

КВАНТОВА ГРАВІТАЦІЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В цій роботі розглянуто поняття чотирьох фундаментальних взаємодій природи: гравітації, електромагнетизму, сильної та слабкої взаємодії. Основну увагу приділено гравітації як винятковій силі, яка не має підтвердженого квантового носія взаємодії — гравітона. Описано, як стандартна модель описує три з чотирьох взаємодій через квантові теорії поля, тоді як гравітація досі базується на класичній загальній теорії відносності Ейнштейна. Пояснено, чому створення квантової теорії гравітації є складною задачею: стандартні методи, зокрема перенормалізація, не працюють для гравітаційного поля, що унеможливорює поєднання загальної теорії відносності з квантовою механікою.

Ключові слова: квантова гравітація, гравітон, фотон, загальна теорія відносності, перенормалізація.

Abstract

This paper examines the concept of the four fundamental interactions of nature: gravity, electromagnetism, strong and weak interactions. The main focus is on gravity as an exceptional force that does not have a confirmed quantum carrier of the interaction - the graviton. It describes how the Standard Model describes three of the four interactions through quantum field theories, while gravity is still based on Einstein's classical general theory of relativity. It explains why creating a quantum theory of gravity is a difficult task: standard methods, in particular renormalization, do not work for the gravitational field, which makes it impossible to combine general relativity with quantum mechanics.

Keywords: quantum gravity, graviton, photon, general relativity, renormalization.

Вступ

Гравітони – це, напевно, майже неловима частинка. Але чому в гравітації взагалі повинні існувати якісь частинки? Взагалі то, вони і не повинні. Але сьогодні багато вчених вважають що вони можуть існувати і на користь цього є чимало цікавих аргументів. Але, поки що, гравітони – частинки виключно гіпотетичні. У вчених немає прямого доказу їх існування, а про те, чи можна їх виявити взагалі, вчені сперечаються не перше десятиліття.

Основна частина

Існує чотири фундаментальні взаємодії, які іншими словами називають чотирма силами природи: гравітація, електромагнетизм, сильна взаємодія та слабка взаємодія. Вважається, що вони керують всіма процесами, що ми спостерігаємо у Всесвіті. Три з чотирьох сил, а саме електромагнетизм, сильна та слабка взаємодія, описуються стандартною моделлю елементарних частинок. І головне, що для кожної з них є свої частинки, або група частинок, так званих носіїв взаємодії: фотон для електромагнетизму, W- і Z- бозони для слабкої взаємодії і група глюонів для сильної взаємодії. Ці частинки є механізмом роботи взаємодій. Наприклад, чому частинки, що мають однаковий електричний заряд (припустимо два електрона) відштовхуються, а з різним електричним зарядом – притягуються? Звідки вони знають, що повинні це робити? Тут і потрібні носії взаємодії, в даному випадку фотони. Електрони ними обмінюються і це приводить до певного результату. Так само кварки всередині протона або нейтрона обмінюються глюонами за рахунок чого утримуються разом. Як вже було сказано, такі носії взаємодії існують лише для трьох із чотирьох взаємодій. Але для гравітації ні. Власне, гравітон і є цим гіпотетичним, досі не виявленим носієм взаємодії гравітації. Ніби логічно, що якщо у всіх інших сил є свої частинки, то і у гравітації вони повинні бути. Але насправді не обов'язково. Гравітація має велику відмінність від інших сил. І саме через свою унікальність дуже важко поєднати гравітацію з іншими силами. Наприклад, гравітація – найслабша зі всіх фундаментальних взаємодій, при чому слабша вона не в кілька раз, а на багато порядків. Хоча різниця в силі і велика, але це не здається проблемою. Але, можна навести інший приклад. Електромагнетизм, сильна та слабка

взаємодія діє на частинки, які мають певний вид заряду. З електромагнетизмом більш менш все зрозуміло. А частинки, на які діє сильна взаємодія, мають колірний заряд. Ця назва не має ніякого стосунку до оптичного кольору. У електромагнетизму два типи заряду (позитивний та негативний), а в сильної взаємодії – колірний заряд, що має три кольори: червоний, зелений та синій. В гравітації немає позитивного чи негативного заряду, або колірного заряду. В гравітації всього один варіант «заряду», роль якого грає маса та енергія. І з цього можна зробити один цікавий висновок: якщо інші взаємодії діють лише на ті частинки, які мають потрібні заряди, то гравітація діє на все, що має енергію, або масу. Це єдина сила, що діє на всі частинки і взагалі на все навколо. В фотона немає маси, але є енергія. Тобто фотон також підкоряється гравітації. Класична теорія гравітації – це загальна теорія відносності Ейнштейна, в якій єдиний простір-час не є порожнечою, а є самостійною сутністю, яка в присутності маси або енергії викривляється. Таким чином одні об'єкти, що викривляють простір змушують інші об'єкти рухатись по цьому викривленому простору певним чином. Це і називається гравітацією. Теорії трьох інших сил, а саме електромагнетизму, сильної та слабкої взаємодії, описують їх як щось, що відбувається на фоні статичного простору-часу. І тільки теорія гравітації описує еволюцію самого простору-часу. Простіше кажучи, три інших сили діють в просторі-часі, а гравітація – це ефекти самого простору-часу.

