

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ ТА НОВА ФІЗИКА

П. О. Наказной^a

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Анотація

В огляді наведені деякі сучасні досягнення та проблеми фундаментальної фізики. Основна мета – привернути увагу студентів та молодих науковців до цієї області науки а також показати що фізика не обмежується предметами, що вивчаються в університеті, змалювати картину живої науки, яка постійно розвивається і вабить своїми фантастичними результатами.

Обрана мета та лімітований час дозволяють не дотримуватись наукової строгості, бо кожна із згаданих теорій вимагає, щонайменше, семестрового курсу для свого більш-менш коректного викладення. Також ця лекція не присвячена історії науки, тому в ній не дотримана хронологія подій та аутентичність оригінальних міркувань.

Ключові слова: теорія відносності, космологія

1. Поняття взаємодії

Однією з головних задач фізики як науки є опис структури матерії та її рух у різноманітних формах. Будемо називати взаємодію причиною рухів. В такому підході однією із задач фізики є вивчення взаємодій. Упродовж кількох століть було виявлено що всі взаємодії можна звести до кількох типів, що отримали назву фундаментальних. Вони усі є безконтактними та поширюються у просторі в середовищі, яке називають полем. Інтенсивність кожної взаємодії визначається відповідним зарядом, який можна приписати кожному тілу. Отже на середину минулого століття були відомі:

- Гравітаційна взаємодія що забезпечує існування Мегасвіту, бо саме завдяки їй існують у вигляді зв'язаних систем зірки та галактики. На планеті, що внаслідок гравітаційної взаємодії обертається навколо однієї з таких зірок у одній із галактик ми живемо.
- Електромагнітна взаємодія, завдяки якій в атомах зв'язуються ядра та електрони, а молекули, з яких ми складаємось, утворюються з різних атомів.
- Сильна взаємодія між кварками в нуклонах зв'язує заряджені однойменним електричним зарядом протони в ядрах атому чим забезпечує їх існування, а, отже, і різноманіття хімічних елементів
- Слабка взаємодія спричинює термоядерну реакцію, яка є джерелом енергії зірок, у тому числі Сонця, одним із наслідків зоряного горіння є синтез важких хімічних елементів в процесі еволюції Всесвіту.

Засобом вивчення фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою декількох теорій, що також називають фундаментальними:

- Класична механіка Ньютона, в основі якої лежать принцип відносності Галілея та закон гравітації Ньютона
- Теорія відносності Айнштайна в якій постулюються принципи відносності Айнштайна та еквівалентності
- Квантова механіка, яка ґрунтується на корпускулярно-хвильовому дуалізмі.

В кожній теорії виникають характерні фундаментальні константи: G – гравітаційна стала у класичній механіці, c – швидкість світла у вакуумі в теорії відносності та \hbar – стала Планка у квантовій теорії. Наведені теорії можуть поєднуватись для опису конкретних задач. Взагалі області їх застосування можна відобразити у вигляді, так званого, кубу теорій, по осях якого відкладені фундаментальні константи (рис. 1).

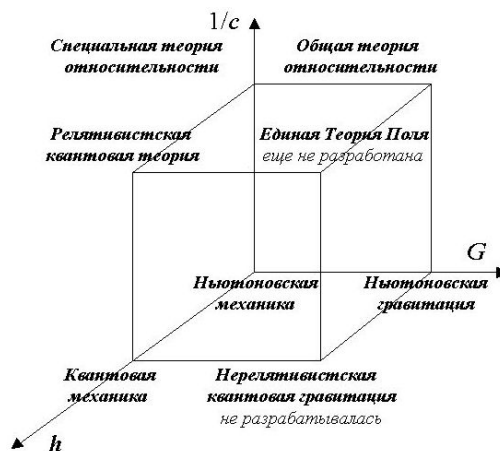


Рис. 1. Куб теорій на якому умовно зображені фундаментальні теорії. У якості координат відповідні цим теоріям фундаментальні константи. Щоб “вимкнути” якусь теорію, необхідно занулити якусь константу або константи.

