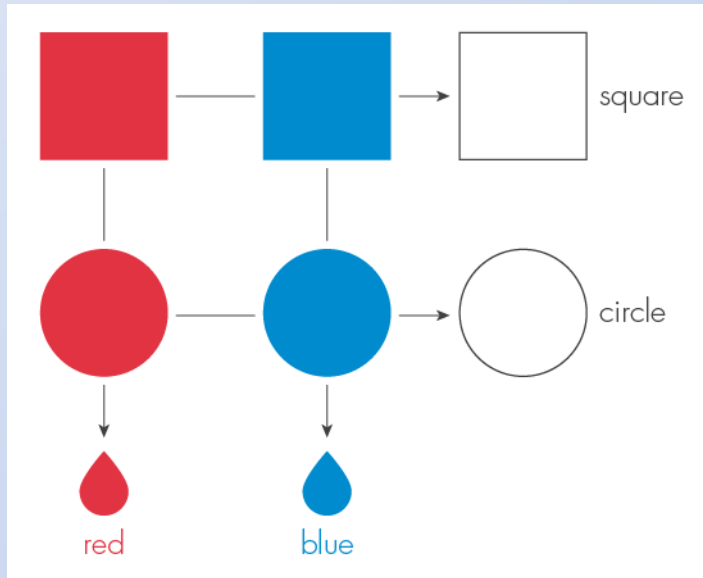
• У 1960 році **Девід Бом** опублікував ще одну інтерпретацію квантової механіки: "квантову теорію з нелокальними прихованими змінними", так само відому як "Бомовська" або "пілот-хвильова";

• Передачу інформації, засновану на заплутаних частинках, називають «**квантовою телепортацією**», перший експеримент поставлений Антоном Цайлінгером у 1997 році;

• У 1999 році Юн-Хо Кімом з Південної Кореї, Ронгом Ю., Сергієм Куликом з МДУ та Яньхуа Ши японцем з Мерілендського інституту в США проведено експеримент «**квантовий гумка з відкладеним вибором**», що передає інформацію в минуле.

• У 2018 році міжнародна команда використала світло від двох квазарів, використавши спектральні дані як випадкові числа для управління перемикачами **в експерименті з відкладеним вибором**. Один квазар утворився приблизно 8 мільярдів років тому, а інший 12 мільярдів років тому. Ці об'єкти могли обмінятися інформацією лише 7,8 мільярда років тому. **Нерівності Белла знову було визнано порушеними**.

ПРИНЦИП ДОДАТКОВОСТІ



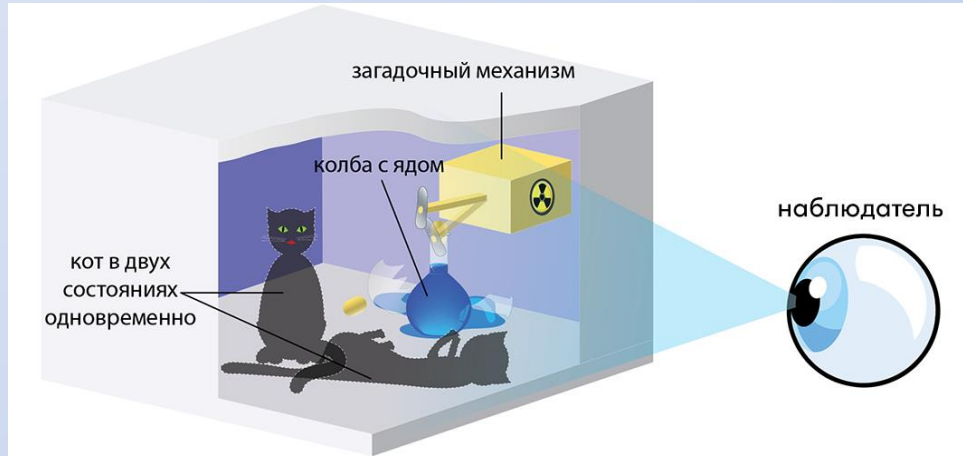
• **Принцип додатковості** (також **принцип комплементарності**) — один із найважливіших методологічних та евристичних принципів науки, а також один із найважливіших принципів квантової механіки, **сформульований у 1927 році Нільсом Бором**, філософський світогляд. Відповідно до цього принципу, **для повного опису квантовомеханічних явищ необхідно застосовувати два взаємовиключні («додаткові») набори класичних понять, сукупність яких дає вичерпну інформацію про ці явища як про цілісні**. Наприклад, додатковими в квантовій механіці є просторово-часова та енергетично-імпульсна картини. **Описи будь-якого фізичного об'єкта як частинки і як хвилі доповнюють один одного**, одне без іншого позбавлене сенсу, корпускулярний і хвильовий аспекти опису обов'язково повинні входити в опис фізичної реальності. **Тобто будь яка квантовий об'єкт веде себе і як частинка і як хвиля!!!**

• Уявімо, що квантові частинки (квантони) бувають двох кольорів — **червоного та синього**. З точки зору класичної теорії, ця додаткова властивість означала б, що квантон може існувати в одному з чотирьох можливих станів: **червоний квадрат, червоний круг, синій квадрат і синій круг**. Але квантові системи поведуться зовсім по-іншому. **Те, що квантон в якихось ситуаціях може мати різну форму і колір не обов'язково означає, що він одночасно має як форму, так і колір. Фактично, здоровий глузд, якого вимагав Ейнштейн від фізичної реальності, не відповідає експериментальним фактам. Ми можемо виміряти форму квантону, але при цьому ми втратимо всю інформацію про колір. Або ми можемо виміряти колір, але втратимо інформацію про його форму. Згідно з квантовою теорією, ми не можемо одночасно виміряти і форму і колір. Це і є суть **принципу додатковості**, так, як її сформулював Нільс Бор. У результаті квантова теорія змушує нас бути обачними у приписуванні властивостей фізичній реальності. Щоб уникнути протиріч, доводиться визнати, що:**

• **Квантова система немає властивостей, доки їх не виміряли.**

• **Вимірювання – активний процес, що змінює систему, що вимірюється.**

ЕКСПЕРИМЕНТ ІЗ КОТОМ ШРЕДІНГЕРА



Подумковий експеримент із котом запропонував у 1935 р. австрійський фізик-теоретик **Ервін Шредінгер**. Дуже спрощено він звучить так: у *сталевому ящику замкнена кішка разом зі смертельним механізмом, який активується при розпаді радіоактивного атома всередині нього.*

Якщо атом розпадеться протягом години, механізм спрацює і кішка помре. Але є 50% ймовірність, що через годину атом не розпадеться, і тоді кішка залишиться жива. Ми дізнаємося, чи жива кішка чи ні, тільки тоді, коли відкриємо ящик. До цього моменту кішка, як і радіоактивний атом, існує відразу в обох стаянах: *вона і жива і мертва одночасно*. З побутової точки зору звучить парадоксально, але в *квантовій механіці це звичайне явище, коли фізична система знаходиться одночасно у кількох квантових стаянах. Такі стаяни називаються суперпозицією: без спостерігача кішка, що сидить у ящику, знаходиться в суперпозиції стану-1 «жива» і стану-2 «мертва»*. Але якщо спостерігач втручається, тобто фізично впливає на систему, то й кіт, і електрон перейдуть у якийсь один стан. Таким чином, *на мікрорівні сам факт виміру змушує об'єкт вибрати конкретний стан*.

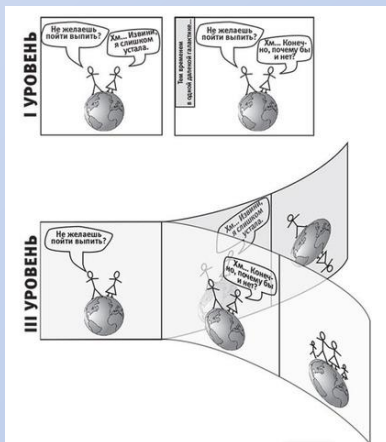
Говорять, що відбувається колапс хвильової функції.

БАГАТОСВІТОВА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ЕВЕРЕТА

Чи справді хвильова функція колапсує? Якщо так, то коли? А якщо ні, то чому ми не бачимо речі у двох місцях одразу? Звідки з'являються випадковості та ймовірності в квантовій механіці?

У 1957 році принстонський аспірант **Х'ю Еверетт** запропонував воістину радикальну відповідь, що передбачає існування паралельних всесвітів. Однак цю ідею здебільшого ігнорували. У чому ж ідея Еверетта? Це напрочуд просте твердження: **Хвильова функція не колапсує ніколи.** Іншими словами, хвильова функція, яка повністю описує наш Всесвіт, завжди змінюється детерміністично, завжди підпорядковується рівнянню Шредингера, незалежно від того, чи виконуються спостереження чи ні.

