

КВАНТОВА ЗАПЛУТАНІСТЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В цій роботі розглянуто поняття корпускулярно-хвильового дуалізму – фундаментальної концепції квантової механіки, яка продовжує залишатися загадкою для людського розуміння. Експерименти, описані в тексті, показують, що на мікроскопічному рівні об'єкти можуть демонструвати властивості як хвиль, так і частинок, залежно від умов спостереження.

Ключові слова: інтерференційна картина, спин, квантова заплутаність, корпускулярно-хвильовий дуалізм.

Abstract

This paper examines the concept of wave-particle duality, a fundamental concept of quantum mechanics that continues to be a mystery to human understanding. The experiments described in the text show that at the microscopic level, objects can exhibit properties of both waves and particles, depending on the conditions of observation.

Keywords: interference pattern, spin, quantum entanglement, wave-particle duality.

Вступ

У 2013 році група вчених з США провели експеримент. Вони проробили два прорізи в силіконовій мембрані з золотим покриттям. Товщина мембрани складала 100 нм, товщина золотого покриття 2 нм. Ширина кожного прорізу складала 62 нм, довжина 4 мкм. Ці паралельні прорізи розташовувались на відстані 272 нм один від одного. Відстань вимірювалась від центру одного прорізу до центра іншого. У цій установі було ще важливе доповнення – автоматичний механізм, що міг переміщати по мембрані перешкоду, блокуючи той чи інший проріз. В ході експерименту пролітало по одному електрону в секунду, а на екрані детектора, що був розташований далі, утворювалась картина, формування якої займало дві години. Процес записувався на відео. Коли обидва прорізи були відкриті, то утворювалась інтерференційна картина, а коли один з прорізів був заблокований, то нічого подібного вже не було. Електрони ніби поводять себе як частинки, та як хвилі одночасно. Кожен електрон здавалося знав не тільки конфігурацію експериментальної установки в момент свого прольоту через неї, але і те, що сталося з електронами, які пролетіли до нього, та з тими, що пролетять після нього пізніше. Але і це ще не все. Складалося враження, що через установку вони проходять як хвилі, а до екрану детектора уже долітають як частинки.

Основна частина

З допомогою рівнянь квантової механіки, можна описати уявний експеримент, в якому атом випускає електрон, що летить у простір (в реальності це процес, що називається бета-розпадом). Електрон має спин – позитивний, або негативний. Спин – це корисна властивість при обговоренні багатьох квантових явищ, оскільки він може приймати два значення. Їх можна уявити напрямленими вгору та вниз, і позначити, як позитивний та негативний. Визначити це заздалегідь неможливо, шанси 50 на 50. Провівши експеримент 1000 разів, або одночасно з 1000 атомів, то нарахуємо 500 електронів (можливо трішки менше, або трішки більше) з позитивним спіном і 500 з негативним спіном. Поки нічого дивного, але Ейнштейн зрозумів, що рівняння квантової теорії пророкує щось дивне, коли йдеться про два електрони, які розлітаються в протилежних напрямках. У певних обставинах тут застосовується закон збереження, згідно з яким ці електрони повинні мати протилежні спіни – один позитивний, інший негативний. В результаті вони один одного компенсують. Але рівняння показують, коли електрони вилітають з атома, в них немає певного спіна.

Вони знаходяться в так званій суперпозиції, суміші станів позитивного та негативного спіна. Електрон вибирає який стан прийняти, лише коли взаємодіє з чимось ще. Ейнштейн вказав на наступне: «Якщо два електрона повинні весь час мати протилежні спіни, то в момент коли перший електрон вирішує, що його спін буде мати позитивне значення, інший повинен мати негативний спін, як би далеко один від одного вони не були.» Ейнштейн назвав це «принцип далекодії», оскільки на перший погляд складалося враження, ніби електрони повинні підтримувати між собою зв'язок із надсвітловою швидкістю, що виключає спеціальна теорія відносності. Ідею Ейнштейна змогли розвинути та викласти в формі статті Борис Подільський та Натан Розен. Вона вийшла в 1933 році. За ініціалами авторів вона відома, як стаття EPR (Einstein-Podolsky-Rosen)[1]. В 1935 році Шредингер назвав спосіб, за допомогою якого дві квантові системи з'єднані «принципом далекодії» - квантовою заплутаністю. В статті EPR констатувалося, що квантова теорія ставить реальність властивостей другої системи в залежність від процесу вимірювання, виробленого над першою системою. Хоча цей процес ніяк не впливає на другу систему. Ніяке розумне визначення реальності не повинно, здавалось би, допускати цього. Автори дійшли висновку: «Ми повинні зробити висновок, що квантово-механічний опис фізичної реальності не є повним.» Ейнштейн вважав, що повинен існувати певний фундаментальний механізм, відомий як приховані змінні. Завдяки йому електрони, розлітаючись в різні сторони від джерела, позбавлені можливості вибирати значення спіна. Все вже вирішено. Вихід статті EPR викликав серед фахівців запеклі суперечки. Але справжній прорив у розумінні заплутаності та її наслідків відбувся лише через три десятиліття і значною мірою тому, що один з найвидатніших математиків свого часу, Джон Фон Нейман, зробив помилку в важливій книзі по квантовій механіці, що побачив світ в 1932 році, до виходу статті EPR. В цій книзі Фон Нейман навів доказ того, що теорії з прихованими змінними не в змозі пояснити поведінку квантового світу, що такі теорії неможливі. Його науковий авторитет був настільки високий, що йому всі повірили, точніше майже всі. Молода німецька дослідниця Грета Герман виявила помилку в його міркуваннях та написала про це статтю[2](переклад з німецької на англійську – [3]) в 1935 році в філософському журналі, який фізики не читали. Фахівці відкрили для себе цю публікацію набагато пізніше. І аж в 1960-х один фізик докладно розібрав аргументи Фон Неймана і показав, що в них було не так. Згадка про приховані змінні можливо не сподобалась би Ейнштейну, оскільки той же фізик довів, що всі подібні теорії повинні включати в себе той самий «принцип далекодії», який Ейнштейн дуже не любив, і яку більш формальною мовою називають «нелокальністю.» Цим фізиком був Джон Белл, який взяв відпустку з роботи і на кілька місяців поїхав в США, попрацювати над тим, що здається йому цікавим. Стаття[4], яка стала результатом цієї відпустки в повсякденній роботі змінили всім відомі факти про квантовий світ ніж будь-що інше, ще з часів відкриття корпускулярно-хвильового дуалізму. По-перше Белл пояснив що було не так у міркуваннях Фон Неймана. Потім показав, як можна було б, в принципі, спроектувати експеримент, який перевірів би існування ефектів нелокальності. Точніше кажучи, цей експеримент дозволив би перевірити припущення локальної реальності. Визначення «локальної» говорить про те, що ніякого «принципу далекодії» не існує. Об'єкти впливають на інші об'єкти лише у своїй локації, що визначається через відстань, яку може пройти світло за певний час.

