

## ПРО ДЕЯКІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК ТА ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ВЗАЄМОДІЙ

У статті розкрито методику формування у суб'єктів навчання поняття класифікації елементарних частинок та моделювання адронів кварками.

**Ключові слова:** вивчення елементарних частинок, фундаментальні взаємодії, моделювання адронів.

Проблеми навчання фізики елементарних частинок та фундаментальних взаємодій у середній школі існують з 50-х років минулого століття. Методологічних досліджень з цих питань майже не було. Остаточного формування структури і змісту курсу фізики для 12-річної освіти ще не сталося. У цьому зв'язку ми пропонуємо одну з точок зору вивчення питань елементарних частинок і фундаментальних взаємодій у середній загальноосвітній школі.

На нинішньому етапі розвитку науки вся різноманітність явищ, які мають місце у Всесвіті на всіх її рівнях – мікросвіт, жива природа, зірки, галактики – визначаються чотирма фундаментальними взаємодіями. Дві з них відомі з класичної фізики – це гравітаційна та електромагнітна. Специфічною особливістю володіють ядерна – сильна та слабка взаємодії. Вони є короткодіючими і мало впливають не лише на рух макроскопічних тіл, а й на рух і властивості атомів та молекул і проявляються лише в ядерних явищах та в перетвореннях елементарних частинок.

У основу сучасного підходу до класифікації елементарних частинок також покладено типи фундаментальних взаємодій [4]. Виділяється чотири фундаментальні частинки фотони, глюони,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  бозони та гравітони, які є відповідальними за ці взаємодії. Узагальнено це показано на рис. 1. Використання рисунка дає можливість наочно побудувати цілісну картину як взаємодій, так і частинок, які причетні до них.

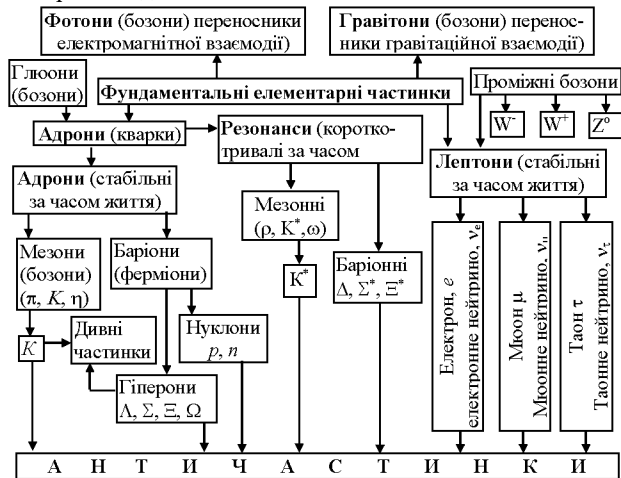


Рис. 1. Класифікація елементарних частинок

Слабка взаємодія – це особлива взаємодія, яка проявляється у всіх процесах, в яких бере участь нейтрино. Таке відбувається при захопленні нейтрино ядрами, при бета-розпаді, при розпаді  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  мезонів і мюонів.

Силу взаємодії двох частинок можна охарактеризувати потенціальною енергією при їх зближенні на деяку відстань. Допідбно на уроках порівняти енергію сильної, слабкої, електромагнітної та гравітаційної взаємодії двох протонів на відстані  $r \approx 10^{-15}$  м. На такій відстані сильна взаємодія проявляється у повній мірі. Для електромагнітної взаємодії ця енергія становить  $\sim 1$  МеВ, сильної  $\sim 50$  МеВ, слабкої  $\sim 10^6$  МеВ, а для гравітаційної  $\sim 10^{-30}$  еВ. Співвідношення між цими взаємодіями становить  $1:10^{-2}:10^{-14}:10^{-38}$  еВ.