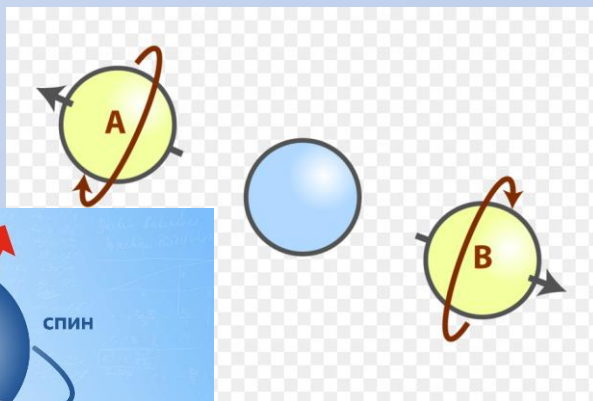
•Еверетт зрозумів: незважаючи на те, що існує лише одна хвильова функція і одна квантова реальність (у якій безліч частинок, що становлять наш Всесвіт, знаходиться у двох місцях одночасно), на практиці це еквівалентно тому, що наш **Всесвіт розщеплюється на два паралельних.** Наприкінці цього експерименту існуватимуть дві ваші копії, і кожна суб'єктивно почуватиметься реальною, але зовсім не сприймає існування іншої. Розщеплення паралельних всесвітів відбувається постійно, роблячи число квантових паралельних всесвітів приголомшливим. Оскільки таке розщеплення йде з моменту нашого Великого вибуху, практично будь-яка версія історії, яку можна уявити, реально розігрується в одному із квантових паралельних всесвітів, якщо він не порушує фізичних законів. Коротше кажучи, Еверетт показав, що якщо хвильова функція ніколи не колапсує, то **знайома нам реальність – лише найвища вершина айсберга, мізерно мала частина справжньої квантової реальності.**



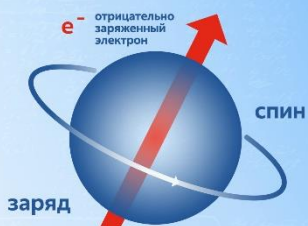
КВАНТОВА ЗАПЛУТАНІСТЬ

• **Квантова заплутаність** - 2 частинки, які з'явилися в результаті однієї події, і, перебуваючи на будь-якій відстані одна від одної, мають взаємопов'язані властивості таким чином, що зміни **будь-якого параметра одного члена заплутаної пари дуже швидко впливають на цей же параметр іншого фотона, навіть, якщо він знаходиться на іншому краю всесвіту**. **Сучасні експерименти свідчать, що ця швидкість принаймі у 100 000 разів швидша за швидкість світла!!!** Щоб створити заплутану пару фотонів, **фотон пропускається через кристал бета-бората барію (ВВО), який перетворює одиничний фотон в пару заплутаних фотонів зниженої частоти, сигнальний і холостий, які летять в різні боки**.

• Парадоксальність квантово заплутаного стану частинок у тому полягає, що «удар по голові» може статися одночасно з відривом яблука від гілки. **Заплутаність нелокальна**, і зміна **об'єкта в одному місці миттєво – і без будь-якого очевидної взаємодії – змінює інший об'єкт у іншому**. Теоретично ми можемо віднести одну із заплутаних частинок хоч на інший кінець Всесвіту, але все одно варто нам торкнутися її партнера, що залишився на Землі, і друга частинка відгукнеться миттєво. Самому **Ейнштейну (теорія прихованих параметрів)** повірити в це було непросто, і суперечка його з **Нільсом Бором** та колегами з «табору» квантової механіки стала одним із найцікавіших сюжетів у сучасній історії науки. **"Реальність визначена, - як би говорили Ейнштейн і його прихильники, - недосконалі лише наші моделі, рівняння та інструменти"**. **«Моделі можуть бути будь-якими, але сама реальність в основі нашого світу ніколи не визначена до кінця»**, – заперечували адепти квантової механіки.



Виступаючи проти її парадоксів, **в 1935 р. Ейнштейн разом із Борисом Подільським та Натаном Розеном сформулював свій парадокс**. **«Ну добре, – міркували вони, – припустимо, дізнатися одночасно координату та імпульс частинки неможливо. Але що, якщо ми маємо дві частинки спільного походження, стан яких ідентичний? Тоді ми можемо виміряти імпульс однієї, що дасть нам опосередковано відомості про імпульс іншої, і координату іншої, що дасть знання координати першої»**.



ЕПР ПАРАДОКС

• **Парадокс Ейнштейна - Подольського - Розена** (скорочено ЕПР-парадокс) - парадокс, запропонований для вказівки на неповноту квантової механіки за допомогою уявного експерименту, що полягає у вимірюванні параметрів мікрооб'єкта непрямым чином. Метою цього є спроба отримати більше інформації про стан мікрооб'єкта, ніж дає квантовомеханічний опис його стану.

• **Світ навколо локальний** - інакше кажучи, щоб якийсь далекий об'єкт змінився, він повинен взаємодіяти з іншим об'єктом. При цьому ніяка взаємодія не може поширюватися зі швидкістю швидше за світлову: це і робить фізичну реальність локальною. Спалах на Сонці не може миттєво позначитися на роботі супутників: зарядженим частинкам доведеться подолати відстань до Землі та провзаємодіяти з електронікою та частинками атмосфери. Але **в квантовому світі локальність порушується**. Згідно з квантовою теорією, ми отримуємо такі результати, навіть якщо дві системи розділятиме величезну відстань і вимірювання будуть проведені майже одночасно. Вибір типу вимірювань в одному місці, зважаючи на все, впливає на стан системи в іншому місці. Ця «лякаюча далекодія», як називав його Ейнштейн, мабуть, **вимагає передачу інформації – у нашому випадку, інформації про проведений вимір – зі швидкістю, що перевищує швидкість світла**

• Альберт Ейнштейн, Борис Подільський та Натан Розен (**EPR- парадокс**) описали дивовижний ефект, що виникає при заплутаності двох квантових систем. **EPR-ефект** поєднує особливу, експериментально досяжну форму квантової заплутаності з принципом додатковості.

• Відповідно до співвідношення невизначеностей Гейзенберга, **немає можливості одночасно точно виміряти координату частки та її імпульс**. Припускаючи, що причиною невизначеності є те, що вимір однієї величини вносить принципово непереборні збурення в стан і здійснює спотворення значення іншої величини, можна запропонувати гіпотетичний спосіб, яким співвідношення невизначеностей можна обійти. Припустимо, **дві однакові частинки А і В утворилися внаслідок розпаду третьої частки С**. У цьому випадку, за законом збереження імпульсу, їх сумарний імпульс повинен дорівнювати вихідному імпульсу третьої частки $p_A + p_B = p_C$, тобто імпульси двох частинок повинні бути пов'язані. **Це дає можливість виміряти імпульс однієї частинки (А) і за законом збереження імпульсу розрахувати імпульс другої (В), не вносячи її рухливих збурень**. Тепер, вимірявши координату другої частинки, можна отримати для цієї частки значення двох незмірних одночасно величин, **що за законами квантової механіки неможливо**. Виходячи з цього, можна було б зробити висновок, що співвідношення невизначеностей не є абсолютним, а закони квантової механіки є неповними і мають бути в майбутньому уточнені. Якщо ж закони квантової механіки в даному випадку не порушуються, то вимірювання імпульсу однієї частки рівнозначне вимірюванню імпульсу другої частки. Однак це створює враження миттєвого впливу першої частки на другу протиріччя з принципом причинності.

НЕРІВНІСТЬ БЕЛЛА

• Девід Бом у 1952 році розглянув можливість провести експеримент (технічно тоді ще неможливий), т.з. оптичний варіант *ЕПР-досвіду, який зміг би вирішити суперечку Ейнштейна - Бора.*

• У 1964 году *Джон Стюарт Белл* ввів математичний формалізм, використовує додаткові параметри, які б пояснити імовірнісну природу квантових явищ. За його задумом, отримані нерівності повинні були показати, *чи може введення додаткових параметрів зробити опис квантової механіки не імовірнісним, а детермінованим: у разі порушення нерівностей Белла такий детерміністичний опис з використанням додаткових параметрів неможливий.* Таким чином, ставало можливим в експерименті отримати певну величину, що описує кореляції між віддаленими вимірами, і на її основі сказати, *чи має сенс описувати квантові явища імовірно чи детерміновано. Результати експериментів, проведених 1972 року Стюартом Дж. Фрідманом і Джоном Ф. Клаузером* у Каліфорнійському університеті в Берклі, *узгоджувалися з квантовою механікою, і було зафіксовано порушення нерівностей Белла.* Потім у Гарвардському університеті Річард А. Хольт і Френсіс М. Піпкін отримали результат, що розходиться з квантовою механікою, але задовольняє нерівності Белла. У 1976 році в Х'юстоні Едвард С. Фрай і Реднделл С. Томпсон виготовили набагато більш досконале джерело корелюваних фотонів, і їх *результат збігся з прогнозами квантової механіки. Вони встановили порушення нерівностей Белла.* Всі ці експерименти виконували з одноканальними поляризаторами і відрізнялися лише джерелами корелюваних фотонів та їх отриманням. При такій спрощеній експериментальній схемі використовуються поляризатори, що пропускають світло, поляризоване паралельно а (або b), але не пропускають світло в ортогональному напрямку. Тому можна отримати лише частину величин, необхідних обчислення кореляції між віддаленими вимірами. Для того щоб підвищити точність експериментів, необхідно було мати стабільне і добре кероване джерело заплутаних фотонів і використовувати двоканальний поляризатор.

