

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.С.Опанасюк, Н.М.Опанасюк

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ НА ТЕМУ

“СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ”

**З КУРСУ «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»
для студентів усіх спеціальностей
денної та заочної форм навчання**

ЧАСТИНА 2

МІКРОСВІТ

СУМИ ВИД-ВО СУМ ДУ 2003

Кінцевим завданням викладання курсу “Загальної фізики” у вищій школі є формування у студентів наукових уявлень про навколишній світ. Даний факт констатується у навчальній програмі курсу фізики, останнім питанням якої є тема “Сучасна фізична картина світу”. Разом з тим завдяки науковій революції уявлення про будову навколишнього світу і місце людини у ньому змінюються дуже швидко. Це приводить до того, що новітні досягнення фізики, як правило, не встигають вноситися до навчальних посібників та підручників. Розроблений конспект лекцій частково вирішує цю проблему, оскільки базується на найбільш сучасному матеріалі, який є у науковій літературі. У другій частині конспекту лекцій розглядаються сучасні фізичні уявлення про будову та закони мікросвіту. Автори зробили спробу викласти складні наукові теорії не виходячи за межі курсу фізики вищої школи.

Конспект лекцій призначений для студентів і викладачів, які виявляють інтерес до новітніх досягнень фізики. Він може бути також використаний у курсі “Методика викладання фізики”.

СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ.

МІКРОСВІТ

Вступ

Добре відомо, що фізика - це наука, яка вивчає найпростіші і водночас найзагальніші закономірності явищ природи, властивості і будову матерії, закони її руху. Основним завданням фізики, поряд з іншими природознавчими науками, є формування у людей адекватних уявлень про будову навколишнього світу і своє місце у цьому світі, або, як кажуть, про єдину картину світу.

Під науковою картиною світу розуміють найбільш загальне зображення реальності, в якому зведені у системну єдність наукові теорії, що допускають взаємне узгодження. Іншими словами, картина світу - це цілісна система уявлень про загальні принципи і закони будови світу, що базується на наукових підвалинах [1-2].

Сучасна фізика виділяє три рівні будови матерії – мегасвіт, макросвіт та мікросвіт.

1 Мегасвіт - світ дуже великих космічних масштабів і швидкостей, відстані у якому вимірюються світловими роками, а час існування космічних об'єктів – мільйонами і мільярдами років.

2 Макросвіт - світ макрооб'єктів, розмір яких відповідає масштабам людського досвіду: просторові величини у цьому випадку вимірюються у міліметрах, сантиметрах і кілометрах, а час у секундах, хвилинах, годинах і роках.

3 Мікросвіт – світ дуже малих об'єктів, які безпосередньо не спостерігаються людиною. Їх просторові розміри знаходяться в інтервалі від 10^{-10} до 10^{-33} м, а час життя - від нескінченності до 10^{-24} с.

Відповідно до цього фізика розглядає три структурні рівні єдиної картини світу. Хоча на цих рівнях діють свої специфічні закономірності, мікро-, макро- і мегасвіти є тісно пов'язаними між собою, і тому такий поділ є досить умовним.

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. Проте у міру накопичення знань про структуру матерії питання "як влаштований світ?" змінилось питанням "чому він так влаштований?". Така постановка питання дозволила фізиці високих енергій вийти на принципово новий рівень розуміння будови навколишнього світу і перекинути містки між будовою мікро- і мегасвіту.

У конспекті лекцій розглядаються сучасні фізичні уявлення про будову та закони мікросвіту, їх зв'язок з макро- і мегасвітом.

1 ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК [3]

Елементарними частинками називаються найдрібніші відомі в даний час частинки матерії.

Першою відкритою елементарною частинкою був *електрон* (e^-) - носій елементарного негативного електричного заряду (Томсон, 1897). Частинки з позитивним електричним зарядом і масою $1840 m_e$, де m_e - маса електрона, були знайдені Резерфордом (1919) серед частинок, вибитих з атомних ядер. Вони отримали назву *протонів* (p). Протон є носієм елементарного позитивного заряду. Інша частинка, що входить до складу ядра атома, але не має електричного заряду, з масою $1839 m_e$ - *нейтрон* (n) - відкрита Чедвіком (1932). У тому самому році Гейзенберг показав, що нейтрон і протон є різними зарядовими станами частинки, яка одержала назву нуклона.

Прямі експериментальні докази існування *фотона* (γ) - кванта електромагнітного випромінювання, - передбаченого Планком (1900) та Ейнштейном (1905), одержали Міллікен (1912 - 1915) і Комптон (1922). Електронне *нейтрино* (ν_e), передбачене Паулі (1930) при поясненні β -розпаду нейтрона, відкрили Райнес і Коуен (1953). У складі космічного проміння Андерсеном був знайдений *позитрон* (e^+) - частинка з масою електрона і позитивним електричним зарядом (1932). Позитрон - перша відкрита античастинка. Після цього протягом кількох десятиріч космічне проміння було основним постачальником

нових елементарних частинок для вчених. Частинки з масою близько $200 m_e$ обох електричних зарядів - *мюони* (μ^+ , μ^-) - були знайдені у космічному промінні Андерсеном та Неддермейєром (1936). Трохи пізніше у Пауелл (1947) відкрив частинки - кванти сильної взаємодії, передбачені Юкавою (1935). Вони отримали назву *піонів* (π^+ , π^-).

Перші частинки з великої групи елементарних частинок, що мають незвичайні властивості і тому названі *дивними*, - K^+ , K^- - *мезони* і λ - *гіперони* - були відкриті у тому самому космічному промінні у 40-50-х рр. Надалі інші дивні частинки були знайдені в дослідах на прискорювачах заряджених частинок. З 50-х років саме прискорювачі, що дозволяли надати елементарним частинкам великої енергії, стали основним інструментом при дослідженні їх властивостей і взаємодії (звідси назва "фізика високих енергій"). За їх допомогою були відкриті *антипротон* (\bar{p}) (1955), *антинейтрон* (\bar{n}) (1956), *антисигма гіперони* ($\bar{\Sigma}^{\pm}$, $\bar{\Sigma}^0$) (1960), *омега-мінус гіперон* (Ω) (1964). У 1962 р. з'ясувалося, що, окрім електронного нейтрино (ν_e), існує *мюонне нейтрино* (ν_μ).

J/ψ (джей-пси)- і ψ' -частинки, які мають маси 3-4 m_p , де m_p - маса протона, знайдені в 1974 р. Вони поклали початок новому сімейству частинок, що отримали назву *зачарованих*. Інші зачаровані частинки D^0 , D^+ і A_c^+ були відкриті в 1976 р. Частинка, що є важким аналогом електрона і мюона - τ - *лептон* (*таон*), знайдена в 1975 р. У подальші роки були відкриті частинки (1977) з масою порядку 10 m_p , так звані *красиві мезони* B^+ , B^- , B^0 , проміжний \bar{B}^0 та векторні бозони W^{\pm} , Z^0 (1983).

В 60-ті роки на прискорювачах також було знайдено велике число дуже нестійких частинок, що отримали назву *мезонних і баріонних резонансів*. Резонанси являють собою стани, що розпадаються. Саме вони складають основну частину відомих елементарних частинок. Досліди також показали, що майже у кожної частинки є своя античастинка, яка відрізняється від неї тільки знаком адитивних квантових чисел.

Згідно з так званою *Стандартною моделлю*, яка встановлює сучасну класифікацію елементарних частинок, дійсно

елементарними, безструктурними сьогодні вважається шістнадцять з понад трьохсот відомих вченим частинок, у тринадцяти з них є свої античастинки. Більшість частинок мають внутрішню структуру і побудовані з *кварків* у різних поєднаннях з антикварками, зв'язок між ними забезпечують інші частинки - *глюони*. Перші експериментальні докази існування кварків були отримані в 1975 р. (відкриття кваркових струменів). Останній з них, шостий, так званий верхній, або топ-кварк, знайдений на весні 1995 року.

Глюони відкриті в 1980 р. дослідницькою групою АРГУС (Радянсько-західнонімецько-американсько-шведська група). В березні 2000 року в Центрі європейських ядерних досліджень поблизу Женеви (ЦЕРН) з використанням колайдера (тип прискорювача) важких релятивістських іонів була отримана кварк-глюонна плазма. А 21 липня 2000 р. в Національній лабораторії імені Фермі (Баталія, США) на установці DONUT (Direct Observation Nu Tau) вперше провели пряме спостереження останньої безструктурної частинки, передбаченої Стандартною моделлю – тау-нейтрино. Таким чином, усі елементарні частинки, передбачені Стандартною моделлю, у теперішній час спостерігались експериментально.

Більшість відомих елементарних частинок є нестабільними - вони спонтанно перетворюються на інші. Стабільними є фотон, всі види нейтрино, електрон, протон і їх античастинки. Їх стабільність обумовлена непорушністю законів збереження. Решта частинок самодовільно розпадається з різними періодами напіврозпаду $t_{1/2} \sim 10^3 - 10^{23}$ с. Найбільш довгоживучим серед нестабільних частинок є нейтрон $t_{1/2} \sim 15$ хв. Час розпаду резонансів має порядок характерного ядерного часу $\sim 10^{-22} - 10^{-23}$ с. В результаті послідовних розпадів нестабільних частинок врешті-решт народжуються стабільні частинки. Стабільні і нестабільні частинки можуть народжуватися з вакууму і при взаємодії з іншими стабільними частинками, якщо тільки їх відносна кінетична енергія є більшою від маси спокою частинок, що при цьому виникають. Зворотний процес, при якому частинки взаємно знищуються, має назву *анігіляції*.

Можливість народження і знищення частинок у процесах їх зіткнень і самодовільного розпаду є однією з головних властивостей

елементарних частинок. Оскільки такі явища можуть бути описані тільки в рамках спеціальної теорії відносності, що враховує зв'язок маси частинок з їх енергією, то теорія елементарних частинок є суттєво *релятивістською*. У зв'язку з виявленням процесів взаємних перетворень елементарних частинок термін «елементарні» стосовно таких мікрооб'єктів втратив своє первинне значення і, як і термін «атом», є умовним. У науковій літературі замість терміна «елементарні частинки» частіше використовується термін «суб'ядерні частинки» або просто частинки.

Всього з античастинками зараз відкрито більше ніж 380 суб'ядерних частинок, і кількість їх продовжує збільшуватись. На думку деяких учених, це свідчить про те, що найближчим часом буде відкритий новий більш глибокий порівняно з кварковим рівень будови матерії і відповідно змінений критерій елементарності.

2 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

Фізиками встановлене існування чотирьох видів взаємодій між суб'ядерними частинками: *сильна, електромагнітна, слабка та гравітаційна* (вони перелічені в порядку зменшення інтенсивності) [4]. Найбільш добре вивчені дві з них: гравітаційна і електромагнітна. Основи класичних (неквантових) теорій обох взаємодій закладені давно (Ньютон, Ейнштейн і Максвелл) і відомі у загальних рисах із загального курсу фізики. Сучасні теорії всіх взаємодій є квантовими і базуються на ідеї близькодії.

Інтенсивність будь-якої взаємодії прийнято характеризувати за допомогою так званої сталої взаємодії, яка визначає вірогідність процесів, обумовлених даним видом взаємодії. Відношення значень констант дає відносну інтенсивність відповідних взаємодій, що дозволяє порівняти їх.

Найбільш універсальною поміж взаємодій є гравітаційна – вона виникає між будь-якими тілами, що мають масу. Гравітаційна взаємодія характеризується гравітаційною сталою $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$. Прекрасне наближення, що описує гравітаційну взаємодію двох точкових тіл з однаковими масами m , які знаходяться на відстані r один від одного, дає закон всесвітнього тяжіння, відкритий Ньютоном:

$$F = G \frac{m^2}{r^2}. \quad (1)$$

У фізиці суб'ядерних частинок гравітаційна взаємодія не відіграє майже ніякої ролі на відстанях $>10^{-35}$ м (*планківська довжина*). При менших відстанях або дуже великих енергіях ця взаємодія за величиною порівнюється з іншими взаємодіями. В рамках загальної теорії відносності гравітація розглядається як викривлення простору-часу, тобто має геометричну інтерпретацію.

Електромагнітна взаємодія виникає між тілами, що мають електричний заряд. У загальному випадку закон руху заряджених тіл описується рівняннями Максвелла - Лоренца, проте в квазістатичному наближенні чудово «працює» аналог закону Ньютона - кулонівське наближення

$$F = k \frac{e^2}{r^2}. \quad (2)$$

Квантова теорія, що описує електромагнітну взаємодію, одержала назву квантової електродинаміки (КЕД) і вважається найбільш досконалою із усіх існуючих теорій. Ця теорія відповідає основним вимогам як квантової теорії, так і теорії відносності.

Величини Gm^2 і e^2 у співвідношеннях (1) і (2) залежать від вибору одиниць вимірювання, і це перешкоджає аналізу спільності обох взаємодій. Щоб полегшити порівняння, з цих величин за допомогою універсальних констант - сталої Планка \hbar і швидкості світла - c утворюють безрозмірні константи [5]. Таким чином, вводять безрозмірні величини - гравітаційну $\alpha_g = G \frac{m^2}{\hbar c}$ та електромагнітну сталу $\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c}$ (*сталу тонкої структури*), де e - заряд електрона (протона).

Необхідно відзначити відмінність між визначенням обох

сталих. У деякому розумінні константа α_e є більш універсальною, ніж α_g . Це пов'язано з тим, що у вираз числа α_e входять тільки фундаментальні сталі, в той час як константа α_g характеризується, взагалі кажучи, довільною масою m . Щоб усунути подібне свавілля, в константі α_g звичайно фіксують значення маси m , вважаючи її такою, що дорівнює m_p (маса протона). Цей вибір цілком природний: протон - одна з двох стабільних частинок у Всесвіті. Інша стабільна частинка - електрон - має масу m_e . Вибір між m_p і m_e є значною мірою умовним.

Інші дві взаємодії (слабка та сильна) були відкриті лише в ХХ сторіччі. Одна з них - слабка - управляє розпадом більш важких суб'ядерних частинок на більш легкі. Історично першим був вивчений розпад нейтрона в атомних ядрах (β -розпад), який відбувається за схемою $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, де $n, p, e^-, \bar{\nu}$ - нейтрон, протон, електрон та антинейтрино.

Згодом з'ясувалося, що розпад нейтрона не унікальний. В результаті численних досліджень стало зрозуміло, що значна частина розпадів управляється єдиною, так званою слабкою взаємодією. Ця взаємодія характеризується константою Фермі (g_F). Безрозмірна константа слабкої взаємодії записується у вигляді $\alpha_w = \frac{g_F m^2 c}{\hbar^3}$. Слабка взаємодія також визначає процеси взаємодії нейтрино з речовиною.

