

СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ: ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ГОРИЗОНТОВ

В. А. Петров *

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

Краткое изложение эволюции представлений о сильных взаимодействиях от
20-х гг. XX столетия и до наших дней.

Summary of evolution of perceptions of strong interactions from the twenties of
the twentieth century to the present day.

PACS: 12.10.Dm; 12.38.Aw

ВВЕДЕНИЕ

Традиционное деление сил Природы на 4 типа: гравитационные, слабые, электромагнитные и «ядерные» (сильные), на фоне новейших тенденций к всеохватному объединению может показаться уже несколько старомодным на фоне захватывающих воображение объединительных тенденций последнего полувека.

Действительно, сначала Стандартная модель (объединяющая в большей степени слабые и электромагнитные взаимодействия), затем активные поиски жизнеспособного варианта «Великого объединения» (Grand Unification), в котором сильные взаимодействия сливаются в одно с электромагнитным и слабым, и, наконец, массивированные Drang und Sturm** «Теории всего сущего» (ТОЕ, Theory of Everything) на базе «новейшей» (но уже почти полувековой!) парадигмы «суперструн».

Эта эволюция неразрывно связана с достижением все более высоких энергий сначала ускорителей и далее коллайдеров. Прямые эффекты единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий стали уже ощутимыми при сотнях гигаэлектронвольт (открытие W - и Z -бозонов). В отношении «действия сил» правильнее говорить не только об энергиях

* E-mail: Vladimir.Petrov@ihep.ru

** Не будем ехидничать по поводу этого затянувшегося на полвека и пока безрезультатного в смысле физических предсказаний и экспериментальных проверок «штурма и натиска». Желающим порекомендуем книгу «суперструнщика-расстриги» П. Войта «Даже не неправильно».

столкновения, но и, по большей мере, о *достижимых передачах импульса*, обусловленных этими энергиями. Кинематика позволяет достигать наибольших передач импульса именно при наибольших энергиях столкновения. При этом максимальная передача импульса ассоциируется (со ссылкой на соотношение неопределенностей) с минимальными расстояниями между взаимодействующими частицами (или их составляющими). По существующим теоретическим оценкам расстояния, где безраздельно царит мир суперструн, порядка 10^{-33} см («планковская длина»).

Если оставаться в рамках реальных энергий и передач импульса, то в отношении сильных взаимодействий принято считать, что низкие энергии столкновения отвечают за динамику сильных взаимодействий на больших расстояниях, тогда как высокие энергии, соответственно, имеют дело с малыми. Что до малых расстояний, то современная — и, по существу, безальтернативная — теория сильных взаимодействий, квантовая хромодинамика (КХД), однозначно предсказывает монотонное ослабление взаимодействий с убыванием расстояний.

То есть получается, что предположительно сильные взаимодействия становятся при высоких энергиях буквально слабыми в смысле их интенсивности. Тут самое время напомнить себе, что, например, при рассеянии двух протонов передачи импульса (при одной и той же энергии) простираются от величин порядка энергии столкновения и до нуля. И если при больших передачах импульса сечения действительно убывают, то при малых совсем наоборот, они возрастают! Таким образом, и при высоких энергиях мы можем наблюдать процессы, в которых сильные взаимодействия проявляют себя как действительно сильные. Соответственно, эффективный радиус взаимодействия также возрастает с энергией.

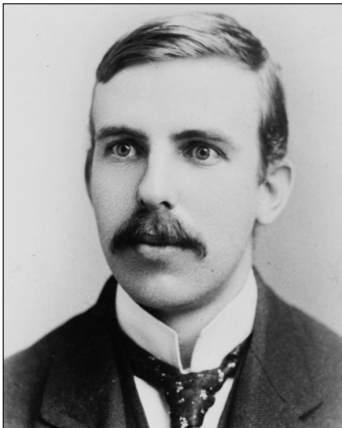
Из школьной программы физики мы знаем, что ядерные силы короткодействующие, имеют конечный радиус. Как примирить это с тем, что было только что сказано?

В данном сообщении я и хочу проследить эволюцию наших представлений о сильных взаимодействиях от самых первых шагов в изучении ядра атома до интереснейших явлений, открываемых в областях все более высоких энергий*.

ПРЕДЫСТОРИЯ (1920–1927)

Как только в 1911 г. Эрнесту Резерфорду удалось твердо установить структуру атома, а именно, что электроны кружатся вокруг центрального положительно заряженного «ядра»: «...атом содержит центральный заряд, распределенный по очень небольшому объему...», так сразу же встал вопрос: как устроено это ядро, имеющее малый, но конечный

* В моем докладе я не касаюсь обширной и специфической темы взаимодействий релятивистских ядер, отсылая интересующихся к великолепному докладу В. Г. Рябова на этой сессии.



Э. Резерфорд (1871–1937)

радиус порядка 10^{-13} см (1 Фм)? Какие силы удерживают его от разрыва электрическими силами одного знака?*

Резерфорд писал в 1923 г.: «Возможно, на очень малых расстояниях могут проявиться новые и неожиданные силы». Ясности в этом вопросе не было длительное время, вплоть до середины 1930-х гг.

В отношении состава атомных ядер с самого начала (поскольку атомные веса элементов были известны) было естественно, не изобретая новых сущностей**, предположить, что ядра состоят из хорошо известных протонов — ядер водорода.

Разницу между порядковым числом в таблице Менделеева и массовым числом быстро «объяснили», добавив в ядро нужное количество электронов.

Эта простая мысль пришла в голову голландскому школьному учителю и физику-любителю А. Ван ден Бруку. Резерфорд, согласившись с этой вполне здравой мыслью, пошел дальше.