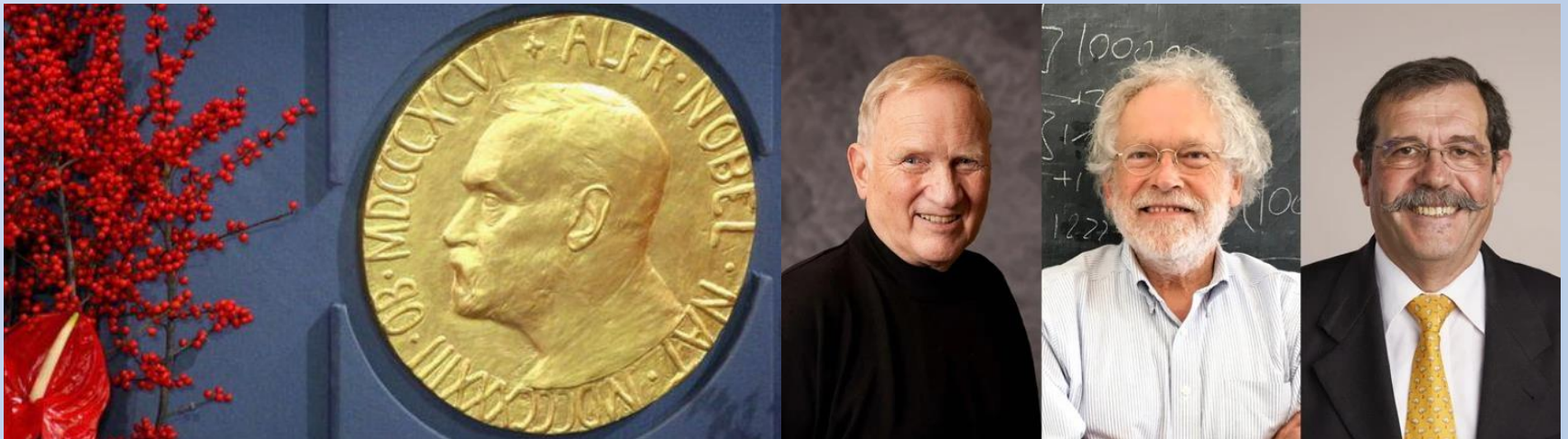
• У 1982-1985 р.р. *Ален Аспе, використовуючи відповідне обладнання, поставив серію складніших експериментів, результати яких також збіглися з прогнозами квантової механіки та продемонстрували порушення нерівностей Белла.* Постановка експериментів і перевірка деталей йдуть досі і, на думку А. Аспе, зрештою повинні призвести до остаточного експерименту, який не залишає жодних «дір». Але поки що такий експеримент так і не був здійснений, і *прихильники теорії прихованих параметрів* вказують на нові деталі і можливості для побудови повної квантово-механічної теорії.

• ПОЯСНЕННЯ ПАРАДОКСУ

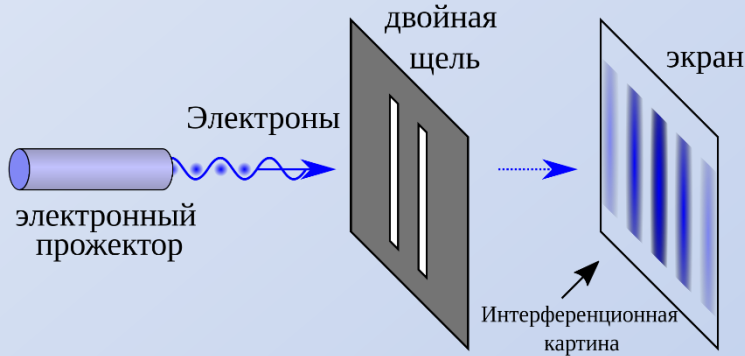
• В експерименті ЕПР після вимірювання імпульсу першої частинки друга частинка також переходить у стан з певним імпульсом. У неї можна виміряти координату, проте відразу після такого виміру імпульс частинки зміниться, тому говорити, що відбувся одночасний вимір координати та імпульсу, сенсу не має.

НОБЕЛІВСЬКА ПРЕМІЯ ЗА КВАНТОВІ ЕФЕКТИ

- Нобелівську премію з фізики 2022 року вручено за *«експерименти із заплутаними фотонами, встановлення порушення нерівностей Белла та новаторство у квантовій інформатиці»*.
- Лауреатами стали Джон Клаузер (США), Ален Аспе (Франція) та Антон Цайлінгер (Австрія).



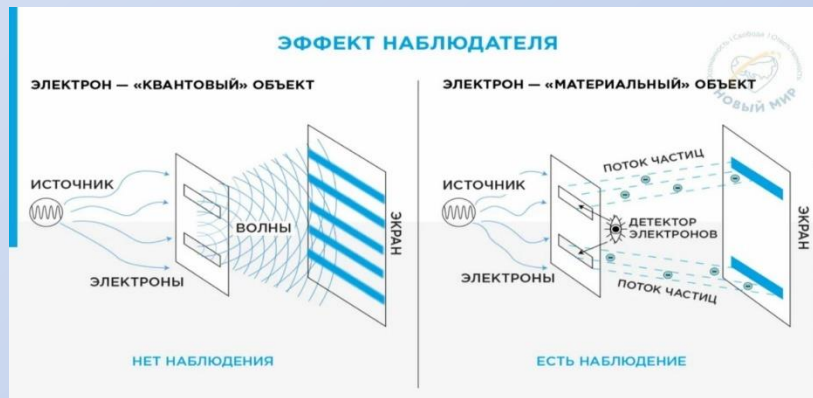
ЕФЕКТ СПОСТЕРІГАЧА



•Двоцелевий експеримент у сучасній фізиці є демонстрацією того, що світло і матерія загалом можуть проявляти характеристики як класичних хвиль, так і частинок; крім того, він відображає фундаментально імовірнісний характер квантово-механічних явищ. Вперше цей експеримент провів **Томас Юнг** зі світлом у 1801 році. У 1927 році **Девіссон і Гермер** продемонстрували, що *електрони виявляють таку ж поведінку, яка пізніше розширена на атоми та молекули*. Досвід Томаса Юнга зі світлом був частиною класичної фізики задовго до квантової механіки та концепції корпускулярно-хвильового дуалізму. Він думав, що це продемонструвало правильність хвильової теорії світла.

•**Ефект спостерігача** - це теорія, що спостереження за явищем змінює властивості цього явища.

•Ефект спостерігача добре відомий у квантовій механіці: залежно від присутності чи відсутності спостерігача, електрони поведуться подвійно – як частинки чи хвилі.



Якщо спостерігача немає, то електрони, проходячи відразу через дві щілини, поведуться як хвилі. Коли спостерігач виникає і намагається визначити, через яку саме зі щілин пролетіли електрони, то вони починають поводитися як частинки. **Подібно до цього створюються комп'ютерні ігри, деталізуються тільки об'єкти за якими спостерігають, всі інші прописуються лише формально.**

ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВІДКЛАДЕНИМ ВИБОРОМ

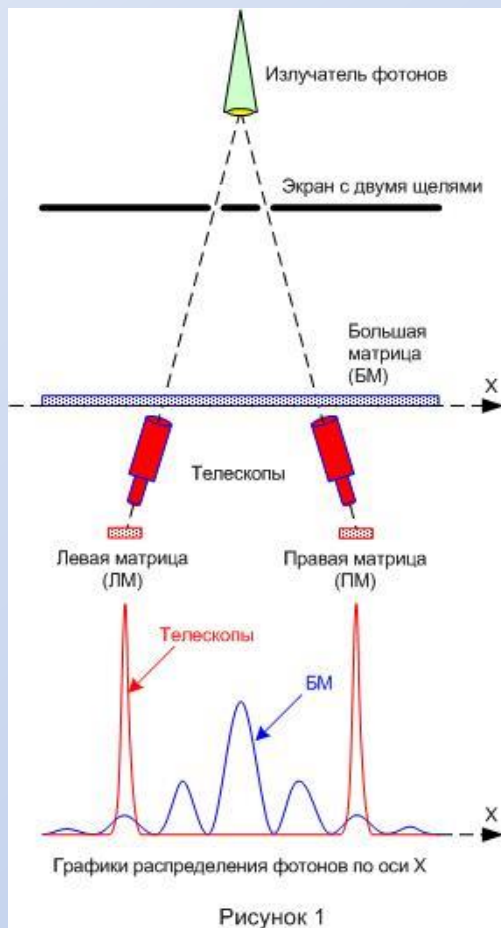
•Коли було відкрито існування квантово заплутаних між собою пар частинок, з'явилася можливість для *експерименту з відкладеним вибором*. Одна частинка залишає слід на екрані, (вона називається "*сигнальна частинка*"), а інша продовжує летіти в іншому напрямі в сторону датчика-показчика щілини, через яку летить частинка. Це так звана «*холоста частинка*». *Якщо датчик буде включений, то, в експериментах завжди виявлялося, що сигнальна частинка залишила слід на екрані як слід від частинки, а не від хвилі. А якщо він не був включений, то, на екрані був слід хвилі.*

•Нагадуємо, що до *екрану частинка долітає раніше ніж до датчика*. Але, долетівши до екрану в лабораторії на Землі, вона вже "*знає*" буде включений датчик, навіть якщо він стоїть на Місяці чи ще даліше. У цьому полягає *містичний елемент*.

