

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Д2-85-206

Н.Н.Боголюбов

**ЦВЕТНЫЕ КВАРКИ -
НОВАЯ СТУПЕНЬ ПОЗНАНИЯ МИКРОМИРА**

*Доклад, прочитанный на общем собрании
Академии наук СССР
18 марта 1985 года*

1985

ПОПРАВКА

Стр.8, второй абзац снизу. Следует читать:

"Гипотеза цветных кварков явилась той кардинальной идеей, которая открыла путь к решению упомянутых выше принципиальных проблем теории элементарных частиц и, следовательно, — к развитию последовательной картины кваркового строения материи".

Будущее физики и успешное развитие опирающихся на ее достижения других отраслей естествознания в значительной степени зависят от прогресса в познании внутренней структуры и фундаментальных законов взаимодействия элементарных частиц.

Вопрос о природе материи является извечным вопросом естествознания. От атомистики древних до современных теорий элементарных частиц проходит идея о существовании истинно элементарных, фундаментальных составляющих материи.

Около 220 лет назад великий русский ученый М.В.Ломоносов в начатых им незадолго до своей смерти трудах "Микрология" и "Системы всей физики" пытался создать целостную физическую картину мира на основе своей "корпускулярной философии" и развиваемых им взглядах на природу материи, которой "исполнен океан всемирного пространства" и которая подчиняется "ненарушимым движениям законам" /1/.

Нынешний век, ознаменовавшийся революционными сдвигами в наших взглядах на пространство и время, созданием релятивистской механики и квантовой теории, раскрытием структуры атома и атомного ядра, овладением ядерной энергией, открытием целого мира элементарных частиц и осознанием единства всех основных сил природы, вписал новую страницу в историю развития идей о природе материи.

Тесно связанный с развитием фундаментальных исследований процесс создания новой техники и технологии привел к качественно новой ступени познания структуры элементарных частиц и атомного ядра.

Возникла новая наука — физика высоких энергий, имеющая в своем распоряжении мощные ускорители заряженных частиц высоких энергий и интенсивностей, крупные уникальные физические установки, современную электронику и быстродействующие электронно-вычислительные устройства.

В результате плодотворного объединения релятивистской и квантовой механики возникло новое мощное направление — квантовая теория поля, являющаяся в течение нескольких десятилетий теоретическим фундаментом физики высоких энергий и ядерной физики, основой теоретических построений в пограничных областях физики, таких, как квантовая статистика, физика твердого тела, биофизика и других.

Усилия многих выдающихся теоретиков, среди которых достойное место принадлежит советским ученым, привели к построению стройного и мощного аппарата квантовой теории поля.

Составные модели элементарных

①

частиц

Ферми и Янг (1949):

$$\begin{cases} \pi^+ = p\bar{n} \\ \pi^- = n\bar{p} \\ \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n}) \end{cases}$$

$m_\pi \approx 140 \text{ МэВ}$

$m_p \approx 940 \text{ МэВ}$

($1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ электронвольт}$)

Гипотеза кварков (1964) Гелл-Манн
Цвейг

Мезоны = $q\bar{q}$

Барионы = qqq , ($q = u, d, s$)

Квантовые числа (ароматы) кварков

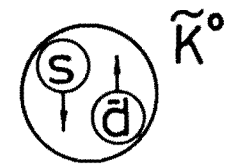
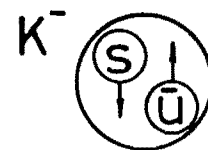
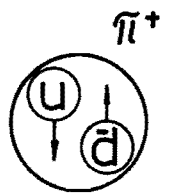
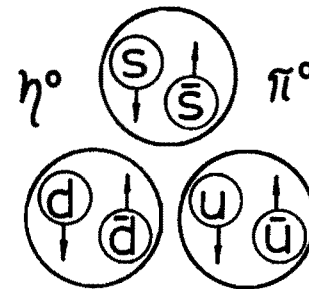
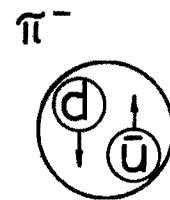
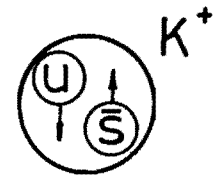
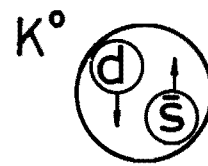
q (кварки)	эл. заряд e	странность s	изоспин i	проекция изоспина i_3
u (<u>u</u> p)	$2/3$	0	$1/2$	$+1/2$
d (<u>d</u> own)	$-1/3$	0	$1/2$	$-1/2$
s (<u>s</u> trange)	$-1/3$	-1	0	0

Спин кварков = $1/2$. Барионное число $B = 1/3$.

Октет псевдоскалярных мезонов

②

$J^P = 0^-$

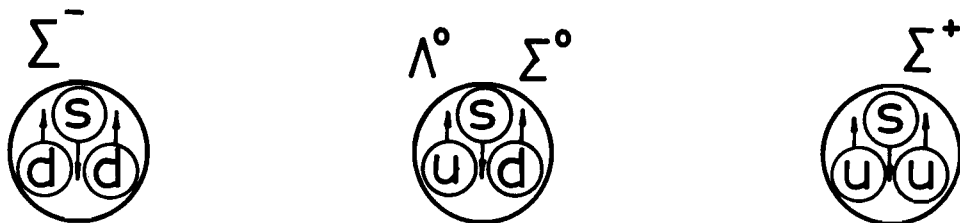


$B = 0$

Октет барионов ($J = \frac{1}{2}$)

