

КВАНТОВА ТА АТОМНА ФІЗИКА

20. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ*

Зміст**Елементарні частинки та їх класифікація**

1. Елементарні частинки та фізика високих енергій
2. Космічні промені
3. Основні частинки. Електрон
4. Спін, власний магнітний момент та статистика
5. Протон та нейтрон
6. Відкриття позитрона. Античастинки. Перетворення пари електрон-позитрон у γ -випромінювання і навпаки
7. Відкриття позитрона антипротона та антинейтрона
8. Нейтрино

Типи взаємодії та взаємоперетворювання частинок

9. Обмінна взаємодія. Мезони. Проміжні векторні бозони
10. Види взаємодії
11. Дивні частинки
12. Взаємні перетворення елементарних частинок. Закони збереження та симетрії в мікросвіті
13. Класифікація частинок

Кварки

14. Будова частинок. Кварки
15. Електрослабка взаємодія. Квантова хромодинаміка

1. Елементарні частинки та фізика високих енергій

До елементарних частинок належать внутріядерні частинки та такі, що з'являються в результаті їх перетворень при відповідних взаємодіях. Частинка вважається елементарною, якщо всі її властивості можуть бути пояснені без припущення про її складеність. Частинку можна вважати складною лише у випадку коли енергія зв'язку кожної складової значно менша її енергії спокою.

$$\epsilon_{0зв} \ll mc^2$$

Саме тому можна вважати, що ядро складається з нуклонів.

Термін «елементарна частинка» замінюють словом *мікрочастинка*, або *суб'ядерна частинка*.

Поняття елементарності носить умовний характер та історичну традиційність, так як в процесі вивчення частинок виявлялось і продовжує виявлятись, що деякі з них, що на певному етапі розвитку науки вважалися елементарними, насправді слід вважати складними.

Єдиним способом дослідження структури мікрочастинок, як і атомного ядра, є здійснення взаємодії між частинками, зондування, шляхом бомбардування одних іншими.

Для здійснення взаємодії на надзвичайно малих відстанях, частинки повинні мати дуже високу енергію.

За теорією відносності

$$E^2 - E_0^2 = p^2 c^2,$$

Якщо частинка має швидкість порівняну зі швидкістю світла ($v \sim c$), то енергією спокою E_0 можна знехтувати в порівнянні з повною енергією $E \gg E_0$, і вважати, що

$$E \approx pc$$

За співвідношенням невизначеності Гайзенберга для координати та імпульсу

$$\Delta p \Delta x \approx \hbar.$$

З попереднього $\Delta E \approx c \Delta p$, тому

$$\Delta E \Delta x \approx \hbar c.$$

Якщо проводити вимірювання в межах ядерних розмірів $\Delta x \approx 10^{-18}$ м, то лише неunikна невизначеність енергії становитиме

$$\Delta E \approx \frac{\hbar c}{\Delta x} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \approx 180 \text{ ГеВ}.$$

Це велетенське значення енергії, і зрозуміло, чому фізика елементарних частинок називається *фізикою високих енергій*.

Також зрозуміло, що розігнати частинки до таких енергій в лабораторних умовах вдалося не одразу, тому перші спостереження за зіткненнями частинок були зроблені при аналізі космічного випромінювання.

2. Космічні промені

Історія космічних променів почалась зі спроб пояснення причини втрати заряду ізольованим тілом в повітрі. Спроби пояснити іонізацію повітря радіоактивним випромінюванням землі не мали успіху, оскільки свинцеві екрани з боку землі не зменшували іонізацію. Крім того, як це виявив в 1912 р. австрійський фізик В.Гесс, зі збільшенням висоти над землею іонізація не зменшувалась, а посилювалась. Врешті прийшли до висновку, що джерелом іонізації є Космос.

До складу космічних променів входять кванти випромінювання та частинки: протони (90%), α -частинки (7%), та більш важкі ядра. Частинки з унікально великими енергіями біля 10^{30} еВ мають позагалактичне походження, частинки з енергією меншою 10^{10} еВ випромінюються Сонцем.

При попаданні в атмосферу, протони викликають утворення вторинних частинок, серед яких багато електронів та γ -квантів. Виникає атмосферна „злива” частинок.

Сліди частинок та наслідки взаємодії між ними, можна фіксувати за допомогою методу фотоємності та трекових камер.

3. Основні частинки. Електрон

Першою відкритою і вивченою частинкою став електрон. Електрони звільняються з речовини при термоелектронній та фотоелектронній емісії. Основним джерелом електронів в лабораторії є розжарена металева нитка вакуумної лампи.

Іншим джерелом електронів є емісія з радіоактивних ядер (β^- – радіоактивність).

Форма і розміри електрона не можуть бути чітко окресленими. З дослідів по розсіюванню високоенергетичних електронів на атомних ядрах можна встановити верхню межу електронного розміру. Якщо вважати електрон кулястим, то його максимальний діаметр становитиме 10^{-14} м.

Заряд електрона становить $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл (Міллікен, 1909 р.).

Відношення заряду електрона до його маси (питомий заряд) $e/m = 1,759 \cdot 10^{11}$ Кл / кг (А. Шустер, 1890; Е. Віхерт, 1896; Д. Д. Томсон, Ф. Ленард, 1897).

Маса електрона $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Досліди показують, що відношення заряду до маси залежить від швидкості електрона, що було пояснено як залежність маси електрона від його швидкості. Вважаючи масу константою, спостережувану залежність слід вважати залежністю від швидкості не маси, а імпульсу електрона, який в дійсності і вимірюється в дослідах.

За теорією відносності від швидкості залежить як просторова складова імпульсу частинки з масою спокою m

$$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m \vec{v} \gamma,$$

так і її енергія

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \gamma.$$

Енергія спокою частинки ($v = 0$)

$$E_0 = mc^2.$$

Останнє співвідношення показує, що масу частинок можна виражати в енергетичних одиницях, як це прийнято в фізиці елементарних частинок.

Обертаючись навколо ядра, електрон має *орбітальний механічний L та магнітний M моменти*:

$$L = mvr,$$

$$\vec{M} = -\frac{q}{2m} \vec{L}.$$

Значення моменту визначається *орбітальним квантовим числом l*, яке може набувати значення від 0 до $n - 1$, де n є головним квантовим числом. Головне квантове число визначає розмір електронної орбіталі, орбітальне квантове число визначає її форму.

В квантовій механіці

$$L = l\hbar,$$

де \hbar стала Планка розділена на 2π (позначення Дірака).

Виходить, що в основному стані $n = 1$ (електрон в К-оболонці) орбітальний момент імпульсу електрона рівний нулю, що суттєво протирічить теорії Бора. Це означає, що говорити про обертання електрона навколо ядра немає сенсу. Можна лише стверджувати, що існує однакова ймовірність перебування електрона в будь-якій точці сфери, що оточує ядро і має радіус, який відповідає головному квантовому числі.

4. Спін, власний магнітний момент та статистика

Досліди показують, що електрон нібито поводить себе, як кулька, що обертається навколо власної осі, подібно до дзиги, як це в 1921 р. вважав А. Комптон.