•*На початку польоту частинки її позначають певним чином*. Тобто, замість датчика, на шляху польоту частинок встановлюється постановник міток на частинку (або "*маркування*"). І тоді, *будучи поміченою, вона залишає на екрані точковий слід, як частинка*. А, *якщо на шляху польоту до екрану з цієї ж частинки зняти вже поставлену мітку (стерти "квантовим ластиком"), після чого можна визначити, через яку щілину пролетів сигнальний фотон, то, ця частинка залишить на екрані слід, як хвиля (інтерференційна картина)*. Дані стираються квантовим методом. Це називається "*Експеримент квантової гумки*". А тепер найцікавіше. *У цього експерименту є варіант з можливістю видалити інформацію "після того як", після того як фотон досягне екран*. З'ясувалося, що *якщо мітку стерти вже "після того як", то, це стирання впливає на слід на екрані, залишений раніше!* Тобто, *майбутня дія вплинула на минулу подію*. Цей варіант експерименту називається "*Експеримент квантової гумки з відкладеним вибором*".

•Лінійний поляризатор встановлюється на шляху першого заплутаного фотона з пари, надаючи йому діагональну поляризацію (див. Рис. 2). Заплутаність гарантує додаткову діагональну поляризацію у другого фотона, який проходить через двохщілинну пластину. Це нівелює вплив кругових поляризаторів: кожен фотон буде давати суміш світла, поляризованого за годинниковою стрілкою і проти неї. Отже, другий детектор не може визначити, який саме шлях був обраний, і інтерференційна картина відновлюється.

ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВІДКЛАДЕНИМ ВИБОРОМ



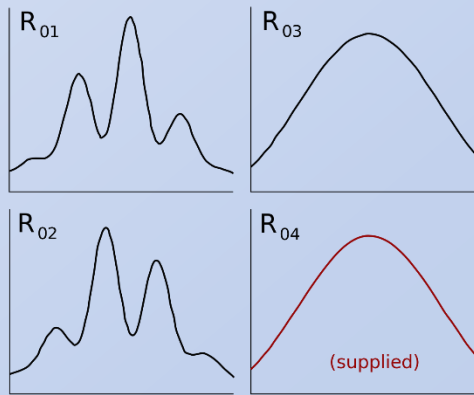
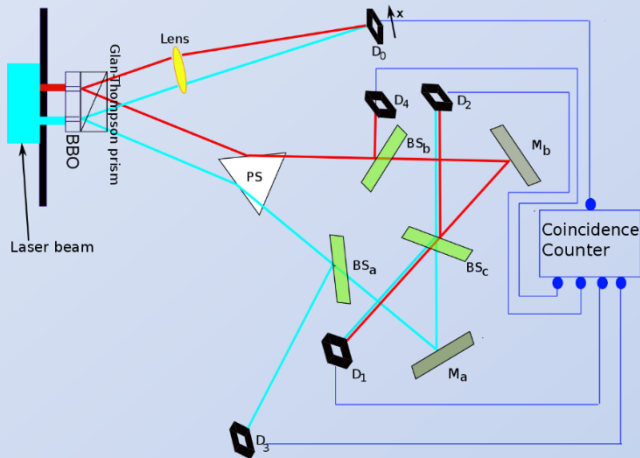
• **Експеримент квантової гумки** - це інтерференційний експеримент, який демонструє деякі фундаментальні аспекти квантової механіки, включаючи **квантову заплутаність і принцип додатковості**. Експеримент квантового гумки на двох щілинах має три стадії:

1. Експериментатор відтворює дослід Юнга, обстрілюючи пластину з двома щілинами і реєструючи інтерференційну картину на екрані детектора.
2. Експериментатор спостерігає, через яку щілину проходить кожен фотон і демонструє, що після цього **інтерференційна картина зруйнована**. Ця стадія показує, що **наявність детекторів (спостерігача) викликає руйнування інтерференційної картини**.

Тобто якщо ми спробуємо зрозуміти, через яку щілину проходить частинка, то **при спробі встановити цей факт фотони миттєво починають вести себе, як частинки і перестають інтерферувати самі з собою**. Частинки практично «відчують» наявність детектора у щілині, тобто **факт спостереження змінює властивості фізичної системи!!!!** При цьому, інтерференція відбувається не тільки з фотонами або електронами, а навіть з досить великими за квантовими мірками частинками. Для руйнування когерентності станів і зникнення інтерференційної картини **має значення виключно принципова наявність інформації, через яку з щілин пройшла частинка - а хто її отримає, і чи отримає, вже не важливо**. Важливо тільки, що таку інформацію принципово можливо отримати. Якщо інформація про обраний шлях слідування фотонів «зтирається» (фотон чи електрон якимось чином помічаються а потім ця мітка знімається), **інтерференційна картина відновлюється**. (Замість видалення або відкату всіх змін, внесених в фотони або їх шлях, в цих експериментах зазвичай виробляють ще одну зміну, яка приховує вироблені раніше).

Основний результат експерименту полягає в тому, що **не має значення, був процес стирання виконаний до або після того, як фотони досягли екрану детектора**.

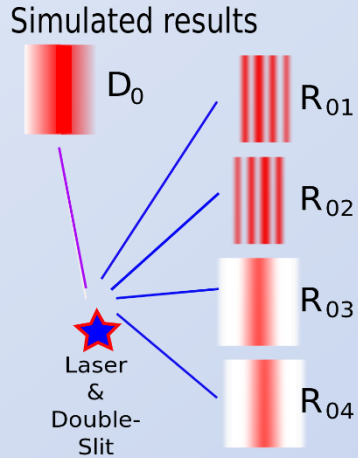
ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВІДКЛАДЕНИМ ВИБОРОМ



Вісь X: положення D0. Ось y: об'єднана частота виявлення між D0 та D1, D2, D3, D4 (R01, R02, R03, R04). R04 не вказано у статті Кіма та постачається відповідно до їх усного опису

• На рис. зображена експериментальна установка, докладно описана *Кімом і його співавторами Юу, Куликом, Ши, Марланом і Скаллі*. Аргонний лазер генерує окремі 351,1 нм фотони, які проходять через двохщілинну установку. Окремий фотон проходить через одну (або обидві) з двох щілин. На ілюстрації траєкторії фотонів мають позначення кольором у вигляді червоних або світло-блакитних ліній, щоб вказати, через яку щілину пройшов фотон (червоний колір позначає щілину А, світло-синій - щілину В). **Поки що експеримент схожий на звичайний експеримент з двома щілинами. Однак після щілин використовується спонтанне параметричне перетворення з пониженням частоти (SPDC) для підготовки запутаного двухфотонного стану.** Це робиться за допомогою нелінійного оптичного кристала ВВО (бета-бората барію), який перетворює фотон (з будь-якої щілини) в два ідентичних, ортогонально поляризованих запутаних фотона з половиною частотою вихідного фотона. Шляхи, якими йдуть ці ортогонально поляризовані фотони, визначаються призмою Глана-Томпсона. Один з цих 702,2 нм фотонів, названий «**сигнальним**» фотоном (див червоні і світло-блакитні лінії, що йдуть вгору від призми Глана-Томпсона), продовжує рухатися до цільового детектора під назвою D0. Під час експерименту детектор D0 сканується уздовж своєї осі x, його рух контролюється кроковим двигуном. Можна вивчити графік кількості «сигнальних» фотонів, виявлених детектором D0 щодо x для визначення, чи формує інтерференційну картину сукупний сигнал. Інший запутаний фотон, названий «**холостим**» фотоном (див червоні і блакитні лінії, що йдуть вниз від призми Глана-Томпсона), відхиляється призмою PS, яка направляє його по розбіжним шляхах в залежності від того, з якої щілини (А або В) він прийшов. Десь після поділу, холості фотони потрапляють в світоподільник BSa, BSb і BSs, кожен з яких має 50% ймовірність пропускання холостого фотона і 50% ймовірність його відбивання. Ma і Mb є дзеркалами. Світоподільник і **дзеркала направляють холості фотони до детекторів, позначених D1, D2, D3 і D4**. Зверніть увагу, що: Якщо на детекторі D3 реєструється холостий фотон, він може поступити тільки з щілини В. Якщо на детекторі D4 реєструється холостий фотон, він може поступити тільки з щілини А. Якщо на детекторі D1 або D2 виявлений холостий фотон, він міг зробити хтось із щілини А або В. Довжина оптичного шляху, виміряна від щілини до D1, D2, D3 і D4, на 2,5 м довший оптичного шляху від щілини до D0.

ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВІДКЛАДЕНИМ ВИБОРОМ



Розподіл сигнальних фотонів у D_0 можна порівняти з розподілом ламп на цифровому рекламному щиті. Коли всі лампочки горять, на рекламному щиті не видно рисунка. Але його можна "відновити", вимкнувши деякі лампочки. Так само інтерференційна картина або її відсутність серед сигнальних фотонів D_0 може бути відновлена тільки після «вимкнення» частини сигнальних фотонів. Інформацію про те, які сигнальні фотони слід ігнорувати для відновлення діаграми, можна отримати лише глянувши на відповідні заплутані фотони в детекторах $D1 \dots D4$

• **Це означає, що будь-яка інформація від холостого фотона отримана приблизно на 8 нс пізніше, ніж від заплутаного з ним сигнального фотона.** Виявлення холостого фотона за допомогою $D3$ або $D4$ дає відкладену «інформацію про шляхи», що вказує, чи пройшов заплутаний з ним сигнальний фотонний щілину А або В. З іншого боку, виявлення холостого фотона за допомогою $D1$ або $D2$ забезпечує відкладену вказівку, що така інформація недоступна для його заплутаного сигналу фотона. Ситуацію, коли інформація про шляхи була раніше потенційно доступна від холостого фотона, називають «відкладеним стиранням» такої інформації. Використовуючи лічильник збігів, експериментатори змогли ізолювати заплутаний сигнал від фотошуму, записавши тільки події, в яких були виявлені як сигнальні, так і неodrжені фотони (після компенсації затримки в 8 нс). Див рис. 3 і 4. коли експериментатори дивилися на сигнальні фотони, заплутані холості пари яких були виявлені в $D1$ або $D2$, вони спостерігали інтерференційні картини. Однак, коли вони дивилися на сигнальні фотони, чий заплутані холості пари були виявлені в $D3$ або $D4$, вони спостерігали прості дифракційні картини без інтерференції.

• Цей результат аналогічний експерименту з двома щілинами, оскільки інтерференція спостерігається коли невідомо, з якої щілини приходить фотон, і не спостерігається, коли шлях відомий. Що робить цей експеримент дивним, так це те, що, на відміну від класичного експерименту з двома щілинами, **вибір збереження або стирання інформації шляху холостого фотона був зроблений тільки через 8 нс після того, як положення сигнального фотона вже зафіксовано за допомогою D_0 .** Виявлення сигнальних фотонів $D0$ безпосередньо не дає жодної інформації про шлях. Виявлення холостих фотонів $D3$ або $D4$, які надають інформацію про шляхи, означає, що в спільно виявленій підмножині сигнальних фотонів $D0$ не може спостерігатися ніякої інтерференційної картини. Аналогічним чином, виявлення холостих фотонів $D1$ або $D2$, які не надають інформацію про шлях, означає, що інтерференційні картини можуть спостерігатися в спільно виявленому підмножині сигнальних фотонів $D0$. Іншими словами, навіть якщо холостий фотон не спостерігається доти, поки через короткий оптичний шлях через деякий час його заплутаний сигнальний фотон не досягне $D0$, інтерференція в $D0$ визначаються тим, чи виявляється заплутаний з сигнальним фотоном холостий фотон в детекторі, який зберігає інформацію про шлях ($D3$ або $D4$), або в детекторі, який стирає інформацію про шлях ($D1$ або $D2$). **Деякі інтерпретують цей результат, таким чином, що відкладений вибір спостерігати чи не спостерігати шлях холостого фотона змінює результат події у минулому.** Зазначимо, зокрема, що інтерференційна картина може бути виведена зі спостереження лише після того, як були зафіксовані холості фотони (тобто $D1$ або $D2$). Сумарна картина всіх сигнальних фотонів в $D0$, чий заплутані холості пари пройшли кілька різних детекторів, будь-коли показувати інтерференцію незалежно від цього, що відбувається з холостими фотонами. Можна зрозуміти, як це працює, глянувши на графіки $R01$, $R02$, $R03$ і $R04$ і помітивши, що вершини $R01$ збігаються з западинами $R02$ (тобто між двома інтерференційними смугами існує π -фазовий зсув). $R03$ показує єдиний максимум, як і $R04$, який експериментально ідентичний $R03$. Заплутані фотони, фільтровані за допомогою лічильника збігів, змодельовані на рис.5 для візуального представлення доказів, доступних експерименту. У $D0$ сума всіх корельованих подій не даватиме інтерференцію. Якби всі фотони, які досягають $D0$, були б нанесені на один графік, можна було б побачити яскраву центральну смугу.

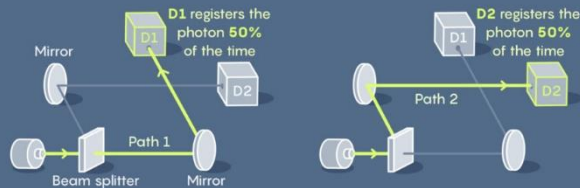
ЕКСПЕРИМЕНТ УИЛЕРА

The Delayed-Choice Experiment Explained

Are quantum objects “real” when they’re not observed? The delayed-choice experiment demonstrates that they can’t be. It shows that an unobserved photon is neither a wave nor a particle.

If the Photon is a Particle

Fire a photon at a beam splitter. The photon acts as an indivisible particle. It takes either path 1 or path 2 and then goes on to hit detector D1 or D2.



If the Photon is a Wave

Add a second beam splitter. This time the photon acts as a wave. It seemingly splits into two waves at the first beam splitter. The waves recombine at the second. The photon always hits only one of the detectors.



Delayed Choice

Start with only one beam splitter. The photon should act like a particle. At the last moment, add the second beam splitter. The particle then suddenly changes to be wavelike, as if it was always going down both paths.



CONCLUSION: Either the addition of the beam splitter sent a signal backwards in time to influence the photon's initial behavior, or photons do not have definite, intrinsic properties when they are not being observed.

•Констатуючи експериментально спостережуваний корпускулярно-хвильовий дуалізм, Нільс Бор постулював **принцип додатковості**. Він говорить, що **якщо спостерігач вимірює властивості квантового об'єкта як частки, то він поводить як частинка. Якщо ж вимірюються його хвильові властивості, то для спостерігача він поводить як хвиля**. Тому для повного опису квантовомеханічних явищ необхідно застосовувати два, такі що здавалося б, суперечать один одному уявлення, які, в результаті, доповнюють одне одного, що і відображено в назві принципу.

•Для перевірки цього **Уїлер запропонував використовувати інтерферометр Маха - Цандера**. Він складається з чотирьох дзеркал. Перше розщеплює потік світла на два пучка, які потім відбиваються від двох непрозорих дзеркал і зводяться знову разом в четвертому дзеркалі. По двох сторонах від нього стоять детектори. Фотони необхідно випускати по одному. Одиночний фотон як би розщеплюється на два в першому дзеркалі, або, іншими словами, проявляє хвильові властивості. Потім він відбивається від двох ідеальних дзеркал, знову інтерферує сам з собою в четвертому напівпрозорому дзеркалі, і нарешті потрапляє в один з детекторів. Для кожного конкретного фотона спрацьовує тільки один з детекторів, але якщо повторювати дослід багато разів, вийде деякий нетривіальне співвідношення відліків двох детекторів. Це співвідношення показує, що частинка, досягнувши четвертого дзеркала, поводить як хвиля. Якщо ж четверте дзеркало прибрати, то співвідношення між спрацьовуваннями буде 50:50. Це виглядає так, як ніби в момент першого розщеплення частка вже «вирішила», яким шляхом вона піде.

•**Ідея Уйлера полягала в тому, щоб поява в схемі четвертого дзеркала вирішувалася за допомогою генератора випадкових чисел вже після того, як фотон увійшов в інтерферометр**, але до того, як його поглинув один з детекторів - **так званий відкладений вибір**. Таким чином, **експериментатори позбавляли б фотон можливості «дізнатися», чи проводиться спостереження чи ні, і тим самим визначити свою «поведінку» - постати часткою або хвилею. Вперше цю гіпотетичну схему вдалося реалізувати лише в 2007 році**.

•З'ясувалося, що результат однаковий для різних видів датчиків, точніше, для різних технологій спостереження та для різних частинок. Тобто, **будь-яке спостереження однаково впливає на поведінку частинки**. Таким чином, підтвердилося припущення Нільса Бора про те, що **не має сенсу приписувати ту чи іншу поведінку частинок - як хвилі або як власне частинки - до того як було зроблено вимір**. Втім, **існує ще одне малоймовірне пояснення, що частинки якимось чином отримують інформацію з майбутнього**. Воно передбачає, що інформація може передаватися швидше за світло, що неможливо з точки зору теорії відносності.