Загальна теорія відносності – класична. Іншими словами, вона не квантова. Доволі часто коли описують різницю між загальною теорією відносності і квантовими теоріями акцент роблять на тому, що теорія гравітації описує те, що відбувається на масштабах макроскопічних, а квантові теорії описують те, що відбувається на масштабах мікроскопічних. В класичній теорії фізичні величини мають чіткі значення, які ми можемо виміряти з великою точністю. А в квантових теоріях зробити те ж саме для частинок – неможливо. Згідно принципу невизначеності Гейзенберга неможливо точно знати абсолютно все про частинку. Якщо ми точніше визначаємо швидкість частинки, то менш точно ми будемо знати місцезнаходження цієї частинки і навпаки. В класичній теорії подібного немає. І з цим пов'язаний той факт, що класична теорія – детерміністична. Якщо ми знаємо все про поточний стан системи, то ми можемо точно передбачити що з нею відбудеться в майбутньому. Наприклад, якщо ми кинемо м'яч і зробимо стоп-кадр на телефоні, то, знаючи його положення, швидкість, напрямок і всі фактори які на нього можуть вплинути, ми зможемо точно передбачити по якій траєкторії полетить м'яч далі і де він виявиться. В квантових теоріях навпаки, всюди є ймовірність. Ми не можемо стан системи визначити точно, а значить і те, що з нею відбудеться в майбутньому також визначити не зможемо. Можна тільки говорити про певну ймовірність того, що з системою може статися. Особливо важлива відмінність в тому, що в квантовій механіці фізичні величини квантуються. Це означає що енергія, положення, імпульс, спіні можуть приймати не будь-які значення, а лише певні. Яскравий приклад цього – електрон, який в атомі займає строго певні енергетичні рівні. А щоб електрон перескочив на інший енергетичний рівень потрібно не просто багато енергії, необхідно випромінювання з певною довжиною хвилі. Також варто згадати, що квантові теорії, що описують три з чотирьох фундаментальних взаємодій – це квантові теорії поля. В них центральне місце займають квантові поля, які пронизують весь Всесвіт, а частинки – це збурення в цих полях з певною енергією. Коли говоримо про гравітацію, то також згадуємо поле – гравітаційне поле. Але різниця в тому, що це поле класичне, а не квантове. Воно не квантується. А в квантових полів є свої дискретні кванти. Фотон – квант електромагнітного поля, глюон – кванти глюонного поля і т.д. Загальна теорія відносності – не квантова. В ній немає ніяких частинок гравітації, а гравітон був би квантом гравітаційного поля в квантовій гравітації.

В чому ж проблема створити квантову теорію гравітації? Про деякі відмінності гравітації від інших сил було згадано. Але якщо поглянемо на інші сили, наприклад на електромагнетизм, то раніше він також описувався класичною теорією і тільки потім була створена квантова електродинаміка. Можливо необхідно просто застосувати схожі математичні методи, але вже до гравітації? Вчені довгий час стараються саме це і зробити, але в них поки що нічого не вийшло. Проблема в тому, що коли вчені стараються створити квантовий опис для фундаментальних взаємодій в розрахунках починають з'являтися нескінченності. Але є спосіб, який дозволяє боротися з нескінченністю. Тут використовують так звану перенормалізацію. Суть в тому, що в розрахунки певним чином додаються додаткові параметри, які ці нескінченності відмінюють. Такий прийом призводить до того, що теорія не тільки видає результати, які мають фізичний зміст, але ще і підтверджується експериментами з високою точністю. Теорії з якими цей трюк проходить називають перенормалізованими. І квантові теорії, які описують три з чотирьох взаємодій є такими. Але спроба створити квантову гравітацію схожим