^aPavel.Nakaznoy@gmail.com

2. Теорія відносності

Першою фундаментальною теорією була класична механіка. Закладена у 1687-ому р. роботою Ньютона «Математичні начала натуральної філософії», ця теорія упродовж 200-х років мала величезний триумф у фізичному світі. Її основна властивість – розгляд просторових та часових інтервалів як абсолютні, тобто такі що не залежать від руху спостерігача. Це означає що взаємодія в цій теорії є дальнодіюча: якщо тіло зміщується у просторі то про зміну його положення миттєво стає відомо усім іншим тілам, якби далеко від першого вони не знаходились.

Проблеми виникли у 1864 р., коли з'явилась робота Максвелла «Динамічна теорія електромагнітного поля», яка узагальнювала спостережувані результати з вивчення електромагнітної взаємодії. Зокрема у цій теорії передбачалось існування електромагнітних хвиль у вакуумі із сталою швидкістю розповсюдження, що, зрозуміло, не узгоджувалось із принципом відносності Галілея. Якщо електромагнітні хвилі, як і інші, відомі на той час хвилі, наприклад, звукові, є збуренням деякого середовища, що називали ефіром та розповсюджуються у ньому, то в залежності від відносного напрямку швидкостей хвилі та середовища, результуюча швидкість повинна була бути різною (класичний ефект Доплера). Для перевірки даного результату теорії Максвелла у 1881 – 1887 роках Майкельсоном були проведені знамениті зараз інтерференційні досліді, що із високою точністю довели: швидкість світла не залежить від швидкості спостерігача (рис.2).

Якщо відкидати штучні пояснення ad hoc, пояснення цього парадоксу могло бути здійснене лише шляхом корекції механіки Ньютона.

В той же час, подібна ситуація склалась, коли аналізуючи результати спостережень випромінювання абсолютно чорного тіла, Планк помітив що вони чудово пояснюються якщо припустити що енергія, яка переноситься електромагнітним випромінюванням, може набувати не довільне значення а лише цілу кількість мінімальних порцій, тобто квантуватись. Обидва ці результати були приголомшуючі для тогочасної фізики. Ситуацію, що склалась наприкінці 19-ого століття, яскраво ілюструє майже анекдотичний випадок. Відомий фізик Уільям Томпсон (лорд Кельвін) в урочистій промові, що присвячена зустрічі нового 20-ого століття, окреслив фізику як майже завершену науку, на чистому небосхилі якої можна вказати лише дві хмаринки-труднощі: з розумінням результатів випромінювання

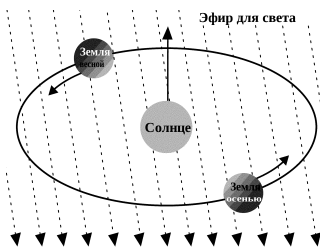


Рис. 2. Швидкість світла, коли воно рухається разом із ефіром (наприклад, восені) і назустріч йому (навесні) повинна відрізнятись. За допомогою інтерферометра Майкельсона ці швидкості можна порівняти.

абсолютно чорного тіла та описом руху Землі крізь ефір (негативний результат дослідів Майкельсона). Посміхаючись наївності (а можливо й далекоглядності) лорда Кельвіна ми через 100 років знаємо, що з цих «хмаринок» пішов «дощик» у вигляді квантової теорії та теорії відносності. І що ці дощики не лише перевернули фізичну картину світу, а примусили зрозуміти – абсолютно вірних теорій не існує!

До обох революційних теорій має безпосереднє відношення Айнштайн. У 1905 році (в історії фізики «рік чудес», лат. Annus Mirabilis) вийшли його 4 знаменитих роботи. В одній з них була викладена теорія фотоефекту, яка стала поштовхом для подальшого розвитку квантової теорії, а в двох наступних почала спеціальна теорія відносності¹. Зосередимось на логіці побудови спеціальної теорії відносності²

Спершу слід за Айнштайном задати питання: «Чи можна вважати просторові та часові інтервали абсолютними?». Вимірювати координати можна лише відносно чогось, а час – те що показує годинник, тобто у нашій системі координат гарантовано присутні тіло для виміру довжини та тіло у якому відбувається періодичний процес. Отже така система не є вакуумом (у сенсі порожнього середовища), а вакуум, у свою чергу, не може слугувати системою відліку (Цитата Айнштайна: «Ефір “вакуум” неможна уявити як такий, що складається з частин, за якими можна слідкувати в часі; такою властивістю володіє лише вагома матерія; також до нього не можна застосовувати поняття руху»). Таким чином, ефіру (як порожнього середовища із механічними властивостями) не існує. Крім того, швидкість світла у вакуумі мусить бути сталою величиною, бо будь які її зміни дозволили б «відмітити» маркером певні точки вакууму, що протирічить його сенсу³.