В 1922 р. О. Штерн та В.Герлах виявили роздвоєння пучка атомів в неоднорідному магнітному полі, що могло пояснюватись наявністю власного магнітного моменту у електронів та можливістю двох варіантів його орієнтації.

Дж. Юленбек та С. Гаудсміт в 1925 році пояснили тонке розщеплення спектральних ліній атомів різницею енергій електрона викликаною різною орієнтацією його власного механічного моменту величиною $\frac{\hbar}{2}$ і пов'язаного з осьовим обертанням. Проте, таке тлумачення одразу викликало різкі заперечення, оскільки уявлення про електрон, як тверду обертову кульку, протирічило теорії відносності.

Однак, сама наявність у електрона власного механічного та магнітного моментів не викликала заперечень. *Власний механічний момент був названий спіном* (від англ. to spin – крутитися). Початкова назва збереглася і після того, коли виявилось, що спін слід вважати внутрішньою властивістю частинки, так як його значення не можна пояснити механічним осьовим обертанням.

Проекція спіну на довільну вісь квантується, набуваючи лише певних значень

$$s_z = s \cos\theta = m_s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar.$$

Отже проекція цього вектора на довільну вісь умовного простору має всього два значення.

Вектор з такою властивістю називається *спінором*.

Власний магнітний момент пов'язаний зі спіном співвідношенням

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{m} \vec{s}.$$

Проекцію власного магнітного моменту на вісь

$$\mu_z = \frac{e\hbar}{2m}$$

називають магнетоном Бора.

Зважаючи на значення квантового числа m_s , кажуть, що електрон належить до частинок з половинним спіном.

За своїм спіном частинки поділяються на два класи: *бозони та ферміони*. Бозони мають цілий спін і описуються *статистикою Бозе-Ейнштейна*, яка не накладає обмежень на взаємні значення енергії частинок. Ферміони мають напівцілий спін і описуються *статистикою Фермі-Дірака*, в якій діє принцип Паулі, за яким не може існувати більше однієї частинки в даному стані.

Таким чином, при поясненні властивостей атомів, слід враховувати орбітальні та власні механічні та магнітні моменти електронів, які додаються за правилами додавання векторів та підлягають квантуванню.

5. Протон та нейтрон

Протони отримують іонізацією атомів водню. При зіткненні енергійного вільного електрона з атомом водню в газовому розряді цей електрон може вирвати інший електрон, зв'язаний з атомом водню. Можливість отримання протонів в результаті бомбардування атомів водню високоенергетичними електронами встановив в 1914 році Резерфорд. Він же отримав протони в 1919 р. при першій ядерній реакції, бомбардуючи атоми азоту α -частинками.

Моделюючи протон кулькою, з дослідів по зіткненню протонів можна оцінити умовний діаметр протона в межах $6 \cdot 10^{-15}$ м.

З електронейтральності атома водню випливає рівність і протилежність за знаком зарядів протона і електрона.

Питомий заряд протона

$$\frac{e}{m_p} = 9,58 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}},$$

звідси значення маси протона $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг, що становить 1836,15 електронних мас.

Механічний спін протона рівний електронному. Магнітний спін становить біля 1/600 магнітного спіну електрона.

Як вже згадувалось раніше, нейтрон був відкритий у 1932 році Д. Чедвіком в результаті аналізу ядерної реакції бомбардування берилію α -частинками.

В зв'язку з цим джерелом нейтронів може бути суміш полонію чи радію, як джерел α -частинок, з берилієм

Нейтрон є незарядженою частинкою з масою рівною 1938,68 електронних мас і розмірами рівними протонним.

Механічний спін нейтрона такий як протона, магнітний – менший протонного і напрямлений протилежно механічному.

6. Відкриття позитрона. Античастинки. Перетворення пари електрон-позитрон у γ -випромінювання і навпаки

Рівняння Шрьодінгера в початковій формі не задовольняло вимогам інваріантності відносно перетворень Лоренца. Проте в 1926 р. англійський фізик П. Дірак знайшов релятивістське квантовомеханічне рівняння для електрона, з якого випливало значення спіну і власного магнітного моменту.

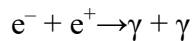
Однак, один з наслідків рівняння вимагав особливого пояснення. Рівняння містило формулу релятивістського зв'язку енергії та імпульсу частинки

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4,$$

з якого можна було зробити висновок про існування двох протилежних за знаком значень енергії частинки

$$E = \pm c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$$

Щоб не відкидати від'ємного значення енергії, Дірак припустив можливість існування для кожної частинки античастинки. Античастинка електрона – позитрон повинна мати протилежний до нього позитивний заряд, зберігаючи інші характеристики електрона. При зустрічі частинки і античастинки має відбуватися реакцію взаємного знищення (зникнення) з виділенням енергії. Зокрема, для пари електрон-антиелектрон можлива реакція



з виділенням енергії

$$\Delta E = 2m_e c^2.$$

Така реакція називається анігіляцією (від лат. nihil, «нігіл» – ніщо). Внаслідок наведеної реакції виділяється енергія 1,02 МеВ. З міркувань оборотності реакції допускається можливість одночасного народження пари частинка-античастинка при виділенні достатньої енергії, зокрема при зіткненні високоенергетичних частинок. Експериментально було виявлено, що електрон-позитронна пара виникає при пролітанні γ -кванта з енергією $h\nu > 1,02$ МеВ поблизу ядра.

«Море Дірака»

Вираз для енергії частинки допускає перехід її в стан з від'ємною енергією $\epsilon = \pm\sqrt{p^2 + m^2c^2}$. Дірак припустив, що всі енергетичні стани частинок з енергією $\epsilon \leq -mc^2$ повністю заповнені. Саме тому частинка-ферміон, яка підкоряється принципу заборони Паулі, маючи позитивну енергію, не може перейти в один з станів з негативною енергією, оскільки, згідно принципу Паулі в кожному стані може бути лише одна частинка-ферміон. Частинки, що заповнюють від'ємні енергетичні стани, утворюють *фізичний вакуум* – «море Дірака».

Якщо частинці зі значенням енергії $\epsilon < -mc^2$, надати достатньої позитивної енергії, то вона може перейти в стан з позитивною енергією і може бути зареєстрована приладами. Найменша енергія, при якій це стає можливим, є подвоєною енергією спокою частинки $\epsilon = 2mc^2$.

При виході електрона з від'ємною енергією, його місце залишається вакантним, утворюється «дірка», яка поводить себе, як позитивно заряджений електрон – позитрон. При виході іншої частинки – її античастинка.

Якщо частинка заповнює дірку енергія виділяється – відбувається анігіляція частинки і античастинки. Труднощі цієї гіпотези в тому, що потрібно припустити нескінченну вакуумну концентрацію частинок в даній точці, а, отже і нескінченно великий заряд, а також те, що не всі частинки підкоряються принципу Паулі.



7. Відкриття позитрона антипротона та антинейтрона

Теорія Дірака не викликала довіри у фізиків до тих пір, аж поки в 1932 році американський фізик К. Андерсон виявив позитрон в складі космічних променів. В камері Вільсона позитрон залишав такий же слід, як і електрон, що народився одночасно з ним, лише закручений в протилежну сторону.