• В лекции 1920 г. он высказал смелую гипотезу: «Однако при некоторых условиях электрон может гораздо теснее объединиться с ядром Н, образуя своего рода нейтральный дублет. Такой атом будет обладать совершенно новыми свойствами. Его внешнее поле было бы практически нулевым, за исключением очень близкого к ядру, и, как следствие, оно должно было бы иметь возможность свободно перемещаться в материи».

Вообще-то не очень понятно, откуда могла взяться такая мысль. С чего вдруг такая компактная система возникнет? На этот счет Резерфорд не высказывался, но идею глубоко восприняли его ученики, особенно Джеймс Чедвик, неустанно продолжавший поиски резерфордовского *нейтрального дублета* в течение более 11 лет, пока не обратил внимание на статью Ф. Жолио и И. Кюри, обнаруживших необычно мощное, как им казалось, γ -излучение после облучения бериллия альфа-частицами. До них такое же явление наблюдали Боте и Беккер. Повторив экспери-

* В принципе, тот же вопрос можно задать и в отношении электрона, но последний оказался крепким орешком, и мы до сих пор не видим в его поведении чего-то, свидетельствующего об отклонении от поведения «материальной точки». Наши коллаидеры пока еще слабоваты! Так что в дальнейшем мы сосредоточимся на ядерных силах, и именно к ним будем относить термин «сильные взаимодействия».

** Неявно придерживаясь принципа «бритвы Оккама»: «Не следует множить сущее без необходимости».

мент буквально через несколько дней после появления статьи Жолио-Кюри, Чедвик пришел к выводу, что γ -излучение тут ни при чем и на самом деле речь идет о потоке неизвестных ранее нейтральных частиц с массой, близкой к массе протона. И это, похоже, нейтрон*! Спустя немного времени он был точно уверен: да, нейтрон.

Чедвик вслед за своим учителем не сомневался, что это и есть связанное состояние протона и электрона. При этом масса нейтрона *по известным тогда* атомным весам протона, электрона и нейтрона получалась *меньше* суммы масс протона и электрона, что давало оценку энергии связи электрона в нейтроне около 2 МэВ**.

Таким образом, все, казалось бы, свидетельствовало, что нейтрон — действительно связанное состояние протона и электрона. Что до состава атомных ядер, то предполагалось, что они состоят из протонов, нейтронов (в смысле Резерфорда***) и... электронов. Считалось, что «ядерные электроны», не связанные в нейтронах, нужны для объяснения β -распада. Фермиевская теория β -распада нейтрона была еще впереди!

Статья Чедвика была получена в редакции 10 мая 1932 г. и опубликована 1 июня. Но еще раньше этого, 28 мая 1932 г., в журнале Nature появилась коротенькая заметка молодого советского теоретика Д. Д. Иваненко, в которой он, вопреки общему мнению, поставил вопрос, а не является ли нейтрон не составной системой из протона и электрона, а *столь же элементарным*, как и протон? В частности, нейтрон должен быть фермионом.



Дж. Чедвик (1891–1974)



Д. Д. Иваненко
(1904–1994)

* Использованный Чедвиком термин «нейтрон», конечно, более удобный, чем «нейтральный дублет», был введен американским химико-физиком У. Харкинсом в 1921 г.

** Отметим здесь же, что по более точным современным данным сумма масс протона и электрона *больше* массы нейтрона.

*** Ясно, что «резерфордовские» нейтроны — бозоны. Отсюда проблемы со статистикой ядер. Например, ядро азота ($7p + 7n$) получается фермионом, тогда как уже в 1929 г. было экспериментально установлено, что оно — бозон.

И тогда все проблемы, в частности, со статистикой ядер разрешались! Чуть позже Иваненко публикует вторую статью, в которой уже нет места готовым «ядерным электронам»: они, согласно Иваненко, рождаются при β -распаде подобно фотонам при γ -излучении, а не сидят в ядре «на скамейке запасных».

Теория Иваненко была теперь уже практически полностью свободна от бытовавших тогда противоречий и, по существу, осталась основой наших воззрений на атомное ядро до сих пор. Один из создателей

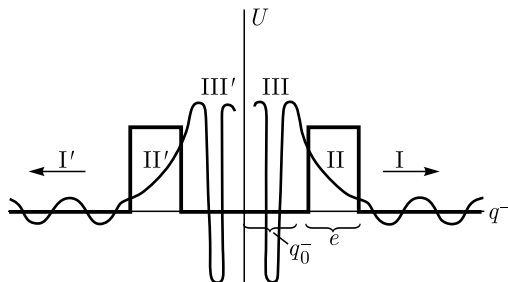


В. Гейзенберг (1901–1976)

квантовой механики, Вернер Гейзенберг, сразу же оценил идею Иваненко и тут же развил ее, предложив считать протон и нейтрон разными состояниями одной и той же частицы — «нуклона», отличающимися значениями проекции нового квантового числа, «изотопического спина»: $1/2$ для протона и $-1/2$ для нейтрона. При этом малая разница в массах протона и нейтрона связывалась с зарядом, и в отсутствие электромагнетизма состояния неотличимы. Понятие изоспина и изотопической инвариантности ядерных сил оказалось исключительно плодотворным и может считаться первым шагом к созданию современных представлений о сильных взаимодействиях. О чем подробнее будет рассказано ниже.