ПАРАДОКС ДРУГА ВІГНЕРА

•«У парадоксі друга Вігнера, сформульованому фізиком **Юджином Вігнером**, відбувається наступне: **припустимо, що замість того щоб самому спостерігати кішку Шрьодінгера, Вігнер просить це зробити свого друга. Його друг відкриває ящик, бачить кішку і потім повідомляє результати свого спостереження Вігнеру. На цьому етапі ми можемо говорити, що Вігнер тільки що актуалізував реальність, яка включає в себе його друга і кішку. Тут є парадокс: чи була кішка жива чи мертва, коли друг Вігнера її спостерігав, але до того, як він повідомив результат спостереження? Говорити, що коли друг Вігнера спостерігав кішку, її стан не колапсував, значить стверджувати, що його друг був у непритомному стані, поки Вігнер його не спитав - тобто свідомість його друга не могла вирішити, жива кішка чи мертва, без спонукання з боку Вігнера».**

•Але в 2018 році, фізики помітили, що останні **досягнення в області квантових технологій дозволили відтворити тест друга Вігнера в реальному експерименті**. Іншими словами, з'явилася можливість створювати різні реальності і порівнювати їх в лабораторії.

•**Массіміліано Пройетті** з Університету Херіот-Ватт в Единбурзі і кілька його колег заявили, що вперше провели цей експеримент: **створили різні реальності і порівняли їх**. І прийшли до висновку, що Вігнер мав рацію: **ці реальності можуть бути непримиренними наскільки, що неможливо прийти до єдиної думки про об'єктивні факти в експерименті**.

•Спочатку уявний експеримент Вігнера починався з одного поляризованого фотона, який при вимірюванні може мати горизонтальну або вертикальну поляризацію. Але перед вимірюванням, відповідно до законів квантової механіки, фотон існує в обох станах поляризації одночасно - так звана суперпозиція. Вігнер уявив собі друга в іншій лабораторії, який вимірює стан цього фотона і зберігає результат, тоді як Вігнер спостерігає здалеку. Вігнер не має інформації про вимірювання свого друга і тому змушений припустити, що фотон і його вимір знаходяться в суперпозиції всіх можливих результатів експерименту. Вігнер може навіть провести експеримент, щоб визначити, чи існує ця суперпозиція чи ні. Свого роду інтерференційний експеримент, який покаже, що фотон і вимір дійсно знаходяться в суперпозиції. З точки зору Вігнера, це «факт» - суперпозиція існує. І цей факт свідчить про те, що вимірювання не могло бути проведене. Але його друг з цим не погодиться, оскільки він виміряв поляризацію фотона і записав її. Друг може навіть подзвонити Вігнеру і сказати, що вимір було зроблено (за умови, що результат не розкрито).

•**Дві реальності суперечать одна одній. «Це ставить під сумнів об'єктивний статус фактів, встановлених двома спостерігачами»**. В 2018 р **Каслав Брукнер** з Віденського університету знайшов спосіб відтворити «вігнеровського друга» в лабораторії за допомогою методів, що включають заплутування безлічі частинок одночасно. Пройетті виконав цей експеримент реально. Вони реалізували розширений сценарій «друга Вігнера» в сучасному експерименті з шістьма фотонами. Шість фотонів були заплутані, щоб створити дві альтернативні реальності - одну, що представляє Вігнера, а другу - Вігнеровського друга. Друг Вігнера вимірює поляризацію фотона і зберігає результат. Потім Вігнер виконує вимір інтерференції, щоб зрозуміти, чи знаходяться вимір і фотон в суперпозиції. Експеримент дав неоднозначний результат. **Обидві реальності можуть співіснувати, навіть якщо вони дають непримиренні результати, як і передбачав Вігнер**. Це піднімає ряд цікавих питань, що **спонукають фізиків переглянути природу реальності**. Ідея того, що спостерігачі можуть в кінцевому підсумку узгодити свої вимірювання в якійсь фундаментальній реальності, заснована на кількох припущеннях. По-перше, універсальні факти дійсно існують і спостерігачі можуть про них домовитися. Але є й інші припущення. Одне з них полягає в тому, що спостерігачі вільні робити будь-які спостереження, які захочуть. І ще одне: **вибір, який робить один спостерігач, не впливає на вибір інших спостерігачів**. Це припущення фізики називають **локальністю**. Якщо існує об'єктивна реальність, з якою всі можуть погодитися, всі ці припущення будуть вірними. Але результат Пройетті і його колег передбачає, що **об'єктивної реальності не існує**. Іншими словами, експеримент передбачає, що одне або більше припущень - про те, що існує реальність, з якою ми погодимось; що є свобода вибору; або про локальність - має бути невірним.

•**«Науковий метод заснований на фактах, встановлених шляхом багаторазових вимірювань і узгоджених повсюдно, незалежно від того, хто їх спостерігав»**. Однак **Proietti and co. В своїй статті підривають цю ідею, можливо, смертельно**.

ОБ'ЄДНАННЯ ВЗАЄМОДІЙ

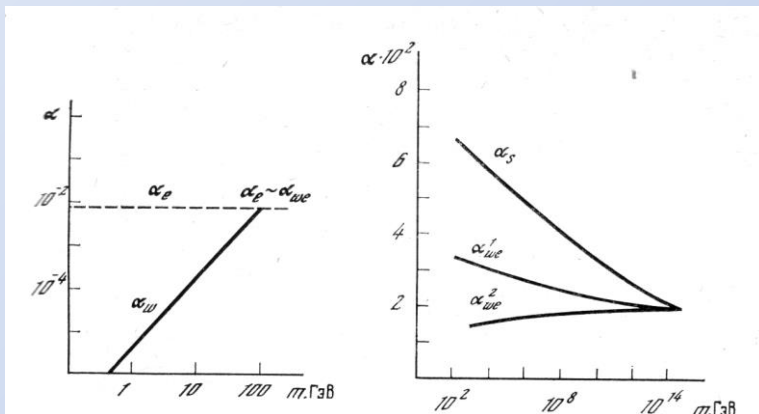
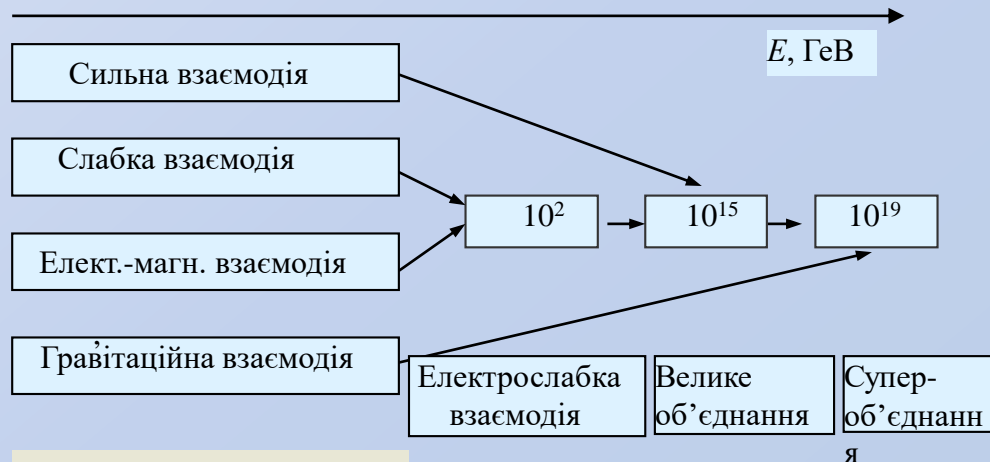


Схема залежності констант електромагнітної α_e слабкої α_w та сильної α_s взаємодій від маси частинки переносника

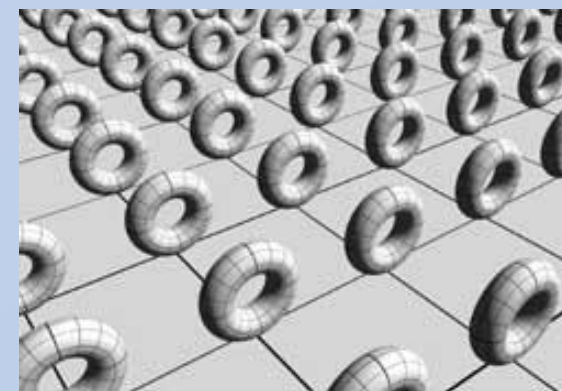
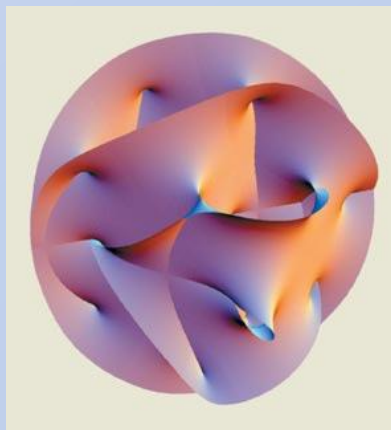


Планківські величини, найменші в природі

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с}$$

$$E_{Pl} = \frac{\hbar c}{l_{pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}$$



Теорію супероб'єднання можна побудувати на основі моделі **суперструн**. Ця теорія ґрунтується на введенні у фізику протяжних мікрооб'єктів (10^{-33} см), які назвали **струнами**. Вони коливаються у 11-мірному просторі і можуть бути як замкненими так і не замкненими. Додаткові виміри не сприймаються, оскільки згорнуті, наприклад, **в просторі Калабі-Яу**.