З рівняння Дірака можна було зробити висновок, що античастинки повинні існувати у всіх частинок. Теоретичні передбачення виявились дійсними. В 1955 р. Еміліо Сегре та Оуен Чемберлен зі співробітниками при бомбардуванні мідної мішені протонами прискореними до 6 ГеВ на прискорювачі беватрон (Каліфорнійський університет, Берклі, США) відкрили *антипротон*. Сумарна енергія спокою пари протон-антипротон складає майже 2 ГеВ, проте вимоги закону збереження імпульсу піднімають енергетичний поріг

спільного народження цих частинок до 5,6 ГеВ. Саме тому можливість спостереження цього явища з'явилась лише після запуску в дію названого потужного прискорювача.

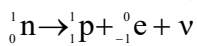
В 1956 р. О. Піччіоні та ін.на тому ж прискорювачі відкрили *антинейтрон*.

Навіть фотон в математичному сенсі повинен мати античастинку, проте його рівняння дозволяють не розрізняти фотон та його античастинку. *Фотон є античастинкою самому собі.*

8. Нейтрино

В 1931 році при аналізі спектру значень енергії електронів, що вилітають при β^- -розпаді радіоактивних ядер В. Паулі, для виконання балансу енергій, припустив, що недораховану після реакції енергію виносить утворювана при цьому частинка, яка за пропозицією Е. Фермі була названа *нейтрино* (італ. – нейтрончик).

Це припущення дозволило в подальшому пояснити енергетичний баланс при розпаді нейтрона на протон та електрон. Було встановлено, що в цій реакції має виникати антинейтрино.



В 1956 році Клайд Коуен (Cowan) та Фредерик Райлес здійснили дослід, що підтвердив гіпотезу Паулі і встановив реальність існування нейтрино. Цікавою є різниця між нейтрино і антинейтрино Спін нейтрино напрямлений протилежно його руху, а спін антинейтрино за рухом.

Було виявлено, що в реакціях взаємного перетворення нуклонів приймають участь електронне нейтрино, або його античастинка. Було відкрито, що існують також і *мюонне, а також таонне нейтрино з відповідними ним антинейтрино.*

9. Обмінна взаємодія. Мезони. Проміжні векторні бозони

Подальші відкриття були пов'язані з розвитком квантової електродинаміки, в основі якої лежала ідея обмінної взаємодії запропонована в 1928 р. В. Гайзенбергом та П. Діраком.

За цією теорією *електромагнітне поле має квантову природу (квантується). Квантами цього поля є фотони, які передають взаємодію між зарядженими частинками.* Таким чином *електромагнітна взаємодія заряджених частинок здійснюється шляхом обміну фотонами.* На основі схеми квантованих полів Гайзенберг з Паулі в 1929 р. сформулювали квантову електродинаміку. Процес взаємодії можна уявити так. Електрон систематично випромінює і поглинає фотони. Такий процес не порушує закони збереження енергії та імпульсу в зв'язку зі співвідношенням невизначеностей, яке допускає невизначеність значенні енергії у відповідності до мализни часу за який вона визначається

$$\Delta E \Delta t \approx \hbar.$$

Такі фотони називаються *віртуальними*.

Додаючи енергії зарядженій частинці можна віртуальні фотони перетворити в реальні.

Можна також оцінити радіус дії електромагнітних сил, врахувавши, що невизначеність енергії в процесі випромінювання та поглинання віртуального фотона рівна його енергії $\Delta E = mc^2$

$$r \approx c \Delta t = c \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{c \hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc}$$

Оскільки маса спокою фотона рівна нулю, радіус дії електромагнітних сил нескінченно великий.

В зв'язку з цим заряджену частинку слід уявляти в оточенні фотонної шуби.

Слід зауважити, що ця теорія, яка з вражаючою точністю описує взаємодію електронів, з меншим успіхом є застосовною до протонів.

В 1934 р. І.Є. Тамм разом з Д.І. Іваненко вперше вказали, що не тільки електромагнітній взаємодії, а й усім типам взаємодій, мають відповідати певні кванти – носії та передавачі цієї взаємодії. Передавачами ядерної взаємодії також мають бути відповідні кванти, при цьому розрахунки показують, що відомі на той час частинки фотон, електрон та нейтрино не можуть бути такими квантами.

В 1935 р. японський фізик Хідекі Юкава (1907 – 1981), посилаючись на роботу радянських фізиків, висунув ідею про існування частинок з масою проміжною між масами електронів та нуклонів – мезонів, як квантів поля ядерних сил та носіїв ядерної взаємодії обмінного характеру.

За радіусом дії ядерних сил (10^{-15} м) Юкава оцінив масу цих частинок, використовуючи вищенаведені міркування.

$$m \approx \frac{\hbar}{rc} \approx \frac{1,54 \cdot 10^{-34}}{10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 0,3 \cdot 10^{-27} \text{ (кг)} \approx 300 \text{ електронних мас.}$$

Гіпотеза Юкави спонукала експериментаторів до пошуків відповідних частинок. В 1938 році К. Андерсон і С. Недермейер фотографуючи космічні промені виявили сліди невідомих частинок з масою наближено рівною 200 електронних. Частинки дістали назву мезонів. Проте маса цих частинок не відповідала вимогам теорії, і, крім того вони легко проходили через свинцеву пластинку, що свідчило про відсутність очікуваної їх взаємодії з нуклонами.

Довелося чекати до 1947 року, коли англієць Сесіль Пауел та італієць Джузеппе Оккіаліні зі співробітниками, проявивши фотоемulsionні пластинки, опромінені космічними променями на великій висоті, виявив сліди частинок з масою, що відповідала теоретичній. Перші частинки отримали назву μ -мезонів, або μ юонів, останні – π -мезонів, або π іонів. Як виявилось, ці мезони існують в трьох видах: позитивні, негативні і нейтральні з відповідними античастинками. Саме π -мезон відіграє роль кванта поля ядерних сил, а μ -мезон, призначення якого не встановлено, виникає в результаті розпаду π -мезона. Існують позитивно і негативно заряджені μ -мезони з відповідними античастинками, нейтрального – не існує. Сам μ -мезон розпадається на електрон і пару специфічних μ юонних нейтрино-антинейтрино.

Було виявлено, що при анігіляції пари нуклон-антинуклон утворюється декілька нейтральних, або заряджених π -мезонів. Це може служити додатковим аргументом на користь того, що π -мезони є квантами поля ядерних сил, подібно до того, як фотони є квантами електромагнітного поля.

З'ясування обмінної сутності електромагнітної та сильної взаємодії спонукало до пошуку частинок, які можуть слугувати переносниками *слабкої взаємодії* (процеси розпаду, розсіювання, анігіляції). Радіус дії слабкої взаємодії досить малий, тому енергія та маси шуканих переносників мають бути значними. Автори ідеї С.Вайнберг, Глешоу, Салам (Нобелівська премія 1979 р.) теоретично передбачили для цих частинок маси 80-90 ГеВ. Такі частинки назвали *проміжними векторними бозонами* – W^+ , W^- та Z . Z -бозон за своїми властивостями, за виключенням маси, подібний до фотона. В 1983 р. ці частинки були виявлені експериментально. В зв'язку з тим, що вони мають спін, який пов'язаний з напрямком, їх назвали векторними.

