

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМ

DOI: 10.22363/2224-7580-2025-1-107-127

EDN: XZJDKY

ОТ КВАРКОВ К ПАРТОНАМ, И ОТ НИХ – К КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКЕ

В.П. Визгин

*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова
Российской академии наук
Российская Федерация, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14*

Аннотация. В статье исследуется история создания квантовой хромодинамики (КХД), являющейся современной теорией сильных взаимодействий и частью стандартной модели в физике элементарных частиц. Выделены и изучены основные этапы в этом развитии, связанные с поворотными событиями на пути к КХД: 1) создание кварковой модели (1964); 2) обнаружение квазиточечных объектов внутри нуклонов в опытах по глубоко-неупругому рассеянию лептонов на нуклонах и гипотеза партонных (1968-1969); 3) доказательство перенормируемости калибровочных теорий (1971); 4) создание калибровочной теории кварков и глюонов (достижение М. Гелл-Манна с сотрудниками, 1971-1973); 5) открытие явления асимптотической свободы как физической основы КХД (Д. Гросс и др., 1973). Сделан вывод о важности и согласованности достижений каждой из этих групп в завершение КХД.

Ключевые слова: стандартная модель, квантовая хромодинамика, кварки, партонны, глюоны, перенормируемость калибровочных теорий, асимптотическая свобода

«История создания квантовой хромодинамики – это история, наполненная путаницей, ошибками, неверными гипотезами и выводами, короче говоря, это история сложная»

Х. Фрич [1. Р. 595]

Введение

Предварительный анализ хронологии событий на пути к завершению квантовой хромодинамики (КХД) приводит к выделению следующих этапов в этом развитии.

1. В основном негативное восприятие кварков как реальных частиц и принятие кварковой модели как математической конструкции, в которой кварки представляют свойства $SU(3)$ -симметрии (1960-е гг.).

2. Обнаружение квазиточечных объектов внутри адронов в экспериментах по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах, приведшее к гипотезе партонов (1968–1969 гг.).

3. Два главных новых импульса для возрождения теории кварков и завершения КХД: гипотеза партонов и доказательство перенормируемости калибровочных теорий (1969–1971 гг.).

4. Первый путь к завершению КХД, связанный с созданием калибровочной цветной $SU(3)$ -теории кварков и глюонов (М. Гелл-Манн и Х. Фрич с сотрудниками, 1971–1973 гг.).

5. Второй путь к завершению КХД, связанный с открытием Д.Дж. Гроссом, Ф. Вильчеком и Х.Д. Политцером асимптотической свободы и конфайнмента кварков (1973).

Позже между этими двумя группами возникла полемика о приоритете в создании КХД, которую мы в заключение затронем.

Об открытии кварков и восприятию кварковой модели в 1960-е годы

Подробное рассмотрение истории открытия кварков в 1963–1964-е годы содержится в наших статьях [2; 3]. Здесь мы только коснемся вопроса о восприятии кварковой модели сообществом теоретиков в середине и конце 1960-х годов. Кварки Гелл-Манна и Цвейга появились и как формальное (триплетное представление группы – сильного взаимодействия $SU(3)$), и как физическое (элементарные составляющие сильновзаимодействующих частиц) основание «восьмеричного пути» Гелл-Манна и Неемана. Гипотеза кварков позволяла «упростить невероятно сложный «зоопарк» частиц, известных к тому времени. Однако все попытки экспериментаторов в 1960-е и начале 1970-х годах вытащить кварки из тех частиц, в которых они предположительно содержатся, полностью провалились. Это выглядело ненормально» [4. С. 142–143]. Кварковая модель оказывалась нереалистичной из-за странного статуса кварков как дробно-заряженных частиц, которые должны были бы наблюдаться, но все попытки их экспериментального обнаружения оказались неудачными. Кроме того, вера в квантово-полевую программу (или даже парадигму) в эти годы оставалась подорванной (с середины 1950-х гг.) проблемой «нуль – заряда» [2]. «Теория поля, – говорил в Нобелевской лекции Д. Гросс, – была заменена на теорию S -матрицы – теорию, основанную на общих принципах, таких как унитарность и аналитичность, но без фундаментального микроскопического гамильтониана». И далее: «Теория S -матрицы достигла некоторых замечательных результатов, таких как дисперсионные соотношения и развитие теории полюсов Редже. Однако все это были черновики теории, основанной на принципе, что никакой теории нет вообще, по крайней мере в традиционном смысле. Более того, до 1973 года считалось неприличным использовать теорию поля без извинений» [5. С. 732]. А об

отношении к кваркам один из создателей КХД говорил: «Кварки все еще не наблюдались, хотя достигнутые энергии в 10 раз превышали порог для их рождения... Из этого был сделан вывод, что кварки – вымышленные математические объекты... Можно было «выводить» свойства кварков из некоторой модели, но не разрешалось верить в их существование и принимать эту модель всерьез» [5. С. 734]. О весьма скептическом и даже негативном отношении физиков к кваркам вспоминал в своей Нобелевской лекции и экспериментатор Г. Кендалл: «Существовали серьезные проблемы в трактовке кварков как физических составляющих нуклонов, и эти проблемы либо обескураживали, либо вызывали неприятие у большинства теоретического сообщества, включая некоторых из наиболее уважаемых его членов» [6. С. 79].