Найбільш складною є ситуація з сильною взаємодією. Ще 20 - 30 років тому сильну взаємодію ототожнювали з ядерною, яка визначала стан протонів і нейтронів в атомних ядрах. Проте створити скільки-небудь закінчену теорію ядерної взаємодії не вдалося. Прогрес відбувся у зв'язку з побудовою динамічної теорії кваркових систем (див. нижче), яка привела до створення *квантової хромодинаміки* (КХД). У цій схемі ядерна взаємодія ототожнюється із взаємодією багатокваркових систем, з яких складаються нуклони. Таким чином, у теперішній час із сильною взаємодією ототожнюється взаємодія між кварками, яка, у свою чергу, обумовлює ядерну взаємодію.

Залежність сталої сильної взаємодії α_s від маси на відміну від інших, які постулюються на основі міркувань розмірності, може бути одержана із квантової теорії поля. Її особливістю є те, що вона зменшується при збільшенні маси частинки m . В асимптотичному наближенні, коли $m \gg m_p$, можна одержати

$$\alpha_s \sim \frac{1}{\ln \frac{m}{m_p}}. \quad (3)$$

Цікаво відзначити, що з фундаментальних сталих G, \hbar, c можна побудувати величини, що мають розмірність довжини, часу, густини, маси, енергії. Ці величини називаються *планківськими*.

Зокрема, *планківська довжина* l_{pl} , *планківська енергія*, *планківський час* t_{pl} і *планківська маса* мають такий вигляд:

$$l_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad E_{pl} = \frac{\hbar c}{l_{pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 10^{19} \text{ GeV},$$

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 1,6 \cdot 10^{-43} \text{ с}, \quad m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{-5} \text{ з} \quad (4)$$

Важливість планківських величин стане зрозуміла читачу пізніше.

Добре відомо, що кожна фундаментальна фізична стала характеризує певний круг фізичних явищ: G - гравітаційні явища; \hbar - квантові; c - релятивістські. Тому якщо в якоесь співвідношення входять одночасно константи G, \hbar, c , це означає, що дане співвідношення описує процес, який одночасно є гравітаційним, квантовим і релятивістським. Таким чином, існування планківських величин свідчить про можливе існування подібних процесів у природі, це, в свою чергу, дозволило фізикам говорити про створення єдиної фізичної теорії цих явищ.

У класичній фізиці будь-яка взаємодія на відстані описується у термінах потенціалів або силового поля, за допомогою якого одна частинка діє на іншу. Кожній взаємодії відповідає своє поле. У квантовій теорії усі фундаментальні

взаємодії подаються як процес обміну *віртуальними* квантами визначеного типу.

Добре відомо, що у світі суб'ядерних частинок існує співвідношення невизначеності Гейзенберга ($\Delta E \Delta t \geq \hbar$). Воно стверджує, що при вимірюванні протягом часу не більше Δt неможливо визначити енергію з точністю, яка краща, ніж $\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta t}$. Це означає, що на короткий проміжок часу у частинки

або системи може з'явитись додаткова енергія нібито з нівідкіль, але ця “зайнята” енергія повинна бути такою, щоб за час Δt її неможливо було б виміряти, і щоб таким чином не порушувався закон збереження енергії.

Подібні частинки, які виникають на дуже короткий час у вакуумі, одержали назву віртуальних. Фактично *фізичний вакуум* є “первинним бульйоном” віртуальних частинок різної природи, які постійно народжуються та знищуються. Таким чином, квантова теорія поля суттєво змінила погляд на вакуум, який у класичній теорії вважався місцем, вільним від матерії. Вакуум квантової теорії - це система полів (електромагнітних, електрон-позитронних, піонних та інших), які здійснюють нульові коливання, в результаті вакуум має енергію, тиск та інші фізичні параметри. Фізичний вакуум бере безпосередню участь у формуванні кількісних і якісних властивостей фізичних об'єктів. Такі властивості частинок, як спин, маса, заряд, з'являються завдяки їх взаємодії з вакуумом.

У рамках квантової теорії взаємодія двох частинок А і В описується наступним чином (рис.1). Частинка А створює навколо себе поле, яке є збуренням фізичного вакууму. В результаті навколо частинки виникає “хмара” або “шуба” віртуальних частинок визначеного типу, густина якої зменшується із збільшенням відстані. Аналогічний процес відбувається навколо частинки В.

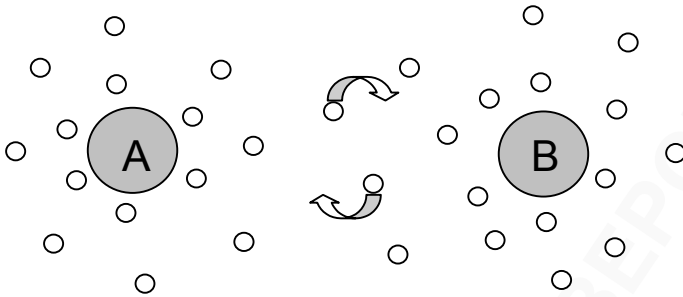


Рисунок 1 - Схема взаємодії двох частинок А і В за допомогою віртуальних квантів поля

Дві частинки, які виявилися у радіусі дії своїх зарядів, починають обмінюватися квантами поля: перша частинка випромінює і одночасно поглинає ідентичний квант, що випромінювала інша частинка. Обмін віртуальними частинками згідно з законом Ньютона ($\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$) в залежності від властивостей квантів поля створює ефект притягання або відштовхування між суб'ядерними частинками.

Кожній фундаментальній взаємодії відповідає своя частинка, яка переносить цю взаємодію. Для гравітації - це *гравітони*, для електромагнітної взаємодії - *фотони*, сильна взаємодія обумовлюється *глюонами*, слабка - *векторними бозонами* (W^+ , W^- , Z^0).

Радіус дії тієї чи іншої взаємодії визначається масою спокою частинки-переносника. Дійсно, якщо врахувати, що будь-яка взаємодія передається зі швидкістю світла, можна одержати

$$L = c\Delta t = c \frac{\hbar}{\Delta E} = c \frac{\hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc} = \lambda_c,$$

де L - радіус взаємодії;

Δt - час існування відповідного віртуального кванта;

m - маса частинки переносника взаємодії;

λ_c - комптонівська довжина частинки.

Із співвідношення видно, що радіус дії взаємодії обернено пропорційний масі. Оскільки фотони і гравітони мають масу спокою, яка дорівнює нулю, відповідні взаємодії є далекодійними, інші дві є короткодійними, їх радіус дії сумірний з радіусом ядра атома.

При аналізі різних процесів у фізиці елементарних частинок зручно використовувати так звані діаграми Фейнмана, на яких реальні частинки зображаються прямими лініями, що приходять з нескінченності або йдуть в нескінченність, а розповсюдженню віртуальних частинок відповідають внутрішні лінії діаграм, які сполучають прямі лінії. Звичайно частинки-переносники взаємодії зображають хвилястими або штриховими лініями. Тоді, наприклад, розсіяння електрона на позитроні шляхом обміну віртуальним фотоном можна зобразити діаграмою Фейнмана, наведеною на рис. 2 а.

Діаграма, зображена на рис. 2 б, що містить замкнену ферміонну петлю, може розглядатися як така, що описує процес випромінювання електроном віртуального фотона, який потім породжує віртуальну електрон - позитронну пару, яка знову анігілює у віртуальний фотон, що поглинається реальним електроном.

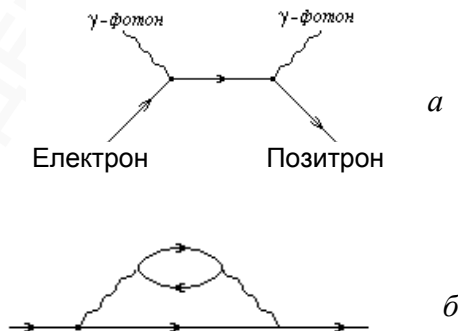


Рисунок 2 - Діаграма Фейнмана: а –розсіювання електрона на позитроні; б- ферміонна петля

Отже, можна вважати, що навколо електрона існує безліч віртуальних електрон-позитронних пар. Реальний електрон притягає до себе віртуальні позитрони і відштовхує віртуальні електрони. Такий ефект називається *поляризацією вакууму*. В результаті, якщо "подивитися" з великої відстані, наприклад, на електрон, його заряд виявляється частково заекранованим. Якщо ж проникнути всередину хмари віртуальних пар, то в результаті зменшення екранування заряд зростає.

Цей ефект обумовлює так зване *перенормування* заряду у квантовій електродинаміці, оскільки в теорії використовується заряд "голого електрона", а заряд, що вимірюється експериментально, відповідає екранованому.

Основні параметри фундаментальних взаємодій та їх обмінних частинок наведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Фундаментальні види взаємодії у природі

Взаємодія	Джерело	Обмін на частинка	Константа взаємодії		Радіус дії $L, \text{ м}$	Час життя $\tau, \text{ с}$
			Вираз	Числове значення при $m = m_p$		
Гравітаційна	Маса	Гравітон	$\frac{Gm^2}{\hbar c}$	$0,6 \cdot 10^{-38}$	∞	0
Слабка	Усі ел. частинки	Проміжні бозони	$\frac{g_F m^2 c}{\hbar^3}$	10^{-15}	10^{-19}	10^{-8}
Електромагнітна	Електричний заряд	Фотон	$\frac{e^2}{\hbar c}$	$1/137 \sim 10^{-2}$	∞	10^{-16}
Сильна	Адрони	Глюони	$\frac{a}{\ln(m/m_p)}$	1	10^{-15}	10^{-23}

У останньому стовпці таблиці наведений середній час життя частинок, що розпадаються за рахунок даного виду взаємодії (цей час називають також *часом розпаду*). З таблиці видно, що гравітаційна взаємодія майже у 10^{37} разів слабша порівняно із сильною.

3 КВАНТОВІ ЧИСЛА СУБ'ЯДЕРНИХ ЧАСТИНОК [6-7]

3.1 Спін

Для того щоб пояснити властивості і поведінку суб'ядерних частинок, їх доводиться наділяти цілим рядом характерних для них фізичних величин - *квантових чисел*. Сукупність внутрішніх квантових чисел частинки повністю її визначає. Термін «внутрішні» відтіняє приналежність квантових чисел власне частинці, тобто ці квантові числа не пов'язані з властивостями простору-часу, які зумовлюють звичні величини, що зберігаються: енергію, імпульс і момент кількості руху.

Основними характеристиками частинок є: 1) *маса* m ; 2) *електричний заряд* Q ; 3) *спін* J ; 4) *баріонний заряд* B ; 5) *лептонні заряди* L_e, L_μ, L_τ ; 6) *дивність* S ; 7) *чарівність (шарм)* C ; 8) *краса* B' ; 9) *ізотопічний спін* I ; 10) *час життя* τ , 11) *магнітний момент* μ ; 12) *парності* – *просторова* P , *зарядна* C , *комбінована* CP , G -*парність*, *часове віддзеркалення* T .

Найбільш відомими характеристиками суб'ядерних частинок є їх маса і електричний заряд. Ці величини прийшли у фізику елементарних частинок з класичної фізики, і їх виникнення не було пов'язано з розвитком квантової механіки.

Принципово новим була поява специфічно квантових чисел. Тут, в першу чергу, слід назвати спін частинок. Спочатку спін увійшов у фізику як власний момент кількості руху J електрона із значенням $J = \hbar/2$. Проте таке трактування спіну зустрічає рішучі заперечення. Справа у тому, що за сучасними уявленнями розміри (r) елементарних частинок, що не мають внутрішньої структури (а електрон належить саме до розряду таких частинок), дорівнюють нулю. У той самий час за визначенням момент імпульсу $\vec{J} = [\vec{r}_e \vec{p}_e]$ (\vec{p}_e - імпульс частинки).

Оскільки $r_e = 0$, то і момент $\vec{J} = 0$ і, отже, не дорівнює $\hbar/2$. Тому ототожнення спіну з образом електрона, що обертається в просторі навколо власної осі хоча і є дуже наглядним, але неправочинними.

Більш послідовним є трактування спіну в рамках квантово-механічних уявлень з урахуванням того, що спіновий стан системи (в даному випадку електрона) визначається вектором у деякому просторі. Тоді довжина (модуль) вектора задається так, щоб його проекція на одну з осей дорівнювала $\pm\hbar/2$. Спіновий стан електрона визначається вірогідністю того, що проекція спіну має певний знак. Слід зазначити різницю між звичайними векторами і вектором, що характеризує спін. Для цього вектора визначено лише обертання навколо заданого початку, тоді як звичайний вектор може також переміщуватися у просторі.

Дуже популярним є теоретико-групове визначення спіну. Спін - представлення групи обертання $SU(2)$, що не приводиться. Знайомим з теорією груп це визначення видається тривіальним; для незнайомих воно незрозуміло. Але для викладення матеріалу більш важливо інше: спін - величина, що має розмірність моменту кількості руху і може складатися з ним за стандартними квантово-механічними правилами.

Далі перейдемо до розгляду інших квантових чисел, не пов'язаних із звичним фізичним простором.

3.2 Ізотопічний спін

У 1932 р. Гейзенберг звернув увагу на дивну близькість мас протона (m_p) і нейтрона (m_n): $m_p = 938,3$ МеВ, а $m_n = 939,6$ МеВ. У зв'язку з цим Гейзенберг в 1932 р. висунув ідею, що протон і нейтрон є різними станами однієї і тієї ж частинки, названої ним нуклоном. Своєрідним “перемикачем”, який переводить нуклон з одного стану у інший, є обмінна частинка, так званий віртуальний піон. Спостережувальна відмінність між протонним і нейтронним станами нуклона, з погляду Гейзенберга, зводиться до різниці значень електричного заряду ($e_p=e$, $e_n=0$), яка і обумовлює невелику відмінність їх мас. Цю властивість нуклона називають *зарядовою незалежністю*, вона обумовлена деякою

внутрішньою симетрією частинки. Гейзенберг сформулював квантову інтерпретацію цього явища, яка, зрозуміло, істотно розширена і покладена в основу теорії елементарних частинок.

Ця концепція базується на такій ідеї: відмінність в станах протона і нейтрона характеризується новим внутрішнім квантовим числом, що одержало назву "*ізотопічний спі́н*". Слово «спін» у цьому терміні підкреслює ту обставину, що математичний метод, який описує ізотопічний спі́н, близький до такого, що описує звичайний спі́н.

Нуклон описується вектором ізотопічного спі́ну I , проекція якого I_z на деяку вісь z може набувати двох значень $\pm 1/2 \hbar$ відповідно до того, як набуває цих значень проекція звичайного спі́ну. Умовилися вважати, що значення $I_z = +1/2$ відповідає протонному стану нуклона, а $I_z = -1/2$ – нейтронному. Проте в рамках цієї концепції виникає таке питання: в якому просторі існує вектор ізотопічного спі́ну? Як було встановлено раніше, вектор звичайного спі́ну можна пов'язати із звичайним фізичним простором (спін і момент кількості руху мають однакову розмірність). У концепції ізотопічного спі́ну цей зв'язок повністю втрачається. Простір ізотопічного спі́ну - абстрактний простір в тому значенні, що він не пов'язаний з фізичним простором, в якому існують макроскопічні тіла і функціонують динамічні закони, що описують їх.