Гіпотетичні переносники гравітаційної взаємодії, існування яких ще не має експериментального підтвердження, були названі *гравітонами*.

За сучасною моделлю будови суб'ядерних частинок, в своїй основі вони складаються з гіпотетичних *кварків*, переносниками взаємодії між якими є такі ж гіпотетичні *глюони* (від англ. *glue* – клей). Очевидно, в основі сильної взаємодії лежить не обмін віртуальними мезонами, а глюонами.

10. Види взаємодії

Відомі чотири види фундаментальних взаємодій: електромагнітна, гравітаційна, ядерна (сильна) та слабка.

Для кількісної характеристики інтенсивності різних взаємодій між частинками вводиться константа, пропорційна імовірності процесів, які йдуть в результаті взаємодії і яка рівна відношенню енергії взаємодії на елементарній довжині до характеристичної енергії. За елементарну довжину можна прийняти радіус дії обмінних сил, визначений на основі співвідношення Гайзенберга, який співпадає з комптонівською довжиною.

$$r = \hbar / mc$$

За константу електромагнітної взаємодії береться відношення енергії кулонівської взаємодії протонів на елементарній (компонівській) довжині до енергії спокою електрона.

$$g^2 = \frac{ke^2}{\hbar/mc} \frac{1}{mc^2} = \frac{ke^2}{\hbar c} = \alpha \approx \frac{1}{137}.$$

Отже, константою електромагнітної взаємодії є так звана стала тонкої структури α .

Щоб знайти константу взаємодії у інших випадках, формально вводять еквівалентні заряди ядерної, слабкої та гравітаційної взаємодії.

Для сильної (ядерної) взаємодії заряд-еквівалент q_n знаходиться з середньої енергії зв'язку на один нуклон $\epsilon_u \approx 10 \text{ MeV}$ і радіуса ядра $R_0 \approx 10^{-15} \text{ м}$.

$$kq_n^2/R_0 = \epsilon_u.$$

Тоді константа взаємодії

$$g^2 = \frac{kq_n^2}{\hbar c} = \frac{\epsilon_u R}{\hbar c} \approx 1$$

Для гравітаційної взаємодії заряд-еквівалент q_g знаходиться з порівняння зарядової і гравітаційної взаємодії протонів.

$$\frac{kq_g^2}{r} = \frac{Gm_p^2}{r}$$

$$g^2 = \frac{kq_g^2}{\hbar c} = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 6 \cdot 10^{-39}$$

Константа слабкої взаємодії виражається через сталу Фермі G_F /

Вид взаємодії	Переносники взаємодії (кванти силового поля)	Константа взаємодії	Радіус дії
1 Сильна (ядерні сили)	π -мезон, K-мезон	$g^2 \sim 14$ $g_K^2 \sim 1$	$\sim 10^{-15} \text{ м}$ $\sim 10^{-16} \text{ м}$
Загальна сильна (гіпотетично, за моделлю кварків)	8 глюонів (гіпотетично)	$g^2 \approx 10 - 17$	$\sim 10^{-15} \text{ м}$ $\sim 10^{-16} \text{ м}$
2 Електромагнітна	Фотон γ	$g^2 = \alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ стала тонкої структури	∞
3 Гравітаційна	Гравітон	$g^2 = \delta = 5,9 \cdot 10^{-39}$	∞
4 Слабка (розпадна)	Проміжні векторні бозони W^+ -бозон, W^- -бозон Z^0 -бозон	$g^2 = G_F^2 \frac{m^4 c^2}{h^2} = 10^{-10}$	$\sim 10^{-24} \text{ м}$

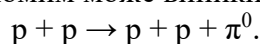
11. Дивні частинки

Відкриття інших груп частинок стало зовсім неочікуваним. Перша група частинок мала масу біля половини маси нуклона, та нульовий спін. Частинки отримали масу K (ка)-

мезонів (каонів). Були відкриті також частинки масивніші нуклонів – *гіперони*. Скоро ці частинки були отримані і на прискорювачах заряджених частинок. Всі вони виявились радіоактивними. Реакції їх виникнення мають час 10^{-23} с, який характеризує сильну взаємодію, а розпаду – 10^{-10} с, який характеризує слабку. До цього вважалося, що взаємодії мають властивість оборотності, передбачалося, що народження і розпад відбуваються в результаті однотипної взаємодії. В зв'язку з цим відкриті частинки назвали *дивними*. Для пояснення явища теоретики припустили, що ці частинки народжуються групами по дві і більше. Такий процес називається *спільним народженням*.

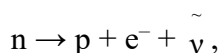
12. Взаємні перетворення елементарних частинок. Закони збереження та симетрії в мікросвіті

Найбільш характерною властивістю елементарних частинок є їх здатність народжуватись і взаємно перетворюватись одна в одну при зіткненнях. Наприклад при зіткненні рухомого протона з нерухомим може виникнути нейтральний π -мезон (піон)

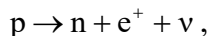


Маса піона в енергетичних одиницях 135 MeV, що свідчить про необхідність розгону протона мінімум до цієї енергії. Але, якщо врахувати, що згідно закону збереження імпульсу частина енергії має перейти в кінетичну енергію продуктів реакції, то мінімальна енергія протона, достатня для реакції, сягне 200 MeV.

Слід зауважити, що розпад частинок та їх взаємоперетворюваність не означає, що вони складаються з продуктів реакції. Так розпад нейтрона за схемою



не означає, що нейтрон складається з протона, електрона та антинейтрино, а лише те, що ці частинки народжуються при розпаді нейтрона. Нейтрон в тій же мірі елементарний, що й протон. В зв'язку з цим можна нагадати і реакцію розпаду протона в ядрі



яка вочевидь не може тлумачитись, як свідчення складності протона.

Закони збереження накладають обмеження на реакції розпаду частинок.

Закон збереження електричного заряду, який у випадку взаємодії частинок набуває форми *закону збереження зарядового числа*, обумовлює стабільність найлегшої зарядженої частинки – електрона, унеможливаючи її розпад на незаряджені частинки, наприклад, на γ -кванти та нейтрино.

Крім того, закон збереження енергії дозволяє розпад на більш легкі частинки, а так як заряджених частинок легших електрона не існує, то електрон взагалі не може розпадатися.

Оскільки взаємодія ядерних частинок не залежить від електричного заряду, то ця властивість та близькість мас дозволяє розглядати протон і нейтрон, як одну частинку, що знаходиться в двох зарядових станах – з електричним зарядом і без заряду (*зарядовий дуплет*). Ідея розглядати протон і нейтрон, як різні стани однієї частинки – нуклона, належить В. Гайзенбергу. В 1933 р. він запропонував для характеристики стану нуклона по аналогії зі спіном ввести квантове число *ізотопічний спін*, проекції якого на вісь в абстрактному просторі $I_z = \pm \frac{1}{2}$, де знак (+) відповідає протону (–) нейтрону. Ізотопічний спін об'єднує в групу (мультиплет) частинки з близькими масами і спільними властивостями, які розрізняються зарядом. Якщо кількість частинок в мультиплеті n , то

$$I_z = \frac{1}{2} (n - 1).$$

Три типи піонів утворюють зарядовий триплет з ізотопічним спіном рівним одиниці, а його проекції $I_z = 1; 0; -1$ відповідають зарядовим станам π^+, π^-, π^0 .