③

$$B = 1$$



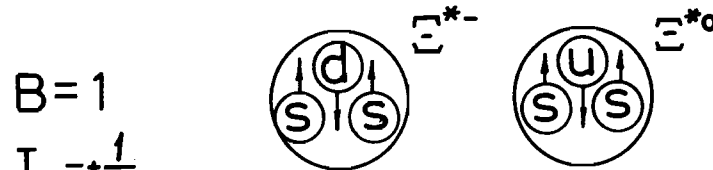
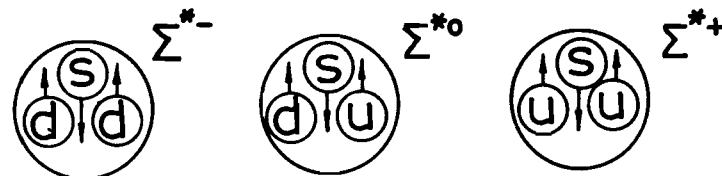
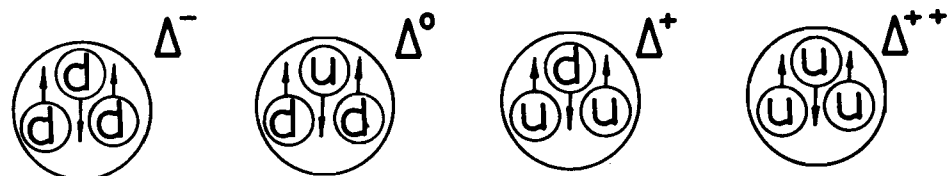
Закон сложения спинов кварков:

$$p (J_z = \frac{1}{2}) = \sqrt{\frac{2}{3}} |u' u' d'\rangle - \sqrt{\frac{1}{3}} |u' u' d'\rangle$$

$$n (J_z = \frac{1}{2}) = \sqrt{\frac{2}{3}} |d' d' u'\rangle - \sqrt{\frac{1}{3}} |d' d' u'\rangle \text{ и т.д.}$$

Декуплет барионов с $J = \frac{3}{2}$:

④



$$B = 1$$

$$J_z = +\frac{1}{2}$$



$$\Delta^{++} (J_z = +\frac{3}{2}) = |u' u' u'\rangle$$

$$\Omega^- (J_z = +\frac{3}{2}) = |s' s' s'\rangle \text{ и т.д.}$$

Противоречие с принципом Паули:

Каждое квантовое состояние может занимать один и только один фермион определенного типа! Кварки - фермионы?

И, наконец, отсутствовало какое-либо объяснение удивительно-му факту — почему, несмотря на усиленные экспериментальные поиски, кварки не обнаружены в свободном, изолированном состоянии? Последняя проблема получила известность как проблема конфайнмента, или невыедания кварков.

Анализ этих принципиальных проблем физики элементарных частиц привел в 1965 году в работе Тавхелидзе, Струминского и моей, выполненной в Дубне¹⁵⁻¹⁷ а также независимо в работе Хана и Намбу¹⁸ (США) и Миямото¹⁹ (Япония), к гипотезе о наличии у кварков нового, неизвестного ранее квантового числа или заряда, названного впоследствии цветом.

Согласно этой гипотезе, кварки являются обычными фермионами и, следовательно, подчиняются статистике Ферми-Дирака. Однако для каждого типа кварков с заданными значениями изотопического спина, электрического заряда и странности (то есть для каждого аромата кварков) имеется три унитарно эквивалентных состояния, различающихся значениями нового квантового числа — цвета (см. иллюстр. 5,6).

Таким образом, общее число кварков, из которых строятся адроны, утроилось с введением цвета, хотя число самих адронов, наблюдаемых в природе, должно было остаться прежним. Это обстоятельство образно можно выразить так: наблюдаемые адроны — мезоны и барионы — в отличие от кварков, бесцветны. Иными словами, цвета кварков компенсируют друг друга внутри адронов аналогично тому, как электрические заряды ядра и окружающих его электронов компенсируют друг друга в нейтральных атомах химических элементов. Это не означает, однако, что цвет никоим образом не проявляет себя на опыте (см. иллюстр. 7).

Прекрасный пример прямого экспериментально наблюдаемого проявления цвета кварков дает нам измерение полной вероятности образования адронов в процессах аннигиляции сталкивающихся электрон-позитронных пар при высоких энергиях. В соответствии с предсказанием теории данная вероятность определяется числом кварковых цветов и величинами электрических зарядов кварков, образующихся в этих процессах.

Гипотеза кварков явилась той кардинальной идеей, которая открыла путь к решению упомянутых выше принципиальных проблем теории элементарных частиц и, следовательно, — к развитию последовательной картины кваркового строения материи.

Как уже говорилось выше, главной проблемой на этом пути явилось отсутствие кварков в свободном состоянии. Объяснение явления невыедания кварков из адронов является одной из наиболее узловых принципиальных проблем, стоящих перед современной физикой элементарных частиц. Хотя и очевидно, что окончательное решение проблемы "невыедания" остается все же экспериментом, был предпринят ряд попыток дать логически непротиворечивое объяснение "вечному заключению" кварков внутри адронов.

Гипотеза цветных кварков (1965) ⁵

Цвет - новое квантовое число, позволяющее расположить на низшем энергетическом уровне до трех кварков с совпадающими ароматами и проекциями спинов без противоречия с принципом Паули для фермионов.

Боголюбов
Струминский
Тавхелидзе
*
Намбу, Хан
*
Миямото

Цветовые состояния кварка: $q = (q, q, q)$

Адроны строятся из кварков различных цветов и сами цвета не имеют (бесцветные):

$$\Omega^-(J_z = +\frac{3}{2}) = |s' s' s' \rangle$$

$$P(J_z = +\frac{1}{2}) = \frac{1}{\sqrt{18}} \{ 2|u' d' \rangle + 2|u' d' u' \rangle +$$

$$+ 2|d' u' u' \rangle - |u' u' d' \rangle - |u' u' d' \rangle -$$

$$- |u' d' u' \rangle - |u' d' u' \rangle - |d' u' u' \rangle - |d' u' u' \rangle \}$$

и т. д.

Цветные кварки

I				$e = 2/3$
				$e = -1/3$
II				$e = 2/3$
				$e = -1/3$
III				$e = 2/3$
				$e = -1/3$

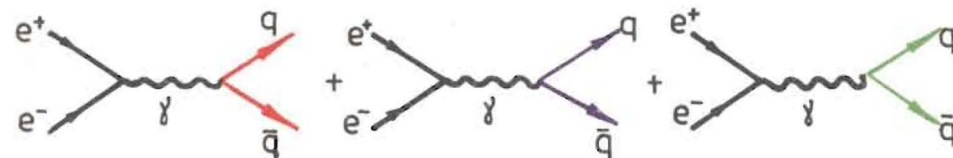
Спин $j = 1/2$. Барьонное число $B = 1/3$.