Важливу роль у фізиці мікросвіту відіграє уява про час, який характерний для того чи іншого явища. Для сильної взаємодії оцінка цього масштабу виявляється з ядерних зіткнень швидких частинок, які мають швидкість порядку швидкості світла. За відомим радіусом дії цих сил та швидкістю взаємодії  $\hbar/c \sim 10^{-21} - 10^{-24}$  с. Це означає, що при розпаді частинки за сильної взаємодії час такого розпаду буде цього ж порядку. Якщо "сильні розпади" за якихось умов не здійснюються, і частинка розпадається під дією електромагнітних сил, то час життя лежить уже в межах  $\sim 10^{-16} - 10^{-20}$  с. Для слабких розпадів відповідний час становить  $\sim 10^{-8} - 10^{-13}$  с. Звертаємо увагу учнів, що частинки, які розпадаються лише завдяки слабким взаємодіям є відносними довгожителами.

Таким чином частинки розділяють на класи за характером взаємодій: фотон має електромагнітну взаємодію; лептони – електрон, мюон, нейтрино, та їх античастинки. Їм властива слабка взаємодія. Вони піддаються і електрослабкій взаємодії, яка у курсі фізики середньої школи не вивчається, хоч її теорія створена у 1964 р, а у 1979 р. вчені Салам, Глешоу за її створення одержали Нобелівську премію.

Глюони відповідальні за сильну взаємодію, яка проявляється у адронів, що складаються з кварків. В цілому ж адронам властиві всі чотири взаємодії. За часом життя адрони поділяються на короткоживучі частинки – резонанси і довго живучі адрони. Одну групу складають мезони – сильно взаємодіючі частинки кванти ядерного поля. Другу групу складають баріони-нукліони, які мають баріонний заряд. Самі легкі баріони – нейтрон і протон.

Адрони-баріони – частинки, беруть участь у сильних взаємодіях. Час їх життя  $\sim 10^{-23}$  с. Але є адрони з часом життя  $\sim 10^{-8} - 10^{-13}$  с. Розпади цих довгоживучих частинок обумовлюються слабкими взаємодіями.

Ми пропонуємо класифікацію адронів здійснювати за їх квантовими числами: масою, електричним зарядом, спіном, магнітним моментом, часом життя, значенням баріонного заряду. Баріонні та електричні заряди – це єдині заряди, які характеризуються сильнодіючими частинками. Нові заряди дістали назву ароматів, чарівних і т.д. В 50-х роках минулого століття відкрили дивні частинки, і ввели квантове число – дивність.

Після об'єднуючого описання електрослабкої взаємодії елементарних частинок виникло питання про об'єднання сильної, слабкої та електромагнітної взаємодії – великого синтезу. Така ідея ґрунтувалась, насамперед, на тому, що константи сильної кварк-глюонної взаємодії зменшуються з ростом переданого імпульсу, а константа електромагнітної і слабкої взаємодії навпаки збільшується [1, с.176-177]. Тому при деякому значенні імпульсу інтенсивність всіх трьох взаємодій можуть зрівнятися.

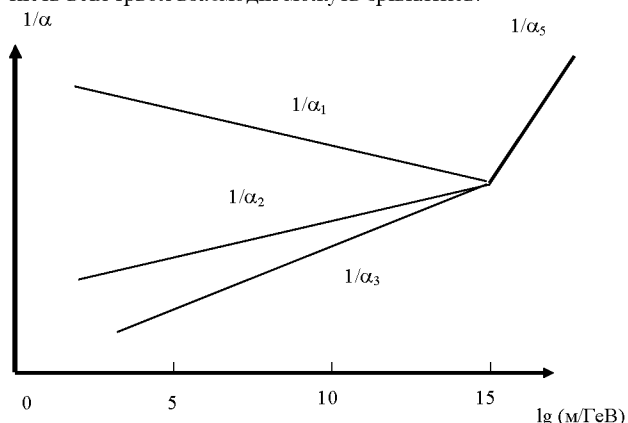


Рис. 2. Поведінка констант електромагнітної  $1/\alpha_1$  слабкої  $1/\alpha_2$  і сильної  $1/\alpha_3$  взаємодії у області великих наданих імпульсів