Після введення цього постулату, додаючи принцип відносності Айнштайна, який стверджує що усі закони природи однакові в різних інерціальних системах відліку (на відміну від принципу відносності Галілея, який стверджував це лише для законів класичної механіки), можна нескладними математичними перетвореннями отримати усі відомі формули СТВ: перетворення Лоренца, вираз для енергії, скорочення Лоренца тощо, а також прийти до математичного опису простору-часу як єдиного цілого (простору Мінковського).

Приблизно за 10 років (у 2015 році неофіційний ювілей!⁴) Айнштайн створює загальну теорію відносності, яка є релятивістською теорією гравітацій-

¹У четвертій роботі була викладена теорія броунівського руху, яка мала велике значення для розвитку статистичної фізики

²В популярній літературі часто про СТВ йдеться як про щось дивне й фантастичне. Мета цієї лекції буде досягнута навіть якщо із усього викладеного слухач збагне логічну простоту та «очевидність» цієї теорії, а механіку Ньютона, навпаки, складною і нереалістичною.

³Слід підкреслити: це не доведення постулата про сталу величину швидкості світла у вакуумі, бо постулат можна довести лише виходячи з інших постулатів – це пояснення, з яких міркувань ми його обираємо.

⁴На відміну від СТВ, засади ЗТВ створювались упродовж декількох років, тому ця дата досить умовна

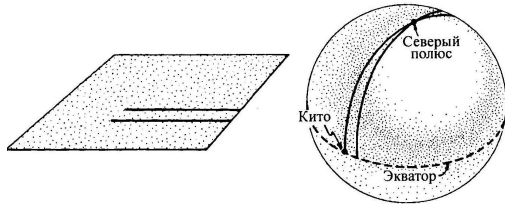


Рис. 3. Рух на викривленій поверхні сфери. Рухаючись по локально паралельним кривим внаслідок криволінійності нашого простору ми переткнемось на полюсі. Це можна ефективно трактувати як наявність деякої сили, що притягає нас.

ної взаємодії. Розглянемо схему її побудови. Перед усім, помітимо, що ньютонівська теорія гравітації не задовольняє принципу відносності Айнштайна, бо гравітаційна взаємодія, як відомо із дослідів, є далекосяжною, а, отже, взагалі кажучи, не може бути «ввимкнена» у жодній інерціальній системі відліку. Ця обставина вказує на необхідність побудови іншої теорії гравітації. Це, апріорі, можна зробити у два способи: розглядаючи гравітацію як один з видів силового поля, наприклад електромагнітного, рівняння якого треба встановити⁵, або як фіктивну взаємодію, яку ми сприймаємо внаслідок невірної опису руху в неінерціальній системі відліку, у якій принцип відносності не виконується.

Розглянемо геометричну аналогію. ІСВ це площина, на якій геодезична (крива, відстань на якій між двома точками є найменшою) це пряма лінія. Рухаючись по двох паралельних геодезичних спостерігачі із однаковими швидкостями ніколи ані віддаляться, ані зближаться. Якщо ми розглянемо аналогічну ситуацію на іншій викривленій поверхні, ситуація зміниться. Наприклад, рухаючись від екватору за локально паралельними кривими ми, врешті рещт, переткнемось на полюсі (рис. 3).