(Квантовые числа антикварков имеют противоположный знак.)

Проявление цвета кварков на опыте

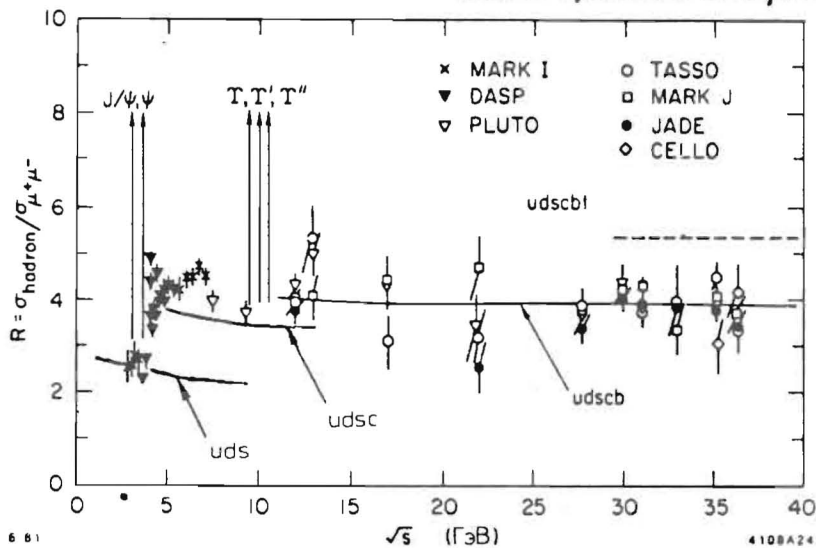
Пример: Аннигиляция e^+e^- пар в адроны при высоких энергиях $E = \sqrt{s}$:

$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} \text{ — адроны}$$



$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \sim 3 \times \sum_i e_i^2$$

сумма по ароматам
число цветов кварков



$$\sqrt{s} > 10 \text{ ГэВ} : R = 3 \times (e_u^2 + e_d^2 + e_c^2 + e_s^2 + e_b^2) = 11/3$$

udscb

Так, динамическая кварковая модель, разработка которой началась в Дубне в 1965 году, опиралась на предположение о том, что кварки — весьма тяжелые объекты, связанные в адронах огромными силами, которые, с одной стороны, обуславливают большой дефект масс кварков в адронах, с другой — препятствуют их вылету наружу^{/5-7/} (см. иллюстр.8).

Удерживаемые стенками потенциальной ямы, кварки в этой модели оказывались эффективно свободными, или квазинезависимыми внутри нее^{/10-11/}. Подобное поведение привело к концепции асимптотической свободы кварков на малых расстояниях, играющей важнейшую роль в физике адронов.

Динамическая кварковая модель позволила дать систематическое описание как статических наблюдаемых характеристик элементарных частиц (магнитных моментов, аксиально-векторных констант слабых переходов и других), так и формфакторов адронов. Эти исследования дали толчок развитию современных кварковых моделей элементарных частиц.

Принципиальный шаг на пути развития динамической теории адронов сделал Намбу^{/12/}, который впервые ввел в рассмотрение векторные поля — переносчики цветового взаимодействия — так называемые глюоны (от английского слова "glue", т.е. клей) (см. иллюстр.9).

Взаимодействия двух цветовых зарядов, переносимые глюонами, по аналогии с электродинамическим взаимодействием двух электрических зарядов, были названы хромодинамическими взаимодействиями, а описывающая их теория — квантовой хромодинамикой. В отличие от электродинамики с единственным фотоном, в хромодинамике присутствует восемь глюонных полей в соответствии с восемью различными способами переноса кварковых цветов. При этом оказывается, что глюоны обладают отличным от нуля цветом, и, следовательно, сами являются источником хромодинамических взаимодействий (см. иллюстр.10).

Это важное отличие от электродинамики связывается с возможностью существования сил, действующих между двумя цветовыми зарядами, которые не убывают с расстоянием. Иными словами, между разносимыми на большие расстояния кварками как бы натягивается струна, препятствующая их разлету. Струна может, однако, разорваться в результате рождения из вакуума новой кварк-антикварковой пары, приводя к образованию двух новых бесцветных систем, скажем, двух мезонов (см. иллюстр.11).

Следует заметить, что квантовая хромодинамика, развитие которой мы наблюдаем в течение последних лет, возникла как результат объединения гипотезы цветных кварков и цветовой унитарной симметрии с принципом локальной калибровочной инвариантности Янга-Миллса. В этой связи важно подчеркнуть, что гипотеза Гринберга о парафермистатистике кварков, высказанная им в 1964 году^{/13/}, не позволяет ввести калибровочную унитарную симметрию, лежащую

Динамическая составная модель адронов

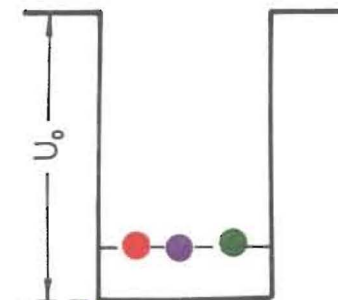
Принцип невылетаия (заключения) кварков:

Наблюдаемые состояния (адроны)-бесцветны, объекты с отличным от нуля цветом (кварки, дикварки и т.п.) в свободном состоянии не существуют.

„Модель „кваркового мешка“: Дубна (1965)

П. Боголюбов
(1967)

Боголюбов
Струминский
Тавхелидзе



Кварки в мешке квазинезависимы (асимптотически свободны) на малых расстояниях и сильно взаимодействуют со стенками на больших расстояниях.

Большая масса кварков M „съедается“ огромными скалярными силами ($M \approx U_0$)
⇒ эффект усиления магнитного момента связанных кварков в нуклоне.