Ізотопічний спі́н - внутрішнє квантове число, для опису якого вводиться спеціальний математичний («уявний») простір. Простір, в якому функціонує ізотопічний спі́н, є двовимірним комплексним евклідовим простором. Такий простір можна уявити як простір двох вимірів, в якому кожна точка x - комплексне число. Евклідовість означає, що модуль вектора у цьому просторі задається сумою квадратів координат ($x_1^2 + x_2^2$). Кардинальність ідеї ізотопічного спі́ну полягала в тому, що вперше у фізику елементарних частинок з необхідністю (а не тільки для зручності обчислень) вводився нефізичний простір, в якому визначався вектор ізотопічного спі́ну.

Формалізм (метод) ізотопічного спі́ну згодом чудово виправдався при інтерпретації численних експериментів і став зразком для опису сукупності інших квантових чисел. Так, було встановлено, що спектри мас восьми баріонів із спі́ном

$J = +\frac{1}{2}$ і десяти баріонів з $J = +\frac{3}{2}$ мають властивість групуватись у так звані *ізоспінові мультиплети* (таблиця 2). Частинки одного мультиплету розрізняються лише електричним зарядовим станом, їх маси (рис.3) дуже близькі і з точністю до електромагнітних поправок можуть вважатися практично однаковими. Фактично кожна складова мультиплету є іншим зарядовим станом однієї і тієї самої частинки.

Таблиця 2 - Ізотопічний спіні деяких суб'ядерних частинок

Частинка	Ізотопічний спіні, I	Проекція ізотопічного спіну, I_z				
		-1	$-1/2$	0	$1/2$	$+1$
Нуклон	$\frac{1}{2}$		n/p		p/n	
Λ -гіперон	0			Λ/Λ		
Σ -гіперон	1	Σ/Σ^+		Σ^0/Σ^0		Σ^+/Σ^-
Ξ -гіперон	$\frac{1}{2}$		Ξ^-/Ξ^0		Ξ^0/Ξ^-	
Ω -гіперон	0			Ω^-/Ω		
Піон	1	π^-		π^0		π^+
Каон	$\frac{1}{2}$		K^0/K^-		K^+/K^0	
η -мезон	0			η		

3.3 Дивність

На початку 50-х років спостерігалось таке явище. Тільки що відкриті K -мезон і Λ -частинка не народжувалися порізно. Наприклад, реакція $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ (π -піон), яка, здавалось б, не була заборонена ніякими фізичними законами, не здійснювалася на досліді. Проте, наприклад, відбувалася реакція $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$.

У фізиці елементарних частинок існує золоте правило: **все, що не заборонено, повинно здійснюватися в природі**. Категоричне заперечення в мікрофізиці означає, що існує якесь *правило заборони*.

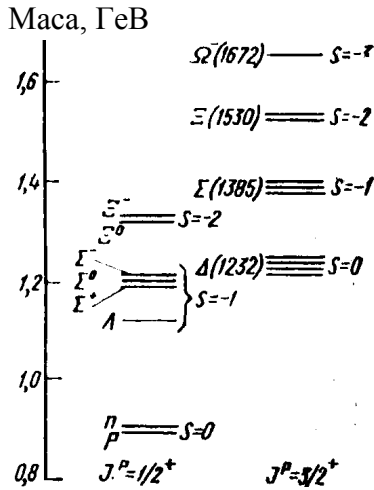


Рисунок 3 - Спектр мас деяких елементарних частинок

З цієї причини відсутність реакцій з виникненням однієї Λ -частинки і обов'язкове парне їх народження повинні були знайти своє відзеркалення у конкретному правилі. Гелл-Ман і Нішіджіма сформулювали його в 1952 р. Згідно з цим правилом K - і Λ -частинкам приписувалося нове квантове число - *дивність* (S), яке зберігається в сильних взаємодіях.

Для простоти було запропоновано характеризувати дивність цілими числами. Домовились, що Λ -частинки мають $S = -1$, K -мезони $S = +1$, дивність нуклонів і піонів дорівнює нулю. Тоді легко пояснюється дивна поведінка нових елементарних частинок. В реакції з одиночним народженням Λ -частинок дивність не зберігається, тому така реакція заборонена. При парному народженні дивності Λ і K -частинок компенсуються, і, отже, такі реакції дозволені.

Відзначимо, що згодом були знайдені елементарні частинки з великими (за абсолютною величиною) значеннями дивності. Загальне обмеження на величину дивності має вигляд $|S| < 3$.

На наступному етапі досліджень виникла необхідність в єдиному описі трьох величин, що зберігаються: I , I_z , S . Для

цього узагальнили схему, що була застосована для ізотопічного спіну. Замість двовимірного простору ізотопічного спіну було запропоновано використовувати тривимірний комплексний евклідов простір. Вектор, що відповідає всім квантовим числам, функціонує саме в такому просторі.

На практиці замість дивності S використовують *гіперзаряд* Y , який визначається співвідношенням $Y = B + S$. Оскільки баріонний заряд B є адитивним, цілочисловим і зберігається, то гіперзаряд має ті самі властивості, що і дивність.

Відповідна теорія, яка одержала назву теорії *унітарної симетрії*, запропонована Гелл-Маном і Нейманом у 1961 р. Початкова ідея унітарної симетрії полягає в незалежності рівняння для енергії сильної взаємодії щодо деяких перетворень, еквівалентних поворотам або обертанням у деякому тривимірному абстрактному векторному просторі – $SU(3)$ -*симетрія*. Вона дозволяє об'єднати велике число схожих частинок, вважаючи їх однією частинкою, але такою, що перебуває в різних станах. При цьому підході вдається об'єднати, здавалося б, абсолютно різні елементарні частинки. Наприклад, з'ясувалося, що всі мезони можна вважати різними станами однієї частинки. Адрони також зв'язані між собою законами симетрії.

У теорії унітарної симетрії частинки групуються в *унітарні мультиплети*, або *супермультиплети*. Частинки–адрони, що входять у супермультиплет, мають однаковий спін і парність. Суб'ядерні частинки найбільш відомих супермультиплетів наведені на рис. 4. Теорія унітарної симетрії привела до ідеї, що адрони мають внутрішню структуру і складаються з більш простих частинок.

3.4 Баріонний та лептонний заряди

Баріонний та лептонний заряди введені у теорію суб'ядерних частинок напівфеноменологічним шляхом для пояснення ряду закономірностей, що спостерігаються на досліди.

Якщо баріонам приписати баріонний заряд (або баріонне число) $B = +1$, антибаріонам - баріонний заряд $B = -1$, а решті частинок - баріонний заряд $B = 0$, то для всіх процесів, що відбуваються за участю баріонів і антибаріонів, буде виконуватися закон збереження баріонного заряду.

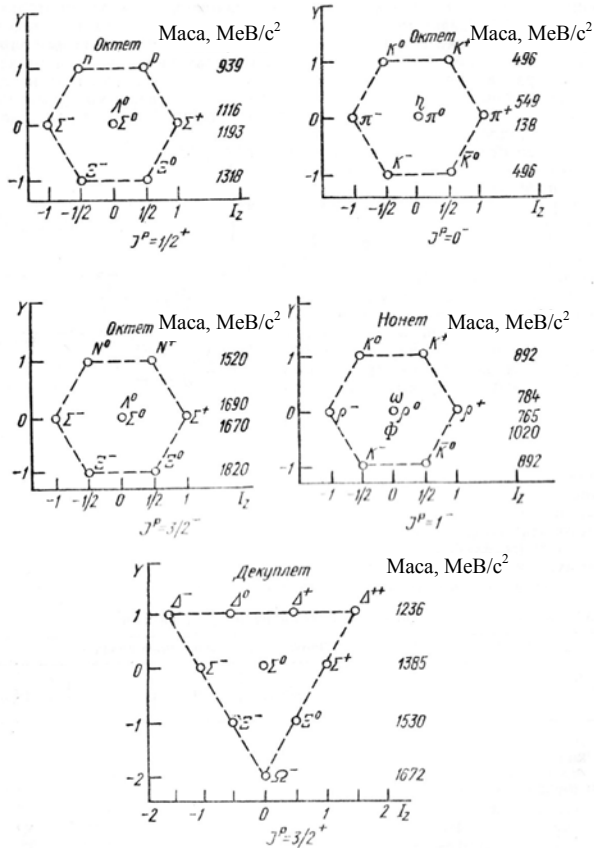


Рисунок 4 - Частинки, що входять до найбільш відомих супермультиплетів

Закон збереження баріонного заряду обумовлює стабільність найлегшого з баріонів - протона. Інші закони збереження (енергії, імпульсу, моменту імпульсу, електричного заряду і т. д.) не забороняють, наприклад, процесу $p \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$, який зрештою привів би до анігіляції атомів. Проте такий процес супроводжувався б зменшенням баріонного заряду на одиницю, і тому він не спостерігається.

Аналогічно закон збереження електричного заряду обумовлює стабільність найлегшої зарядженої частинки - електрона, забороняючи, наприклад, процес $e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \nu$.

Для пояснення особливостей проходження процесів з участю лептонів (e^- , μ^- , τ^- , ν_e , ν_μ , ν_τ) і антилептонів доводиться ввести квантове число L , що отримало назву лептонного заряду, (або лептонного числа). Лептонам приписується значення $L = +1$, антилептонам $L = -1$, решті частинок $L = 0$. За цієї умови у всіх без винятку процесах спостерігається збереження сумарного лептонного заряду системи частинок, що розглядається, тобто $\sum_i L_i = const$.

Досліди показують, що нейтрино визначеного типу може породити тільки відповідний йому лептон. Тому кожна пара лептонів або покоління (e^- , ν_e), (μ^- , ν_μ), (τ^- , ν_τ) має свій специфічний лептонний заряд L_e , L_μ , L_τ .

Інші квантові числа суб'ядерних частинок - *чарівність* або *шарм* (C), *краса* (B') - теж введені для пояснення неможливості проходження деяких реакцій з їх участю.

3.5 Квантові числа парності

Квантові числа парності P , C , G , T пов'язані з *симетрією проходження фізичних процесів* і, отже, рівнянь руху, що описують їх в квантовій теорії відносно різних операцій віддзеркалення. Цим операціям відповідають дискретні перетворення хвильових функцій частинок (векторів станів), що приводять до мультиплікативних законів збереження деяких фізичних величин.

Операції \hat{P} (\hat{P} - деякий оператор) відповідає фізична величина, яка одержала назву *P-парності*, *просторової парності*, або просто *парності*. Ця операція характеризує властивість хвильової функції частинки змінювати або зберігати свій знак при зміні знака усіх просторових координат. З точки зору симетрії це відповідає відбиттю у центрі симетрії або у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Ця операція переводить ліву систему координат у праву (тобто ліве замінюється правим).

Операція \hat{C} одержала назву *зарядового спряження*. Вона полягає в зміні знаків всіх без винятку зарядів частинки. Така операція змінює знаки всіх адитивних квантових чисел, але залишає незмінними їх імпульс і спін. Операція \hat{C} називається також операцією спряження частинка - античастинка. Вона ермітова і

унітарна одночасно. Власні значення C оператора \hat{C} дорівнюють ± 1 . Число C називається *зарядною парністю*. Певну зарядну парність мають тільки частинки, у яких всі заряди дорівнюють нулю, $B=Q=S=L=0$. Такі частинки називаються істинно нейтральними. Частинки з ненульовими зарядами мають невизначену зарядну парність C .

Операції \hat{G} відповідає фізична величина, що називається G -парністю. Вона складається із зарядного спряження \hat{C} і повороту на 180° навколо осі y в ізотопічному просторі. Оскільки поворот навколо цієї осі змінює знак третьої компоненти I_z ізотопічного спіну (за вісь квантування вибрана, як завжди, вісь z), то операція \hat{G} не змінює електричний заряд частинки і дозволяє приписати визначену G -парність адронам, які мають електричний заряд (наприклад, піонам). G - парність зберігається тільки в сильних взаємодіях.

Операція \hat{T} називається *часовим віддзеркаленням*. При цій операції змінюється напрямок проходження часу. Вона полягає в зміні знаків всіх імпульсів і моментів кількості руху частинки на протилежні, заміні вектора стану на комплексно спряжений. Симетрія відносно операції \hat{T} не веде до закону збереження якої-небудь парності, але проявляється у принципі детальної рівноваги, який добре виконується в сильних і електромагнітних взаємодіях (з точністю $<1\%$) і порушується в слабких взаємодіях.

Операція $\hat{C}\hat{P}$ називається *комбінованою інверсією*. При такій операції віддзеркалення всі імпульси і всі заряди змінюють знаки, тобто частинки переходять в античастинки.

Операція $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ полягає в зміні знаків моментів кількості руху і зарядів частинок. Імпульси при цій операції не змінюються. Згідно з CPT -теоремою Людерса - Паулі (1954—1955) симетрія відносно $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ -операції існує в будь-яких взаємодіях. Ця теорема у точному вигляді доведена в квантовій теорії поля.

До середини 50-х років існувало переконання, що у світі суб'ядерних частинок усі відомі закони збереження виконуються суворо. Вважалося, що світ є симетричним відносно таких симетрій, як зарядове спряження C , часове віддзеркалення T та просторова

парність P , але реальність виявилась більш складною.

З'ясувалося, що у мікросвіті симетрія контролюється взаємодією, при цьому точність проявлення симетрії, а отже, і законів збереження є різною для різних взаємодій – чим сильніша взаємодія, тим точніше проявляється симетрія. Так, у процесах, що контролюються гравітаційною, електромагнітною і сильною взаємодіями, суворо зберігаються C -, P - і T - симетрії, причому кожна окремо. *При слабкій взаємодії ці динамічні симетрії порушуються.*

Експериментально встановлено (при розпаді так званих довгоживучих нейтральних каонів на піони π^+ , π^-), що слабкі процеси можуть проходити з незбереженням просторової парності, тобто ніби відчують різницю між лівим і правим. У наш час є тверді експериментальні докази, що незбереження парності в слабких взаємодіях має універсальний характер, воно проявляє себе не тільки в розпадах елементарних частинок, але і в ядерних і навіть атомних явищах. Тобто слід визнати, що асиметрія є властивістю природи на найфундаментальнішому рівні.