Ця аналогія дозволяє нам зрозуміти принцип еквівалентності Айнштайна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля, яке називають гравітаційним. Тому щоб описати гравітаційну взаємодію слід побудувати теорію викривленого простору-часу, що є локально плоским, якому ми будемо приписувати властивості інерціального простору. Таку теорію називають загальною теорією відносності. Але математична теорія викривлених просторів була побудована Ріманом ще у середині 19-ого століття. Все що нам необхідно це визначити риманів многовид, тобто означити метрику (задати спосіб виміру відстані між двома нескінченно близькими точками) у такий спосіб, щоб у випадку плоского простору вона набула вигляду метрики Мінковського. Найпростіший спосіб це зробити – визначити квадратичну форму $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, де за індексами що повторюються відбувається сумування згідно розмірності простору. У випадку евклідового простору ми маємо теорему Піфагора $ds^2 = \sum_{\mu} (dx^\mu)^2$, а у випадку простору Мінковського так звану галілеєву метрику: $ds^2 = c^2 dt^2 - \sum_i (dx^i)^2$ (i – просторовий ін-

декс). Узагальнюючи рівняння руху матерії так щоб їх вигляд був однаковий в усіх (а не лише інерціальних) системах відліку і розглядаючи простір-час як риманів многовид можна отримати основні рівняння ЗТВ – рівняння Айнштайна [1]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu},$$

де в лівій частині присутні геометричні величини: тензор Річчі та його згортка – скаляр Річчі, які є функціями метрики простору-часу $g_{\mu\nu}$, у правій частині $T_{\mu\nu}$ – тензор енергії-імпульсу речовини, Λ – космологічна стала.

Слід звернути увагу на цікаву обставину: якщо задати розподіл речовини, то розв'язуючи ці тензорні рівняння, ми знайдемо метрику $g_{\mu\nu}$, задаючи метрику – знайдемо розподіл матерії. У загальному випадку ці рівняння описують й простір-час, й речовину (Як зазначав з цього приводу Айнштайн: «Речовина вказує простору як сгинатись, простір вказує речовині як рухатись»)⁶.

Рівняння Айнштайна – нелінійні диференціальні рівняння в частинних похідних із в'язами. Тому їх точний розв'язок вельми складна математична задача. Сьогодні відомо лише декілька точних розв'язків, які отримані для систем, що мають високий ступінь симетрії. Зрозуміло що у ньютонівській границі вони переходять до рівнянь Ньютона і тому «вміщують» в собі усю класичну механіку. Крім того, в рамках ЗТВ вдалось пояснити спостережувану проблему аномальної прецесії перигелію Меркурію (теоретичне значення величини кута прецесії орбіти Меркурія після врахування притягання до інших планет мала розбіжність із спостереженнями $\Delta\varphi = 43''$ – аномальний зсув перигелію за 100 років, або $\sim 0,1''$ за оберт) та передбачити нові ефекти: відхилення променів світла у полі Сонця $\Delta\varphi = 1.75''$, затримка радіолокаційної луни у полі Сонця тощо, які були чисельно підтверджені на спостереженнях.

Зупинимось докладніше на ефекті гравітаційного червоного зміщення: сповільнення часу поблизу масивного тіла. Часто цей ефект наводять як один з фантастичних наслідків ЗТВ. Доведемо, що він має місце і для ньютонівської теорії гравітації, різниця лише чисельна. Для цього розглянемо так званий уявний експеримент Айнштайна. Над щілиною у підлозі під стелею висить годинник, який рівномірно надсилає імпульси до іншого годинника, який стоїть біля краю щілини. Відріжемо верхній годинник а потім зіштовхнемо у щілину нижній. Оскільки перший годинник почав падати раніше, він буде наблизатись до другого, а тому інтервали між імпульсами, що надходять до нижнього будуть ставати все меншими ніж інтервали з якими надсилає сигнали верхній (рис.4), тобто $\delta t_{\text{знизу}} < \delta t_{\text{вгорі}}$, а це і означає що знизу (біля масивного тіла – Землі) плин часу сповільнюється.

Зрозуміло що область застосувань ЗТВ – системи з великою густиною. Єдиний приклад поблизу нас

⁵Про спроби таких побудов Айнштайн відносився як до «чудових конячек без 3 ніг».

⁶Це є прояв нелінійності даних рівнянь: всі доданки, у загальному випадку, складні функції від метрики.