9

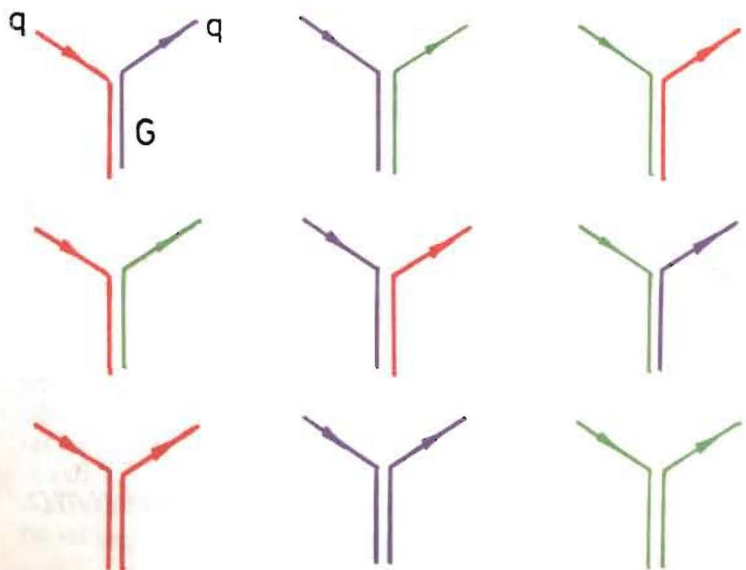
Квантовая хромодинамика -
- калибровочная теория ядерных сил

Цвет \Rightarrow заряд нового типа ("цветовой")

Глюоны - векторные бозоны, переносчики взаимодействия между цветовыми зарядами.

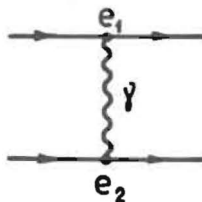
Намбу (1966).

Всего 8 способов переноса цвета кварков - 8 типов глюонов ($3 \times 3 - 1 = 8$):



10

КЭД

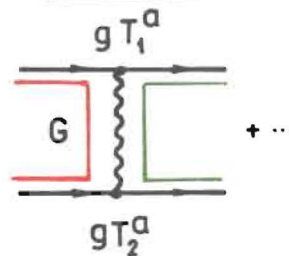


$$U = \frac{e_1 e_2}{4\pi r}$$

e_i - кратны заряду электрона e ,

$$e^2/4\pi \sim 1/137$$

КХД



$$U = \alpha_s T_1^a T_2^a \cdot f(r)$$

T_i^a - генераторы группы цветовой симметрии $a = 1, 2, \dots, 8$

$$f(r) \sim \frac{1}{r} + cr$$

Учет эффектов поляризации вакуума и других высших квантовых поправок:

$$\alpha_s = g^2/4\pi \Rightarrow \alpha_s(Q^2) - \text{эффективная константа связи КХД.}$$

Свойства асимптотической свободы:

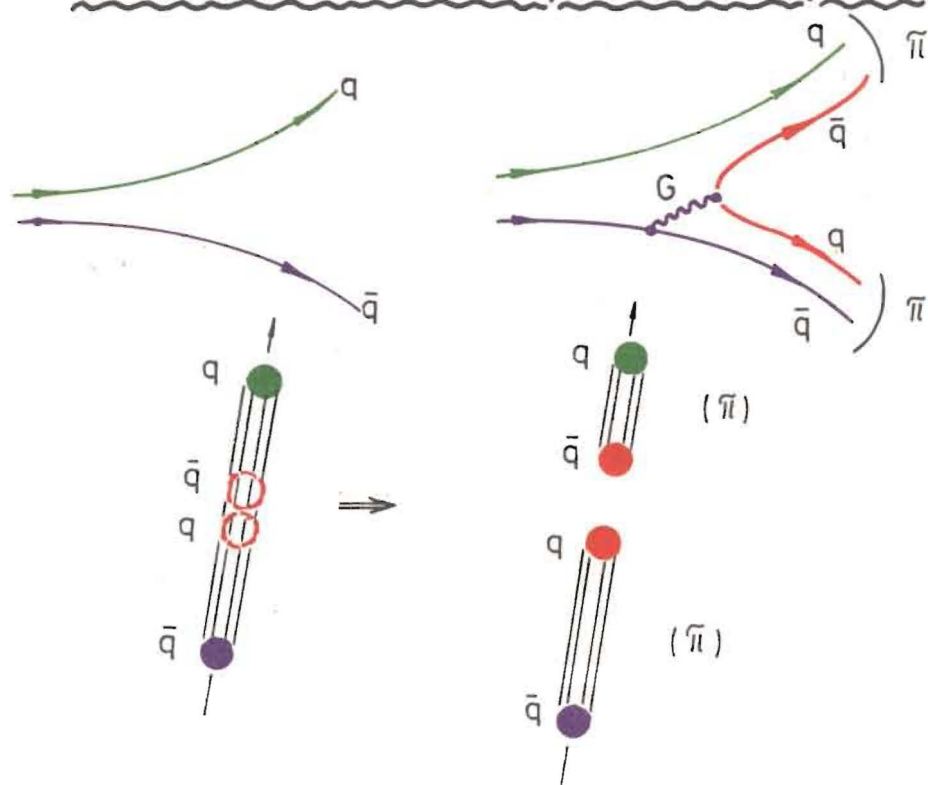
$$\alpha_s(Q^2) \sim 1/\ln Q^2$$

$$(Q^2 \sim \infty)$$

Метод ренормгруппы в кв. теор. поля
 Боголюбов
 Логунов
 Ширков

(1955 - 1956)

Аналогия не убывающих с расстоянием хромодинамических сил между цветными кварками со струной



При разлете $\bar{q}q$ на большие расстояния ($\sim 10^{-13}$ см) „струна“, связывающая кварки, „рвется“, и в месте разрыва образуется из вакуума новая пара $\bar{q}q$, что приводит к возникновению двух струн и в результате повторения — к образованию системы адронов в конечном состоянии реакции.

в основе квантовой хромодинамики, и является, таким образом, физически неприемлемой альтернативой гипотезе цветных ферми-кварков^{/14/}.

Невозможно в нескольких словах осветить все достижения квантовой хромодинамики, развитие которой знаменует значительный прогресс теории сильных взаимодействий.

С неабелевым, т.е. некоммутативным характером цветовой калибровочной симметрии и нетривиальными топологическими свойствами вакуумных конфигураций поля в квантовой хромодинамике связываются надежды на последовательное теоретическое решение проблемы конфайнмента.