Для знаходження такого імпульсу використовується

залежність констант  $\alpha_i = \frac{g_i^2}{4\pi}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) від імпульсу відповідних  $U_1$ -,  $SU_2$ -,  $SU_3$ -симетричних взаємодій:

$$\frac{1}{\alpha_i(M)} - \frac{1}{\alpha_i(\mu)} = \frac{\alpha_i \ln\left(\frac{M}{\mu}\right)}{2\pi}$$
, де  $M$  і  $\mu$  – деякі значення імпульсу. В дослідженнях під  $M$  розуміється імпульс, при якому зрівнюються інтенсивності взаємодій  $\mu = M_0$ . Головний внесок у залежність від  $M$  констант дають їх залежності від енергії.

Знайомимо учнів з методикою вивчення характеру залежності констант від імпульсу. За співвідношенням коефіцієнтів  $a_i$  встановлюємо характер залежності констант від імпульсу:  $a_3 - a_2 = 11/3$ ,  $a_3 - a_1 = 11$ ,  $a_3 = 11 - 2N_f/3$ . Коефіцієнти  $\alpha_2$  і  $\alpha_3$  додатні, а  $\alpha_1$  від'ємний. Тоді константи  $SU_2$ - і  $SU_3$ -взаємодій з ростом  $M$  зменшуються, а константа  $\alpha_1$  збільшується. Маса, при якій  $\alpha_1(M) = \alpha_2(M) = \alpha_3(M)$  ви-

значається із співвідношення  $\ln \frac{V}{\mu} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{8}{3\alpha_s}\right)\pi}{11}$ .

Якщо при  $\mu = M_0$  константи  $\alpha(M_0) = 1/129$ ,  $\alpha_f(M_0) = 0,1$ , то  $\ln(M/M_0) = 29$ . Відповідно  $M/M_0 = 4 \cdot 10^{12}$ , а  $M \approx 4 \cdot 10^{14}$  GeV. Передбачається, що при таких енергіях існує єдина взаємодія, яка має більш високу симетрію у порівнянні з  $U_1 \times SU_2 \times SU_3$ -симетріями сильної і електромагнітної взаємодій, які спостерігаються до цього часу. Найбільш простою для такого об'єднання є  $SU_5$ -симетрія.

Важливим для наукового світосприймання учнів ознайомлення їх з моделлю кваркової будови адронів. Ми пропонуємо розглянути цю модель у такій послідовності:

1. Адрони не можна розглядати як елементарні частинки у прямому розумінні цього слова. Вони мають складну внутрішню структуру і складаються з істинно елементарних частинок. Структурні елементи адронів назвали кварками.

2. Систематика адронів дозволила зобразити відомі баріони з трьох кварків і антибаріони – антикварків.

3. Існує не менше 6 типів кварків, кожен з яких є носієм певного нового квантового числа – адронного аромату.

4. Сильні та електромагнітні взаємодії не можуть змінювати індивідуальність кварків, вони не змінюють значення кваркових ароматів. У процесах, які обумовлюються сильними і електромагнітними взаємодіями можуть проходити просто перегрупування кварків, або утворення знищення кварк-антикваркових пар з певними ароматами, або і одне і друге.

5. Слабка взаємодія відіграє в природі унікальну роль – вони змінюють індивідуальність кварків.

Наступним кроком вивчення кваркової моделі є розгляд процесів утворення і розпаду адронів. Відповідно до кваркової моделі здійснюються різні адронові реакції. Наприклад, утворення  $\pi$ -мезонів у нуклон-нуклонних взаємодіях  $p+p \rightarrow p+n-\pi^+$ . В кварковій моделі ця реакція записується таким чином:  $[udd]+[uud] \rightarrow [udd]+[udd]+[ud]$ .