Узагальнення цієї теорії на брани (Уїттен, 1995 р.) назвали М-теорією (magic).

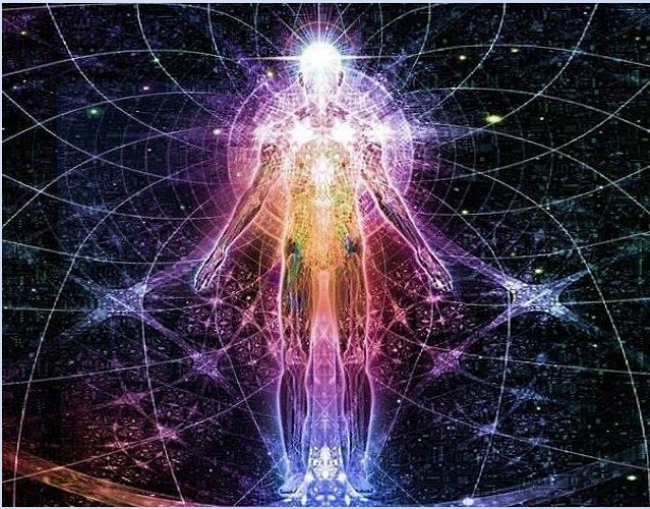
ЩО НЕ ТАК З НАШИМ ВСЕСВІТОМ????

• Деякі фахівці як доказ того, що з Всесвітом щось не так, вказують на дуже **дивні відкриття, зроблені сучасною фізикою, особливо квантовою механікою**. Так, з'ясовується, що і *матерія, і енергія мають гранульовану структуру*. Більше того, «розрізнення», при якому ми можемо спостерігати Всесвіт, має свою мінімальну межу: якщо спробувати поспостерігати за дрібнішими об'єктами, вони просто не виглядатимуть досить "чіткими". За словами Смута, ці дивні особливості квантової фізики такі можуть бути ознаками того, що ми живемо всередині симуляції - подібно до того, як при спробі розглянути зображення на екрані з дуже близької відстані воно розпадається на окремі пікселі. Але це дуже брутальна аналогія. Вчені поступово приходять до висновку про те, що "зернистість" Всесвіту на квантовому рівні може бути наслідком фундаментальніших законів, що визначають межі пізнаваної реальності. Ще один аргумент на користь віртуальності нашого світу говорить, що *Всесвіт, як видається ряду вчених, описується математичними рівняннями*.

• ОСОБЛИВОСТІ ВСЕСВІТУ ВСТАНОВЛЕНІ ОСТАННІМ ЧАСОМ

• **Зернистість, нелокальність, підпорядкування математичним законам, ефект спостерігача, відсутність характеристик квантових частинок до вимірювання, неможливість існування Всесвіту БЕЗ СПОСТЕРІГАЧА, відсутність об'єктивної реальності, обрив в спектрі космічних променів на певних енергіях.**

СВІТ ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ??



«Квантова свідомість» - це теорія про те, що функціонування свідомості засноване на квантових процесах

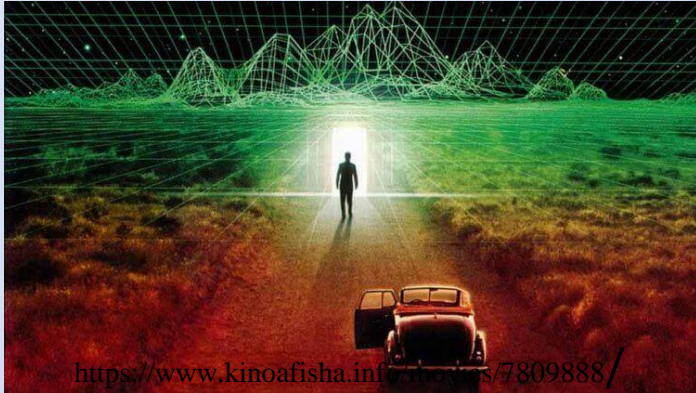


Квантові теорії свідомості, Дік Чопра,
Роджер Пенроуз.
Біоцентризм Роберта Ланца 2007 р.

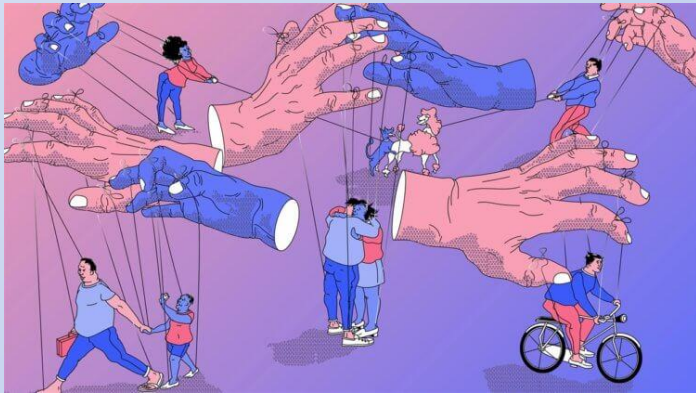
• Не тільки Ілон Маск а і все більше вчених вважають що ми живемо у комп'ютерній симуляції світу. Можливо, що якась постлюдська цивілізація з неймовірними обчислювальними можливостями створила щось на зразок комп'ютерної програми, яка симулює історичний процес розвитку людства. Так Нік Бострем (лауреат престижних премій і автор робіт з антропного принципу) оперує концепцією, що **свідомість не залежить від біологічної тканини і може бути реалізована у вигляді набору електроімпульсів в обчислювальній машині**. З огляду на це, **для постлюдей не представляє особливих труднощів створити людей, що мають свідомість, для яких ця модель цілком реальна**. Грубо і приблизно обчислювальна потужність людського мозку обмежена 10^{17} операціями в секунду. При цьому ми отримуємо 10^8 біт в секунду особистої інформації. На підставі цього Бострем вивів формулу і вираховував, що **для симуляції всієї історії людства потрібно всього-на-всього 10^{33} - 10^{36} операцій** (50 років на людину при 100 млрд людей, які будь-коли жили на планеті). Сучасний китайський компютер Sunway Taihu Light виконує близько $9,3 \cdot 10^{16}$ операцій за одну секунду.

• Розрахунок комп'ютерної потужності необхідної для симуляції Всесвіту в 2002-му зробив фізик Ллойд з МТУ - для неї потрібна машина з пам'яттю 10^{90} біт, яка виконає 10^{120} логічних операцій. Таких комп'ютерів поки що не існує. Але той же Ллойд, скориставшись досягненнями квантової механіки, розрахував граничну потужність комп'ютера масою в 1 кг і об'ємом в 1 дм³, і з'ясував, що він може виконати 10^{50} операцій в секунду. Мало того, **якщо закон Мура (кожні 24 місяці обчислювальна потужність процесора подвоюється при тому ж розмірі) виявиться вірним на найближчій парі сотень років, ми отримаємо таку машину вже через 250 років!** Вчені Бін, Давоуді і Севідж використовуючи квантову хромодинаміку зайнялися, фізикою такої моделі і з'ясували, що **в симуляції повинен існувати обрив в спектрі космічних променів на певних енергіях**. Найцікавіше, що він існує - **це межа Грайзена-Зацепіна-Кузьміна в 50 екселектронвольт**, яка пов'язана з тим, що високоенергетичні частинки взаємодіють з фотонами фонового реліктового випромінювання і втрачають енергію. Але експериментально, ця межа поки що не доведена, вона існує тільки в теоретичних викладах.

НАШ СВІТ ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ??



<https://www.kinoafisha.info/movies/7809888/>



У версії Дипака Чопри будь-яка система, поки за нею не спостерігають, являє собою розмиту суперпозицію, такого собі кота Шредингера, який не перебуває в якомусь конкретному стані. Отже, **Всесвіт для перебування в конкретному стані вимагає спостерігача.** А значить, існує один або кілька богів (надцивілізацій), які здійснили спостереження Всесвіту.

•У статті 2003 р. філософ з Оксфордського університету **Нік Бострем** висловив ідею того, що **наша реальність - це комп'ютерна симуляція, створена високорозвинутою цивілізацією.** У роботі він стверджував, що принаймні **одне з трьох припущень має бути істинним: цивілізації зазвичай вимирають, не встигнувши розвинути здатність до створення симуляції реальності; розвинені цивілізації зазвичай не зацікавлені в створенні симуляції реальності; ми майже напевно живемо всередині комп'ютерної симуляції.** Нещодавно астроном Колумбійського університету Девід Кіппінг уважно вивчив ці положення, також відомі як **«трілемма» Бострома**, і довів, **що ймовірність того, що ми дійсно живемо в симуляції, становить 50 на 50%.** Щоб краще розібратися в аргументі Бострома про симуляції, **Кіппінг вдався до байєсівського міркувань.** Цей тип аналізу використовує **теорему Байєса**, британського математика, який жив в 18-му столітті. Байєсівський аналіз дозволяє обчислити ймовірність того, що щось станеться (так звана «апостеріорна» ймовірність), попередньо зробивши припущення про подію, що аналізується (присвоївши йому «апріорну» ймовірність). Кіппінг почав з того, що перетворив трілемму в дилему. **Він звів перші два припущення в одне, стверджуючи, що вони обидва приведуть до одного і того ж результату - ми не живемо всередині симуляції.**

•Кіппінг також стверджує, що **чим більше шарів реальності було вбудовано в симуляцію (як в матрьошку), тим менше буде потрібно комп'ютерних ресурсів.** Іншими словами, чим далі ви спускаєтеся в кролячу нору, тим менше обчислювальних потужностей вам буде потрібно для створення переконливої симуляції. Висновок астронома після того, як він провів розрахунки був наступним: **ймовірність того, що будь-яка з гіпотез вірна, становить близько 50 %.** Але якби люди будь-коли придумали таку симуляцію, то картина змінилася б радикально. Наступний етап аналізу вимагав осмислення «пародійних» реальностей - тих, які можуть породжувати інші реальності - і «неспоріднених» реальностей - тих, які цього робити не можуть. Якби фізична гіпотеза була вірна, то ймовірність того, що ми живемо в безплідному Всесвіті, було б легко обчислити: вона склала б 100%.