це Сонце, тому й усі наведені ефекти мають місце поблизу нього. Але у Всесвіті існує безліч набагато масивних систем. Тому справжня арена для ЗТВ це астрофізичні та космологічні задачі. Тут ЗТВ має багато непрямих спостережень систем, саме існування яких підтверджує дану теорію: чорні дірки, гравітаційні лінзи, гравітаційні хвилі, нейтронні зірки тощо. Зокрема усі наведені вище ефекти, що були вперше виявлені поблизу Сонця, винайдені в подвійних системах з пульсарів та білих карликів, причому в набагато більших масштабах. Так подвійна система PSR 1913 + 16, один з компонентів якої пульсар (нейтронна зірка) має зсув періоду $\Delta\varphi = 4.2^\circ$ в рік (в 36000 раз більший ніж для Меркурія!), а її компоненти зближуються за рахунок втрати енергії на випромінювання гравітаційних хвиль, що описується ЗТВ із точністю 0.2% (За відкриття цієї системи у 1974 році її відкривачі Халс та Тейлор отримали Нобелівську премію 1993 року) [2].

Одне з найбільш інтригуючих застосувань ЗТВ – можливість опису будови та еволюції Всесвіту як цілого. Розділ фізики, який вивчає це називають космологією. Найбільш просту модель, яка при цьому не втратила своєї актуальності вже, майже, 100 років, запропонував Фрідман у 1924 році⁷ [3]. Заради спрощення нелінійних рівнянь ЗТВ для опису Всесвіту в цій моделі використовується спостережуваний, так званий, космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах $\sim 100 - 300$ Мпк. Це дозволяє використати для речовини наближення ідеальної рідини, а простір вважати однорідним та ізотропним. Такий простір відомий як простір сталої кривини. Відомо що він може бути замкнутим (сфера), відкритим (простір Лобачевського) або плоским (площина). Локально паралельні прямі (геодезичні) мають таку поведінку:

- $k = 1$ (замкнутий простір): зближуються
- $k = 0$ (плоский простір): залишаються паралельними
- $k = -1$ (відкритий простір): віддаляються,

де k нумерує тип простору.

Описуючі наведені простори за допомогою метрики Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW): $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$, де $a(t)$ – масштабний фактор, у якій елемент відстані має вигляд

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

⁷Слід зазначити, що історія цього відкриття як і відкриття іншого розв'язку рівнянь Айнштейна – розв'язку Шварцшильда, трагічна.

з рівнянь Айнштейна можна отримати рівняння Фрідмана

$$\begin{cases} \dot{a}^2 + kc^2 = \frac{1}{3}\kappa c^2(\varepsilon + \lambda)a^2 \\ \ddot{a} = -\frac{1}{6}\kappa c^2(\varepsilon + 3p - 2\lambda)a, \quad \kappa = \frac{8\pi G}{c^4}. \end{cases} \quad (1)$$

На їх основі Гамов, Альфер, Герман у (1948) році побудували теорію гарячого Всесвіту, згідно якої Всесвіт народжується з малим розміром і дуже гарячим, а згодом, в процесі еволюції, поступово розширюється і при цьому охолоджується [4]. Спочатку він наповнений плазмою, яка складається з усіх частинок, їх енергія занадто велика щоб вони могли утворити зв'язані системи. Після утворення атомів фотони перестали постійно перерозсіюватись і почали вільно розповсюджуватись по Всесвіту. Це, так зване, реліктове випромінювання, його характерні особливості: спектр абсолютно чорного тіла та висока ступінь однорідності по небесній сфері. За його відкриття у 1965 році Пензіас, Вільсон (воно відповідало температурі $T = 2.725$ К та мало концентрацію $n_\gamma = 410 \text{ см}^{-3}$) отримали Нобелівську премію у 1978 році⁸.

3. Проблема темної речовини

Незважаючи на чисельні успіхи ЗТВ, існують задачі, які на даний момент стандартна модель розв'язку астрофізичних та космологічних задач, що складається із ЗТВ та результатів сучасної фізики елементарних частинок, не може дати відповідь. Це так звана проблема темної речовини [5].