Таким чином, відмітною властивістю слабкої взаємодії є її *CP-неінваріантність*. Це приводить до того, що наш світ є симетричним тільки відносно трьох перетворень – CPT - симетрія, але кожне перетворення окремо приводить до асиметрії. Виявилось, що у мікросвіті (як і у макросвіті) існує абсолютна різниця між лівим і правим, між минулим і майбутнім, між частинками і античастинками. Можливо, що ця властивість відповідальна за ту обставину, що речовина у Всесвіті значно превалює над антиречовиною яка побудована з античастинок. Завдяки CP -неінваріантності слабкої взаємодії світ і антисвіт несиметричні.

4 ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ У ФІЗИЦІ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

У фізиці суб'ядерних частинок існує велика кількість законів збереження. Є всі підстави вважати, що кожний закон збереження пов'язаний з певною симетрією законів природи. Умовно ці закони можна розділити на три групи відповідно до їх фізичної природи:

1) закони збереження, пов'язані з геометрією чотиривимірного простору-часу;

2) точні закони збереження зарядів;

3) наближені закони збереження (виконуються тільки для деяких фундаментальних взаємодій).

Зазначені групи законів збереження систематизовані у таблиці 3, де символами S , EM , W , G – позначені сильна, електромагнітна, слабка та гравітаційна взаємодії.

Фізичний зміст емпірично встановлених симетрій, пов'язаних з кожним із п'яти зарядів Q , B , L_e , L_μ , L_τ , сьогодні не встановлений.

Закони збереження у фізиці частинок мають дуже важливе значення, оскільки сучасна теорія високих енергій не має фундаментальних рівнянь руху, аналогічних до рівнянь Максвелла у класичній електродинаміці. У той самий час вивчення різних симетрій, законів збереження і їх наслідків дозволяє систематизувати одержані експериментальні дані. Новітні фізичні теорії, які претендують на статус найбільш загальних, неодмінно повинні пояснити природу тих фізичних величин, що зберігаються, і виявити їх фізичне походження.

5 ОСНОВИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЧАСТИНОК

Суб'ядерні частинки класифікуються за різними параметрами. Мабуть, найзагальніша основа класифікації частинок - значення їх власного моменту імпульсу - спіну (J).

З'ясувалось, що поведінка частинок істотно залежить від того, яке число, ціле ($0, 1, 2, \dots$) або напівціле ($1/2, 3/2, 5/2$), характеризує спін. Частинки з напівцілим спіном називаються *ферміонами*, з цілим - *бозонами*. В рамках квантової механіки відмінність в поведінці ферміонів і бозонів проявляється в типі симетрії хвильових функцій, що описують ці частинки.

Система, що складається з ферміонів, підлягає принципу заборони Паулі, а для системи з бозонів ця заборона відсутня. Нагадаємо, що принцип Паулі стверджує: *два ферміони не можуть існувати в одному стані, тобто мати однакові енергії, орбітальні моменти імпульсу і напрями спіну (однакові квантові числа).*

Таблиця 3 - Закони збереження у фізиці суб'ядерних частинок

Група законів збереження	Величина, яка зберігається	Позначення	Фізичне походження	У яких взаємодіях зберігається
Закони збереження, пов'язані з геометрією чотири-вимірною простору-часу	Енергія	E	Однорідність часу	S, EM, W, G
	Імпульс	\vec{p}	Однорідність простору	S, EM, W, G
	Момент імпульсу	\vec{L}	Ізотропність простору	S, EM, W, G
	Центр інерції	\vec{r}_c	Рівноправність інерціальних систем відліку	S, EM, W, G
	Віддзеркалення просторових осей	CP	Право-ліва симетрія	S, EM, W (окрім розпаду K^0)
	Віддзеркалення часу	T	Симетрія відносно зміни знака часу	$S, EM,$ ($>99\%$)
	СРТ-симетрія	CPT	Комбінація CP і T властивостей	S, EM, W, G
Заряди	Електричний	Q	Невідомо	S, EM, W, G
	Баріонний	B	Невідомо	S, EM, W, G
	Лептонний 1	L_e	Невідомо	S, EM, W, G
	Лептонний 2	L_μ	Невідомо	$S, EM, W,$ $G(?)$
	Лептонний 3	L_τ	Невідомо	$S, EM, W,$ $G(?)$

Продовження таблиці 3

Наближені закони збереження	Повний ізотопічний спіні	I	Ізотопічна симетрія	S
	Зарядове спряження	C	Невідомо	S, EM
	Парність	P	Невідомо	S, EM
	G-парність	G	Невідомо	S
	Спонтанне порушення симетрії		Невідомо	Порушується у всіх взаємодіях
	Дивність (гіперзаряд)	S $Y=B+S$	Невідомо	S, EM
	Чарівність (шарм)	C	Невідомо	S, EM

Прекрасною і, мабуть, найважливішою ілюстрацією принципу Паулі є структура атомних рівнів, що визначають періодичну систему Менделєєва.

Згідно з сучасною точкою зору будь-яка взаємодія елементарних частинок здійснюється іншими частинками - квантами відповідної взаємодії. Такими переносниками взаємодії завжди є бозони (їх називають калібрувальними), в той час як сама матерія побудована з ферміонів (рис. 5). Вже відмічалось, що переносником електромагнітної взаємодії є фотон, гравітаційної – гравітон, слабкої W^\pm (дубль ве) і Z^0 (зет нуль) - бозони.

Квантами сильної взаємодії з сучасної точки зору є глюони (від англійського "глює" - клей). Їх вісім різних типів. Усі калібрувальні бозони за винятком гравітона який має спіні 2 характеризуються спіном, що дорівнює одиниці. Гравітони є чисто теоретичними об'єктами і поки що дослідно не знайдені, в той час як інші калібрувальні бозони спостерігалися експериментально.

Іншою основою класифікації елементарних частинок є їх взаємодія. Всі елементарні частинки схильні до слабкої взаємодії. Частинки, які, крім того, беруть участі у сильній взаємодії,

Кварки	u up	c charm	t top	γ фотон
	d down	s strange	b beauty	g глюон
	ν електронне	ν_{μ} мюонне	ν тау	Z Z-бозон
Лептони	e електрон	μ мюон	τ таон	W W- бозон
	Ферміони			Бозони

Рисунок 5 - Стандартна модель частинок. Уся речовина Всесвіту складається з кварків та лептонів (ферміонів), з'єднують їх переносники взаємодії (бозони).

називаються *адронами* (грецьке «хадрос» означає крупний, масивний). Встановлено, що всі адрони мають внутрішню структуру і складаються з більш фундаментальних частинок - кварків. Їх існує шість типів. Адрони з нульовою дивністю ($S = 0$) називають звичайними, з $S \neq 0$ - дивними, з ненульовою чарівністю ($C = \pm 1$) – зачарованими (або шармованими).

Адрони - ферміони одержали загальну назву – *баріонів* (від грецького "бариос" - важкий), адрони - бозони називають *мезонами* (від грецького "месос"- середній, проміжний). Найбільш відомими з баріонів є нуклони (протон і нейтрон), з мезонів - π -мезони (*піони*) і K -мезони (*каони*). До баріонів, крім нуклонів, відносять групу частинок, яка одержала назву *гіперонів* (Λ , Σ^+ , Σ^0 , Ξ^0 , Ξ^- , Ω^- , Λ_c^-). Гіперони (за винятком Λ_c^+ , $\bar{\Lambda}_c^+$ які належать до зачарованих) є дивними частинками, оскільки їх дивність не дорівнює нулю.

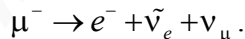
Ферміони, що не беруть участі у сильній взаємодії, називаються *лептонами*. Лептони отримали свою назву від

грецького слова «лептос», яке означає «легкий, дрібний». Ті з них, які мають електричний заряд (тобто електрони і мюони), беруть участь також у електромагнітній взаємодії. Типовими лептонами є електрони і нейтрино. На сучасному рівні знань тільки лептони і кварки вважаються точковими безструктурними частинками і, як результат, їх називають *фундаментальними ферміонами*.

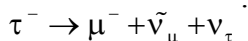
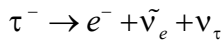
На рис.5 наведена класифікація фундаментальних ферміонів. Вони згруповані у три *покоління* у відповідності до структури сучасної теорії. Наш Всесвіт побудований із частинок першого покоління – лептонів і кварків, а також калібрувальних бозонів, але, як свідчить теорія, на початкових стадіях його розвитку важливу роль відігравали частинки всіх трьох поколінь.

Найбільш відомою частинкою Всесвіту є електрон. Роль електронів у нашому світі надзвичайна. Він є тією негативною частинкою, яка разом з атомними ядрами створює всі атоми елементів, що входять до Періодичної таблиці Менделєєва.

До другого покоління частинок належить мюон – частинка, яка за своїми властивостями є важким аналогом електрона ($m_{\mu} = 207 \cdot m_e$). На відміну від електрона, мюон є нестабільною частинкою, час його життя складає $t = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Як правило, мюон розпадається за схемою



Ще більш важким аналогом електрона є τ -лептон (*таон*). Його маса більше ніж у 3 тисячі разів перевищує масу електрона, тобто таон важчий, ніж протон чи нейтрон. Час його життя дорівнює $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ с}$, а з більш ніж ста різних схем (каналів) його розпаду найбільш часто реалізуються такі:



З рисунка видно, що кожному лептону відповідає своє нейтрино: електрону - електронне ν_e , мюону - мюонне ν_{μ} і таону - тау-нейтрино ν_{τ} . Протягом тривалого часу вважалося, що нейтрино, як і фотони, не мають маси спокою, але експерименти останніх років показали, що це не так. Маси нейтрино до теперішнього часу ще точно не відомі, але визначені їх верхні

межі, наприклад, для ν_e вона дорівнює $10^{-3} m_e$. Вважається, що нейтрино є найбільш розповсюдженою частинкою у Всесвіті, на кожний протон припадає близько мільярда нейтрино.

Окрім перелічених вище частинок, знайдена велика кількість сильно взаємодіючих короткоживучих частинок, які отримали назву резонансів. Резонанси є збудженими станами адронів (рис. 6) і подібно до атомних і ядерних систем створюють квазідискретний спектр. Уявлення про збуджені стани адронів і їх теорія будуються за аналогією до атомної фізики.

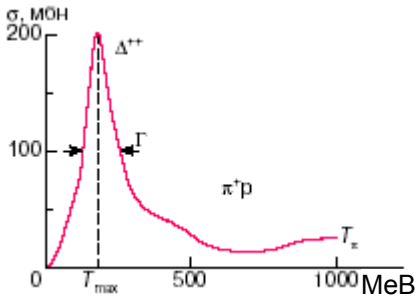


Рисунок 6 - Залежність перерізу реакції π^+p від кінетичної енергії піона. При енергії $T = 200$ MeV виникає Δ^{++} - резонанс

6 ЧАСТИНКИ І АНТИЧАСТИНКИ

Рівняння Шредінгера, яке є основним рівнянням квантової механіки, не задовольняє вимоги теорії відносності - воно неінваріантне відносно перетворень Лоренца. В 1928 р. Діраку вдалося знайти релятивістське квантово-механічне рівняння для електрона, з якого випливає ряд важливих наслідків. Перш за все з цього рівняння природно, без яких-небудь додаткових припущень, можна одержати спін і числове значення власного магнітного моменту електрона. Таким чином, з'ясувалося, що спін є величиною одночасно і квантовою, і релятивістською.

Крім того, рівняння Дірака дозволило передбачити існування античастинки електрона - *позитрона*. З рівняння Дірака випливає, що повна енергія вільного електрона може мати не тільки позитивні, але і негативні значення. Дослідження цього співвідношення показує, що при заданому імпульсі частинки p існують розв'язки рівняння, які відповідають енергіям

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_e^2 c^4}.$$

Між найбільшою негативною енергією ($-m_e c^2$) і найменшою позитивною енергією ($+m_e c^2$) є інтервал значень енергії, які не можуть реалізуватися. Ширина цього інтервалу дорівнює $2m_e c^2$ (рис. 7). Оскільки у квантовій теорії енергія може змінюватися порціями, то існування забороненої зони не може перешкодити переходу частинки в стани з негативною енергією.

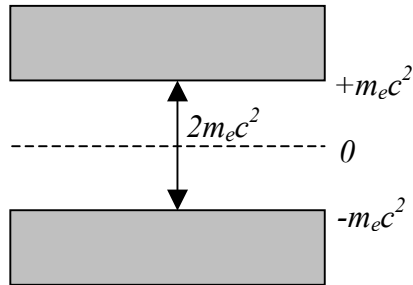


Рисунок 7 - Результати розв'язку рівняння Дірака для електрона

Частинка з негативною енергією повинна мати дуже дивні властивості. Тому щоб вирішити цю проблему, Дірак припустив, що переходи електронів в стани з негативною енергією звичайно не спостерігаються з тієї причини, що всі наявні рівні вже зайняті електронами (море електронів Дірака). Нагадаємо, що електрони є ферміонами і підлягають принципу Паулі, який забороняє перебувати в одному і тому ж стані більш ніж одній частинці.

Тобто згідно з думкою Дірака вакуум є такий стан, в якому всі рівні негативної енергії заселені електронами, а рівні з позитивною енергією вільні. Оскільки зайняті всі без винятку рівні, що розміщені нижче забороненої зони, то електрони на цих рівнях ніяк себе не виявляють. Якщо одному з електронів, що знаходиться на негативному рівні, повідомити енергію $E > 2m_e c^2$, то він перейде в стан з позитивною енергією і буде "поводитися" звичайним чином, як частинка з позитивною масою і негативним зарядом. Вакансія («дірка»), що утворилася при цьому в

сукупності негативних рівнів, повинна “поводитися” як позитрон тобто як античастинка. Дійсно, відсутність частинки, що має негативні масу і заряд, сприйматиметься як наявність частинки з позитивною масою і позитивним зарядом (повна аналогія з електронно-дірковими парами у власних напівпровідниках).

При зустрічі позитрона з електроном вони *анігілюють* (зникають) – відповідно електрон переходить з позитивного рівня на вакантний негативний. Енергія, що відповідає різниці цих рівнів, виділяється у вигляді випромінювання γ -кванта.

У подальшому в дещо зміненому вигляді рівняння Дірака було застосовано не тільки до електронів, але і до інших частинок із спіном, що дорівнює $1/2$. З'ясувалося, що у кожної такої частинки (наприклад, протона або нейтрона) повинна існувати своя античастинка. Народження пари протон - антипротон або нейтрон - антинейтрон можна чекати, наприклад, при зіткненні нуклонів, які мають достатньо високу енергію.

Античастинки є не тільки у ферміонів, але і у бозонів. Так, наприклад, π^- -мезон є античастинкою π^+ -мезона. В той самий час існують суб'ядерні частинки, які тотожні зі своїми античастинками (тобто не мають античастинок). Ці частинки називаються *абсолютно нейтральними*. До них, наприклад, належать фотон, π^0 -мезон і η -мезон, такі частинки не здатні до анігіляції.