В последующее время выдающееся открытие Иваненко было часто недооценено. Мол, «это и дураку ясно». Однако многие выдающиеся ученые (например, Нильс Бор) в начале 1930-х гг. еще ряд лет сомневались и продолжали верить в «ядерные электроны» и составной нейтрон. И не потому, что просто «не были дураками». Скорее, дело было в подсознательном следовании принципу «бритвы Оккама» неумножения сущего, т. е. введения новых элементов без необходимости. Но в случае с нейтронами такая необходимость была.

• Однако вернемся к ядерным силам. Они себя уже проявили (помимо связывания нуклонов в ядре) при взаимодействии чедвиковских нейтронов с протонами (в парафиновой мишени). Этому, однако, тогда значения не придали. Что же до более количественного подхода, то в 20-е гг. XX в. обходились довольно простыми представлениями типа потенциальной ямы. Простота, правда, не помешала эффективности. Советский физик-теоретик Георгий Гамов на этой основе (см. рисунок) объяснил и описал α -распад как туннелирование α -частиц через потенциальный барьер. Возможность «просачивания» через потенциальный барьер («силовую стенку») определялась только что созданной квантовой механикой и ярко продемонстрировала теоретическую мощь последней. Кстати, соображения Гамова подтолкнули Кокрофта и Уолтона к мысли о том, что туннельный



Г. А. Гамов (1904–1968) и иллюстрация туннельного эффекта — проникновение α -частиц через потенциальный барьер

эффект может сработать и в обратном направлении и даже не очень сильно ускоренный протон (с энергией порядка сотен килоэлектрон-вольт) имеет шанс проникнуть в ядро. Более того, при бомбардировке протонами ядер лития совершилось чудо: в конечном состоянии родились две α -частицы! Ядро лития было разрушено!* Так начиналась физика высоких энергий.

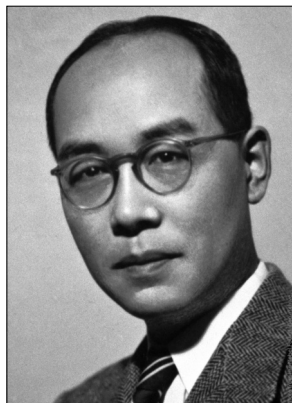
МЕЗОННАЯ ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ СИЛ

Разумеется, модель, использованная Гамовым, была далека от настоящей теории ядерных сил. Гейзенберг в той же статье, где он ввел понятие изоспина, предположил, что ядерные (сильные) взаимодействия (само собой, короткодействующие) имеют обменный характер (на манер межатомных сил за счет обмена электронами), а также инвариантны относительно группы преобразований («поворотов») изоспина, если пренебречь электромагнитными эффектами.

Идею обменности попытались реализовать советские теоретики Игорь Тамм и знакомый нам Дмитрий Иваненко. В отличие от примитивных потенциальных ям они уже оперировали в рамках квантовой теории поля. К этому времени помимо квантовой электродинамики (развивавшейся Гейзенбергом, Дираком и Паули) Энрико Ферми сформулировал квантово-полевую теорию β -распада, которая описывала не только распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино, но и ряд других процессов. Этим и воспользовались Тамм и Иваненко, рассмотрев обмен

* Здесь я не могу не отметить, что спустя всего лишь 2 месяца такой же эксперимент был осуществлен в СССР, в Харьковском физико-техническом институте усилиями Вальтера, Латышева, Лейпунского и Синельникова.

парой электрон–антинейтрино между нейтроном и протоном. За счет электрона обменная пара была массивной, что обеспечивало конечный радиус сил, и в этом плане теория вроде бы реализовала идеи Гейзенберга, но интенсивность взаимодействия была безнадежно мала, чтобы обеспечить энергию ядерной связи: получить *сильное* взаимодействие за счет комбинации *слабых* не удалось. Это, впрочем, признавали и сами авторы.



Х. Юкава (1907–1981)

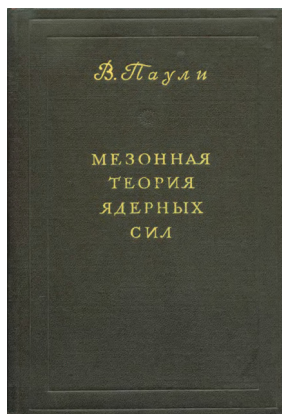
Но «нет худа без добра». Японский физик-теоретик Хидэки Юкава, уловив рациональное зерно в попытке Тамма–Иваненко и поняв, что реализовать сильное короткодействие с помощью известных частиц не получается, «просто-напросто» предположил, что в природе имеется *еще неизвестная* частица, «мезон», сильно взаимодействующая с нуклонами, и с массой, промежуточной между нуклоном и электроном. Для требуемого радиуса этой ядерной силы (10^{-13} см) масса кванта нового поля — мезона — должна была быть между 100 и 200 МэВ.

Несмотря на то, что впервые мезон (по современной номенклатуре «пи-мезон» или «пион») удалось наблюдать в космических лучах только более десяти лет спустя, сама идея была (хоть и не сразу) по достоинству оценена и положила начало квантово-полевым теориям мезонных сил и достаточно успешной феноменологии в ядерной физике.

Тот из современных физиков, кто откроет эту давнюю книгу Паули, поймет, какой огромный путь пришлось проделать нашим предшественникам к тому, что мы имеем сейчас.



В. Паули (1900–1958)



КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ: ОТ ТРИУМФА К «АНАФЕМЕ»

1945 г. ознаменовался не только окончанием Второй мировой войны и чудовищным торжеством* ядерной физики в Хиросиме и Нагасаки, но и началом прорыва в квантовой теории поля, прежде всего — в квантовой электродинамике (КЭД).

Бете, Фейнманом, Швингером, Томонагой и Дайсоном был разработан метод борьбы с бесконечностями, мучившими физиков с конца 1920-х гг. С небывалой точностью были описаны и объяснены такие физические эффекты, как «лэмбовский» сдвиг уровней атомных электронов и аномальный магнитный момент электрона.

Взор физиков в области ядерных сил естественно обратился к возможностям использовать новые методы («перенормировка») и в области сильных взаимодействий — игры с юкавскими обменами уже себя исчерпали.

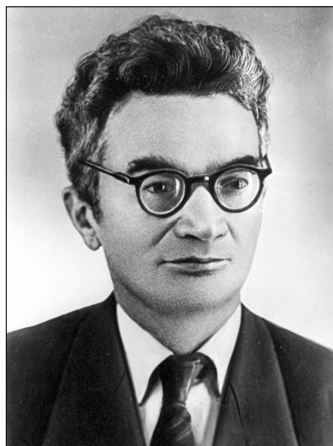
И здесь их ждало разочарование. Несмотря на то, что теорию Юкавы удалось воплотить в квантово-полевой ипостаси и даже доказать ее перенормируемость, все это осталось втуне. Сначала Ландау в КЭД, а потом Померанчук в юкавской мезодинамике обнаружили, что последовательное применение теории перенормировок ведет к абсурдному выводу: физическое взаимодействие исчезает! Ландау усмотрел в этом неизлечимый логический изъян и призвал навсегда расстаться («похоронить со всеми почестями!») с применением квантовой теории поля, по крайней мере, к сильным взаимодействиям.

Взамен предлагалось строить теорию на основе программы, сформулированной еще в 1942 г. Гейзенбергом. Вместо лагранжиана (гамильтониана), построенного из ненаблюдаемых операторов квантовых полей, главным объектом объявлялась S-матрица — амплитуда вероятности переходов между физическими состояниями.

Динамические уравнения поля заменялись условиями унитарности, аналитичности, кроссинг-симметрии и следующими из этих принципов дисперсионными соотношениями**, связывающими между собой различные процессы. Одним из немаловажных достоинств такого метода была непосредственная близость к экспериментально наблюдаемым сечениям физических процессов рассеяния и рождения частиц и большая доступность теории для физиков-экспериментаторов. Мощь нового подхода была, например, ярко продемонстрирована так называемой теоремой

* «Какая прекрасная физика!» — якобы сказал Энрико Ферми, увидев 16 июля 1945 г. первый ядерный взрыв на полигоне Аламогордо.

** Отметим, однако, что первое математически строгое доказательство дисперсионных соотношений было дано выдающимся советским математиком и физиком Н. Н. Боголюбовым (1956) на основе его же *квантово-полевого* принципа микропричинности.



И. Я. Померанчук (1913–1966)

Померанчука*, согласно которой полные сечения взаимодействия частицы и античастицы с одной и той же мишенью должны совпадать при высоких энергиях и справедливость которой подтверждается при самых высоких достигнутых энергиях.

«ЯДЕРНАЯ ДЕМОКРАТИЯ» И «ЗАШНУРОВКА»

Пророком и страстным проповедником нового символа веры выступил Джеффри Чью из Калифорнийского университета в Беркли. Его энтузиазм, совершенно новый взгляд на физику частиц и их взаимодействий привлекли огромное число, молодых и не очень, сторонников и последователей. Старая парадигма поиска все новых и все более элементарных структур — от макротел к молекулам и атомам, от атомов — к электронам и ядрам, от ядер к нуклонам и мезонам и т. д. — отвергалась. Что же взамен?



Дж. Чью (1924–2019)



В 1950-х гг. вновь открываемых сильновзаимодействующих частиц («адронов», как окрестил их в начале 1960-х гг. советский теоретик Л. Б. Окунь) насчитывалось уже десятки, и называть их все элементарными было уже неуместным. Дальнейший путь мог быть, как и раньше,

* И. Я. Померанчук — выдающийся советский физик-теоретик, внесший вместе с В. Н. Грибовым основополагающий вклад в развитие метода полюсов Редже (см. ниже).

поиском новых, более элементарных частиц, и эти новые частицы по отношению к адронам занимали как бы привилегированное, «аристократическое» положение. Однако Чью, осознанно или нет, пошел по пути, предначертанному «бритвой Оккама», — не измышлять новых сущностей, и предложил путь «ядерной демократии»: *ни один из известных адронов не более элементарен, чем любой другой*. И в то же время в известной степени можно считать, что любой адрон состоит из всех остальных. Все адроны являются простыми полюсами S -матрицы как аналитической функции энергии. Что же касается их характеристик (массы и т. д.), то в силу бесконечного числа условий унитарности и кроссинга должен получиться в качестве единственного решения этих условий — в виде дисперсионных соотношений — самосогласованный набор параметров. Такая захватывающая дух картина в корне отличалась от всего, что было раньше известно в физике, а сама идея и программа ее реализации получили название bootstrap («зашнуровка»)*. В разгар активности сторонников нового направления они получили ценный инструмент в виде «полюсов Редже», согласно которому адроны — полюсы не только в комплексной плоскости энергии, но и в плоскости комплексного углового момента. В физике появилось чрезвычайно плодотворное понятие «траекторий Редже», и оно совершенно органично вошло в арсенал теории «аналитической S -матрицы». Взаимодействие как обмен индивидуальными частицами заменялось на обмен «реджеонами». Новый подход чрезвычайно облегчал создание феноменологических моделей для описания сильных взаимодействий, чем не могла похвастаться квантовая теория поля.

КВАРКОВАЯ «КОНТРРЕВОЛЮЦИЯ»?

«Размножение» вновь открываемых адронов просто взывало к установлению в этом «зоопарке» какого-то упорядочения, классификации. Например, были открыты тяжелые барионы (гипероны) и тяжелые мезоны (каоны), которые по всем признакам относились к адронам, но имели необычно большое время жизни и были снабжены новым лейблом — «странностью», квантовым числом, сохраняющимся в сильных взаимодействиях.

Зародышем упорядочивания послужил изоспин, гейзенберговское квантовое число, распространявшееся уже не только на нуклоны, но и на адроны любых типов, разбивая их на «изомультиплеты». Дублет нуклонов, триплет пи-мезонов и т. д. Математически это связывалось

* У нас этот термин был переведен как «зашнуровка». Однако на самом деле в широком смысле этот термин трактуется как «самостоятельная загрузка» и обычно относится к самозапускающемуся процессу, который должен продолжаться или развиваться без внешнего вмешательства. В дальнейшем используем слово бутстрап.

с полупростой унитарной унимодулярной группой $SU(2)$, изоморфной группе вращений «во внутреннем пространстве». Навести порядок уже среди изомультиплетов удалось с помощью «очевидного» обобщения: $SU(2) \rightarrow SU(3)$! Мезоны и барионы очень красиво распределялись по унитарным октетам, и поток работ по унитарной симметрии и ее обобщениям, инициированный работами Гелл-Манна и Неемана под общим интригующим названием «восьмеричный путь»*, казался нескончаемым. И хотя ничто не свидетельствовало о какой-либо выделенной роли каких-либо из адронов, все же стремление найти среди них «более



С. Саката (1911–1970)

равных» («аристократов»), из которых можно составить все остальные, оставалось. Тем более что была непонятной роль фундаментального триплетного представления группы $SU(3)$.

Еще до всеобщего торжества унитарной симметрии, в 1956 г., Сёити Саката предположил, что в мире адронов имеется тройка «аристократов»: протон, нейтрон и (странный) лямбда-барион**. Связывая их между собой по три и по два (частицу с античастицей), можно получить весь спектр остальных адронов***.

И хотя в конце концов от этой конструкции пришлось отказаться (некоторые предсказания противоречили эксперименту), именно она открывала путь к $SU(3)$ и кварковой схеме, поставив во главу угла низшее спинорное представление размерности 3.

Мысль заполнить «пустующий» $SU(3)$ -триплет посетила сразу трех, предположительно независимо работавших, теоретиков и почти в одно и то же время (!), в конце 1963 – начале 1964 г. Из них двое теперь давно и хорошо известны как авторы идеи трех фундаментальных фермионов, составляющих наблюдаемые адроны. Это М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг. Но со временем обнаружилось, что был и третий, А. Петерман, статья которого была направлена в журнал *раньше всех* (30 декабря 1963 г.), но опубликована на год с лишним *позже всех*, в марте 1965 г.

* Название взято из древнеиндийского учения о восьми заповедях достижения праведной жизни.

** Надо отметить, что еще в 1949 г. Ферми и Янг предлагали на роль «истинно элементарных» нуклоны и антинуклоны, так что пион состоял бы из пары нуклон–антинуклон. В дальнейшем модель была признана несостоятельной, но оказала определенное влияние на направление мыслей.

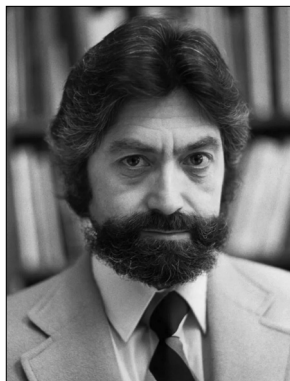
*** Несколько позже свой вариант теории с фундаментальной тройкой (p, n, Λ) разработал Л. Б. Окунь (1958).



А. Петерман
(1922–2011)



М. Гелл-Манн
(1929–2019)



Дж. Цвейг
(р. 1937)

В новой гипотезе внимание публики (даже и ненаучной) было, в частности, привлечено необычным свойством кварков: их электрические заряды составляли (по модулю) не 1 или 2 заряда электрона $|e|$, а $|e|/3$ и $2|e|/3$ *. Что до названия, то Гелл-Манн предложил «кварки», Цвейг — «тузы», а Петерман — «элементарный спинор». Утвердилось наиболее необычное название «кварки».

Идея сразу захватила физическое сообщество, посыпались публикации, уточняющие, дополняющие... В общем, новый символ веры был воздвигнут! Для идейных сторонников «ядерной демократии» это был удар, настоящая контрреволюция...

«... МНОГОЕ ЕЩЕ МОЖНО СКАЗАТЬ В ДО-МАЖОРЕ»

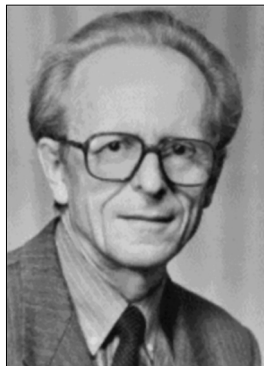
Впрочем, многие практически работающие физики довольно спокойно восприняли «кварковую парадигму». Тем более что сами кварки себя пока никак в экспериментах не обнаруживали. Один из первых экспериментов по поиску дробно-заряженных частиц был поставлен в 1968 г. на протонном синхротроне в Протвино. Как и во всех последующих попытках, результат был отрицательным. Однако эта отрицательность оказалась столь же значимой, как и отрицательность знаменитых экспериментов Майкельсона–Морли, поскольку, по существу, по-новому поставила само понятие наблюдаемости, на чем мы еще остановимся.