Для опису взаємодії частинок корисним є поняття *гіперзаряду* Y , рівного подвоєному середньому зарядові мультиплету в одиницях електронного заряду.

$$Y = 2\bar{Q}$$

Наприклад для триплету Σ -гіперонів (Σ^+ , Σ^- , Σ^0)

$$Y = 2 \frac{Q - Q + 0}{3} = 0$$

Для нуклона гіперзаряд $Y = 1$, антинуклона $Y = -1$. Для піона $Y = 0$.

При взаємодіях з малою енергією зберігається число нуклонів, але, при переході до реакцій з великими енергіями, досягнутими на прискорювачах, виявилось, що сумарне число нуклонів не зберігається, оскільки народжуються нові частинки – *гіперони*. Якщо *важким частинкам* нуклонам та гіперонам (*баріонам*) приписати певне *баріонне число* (*баріонний заряд*) $B = +1$ для частинок, $B = -1$ для їх античастинок, $B = 0$ для небаріонів, то для всіх процесів з участю баріонів та антибаріонів виконуватиметься *закон збереження баріонного заряду*. Такий закон забороняє, наприклад, розпад нуклона на легкі частинки, тобто знищення атомів, тому що баріонів легших за нуклони в природі немає.

Баріонний заряд аналогічний електричному (звідси назва). Подібно до того, як всі частинки мають електричний заряд рівний нулю, або електронному, так вони мають баріонний заряд рівний нулю, або нуклонному з відповідними знаками.

Ядерні взаємодії підкоряються *законам збереження сумарного ізотопічного спіну та гіперзаряду*. Ці закони не виконуються при слабких та електромагнітних взаємодіях.

Особливості протікання процесів з участю легких частинок – лептонів та антилептонів характеризуються *законом збереження лептонного заряду* (лептонного числа L), який для лептонів рівний $+1$, антилептонів -1 , і 0 для решти частинок.

Щоб пояснити заборону поодинокого народження дивних частинок в 1953-54р.р. М. Гелл-Манн та К. Нішіджіма ввели в розгляд *квантове число S – дивність*, сумарне значення якого мало зберігатися при сильних взаємодіях. Це число приписується лише *сильно взаємодіючим частинкам – мезонам та баріонам, і є різницею гіперзаряду та баріонного числа*

$$S = Y - B.$$

Квантові числа визначають можливі значення фізичних величин, що характеризують квантові системи, а також окремі елементарні частинки. В фізиці елементарних частинок

Рівняння квантової механіки передбачають різного виду симетрії, пов'язані з інваріантністю відносно певних перетворень.

З симетрією певного виду можна пов'язати закон збереження. Існує так звана теорема Е. Ньотер, яка стверджує: «Якщо властивості системи не змінюються від деякого перетворення параметрів стану системи, то цьому відповідає певний закон збереження». Теорія відносності за А. Пуанкаре повністю ґрунтується на ідеї лоренц-інваріантності.

Слід зауважити, що деякі, емпірично відкриті закони збереження, не мають достатньо глибокого пояснення, тому пошуки загального, достатньо переконливого для всіх, доведення наведеного твердження про зв'язок природної симетрії та законів збереження продовжуються.

Симетрію відносно зарядового спряження, тобто заміни частинок античастинками, яка виражає *закон збереження зарядової парності C* .

Симетрію відносно дзеркального відображення виражає *закон збереження просторової парності P* .

Якщо для хвильової функції, що описує стан системи $\Psi(x, y, z, t)$, при заміні $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$, яка називається *просторовою інверсією*, виконується $\Psi(-x, -y, -z, t) = \Psi(x, y, z, t)$, то така інваріантність і називається *просторовою парністю*.

Просторова інверсія здійснюється поворотом на розгорнутий кут однієї з осей, а також *дзеркальним відображенням*. Оскільки фізичні явища інваріантні відносно поворотів системи координат, то закони природи мають бути незмінними (інваріантними) відносно перетворення (операції) дзеркального відображення, тобто взаємної заміни правого та лівого.

Закон збереження часової парності T пов'язаний зі симетрією, що виражається незмінністю хвильової функції при заміні $t \rightarrow -t$ (оберненні часу). Ця симетрія означає, що процеси зі зростанням і зменшенням часу являють собою сукупність одних і тих же станів, і не можуть бути відрізнені.

Згідно певної властивості хвильової функції, що описує частинку, їй приписується відповідне число. Просторова парність виражається числом $P = \pm 1$. Знак (+) позначає позитивну внутрішню парність, знак (–) – негативну. Парність системи рівна добутку парностей окремих частинок.

В 1956 р. увагу відомих китайських вчених Ц. Лі та Ч. Янга, які працювали в Колумбійському університеті, привернула «загадка тау тета». Тау-мезон (таон) розпадався на три піони, що утворювали непарну групу, а тета-мезон на два піони, вже парної групи. При цьому решта властивостей мезонів були абсолютно однаковими, що свідчило про їх ідентичність. Це могло означати, що *при слабких взаємодіях просторова парність може не зберігатися*. Таке порушення парності мало бути пов'язане з неоднаковою ймовірністю випускання продуктів розпаду в протилежних напрямках відносно осі визначеної обертальними характеристиками (спіном). Вчені запропонували ідею перевірки, яка була здійснена Ву Цзянь-сун та її співробітниками. В проведеному досліді ядра радіоізоотопу $Co - 60$ орієнтувались з допомогою магнітного поля спінами в одному напрямку. Виявилось, що електрони випускаються переважно в напрямку протилежному спіновому, що свідчило про порушення парності.

В подальшому Ландау, Лі та Янг висунули гіпотезу, що будь-які взаємодії інваріантні відносно складного перетворення (інверсії CP), яке полягає в одночасній просторовій інверсії P і заміні частинок античастинками (операції зарядового спряження C). Таким чином для слабких взаємодій виконується закон збереження комбінованої парності.

В 1964 р. В.Фітч та Дж. Кронін, при вивченні розпаду нейтрального каона (K^0 – мезона), виявили порушення цього закону. Одночасно було виявлено два варіанти розпаду K_2^0 - мезона, що означало порушення T -парності. Таким чином симетрія явищ відносно обернення часу не виконується.

Існують теоретичні міркування, які стверджують, що виконується закон збереження комбінованої зарядової, просторової та часової парності – *CPT-теорема*. З цієї теореми, зокрема випливає, що маси, часи життя частинок та античастинок рівні, магнітні моменти відрізняються лише знаком, взаємодія з гравітаційним полем однакова (антигравітації не існує). На досліді не виявлено жодного порушення CPT -інваріантності.

