
Предложение концепции кварков

Бахтин Павел
НИЯУ МИФИ
Физический семинар по физике элементарных частиц

6 Ноября 2023

Введение

Кварки - фундаментальные фермионы, участвующие в сильном взаимодействии. Имеют дробный заряд, из них состоят адроны. Известны, как частицы, обладающие цветовым зарядом - не могут быть напрямую зарегистрированы.

Откуда появилась эта концепция?

$$\partial \mathbf{f}_{\mu\nu} / \partial x_\nu + 2\epsilon(\mathbf{b}_\nu \times \mathbf{f}_{\mu\nu}) + \mathbf{J}_\mu = 0,$$

$$\gamma_\mu (\partial_\mu - i\epsilon \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{b}_\mu) \psi + m\psi = 0,$$

$$\mathbf{f}_{\mu\nu} = \frac{\partial \mathbf{b}_\mu}{\partial x_\nu} - \frac{\partial \mathbf{b}_\nu}{\partial x_\mu} - 2\epsilon \mathbf{b}_\mu \times \mathbf{b}_\nu.$$

$$\mathbf{J}_\mu = i\epsilon \bar{\psi} \gamma_\mu \boldsymbol{\tau} \psi.$$

Экспериментально известные факты

- Лептоны: Электроны, мюоны, нейтрино (2 поколения)
- Барионы: Протон, нейтрон, Лямбда, сигма гипероны
- Мезоны: легкие аксиальные (Пионы), векторные (ρ) мезоны, К-мезоны.
- Нарушение Р-четности в слабом взаимодействии.
- Соотношения сечений в различных процессах рассеяния

Почему так много частиц участвуют в сильном взаимодействии? Почему у них так сильно отличаются массы? Почему их именно столько с такими квантовыми числами?

Предшествующие попытки

Первая попытка представить, к примеру, мезоны составными частицами - модель Ферми-Янга, от 1949 года.

Впоследствии появится масса различных теорий. Выделим некоторые из этапов:

- Модель Янга-Миллса, для слабого взаимодействия
- Модель Саката

Последней удалось качественно описать некоторые свойства барионов и мезонов. Именно опираясь на нее, будет развита подробнее более подробно интересующий нас этап.

Структура статьи:

Всего - 9 секций и дополнительный комментарий пост-фактум. 1 секция - введение, 9-ая - обобщение результатов.

Часть 2 посвящена выведению эмпирической формулы Гольдбергера-Треймана из теории рассеяния.

Часть 3 посвящена получению коммутационных соотношений между наблюдаемыми, введению алгебр групп и поиску их фундаментальных представлений.

Часть 4 посвящена замечанию о симметриях и их применению к модели.

Часть 5 явному получению из теории выражений для векторного и аксиального тока

Часть 6 анализу нарушений симметрии в контексте свойств получающихся мезонов

Часть 7 анализу нарушений симметрий в контексте свойств получающихся барионов

Часть 8 - заметке о другой модели, именуемой “восьмеричным путем”.

Наконец, отдельная небольшая статья, опираясь на итоги описанного выше, предлагает концепцию кварков - в ее простейшем виде.

Часть 3: коммутационные соотношения

Компоненты изоспина $[I_i, I_j] = ie_{ijk}I_k$.

$$[\mathfrak{S}_{i4}(\mathbf{x}, t), \mathfrak{S}_{j4}(\mathbf{x}', t)] = -ie_{ijk}\mathfrak{S}_{k4}(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}'),$$

Изоспиновый и аксиальный векторный токи

$$\mathfrak{S}_\alpha = i\bar{N}\boldsymbol{\tau}\gamma_\alpha N/2, \quad \mathbf{P}_\alpha = i\bar{N}\boldsymbol{\tau}\gamma_\alpha\gamma_5 N/2,$$

$$[\mathfrak{S}_{i4}(\mathbf{x}, t), P_{j4}(\mathbf{x}', t)] = -ie_{ijk}P_{k4}(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}'),$$

$$[P_{i4}(\mathbf{x}, t), P_{j4}(\mathbf{x}', t)] = -ie_{ijk}\mathfrak{S}_{k4}(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}').$$