Настоящим поворотным моментом, резко изменившим эту ситуацию стали работы молодого теоретика Г. 'т Хоофта, ученика голландского физика из Утрехтского университета Мартинуса Вельтмана (1971 г.). В них была убедительно доказана перенормируемость неабелевых калибровочных полей, как безмассовых, так и массивных и со спонтанно нарушенной симметрией. В результате в последующие два-три года согласованные действия теоретиков и экспериментаторов привели к созданию квантовой теории неабелевых калибровочных полей сильного и электрослабого взаимодействий, именуемой стандартной моделью. Наиболее значительным и продуктивным здесь оказался 1973 год, когда М. Гелл-Манн с сотрудниками, с одной стороны, и Д. Гросс с Ф. Вильчеком, а также Х.Д. Политцер – с другой, завершили создание перенормируемой калибровочно-полевой теории сильных взаимодействий, именно КХД. И тогда же электрослабая калибровочно-полевая теория Вайнберга-Салама была признана и подтверждена экспериментально обнаружением предсказываемых ею нейтральных токов. Этот год можно считать годом рождения стандартной модели и одновременно годом полной реабилитации и торжества полевой парадигмы в микрофизике.

Поскольку массив публикаций в эти годы резко возрастает, как и математико-технический уровень теоретических исследований, мы будем часто опираться на обзорные и исторические работы, в том числе на Нобелевские лекции и воспоминания некоторых главных участников событий, а также на обстоятельные монографии А. Пайса [7], Т.Ю. Цао [8], а также сборники работ, посвященные 50- и 60-летним юбилеям теории Янга – Миллса [9; 10] и материалы конференции «Симметрии в физике (1600–1980)», состоявшейся в Испании в 1983 году [11] и др.

От экспериментов по глубоко неупругому рассеянию к партонной модели (1967–1969 гг.)

Следующим после 1964 года поворотным стал 1967 год [2; 4]. Именно в этом году появилась электрослабая теория Вайнберга – Салама, в которой была решена проблема массы калибровочных бозонов, и, кроме того, тогда же Фаддеев и Попов разработали метод квантования неабелевых калибровочных полей, с помощью которого спустя четыре года были доказаны

‘т Хоофтом перенормируемость калибровочных полей. Но оба этих достижения не были тогда же поняты и оценены по достоинству. Поэтому значительность этих событий была скрытой. Так что ситуация в теоретическом сообществе в 1967 году и ближайшие последующие годы оставалась как будто неизменной. Квантово-полевая программа, включая ее калибровочное расширение, казалась большинству теоретиков по-прежнему бесперспективной, так же как представления о существовании фундаментальных частиц, будь то обычные элементарные частицы или загадочные кварки. Большие надежды по-прежнему возлагались на феноменологическую программу S-матрицы и связанные с ней концепции бутстрапа и полюсов Редже. Об этом говорилось, в частности, в Нобелевских лекциях Д. Гросса и Г.У. Кендалла [5; 6]. Цитируем Г.У. Кендалла: «Признанным подходом к пониманию адронных взаимодействий ... была тогда теория бутстрапа, один из нескольких подходов к теории S-матрицы. Он предполагал, что не существует „фундаментальных частиц“: каждая состоит из других. Эта теория была расположена на противоположном полюсе по отношению к конституентным теориям и иногда называлась „ядерной демократией“» [6. С. 78]. Такая ситуация особенно затрудняла развитие кварковой модели на пути к последовательной теории сильных взаимодействий. Трудности кварковой модели связывались с кризисом квантово-полевой программы; и то и другое имели, как выразился Кендалл в Нобелевской лекции, «низкую теоретическую репутацию» [Там же]. Так, первооткрыватель кварков М. Гелл-Манн на одной из конференций так закончил свой доклад о кварках: «Я бы хотел закончить, выделив основную мысль о том, что может оказаться вполне возможным построить ясную теорию адронов, основанную на кварках и некотором их склеивании, расцениваемую как вымышленную, но с достаточным числом физических свойств, которые абстрагируются и применяются к настоящим адронам для построения полной теории. Так как величины, с которых мы начинаем, вымышлены, нет никакой необходимости для конфликта с бутстрапом или с согласованной дуальной партонной точкой зрения» (цит. по [1. С. 732]).

В 1967–1969-е годы полевая программа и кварковая модель получили неожиданную мощную поддержку со стороны эксперимента и экспериментального сообщества. Как раз в эти годы в Стенфордском центре линейного ускорителя под руководством Г.У. Кендалла и Дж.А. Фридмана из Массачусетского технологического института, а также канадского физика Р.Э. Тейлора были проведены эксперименты по глубоко неупругому рассеянию электронов на протонах, из которых следовало, что внутри протона имеются точечно-подобные объекты, названные Р. Фейнманом партонами. Результаты по глубоко неупругому рассеянию, полученные в Стенфорде, были впервые представлены на XIV Рочестерской конференции по физике высоких энергий в августе 1968 года. В итоговом докладе директор Стенфордского центра линейного ускорителя В.К.Г. Пановский резюмировал: «Таким образом, теоретические размышления сфокусированы на той возможности, что эти данные могли бы дать указание на поведение точечных заряженных структур в нуклоне» (цит. по [6. С. 100]). Эти «теоретические размышления» принадлежали