Реальність – це концепція, згідно якої реальний світ існує незалежно від того дивиться на нього хтось, чи ні, вимірює його хтось, чи ні. Через імовірнісну природу квантового світу запропонований Беллом експеримент вимагав би вимірювання великого числа пар частинок, таких як електрони або фотони, що проходять через установку. Цей гіпотетичний експеримент був спланований так, що після великої кількості прогонів мало вийти два набори вимірювань. Якщо б один набір чисел виявився більшим за інший, це довело б, що припущення локальної реальності справедливо. Це співвідношення відоме як «нерівність Белла», а пов'язаний з ним комплекс ідей – «теорема Белла». Якби всупереч нерівності Белла більшим виявився інший набір чисел, то це означало би, що гіпотеза локальної реальності неправдива. Якщо квантова механіка правдива, то нерівність Белла повинна порушуватись. Або світ реальний, але з «принципом далекодії», або це локальність, але за умови, що ніщо не є реальним, якщо його ніхто не спостерігає. Раніше фізики вже намагалися пройти по цьому шляху, хоча деякі з них цього навіть не усвідомлювали. Коли в 17 столітті Роберт Гук та Ісаак

Ньютон розробляли свої ідеї щодо тяжіння, вони розуміли, що Місяць утримується на орбіті навколо Землі завдяки якійсь силі, яка притягує їх одна до одного. І що планети утримуються на своїх орбітах навколо Сонця завдяки тій самій силі. У 20 столітті, Ейнштейн, розробивши загальну теорію відносності, змінив ідеї дії гравітації на відстані на ідеї про викривлення простору. Для проведення запропонованого Беллом експерименту були потрібні технічні рішення, які були недоступні в середині 1960-х. Але ці експерименти провели вже до початку 1980-х років з використанням фотонів замість електронів. В результаті було доведено, що нерівність Белла порушується.

Висновок

Локальна реальність не є достовірним описом нашого світу. Сам Джон Белл на конференції в Женеві в 1990 році сказав: «мені невідомо ні про одну концепцію локальності, яка працює з квантовою механікою.» Тому думаю, що ми «приречені» на нелокальність. Ейнштейн можливо вважав, що ніяке розумне визначення реальності не може цього допустити, але ми повинні зробити висновок, що реальність, кажучи його ж словами, не є розумною. Проте найбільш вражаючу особливість часто упускають з поля зору. Хоча стартовою точкою для теореми Белла була спроба розібратися в квантовій фізиці, результати відносяться не тільки до галузі цієї науки. Вони відносяться до всього світу. Немає значення чи думаємо ми, що коли-небудь квантову фізику в ролі опису нашого світу може замінити щось інше, чи ні. Експерименти показують, що локальна реальність незастосовна до нашого світу. Чому ми віддаємо перевагу, зберегти реальність і прийняти нелокальність, або зберегти локальність і відкинути реальність, справа наших особистих переваг. Але зберегти те й інше – неможливо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? – 1935. – Режим доступу до ресурсу: <https://cds.cern.ch/record/405662/files/PhysRev.47.777.pdf>
2. Grete Hermann, Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik – 1935. – Режим доступу до ресурсу: <https://cqi.inf.usi.ch/qic/grete.pdf>
3. Grete Hermann, The foundations of quantum mechanics in the philosophy of nature – 1999. – Режим доступу до ресурсу: https://cqi.inf.usi.ch/qic/grete_en.pdf
4. J. S. Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox – 1964. – Режим доступу до ресурсу: https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200_001.pdf

Зозуля Владислав Олександрович – студент групи 4КН-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: adunadan12@gmail.com.

Науковий керівник: **Володимир Валерійович Мартинюк**—доцент Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua.

Zozulya Vladyslav Oleksandrovych – student of group 4KN-24b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: adunadan12@gmail.com.

Academic supervisor: **Volodymyr Valeriyovych Martynyuk**— Associate Professor of Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua.