

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И - 207

2-81-279

ИВАНОВ  
Сергей Вилорович

СЛЕДСТВИЯ  $U(1) \times SU_L(2) \times SU(3)$  МОДЕЛИ  
С ЦЕЛОЗАРЯДНЫМИ КВАРКАМИ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ОИЯИ

А.В.Ефремов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ИТФ, Киев

Б.В.Струминский

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ОИЯИ

С.Б.Герасимов

Ведущая организация - Институт ядерных исследований АН СССР.

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ на заседании специализированного совета К 047.01.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук в ЛТФ ОИЯИ.  
Адрес: 141980, г. Дубна, Московская обл., ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1981 года.

Ученый секретарь

Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

В.И.Луравлев

#### Общая характеристика работы

Актуальность темы. Основные успехи современной физики элементарных частиц связаны с выяснением роли неабелевых калибровочных полей в механизме сильного взаимодействия. Исследования последних лет указывают на то, что цветовая симметрия является определяющим звеном при построении реалистических моделей сильного взаимодействия. Кроме того, оказалось, что вопросы симметрии тесно связаны с пониманием природы электромагнитных и слабых взаимодействий. Несомненно, стандартная КХД описывает основные свойства кварковых процессов, однако развитие направления, связанного с объединением в рамках теоретико-полевой схемы электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий, открывает новые возможности для интерпретации имеющихся экспериментальных данных.

Исследование цветовой  $SU_c(3)$  симметрии позволяет ответить на вопрос - каков истинный заряд кварков? Выяснение электромагнитных зарядов кварков является принципиально важной задачей, актуальность которой определена возможностью выбора: либо роль сильного взаимодействия выделена по сравнению с другими взаимодействиями и цвет ненаблюдаем, либо (если заряды кварков целые) необходимо построение объединенной калибровочной теории электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий с нарушенной цветовой симметрией. В последнем случае эффекты нарушения цветовой симметрии должны проявляться как в лептон-лептонных, так и в лептон-адронных и фотон-адронных реакциях. В настоящее время активно развивается направление, связанное с моделями "Большого объединения", в которых константы взаимодействия при сверхвысоких энергиях сливаются в единую асимптотически свободную константу унифицирующей группы. При доступных в настоящее время энергиях эффекты "Большого объединения" представляют чисто академический интерес. Согласно теореме Апелъквиста, уравнения ренормализационной группы фактически расщепляются на систему уравнений, которые характеризуют подгруппы объединяющей группы. Таким образом, применительно к современным энергиям точная симметрия (например  $SU(5)$ ) нарушается до симметрии соответствующих подгрупп. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в основе большинства идей и подходов к объединению взаимодействий лежат базисные группы  $U(1)$ ,  $SU(2)$  и  $SU(3)$ . Актуальность работы определяется необходимостью убедиться в принципиальной возможности построения объединенных моделей, не противоречащих современным экспериментальным данным, на фундаменте  $U(1)$ ,  $SU(2)$  и  $SU(3)$  групп.

В работе изучаются теоретические и экспериментальные возможности выявления эффектов объединения и нарушения цветовой симметрии в процессах  $eN \rightarrow eX$ ,  $\nu N \rightarrow \nu X$ ,  $\nu N \rightarrow \mu X$ ,  $\delta N \rightarrow \delta X$   
 $e^+e^- \rightarrow 2 \text{ jets}$ ,  $e^+e^- \rightarrow hX$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

Основная цель работы - на основе анализа глубоконеупругих лептон-адронных процессов, реакции  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны и в мюны, а также исследования неупругого фоторождения фотона выяснить, насколько целозарядная кварковая модель совместима с современными экспериментальными данными. Определить основные эффекты нарушения цветовой симметрии в рамках  $U(1) \cdot SU(2) \cdot SU(3)$  калибровочной модели и указать наиболее перспективные пути их экспериментального изучения.

Научная новизна. В диссертации рассчитано значение величины нарушения соотношения Каллана-Гросса, как в  $eN$ -, так и в  $\nu N$ -неупругом рассеянии. Определена величина, характеризующая модификацию  $Y$ -распределения во взаимодействии нейтральных токов с нуклонами. Впервые рассмотрена возможность образования глюонных струй при непосредственной аннигиляции  $e^+e^-$  в глюоны. Выявлен эффект подавления ряда партонных подпроцессов, характерный для объединенных моделей, включающий в себя сильное взаимодействие. Определена область применимости партонной модели при глубоконеупругом комптоновском рассеянии.