в первую очередь стенфордскому теоретику Дж. Бьеркену, который при планировании экспериментов по глубоко-неупругому рассеянию предполагал, что они смогут пролить свет на «элементарные составляющие» нуклонов. При этом он опирался на связанную с кварковой моделью так называемую алгебру токов. Полученные на ее основе результаты он считал «настолько ясными, что, вспоминая об исторических примерах (имелись, скорее всего, в виду опыты Резерфорда, а также Марсдена и Гейгера по рассеянию альфа-частиц на ядре атома – *V.V.*)», предлагал «их интерпретировать в терминах «элементарных составляющих нуклона» (цит. по [12. С. 112]). Об этом он говорил в своей лекции на Международной школе «Э. Ферми» в июле 1967 году в Варенне. И это было, как подчеркивал Дж. А. Фридман в своей Нобелевской лекции, «задолго до того, как появились наши первые результаты по неупругому рассеянию». Говоря об «элементарных составляющих нуклона», Бьеркен имел в виду «точечно-подобные структуры протона». Однако «в то время, – продолжал Фридман, – бьеркеновские результаты произвели на нас малое впечатление. Возможно, так произошло потому, что эти результаты основывались на алгебре токов, которую мы находили в большой степени теорией для посвященных. Или, быть может, это определялось тем, что мы были слишком пропитаны физикой того времени, которая предполагала, что адроны являются протяженными объектами с диффузными подструктурами» [12. С. 112]. Неудивительно, что первые, весьма неожиданные, результаты экспериментов по глубоко неупругому рассеянию электронов объяснил именно Бьеркен в терминах скейлинга, или масштабной инвариантности, свойственной этому рассеянию. Скейлинг означал зависимость величин, характеризующих рассеяние, не от двух переменных, а от одной, как в формуле Резерфорда при описании рассеяния альфа-частиц на ядре атома. Летом 1968 года в Стенфорд приехал Р. Фейнман, который, ознакомившись с результатами Бьеркена, придумал их простую и наглядную интерпретацию, введя партоны, точечно-подобные частицы, заполняющие внутренность нуклонов (см. [13]). В октябре он снова появился в Стенфорде и прочел лекцию о партонной модели, после чего теоретики начали связывать партоны с кварками и кварк-партонная картина сильных взаимодействий стала началом заключительной стадии формирования квантовой хромодинамики. 1969 год стал поворотным на этой стадии: восстановился плодотворный контакт теоретиков и экспериментаторов, были опубликованы как сенсационные результаты экспериментаторов, так и теоретические работы Бьеркена и Фейнмана (см. [12; 6; 7; 8]). Стали разрабатываться кварк-партонные модели, которые при всей их привлекательности приводили, по словам Фридмана, к «вопиющей несогласованности»: точечно-подобные конститuentы (партоны, в конечном счете, кварки), с одной стороны, должны были сильно взаимодействовать между собой, чтобы не быть наблюдаемыми в лаборатории, а с другой – для объяснения результатов глубоко неупругого рассеяния они должны были вести себя как «свободные», невзаимодействующие между собой частицы [12. С. 114].

В эти и последующие годы усилия теоретиков были направлены на устранение этой несогласованности, и это было достигнуто как благодаря открытию феномена асимптотической свободы, так и на основе разработки калибровочной цветной $SU(3)$ -симметрии. При этом и первооткрыватели понятия асимптотической свободы Д. Гросс, Ф. Вильчек, Х.Д. Политцер, Г. 'т Хоофт, и создатели теории кварков и глюонов Х. Фрич и М. Гелл-Манн впоследствии подчеркивали важнейшую роль в их достижениях как экспериментальных, так и теоретических работ по неупругому рассеянию, включая теорию скейлинга и партонную модель. Приведем несколько высказываний названных творцов КХД. Вот довольно обширная цитата (с некоторыми купюрами) из Нобелевской лекции Д. Гросса, содержащая некоторые важные дополнительные детали: «Эксперименты по глубоко неупругому рассеянию на установке SLAC оказали на меня сильное влияние. Они явно показали, что на малых временах протон ведет себя так, как будто он сделан из точечных объектов со спином $\frac{1}{2}$... Мы руководствовались экспериментами, которые были выполнены тогда в ЦЕРНе (это была еще одна серия опытов по неупругому рассеянию, именно рассеянию нейтрино на нуклонах. – *В.В.*)... Эксперименты вскоре показали, что компоненты протона имеют барионное число $1/3$, другими словами, они были похожи на кварки. Тогда я полностью убедился в реальности кварков... Конечно, между кварками должно было существовать сильное взаимодействие, которое размывает их точечно-подобное поведение» [1. С. 736].

После работ Бьеркена и Фейнмана по интерпретации результатов опытов по неупругому рассеянию на основе скейлинга и партонной модели Гросс «вскоре осознал, что в контексте теории поля только свободная, невзаимодействующая теория может дать точный скейлинг». А с другой стороны, «едва ли можно выключить или сделать очень слабым взаимодействие между кварками, так как тогда можно ожидать, что адроны должны легко рассыпаться на кварковые составляющие, а свободных кварков никто не видел». «Этот парадокс и поиск объяснения скейлинга, – заключал Гросс, – обеспечили меня работой на последующие четыре года» [Там же. С. 737]. Об этом же говорил в своей Нобелевской лекции Ф. Вильчек, соавтор Гросса по работам, в которых было опубликовано их открытие асимптотической свободы: «Атмосфера таинственности вокруг свойств кварков еще более сгущалась, когда Дж. Фридман, Г. Кендалл, Р. Тейлор и их коллеги на линейном ускорителе в Стенфорде (SLAC) направили фотоны с высокой энергией на протоны и обнаружили внутри нечто вроде кварков. Неожиданным было то, что при сильных столкновениях кварки двигаются (точнее, передают энергию и импульс) так, как если бы они были свободными частицами» [14. С. 769].

Для Г. 'т Хоофта, который справедливо считается сооткрывателем асимптотической свободы, неожиданные результаты опытов по неупругому рассеянию и их интерпретация в работах Бьеркена и Фейнмана, также были весьма важны. «Эксперименты тем временем углублялись в область все больших энергий, и было обнаружено странное скейлинговое явление. Его истинная природа была изучена Дж. Бьеркеном... Позднее это было

интерпретировано Фейнманом следующим образом: на малых расстояниях составные части адрона движутся сравнительно свободно. Эти составляющие он назвал «партонами». Тогда, продолжал 'т Хоофт, «у многих сложилось впечатление, что ни одна квантовая теория поля не в состоянии описать бьеркеновский скейлинг. Мне было не очень понятно, почему многие так считали, поскольку я знал о весьма изящном скейлинговом поведении неабелевых калибровочных теорий... Когда я поделился своими догадками о том, что теории с калибровочной группой SU(3) было бы достаточно для описания сил взаимодействия между кварками, с Вельтманом, то он предостерег меня, сказав, что эту идею никто не стал бы воспринимать всерьез до тех пор, пока не будет выяснен кварковый конфайнмент» [15. С. 106]. Стенфордские ускорительные опыты по изучению структуры нуклонов и их истолкование в духе партонной модели оказали существенное воздействие и на возвращение одного из главных первооткрывателей кварков М. Гелл-Манна к кварковой модели и развитию ее до калибровочной теории кварков и глюонов в серии совместных работ с молодым немецким теоретиком Х. Фричем и другими сотрудниками [1. Р. 600]. Так неожиданные результаты опытов по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах и их интерпретация на основе партонной модели (1968–1969 гг.) оказались важнейшим фактором на пути и к понятию «асимптотической свободы», и к кварк-глюонной калибровочной теории сильных взаимодействий, то есть к КХД, разработанных в 1971–1973-е годы в работах 'т Хоофта, Фрича и Гелл-Манна (с соавторами), Гросса, Вильчека и Политцера и др.

Поворотный момент 1971 г.: Г.'т Хоофт доказывает перенормируемость неабелевых калибровочных полей

В конце предыдущего раздела мы забежали немного вперед и здесь возвращаемся к 1971 году, когда Г.'т Хоофт доказал перенормируемость янг-миллсовских калибровочных теорий. Поначалу концепция перенормировок многим казалась каким-то формально-вычислительным трюком, позволяющим проводить расчеты с помощью теории возмущений. Не случайно Нобелевская премия за разработку этой теории в рамках квантовой электродинамики была вручена Р.Фейнману, Дж. Швингеру и С. Томонаге более чем через два с половиной десятилетия после их открытия. «При известном снобизме, – писал Л.Б. Окунь в начале 1980-х годов – можно сказать, что требование перенормируемости теории является чисто „ремесленным“. Цель его – придать смысл расчетам по теории возмущений, но природа может совершенно не заботиться об этом» [16. С. 146].

Но в дальнейшем требование перенормируемости теории превратилось в один из главных критериев качества теории, ее непротиворечивости (отсутствие расходимостей) и вычислительной эффективности и даже приобрело, по словам Окуня, эстетический характер: «Перенормируемая теория слабого взаимодействия (при этом имеется в виду единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий. – В.В.), несмотря на свое

«неаристократическое», «ремесленное» происхождение, а, возможно, благодаря ему, полна жизненных сил, красива и обладает большим запасом предсказаний» [Там же. С. 147]. И творцы СМ, такие как нобелевские лауреаты А. Салам, С. Вайнберг, Д. Гросс, Ф. Вильчек и др., а также видные специалисты по физике элементарных частиц, такие как Э. Зи, Л. Бринк, К.К. Пхуа и др., уверенно выделяют работы 'т Хоофта по перенормируемости неабелевых калибровочных теорий 1971 года как явно поворотные. Вот как об этом говорил в Нобелевской лекции один из главных участников тех героических событий Д. Гросс: «Эффектная работа Г. 'т Хоофта о перенормируемости теории Янга – Миллса переоткрыла для физической общественности неабелевы калибровочные теории» [1. С. 738]. Эти воспоминания можно дополнить фрагментом из более поздней книги Вайнберга «Мечты об окончательной теории»: «Более внимательно посмотрев на то, что сделал 'т Хоофт, я убедился, что он действительно нашел ключ к доказательству сокращения всех бесконечностей. Хотя все еще не существовало ни малейших экспериментальных свидетельств в пользу электрослабой теории, но именно после работы 'т Хоофта она стала частью рабочего аппарата физики... Открытие, из-за которого физики с самого начала проявили интерес к этой теории, состояло в том, что она решает внутреннюю концептуальную проблему физики частиц – проблем у бесконечностей в теории слабых ядерных сил» [4. С. 96]. Впоследствии Вайнберг называл 'т Хоофта «одним из величайших физиков нашего времени», имея в виду его работы по перенормируемости неабелевых калибровочных теорий [17. С. 82]. О поворотном характере работы 'т Хоофта говорили физики и спустя несколько десятилетий. При этом многие из них отмечали также важную роль учителя 'т Хоофта М. Вельтмана. «В 1999 году 'т Хоофт и Вельтман, – писал в своей книге Э. Зи, – получили Нобелевскую премию за доказательство того, что электрослабая $SU(2) \times U(1)$ -теория является перенормируемой, *проложив тем самым путь к торжеству неабелевых калибровочных теорий при описании сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий* (курсив наш. – В.В.) [18. С. 428]. В предисловии к трудам юбилейной конференции, посвященной 60-летию теорий Янга-Миллса, редакторы этого издания Л. Бринк и К.К. Пхуа связывали это достижение 'т Хоофта с началом научной революции: «В 1971 году молодой голландский студент Хоофт потряс мир, объявив, что теории Янга-Миллса перенормируемы даже в том случае, когда симметрии теории спонтанно нарушены. В следующем году он завершил доказательство вместе со своим научным руководителем М. Вельтманом. Это было началом настоящей революции. Наконец, мы получили последовательную квантовополевую теорию слабых взаимодействий» [21. Р. VI].

Заслуживает особого внимания рассказ М. Вельтмана о том, как его студент 'т Хоофт решил проблему перенормируемости для безмассовых полей, а затем сумел перенести развитую им технику на поля с массивными бозонами и спонтанно нарушенной симметрией, по существу, переоткрыв электрослабую теорию и доказав ее перенормируемость: «Как-то осенью или зимой 1970/1971 года Вельтман с 'т Хоофтом шли по университетскому

кампусу. – Мне все равно, что и как, – заявил Вельтман своему студенту, – но нам нужна хотя бы одна перенормируемая теория с массивными векторными бозонами, и похоже это будет на природу или нет, не важно, это все детали. – Это я могу, – тихо сказал ‘т Хоофт. Прекрасно понимая, как трудна проблема и что другие физики, например Р. Фейнман, пытались ее решить и не смогли, Вельтман очень удивился, услышав ‘т Хоофта. Он чуть не врезался в дерево. – Что-что? – переспросил он. – Я могу это сделать, – повторил ‘т Хоофт. Вельтман так долго бился над проблемой, что ему не верилось, будто у нее может быть такое простое решение, как представлялось ‘т Хоофту. Понятно, почему Вельтман отнесся к его словам с недоверием. – Запиши, и посмотрим, – сказал он» (Из разговора Вельтмана с философом физики Э. Пикерингом. Цит. по [20. С. 54–55]). И хотя Вельтману не нравился использованный ‘т Хоофтом механизм Хиггса, он решил проверить результаты ‘т Хоофта на компьютере в ЦЕРНе с помощью разработанной им компьютерной алгебраической программы. Расчеты ‘т Хоофта оказались верными, и голландские теоретики поняли, что им удалось получить полностью перенормируемую квантово-полевую теорию электрослабых взаимодействий. «Психологический эффект от доказательства перенормируемости был огромен», – вспоминал впоследствии Вельтман (цит. по [20. С. 55]).

Опубликованные в *Nuclear Physics* две обсуждаемые статьи ‘т Хоофта [21; 22] были весьма объемисты и заполнены сложными вычислениями. Неудивительно, что даже такие искушенные теоретики, как С. Вайнберг, Ш. Глэшоу и др., поначалу их не поняли и не оценили должным образом. Да и шеф ‘т Хоофта М. Вельтман не сразу в них разобрался. Впоследствии даже в таких основательных и специальных монографиях по калибровочным полям, как цитированные выше книги Л.Б. Окуня и Э. Зи [16; 18], эти работы ‘т Хоофта упоминаются, признаются «прорывными», но фактически не рассматриваются. «...Вайнберг еще в своей исходной работе, – говорится в книге Окуня, – высказал гипотезу о том, что лагранжиан (электрослабой теории. – *V.B.*) перенормируем. Но доказать справедливость этого утверждения оказалось очень непросто. Это сделал ‘т Хоофт (1971 г.). Рассмотрение этого доказательства выходит за пределы нашей книги» [16. С. 174]. Э. Зи, отметив революционное значение этих работ ‘т Хоофта, отказывается от их рассмотрения и лишь кратко указывает на формально-математическую суть доказательства [20. С. 428].

Вот фрагменты краткого рассказа самого ‘т Хоофта, относящегося к 1998 году: «В 1970 году ...мы (он и Вельтман. – *V.B.*) решили составить следующую программу моих исследований: 1) Как в точности надо перенормировать амплитуды в чистой, имеющей нулевую массу системе теории Янга – Миллса? Каковы в точности правила вычислений? Конечно, все это надо было делать в рамках теории возмущений. 2) И как затем можно было бы согласовать найденную процедуру с массовыми членами? Я знал, что все это в конце концов окажется теорией Хиггса. Первый шаг не обещал быть легким. Как можно вычитать друг из друга бесконечности и как вычислять поправки высших порядков, которые не нарушали бы локальную калибровочную

инвариантность?» [15. С. 13]. И далее 'т Хоофт использует результаты Л.Д. Фаддеева и В.Н. Попова по квантованию калибровочных полей, полученные ими еще в 1967 году на основе применения фейнмановского метода интегралов по путям (или метода функциональных интегралов): «Функциональные интегралы для калибровочной теории изучили прекрасно Л.Д. Фаддеев и В.Н. Попов... Я заметил, что определитель Фаддеева-Попова (играющий в их теории ключевую роль – см. предыдущий раздел нашей работы. – *V.B.*) можно переписать в терминах функционального интеграла Гаусса...», что позволило довести до конца доказательство перенормируемости безмассовых калибровочных теорий. „Я с нетерпением ожидал следующего шага: добавления массовых членов, – продолжал 'т Хоофт. – Теперь это было легко. Абсолютная калибровочная инвариантность была абсолютно существенна, так что добавлять массовый член, как в модели Глэшоу, было запрещено. Но механизм Хиггса прекрасно работал. И было уже легко обобщить наши процедуры так, чтобы включить в них механизм Хиггса. И снова унитарность и другие необходимые свойства можно было установить с помощью теории возмущений“» [Там же. С. 14–16].

Завершение основ КХД: путь группы М. Гелл-Манна и Х. Фрича (1971–1973 гг.)

Итак, мы подошли к решающим событиям 1973 года, которые означали завершение основ квантовой хромодинамики (КХД). Первым важным вкладом здесь были работы группы М. Гелл-Манна, Х. Фрича и сотрудничающих с ними У. Бардина и Г. Лейтвилера, связанных с Калифорнийским технологическим институтом (Калтехом) и ЦЕРНом. Они, по-видимому, первыми пришли к пониманию теории сильных взаимодействий как теории кварков и октета безмассовых калибровочных глюонов, связанных с цветной калибровочной $SU(3)$ -симметрией. Вспомним, что Гелл-Манн был бесспорным лидером в разработке теории сильного взаимодействия 1950-х годов. Параллельно с Ю. Нееманом он открыл $SU(3)$ -симметрию сильного взаимодействия, а затем (также параллельно) с Г. Цвейгом – кварковую модель (соответственно в 1961 и 1964 гг.).