Другий приклад: утворення баріонів і антибаріонів  $\pi^+p \rightarrow \pi^+p+p+p$ . У кварковій моделі має місце процес  $[du]+[uud] \rightarrow [du]+[uud]+[uud]+[uud]$ . Утворення  $u$ -пар і однієї  $d$ -пари, які потім згрупувались в протон і антипротон.

Розглянемо реакцію утворення дивних частинок  $[ud]+[uud] \rightarrow [uus]+[su]$  зводиться до анігіляції  $dd$ -пари і до народження  $ss$ -пари. Така реакція є дозволеною. У цьому випадку два  $s$ -кварки повинні перейти у два  $u$ -кварки. Згідно основних положень кваркової моделі такі процеси не можуть проходити в сильних і електромагнітних взаємодіях, у яких аромати зберігаються. І дійсно така реакція ніде не спостерігалась в експериментах. Таким чином масмо нібито гру в кубики згідно правил кваркової моделі.

Після відкриття у 1932 р. нейтрона і введення гіпотези нейтрино у фізиці завершилась монополія електромагнітної взаємодії і розпочався період утвердження уявлень про сильну і слабку взаємодію. Е.Фермі у 1952 р. виявив складну структуру нуклона. Дослідження з розсіювання піонів нуклонами виявило збуджені стани нуклона:  $\Delta$ -ізобара з масою 1,24 GeV, спіном  $3/2$  і додатною просторовою парністю. Ідея про структуру адронів утвердилась у фізиці елементарних частинок у 1956 р. після дослідів з розсіювання електронів нуклонами і ядрами (Хофштадтер) [3, с.168]. Принципове значення для розуміння структури адронів мала кваркова модель [3, с.341]. Її успіх у класифікації адронів було закріплено після дослідів з розсіювання лептонів, електронів і нейтрино нуклонами. Спроби розв'язати проблему взаємодії кварків привели до появи глюонів – нейтральних безмасових векторних частинок. Так виникла квантова хромодинаміка – теорія сильної взаємодії кварків з глюонами. Реальність кварків і глюонів доводить утворення адронних струмин у дослідях на зустрічних пучках. За допомогою кварк-лептонної симетрії була побудована єдина теорія електрослабкої взаємодії лептонів і кварків. На мові лептонів та кварків нині формується теорія “великого об'єднання” елементарних частинок [2, с.3-38]. На дослідях спостерігались 5 кварків. Теорія електрослабкої взаємодії вимагає ще одного  $t$ -кварка. Із  $u$ -і  $d$ -кварків складаються нуклони: протон, нейтрон, піони  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ , векторні мезони  $\rho$  і  $\omega$ . Із трьох класів кварків складаються баріони, а мезони – із кварка і антикварка. Можливі баріони із п'яти кварків: чотири кварки і один антикварк  $B = 4q + \bar{q}$ . Маси  $u$ -,  $d$ - і  $s$ -кварків близькі між собою  $m_u = m_d = 300$  MeV, а  $m_s = 475$  MeV. Якщо різницею у масах знехтувати, то виникає  $SU_3$  – симетрія сильної взаємодії адронів [1, с.168-182]. Ця симетрія має визначальне значення при аналізі мас адронів, їх розпадів, класифікації адронів. У групі  $SU_3$  кварки утворюють мультиплет розмірності 3, антикварки –  $\bar{3}$ . Тоді мезони, які складаються з кварків та антикварків мають належати двом мультиплетам  $SU_3$   $3 \oplus \bar{3} = 1 \oplus 8$ .

На рис. 3 показано як заповнюються октети псевдоскалярних і векторних мезонів. Ранг групи рівний 2, то адрони у ній повинні характеризуватись двома квантовими

числами: гіперзарядом  $Y = S+B$  ( $S$  – странність,  $B$  – барионний заряд) і ізотопічним спіном  $I_3$ .