Последний результат справедлив как для КХД, так и для объединенной модели. Расчет  $\delta N \rightarrow \delta X$  реакции в модели электросильных взаимодействий позволил интерпретировать имеющиеся экспериментальные данные. Из экспериментов по проверке КЭД получено ограничение на возможные значения токовых масс глюонов. Указаны эксперименты, наиболее критичные для выявления электромагнитных зарядов кварков. Приведены расчетные графики, экспериментальная проверка которых явится наиболее хорошим тестом на целозарядные модели.

Практическая ценность работы. Последние экспериментальные данные по измерению  $R = \sigma_h/\sigma_r$  в глубоконеупругих процессах свидетельствуют о функциональной зависимости величины  $R$  от скейлинговой переменной  $x$ . В этой связи полученное соотношение, связывающее функции распределения глюонов и кварков с величиной  $R(x)$ , может оказаться весьма полезным для фитирования функции распределения глюонов внутри нуклонов при более точном измерении функциональной зависимости  $R(x)$ .

В связи с тем, что доказана возможность образования глюонных струй с угловым распределением  $\sim \sin^2\theta$ , этот эффект может быть проконтролирован экспериментально в реакции  $e^+e^- \rightarrow 2 \text{ jets}$

при достаточно точном измерении величины в соотношении  
 $d\sigma_{h\Omega} \sim 1 + \alpha \cos^2\theta$ .

Результаты исследования  $\delta N \rightarrow \delta X$  позволяют утверждать, что фотонного пучка с энергией  $\geq 40$  ГэВ в принципе достаточно, чтобы однозначно ответить на вопрос, каков электрический заряд кварков, для этого необходимо детектирование вторичных фотонов с

$K_1 \geq 3$  ГэВ. Отличие предсказаний КХД от предсказаний объединенной модели во много раз превосходит радиационные поправки и, следовательно, может явиться решающим аргументом в пользу одной из теорий. Наиболее желательное измерение величины  $\frac{d^2\sigma(\delta D \rightarrow \delta X)}{dx dy} / \frac{d^2\sigma(e D \rightarrow e X)}{dx dy}$ ,

где  $D$  - изоскалярная мишень, так как в этом случае теоретический результат практически не зависит от функции распределения кварков и глюонов. Это связано с тем, что в определенной области применимости партонной модели  $0,6 \leq x \leq 0,8$  фактически  $R(x) = \text{const}$ . Отметим, что указанные энергии фотонного пучка в настоящее время уже доступны экспериментально.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, а также на сессиях ОЯФ АН СССР в 1980-1981 г.г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 108 страниц печатного текста, в ней имеется 8 рисунков. Список литературы насчитывает 81 наименование.

Содержание работы. Во введении сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы. Приведено краткое изложение результатов и направлений развития объединенных калибровочных моделей.

В первой главе приведена схема построения объединенной калибровочной модели  $U(1) \cdot SU_c(2) \cdot SU(3)$  со спонтанно нарушенной цветовой симметрией. Все глюоны массивны. Теория формулируется для следующих кварковых и лептонных мультиплетов

$$q_{a(r)}^i = \begin{pmatrix} u_r & u_g & u_b \\ d_r & d_g & d_b \end{pmatrix}, \quad l_{a(l)} = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}.$$

$$q_{a(r)}^i = \begin{pmatrix} c_r & c_g & c_b \\ s_r & s_g & s_b \end{pmatrix}, \quad l_{a(l)} = \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}.$$

$$Q_{a(i)}^i = \begin{pmatrix} t_r & t_s & t_l \\ b_r & b_s & b_l \end{pmatrix}, \quad l_{a(i)} = \begin{pmatrix} \nu_c \\ \tau \end{pmatrix}.$$

$i = 1, 2, 3$  индекс цвета,  $a = 1, 2$  - индекс аромата.

Вопрос цветовой симметрии решается в зависимости от выбора кварковой модели для дробнозарядной модели

$$Q_a^1 = \begin{pmatrix} 2/3 & 2/3 & 2/3 \\ -1/3 & -1/3 & -1/3 \end{pmatrix}.$$

она является точной, а в случае целозарядной модели, предложенной Боголюбовым, Струминским, Тавхелидзе и независимо Ханом и Намбу,

$$Q_a = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

- нарушенной электромагнитным взаимодействием.

Для кварковых ароматов используются следующие зарядовые структуры:

$$u (Q_1, Q_2, Q_3)$$

$$d (Q_1-1, Q_2-1, Q_3-1)$$

$$s (Q_1-1, Q_2-1, Q_3-1)$$

$$c (Q_1, Q_2, Q_3).$$

Так как при классификации элементарных частиц существенно используется дробное значение усредненного по цвету заряда кварков, то необходимо условие  $\sum_{i=1}^3 Q_i = 2$ . Формулировка лагранжиана и расчет конкретных процессов проведен без конкретизации численных значений зарядов.