Операція симетрії (перетворення)	Величина, що зберігається	Виражена властивість
1 Перенос в просторі (Трансляція, переміщення, зсув координати, зміна початку відліку координат)	Імпульс (p)	Однорідність простору
2 Перенос у часі (Переміщення в часі, зміна початку відліку часу)	Енергія (E, W)	Однорідність часу
3 Поворот в просторі (Поворот системи координат)	Момент імпульсу (L)	Ізотропність простору
4 Зміна початку відліку потенціалів електромагнітного поля (Калібрувальні перетворення)	Електричний заряд (q, Q)	Стабільність носіїв елементарного заряду
5 Інверсія заряду (Зарядове спряження, зарядове відображення)	Зарядова парність (C), проекція ізотопічного спіну (I_z), дивність (S)	Зарядова незалежність
6 Інверсія простору (Дзеркальне відображення)	Просторова парність (P)	Нерозрізнюваність правого і лівого
7 Інверсія часу (Обернення часу)	Часова парність (T)	Оборотність процесів

Є всі підстави вважати, що процеси, хід яких не протирічить законам збереження, можливі в природі. Якщо якийсь процес не відбувається, то слід шукати новий закон збереження, який тут порушується і забороняє цей процес. Оскільки не всі закони збереження вдалося пов'язати зі звичною просторово-часовою симетрією, то була висунута ідея внутрішніх симетрій, що виникають на основі перетворень особливих абстрактних, «внутрішніх» просторів.

Плющай І.І.

Пошуки закономірностей породжених симетрією таких просторів почалися зі спроб поєднання частинок в групи (мультиплети) за однаковими квантовими числами. Найбільшого успіху на цьому шляху досягли М.Гелл-Манн та І. Неєман, які для класифікації частинок використали сукупність (групу) перетворень *унітарної симетрії*, яка характеризує перетворення в тривимірному абстрактному комплексному просторі – SU(3) (S – special, англ., спеціальний; U – unitary, англ., унітарна; 3 – розмірність простору).

В 1961 році ці вчені запропонували систему об'єднання симетрій, яка обґрунтовувала існування супермультиплетів. Нова система отримала назву «*восьмеричний шлях*», оскільки вона оперувала вісьмома квантовими числами. Назва асоціювалась з висловлюванням Будди, який вчив, що існує «... шляхетна істина, яка веде до припинення страждань, шляхетний восьмеричний шлях: вірні погляди, вірні наміри, вірна мова, вірні дії, вірне життя, вірні зусилля, вірне спрямування розуму, вірне зосередження»

При аналізі супермультиплету, побудованого для баріонних резонансів з однаковим спіном та просторовою парністю і різними значеннями ізотопічного спіну ($I_z = 0; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$) та дивності ($S = 0; 1; -1$), було виявлено що крім відомих дев'яти частинок повинна існувати ще не виявлена частинка, оскільки за умов симетрії розглядувані частинки мають утворювати декаплет. Було передбачено характеристики цієї частинки, і в 1964 р. на Брукхейвському прискорювачі (США) таку частинку (Ω^- -гіперон) було виявлено.

13. Класифікація частинок

Характеристики мікрочастинок

1	Час життя	τ
2	Масове число	$M = \pm N$, кількість нуклонів (+), антинуклонів (-)
3	Зарядове число	$\pm Q$ – кількість електронних зарядів
4	Спін	$J = \pm \frac{1}{2}$ для ферміонів, $J = \pm 1$ для бозонів
5	Баріонний заряд	$B = \pm M$, (+) для частинок(-) для античастинок
6	Лептонний заряд	L_e, L_μ, L_τ
7	Гіперзаряд	$Y = \frac{2(Q_1 + \dots + Q_n)}{n}$, подвоєний середній заряд мультиплету з n частинок
8	Ізотопічний спін	$I = (n - 1) / 2$, для мультиплету з n частинок
9	Парність	C – зарядова, P – просторова, T – часова; CP, CPT – комбіновані
10	Дивність	$S = I - B$, різниця гіперзаряду і баріонного заряду
11	Чарівність	$c = \pm 1$
12	Краса	$b = \pm 1$
13	Правда	$t = \pm 1$

Класифікація частинок може проводитися за різними ознаками: масою, зарядом, типом взаємодії, закону збереження, тощо. Також частинки можна систематизувати на основі певних властивостей та зв'язків між ними за певними схемами.

На сучасний момент всі елементарні частинки розділяють на дві групи: адрони, які мають складну будову, і фундаментальні, які не мають складної будови і є істинно елементарними, найпростішими.

До фундаментальних частинок належать шість *лептонів* (гр. *λεπτός* – дрібний, тонкий), 18 кварків та 18 антикварків, а також переносники взаємодій – 8 глюонів, фотон та три бозони. У кожного лептона є антилептон, який має протилежний електричний та лептонний заряд. *Лептони* не приймають участі в сильних взаємодіях, а лише в електрослабких і є ферміонами (мають половинний спін). Вони є або абсолютно стабільними, або мають довгий час життя, поведуть себе як безструктурні об'єкти зі

Плющай І.І.

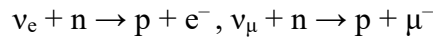
зникаюче малими розмірами. Наприклад, електрон не виявляє розмірів, і тим паче внутрішньої структури, навіть при зверхвисоких енергіях порядку 40 ГеВ, тобто впритул до відстаней $2 \cdot 10^{-18}$ м.

Сімейство лептонів		Частинки сімейства	Позначення	Лептонний заряд			Спін, \hbar	Маса MeV, $mc^2 =$	Середній час життя, с
				L_e	L_μ	L_τ			
1	Електронний дублет E	Електрон	e^-	+1	0	0	$\frac{1}{2}$	0,511	∞
		Електронне нейтрино	ν_e	+1	0	0	$\frac{1}{2}$	$<46 \cdot 10^{-6}$	∞
2	Мюонний дублет M	μ^- мюон	μ^-	0	+1	0	$\frac{1}{2}$	105,66	$2,2 \cdot 10^{-6}$
		Мюонне нейтрино	ν_μ	0	+1	0	$\frac{1}{2}$	$<0,25$	∞
3	Таонний дублет T	τ^- -таон	τ^-	0	0	+1	$\frac{1}{2}$	1784	$3,5 \cdot 10^{-13}$
		Таонне нейтрино	ν_τ	0	0	+1	$\frac{1}{2}$	<70	?

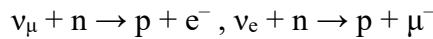
Нейтрино різних сортів відрізняються характером взаємоперетворень. Експеримент, в якому було доведено існування двох сортів нейтрино був поставлений в 1960 р.

В 1975 р. М. Перл зі співробітниками в Стенфорді відкрили «тяжкий» тау-мезон (таон) з масою 1,8 ГеВ. і передбачили існування його нейтронного партнера – тау-нейтрино (Нобелівська премія 1996 р.).

Існуванням різних сортів нейтрино можна пояснити, чому, наприклад, реакції розпаду нейтрона за схемами



є дозволеними, а за схемами



є забороненими.

Адронами (гр. *άδρός* –сильний, великий), за пропозицією Л.В.Окуня, називаються частинки, які можуть приймати участь в сильній взаємодії, а також в електромагнітній, слабкій та гравітаційній взаємодії. Їх число становить декілька сотень.