Окрім цього, відомі суб'ядерні частинки-“перевертні” (K^0 і B_d -мезони), які з часом змінюють свій тип, тобто частинка перетворюється на античастинку, а та в свою чергу знову стає частинкою. Подібні перетворення одержали назву *осциляцій*.

Таким чином, поряд із світом частинок існує світ античастинок. Маса кожної античастинки строго дорівнює масі відповідної частинки, також як і часи життя, але знаки їх зарядів протилежні. Під зарядом слід розуміти не тільки електричний, але

й інші заряди, наприклад, баріонний і лептонний заряди.

Як уже зазначалося, уявна операція заміни частинки-античастинкою називається зарядним спряженням.

7 КВАРКИ

У 60-ті роки субатомних частинок було відкрито настільки багато, що виникли сумніви з приводу їх елементарності.

Ідея кварків виникла у результаті спроби розробити класифікацію великої кількості частинок, що беруть участь у сильній взаємодії. Гелл-Ман і Цвейг припустили, що усі адрони складаються із більш простих частинок – *кварків*, що мають дробовий (порівняно з зарядом електрона) заряд $\pm 1/3 \cdot e$, $\pm 2/3 \cdot e$. Назва «кварк» запозичена Гелл-Маном з фантастичного роману Дж. Джойса «Поминання по Фіннегану». В романі є пісня, що починається словами «three quarks», що означає «три каркання», «три квакання», «три нісенітниця». Ця назва добре відбиває досить своєрідні властивості кварків.

Експериментальні пошуки дробового заряду у природі до цього часу виявилися безуспішними, хоча точність вимірювань була доведена до винятково високих значень. Це приводить до висновку, що існування дробового електричного заряду можливо за умови, якщо його частинки-носії утворюють зв'язані об'єднання, в яких сумарний електричний заряд дорівнює або 0, або ± 1 . Тобто кварки завжди знаходяться у зв'язаному стані.

Клас кварків містить шість частинок і стільки ж античастинок. Фізики назвали кожний тип кварків ароматом. Цей термін, що асоціюється з нюхом, насправді позначає квантове число, яке приписують частинкам даного типу. Аромати позначаються першими буквами англійських слів, прийнятих як їх назва: up (верхній), down (нижній), strange (дивний), charm (шармований або чарівного), beauty, bottom (красивий, нижній), top, truth (істинний). Інші квантові числа кварків наведені в таблиці 4.

З таблиці видно, що *u*- і *d*-кварки створюють ізотопічний дублет, відповідно їм приписаний ізотопічний спінін $I = 1/2$ з проєкціями $I_s = 1/2$ (*u*-кварк) і $I_s = -1/2$ (*d*-кварк). Обидва компоненти дублета мають близькі значення маси та ідентичні за всіма властивостями, за винятком електричного заряду.

Таблиця 4 - Фізичні властивості кварків

Кварки	u	d	s	c	b	t
Маса, m	1,5-5 MeB	3-9 MeB	60-70 MeB	1,55 ГеВ	4,73 ГеВ	74 ГеВ
Ізоспін, I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекція, I_s	+1/2	-1/2	0	0	0	0
Заряд, q/e	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Дивність, S	0	0	-1	0	0	0
Чарівність, C	0	0	0	1	0	0
Краса, B'	0	0	0	0	1	0
Істина, T	0	0	0	0	0	1

Наведені у таблиці значення мас відповідають масам голих кварків, тобто кварків без оточуючих їх глюонів. Хмара глюонів має енергію близько 300 MeB, в результаті загальна маса кварка в одязі глюонів збільшується.

Складені з кварків адрони поділяються на три групи. Перша – баріони - утворюються комбінаціями трьох кварків, ця група містить протон і нейтрон – фундаментальну основу атомних ядер (див. рис. 8). Другу групу утворюють частинки, що одержують шляхом поєднання кварка і антикварка. Вони називаються мезонами. Ще одна група містить частинки, що утворені поєднанням трьох антикварків. До цієї групи потрапляють антипротон і антинейтрон, які складають основу антиречовини. Більш докладно будова адронів буде розглянута нижче.

Деякі роки тому у ході експериментів, які проводились у лабораторії Spring-8 у Осаці (Японія), одержані перші частинки, які містять п'ять кварків, але ці експерименти потребують подальшої перевірки. Разом з тим квантова хромодинаміка не

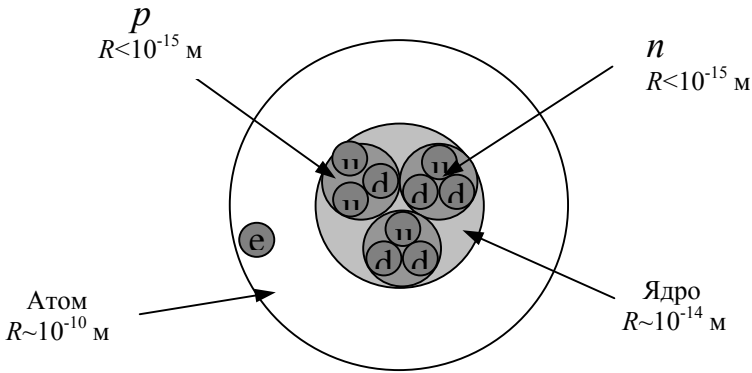


Рисунок 8 - Внутрішня будова атома.

забороняє існування таких частинок, тому, можливо, у найближчому майбутньому буде відкритий цілий клас нових суб'ядерних частинок, що складаються більше ніж з трьох кварків.

Кварки, що визначають основні фізичні властивості суб'ядерних частинок, називають *валентними*. Окрім валентних кварків, до складу адронів входять віртуальні пари частинок – кварки і антикварки, які випромінюються і поглинаються глюонами на дуже короткий час ($\Delta t \leq \hbar/\Delta E$, де ΔE – енергія віртуальної пари). Віртуальні пари кварків одержали назву *кварків моря*, або *морських кварків*. Таким чином, у структуру адронів входять валентні і морські кварки та глюони.

В описаній вище стрункій схемі виявляється принциповий дефект. Кварки, будучи ферміонами, повинні підлягати принципу заборони Паулі і не можуть з'єднуватися, якщо їх стани однакові. А в баріонах і антибаріонах кварки одного аромату часто виявляються разом. Наприклад, протон утворюється комбінацією кварків, яка записується так: *uud*, нейтрон - *udd*. Здавалося б, порушується *принцип заборони Паулі*. Для усунення цієї суперечності було введено припущення, що кварки одного аромату не ідентичні, вони розрізняються характером взаємодії один з одним, і тому для їх опису ввели ще одне квантове число. З властивим фізиком своєрідним почуттям гумору його назвали *«кольором»*. Як аромат не має ніякого відношення до запаху, так і «колір» не має нічого спільного із загальноприйнятим значенням цього слова.

Таким чином, кварк кожного аромату може існувати у трьох кольорових станах. За кольори домовились брати жовтий (y), синій (ν) і червоний (r). Антикварки мають кольори додаткові до білого, які називають *антикольорами* (y, ν, r). Чому кольорові заряди кварків вибрані таким чином, пояснено нижче.

7.1 Колір

Серед квантових чисел особливе місце займає електричний заряд суб'ядерних частинок. З одного боку, це типowo квантове число, оскільки всі заряджені частинки мають заряд, кратний величині e . З іншого боку, заряд електрона - характеристика електромагнітної взаємодії, яка визначає константу α_e , а отже, і саму взаємодію.

За аналогією з електромагнітною взаємодією припускають, що існує квантове число - «сильний заряд», яке обумовлює сильну взаємодію. Проте сильна взаємодія нуклонів не є далекодійною - сильні заряди не виявляються на великих відстанях. Тому наслідком гіпотези «сильного заряду» є (знову-таки за аналогією з неможливістю спостереження вільних кварків) припущення, що усередині нуклона «сильні заряди» трьох кварків компенсують один одного так, що результуючий сильний заряд нуклонів дорівнює нулю.

Здавалося б, найпростіший варіант такої гіпотези (за аналогією з електромагнетизмом) - надати «сильному заряду» трьох значень: ± 1 і 0 . Проте таке найпростіше допущення суперечить уявленню про симетрію частинок з різними знаками електричних зарядів. Відповідно до сучасної теорії системи, в яких електрони (заряд $-e$) замінені на позитрони (заряд $+e$), еквівалентні (так звана зарядна інваріантність). Очевидно, що така еквівалентність зникає, якщо заряджені частинки замінити на нейтральні. Тому для характеристики сильного заряду необхідно ввести величину, яка в трьох модифікаціях була б повністю еквівалентна, і, крім того, сума трьох різних зарядів оберталася б в нуль, оскільки «сильний заряд» (на відміну від електромагнітного) ніколи не спостерігається.

Аналогом і терміном, що визначає «сильний заряд», став образ кольору. Загальновідомо, що саме три кольори

(наприклад, червоний, жовтий і синій) мають властивість додатковості, тобто їх сукупність утворює білий колір. Тому домовилися, що кварки в нуклонах мають сильний заряд - «колір». Набір «кольорів» кварків, які належать до складу однієї і тієї ж частинки, такий, що в результаті вона знебарвлюється, тобто сильний заряд («колір») цих частинок обертається у нуль. Таким чином, кожний кварк у таблиці 4 може виступати у трьох іпостасях і є кольоровою частинкою. Антикварки мають такий колір, що разом з кварком можуть утворювати частинку-мезон, яка кольору не має.

Взаємодія між кварками обумовлюється обміном глюонами. Квантові числа B, I, S, C і Q глюонів дорівнюють нулю. У той самий час кожний глюон має один колір і один антиколір. Тому при поглинанні чи випромінюванні глюона кварк змінює колір, але не аромат. Всього існує дев'ять незалежних комбінацій із кольору і антикольору. Одна суперпозиція із кольорів і антикольорів $u\bar{u} + v\bar{v} + r\bar{r}$ не розглядається, оскільки такий глюон не змінює колір кварка. В результаті залишається вісім глюонів:

$(r\bar{u}, r\bar{v}, r\bar{w}, r\bar{u}, r\bar{v}, r\bar{w}, \frac{(r\bar{r} - u\bar{u})}{\sqrt{2}}, \frac{(r\bar{r} + u\bar{u} - 2v\bar{v})}{\sqrt{6}})$, які і

обумовлюють взаємодію кварків.

7.2 Кваркова модель адронів [7]

Особливістю сильної взаємодії є те, що глюони мають кольорові заряди і взаємодіють між собою. Це приводить до кардинальної зміни картини силових ліній глюонного поля порівняно, наприклад, з електричним полем. Відповідна картина силових ліній електричного поля точкового заряду наведена на рис. 9 а. Видно, що у випадку електромагнітної взаємодії силові лінії розходяться від їх джерела - електричного заряду. Це пов'язано з тим, що віртуальні фотони, які випромінюються джерелом одночасно, не взаємодіють один з одним. У випадку сильної взаємодії замість ліній, що розходяться, ми одержуємо джгут силових ліній, що протягнутий між кварком і антикварком (рис. 9 б). Все ж найбільш цікавим є те, що глюони стають джерелом нових глюонів, кількість яких збільшується при віддаленні від кварка. Така картина взаємодії відповідає залежності

потенціальної енергії взаємодії між кварками від відстані між ними, зображений на рис. 10.

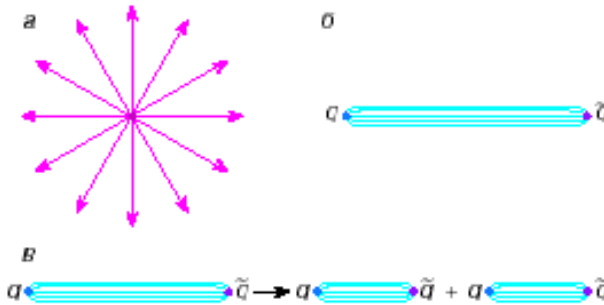


Рисунок 9 - Схема силових ліній електричного поля точкового заряду (а), глюонного поля між кварком і антикварком (б), а також схема розриву джгута при його великому розтягуванні (в)

З рисунка видно, що до відстані $R < 10^{-13}$ см залежність $U(R)$ має воронкоподібний характер, причому сила кольорового заряду в цій області відстаней відносно невелика, так що кварки при $R < 10^{-15}$ см в першому наближенні можна розглядати як вільні, незважені частинки. Це явище має назву *асимптотичної вільності кварків* при малих відстанях. Однак при R , яке є більшим від деякого критичного

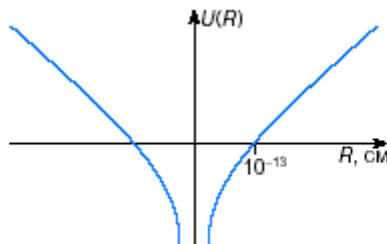


Рисунок 10 - Залежність потенціальної енергії взаємодії кварка з антикварком від відстані між ними

$R_{кр} \sim 10^{-13}$ см, величина потенціальної енергії взаємодії $U(R)$ стає прямо пропорційною R . Звідси безпосередньо випливає, що сила, яка

зв'язує кварки ($F = -dU/dR = \text{const}$), не залежить від відстані. Таким чином, сили, які діють між кварком і антикварком, починаючи з $R_{кр}$, перестають залежати від відстані, залишаючись на рівні величезної величини, близької до 20 т. Ніякі інші взаємодії, які фізики вивчили раніше, не мали такої незвичайної властивості.

На відстані $R \sim 10^{-12}$ см (радіус середніх атомних ядер) кольорові сили більше ніж в 100 тисяч разів перевищують електромагнітні сили. Якщо порівняти кольорові сили з ядерними силами між протоном і нейтроном усередині атомного ядра, то виявляється, що кольорові сили є в тисячі раз більшими! Таким чином, перед фізиками відкрилася нова грандіозна картина кольорових сил в природі, що на багато порядків перевищують ядерні сили.

Природно, постає питання: до яких відстаней між кварками потенціальна енергія лінійно збільшується із зростанням R ? Відповідь проста: при великих відстанях джгут силових ліній рветься, оскільки енергетично більш вигідно утворити розрив із народженням кварк-антикваркової пари частинок. Це відбувається, коли потенціальна енергія в місці розриву є більшою, ніж маса спокою кварка і антикварка. Процес розриву джгута силових ліній глюонного поля показаний на рис. 9 в.

Такі якісні уявлення про народження пари кварк-антикварк дозволяють зрозуміти, чому одиночні кварки взагалі не спостерігаються в природі. Кварки навіки заточені усередині адронів. Це явище невилітання кварків називається *конфайнментом* (від англ. полонення, ув'язнення).

При високих енергіях джгут силових ліній може бути розірваним відразу в багатьох місцях, утворивши безліч $q\bar{q}$ -пар.