Исходя из требования сохранения изоспина и пользуясь лагранжианом модели модели Ферми-Янга:

$$[\mathfrak{S}_{i4}(\mathbf{x}, t), u_0(\mathbf{x}', t)] = 0, \quad [P_{i4}(\mathbf{x}, t), u_0(\mathbf{x}', t)] = -iv_i(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}'), \text{ etc.}$$

$$\partial_\alpha \mathbf{P}_\alpha = -i[\mathbf{D}, H] = i[\mathbf{D}, u_0] = \mathbf{v},$$

Часть 4: Симметричная модель Саката

$$L = -\bar{p}\gamma_\alpha p - \bar{n}\gamma_\alpha \partial_\alpha \bar{n} - \bar{\Lambda}\gamma_\alpha \partial_\alpha \Lambda - \frac{1}{4}(\partial_\alpha B_\beta - \partial_\beta B_\alpha)^2 \\ - \frac{1}{2}\mu_0^2 B_\alpha B_\alpha - i\hbar_0(\bar{p}\gamma_\alpha p + \bar{n}\gamma_\alpha n + \bar{\Lambda}\gamma_\alpha \Lambda)B_\alpha \\ - m_{0N}(\bar{n}n + \bar{p}p) - m_{0\Lambda}\bar{\Lambda}\Lambda.$$

$$L = \bar{L} + L' + L'',$$

$$L' = (2m_{0N} + m_{0\Lambda})(\bar{N}N + \bar{\Lambda}\Lambda)/3,$$

$$L'' = (m_{0N} - m_{0\Lambda})(\bar{N}N - 2\bar{\Lambda}\Lambda)/3.$$

Где: $L + L'$ - обладает унитарной симметрией $U(3)$, L'' - отвечает за разницу масс "фундаментальных барионов" модели. Факторизуем группу в $U(1)*SU(3)$. Для последней получен набор матриц генераторов группы - для варьирования.

$$i\bar{b}\gamma_\alpha b = i\bar{n}\gamma_\alpha n + i\bar{p}\gamma_\alpha p + i\bar{\Lambda}\gamma_\alpha \Lambda,$$

$$\mathcal{F}_{i\alpha} = i\bar{b}\lambda_i\gamma_\alpha b / 2 \quad (i = 1, \dots, 8).$$

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_8 = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & -2/\sqrt{3} \end{pmatrix}$$

Часть 5: Векторные и Аксиальные токи

- Вводится дополнительная матрица, для объединения описания U(1) и SU(3):

$$[\lambda_i, \lambda_j] = 2if_{ijk}\lambda_k \quad (i=0, \dots, 8),$$

$$\{\lambda_i, \lambda_j\} = 2d_{ijk}\lambda_k \quad (i=0, \dots, 8),$$

$$\text{Tr}\lambda_i\lambda_j = 2\delta_{ij} \quad (i=0, \dots, 8).$$

- Аксиальный векторный ток и коммутационные соотношения:

$$\mathcal{F}_{i\alpha^5} = i\bar{b}\lambda_i\gamma_5 b/2$$

$$[\mathcal{F}_{i4^5}(\mathbf{x}, t), \mathcal{F}_{j4}(\mathbf{x}', t)] = -if_{ijk}\mathcal{F}_{k4^5}(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$$

$$[\mathcal{F}_{i4^5}(\mathbf{x}, t), \mathcal{F}_{j4^5}(\mathbf{x}', t)] = -if_{ijk}\mathcal{F}_{k4}(\mathbf{x}, t)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$$

- “Потенциальные частицы” при нарушении симметрий:

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{i\alpha} = 0, \quad (i=0, 1, 2, 3, 8)$$

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{4\alpha} = (\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}}u_5, \text{ etc.},$$

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{0\alpha^5} = (\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}}v_0 + (\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}}cv_8,$$