Ситуация вполне гармонизировала с идеями Чью, и попытки найти модель, реализующую аналитичность, унитарность, кроссинг и новое свойство «дуальности», продолжались. Дуальность (если не вдаваться

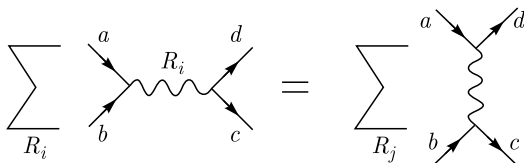
* Впоследствии некоторое время развивались варианты с целочисленными зарядами, но в конце концов дробно-заряженный вариант был признан более обоснованным.



А. А. Логунов
(1926–2015)



Л. Д. Соловьёв
(1934–2003)



Дуальность: сумма по резонансам в s -канале эквивалентна сумме по обмену реджеонами в t -канале



Г. Венециано (р. 1942)

в тонкости) заключалась в том, что одна и та же амплитуда содержит в себе и резонансы в прямом (s) канале, и обмен реджеонами в перекрестном (t) без искусственного сложения s -канальной и t -канальной амплитуд. Начало этой идее было положено в работе советских ученых А. А. Логунова, Л. Д. Соловьёва и А. Н. Тавхелидзе* (1967).

Наиболее удачная попытка построить такую амплитуду была реализована в 1968 г. Габриеле Венециано.

Правда, она относилась только к случаю, когда все адроны стабильны, тогда как на самом деле почти все они распадаются. Но тем не менее уже на этом уровне получались очень реалистичные соотношения,

а еще оказалось, что спектр состояний соответствующих траекторий Редже совпадает со спектром состояний релятивистской струны. Лет 15 ушло на работу по обобщению модели Венециано в рамках «дуальной

* Портрет А. Н. Тавхелидзе см. ниже.

резонансной модели», пока, наконец, не обнаружилось, что в спектре состояний присутствует безмассовая частица со спином 2. Таких адронов в природе не было. Зато давно все знали, что такими свойствами должен обладать гравитон. Поскольку потом оказалось еще, что струна (при некоторых модификациях) может обладать возбуждениями, отвечающими и другим элементарным полям, например электронам, то те, кто долго и безрезультатно мучился с дуальной теорией сильных взаимодействий, оказывается, набрали, сами того не ведая, на грандиозную *теорию вообще всего сущего!** С конца 1970-х гг. начался массовый наплыв желающих участвовать в таком великом деле, как создание истинно фундаментальной теории — «теории суперструн».

Много было шума, об этом писали в газетах и говорили с экранов ТВ, и новоявленные гуру без тени сомнения убеждали публику в том, что человечество буквально в одном шаге от небывалой, величайшей и решающей все проблемы «Теории Всего Сущего», ТОЕ (Theory of Everything)..., но время шло, коллаидеры сменяли один другой, вот и Большой адронный подоспел... «А Германа все нет!» — так же, как и каких-либо намеков на «эффекты суперструн» в экспериментах. Что ж, оставим эту область, оказавшуюся (по крайней мере на настоящее время) тупиковой**, и вернемся к нашим старым добрым сильным взаимодействиям, которые все же дают немалую пищу для ума.

СИММЕТРИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В отношении *природы* сильных взаимодействий гениальная догадка Юкавы оставалась догадкой, хотя и служила источником успешной феноменологии. Многие ощущали необходимость вывода взаимодействия из какого-то общего принципа в рамках теории поля. В 1926 г. советский физик-теоретик Владимир Фок «вывел» электромагнитное взаимодействие, исходя из требования инвариантности относительно локального изменения фазы волновых функций заряженных частиц, отвечающей группе $U(1)$, которое обеспечивалось нейтральным векторным безмассовым полем, фотонами. 28 лет спустя в США Янг и Миллс проделали «то же самое» с группой изотопического спина $SU(2)$ и получили в результате, что частицы, обладающие изоспином, тоже взаимодействуют посредством векторного поля, но не нейтрального, а составляющего изотриплет. Кроме того, получалось также, что и сами эти векторные поля нелинейным образом взаимодействовали друг с другом. При этом,

* Г-н Журден: «Честное слово, я и не подозревал, что вот уже более сорока лет говорю прозой» (Ж.-Б. Мольер. «Мещанин во дворянстве»).

** Однако, кажется, математики нашли в этой теории много пищи для ума и новых результатов.



Ч. Янг (р. 1922) и Р. Миллс (1927–1999)

в отличие от электромагнитного поля, взаимодействие сохранялось даже при отсутствии первоначальных носителей изоспина.

Идея получения сильных взаимодействий из требования калибровочной инвариантности вдохновила Сакураи на принцип локализации любой симметрии как источника взаимодействий. Так, например, локализация эмпирически установленного закона сохранения барионного числа приводила бы к существованию нейтрального векторного поля*. При этом поле по-разному генерировалось барионами и антибарионами, и протоны и антипротоны по-разному реагировали бы на поле Земли. Эффект, однако, обнаружен не был. Всеобщность принципа локализации тем самым несколько подрывалась**. Кроме того, идентификация нелинейных векторных полей Янга–Миллса с экспериментально обнаруженными впоследствии векторными адронами (ρ -, ω -, φ -мезонами) омрачалась тем, что инвариантность требовала, чтобы они были безмассовыми, что было в реальности далеко не так. Впрочем, понятие нарушенной симметрии

* Пару лет спустя после работы Янга и Миллса Р. Утияма выдвинул блестящую идею локализации группы Пуанкаре, заложившую основы ныне активно развиваемого калибровочного подхода к теории гравитации. То, что в теории Гильберта–Эйнштейна вводится достаточно произвольно, в калибровочном подходе естественно следует из общего принципа.

** В новейшее время в связи с открытием различного рода «аномалий» активно обсуждаются «сценарии» нарушения закона сохранения барионного числа в связи с проблемой, в частности, устойчивости материи («распад протона») и барион-антибарионной асимметрии Вселенной. Мы не обсуждаем эти проблемы, связанные с электрослабыми взаимодействиями.

уже было в ходу, так что это обстоятельство не препятствовало многим плодотворным идеям о свойствах и взаимодействиях векторных мезонов. На современном языке речь шла о нарушенной калибровочной инвариантности относительно группы $SU(3)$ как группы, связанной с квантовым числом, нареченным термином flavour («вкус» или «аромат»). Соответственно, группу обозначили $SU(3)_f^*$.

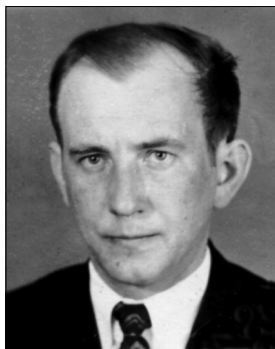
«НА ВКУС, НА ЦВЕТ МАСТЕРА НЕТ...» ЕСТЬ-ТАКИ!

Сразу же после начала «эры кварков» стало очевидно, что в ряде случаев построить барионы с нужными значениями, скажем, магнитных моментов нельзя без нарушения принципа Паули: кварки одинакового типа должны были находиться в одном квантовом состоянии. Выход, как всегда потом видится, был почти тривиальный: *пусть эти кварки перестанут быть одинаковыми!*

Для этого вводится новое квантовое число, и ранее одинаковые три кварка становятся разными. Принцип Паули был спасен. И пионерами здесь были советские теоретики Боголюбов, Струминский и Тавхелидзе (1965).



Н. Н. Боголюбов
(1909–1992)



Б. В. Струминский
(1939–2003)



А. Н. Тавхелидзе
(1930–2010)

* В 1974 г. произошла «ноябрьская революция» — открытие группами Тинга и Рихтера четвертого кварка, а в последующие годы добавились еще два. При этом массы новых кварков существенно превышали массы старых. На необходимость в Природе этих новых сущностей указывалось на феноменологической основе теоретиками и ранее (1970 г., подавление нейтральных токов), ее иногда увязывали с сокращением аномалий, но концептуально вопросы остаются. Мы же, не останавливаясь на обширнейшей теме «физика тяжелых кварков», только отметим, что (сильно нарушенная) симметрия ароматов теперь становится группой $SU(6)_f$.

Вслед за ними, «независимо и одновременно», появились работы Хана–Намбу и Миямото. Соответственно, появляется новая группа симметрии, $SU(3)_c$. Что это за «с» внизу? Это — сокращение слова «colour», «цвет», предложенное в начале 1970-х гг.

Отличие от нарушенной «вкусовой», «цветовая» симметрия $SU(3)_c$ предполагается точно так же выполняемой, как и «электромагнитная» симметрия $U(1)$. И (по заветам Фока–Сакураи) локализация цветовой симметрии дает 8 безмассовых векторных полей с нелинейным самодействием.

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА — ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Вся конструкция (кварки вкупе с нелинейным «глюонным» полем) с начала 1970-х гг. называется «квантовой хромодинамикой» (КХД) и считается фундаментом и синонимом теории сильных взаимодействий.

Не успело это название утвердиться, как обнаружилось, что номинально сильное взаимодействие становится... слабым при достаточно тесном сближении взаимодействующих объектов, что выражается в том, что эффективный «цветовой заряд» $g(r) \rightarrow 0$, $r \rightarrow 0$. Взаимодействие исчезает, частицы становятся свободными. Явление так и назвали «асимптотическая (т. е. при малых r) свобода». Оно было обнаружено в 1973 г.

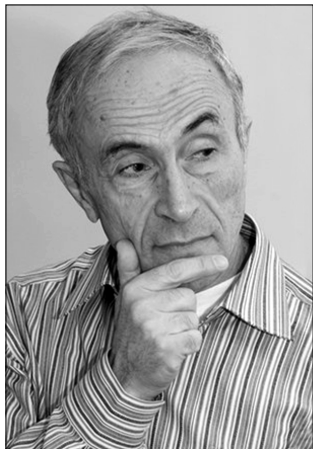
в одном и том же журнале как независимые статьи американцев: совместная работа Гросса–Вильчека и отдельно — Политцера.

Вскоре выяснилось, правда, что еще раньше, в 1965 г., близко к этому подошли советские теоретики Ваняшин и Терентьев, и еще в 1967 г. уж совсем буквально такой же, как и у американских авторов, результат получил советский же физик новосибирец Хриплович.

Однако ж Нобелевскую премию ему «почему-то» не дали... Конечно, можно сослаться на правило, что число призеров не превышает трех, но почему именно первоходец оказался «четвертым лишним»?

Вернемся к физике. Если взаимодействие убывает с уменьшением расстояния, то, ясное дело, оно, стало быть, *возрастает*

с его увеличением. Вот вам и ответ на «проблему конфайнмента» — силы между кварками просто не дают им разлететься и попасть в детекторы так же, как попадают в них обычные адроны. Наблюдать кварки «вживую» так, как это делают с известными адронами, не получается.



И. Хриплович (1937–2024)

Та же судьба уготована, как показывают эксперименты, и глюонам*. В конце концов ситуацию обозначили как «проблему конфайнмента»: физически наблюдаемые состояния (адроны) в корне отличаются от возбуждений, отвечающих кварк-глюонным полям. При столкновении адронов любой энергии рождаются только адроны. Они, согласно гипотезе конфайнмента, не обладают «цветом», как кварки и глюоны, они цветонейтральны. Но так же, как и электрически нейтральные частицы, все еще взаимодействуют путем частично экранированных кулоновых сил («силы Ван дер Ваальса»), так же и адроны взаимодействуют путем обмена бесцветными массивными состояниями (например, юкавским пимезоном), т. е. испытывают короткодействующие силы, не мешающие им долетать до детекторов. В этом месте можно усмотреть правоту принципа «ядерной демократии»: в любом процессе рассеяния и множественного рождения адронов установки детектируют только адроны, из которых ни один не элементарен.

Однако во многих процессах, скажем, глубоконеупругом лептон-адронном рассеянии или рассеянии адронов на большие углы, кварк-глюонная структура адронов, хоть и опосредованно, но проявляется с очевидностью.

Получается несколько парадоксальный вывод, что в известной степени оба похода — «аристократический» и «ядерно-демократический» — правильны, и они объединяются вполне органично в рамках КХД с учетом ключевого условия — конфайнмента. Надо при этом отметить, что мечта Чью о самосогласованном решении посредством «бутстрапа», хотя и не опровергнута теоретически, на практике так и не смогла (пока?**) реализоваться в деле предсказаний адронных параметров, хотя бы частично.

Напротив, такие важные параметры адронных взаимодействий, как траектории Редже (полюса S-матрицы), уже довольно длительное время исследуются в рамках КХД. И хотя получить надежные предсказания для таких параметров, как интерсепт вакуумной траектории (померон), пока не удастся, но тем не менее в работах российского



Л. Липатов (1940–2017)

* Здесь надо отметить, что, несмотря на это, кварки и глюоны все же в определенном смысле наблюдаемы. Но не так, как обычные частицы, а в виде коллимированных коллективов адронов — «струй», которые удивительно точно воспроизводят кинематику кварков и глюонов, взаимодействующих на малых расстояниях и затем «маскируемых» конфайнментом.

** Отметим, что на этом фронте в последнее время наблюдается что-то вроде ренессанса.

теоретика Льва Липатова был получен исключительно важный результат: в КХД траектории Редже нелинейны и стремятся к постоянным в глубокоевклидовой области, что вполне гармонирует с известной динамикой на малых расстояниях. В отношении масс адронов существенный прогресс достигнут в рамках КХД с решеточной регуляризацией (КХД в дискретном евклидовом пространстве).

КХД, «КАМО ГРЯДЕШИ?»

В отличие от процессов, где определяющую или очень существенную роль играют малые расстояния (кинематически это процессы с большими передачами импульса или большими массами), процессы, скажем, упругого рассеяния адронов на малые углы, где, наоборот, определяющими являются большие расстояния (по «ядерным меркам» это $\geq 1 \text{ Фм} = 10^{-13} \text{ см}$) и где взаимодействия действительно *количественно сильные*, остаются недосягаемыми в рамках известных вычислительных реквизитов КХД.

И здесь приходится уповать на феноменологические модели, с помощью которых мы пытаемся *описать* (не объяснить!) экспериментальные данные, которыми нас снабжают коллеги-экспериментаторы. Уже несколько десятилетий длится это увлекательное занятие, и феноменологи время от времени с гордостью демонстрируют свои модели (нагромождения, иногда весьма причудливые, различных функций), прекрасно *описывающие* все, что было измерено от самых низких до самых высоких энергий столкновения. Но на вопрос: «А что же означают Ваши 5, 10, 20, ... параметров?», они лишь разводят руками. А кто-то и возмутится: «Да Вы посмотрите на наш χ^2 ! Попробуйте так!»*.

А эксперимент показывает нечто очень интересное. Упругие и неупругие сечения растут с ростом энергии. Последнее — результат роста открывающихся «каналов» (фактически, это следствие знаменитого $E = mc^2$), первое же означает, что растут (хотя и довольно медленно) расстояния, на которых еще заметно взаимодействуют адроны. Это же показывают и угловые распределения рассеянных адронов, демонстрирующих *дифракционную* картину, определяемую радиусом взаимодействия. Последний медленно, но неуклонно растет с ростом энергии. Похоже, что короткодействие сильных взаимодействий постепенно, с ростом энергии, переходит в *дальнодействие*?! Как быть с конфайнментом?

В отличие от большинства экспериментов, скажем, на Большом адронном коллайдере, исследующих, так сказать, *внутренние горизонты*

* Напомним, что Макс Планк, получив прекрасное описание спектральной плотности излучения, введя один-единственный новый параметр — свою знаменитую постоянную, не почил на лаврах, но в течение нескольких месяцев не мог найти себе места, пока не разгадал ее физический смысл.

микромира, эксперименты по дифракционному взаимодействию адронов открывают нам его *горизонты внешние*.

Итак, по истечении ста лет мы получили доступ к тем самым *неожиданным и новым силам*, о которых задумывался Резерфорд. Силы эти уменьшаются при сближении и возрастают при удалении адронов друг от друга, при этом картина существенно зависит от их относительных скоростей, с ростом которых радиус действия сил увеличивается.

Теперь перед физиками стоит непростая задача — научиться использовать КХД там, где она описывает *действительно сильные* взаимодействия. Новые и более (и менее!) мощные коллайдеры будут снова и снова ставить эту задачу. Без ее выполнения никакая общая теория структуры материи не будет завершённой.