ТИПИ ЦИВІЛІЗАЦІЙ

У своєму розвитку людська цивілізація пройшла ряд стадій представлених нижче. Зараз будується так зване *інформаційне суспільство*.



Нік Бострем. Докази симуляції

- 1) Висновки (1) і (2) - нелокальні. Вони стверджують, що *або всі цивілізації гинуть, або всі не хочуть створювати симуляції*. Це твердження поширюється не тільки на весь видимий Всесвіт, не тільки на весь нескінченний Всесвіт за межами горизонту видимості, а й на весь агломерат 10^{500} всесвітів з різними властивостями, які можливі, відповідно до теорії струн. На відміну від них, теза про те, що ми живемо в симуляції, - локальний. Загальні твердження набагато рідше бувають істинними, ніж часткові твердження. (Порівняй: «Всі люди блондини» і «Іванов блондин» або «всі планети мають атмосферу» і «Венера має атмосферу»). Щоб спростувати загальне твердження, достатньо одного винятку. Таким чином, *твердження про те, що ми живемо в симуляції, набагато ймовірніше перших двох альтернатив*.
- 2) Не обов'язково потрібен розвиток комп'ютерів - достатньо, наприклад, снів. Які будуть бачити генетично модифіковані і спеціально пристосовані для цього мізки.
- 3) Міркування про симуляцію працює в звичайному житті. *Велика частина зображень, які надходять до нашого мозку, є симуляціями* - це кіно, телевізор, інтернет, фотографії, реклама - і last but not least - сні.
- 4) Чим незвичніше видимий нами об'єкт, тим більше шансів, що він знаходиться в симуляції. Наприклад, якщо я бачу страшну аварію, то швидше за все я бачу її уві сні, по телевізору або в кіно.
- 5) Симуляції можуть бути двох типів: *симуляції всієї цивілізації і симуляції особистої історії або навіть якогось одного епізоду з життя однієї людини*.
- 6) Важливо відрізнити симуляцію від імітації - можлива симуляція людини або цивілізації, яких ніколи не існувало в природі.
- 7) *Надцивілізації повинні бути зацікавлені в створенні симуляцій, щоб вивчити різні варіанти свого минулого і таким чином різні альтернативи свого розвитку*. А також, щоб, наприклад, вивчити середню частоту інших надцивілізацій в космосі і їх очікувані властивості.
- 8) Проблема симуляції стикається з проблемою філософського зомбі (тобто істотами, позбавленими тіла, як тіні на екрані телевізора). Істоти, що Симулюються не повинні бути філософськими зомбі. Якщо в більшості симуляцій перебувають філософські зомбі, то міркування не працює (оскільки я не філософський зомбі.)
- 9) *Якщо є кілька рівнів симуляції, то одна і та ж симуляція 2 рівня може використовуватися в декількох різних симуляціях 1 рівня тими, хто живе в симуляції 0 рівня з метою економії обчислювальних ресурсів*. Це подібно до того, як багато різних людей дивляться один і той самий фільм. Тобто припустимо я створив три симуляції і кожна з них створила 1000 підсимуляцій. Тоді мені б довелося стимулювати 3003 симуляції на своєму суперкомп'ютері. Але якщо симуляції створили в принципі однакові підсимуляції, то мені достатньо змодельовати лише тисячу симуляцій, пред'являючи результат роботи кожної з них три рази. Тобто всього я запуску 1003 симуляції. Інакше кажучи, *одна симуляція може мати кілька господарів*.

Нік Бострем. Докази симуляції

- 10) Те, *живете ви в симуляції чи ні, можна визначити по тому, наскільки ваше життя відрізняється від середньостатистичного в сторону унікального, цікавого або важливого.* Тут передбачається, що робити симуляції цікавих людей, що живуть в цікавий час важливих змін - більш привабливо для авторів симуляції, не залежно від їх цілей - розважальних або дослідницьких. 70% людей, що колись жили на Землі, були неписьменними селянами. Однак тут потрібно враховувати ефект спостережної селекції: неписьменні селяни не могли задатися питанням про те, в симуляції вони чи ні, а отже, той факт, що ви не неграмотний селянин, ще не доводить, що ви в симуляції. ***Ймовірно, найбільший інтерес для авторів симуляції матиме епоха в районі Сингулярності, оскільки в районі неї можлива незворотна біфуркація шляхів розвитку цивілізації, на яку можуть вплинути малі чинники, в тому числі особливості однієї особистості.*** Наприклад, я, Олексій Турчин, вважаю, що моє життя настільки цікаве, що скоріше є симульованим, ніж реальним.
- 11) Те, що ми знаходимося в симуляції, збільшує наші ризики: а) симуляцію можуть вимкнути б) автори симуляції можуть ставити над нею експерименти, створюючи свідомо малоімовірні ситуації - падіння астероїда і т. ін.
- 12) Важливо відзначити слова Бострома про те, що принаймні одне з трьох вірно. Тобто можливі ситуації, коли деякі з пунктів вірні одночасно. Наприклад, те, що ми загинемо, не виключає того, що ми живемо в симуляції, і те, що більшість цивілізацій не створює симуляції.
- 13) Симуляції людей і світу навколо них можуть бути взагалі не схожі ні на яких реальних людей і реальний світ, ***важливо, щоб вони думали, що вони в реальному світі.*** Люди не здатні помітити відмінності, тому що взагалі ніколи ніякого реального світу не бачили, або їх здатність помічати відмінності притуплена як це буває уві сні.
- 14) Є спокуса знайти в нашому світі ознаки симуляції з боку як чудеса. Але чудеса можуть відбуватися і без симуляції.
- 15) Є модель світобудови, яка знімає запропоновану дилему. (Але не позбавлена своїх протиріч). А саме, це ***кастанедівсько-будійська модель, де спостерігач породжує весь світ (сон бога).***
- 16) Ідея симуляції має на увазі спрощення. ***Якщо симуляція буде з точністю до атома, то вона буде тією ж самою реальністю. У цьому сенсі можна уявити собі ситуацію, коли якась цивілізація навчилася створювати паралельні світи із заданими властивостями. У цих світах вона може ставити натурні експерименти, створюючи різні цивілізації. Тобто це щось на кшталт гіпотези космічного зоопарку. Ці створені світи НЕ будуть симуляціями, оскільки вони будуть цілком реальні, але вони будуть під владою тих, хто їх створив і може включити або вимкнути комп'ютер. І їх теж буде кількісно більше, оскільки тут можна застосувати схоже статистичне міркування, як і в міркуванні про симуляції.***

ВИСНОВОК

•Технологічно зріла постлюдська цивілізація повинна мати у своєму розпорядженні *величезну обчислювальну потужність*. Грунтуючись на цьому, міркування про симуляцію показує, що принаймні *одна з наступних тез є істинною*:

(1) *Частка цивілізацій людського рівня, які досягають постлюдського рівня, дуже близька до нуля.*

(2) *Частка постлюдських цивілізацій, які зацікавлені у запуску симуляцій попередників, дуже близька до нуля.*

(3) *Частка всіх людей з нашим типом переживань, які живуть у симуляції, близька до одиниці.*

Якщо вірно (1), то ми (наша цивілізація) майже напевно помремо до того, як досягнемо постлюдського рівня.

Якщо вірно (2), тоді має бути суворо узгоджена конвергенція шляхів розвитку всіх просунутих цивілізацій, так щоб у жодній з них не було багатих індивідів, які хотіли б запускати симуляції предків і були б вільні робити це.

Якщо вірно (3), *ми майже напевно живемо в симуляції*. Темний ліс нашого незнання робить розумним розподіл нашої впевненості майже рівномірно між пунктами (1), (2) та (3). За *винятком того випадку, що ми вже живемо у симуляції*, наші нащадки майже напевно ніколи не запускатимуть симуляції – своїх предків.

Але наша цивілізація цим ВЖЕ ЗАЙМАЄТЬСЯ.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30372>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30373>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30407>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30443>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30463>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30461>

<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/30464>