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{1\alpha^5} = [(\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}} + (\frac{1}{3})^{\frac{1}{2}}c]v_1, \text{ etc.},$$

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{4\alpha^5} = [(\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}} - (\frac{1}{12})^{\frac{1}{2}}c]v_4, \text{ etc.},$$

$$\partial_\alpha \mathcal{F}_{8\alpha^5} = [(\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}} - (\frac{1}{3})^{\frac{1}{2}}c]v_8 + (\frac{2}{3})^{\frac{1}{2}}cv_0.$$

Часть 6: Нарушение симметрий - мезон

Октет из фундаментальных полей:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{b}(\lambda_1 - i\lambda_2)b/2 &= \bar{n}p, \\
 \bar{b}\lambda_3b/\sqrt{2} &= (\bar{p}p - \bar{n}n)/\sqrt{2}, \\
 \bar{b}(\lambda_1 + i\lambda_2)b/2 &= \bar{p}n,
 \end{aligned} \right\} I=1, S=0$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{b}(\lambda_4 - i\lambda_5)b/2 &= \bar{\Lambda}p, \\
 \bar{b}(\lambda_6 - i\lambda_7)b/2 &= \bar{\Lambda}n,
 \end{aligned} \right\} I=\frac{1}{2}, S=+1$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{b}(\lambda_4 + i\lambda_5)b/2 &= \bar{p}\Lambda, \\
 \bar{b}(\lambda_6 + i\lambda_7)b/2 &= \bar{n}\Lambda,
 \end{aligned} \right\} I=\frac{1}{2}, S=-1$$

$$\bar{b}\lambda_8b/\sqrt{2} = (\bar{p}p + \bar{n}n - 2\bar{\Lambda}\Lambda)/\sqrt{6}, \quad I=0, S=0,$$

Предсказание: хи-мезон

Таблица для полученной схемы симметрий:

Unitary spin	Isotopic spin	Strange-ness	Pseudo-scalar	Vector	Scalar	Axial vector
Octet	1	0	π	ρ	π'	ρ'
	1/2	+1	K	M	K'	M'
	1/2	-1	\bar{K}	\bar{M}	\bar{K}'	\bar{M}'
Singlet	0	0	χ	ω	χ'	ω'
	0	0	A	B	A'	B'

Часть 7: Концепция кварка

Очевидное неизящество получающихся состояний, избыточно большое число “ячеек”, слишком большое сходство подтолкнули к тому, чтобы сделать следующее предложение:

Тем самым, модифицируя модель, добавляя в нее иные, исходно достаточно абстрактные фундаментальные частицы - и возникла концепция дробно-зарядных партонов

$$i \bar{u} \gamma_{\alpha} (1 + \gamma_5) (d \cos \theta + s \sin \theta)$$

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$. We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq) , $(qqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assumed that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

Заключение

A search for stable quarks of charge $-\frac{1}{3}$ or $+\frac{2}{3}$ and/or stable di - quarks of charge $-\frac{1}{3}$ or $+\frac{2}{3}$ at the highest energy accelerators would help to reassure us of the non - existence of real quarks.

Явно предложена, рассмотрена подробно и применена алгебра группы, в результате используемая в основе КХД. Предложены альтернативные партоны. Построена схема распределения для мезонов и барионов - и гораздо удачнее заполнен барионный октет после того, как устранены “фундаментальные барионы”.

Указанный нейтральный мезон (Состояние χ_0) - эта-мезон, с в основном электромагнитным, но также и распадом в 3 пиона. Предложены механизмы разделения масс барионов и мезонов (для вторых - удалось воспроизвести до некоторой точности массовые соотношения, впрочем, очень посредственно). Любопытно также, что даже при отсутствии явного поля, удалось показать, что можно ввести оператор, его эффективно создающий.

В целом, невозможно не переоценить значимость такой идеи - хотя, конечно, в оригинальном виде - это были лишь математические абстракции, очень удобные для формирования нужных состояний и категоризации барионов.