Більшість з них є резонансами – вкрай нестабільними частинками, час життя яких за порядком співпадає з характерним часом сильної взаємодії $\tau \sim (10^{-24} - 10^{-28})$ с. На противагу стабільним частинкам, які розпадаються за рахунок електромагнітної, чи слабкої взаємодії, резонанси розпадаються за рахунок сильної взаємодії.

У адронів виявлена внутрішня структура. З дослідів по пружному розсіюванні електронів на нуклонах впливає, що приблизні радіуси нуклонів становлять $0,8 \cdot 10^{-15}$ м, і, що електричний заряд і магнітний момент розподілені в них плавно, спадаючи з віддаленням від центра по експоненті. Досліди по непружному розсіюванні високоенергетичних електронів на нуклонах виявили, що більша частина внутрішнього простору нуклонів порожня, електрони-снаряди взаємодіяли з надзвичайно малими об'ємами (партонами). Виявлення зернистої (партонної) структури нуклонів привело до висновку про їх неелементарність.

Фотон	Лептони	Адрони		
		Мезони	Баріони	
			Нуклони	Гіперони
γ	e, μ, τ, ν	π, K, η -резонанси	протон, нейтрон: p, n	$\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ -резонанси

14. Будова частинок. Кварки

За сучасними поглядами адрони складаються з *кварків* – фундаментальних частинок, які мають заряд кратний третині електронного. Гіпотеза фундаментальних субчастинок була висунута в 1964 р. Дж. Цвейгом та М. Гелл-Манном (Нобелівська премія 1969 р.). Прийнята за пропозицією Гелл-Манна назва «кварк» запозичена з роману Джеймса Джойса «Поминки по Фіннегану», де головному герою марились фантазмагоричні істоти в образі чайок, які викрикували загадкові слова: «Три кварки для містера Марка». Містичний зміст слова «кварк» з тексту модерністського роману неможливо точно витлумачити: це і наслідування крику чайок, і, за перекладом, може означати – «неуявне», «марево», «маячня».

Існує шість різновидів, або «ароматів» кварків – *u, d, c, s, b, t*.

Назви *кварків* утворені з перших букв англійських слів: назва кварка *u* утворена від *up*, верхній; *d* – від *down*, нижній; *c* – від *charm*, чарівний (зачарований); *s* – від *strange*, дивний, за іншим варіантом, від *side way*, побічний; *b* – від *beauty*, красивий; *t* – від *truth*, правдивий, істинний.

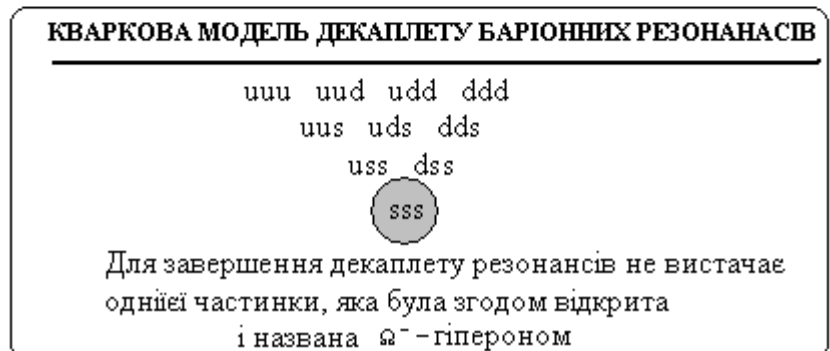
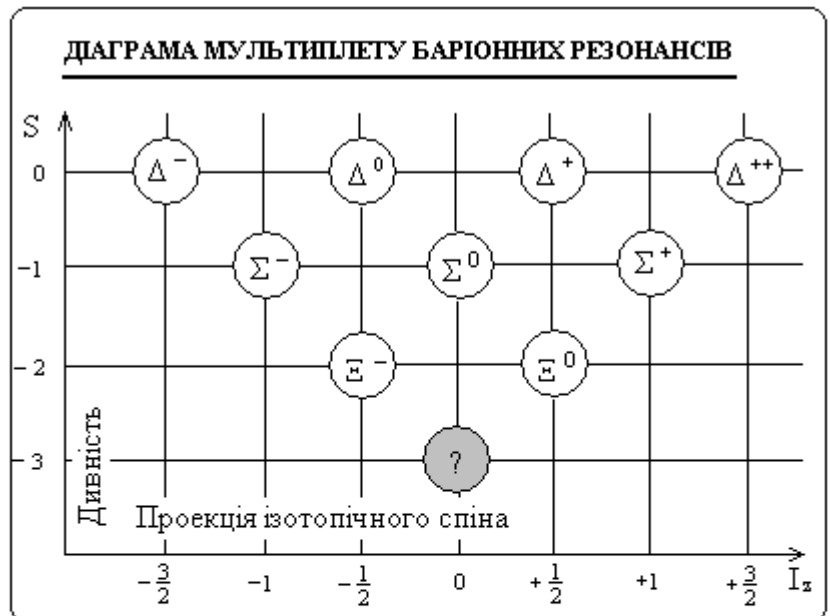
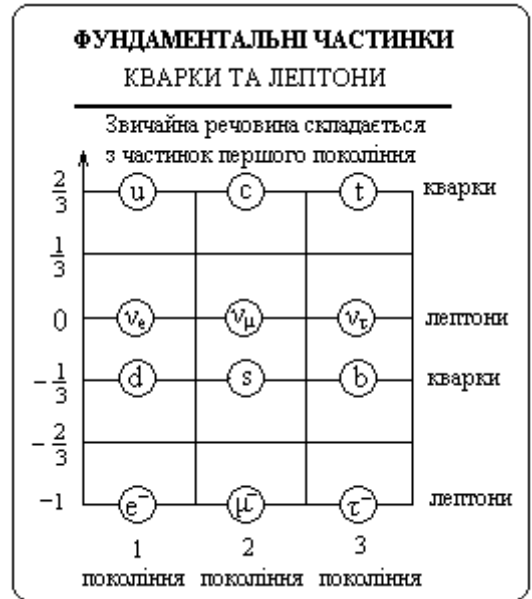
Кварки належать до ферміонів з половинним спіном. Кварки *u, c, t* – називають *верхніми*, вони мають заряд $q = +\frac{2}{3}e$, кварки *d, s, b* – *нижніми*, зі зарядом $q = -\frac{1}{3}e$.

Кожен кварк може знаходитися в одному з трьох станів, які називають «кольоровими» – червоний, зелений та синій. Суміш цих кольорів дає «нульовий», білий колір. Антикварки мають антикольор з відповідними назвами.

Колір та антиколір також дають нульовий колір. Вводиться *квантове число* – колір, яке визначає кольоровий заряд.

Кварки утворюють три дублети, чи покоління: (*u, d*), (*c, s*), (*t, b*) так, що має місце кварк-лептонна симетрія, за якою кожній парі лептонів відповідає пара кварків.

(*u, d*) → (*ν_e, e⁻*) – перше кварк-лептонне покоління,



(c,s) → (ν_μ, μ⁻) – друге,

(t,b) → (ν_τ, τ⁻) – третє.

Така ж відповідність властива і античастинкам.

Іноколи b- та t-кварки називають bottom- (англ. «дно») та top-кварками (англ. «вершина»).