Ще у 1937 році Цвіккі, а згодом, у 1974 Ейнасто та ін. помітили що криві обертань галактик мають аномальну поведінку. Крива обертань спіральної галактики складається із міжзоряного пилу, що обертається навколо центру галактики. Вимірюючи її швидкість за законом Доплера можна побудувати залежність колової швидкості v від відстані до центру галактики r . З теорії Ньютона випливає, що швидкість повинна спадати з відстанню приблизно як $v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$, де M – маса галактики. Однак чисельні спостереження не бачать спадання швидкості з r до 10 – 20 радіусів галактики, а часто навіть спостерігається її зростання за законом $v(r) \sim \sqrt{r}$ (рис. 5)⁹

Це один з багатьох проявів проблеми темної матерії. Назва обумовлена тим що даний парадокс можна пояснити припущенням існування невидимої речовини, густина якої зростає з r як $\rho(r) \sim \frac{1}{r^2}$, що забезпечує $v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}} = \text{const}$ та яка не взаємодіє зі звичайною речовиною жодним чином окрім гравітаційної взаємодії за допомогою якої вона локалізується у вигляді гало навколо видимих частин галактики. Необхідність введення темної матерії впливає також при описі гравітаційного линзування

⁸Разом із Капіцею, бо у конструкції детектора використовувалось охолодження рідким гелієм.

⁹Швидкість на «плато» зв'язана із масою галактики M емпіричним співвідношенням Таллі-Фішера: $v_* \sim \sqrt[4]{M}$

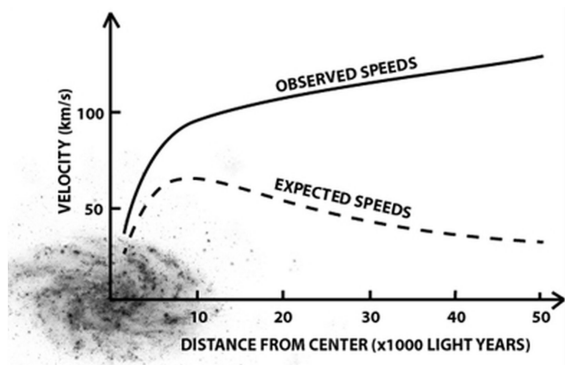


Рис. 5. Крива обертань для спіральної галактики M33.

та спостереженні анізотропії реліктового випромінювання (за його спостереження Смуту і Мазеру була присуджена Нобелівська премія у 2006 році.) Проблема полягає в тому що у фізиці елементарних частинок невідомі такі частинки (що отримали назву WIMP – weakly interacting massive particles). Їх багаторічний пошук, на даний момент, не приніс позитивних результатів.

Інший наслідок моделі Фрідмана це явище прискореного розширення Всесвіту¹⁰. Насправді з рівнянь (рис. 1) випливає що швидкість «розбігання» галактик пропорційна відстані між ними (для невеликих відстаней) $v = H(t)r$, де $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ – параметр Хаббла, що узгоджується із спостережуваним законом Хаббла для малих значень червоного зміщення $z(t) = \frac{a_0}{a(t)} - 1$, де a_0 – нормувальне (сучасне) значення масштабного фактору. Для великих значень z слід розрахувати світловий потік $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$, де L – абсолютна світність, d_L – фотометрична відстань (luminosity distance), який є узагальненням відомої формули з оптики. Фотометричну відстань можна розрахувати в космології. Якщо для евклідового простору вона обраховується за теоремою Піфагора $d_L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ то для моделі Фрідмана її можна знайти у вигляді:

$$d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}.$$

Якщо відомі об'єкти («стандартні січки») для яких по формі спектру можна визначити абсолютну світність L , то інтерполюючи спостережувану криву $H(z)$ можна знайти параметри космологічної моделі. Як виявилось, наднові типу Ia в галактиках, що «віддаляються» за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану. Це означає що відстань за стандартними свічками більше відстані за законом Хаббла, тобто Всесвіт розширюється з прискоренням! Керівники груп, які у 1998 році встановили це явище, Perlmutter, Schmidt, Riess отримали Нобелівську премію у 2011 році.

Прискорене розширення Всесвіту можна описати припущенням про існування взаємодії, що відштов-

¹⁰Відома аналогія – збільшення відстані між двома точками на гумовій кулі при її надуванні.