Розглянемо більш докладно будову легких адронів, тобто мезонів. Вони побудовані, як ми вже говорили, з одного кварка і одного антикварка. Надзвичайно важливо, що обидва партнери пари мають при цьому однаковий кольоровий заряд і такий самий антизаряд (наприклад, кварк синій і антикварк антисиній), так що їх пара незалежно від ароматів кварків не має кольору (у природі ми спостерігаємо тільки безбарвні частинки).

У табл. 5 наведені деякі парні і більш складні комбінації кварків з зазначенням, яким відомим адронам це поєднання кварків

відповідає.

З найбільш вивчених у наш час мезонів і мезонних резонансів найбільшу групу складають легкі неароматні частинки, у яких квантові числа $S=C=B=0$. До цієї групи входять близько 40 частинок.

Таблиця 5 починається з піонів. Вони є квантами поля, що забезпечує взаємодію між нуклонами. Заряджені піони живуть близько 10^{-3} с, розпадаючись на лептони за такими схемами:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu \quad \text{і} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu .$$

Їх "родичі" в табл. 5 - резонанси ρ^\pm, ρ^0 (ро-мезони) мають на відміну від піонів спін $J = 1$, вони нестабільні і живуть всього близько 10^{-23} с. Причина розпаду ρ^\pm, ρ^0 - сильна взаємодія.

Причина розпаду заряджених піонів обумовлена слабкою взаємодією, а саме тим, що кварки з яких побудована частинка здатні випромінювати і поглинати в результаті слабкої взаємодії на короткий час Δt віртуальні калібрувальні бозони: $u \rightarrow d + W^-$ або $d \rightarrow u + W^-$. На відміну від лептонів здійснюються і переходи кварка одного покоління в кварк іншого покоління, наприклад, $u \rightarrow b + W^-$, або $u \rightarrow s + W^-$, і т. ін., хоча такі переходи відбуваються набагато рідше, ніж переходи в рамках одного покоління. Разом з тим при всіх подібних перетвореннях електричний заряд у реакції зберігається.

Вивчення мезонів, що містять s - і c -кварки, привело до відкриття декількох десятків дивних і чарівних частинок. Їх дослідження проводиться зараз у багатьох наукових центрах світу.

Перейдемо до розгляду важких адронів, тобто баріонів. Всі вони складаються з трьох кварків, але таких, у яких є всі три різновиди кольору, оскільки, так само, як і мезони, всі баріони безбарвні. Кварки усередині баріонів можуть мати орбітальний рух. У цьому випадку сумарний спін частинки буде перевищувати сумарний спін кварків, який дорівнює $1/2$ або $3/2$ (якщо спіни всіх трьох кварків паралельні один одному).

Таблиця 5 - Кварковий склад деяких адронів

Кварки	Мезони		Кварки	Баріони	
	$J = 0$	$J = 1$		$J = \frac{1}{2}$	$J = \frac{3}{2}$
	Частинки	Резонанси		Частинки	Резонанси
$u\bar{d}$	π^+ (піон+)	ρ^+ (ро+)	uuu		Δ^{++} (дельта++)
$\bar{u}d$	π^- (піон-)	ρ^- (ро-)	uud	p (протон)	Δ^+ (дельта+)
$u\bar{u} - d\bar{d}$	π^0 (піон 0)	ρ^0 (ро 0)	udd	n (нейтрон)	Δ^0 (дельта 0)
$u\bar{u} + d\bar{d}$	η (ета)	ω (омега)	ddd		Δ^- (дельта-)
$d\bar{s}$	k^0 (каон 0)	k^{0*} (каон 0*)	uus	Σ^+ (сигма+)	Σ^{+*} (сигма+*)
$u\bar{s}$	k^+ (каон+)	k^{+*} (каон+*)	uds	Λ^0 (лямбда 0)	Σ^{0*} (сигма 0*)
$\bar{u}s$	k^- (каон -)	k^{-*} (каон -*)	dds	Σ^- (сигма-)	Σ^{-*} (сигма-*)
cd	D^+ (де+)	D^{+*} (де+*)	uss	Ξ^0 (ксі 0)	Ξ^0 (ксі 0)
$c\bar{s}$	D^+ (де ес+)	D^{+*} (де ес+*)	dss	Ξ^- (ксі-)	
$c\bar{c}$	Чармоній	J/ψ (джей-псі)	sss	Ω^- (омега-)	
$b\bar{b}$	Ботоній	Іпсилон	udc	Λ_c^- (лямбда-це-)	
$c\bar{u}$	D^0 (де 0)	D^{0*} (де 0*)	usc	Σ_c^{--} (сигма-це-)	
$b\bar{u}$	B^- (ве-)	B^* (ве*)	udb	Λ_b (лямбда-бе)	

Баріонами з мінімальною масою є протон p і нейтрон n (див. табл. 5). Але якщо спин цієї комбінації кварків $J = 3/2$, утворюються резонанси Δ^- і Δ^0 відповідно. Всі інші баріони, що складаються з важких кварків s , b , t , мають істотно більшу масу. Серед них особливий інтерес викликав Ω -гіперон, що складається з трьох дивних кварків. Він був відкритий спочатку на папері, тобто в результаті розрахунків з використанням ідей кваркової будови баріонів. Були передбачені всі основні властивості цієї частинки, які в подальшому були підтверджені експериментами.

Зараз існує багато експериментальних фактів, що переконливо свідчать про існування кварків. Зокрема, йдеться про відкриття нового процесу в реакції зіткнення електронів і позитронів, що приводить до утворення *кварк-антикваркових струменів*. Схема цього процесу наведена на рис. 11. На рисунку стрілками показані напрямки пучків e^+ і e^- , а з точки їх зіткнення - вилітання кварка q і антикварка \bar{q} під кутом θ до напрямку польоту електронів і позитронів. Таке народження $q + \bar{q}$ пари відбувається в реакції $e^+ + e^- \rightarrow \gamma_{\text{вирт}} \rightarrow q + \bar{q}$.

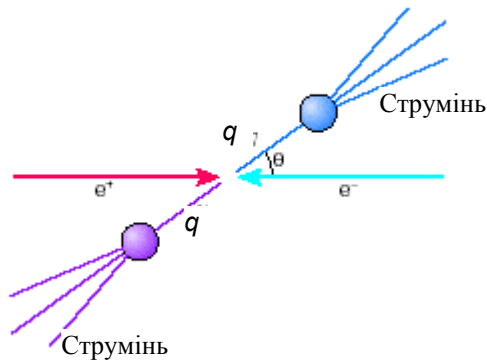


Рисунок 11 - Схема виникнення двох кваркових струменів у реакції між електроном і позитроном

Як ми вже говорили раніше, джгут силових ліній взаємодіючих частинок (частіше говорять - струна) при достатньо великому розтягуванні рветься на складові. При великій енергії кварка і антикварка струна рветься в багатьох місцях, внаслідок чого в обох напрямках уздовж лінії польоту кварка q і антикварка \bar{q} , як це показано

на рис. 11, утворюються два вузькі пучки вторинних безбарвних частинок - мезонів. Такі пучки частинок одержали назву *струменів*. Достатньо часто на досліді спостерігається утворення трьох, чотирьох і більше струменів частинок одночасно. Оскільки струни одновимірні, то центри утворення струменів також розташовуються уздовж прямої лінії.

7.3 Кварк-глюонна плазма

Конфайнмент властивий кваркам і глюонам тільки в «звичайних» умовах їх знаходження в складі адронів, в деяких особливих умовах його може і не бути. Для прикладу розглянемо випадок стискання ядра атома.

При стисканні важкого ядра окремі його нуклони наближуються один до одного, в результаті їх хвильові функції починають перекриватися. Як наслідок, кварки і глюони, що належали за звичайних внутрішньоядерних умов окремим нуклонам, втрачають свої зв'язки і починають вільно переміщуватися усередині всього об'єму ядра. Звичайно, вони, як і раніше, схильні до конфайнменту, але розмір області, яку ці частинки не можуть покинути, стає набагато більшою. Якщо таким же чином стискати N ядер, об'єм ув'язнення кварків та глюонів зростає ще в N разів. При достатньо великій кількості ядер цей об'єм може стати цілком макроскопічним і навіть величезним. У середині всього цього об'єму кварки і глюони можуть переміщатися як звичайні вільні частинки, говорять, що відбувається *деконфайнмент* кварків і глюонів. Такий новий стан речовини називають *кварк-глюонною плазмою*. За оцінками вчених він може реалізуватися в надрах нейтронних зірок.

Оцінимо ступінь стиснення, при якому звичайна ядерна матерія повинна перетворитися на кварк-глюонну плазму. Добре відомо, що об'єм ядра є приблизно в два-три рази більшим від сумарного об'єму всіх нуклонів, що створюють його (рис.12). Тому для того, щоб наблизити нуклони один до одного, достатньо зменшити об'єм ядра всього лише вдвічі-втричі. Якщо зменшити його більше, то хвильові функції нуклонів перекриються на стільки, що межі між окремими нуклонами будуть практично повністю зруйновані, але досягнути подібного стискання речовини досить складно.

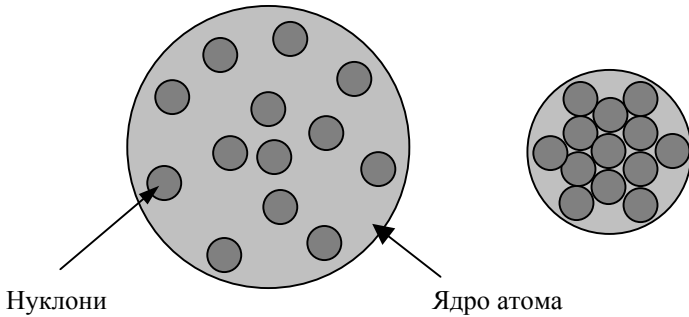


Рисунок 12 - Зміна у стані нуклонів при стисканні ядра атома

Описаний приклад ілюструє перехід до кварк-глюонної плазми за допомогою одного лише стискання речовини, без підвищення її температури. При підвищенні температури того самого ефекту можна досягти і при меншій густині ρ баріонної матерії за рахунок теплового народження частинок (у переважній кількості - піонів) при зіткненнях. Ці знову створені частинки можуть заповнити «пустоти» між баріонами настільки, що хвильові функції всіх частинок знову-таки перекриються. В результаті кварки і глюони стають вільними і можуть перемішуватися по всьому об'єму речовини.

Таким чином, кварк-глюонна плазма може існувати і при малій, навіть нульовій густині баріонної речовини, але для цього необхідна температура, яка приблизно дорівнює 10^{12} К (рис. 13). Згідно з сучасними космологічними уявленнями, приблизно таким був Всесвіт через 10-30 мікросекунд після свого народження (Великого вибуху).

На перший погляд здається, що реалізувати параметри, при яких виникає кварк-глюонна плазма в умовах Землі, неможливо. Проте розрахунки показують, що це можна зробити при зіткненні важких ядер, які мають дуже велику енергію.

Програма відповідних досліджень почалася у 1994 році на найбільшому в світі прискорювачі елементарних частинок у ЦЕРНі. За участю провідних наукових інститутів Чехії, Франції, Індії, Італії, Німеччини, Швеції та Швейцарії цей прискорювач був

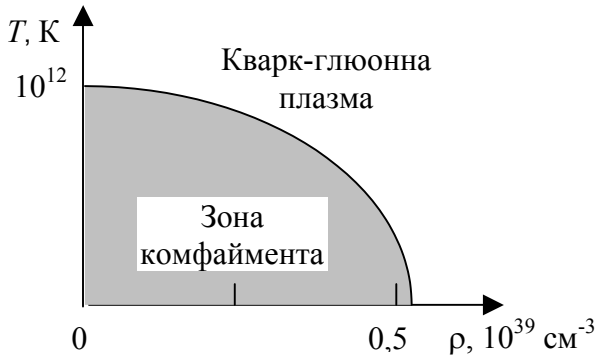


Рисунок 13 - Фазова діаграма існування кварк-глюонної плазми.

модернізований і пристосований для нових потреб. Потім була проведена ціла низка (сім) дуже складних експериментів із зіткнення ядер атомів свинцю, розігнаних до дуже високих енергій (33 TeV). При зіткненні іонів з мішенню виникла температура, яка сягала трильйона градусів - у 100 тисяч разів більше, ніж у середині Сонця! Густина отриманої при цьому матерії у 20 разів перевищувала густину матерії у ядрі атома. Остаточні результати експериментів були обнародовані тільки у лютому 2000 року, вони свідчать що вченим таки вдалося одержати кварк-глюонну плазму!

Остаточню це було підтверджено у 2001 році з використанням суперколайдера Національної лабораторії Брукхевена (США). Цей прискорювач забезпечує двадцятикратне підвищення енергії зіткнення ядер у порівнянні з прискорювачем, який діє в Європі. А прискорювач у ЦЕРНі тимчасово зупинений на реконструкцію - повним ходом йде спорудження нового суперколайдера «Large Hadron Collider» (LHC). Женевські експерименти продовжаться у 2005 році: планується провести зіткнення з мішенню іонів, енергія яких у 30 разів більша, ніж у Брукхевені. Це дозволить подовжити час життя згустку кварк-глюонної плазми і детальніше дослідити її фізичні властивості.

8 ЄДИНІ ТЕОРІЇ ВЗАЄМОДІЙ [8-9, 12]

Кінцевою метою фізики елементарних частинок і квантової теорії поля є створення *єдиної теорії всіх взаємодій*. Сучасні експерименти свідчать, що усі фундаментальні взаємодії не є незалежними, а можуть бути описані в рамках єдиної теорії, яку називають *супероб'єднанням*.

Для подальшого корисно пояснити, що мається на увазі під єдиною теорією поля. По суті це теорія (сукупність рівнянь), що описує єдиним чином всі існуючі взаємодії і елементарні частинки. Тобто рівняння єдиної теорії повинні описати загальні властивості взаємодій і частинок, відтіняючи, проте, і їх відмінність. В цьому понятті є два аспекти: 1) єдина взаємодія повинна характеризуватися загальною константою або сукупністю загальних констант; 2) взаємодія повинна відповідати єдиному типу симетрії, який і характеризує спільність властивостей системи різних частинок. На математичній мові подібна спільність відповідає загальній симетрії або групі перетворень, відносно якої є інваріантними рівняння єдиної теорії поля. Розглянемо по черзі обидва аспекти єдиної теорії.

8.1 Єдина константа

З першого погляду здається, що сама постановка питання про єдину константу для всіх фундаментальних взаємодій є абсурдною. Проте такий висновок неправильним, якщо пригадати (див. табл. 1), що сталі взаємодій α - є константами, що залежать від маси m (імпульсу) обмінних частинок.

Константи фундаментальних взаємодій α залежать від m різною мірою. Так, стала електромагнітної взаємодії α_e залежить від m дуже слабко (рис.14 а), і тому цією залежністю, як правило, нехтують, вважаючи, що $\alpha_e(m) \sim const$. Слід відмітити, що через специфічності слабкої взаємодії (вона переноситься двома сортами частинок, що мають різну масу) її характеризують двома константами взаємодії. Характер залежності цих констант від маси зображений на рис. 14 б.