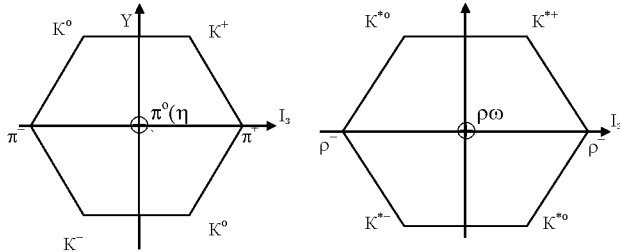


Рис. 3. Октети псевдоскалярних і векторних мезонів

Баріони складаються з трьох кварків і можуть належати унітарним синглетам, октетам і декуплетам, рис. 4  $3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$ .

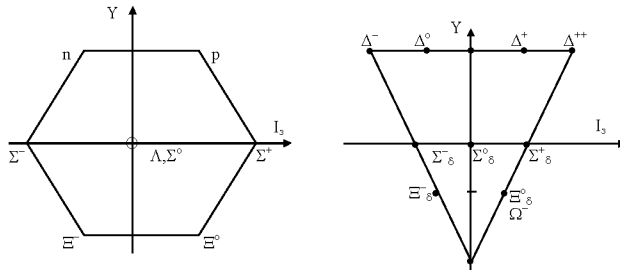


Рис. 4. Мультиплети баріонів у  $SU_3$ -симетрії

Маса шармового с-кварка рівна  $\approx 1$  GeB і значно відрізняється від u-, d-, s-кварків. Тому можлива симетрія  $SU_4$ -симетрії повинна бути досить сильно порушена. Це означає, що маси шармових адронів перевищують масу звичайних адронів. Проте для класифікації таких адронів можна використовувати дану симетрію. У цьому випадку мезони повинні утворити синглет і 15-плет, або  $4 \otimes 4 = 16 = 1 \oplus 15$ . Мезонний мультиплет розмірності 15 має нонет мезонів з нульовим шармом, а також 6 мезонів з шармом відмінним від нуля:  $F^+ = (s^+c)$ ,  $F^0 = (c^+s)$ ,  $D^+ = (d^+c)$ ,  $D^0 = (u^+c)$ ,  $D^- = (c^+d)$ ,  $(D^{*0}) = (c^+u)$ .

Нонет мезонів з нульовим шармом складається із шармового кварка і антикварка. Це є  $\Psi$ -частинки ( $\Psi = (c^+c)$ ). Шармові D- і F-мезони спостерігались у дослідях на зустрічних електрон-позитронах [1, с. 170].

Шармові баріони можуть мати 1-3 с-кварки ( $\Lambda_c = [ud]c$ ,  $\Sigma_c^+ = \{ud\}c$ ,  $\Sigma_c^0 = ddc$ ,  $\Sigma_c^+ = \{ud\}c$ ), де  $[ud]$  й  $\{ud\}$  – симетрична і антисиметрична хвильова функція u- та d-кварків. Баріони з рівним одиниці шармом і нерівною нулеві странністю мають таку кваркову структуру:  $A^0 = c[ds]$ ,  $A^+ = c[us]$ ,  $S^0 = c\{ds\}c$ ,  $S^+ = c\{us\}$ ,  $T^0 = css$ .

Триплет  $SU_3$ -симетрії утворюють баріони з двома кварками  $X_u^{++} = ccu$ ,  $X_d^+ = ccd$ ,  $X_s^+ = ccs$ .

Баріони з одним і двома кварками мають спін 1/2, додатно парність, хвильова функція баріона повинна змінювати знак при перестановці будь-якої пари кварків.

Для баріону  $O^{++}$  з трьома с-кварками маємо нульовий ізотопічний спін, подвійний електричний заряд, спін рівний 3/2.