Но в это время, вплоть почти до создания КХД, большинство теоретиков утратило веру в то, что сильные взаимодействия могут быть описаны тем или иным вариантом квантовой теории поля и связанным с ним выделением каких-то частиц в качестве первичных, или фундаментальных. Поэтому и отношение к загадочным кваркам (с дробными электрическими зарядами и не существующими в свободном виде) было весьма критическим. И сам Гелл-Манн испытывал сомнения в реальности кварков, в отличие от своего соавтора Х. Фрича, который был явным приверженцем концепции кварков как реальных частиц. Однако в конце 1960-х годов и затем в 1971 году произошли события, изменившие (одно постепенно, другое сразу) соотношение сил в пользу кварков и квантово-полевой калибровочной программы. О первом подробно рассказывалось выше: речь идет о сенсационных результатах

экспериментов по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах, согласно которым нуклон ведет себя как совокупность квазиточечных объектов, названных Р. Фейнманом партонами. О втором событии говорилось в предыдущем разделе – это было доказательство перенормируемости неабелевых калибровочных теорий ‘т Хоофтом. В результате была не только подтверждена правильность теории Вайнберга – Салама, но и созданы основные предпосылки для возрождения калибровочно-полевой концепции и в отношении сильного взаимодействия. Вместе с тем участники событий впоследствии отмечали нагромождение предубеждений, ошибок, сменявшихся разрешением парадоксов и прорывами на финишном, скорее, кривом, чем прямом пути, к КХД (см. эпиграф).

Х. Фрич (H. Fritzsch), окончивший в 1968 году Лейпцигский университет, был горячим приверженцем гелл-манновских кварков, в реальность которых он верил больше, чем их изобретатель. Видимо, это произвело впечатление на Гелл-Манна, который в 1970 году стал сотрудничать с Фричем, пытаясь приспособить модель кварков для объяснения результатов экспериментов по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах и связать ее с квазиточечной и партонной моделями структуры нуклонов Дж. Бьеркена и Р. Фейнмана. Основным методом, которым они пользовались, была «алгебра токов», рассматриваемая вблизи светового конуса и потому получившая название «алгебры светового конуса». Вообще метод алгебры токов также ранее был развит Гелл-Манном и им же очень выразительно описан еще в 1964 году: «Чтобы считать предполагаемые соотношения верными, мы используем метод обобщения, исходя из лагранжевой модели теории поля. Другими словами, мы строим математическую теорию сильно взаимодействующих частиц, которая может соответствовать, а может и не соответствовать действительности, находим подходящие алгебраические соотношения, которые выполняются в модели, постулируем их выполнение, а затем выбрасываем модель» (цит. по [5. С. 733]). Такой подход позволял получать важные феноменологические соотношения алгебраического характера, избегая погружения в квантовую теорию поля, которая находилась в кризисе, особенно в отношении сильных взаимодействий. В 1970–1971-е годы «мы получили те же результаты, что и Фейнман, который предложил модель партонов, если партоны отождествить с кварками, – вспоминал впоследствии Фрич. – Позже выяснилось, что результаты алгебры токов на световом конусе почти совпадают с результатами КХД благодаря асимптотической свободе теории» [23. Р. 21]. Там же было впервые выдвинуто предположение «о новых нейтральных объектах, не наблюдаемых непосредственно при глубоко неупругом рассеянии, но могущих появиться в тензоре энергии-импульса, фигурирующем в алгебре токов, и отождествляемых с глюонами, которые обеспечивают взаимодействие между кварками» [24. Р. XI]. Более того, уже тогда они отметили «возможность того, что каждый из u , d , s -кварков может находиться в одной из трех форм, названной позже «цветом», и что на этом пути можно решить проблему, связанную с принципом Паули, при составлении некоторых барионов из кварков [Ibid.]».

В ЦЕРНе к Гелл-Манну и Фричу примкнул У. Бардин (сын знаменитого физика Нобелевского лауреата Дж. Бардина), и они подготовили доклад для конференции по масштабной и конформной симметрии в физике адронов (1972), опубликованный затем в «Трудах» этой конференции [25]. В нем они показали, что «цветная модель кварков» обладает рядом преимуществ, и прежде всего позволяет обойти трудность, связанную с кажущимся нарушением принципа Паули. Она также не приводила, в отличие от ранее предложенной схемы Ё. Намбу – М. Хана с нарушенной цветной $SU(3)$ – симметрией, к существованию наблюдаемых цветных объектов. В лекции «Кварки», прочитанной Гелл-Манном на Международной университетской неделе по ядерной физике в Шладминге в 1972 году, изобретатель кварков подчеркивал их «нереалистичность», утверждая, что хотя адроны ведут себя так, как будто они состоят из кварков, сами кварки не являются самостоятельно существующими частицами [39]. Наконец, в обстоятельном совместном докладе на XVI Международной конференции по физике высоких энергий в Чикаго (1972) Гелл-Манн и Фрич рассмотрели все преимущества введения нового квантового числа кварков – «цвета» и связанного с ним принципа бесцветности реально наблюдаемых адронов. Появление октета векторных глюонов, осуществляющих взаимодействие между кварками, было связано с локализацией цветной $SU(3)$ -симметрии на основе теории неабелевых калибровочных полей Янга – Миллса [26]. В комментарии к этой статье в томе избранных трудов Гелл-Манна подчеркнуто, что «эта статья была первой, в которой рассматривалась янг-миллсовская теория цветного октета глюонов, связанного с цветными кварками. Иначе говоря, это была теория, которую Фрич и Гелл-Манн позже называли квантовой хромодинамикой» [24. Р. 12].