Із зіставлення різних сталих можна розрахувати значення характеристичних мас $m_{\omega e}$, $m_{\omega es}$, $m_{\omega esg}$ і відповідних їм енергій, при

яких відбудеться об'єднання констант. Ці величини наведені на

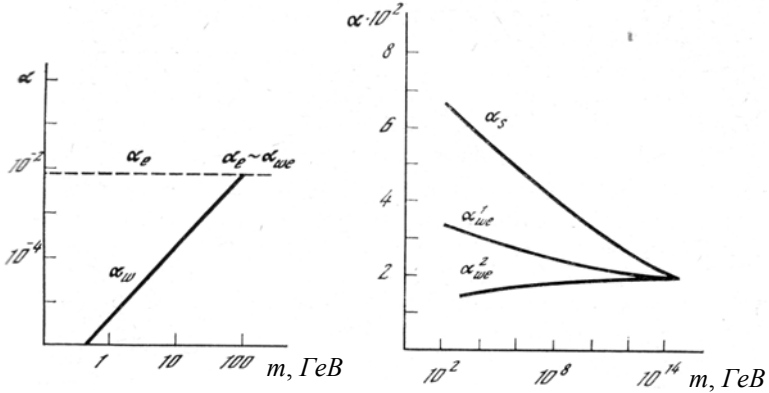


Рисунок 14 - Схема залежності констант електромагнітної α_e слабкої α_w та сильної α_s взаємодій від маси частинки переносника

рис. 15. Оскільки найменше значення об'єднуючої маси належить до сукупності слабкої і електромагнітної взаємодій ($m \sim 100$ GeV), створення такої теорії природно почати саме з їх об'єднання. Ця задача у наш час фізиками розв'язана.

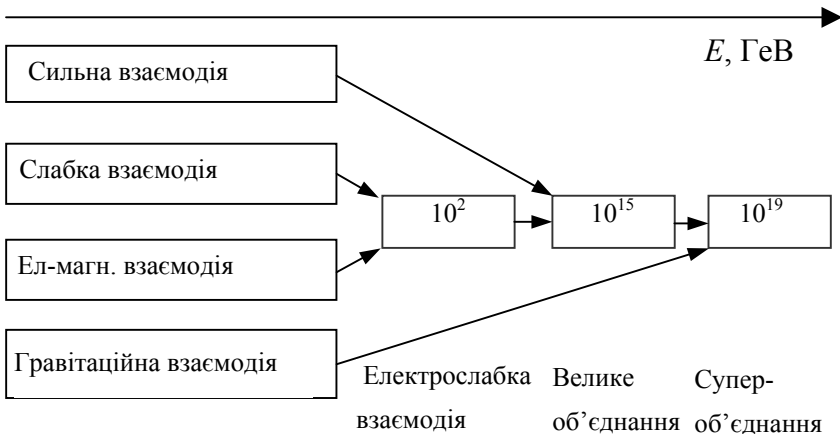


Рисунок 15 – Енергії, при яких відбувається об'єднання

фундаментальних взаємодій

На шляху об'єднання сильної і електрослабкої взаємодій є дуже серйозні труднощі, які пов'язані з наступним. Наявність кольору у глюонів приводить до взаємодії між ними і, отже, до кардинальної відмінності рівнянь квантової електродинаміки і квантової хромодинаміки. Електромагнітні рівняння, як правило, лінійні, в той самий час рівняння квантової хромодинаміки принципово нелінійні. Остання обставина істотно ускладнює їх розв'язок. Зокрема, проблема невилітання кварків пов'язана саме з нелінійністю рівнянь квантової хромодинаміки, що описують взаємодію кварків.

Найважче включити у загальну теорію гравітаційну взаємодію. Це обумовлено тим, що спеціальна теорія відносності описує цю взаємодію геометрично, в той час як теорії інших взаємодій є польовими.

8.2 Єдиний тип симетрії

У природі існують різні типи симетрії: геометричні, дзеркальні, негеометричні. Серед негеометричних є так звані *калібрувальні симетрії*. Калібрувальні симетрії мають абстрактний характер і безпосередньо не фіксуються. Вони пов'язані із зміною відліку рівня, масштабу або значення деякої фізичної величини. Система має калібрувальну симетрію, якщо її природа залишається незмінною при такого роду перетвореннях. Це означає, що хвильова функція, яка визначає поле, повинна бути інваріантна відносно перетворень $\psi' \rightarrow \psi \exp(ia)$, де i – уявна одиниця, a – деяка стала.

Калібрувальні перетворення можуть бути глобальними і локальними. Калібрувальні перетворення, що змінюються від точки до точки, відомі під назвою "локальних калібрувальних перетворень". В природі існує цілий ряд локальних калібрувальних симетрій і необхідне відповідне число полів для компенсації цих калібрувальних перетворень. Силкові поля частинок переносників можна розглядати як засіб, за допомогою якого в природі створюються властиві їй локальні калібрувальні симетрії. Значення концепції калібрувальної симетрії полягає в тому, що завдяки їй теоретично моделюються всі чотири фундаментальні взаємодії, що спостерігаються у природі. Всі взаємодії можна розглядати як калібрувальні поля.

Ідея об'єднання сил у природі базується на двох постулатах: 1) існує єдиний тип симетрії взаємодії; 2) існує єдиний тип симетрії, що характеризує фундаментальні елементарні частинки.

Зупинимося спочатку на першому питанні. Раніше наводились приклади симетрії - геометричної і внутрішньої. Проте геометричні симетрії визначають лише закони збереження енергії, імпульсу і моменту, тобто загальні закони, справедливі для будь-яких динамічних рівнянь, в цьому значенні вони ніяк не сприяють пошукам рівнянь єдиної теорії. Істотно більшу обмежуючу роль відіграють внутрішні квантові числа. Вже згадувалося, що квантові числа обмінних частинок визначають характер взаємодії. Проте при такому підході створюється враження ізольованості взаємодій, оскільки квантові числа обмінних частинок здаються дуже різними. Це правильно лише з однією обмовкою: спіни обмінних частинок трьох взаємодій однакові і дорівнюють одиниці. Ця обставина і є та спільність, яка сприяє об'єднанню. Універсальність калібрувальної інваріантності - одна з основ об'єднання взаємодій.

Друга основа пов'язана з узагальненням властивостей фундаментальних елементарних частинок. Під фундаментальними (істинно елементарними) частинками розуміють об'єкти, з яких складається вся решта елементарних частинок. Зрозуміло, що такими частинками повинні бути ферміони. Дійсно, з частинок з напівцілим спіном можна утворити бозони з цілим спіном ($1/2+1/2=1$), але неможливо з бозонів скласти ферміони ($1+1=2$). Протяжні частинки теж не можуть бути фундаментальними частинками.

Виявляється, під визначення фундаментальних частинок потрапляє їх дуже невелика кількість. До таких частинок відносять перш за все лептони і, можливо, кварки. Елементарність лептонів впливає з експериментальних даних, які свідчать, що розміри електронів і мюонів $<10^{-15}$ см, і теоретичних міркувань. Дійсно, квантова електродинаміка - теорія, що описує поведінку заряджених лептонів, базується на уявленні про їх точковість і при цьому чудово узгоджується з експериментом.

Більш проблематичне допущення про фундаментальність кварків. Зрозуміло, виміряти надійно розміри кварків

неможливо. Проте поки що немає експериментів, які суперечать їх точковості. Та обставина, що всі адрони складаються з кварків, - серйозний аргумент на користь їх «фундаментальності».

Отже, постулюється, що об'єднання повинне здійснюватися на основі лептонів і кварків. Електрослабка взаємодія не містить сильної. Тому таке об'єднання повинно включати лише лептони. Найпростіший варіант об'єднання - припущення, що кожний лептон і відповідне йому нейтрино утворюють аналог ізотопічного сімейства.

Складнішим є об'єднання обмінних частинок. Потрібно (в рамках електрослабкої взаємодії) об'єднати фотон, переносник електромагнітної взаємодії і важкі бозони (з масою $m_{\omega e} \sim \sim 100$ ГеВ), що переносять слабку взаємодію. Цю задачу успішно розв'язали Вайнберг, Глешоу і Салам, за що і одержали Нобелівську премію 1979 року.

У цій теорії існує чотири поля: електромагнітне поле і три поля, що відповідають слабкій взаємодії. Крім того, введено стале на всьому просторі скалярне поле (т.зв. поле Хігса), з яким частинки взаємодіють по-різному, що і визначає відмінність їх мас. Кванти скалярного поля є новими елементарними частинками з нульовим спіном. Їх називають хігсовськими (на ім'я фізика П.Хігса, що припустив їх існування). Число хігсовських бозонів може досягати декількох десятків. На досліді такі бозони досі не знайдені, хоча за оцінками, зробленими у 2001 році, їх маса повинна складати 114,4-196 ГеВ. Ці енергії цілком досяжні для сучасних прискорювачів. Спостереження бозона Хігса (чи бозонів Хігса!) дасть можливість вважати Стандартну модель завершеною теорією.

З теорії електрослабкої взаємодії випливає, що при енергіях, які перевищують 100 ГеВ (енергія W - і Z -бозонів, які переносять слабку взаємодію), слабкі та електромагнітні сили неможливо розрізнити (рис. 12). Симетрія між силами спонтанно порушується при енергіях, які ми спостерігаємо у повсякденному житті, і відновлюється при переході до енергій вище 100 ГеВ ($r < 10^{18}$ м). Це явище можна розглядати як деякий фазовий перехід.

У процесі порушення симетрії W - і Z - бозони захоплюють частинки Хігса, в результаті чого набирають маси. Відмінність властивостей електромагнітної і слабкої взаємодій пояснюється особливостями характеристик їх частинок

переносників. Якщо до фазового переходу обидві взаємодії були близькими за величиною, порушення симетрії спричиняє різке ослаблення слабкої взаємодії, оскільки її переносники W і Z частинки є дуже масивними.

Таким чином, у сучасній схемі електрослабкої взаємодії при малих енергіях електромагнітна взаємодія переноситься фотоном; слабка - W^{\pm} і Z -бозонами. При великих масах (енергіях) існує єдина взаємодія, яка передається усіма чотирма частинками.

Проміжні бозони були знайдені у 1982 –1983 роках двома групами фізиків у ЦЕРНі. Дослід проводився на протон-антипротонному колайдері - прискорювачі, в якому взаємодіють зустрічні пучки протонів і антипротонів, кожний з яких прискорювався до енергії 270 ГеВ. Було встановлено, що маса W^{\pm} - бозонів дорівнює $80,22 \pm 0,26$ ГеВ, а Z^0 - бозона $91,187 \pm 0,007$ ГеВ, ці величини добре узгоджуються з прогнозами теорії (нагадаємо, що маса нуклона дорівнює приблизно 1 ГеВ).

Проміжні бозони - нестабільні частинки, їх час життя складає всього $3 \cdot 10^{-25}$ с. Не дивлячись на це, їх народження надійно встановлюється за природою і енергією продуктів розпаду.

Оскільки бета-розпад відбувається за рахунок слабкої взаємодії, в ньому повинен брати участь проміжний бозон. Відповідно до цього, наприклад, розпад нейтрона ($n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$) насправді є двохетапним процесом: $n \rightarrow p + W^{-}$ потім $W^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e$

Теорії електрослабкої взаємодії і квантової хромодинаміки стали фундаментом сучасної Стандартної моделі класифікації суб'ядерних частинок. У той самий час вона не дає відповіді на цілий ряд питань, що виникають перед ученими. Крім того, вона не відрізняється внутрішньою стрункістю і симетрією, як того вимагає ідеальна фізична теорія. Так, Стандартна модель містить близько двох десятків сталих, у тому числі значення маси частинок. Всі ці константи не можна визначити за допомогою теоретичних розрахунків, їх треба вимірювати експериментальним шляхом. Стандартна модель не дає відповіді на питання, чому більшість елементарних частинок мають масу. Незрозуміло також, чому в

природі існує декілька фундаментальних взаємодій, що різко відрізняються за образом дії та інтенсивністю.

Останнім часом було одержано і ряд експериментальних підтверджень того, що Стандартна модель є неповною. Так, в лютому 2001 року сенсаційна новина надійшла із стін Брукхейвенської лабораторії (США). В нагромаджувальному кільці прискорювача вдалося розігнати мюони майже до світлової швидкості і, пропустивши їх крізь інтенсивне магнітне поле, виміряти магнітний момент мюонів з небаченою раніше точністю. Під час експерименту в Брукхейвене виявилось, що величина магнітного моменту є на 0,0004 відсотки вищою, ніж це одержано з рівнянь Стандартної моделі. Для пояснення цього факту була висунута гіпотеза, що на поведінку мюонів впливають якісь не відкриті поки що елементарні частинки, відсутні в Стандартній моделі.

Недавно вчені, що працюють на детекторі нейтрино SNO (Канада, штат Онтаріо), показали, що нейтрино, що виникають в процесі термоядерної реакції на Сонці, по дорозі до Землі втрачають свою ідентичність, тобто нейтрино різних поколінь переходять одне в інше. Цей факт, як і наявність у нейтрино маси спокою ($5 \cdot 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \cdot 10^{-3} eB^2$ де $\Delta m^2 = (m_2^2 - m_1^2)$ тут $m_{1,2}$ - маси нейтрино різного сорту; $m_\nu < (1-20) eB$ - хай і дуже малої, але відмінної від нуля, - завдає сильного удару по Стандартній моделі суб'ядерних частинок. Згідно з нею взаємні перетворення трьох різновидів нейтрино неможливі, і маси спокою у цих частинок бути не може.

Щоб дати відповіді на питання, пов'язані з новими експериментами, потрібно вдатися до нових гіпотез. На черзі стало створення теорії Великого об'єднання, ідея якого полягає в тому, що сильна, слабка і електромагнітна взаємодії є різними проявами однієї фундаментальної взаємодії. Отже, в єдину групу треба внести лептони і кварки, а також частинки - переносники відповідних взаємодій.

8.3 Велике об'єднання

В 70-90 -ті роки 20 сторіччя було розроблено декілька конкуруючих між собою теорій Великого об'єднання. Найбільш рання з них запропонована Джорджи і Глешоу у 1974 році. Більшість цих теорій є калібрувальними і базуються на використанні групи симетрії $SU(5)$.