Важную роль в квантовой хромодинамике играют разработанные Логуновым, Ширковым и мною методы ренормализационной группы в теории полей^{/15-17/}, которые легли в основу доказательства свойства асимптотической свободы и позволили развить эффективные методы расчета высших приближений теории возмущений квантовой хромодинамики. Эти методы, а также операторное разложение Вильсона и дисперсионные правила сумм квантовой хромодинамики служат в настоящее время надежной базой теоретического расчета многих важнейших характеристик физики адронов^{/18-19/}.

Следует подчеркнуть, что объяснение закономерностей спектроскопии адронов само по себе еще не могло служить решающим аргументом в пользу гипотезы существования кварков. Необходимо было найти прямое динамическое проявление кварковой структуры адронов. Адекватный путь к этому лежит через исследование особенностей процессов взаимодействия частиц при высоких энергиях, которые дают наиболее непосредственную информацию о внутреннем строении элементарных частиц и атомных ядер (см. иллюстр. 12).

Заметим, что еще в 1911 году Резерфорд в результате своих опытов по рассеянию заряженных α -частиц на тонких фольгах, установил наличие плотного ядра в атомах химических элементов, что привело к возникновению новой, так называемой планетарной модели атома.

Повышение энергии взаимодействующих частиц, связанное с продвижением в область все более малых расстояний, вскрыло удивительную по своему многообразию и сложности картину микромира.

Одна из характерных черт процессов, протекающих при столкновении двух частиц высоких энергий, — их существенная неупругость, связанная с возможностью образования новых, вторичных частиц. Чем выше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество новых частиц может родиться в результате такого столкновения. Разнообразие и сложность описания конечных продуктов реакции при достаточно высоких энергиях делают здесь непригодными традиционные методы исследования.

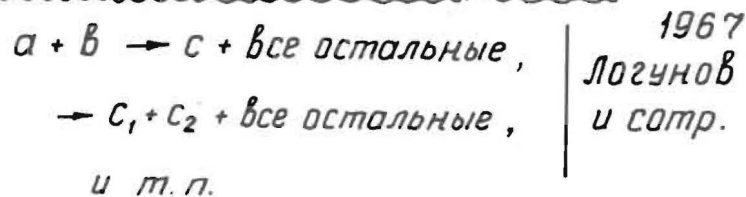
В 1967 году А.А.Логуновым был выдвинут принципиально новый подход к изучению процессов неупругого взаимодействия частиц

Кварк-глюонная структура адронов и ее динамическое проявление в столкновениях частиц при высоких энергиях

Опыты Резерфорда (1911) по рассеянию
заряженных α -частиц на тонких фольгах
⇒ обнаружение плотного ядра в атомах
химических элементов.

Высокие энергии ⇒ множественное
рождение частиц.

Концепция инклюзивной реакции:



Инклюзивный метод (inclusive - включающий в себя)
- позволил включить в рассмотрение все каналы
реакции и дать модельно-независимое
описание многочастичных процессов при
высоких энергиях на основе общих прин-
ципов квантовой теории поля.

при высоких энергиях. В основе этого подхода лежит концепция так называемого инклюзивного измерения или инклюзивной реакции^{/20,21/}.

Вместо того, чтобы следить за всеми вновь образующимися частицами, в этом подходе ставится задача изучения характеристик лишь одной или нескольких выделенных вторичных частиц заданного сорта, однако взятых по совокупности во всех возможных каналах реакции.

Инклюзивный (от английского "inclusive", т.е. включающий в себя) подход позволил включить в рассмотрение все каналы реакции и дать модельно-независимое описание важнейших закономерностей многочастичных процессов при высоких энергиях на основе общих принципов квантовой теории поля.

Замечательно, что как адронные инклюзивные реакции, так и реакции глубоконеупругого рассеяния лептонов на нуклонах обнаруживают всеобщее свойство приближенной автомодельности (или самоподобия), универсальное для процессов сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий^{/22/}. Заключается это свойство в том, что все наблюдаемые характеристики соответствующих процессов оказываются зависящими лишь от безразмерных комбинаций больших кинематических переменных типа энергий, импульсов частиц и т.п. В определенном смысле мы имеем здесь близкую аналогию с явлением автомодельности в газо- и гидродинамике (см. иллюстр. 13).

Явление автомодельности инклюзивных и глубоконеупругих процессов указывает на локальный, точечный (т.е. масштабно-инвариантный) механизм взаимодействия при высоких энергиях в полном соответствии с гипотезой о кварк-глюонной структуре адронов и свойством асимптотической свободы квантовой хромодинамики.

Теоретические исследования, проведенные мною совместно с Владимиром и Тавхелидзе, а также Логановым с сотрудниками, позволили строго обосновать существование автомодельного асимптотического поведения в квантовой теории поля и установить ряд важнейших свойств глубоконеупругих и инклюзивных процессов^{/23, 24/}.

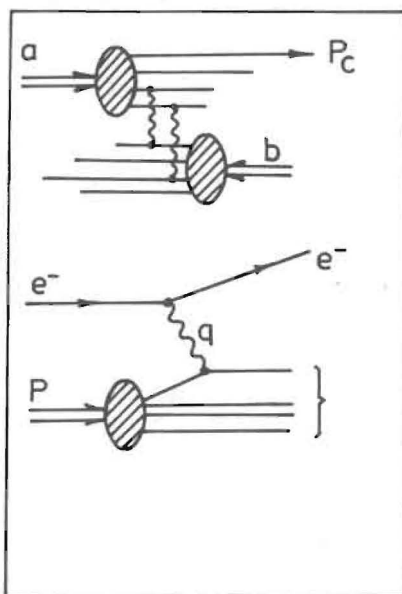
Отметим, что впервые масштабно-инвариантное поведение инклюзивных реакций сильного взаимодействия адронов экспериментально было обнаружено в 1969 году, сразу же после введения в строй протонного ускорителя Института физики высоких энергий в Серпухове, в то время крупнейшего в мире. Масштабно-инвариантное поведение процессов глубоконеупругого взаимодействия лептонов с адронами впервые наблюдалось в опытах на линейном ускорителе электронов в Стэнфорде (США).