Оскільки кварки у вільному стані не виявлені і, скоріше за все, не існують, то маса їх визначається умовно.

Кваркам приписують певні квантові числа: C – чарівність, або чарм; S – дивність; B – краса; T – істина.

На початку була розроблена теорія будови баріонів з трьох кварків, а мезонів з кварків та антикварків. Наприклад :

$$n = udd, p = uud, \pi^+ = u\bar{d}, \pi^- = \bar{u}d.$$

Гіпотеза трьох кварків пояснювала існування супермультиплетів. Якщо зобразити декаплет баріонних резонансів, в координатах ізотопічний спіні (I_z = 0; 1/2; -1/2) та дивність (S = 0; 1; -1), то можна помітити, що всі частинки комбінуються з кварків

Проте в 1974 році була відкрита частинка з групи резонансів з масою mc² = 3,1 GeV (Нобелівська премія 1976 р.). Групою Б. Ріхтера, яка спостерігала її в Стенфорді при електрон-позитронній анігіляції як резонанс, вона була названа – j- частинкою. Групою С.Тінга, яка спостерігала її в Брукхейвені при зіткненні та Б.Ріхтера протонів з енергією 28 GeV з берилієвою мішенню, ця частинка була названа ψ-частинкою. За частинкою закріпилась назва j/ψ- частинка (джерей-пси-частинка). Енергетичний спектр цієї частинки (резонансна ширина) не допускав можливості її будови з трьох кварків. Саме для пояснення її будови, прийшлося вводити в розгляд «зачарований» кварк c, носій квантового числа C (чарівність, чарм), існування якого було передбачено в 1970 р. Природно було прийняти, що j/ψ побудована з двох кварків: c та анти-c. j/ψ нагадує тимчасову атомоподібну систему електрон-позитрон, яка називається позитроній, і тому цю частинку називають *чармоній*.

Було передбачено велику кількість частинок, до складу яких входять чарівні кварки зі своїми антикварками, і, дійсно, 1979 р. були виявлені зачаровані баріони, які містили ці кварки.

В 1977 р. Л.Ледерман зі співробітниками відкрили нову частинку іпсилон-мезон Y з масою mc² = 9,46 GeV і шириною Γ = 0,04 MeV, для пояснення будови якої був введений «красивий» кварк b, носій відповідного квантового числа B.

В 1995 році був відкритий «правдивий » кварк t, носій квантового числа T.

Тип кварка (аромат)	Маса, MeV m c ² =	Заряд				
		Q, e (електр. заряд)	S (дивність)	C (чарівність)	b (краса)	t (правда)
Верхній u	300	+2/3	0	0	0	0
Нижній d	300	-1/3	0	0	0	0
Дивний s	500	-1/3	-1	0	0	0
Чарівний c	1500	+2/3	0	+1	0	0
Красивий b	5000	-1/3	0	0	+1	0
Правдивий t	175000	+2/3	0	0	0	+1
Всі кварки мають спіні (в ħ) J = 1/2 та баріонний заряд B = 1/3						

Наявність великої кількості кварків та різноманіття їх характеристик спонукали пошуки пояснення такого стану. Одним з варіантів такого пояснення стала *модель преонів* (Петі, А. Салам, 1974 р.). Оскільки кожен кварк може бути описаним трьома величинами:

зарядом, кольором, номером покоління, то ці параметри можна задати трьома групами частинок – *преонів* (preons). Преони, що відповідають номеру покоління, називаються *сомонами* (somons): s_1, s_2, s_3 . Преони, що відповідають кольору, називаються *хромонами* (chromons):

червоний – c_r , жовтий – c_y , синій – c_b , безкольоровий c_0 . Преони, що відповідають електричним зарядам, називаються *флавонами* (flavons) : f_1, f_2 .

Іншим варіантом є гіпотеза, яка розглядає гіпотетичні частинки – *рішоні* (Харарі, 1979 р.). Один з двох рішонів T має заряд $Q_T = +1/3$, другий – $Q_V = 0$, Один з антирішонів \bar{T} має протилежний заряд, інший нульовий. Кварки та лептони будуються з трьох рішлів, чи антирішонів (одночасне входження рішона та антирішона гіпотеза забороняє). Так електрон має будову – $\bar{T}\bar{T}\bar{T}$, позитрон – TTT .

15. Електрослабка взаємодія. Квантова хромодинаміка

Теорія електрослабкої взаємодії об'єднує електромагнітну та слабку взаємодії. В електрослабкій взаємодії приймають участь кварки та лептони шляхом випромінювання та поглинання фотонів та проміжних векторних бозонів, введених вперше Ю. Швінгером (J. Schwinger) в 1957 р.

Кінцева форма теорії була дана Ш. Глешоу (S. Glashow), С. Вайнбергом (S. Weinberg) та А. Саламом (A. Salam) в 1967 (Нобелівська премія 1979 р.) з використанням механізму Хіггса, за яким при певних умовах взаємодії у безмасові частинки перетворюються в носії маси. При цьому прийшлося допустити, що в стійкий стан з найменшою енергією підтримується при взаємодії з вакуумом з допомогою бозона нульової маси – *бозона Хіггса* H_0 , маса якого може сягати 1Тев.

В теорія електрослабкої взаємодії, електромагнітне поле і поле слабкаї взаємодії представляються різними компонентами одного поля з яким пов'язані чотири кванти – γ, W^+, W^-, Z^0 , які є бозонами, оскільки, на відстанях $\sim 10^{-17}$ м та меншої, електромагнітна взаємодія змінює свій характер – з'являється обмін проміжним нейтральним мезоном Z^0 . Така взаємодія стає характерною для не тільки для заряджених частинок.

Переносниками сильної взаємодії між кварками є глюони – нейтральні частинки зі спіном 1, нульовою масою і кольоровим зарядом. Глюони «склеюють» кварки в адрони і звідси їх назва (glue – клей). Всього існує 8 різновидів глюонів, що дуже ускладнює розрахунок сильної взаємодії. Так як кварки і глюони є кольоровими частинками, польова теорія кваркових взаємодій називається *квантовою хромодинамікою* (КХД).

Існує гіпотеза конфайнменту (confinement – полон, англ.), за якою для кварків потрібна нескінченно велика енергія. Звільнення від сили притягання, що зменшується при збільшенні відстані означає, що для розведення взаємодіючих тіл на нескінченність потрібна певна енергія – енергія зв'язку. Якщо при зміні відстані сила залишається незмінною, то робота цієї сили при віддаленні на нескінченність буде рівна нескінченності. Фізично це реалізується, якщо силові лінії глюонного поля будуть взаємопаралельними. Кажуть, що ці лінії зібрані в трубку, або їх називають *суперструнами*, що з'єднують кварки. Проте, при взаємовіддаленні кварків, постійність сили може змінитися зростанням, що називають розтягом струни. Якщо енергія взаємодії досягає певного значення, і приводить до народження пари кварк-антикварк, то така подія називається розривом струни. Кінцями розриву стає народжена пара. Далі антикварк анігілює з первинним кварком з вилітанням мезона, а залишений кварк утвореної пари притягується назад до джерела сили – струна замикається. Відокремити кварки, розділити адрон виявляється неможливим.