хує і описується λ -членом у рівняннях Фрідмана (рис. 1), який за своїм сенсом повинен бути сталою або слабко залежною у просторі та часі густиною деякої речовини, так званої темної енергії. Оскільки темна енергія повинна рівномірно заповнювати Всесвіт та мати сталу у часі густину енергії її зв'язують із густиною енергії фізичного вакууму – основного стану квантових полів.

Разом із темною матерією, за оцінками останніх спостережень, темна речовина складає 96% речовини у Всесвіті (згадайте «хмаринки» Кельвіна!). Однак, незважаючи на задовільне пояснення спостережуваних даних за допомогою феноменологічного введення темної речовини, залишається невідомою її мікроскопічна природа. Як зазначалось, стандартна модель фізики елементарних частинок не містить в собі кандидата на роль носія темної матерії, а сучасна квантова теорія поля, яка є теоретичним підґрунтям для фізики високих енергій, не може пояснити значення густини енергії вакууму, необхідне для того, щоб з нею можна було зв'язати темну енергію. Тому пояснення природи темної речовини повинно відбуватись за межами відомих теорій та неминуче призведе до відкриття нової фізики.

Спроби мікроскопічної інтерпретації темної речовини сьогодні просуваються, в основному, в двох напрямках. З одного боку, якщо припустити існування темної речовини, слід модифікувати стандартну модель та квантову теорію поля. Це відбувається за рахунок додавання нових частинок, існування яких в свою чергу можна обґрунтувати в рамках нових квантово-польових моделей.

В іншому підході припускається що ефекти з якими зв'язують темну речовину можна пояснити шляхом модифікації теорії гравітації, яка використовується як теоретична парадигма для опису астрофізичних та космологічних спостережень. Зокрема модифікація польових рівнянь може принципово призводити до модифікації рівнянь руху (від яких залежить обробка спостережень темної матерії) та рівнянь для масштабного фактору (які використовуються при вивченні ефекту темної енергії). Серед таких теорій MOND, $F(R)$ -гравітація, нелагранжева гравітація тощо.

4. До об'єднаної теорії

На завершення розглянемо питання про можливе об'єднання фундаментальних взаємодій і, таким чином, скорочення наведеного на початку їх переліку, тобто побудови такої теорії поля, щоб при деяких умовах спостерігалась одна взаємодія, а при інших – дві чи більше.

Для цього розглянемо явище спонтанного порушення симетрії, за якого задача, умова якої задовольняє певному перетворенню симетрії (початкова конфігурація або лагранжіан інваріантні відносно певного перетворення) має розв'язки, які відносно цього перетворення вже не інваріантні. Відомий механічний приклад ілюструється падінням кульки вниз точно по осі профіля сомбреро (рис. 6).

Внаслідок наявності неоднорідностей поверхні симетричне положення нестійке і кулька «вимушена» зайняти одне з несиметричних положень на дні.

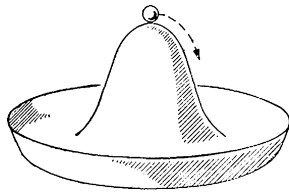


Рис. 6. Ілюстрація явища спонтанного порушення симетрії.

Більш складний приклад – модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі T_c , що описується теорією Гінзбурга-Ландау. При його нагріві вище критичної температури (точки Кюрі T_c), тобто при $T > T_c$ магнітні моменти його доменів випадково зорієнтовані у просторі і усереднене значення вектора намагніченості $\langle \vec{M} \rangle = 0$. При охолодженні до $T < T_c$ моменти навпаки орієнтуються вздовж деякого довільного напрямку і, таким чином, $\langle \vec{M} \rangle \neq 0$.

Дане явище можна описати, якщо припустити що потенціальна енергія системи як функція чи параметру порядку (для феромагнетиків), чи значення поля φ (якщо ми шукаємо польові розв'язки) в околі основного стану ($V(\varphi) = V'(\varphi) = 0$) має розклад у вигляді

$$V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4. \quad (2)$$

Тоді, в залежності від знаку параметру біля φ^2 основний стан, що відповідає $\varphi = 0$, буде або стійким, або нестійким (рис. 7).