Ярким примером динамического проявления кварковой структуры элементарных частиц в процессах взаимодействия при высоких энергиях являются установленные в 1973 г. Матвеевым, Мурадяном и Тавхелидзе так называемые формулы кваркового счета, определяющие закон асимптотического поведения и сечений упругого рассеяния

Всеобщее свойство автомодельности (самоподобия) инклюзивных и глубоконеупругих процессов

Масштабная инвариантность на малых расстояниях - универсальное свойство сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий.

Экспериментальное обнаружение:



Серпухов (1969) - инклюзивные спектры вторичных частиц,

$$x = \frac{|\vec{P}_c|}{E_a} - \text{безразмерная характеристика}$$

Стэнфорд (1968) - глубоконеупругое рассеяние на нуклоне,

$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q} - \text{зависимость}$$

„Точечно-подобное“ поведение неупругих γN взаимодействий.

Марков (1964).

Боголюбов
Владимир
Тавхелидзе
*
Логунов
и сотрудники

Доказательство существования автомодельных асимптотик в локальной квантовой теории поля.

на большие углы и формфакторов адронов в зависимости от числа составляющих их кварков ^{/25/} (см. иллюстр.14,15).

Формулы кваркового счета удивительно хорошо описывают многочисленные экспериментальные данные по рассеянию элементарных частиц, позволяя непосредственно из опыта извлекать информацию о кварковой структуре адронов и легчайших атомных ядер.

Следует отметить, что в последние годы идеи и представления теории цветных кварков начинают все более проникать в физику атомного ядра. Главная проблема здесь состоит в том, чтобы объяснить природу и основные закономерности ядерных сил, исходя из фундаментальных хромодинамических взаимодействий кварков и глюонов. В работах последнего времени весьма интенсивно обсуждается проблема учета кварковых степеней свободы при описании структуры ядер и динамики ядерных взаимодействий на малых расстояниях, указывается на возможность существования нового типа высоковозбужденных состояний ядерной материи, характеризующихся наличием своеобразной внутренней цветовой поляризации — так называемого "скрытого цвета" ^{/28/} (см. иллюстр.16).

В становлении этой новой области ядерных исследований, расширяющей наши представления о сложном строении атомного ядра и называемой сейчас релятивистской ядерной физикой, большую роль сыграли теоретические работы А.М.Балдина и инициированные им много лет назад широкие экспериментальные исследования на пучках релятивистских ядер синхрофазотрона в Дубне, приведшие, в частности, к установлению границ применимости протон-нейтронной модели ядра ^{/27,28/}.

Одной из главнейших закономерностей развития теории на современном этапе является тенденция к объединению всех основных сил природы — электромагнитных, сильных, слабых и гравитационных в рамках единой теории.

Важное значение на пути реализации этой кардинальной идеи приобрели понятие вырожденного вакуума и принцип спонтанного нарушения симметрии, сыгравшие ключевую роль при разработке микроскопической теории явлений сверхтекучести и сверхпроводимости ^{/29/}.

Недавнее открытие в Европейском центре ядерных исследований в Швейцарии так называемых Z- и W-промежуточных бозонов знаменовало крупный успех модели Глэшоу-Вайнберга-Салама, объединившей описание электромагнитных и слабых взаимодействий в рамках единой калибровочной теории электрослабых взаимодействий.

На очереди стоит задача разработки приемлемой теории великого объединения, включающей в общую схему хромодинамические силы, действующие между цветными кварками и глюонами.

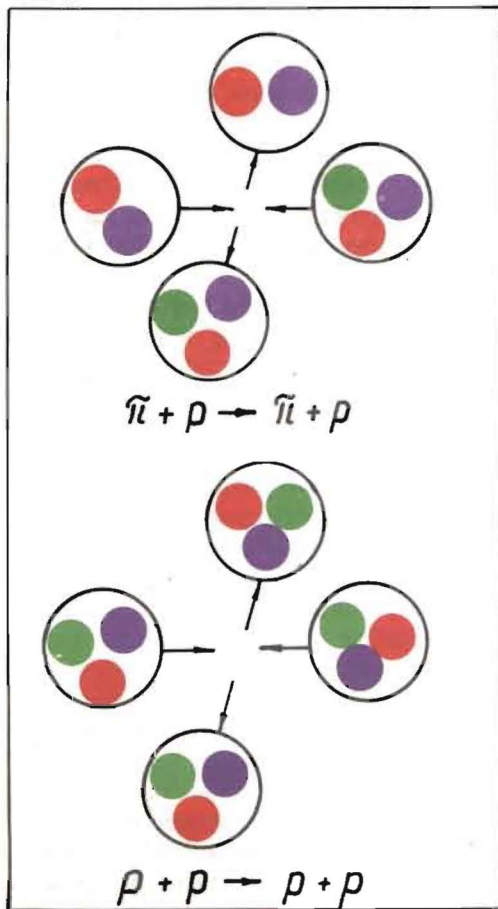
Наибольший интерес, на наш взгляд, вызывает при этом вопрос о том, является ли цветовая симметрия абсолютно точным или приближенным законом природы. С этой еще не решенной принципиальной проблемой теории элементарных частиц тесно связан вопрос о зарядах кварков.

Формулы кваркового счета (1973) ⁽¹⁴⁾

Степенной закон для сечения упругого рассеяния адронов на большие углы θ при высоких энергиях $E = \sqrt{s}$:

$$\frac{d\sigma}{dt}(ab \rightarrow cd) \sim \left(\frac{1}{s}\right)^{n_a+n_b+n_c+n_d-2} \cdot f(\theta)$$

n_a, n_b, n_c, n_d - числа кварков в адронах a, b, c, d .