Об этом же писал Фрич в статье, опубликованной в 2012 году: «Весной 1972 года мы (то есть он вместе с Гелл-Манном. – *В.В.*) начали интерпретировать цветную группу симметрии как калибровочную. Полученная калибровочная теория была похожа на квантовую электродинамику. Взаимодействие кварков порождалось октетом безмассовых калибровочных бозонов, которые мы назвали глюонами. Позже мы назвали эту теорию квантовой хромодинамикой» [23. Р. 21]. Заметим, что Фрич предлагал назвать цветные безмассовые калибровочные бозоны хромонами, но за ними закрепилось название, предложенное Гелл-Манном, то есть глюоны [38. Р. 16]. Тогда же они в основу теории положили по существу правильный лагранжиан, который фигурировал и в лекциях Гелл-Манна, прочитанных на зимней школе в Шладминге [39].

Фактически Гелл-Манн и Фрич были очень близки к тому, чтобы открыть явление асимптотической свободы для КХД, поскольку в этой теории «глюоны взаимодействуют не только с кварками, но и между собой... и это взаимодействие приводит к уменьшению константы связи при увеличении энергии, то есть теория становится асимптотически свободной» [23. Р. 21]. Но, как вспоминал впоследствии Фрич, они тогда считали что на малых расстояниях (и больших энергиях) взаимодействие между кварками обращается в нуль [38. Р. 16]. Правда, как несколько позже показали Д. Гросс,

Ф. Вильчек и Х. Политцер, оно не исчезает, а становится очень малым. Это, по мнению Фрича, помешало им открыть асимптотическую свободу сильных взаимодействий. Вероятно, сделать решающий шаг на пути к этому могли помешать им еще три обстоятельства:

- 1) недостаточная укорененность их теории в квантовой теории поля;
- 2) эта теория рассматривалась ими как одна из возможностей, которая еще может претерпеть значительные изменения, в частности, из-за недостаточно разработанного представления о конфайнменте кварков при увеличении расстояния между ними;
- 3) неясности в отношении степени реальности кварков и глюонов; это в большей мере касалось самого Гелл-Манна, который считал, что «так как величины, с которых мы начинаем (то есть кварки. – *В.В.*), вымышлены, нет никакой необходимости для конфликта с бутстрапом...» (цит. по [1. С. 732]) или другими неполевыми феноменологическими концепциями.

Завершение основ КХД: путь группы Д. Гросса, Ф. Вилчека и Х.Д. Политцера

Решающий шаг на пути к открытию асимптотической свободы был сделан весной 1973 года Д. Гроссом вместе с Ф. Вильчеком и, независимо, Х.Д. Политцером. Впрочем, за год до этого Г. 'т Хоофт уже знал об этом феномене, но полагал, что надо сначала решить проблему конфайнмента, а потом уже сразу описать поведение кварков как на малых, так и на больших расстояниях [15]. Последняя важная работа Гелл-Манна с сотрудниками [27] была написана и опубликована уже после ознакомления авторов с работами Гросса и Вильчека, а также Политцера по асимптотической свободе. В ней содержалась интерпретация цветной теории кварков и глюонов как полевой теории сильного взаимодействия. Отчетливо говорилось о том, что цветная SU(3)-симметрия является точной (ненарушенной). Фрич, Гелл-Манн, Лейтвилер и др. подчеркивали впоследствии, что открытие асимптотической свободы в их теории, которую они сначала называли квантовой адродинамикой, а затем КХД, стало важным шагом на пути к физическому осмыслению скейлингового поведения адронов при глубоко неупругом рассеянии лептонов на нуклонах и к утверждению КХД как полевой теории сильных взаимодействий. Важным было и то, что с асимптотической свободой оказался связан и прямо противоположный эффект: увеличение кварк-глюонного взаимодействия при увеличении расстояний получило название конфайнмента кварков и глюонов, то есть их пленения или удержания внутри адронов.

Теперь, на основе Нобелевских лекций Д. Гросса, Ф. Вильчека и Х.Д. Политцера [5; 14; 28], а также других текстов Гросса и Гросса вместе с Вильчеком [29–31], рассмотрим версию создания КХД, принадлежащую Гроссу и Вильчеку, согласно которой КХД как квантово-полевая теория сильного взаимодействия была создана прежде всего именно в их (а также Политцера) работах по асимптотической свободе. Поворотным для Гросса, занимавшегося теорией сильного взаимодействия, стал 1969 год, когда его внимание