З фізичної точки зору всі варіанти теорії Великого об'єднання базуються на одній і тій самій ідеї. Якщо електрослабка і сильна взаємодії насправді є лише двома сторонами єдиної взаємодії, то останній також повинно відповідати калібрувальне поле з деякою складною симетрією. Вона повинна бути достатньо загальною, здатною охопити всі калібрувальні симетрії, що містяться і в квантовій хромодинаміці і в теорії електрослабкої взаємодії. Пошук такої симетрії - головне завдання на шляху створення єдиної теорії сильної і електрослабкої взаємодії. Існують різні підходи, що породжують конкуруючі варіанти теорії Великого об'єднання, проте всі ці гіпотетичні варіанти мають ряд загальних особливостей.

По - перше, у всіх гіпотезах кварки і лептони - носії сильної і електрослабкої взаємодії - входять до єдиної теоретичної схеми, в той час як дотепер вони розглядалися як абсолютно різні об'єкти.

По - друге, залучення абстрактних калібрувальних симетрій приводить до відкриття нових типів полів, що характеризуються новими властивостями, наприклад, здатністю перетворювати кварки на лептони.

Навіть в найпростіших схемах великого об'єднання, крім чотирьох частинок, що переносять електрослабку взаємодію, і восьми глюонів, що переносять сильну, повинні існувати 12 надважких X і Y бозонів з масою $m_{\omega es} \sim 10^{15}$ GeV і спіном, що дорівнює 0, які переносять одночасно слабку, електромагнітну і сильну взаємодії. Кожне з X і Y полів набуває трьох значень кольорового заряду і має електричні заряди, що дорівнюють $\frac{4}{3}e$ і

$\frac{1}{3}e$ відповідно. Надважкі векторні бозони X і Y спричиняють перехід кварків і лептонів один в інший, тому їх ще називають лепто-кварками.

Енергія, необхідна для прямої перевірки теорії Великого об'єднання шляхом реакцій між частинками така велика ($\sim 10^{15}$ GeV), що навряд чи буде досягнута на прискорювачах в осяжний час. Найбільш крупним електрон-позитронним колайдером у наш час є LEP (Large Electron-Positron Collider) лабораторії ЦЕРН, який розташований на території відразу двох країн - Швейцарії і Франції. Його коло складає 27 км, і в даний час він працює на енергії центра мас частинок, що стикаються, 200 GeV. Ця цифра і є межею для циркулярних електронно-позитронних колайдерів.

У випадку прискорення протонів можна досягнути значно більших енергій. У 2006 році в тому самому тунелі, де зараз розташований LEP, почне працювати протонний колайдер LHC, розрахований на енергію 14 TeV (в системі центра мас). Проте це ще не межа - циркулярні протонні машини можна у принципі створювати і на енергії 100-1000 TeV. Тому технічно можливо створення ще одного протонного суперколайдера. Зараз ця ідея перебуває на стадії попереднього обговорення, "кодова назва" майбутньої машини - VLHC (Very Large Hadron Collider), але якщо вона коли-небудь і почне працювати, то не раніше, ніж через 20-30 років.

Проте є спосіб непрямой перевірки теорії Великого об'єднання. Справа у тому, що наслідком кварк-лептонної взаємодії є існування процесів, які йдуть з незбереженням баріонного і лептонного зарядів. Це, в свою чергу, може привести до розпаду протона.

У Всесвіті існують дві стабільні частинки з масою, відмінною від нуля: електрон і протон. Чому не розпадається електрон, зрозуміло. Електрон – найлегша заряджена частинка. Всі більш легкі частинки (фотон, нейтрино) електронейтральні. Таким чином, розпаду електрона перешкоджає закон збереження електричного заряду. А чому не розпадається протон, незрозуміло. Існує багато потенційних каналів розпаду протона (наприклад, на піон і нейтрино), але експериментально вони не спостерігаються. Щоб сумістити цей факт з правилом «все, що може відбуватися у світі елементарних частинок, відбувається», фізики винайшли закон збереження *баріонного* заряду. Заборона порушення закону збереження цього заряду «пояснює» стабільність протона.

Закон збереження баріонного заряду був введений за аналогією із законом збереження електричного заряду. Але електричний заряд, крім того, що він є величиною, що зберігається, несе і іншу найважливішу функцію. Електричний заряд - кількісна міра електромагнітної взаємодії. Баріонний заряд цю функцію не виконує. З великим ступенем точності на досліді вдалося показати непричетність баріонного заряду до далекодійних взаємодій, тому виникли сумніви відносно аналогії між електричним і баріонним зарядами. Це й обумовило сумніви вчених відносно стабільності протона.

Нестабільність протона (якщо вона є) вкрай мала. Теоретичні оцінки часу життя протона у різних моделях дають значення 10^{30} - 10^{32} років (відзначимо, що час існування Всесвіту порядку 10^{10} років). Такий великий час життя не виключає можливості експериментальної перевірки прогнозу теорії. Якщо час життя складає 10^{30} років, то в одному кубічному метрі води повинен протягом року розпадатися один протон, сучасна експериментальна техніка дозволяє зареєструвати такі події. Але поки що знайти розпад протона не вдалося. З останніх експериментальних даних випливає, що час життя протона перевищує 10^{32} років. В той же час спроби зареєструвати розпад протона продовжуються, оскільки виявлення нестабільності протона стало б остаточним підтвердженням теорії Великого об'єднання

Деякі варіанти теорії Великого об'єднання передбачають існування дуже екзотичних частинок, наприклад, монополя Дірака, носія магнітного заряду. Не беручи участі у взаємодіях, монополь може індукувати процеси, які проходять з порушенням баріонного заряду, тобто є своєрідним каталізатором. Наприклад, можливі такі процеси $p + \text{монополь} \rightarrow e^+ + \text{мезони} + \text{монополь}$. Це приводить до того, що монополь стає "пожирачем" протонної матерії і його досить легко зафіксувати за випромінюванням вторинних частинок, які при цьому утворюються. Але інтенсивні пошуки монополя Дірака, що проводяться у багатьох лабораторіях світу на протягом багатьох років, позитивного результату поки що не принесли.

Ще однією областю перевірки теорій Великого об'єднання є космологія, оскільки без неї неможливо описати ранню стадію еволюції Всесвіту, коли температура первинної плазми досягала

10²⁷ К. Саме в таких умовах могли народжуватися і анігілювати надважкі Х- і У-бозони.

8.4 Супероб'єднання

Теоретичні схеми, в рамках яких об'єднуються всі відомі типи взаємодій (сильна, слабка, електромагнітна і гравітаційна), називаються моделями суперсиметрії.

Об'єднуючи бозони і ферміони, суперсиметрія зводить в єдине сімейство частинки з різними спінами. Частинки, одні з яких мають спін 0, інші $-1/2$, 1 і, що особливо важливо, $3/2$, можна об'єднати так, що сімейство в цілому буде суперсиметричним. Елементарні частинки зі спіном $3/2$ поки що невідомі (хоча комбінація з трьох кварків може мати сумарний спін $3/2$), тому передбачення такої частинки - одна з важливих особливостей теорії суперсиметрії, яка дозволяє її перевірити.

Опис гравітації на мові суперсиметрії отримав назву *супергравітації*. Від звичайної гравітації супергравітація відрізняється тим, що гравітон тут вже не єдиний переносник гравітаційної взаємодії. Переносниками виступає ціле сімейство частинок суперсиметрії, у тому числі загадкові частинки зі спіном $3/2$, які фізики назвали "гравітіно". Подібні суперсиметричні партнери повинні мати всі ферміони. Отже, теоретики роблять висновок, що у кожної матеріальної частинки є свій двійник суперсиметрії - якась силова частинка, і відповідно у кожної силовій частинки є матеріальний двійник суперсиметрії. Це означає, що у Всесвіті повинно бути принаймні удвічі більше різновидів частинок, ніж відомо поки що дослідникам. Ці частинки (суперчастинки) суперсиметрії ще потрібно відкрити, оскільки їх маса є більшою ніж 100-1000 ГеВ. Проте вчені вже давно дають їм імена. Так, в пару до електрона підбрали селектрон, в пару до мюона - смюон, кварки доповнили скварками, а фотон суперсиметрії назвали «фотіно».

Згідно з теорією супергравітації найлегша суперчастинка повинна бути стабільною. Отже, таємна темна матерія Всесвіту [10] частково може складатися саме з таких частинок. Можливо фізика суб'ядерних частинок знаходиться на порозі найважливіших

відкриттів, які можуть зіграти вирішальну роль в створенні єдиної теорії матерії і її фундаментальних взаємодій.

Детальна структура сімейства суперсиметричних частинок залежить від математичного представлення суперсиметрії, якому теоретик віддає перевагу. Найплідніше уявлення називається супергравітацією $N = 8$. В ньому розглядається сімейство частинок значних розмірів: 70 частинок зі спіном 0, 56 - із спіном S ; 28 - зі спіном 1 і 8 - зі спіном $3/2$, а також єдиний гравітон зі спіном 2. Всі ці частинки з'єднані єдиною суперсилою при колосальній енергії 10^{19} ГеВ, якій відповідає температура $T=10^{32}$ К, радіус $r=10^{-33}$ см і густина речовини $\rho = 10^{94}$ г/см³ (планківські параметри!).

Виникає цікаве питання: чи можна ототожнити всі ці частинки з відомими в природі, тобто з кварками, лептонами і переносниками взаємодій? Якщо можна, то вчені одержать у своє розпорядження єдину теорію природи, яка не тільки вміщує всі частинки речовини в одне суперсімейство, але і "поєднує" всі переносники взаємодій, тим самим об'єднуючи їх. Таким чином, супергравітація створює основу для повного об'єднання, в рамках якого весь світ управляється єдиною суперсилою. Ця суперсила предстає перед нами різними гранями: то як електромагнітна взаємодія, що переноситься фотонами, то як сильна взаємодія, що переноситься глюонами, і т. ін., але всі ці грані зв'язані між собою суперсиметрією.

Теорію, яка покликана об'єднати гравітаційну взаємодію з іншими, називають **супероб'єднанням** (або **надвеликим об'єднанням**). Вона повинна охопити всі чотири взаємодії одночасно. Хоча поки що рано говорити про її результати, але сьогодні фізики вважають, що цю теорію можна створити на основі *теорії струн*. Ця нова теорія ґрунтується на введенні протяжних мікрооб'єктів, які назвали *струнами*, вони є просторово одновимірними відрізками з розміром планківської довжини 10^{-33} см.

Ця теорія виникла в результаті об'єднання квантової теорії із загальною теорією відносності. Тут струна замінює частинку або в загальному випадку будь-який локалізований в просторі мікрооб'єкт. В теорії *суперструн* передбачається, що всі елементарні частинки, які відомі сьогодні або будуть відкриті в майбутньому, є певними збудженими станами струни, що коливається у багатовимірному (10-11 - вимірному) просторі. Тільки три з цих вимірів

виявляються в нашому світі, а інші скомпактувалися (скрутилися) до масштабу $r=10^{-33}$ см (знову планківська довжина!) Поняття струни виключає точкові уявлення про мікрооб'єкти із структури мікросвіту і зводить фізику до геометрії. Тим самим простір-час стає найфундаментальнішим поняттям у фізиці.

Теорія суперструн приводить також до цілого ряду дуже нетривіальних наслідків. Наприклад, передбачається існування частинок, що рухаються з надсвітловими швидкостями, які називаються *тахіонами*.

Проте все це вельми попередні теоретичні побудови. На шляху об'єднання гравітації з рештою фундаментальних взаємодій поки що дуже багато невирішених проблем.

9 ФІЗИКА ЧАСТИНОК І КОСМОЛОГІЯ

Сучасні космологічні моделі базуються на останніх досягненнях фізики суб'ядерних частинок: теоріях великого, надвеликого об'єднання та суперструн і є квантовими. В той же час космологія дозволяє одержувати відомості про частинки і процеси, енергія яких є недоступною для сучасних прискорювачів. У космічному промінні, наприклад, зареєстровані частинки з енергією, що сягає $E = 3 \cdot 10^{20}$ eV у лабораторній системі відліку (протон з такою енергією при зштовхуванні з нуклоном, що знаходиться у стані спокою у системі центру мас має енергію $E \sim 800$ TeV, що відповідає їх зближенню на відстані $l = 10^{-20}$ см).

Перетин об'єктів дослідження космології, яка вивчає явища космічних масштабів, з фізикою високих енергій, яка досліджує властивості речовини на гранично малих відстанях, є вказівкою на присутність глибинних взаємозв'язків між нескінченно великим і нескінченно малим. Розвиток цього взаємозв'язку схематично проілюстрований на рис. 16 [3].

Сучасні наукові теорії свідчать, що структура Всесвіту визначається значеннями фундаментальних сталих взаємодії і параметрами стабільних елементарних частинок [5, 9]. В той же час взаємодія частинок при надвеликих енергіях $E > 10^{15}$ GeV може стати причиною народження нового Всесвіту [10].

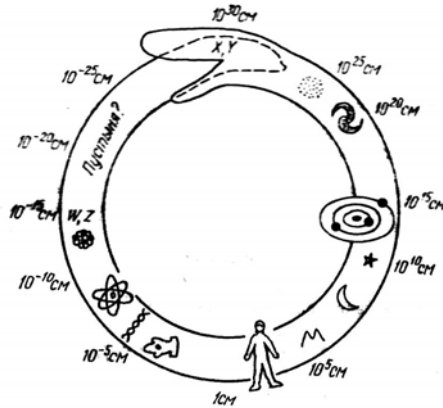


Рисунок 16 - Зв'язок між мега- та мікросвітами у природі

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Концепции современного естествознания / Под ред. В.Н. Лавриненко, В.П. Ратникова. - М.: Культура и спорт: ЮНИТИ, 1997.- 325 с.

2. Грушевицкая Т.Г., Садохин А.П. Концепции современного естествознания. - М.:Высшая школа, 1998.- 278 с.

3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики: Справочник. Киев: Наукова думка, 1989.- 864 с.

4. Бухбиндер И.Л. Фундаментальные взаимодействия. Соровский общеобразовательный журнал.- 1997. - N 5.- С. 67-73.

5. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. - М.:Наука, 1984. -245 с.

6. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. -М.: Наука, 1988.

7. Славинский С.А. Фундаментальные частицы. Соровский общеобразовательный журнал. - 2001- Т.2, N 2. -С.62-68.

8. Девис П. Суперсила. - М.: Мир, 1989.- 320 с.

9. Ассовская А.С., Ложкин О.В. Барионы и эволюция Вселенной. Новое в жизни, науке, технике. Серия "Физическая" - М.:Знание, 1991. - №8.

10. Опанасюк А.С., Опанасюк Н.М. Конспект лекцій "Сучасна фізична картина світу". Частина 1. Мегасвіт. – Суми: Вид-

во Сум ДУ, 2002.- 51 с.

11. Гинзбург В.Л. О некоторых успехах физики и астрономии за последние три года. Успехи физических наук. - 2002.- Т.172, №2 – С.213-219.

12. Валь О., Королюк С., Мельничук С. Основи теорії відносності та космології.-Тернопіль:Підручники і посібники, 2003.- 336 с.