$$n_a + n_b + n_c + n_d = 10$$

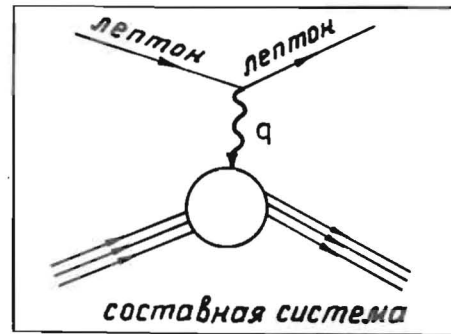
$$\frac{d\sigma}{dt}(\pi p \rightarrow \pi p) \sim \frac{1}{s^8}$$

$$n_a + n_b + n_c + n_d = 12$$

$$\frac{d\sigma}{dt}(pp \rightarrow pp) \sim \frac{1}{s^{10}}$$

Матвеев
Мурадян
Тавхелидзе

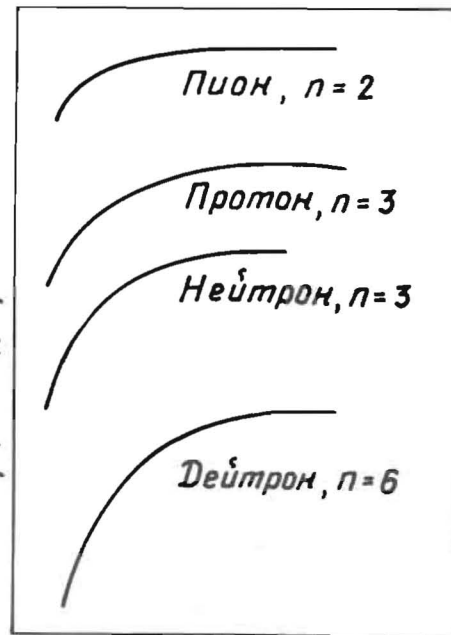
Формула кваркового счета для фактора составной системы



$$F_a(t) \sim \left(\frac{1}{t}\right)^{n_a-1}$$

n_a - число элементарных составляющих системы

$t = -q^2$ - квадрат



$$F_\pi(t) \sim \frac{1}{t}$$

$$F_{p,n}(t) \sim \frac{1}{t^2}$$

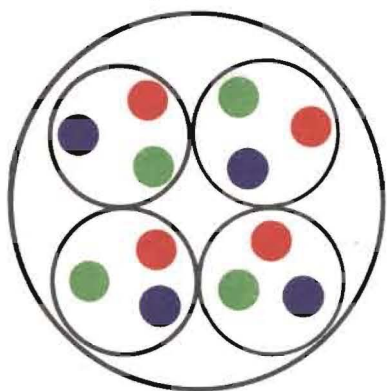
$$F_d(t) \sim \frac{1}{t^5}$$

квадрат передачи импульса, q^2 (ГэВ²)

Кварки в ядрах

Проблема - объяснение основных закономерностей ядерных сил, исходя из фундаментальных хромодинамических сил, действующих между цветными кварками и глюонами.

${}^4\text{He} = pppn$



Новая задача - поиск проявлений кварковых степеней свободы ядер ("скрытый цвет")

12 - кварков

Опыты с релятивистскими ядрами

в Дубне ⇒ Релятивистская ядерная физика -

(1971) - новая область исследований на стыке физики ядра и физики элементарных частиц.

Изучение кварк-глюонной структуры атомных ядер.

Заметим, что уже в первых работах, посвященных составным кварковым моделям, указывалось на возможность выбора целочисленных значений электрических и барионных зарядов цветных кварков. Введение целочисленных зарядов кварков, зависящих от их цветового состояния, приводит, очевидно, к нарушению цветовой симметрии, по крайней мере, в электромагнитных взаимодействиях частиц.

Исследование проблемы спонтанного нарушения цветовой симметрии привело в работах последнего времени к интересным и важным результатам, касающимся особенностей структуры вакуума в калибровочных теориях с цветными скалярными полями и вопроса о существовании легких скалярных кварков ^{/30/}.

Подчеркнем, что гипотеза о целочисленности кварковых зарядов вместе с предположением о спонтанном нарушении цветовой и других калибровочных симметрий привела к представлению о нестабильных кварках и послужила исходным моментом построения первых объединенных калибровочных моделей элементарных частиц ^{/31/}.

Принципиальную роль на пути построения теории великого объединения играет идея симметрии между кварками и лептонами. Отражая достигнутый на сегодняшний день уровень знаний об элементарных частицах, мир кварков и лептонов предстает перед нами в удивительно симметричной форме (см. иллюстр.17).

Фермионные поля, соответствующие кваркам и лептонам, обычно группируются в дублеты — простейшие двумерные представления группы изотопического спина.

Порядок, в котором расставлены кварки и лептоны, отвечает закону возрастания их массы. Очевидно, что это же обстоятельство определяет и хронологию их открытия — более тяжелые кварки и лептоны требуют для своего обнаружения больших энергий. Сообщение о возможном обнаружении наиболее тяжелого из известных нам кварков, — так называемого t -кварка, появилось лишь около года назад.

Было бы уместным спросить: исчерпывается ли уже известными кварками и лептонами мир фундаментальных частиц, или этот ряд будет продолжен? Будущее развитие физики высоких энергий позволит дать правильный ответ на этот далеко не схоластический вопрос.

Отметим то значительное влияние, которое оказала на развитие теории элементарных частиц высказанная Марковым и Понтекорво в 1957 году и получившая впоследствии прямое экспериментальное подтверждение гипотеза о существовании двух типов нейтрино — электронного и мюонного ^{/32,33/}. В настоящее время существуют основанные на данных астрофизики и космологии соображения о том, что число нейтрино — легчайших нейтральных лептонов — не может превышать трех-четырёх. При этом большой интерес как теоретиков, так и экспериментаторов вызывает высказанная Понтекорво идея об осцилляциях нейтрино, то есть о возможности взаимопревращения различных типов нейтрино друг в друга ^{/33/}.

Кварк-лептонная симметрия

Дублеты фундаментальных частиц -

Кварки: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}, \dots$ $m_t \sim 45 \text{ ГэВ}$
ЦЕРН
(1984)

Лептоны $\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}, \dots$

Объединение фундаментальных частиц в рамках единых калибровочных теорий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий.

$$\underbrace{SU_c(3)}_{\alpha_s} \times \underbrace{SU(2) \times U(1)}_{e, G \approx 10^5 m_p^{-2}}$$

KXD - g γ, Z^0, W^\pm - электрослабые вз-ия

Великое объединение всех трех взаимодействий при $M \sim 10^{15} \text{ ГэВ}$ | Вайнберг
Глэшоу
Салам
(1967)

Экспериментальные следствия в области низких энергий:

- Распад нуклона ($\tau_p \approx 10^{32}$ лет)
- Осцилляции $n \leftrightarrow \bar{n}$ (период ~ несколько лет)
- Объяснение барионной асимметрии Вселенной

Попытки построения теории великого объединения приводят к наблюдаемым следствиям фундаментальной значимости — предсказаниям возможной нестабильности протона, нейтрон-антинейтронных осцилляций, которые открывают путь к теоретической интерпретации факта барионной асимметрии Вселенной. Экспериментальная проверка предсказаний подобных теорий является одной из важнейших задач физики элементарных частиц, над решением которой работают во многих крупнейших лабораториях мира, в том числе и у нас в стране.