Существенным недостатком теории является нульзарядовое поведение констант самодействия хиггсовских полей, к тому же произвол в выборе хиггсовского сектора значительно ослабляет предсказательную способность объединенной модели.

Во второй главе анализируются свойства инвариантных зарядов объединенной модели. Рассмотрены данные по  $e^+e^-$  - аннигиляции в  $\mu^+\mu^-$  при больших ( $\sqrt{q^2} \gg 1$  ГэВ) и малых ( $\sqrt{q^2} \ll 1$  ГэВ) переданных 4-импульсах, а также при  $\sqrt{q^2} \approx m_B$  ( $m_B$  - масса глюона), т.е. в резонансной области, вычислен аномальный магнитный момент глюона. Сделан вывод, что объединенная модель не противоречит имеющимся экспериментальным данным по электромагнитным взаимо-

действиям лишь в том случае, когда токовые массы глюонов  $\Lambda < m_G \approx 0,3 + 0,4$  ГэВ, где  $\Lambda$  - масштабный фактор, определяемый экспериментально ( $\Lambda^2 \approx 0,1$  ГэВ<sup>2</sup>).

Существенной чертой анализа реакций глубоконеупругого лептон-адронного рассеяния, проведенного в главе III, является тот факт, что объединенная теория позволяет проконтролировать экспериментально роль партонных каждого сорта в динамике нуклона, это обусловлено наличием электрических зарядов у глюонов. В рамках предположения, что величина  $R = G_{\nu\sigma} = const$ , рассчитано ее значение в реакциях  $eN \rightarrow eX$  и  $\nu N \rightarrow \nu X$ , которое неплохо согласуется с экспериментальными данными в области изменения  $X$  от 0,4 до 0,8. В случае малых  $x \sim 0,1 + 0,5$  эксперимент по измерению функции хорошо согласуется с целозарядной теорией, если глюонные функции распределения  $\sim (1-x)^3/x$ , а кварковые функции распределения  $\sim (1-x)^3/\sqrt{x}$ . Доля импульса адрона, переносимая кварками, определенная из независимых измерений  $eN$  и  $\nu N$  (заряженные токи) - рассеяния, согласуется с хорошей точностью. Определена связь между протонной  $R_p$  и нейтронной  $R_n$  величинами ( $R_p/R_n = 0,55 \pm 0,08$ ). Расчет процессов с участием нейтральных нейтринных токов с учетом взаимодействия с глюонным морем приводит к дополнительному вкладу в  $y$  -распределение, который определяется величиной

$$\frac{2\pi d}{G_F^2 S dy} \left\{ \frac{dG_c^{y\nu}}{dy} + \frac{dG_n^{y\nu}}{dy} \right\} \Big|_{y=1} = -A_G \approx -0,008$$

В основе многих результатов лежит свойство усреднения электрических зарядов кварков по цветам ароматов при достаточно больших значениях переданного 4-импульса.

В п.3 третьей главы исследована реакция  $\delta N \rightarrow \delta X$ . Взаимодействие с цветным фотоном приводит к проявлению истинного (неусредненного по цвету) заряда кварков. Четко определена область применимости партонной модели для комптоновского рассеяния. Отличия предсказаний объединенной модели от КХД иллюстрируются графиками. Показано, что существующие данные лучше согласуются с целозарядной моделью, чем с КХД.

Принципиально новые эффекты, проявляющиеся в реакции  $e^+e^-$  - аннигиляции, как и в глубоконеупругом рассеянии, определены ролью заряженных глюонов. Расчеты, приведенные в главе IV, свидетельствуют о возможности образования адронных струй с угловым распределением  $\sim \sin^2\theta$ , что целиком связано с непосредственной  $e^+e^-$  - аннигиляцией в глюоны. Однако угловое распределение струй в их общей

статистике искажается незначительно ( на 0,1 - 0,2 по сравнению с КХД). В п. 4 четвертой главы и п. 4 третьей главы указано на специфический механизм подавления кварковых разветвлений глюонных линий в партонных подпроцессах как  $e^+e^-$ -аннигиляции, так и лептон-адронного рассеяния. Перечисленные выше результаты присущи только объединенным моделям и не имеют аналога в КХД.

В заключении работы акцентируется внимание на специфических предсказаниях объединенной теории, доступных для экспериментальной проверки в ближайшие годы.