шляхом здається неперенормалізованою. Це значить, що при спробі квантувати гравітацію в розрахунках з'являються нескінченності і спроба виправити це через перенормалізацію не є вдалою. Тому що, щоб прибрати одні нескінченності необхідно добавляти нескінченне число додаткових параметрів. Часто це є однією з причин, яку мають на увазі, коли говорять про те, що загальну теорію відносності не вдається поєднати з квантовою теорією. Але вчені все ж намагаються знайти квантову теорію гравітації. Це дало би величезний прорив в світі фізики. І можливість вирішити проблеми чорних дир (наприклад, проблему сингулярності), можливість зрозуміти що відбувалось в перші миті існування Всесвіту, з чим теперішні теорії поки що не справляються. Ну і звісно можливість створити так звану теорію всього. Але не треба виключати можливість, що гравітацію не вийде квантувати, тобто вона принципово інша, працює по-іншому, ніж інші сили. Якщо це так, то і ніяких гравітонів немає. І навпаки, якщо вченим вдасться знайти гравітон – це доведе квантову природу гравітації. Цікаво, що у вчених навіть є ідеї про те, який цей гравітон повинен бути.

Як і з багатьма поки гіпотетичними термінами існує не один опис гравітона. Що ж таке взагалі гравітон? Як це взагалі, частинка гравітації? Тут ми можемо провести паралель з іншими частинками і полями. В якості прикладу візьмемо електромагнетизм, для якого квантовий опис вже існує. В нас є дві частинки з зарядом (наприклад електрони), які по іншому ще описуються як збурення в електромагнітному полі з певною енергією. Коли вони знаходяться досить близько один до одного, вони відштовхуються і сучасні теорії пояснюють це тим, що два електрона обмінялись фотоном – носієм електромагнітної взаємодії, яке є збуренням в електромагнітному полі (ще його називають полем фотонним). В випадку з гравітонами ситуація схожа, але замість електронів, у яких повинен бути певний заряд, ми можемо розглядати будь-які частинки з масою та енергією. І коли вони достатньо зближуються, то вони притягуються гравітацією, обмінюючись вже гравітонами. Порівняння фотонів з гравітонами не випадкове. Сучасні теорії передбачають, що якщо гравітон існує, то він повинен мати певні властивості. І по багатьох параметрах він схожий на фотон. Скоріш за все, вони, як і фотони, не мають маси, а значить, вони, як і фотони, рухаються зі швидкістю світла. Відрізняється гравітон від фотона спіном. Якби він існував, то це була б єдина елементарна частинка зі спіном 2, але поки гравітони напряду виявлені не були. Але можливо вони себе можуть якось проявляти? Є ще один цікавий аспект порівняння гравітонів з фотонами, адже фотони є не тільки носіями електромагнітної взаємодії. Мова йде про світло. Світло має квантову природу і складається з фотонів, які, як і всі інші частинки, можуть поводити себе як частинки, так і як хвилі. Тоді виходить існують також гравітаційні хвилі. Ці хвилі, на відміну від гравітонів, були виявлені напряду експериментально. Астрофізик Ітан Сігель порівнює хвилі гравітаційні з хвилями на воді. Ми бачимо хвилі на воді, вони є об'єктами макроскопічними. Але якщо ми збільшимо зображення хвилі, то побачимо, що насправді це рух багатьох молекул води. Ситуація з гравітаційними хвилями може бути схожою. Різниця поки що в тому, що макроскопічні хвилі за допомогою певних детекторів ми бачимо, а от гравітона на масштабах мікроскопічних поки що не виявлено.

Висновок

Серед чотирьох фундаментальних взаємодій гравітація залишається найменш вивченою у контексті квантового опису. Попри значні успіхи у формалізації квантових теорій електромагнетизму, сильної та слабкої взаємодії, спроби побудувати узгоджену квантову теорію гравітації наразі не дали задовільного результату. Пошуки гравітона як кванта гравітаційного поля є важливою складовою цих зусиль, оскільки його виявлення стало б переконливим свідченням квантової природи гравітаційної взаємодії. Розв'язання проблеми квантування гравітації дозволило б здійснити довгоочікуване об'єднання загальної теорії відносності з квантовою механікою та створити єдину теоретичну основу для опису всіх фундаментальних процесів у природі. Такий прорив мав би фундаментальне значення як для розуміння еволюції Всесвіту, так і для подолання концептуальних обмежень сучасної фізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. C. Rovelli, Quantum Gravity – 2004. – Режим доступу до ресурсу: https://assets.cambridge.org/97805218/37330/frontmatter/9780521837330_frontmatter.pdf

2. И. Владленова, Философско-методологические проблемы квантовой теории гравитации – 2008. – Режим доступа до ресурсу:
<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/27ff2c15-a371-45cb-95da-f6607bccddd/content>
3. T. Rothman, S. Boughn, Can Gravitons Be Detected?– 2008. – Режим доступа до ресурсу:
https://www.researchgate.net/publication/1970628_Can_Gravitons_Be_Detected

Зозуля Владислав Олександрович – студент групи 4КН-24б, 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 Oleksandrovyh – 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.