Еквівалентність властивостей кварків різних кольорів приводить до кольорової  $SU_3$ -симетрії. Передбачається, що ця симетрія є точною для усіх нині відомих взаємодій. При виконанні умови, що дана симетрія має локальний характер [1, с.171], то виникає вісім векторних полів з нульовою масою глюони. Локальність симетрії означає, що відповідна теорія інваріантна відносно групи  $SU_3$ -симетрії, вісім параметрів яких є функціями чотиримірної координати простору-часу. Обмін глюонами приводить до взаємодії між кварками, аромат кварка не змінюється при випромінюванні чи поглинанні глюона, але колір кварка у цьому випадку не змінюється.

Досліди на зустрічних електрон-позитронних пучках підтвердили передбачення теорії квантової хромодинаміки [1, с.172-173].

Уявлення про кваркову структуру адронів добре описали процеси слабкої взаємодії лептонів і адронів. Це проявилось у єдиних теоріях слабкої та електромагнітної взаємодії елементарних частинок. Такі теорії використовують три принципові обставини: калібрувальну інваріантність, спонтанне порушення симетрії і скалярні мезони Хітса [1, с.174-175]. Спонтанне порушення симетрії можна розглядати як джерело появи маси у заряджених і нейтральних векторних бозонів. Із обміном забезпечується взаємодія частинок. Маса заряджених ферміонів також зумовлені спонтанним порушенням симетрії. У об'єднуючих схемах важливою характеристикою є їх перенормування навіть за наявності масивних векторних бозонів. Тут радикальне значення має спонтанне порушення калібрувальної інваріантності.

### Список використаних джерел:

1. Рекало М.П. Современные представления о структуре адронов // Очерки по истории развития ядерной физики в СССР. – К.: Наук. думка, 1982. – С.168-182.
2. Матинян С.Г. УФН. – 1980. – 130. – №1. – С.3-38.
3. Коккеде Я. Теория кварков. – М.: Мир, 1971. – С.168-341.
4. Наумов А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учеб. пособие [для студ. пед. ин-тов по физ. спец.] / Наумов А.И. – М.: Просвещение, 1984. – 384 с.

In the article the method of forming for the subjects of teaching of conception of classification of elementary particles and of adrons is exposed quarks.

**Keywords:** study of elementary particles, fundamental co-operations, designs of adrons.

Отримано: 3.09.2009

О. А. Черченко

*Чернігівський державний педагогічний університет імені Т.Г. Шевченка*

## **ЗМІСТ ПОЗАУРОЧНОЇ РОБОТИ З ФІЗИКИ В УМОВАХ СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ЇЇ ОРГАНІЗАЦІЇ**

У статті розглядається проблема формування змісту позаурочної роботи з фізики в основній школі. Як результат, пропонується спосіб формування змісту в умовах використання синергетичного підходу.

**Ключові слова:** позаурочна робота, основна школа, навчання фізики, фізика, синергетика, навчання, синергетичний підхід.

Однією із важливих проблем дидактики фізики є формування інтересу в учнів до її вивчення. Важливе місце у розв'язанні цієї проблеми займає позаурочна робота [1-9]. Вона приймає різноманітні форми, які можна віднести до чотирьох груп [1]: організована вчителем фізики позаурочна (позакласна) робота; організована керівником з іншого позашкільного закладу позаурочна робота з фізики в школі; організована вчителем фізики позаурочна робота з фізики в іншому позашкільному закладі; організована позаурочна

робота з фізики в іншому позашкільному закладі керівником цього закладу. Кожна з груп включає позаурочну роботу, яка класифікується за ступенем охоплення учнів, а саме [2]: індивідуальна (читання книжок і журналів, підготовка рефератів, розв'язування задач, виконання фізичного експерименту в домашніх умовах, виготовлення моделей і приладів, виконання експериментальних робіт дослідницького типу...); групова (факультативні заняття, фізичний гурток, фізико-технічний гурток, технічний гурток, участь