#### Основные результаты работ

1. Сформулирована модель электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий без конкретизации электрических зарядов кварков. При стремлении масс глюонов к нулю теория расщепляется на КХД и модель Салама-Вайнберга.

2. Получено жесткое ограничение на значение токовых масс глюонов  $m_g \approx 0,3 \div 0,4$  ГэВ. Это ограничение следует из расчета аномального магнитного момента мюона и из расчета процесса  $e^+e^-$ -аннигиляции в мюоны при переданных 4-импульсах  $|q^2| \gg m_g^2$ ,  $|q^2| \ll m_g^2$  и в области  $|q^2| \sim m_g^2$  с последующим сравнением с экспериментальными данными. Кроме того, учтено, что масштабный фактор  $\Lambda$  должен быть меньше  $m_g^2$ .

3. В рамках объединенной модели рассчитаны реакции взаимодействия заряженных и нейтральных нейтринных токов с нуклонами. Показано, что эффекты объединения незначительно изменяют величину угла Вайнберга ( на величину 0,02 ). Получена модификация  $\chi$ -распределения в нейтринных реакциях, обусловленная взаимодействием с глюонным морем. Нарушение соотношения Каллана-Гросса в нейтринных процессах незначительно  $R \sim 0,01 - 0,02$ .

4. Рассчитаны параметры нарушения цветовой симметрии в процессах  $eN$ -рассеяния. Для величины  $R = \frac{G_4}{G_T}$  получено следующее соотношение  $R = \frac{D}{12} \left[ \frac{G(\omega + G(\omega))}{\sum_i Q_i^2} [q(\omega) + \bar{q}(\omega)] \right]$ , которое может быть использовано для фитирования глюонных функций распределения  $(D = \sum Q_i^2 - \frac{1}{3}(\sum Q_i)^2)$ . В предположении, что при  $x \in (0,4 + 0,8)$ , величина  $R$ -константа, фактически вычислено отношение  $R_p/R_n$ .

5. Рассмотрена  $e^+e^-$ -аннигиляция в адроны, показано, что в области  $\sqrt{s^2} < 4$  ГэВ величина  $R = G(e^+e^- \rightarrow h) / G(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \sim 2,1$ , при  $\sqrt{s^2} > 4$  ГэВ  $R \sim 3,6$ . Учет хиггсовских бозонов повышает значение  $R$  на 1/2. В произвольном порядке теории возмущения доказано подавление характерных для объединенной модели партонных подпроцессов.

6. Рассчитан процесс глубокоэластичного фоторождения фотона.

Показано, что предсказания КХД отличаются от экспериментальных данных на порядок, в то время как целозарядная модель согласуется с измерениями вполне удовлетворительно.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что объединенная модель описывает широкий круг имеющихся экспериментальных данных не хуже, чем КХД и модель Салама-Вайнберга. Следовательно, до сих пор нельзя дать однозначного ответа на вопрос: каков истинный электрический заряд кварков? Однако измерения протон-протонных реакций с выходом реальных фотонов, проводящиеся в ЦЕРНе, а также регистрация адронных струй при двухфотонной аннигиляции группой **PLUTO** на **PETRA** позволят в ближайшие годы прояснить эту проблему.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Верешков Г.М., Еришов С.А., Иванов С.В., Михайлов С.В. Лептон-адронные процессы в теории с целозарядными кварками. ЯФ, т. 32, вып. 1/71, с. 227-235, 1980.
2. Иванов С.В. Эффективные калибровочные константы  $U(1) \cdot SU(3)$  теорий. Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы, № 3, с. 48-51, 1980.
3. Ефремов А.В., Иванов С.В., Нестеренко В.А. Физические константы и инвариантные заряды  $U(1) \cdot SU(3)$  модели. Препринт ОИЯИ P2-80-519, Дубна, 1980.
4. Ефремов А.В., Иванов С.В., Михайлов С.В. Глубокоэластичное комптоновское рассеяние как тест на модели с целозарядными кварками. Препринт ОИЯИ P2-80-659, Дубна, 1980.
5. Ефремов А.В., Иванов С.В., Михайлов С.В. Глубокоэластичное комптоновское рассеяние как тест на модели с целозарядными кварками. Письма в ЖЭТФ, 32, в. II, с. 669-673, 1980.
6. Efremov A.V., Ivanov S.V., Mikhailov S.V. The process  $\gamma N \rightarrow \gamma X$  in the theory with broken colour symmetry. JINR communication E2-81-96, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 апреля 1981 года.