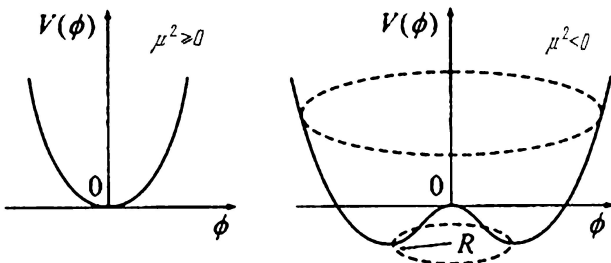


Рис. 7. Утворення біфуркації (зміни кількості розв'язків для основного стану) при зміні знаку біля квадратичного члену в потенціалі φ^4 .

Подібний механізм був використаний Хіггсом для побудови теорії спонтанного порушення калібрувальної симетрії [6]. В цій теорії припускається існування нового скалярного поля із потенціалом виду (рис. 2), яке призводить до спонтанного порушення симетрії внаслідок чого основний стан при якому електромагнітна та слабка взаємодії об'єднані перестає бути стійким при зниженні температури Всесвіту. Після відкриття у 2012 році бозону Хіггса, який відповідає спонтанному порушенню симетрії введеного скалярного поля, Хіггс був нагороджений Нобелівською премією у 2013 році.

Таким чином, шляхи фізики мікросвіту та фізики Всесвіту перетинаються: у наведеній теорії використовуються, як результати теорії гарячого Всесвіту так і фізики елементарних частинок. Після 70-х років минулого століття з'являється все більше праць

у яких космологія та фізика елементарних частинок, які до цього вважались різними областями науки, використовуються в об'єднаній схемі [7]. Зокрема у 1973 р. Гросс, Політцер та Вільчек, вивчаючи квантову хромодинаміку, яка описує взаємодію між кварками, винайшли явище асимптотичної свободи (за це відкриття автори нагороджені Нобелівською премією за 2004 р.). Виявилось що найсильніша відома взаємодія у Всесвіті, сила притягання між кварками, яка забезпечує їх зв'язані стани в нуклонах, зменшується з ростом енергії. Виявляється що величини електрослабкої та сильної взаємодій зрівнюються при енергіях $\sim 10^{24}$ eV, що дозволяє сподіватись що крім об'єднаної теорії електрослабкої взаємодії можна буде побудувати об'єднану теорію, що описує також і квантову хромодинаміку. Ця естетична концепція отримала назву теорії великого об'єднання. На сьогодні її коректне формулювання не винайдене. Однак зрозуміло що вона буде описувати процеси при неймовірно великих, біляпланківських масштабах енергії. І перевірити її ми зможемо вивчаючи космологічні спостереження, бо така висока енергія була у гарячому Всесвіті (Як зазначав Зельдовіч, Всесвіт – прискорювач для бідних). Цей напрям, що об'єднує астрофізичні, космологічні спостереження та результати фізики елементарних частинок сьогодні називають «Cosmoparticle physics».

Закінчення

Таким чином ми з вами переконались що фундаментальна фізика сьогодні має багато цікавих питань, відповідь на які неодмінно дозволить краще зрозуміти Всесвіт, а можливо й вийти за його рамки. У найближчі десятиліття фізику очікують неймовірні відкриття!

На завершення наведемо вислів Сенеки: «Час прийде, коли наших потомків буде бавити що ми не знали понять, які вони вважають такими простими... Багато відкриттів призначені для майбутніх віків, коли сама пам'ять про нас зітреться. Природа не розкриває свої таємниці раз і назавжди».

Перелік використаних джерел

1. Ландау Л. Д, Лившиц Е.М. — Теория поля. — Физматлит. — 2006.
2. J. M. Weisberg, J. H. Taylor — arXiv:astro-ph/0407149.
3. Фридман А. А. Z. Phys.. — 1922. — № 10. — с. 377–386.
4. Зельдович Я. Б. УФН. — 1966. — Т. 89, № 10. — с. 647–648.
5. Чернин А. Д. УФН. — 2008. — Т. 178, № 3. — с. 267–300.
6. Илиопулос Дж. УФН. — 1977. — Т. 123, № 12. — с. 565–596.
7. Рубаков В. А. УФН. — 1999. — Т. 169, № 12. — с. 1299–1309.