Говоря о перспективах построения объединенной теории электромагнитных, сильных, слабых и, возможно, гравитационных взаимодействий, нельзя не подчеркнуть, что необходимость единого описания диктуется всей логикой развития теоретических представлений об элементарных частицах и свойствах их взаимодействий.

Поиск единства в описании свойств и фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и их универсальных составляющих — кварков и лептонов — есть, по-существу, поиск главных, краеугольных черт явлений микромира. Познание управляющих ими законов таит в себе огромные потенциальные возможности не только для самой науки, но и для развития техники и технологии будущего.

Трудно сказать, насколько близко мы стоим сейчас к решению этой грандиозной проблемы. Ясно, однако, что процесс в данном направлении возможен лишь при самом широком развитии всесторонних теоретических исследований и экспериментов на существующих и будущих ускорителях заряженных частиц, а также других крупных ядерно-физических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломоносов М.В. Полн. собр. сочинений. Изд-во АН СССР, М.-Л., 1950, т.3, с.323.
2. Fermi E., Yang C.N. Phys.Rev., 1949, vol.76, p.1739.
3. Gell-Mann M. Phys.Lett., 1964, vol.8, p.214.
4. Zweig G. CERN Preprint TH-401, Geneva, 1964.
5. Боголюбов Н.Н., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. ОИЯИ, Д-1968, Дубна, 1965.
6. Tavkhelidze A.N. In: High Energy Phys. Elem. Particles, Vienna, 1965, p.753.
7. Боголюбов Н.Н., Матвеев В.А., Нгуен Ван Хьюе, Стоянов Д.Ц., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н., Шелест В.П. ОИЯИ, P-2141, Дубна, 1965.
8. Han M.Y., Nambu Y. Phys.Rev., 1965, vol.139B, p.1005.
9. Miyamoto Y. Progr.Theor.Phys., Suppl.Extra, 1965, No.187.
10. Боголюбов П.Н. ОИЯИ, P2-3115, Дубна, 1967; ЭЧАЯ, 1972, т.3, вып.1, с.144.
11. Bogolubov P.N. Ann.Inst.Henri Poincare, 1968, vol.VIII, p.2.
12. Nambu Y. In: Preludes in Theor.Phys. (Ed. by R.Gatto). J.Wiley, New York, 1972.
13. Greenberg O.W. Phys.Rev.Lett., 1964, vol.13, p.598.
14. Говорков А.Б. ЭЧАЯ, 1983, т.14, вып.5, с.1229.
15. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, 103, с.203; 103, с.391.
16. Логунов А.А. ЖЭТФ, 1956, 30, с.793.
17. Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, 105, с.972.

18. Logunov A.A., Soloviev L.D., Tavkhelidze A.N. Phys.Lett., 1967, vol.24B, p.181.
19. Chetyrkin K.G., Krasnikov N.V., Tavkhelidze A.N. In: Proc. of the Int. Conf. on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics. Vacsan Valley, June 1977, vol. 2, p.189; Красников Н.В., Тавхелидзе А.Н., Четыркин К.Г. ТМФ, 1978, т.35, вып.2, с.373.
20. Logunov A.A., Mestvirishvili M.A., Nguen Van Hieu. Phys.Lett., 1967, vol.25B, p.611.
21. Logunov A.A., Nguen Van Hieu. Lectures at the Int. School on High Energy Phys., Popradske Pleso, Czechoslovakia, 1967; and In: Topical Conf. High Energy Coll. Hadrons. CERN, Geneva, 1968, vol.2, p.74.
22. Матвеев В.А., Мурадян Р.М., Тавхелидзе А.Н. ОИЯИ, P2-4578, Дубна, 1969; ОИЯИ, E2-5962, Дубна, 1971; ЭЧАЯ, 1971, т.2, вып.1, с.7.
23. Боголюбов Н.Н., Владимиров В.С., Тавхелидзе А.Н. ТМФ, 1972, т.12, вып.1, с.619.
24. Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Петров В.А. Принципы квантовой теории поля и их следствия. "Наука", М., 1977.
25. Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkhelidze A.N. Lett.Nuovo Cim., 1973, vol.7, p.712.
26. Matveev V.A., Sorba P. Lett.Nuovo Cim., 1977, vol.20, p.443.
27. Балдин А.М. Краткие сообщения по физике. ФИАН, М., 1971, с.35; ОИЯИ, P7-58, Дубна, 1971; ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.429.
28. Baldin A.M. et al. Proc.Rochester Meeting APS/OPF, 1971, p.131.
29. Боголюбов Н.Н. Избранные труды по статистической физике. Изд-во МГУ, 1979.
30. Матвеев В.А., Тавхелидзе А.Н., Шапошников М.Е. ТМФ, 1984, т.59, вып.3, с.323.
31. Pati J.C., Salam A. Phys.Lett., 1975, vol.58B, p.333.
32. Марков М.А. Гипероны и К-мезоны. Гос.изд.физ.-мат.лит., М., 1958.
33. Понтекорво Б.М. "Природа", 1983, №1, с.43.

*Рукопись поступила в издательский отдел
21 марта 1985 года.*

Боголюбов Н.Н.

D2-85-206

Цветные кварки — новая ступень познания микромира

Доклад на общем собрании Академии наук СССР, прочитанный академиком Н.Н.Боголюбовым 18 марта 1985 года в связи с вручением ему высшей награды АН СССР — Золотой медали им.М.В.Ломоносова.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Bogolubov N.N.

D2-85-206

Colour Quarks as a New Level of Understanding the Microcosm

A talk given at the general meeting of the Academy of Sciences of the USSR held on March 18, 1985 at the ceremony of presentation of the M.V.Lomonosov Gold Medal.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985