привлекли сенсационные результаты по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах. Эксперименты, проводимые в ЦЕРНе, «вскоре показали, что компоненты протона имеют барионное число $1/3$, другими словами, они похожи на кварки. Тогда я полностью убедился в реальности кварков». «Я вскоре, – продолжал Гросс, – осознал, что в контексте теории поля только свободная, невзаимодействующая теория может дать точный скейлинг. Пока эксперименты подтверждали, что со скейлингом все в порядке. Однако едва ли можно выключить или сделать очень слабым между кварками взаимодействие, так как тогда можно было ожидать, что адроны должны легко рассыпаться на кварковые составляющие, а свободных кварков никто не видел. Этот парадокс и поиск объяснения скейлинга обеспечили меня работой на следующие четыре года» [1. С. 737]. Последний парадоксальный поворот Гросса на пути к асимптотической свободе произошел к концу 1972 г.: «К концу 1972 года я выучил теорию поля, в особенности методы, связанные с ренормализационной группой, настолько, чтобы взяться за проблему скейлинга. Я решил довольно осторожно доказать, что локальная теория поля не может объяснить экспериментальный факт скейлинга и потому не является подходящей основой для описания сильных взаимодействий... План атаки состоял из двух частей. Во-первых, я хотел доказать, что... исчезновение эффективной связи на малых расстояниях – позднее названное асимптотической свободой, было необходимо для объяснения скейлинга. Во-вторых, я хотел доказать, что асимптотически свободных теорий (поля. – *B.V.*) не существует» [1. С. 739]. При этом Гросс исходил из того, что перенормируемые квантово-полевые теории подобны квантовой электродинамике, и они не допускали асимптотической свободы. Близкий результат получил в 1972 году также Э. Зи. Но они не рассматривали неабелевы калибровочные теории янг-миллсовского типа. С осени 1972 года к Гроссу присоединился его студент Ф. Вильчек, который с самого начала работал скорее как соавтор, чем как студент. «Мы решили вычислить бета-функцию для теории Янга-Миллса. Это был единственный пробел в развиваемой мной цепочке аргументов, – вспоминал Гросс. – *Он не был заполнен в основном из-за того, что теория Янга-Миллса все еще казалась странной и сложной* (курсив наш. – *B.V.*)» [Там же. С. 740–741]. Появившийся в это время в Принстоне, где работали Гросс и Вильчек, Коулмен спросил Гросса о том, занимается ли кто-нибудь вычислением бета-функции для теории Янга – Миллса, и тот ответил, что этим занимается сейчас он вместе с Вильчеком. Коулмен же сказал, что он попросил своего студента Х.Д. Политцера обобщить на неабелев случай механизм разрушения симметрии в абелевой калибровочной теории. В результате Политцер занялся той же проблемой, которую решали Гросс с Вильчеком, которые сначала (в феврале 1973 г.) пришли из-за ошибки в знаке к ошибочному выводу об отсутствии асимптотической свободы. Гросс эту ошибку нашел, и примерно тогда же свои вычисления завершил Политцер. Полученные результаты совпали, и они направили свои статьи в «Phys. Rev. Letters», которые были опубликованы в июне 1973 года [32; 33].

Основной результат сформулирован ими уже в первом абзаце статьи: «В последнее время неабелевы калибровочные теории привлекли значительное внимание как способ построения единых перенормируемых теорий слабого и электромагнитного взаимодействия. В этой заметке мы сообщаем об исследовании асимптотического поведения этих теорий. Мы обнаружили, что они обладают тем замечательным свойством, возможно уникальным среди перенормируемых теорий, что они асимптотически близки к теории свободного поля. Такие асимптотически свободные теории демонстрируют бьеркенский скейлинг... Поэтому мы предполагаем, что для объяснения скейлинга Бьеркена, который до сих пор ускользал от понимания с позиций теории поля, нужно искать неабелеву калибровочную теорию сильных взаимодействий» [32. Р. 1343] (Эти высказывания Гросс также приводит в своей Нобелевской лекции [5. С. 743].) Мы помним, что Гросс поначалу хотел показать, что асимптотически свободных перенормируемых теорий поля вообще не существует. Поэтому, вспоминая он в Нобелевской лекции, «для меня открытие асимптотической свободы было полнейшей неожиданностью. Подобно атеисту, с которым только что заговорил горящий куст, я немедленно стал истинно верующим. Теория поля не ошибочна – наоборот, скейлинг должен получить свое объяснение в асимптотически свободной теории сильных взаимодействий. Наша первая статья содержала, в дополнение к сообщению об асимптотической свободе теории Янга-Миллса, гипотезу, что это может предложить объяснение скейлинга... а также, что было самым важным, предположение, что сильные взаимодействия должны быть основаны на цветной калибровочной теории» [Там же]. Из исторического обзора по созданию КХД, написанного Х. Фричем в журнале «Курьер ЦЕРНа» в 2012 году [23. Р. 21], следовало, что уже весной 1972 года Гелл-Манн и он уже заложили основы цветной калибровочной теорией кварков и глюонов, которую они позже назвали КХД. А вскоре после открытия явления асимптотической свободы сначала 'т Хоофтом (1972), а затем, в 1973 году, Гроссом и Вильчеком, а также Политцером Гелл-Манн и Фрич вместе с Г. Лейтвилером опубликовали некоторые детали этой теории. Вскоре, как бы в ответ на версию Фрича – Гелл-Манна, Д. Гросс и Ф. Вильчек кратко описали свою версию создания КХД в том же журнале [31]. Их основное утверждение заключается в том, что теоретические работы, которые сыграли центральную роль в этой трансформации (приведшей к созданию КХД), можно идентифицировать с большой точностью, и это именно их и Политцера статьи 1973 года [32; 33].

В качестве основных предпосылок, или путеводных нитей, они называют:

1) модель цветных кварков, плененных внутри адронов (в разработку которой, вслед за М. Ханом и Ё. Намбу, внесли Гелл-Манн и Фрич);

2) эксперименты по глубоко неупругому рассеянию, открытие скейлинга и партонов;

3) доказательство перенормируемости калибровочных теорий ('т Хоофтом и Вельтманом) и возрождение метода ренорм-группы применительно к теории сильных взаимодействий.

Авторы цитируют свою основную статью 1973 года и приходят к выводу, что в этих высказываниях выражена суть КХД и разрешено основное противоречие между скейлингом и квантовой теорией поля [32]. Особого внимания заслуживает и их оценка вклада Гелл-Манна и Фрича. В докладе последних на XVI Международной конференции по физике высоких энергий в Чикаго летом 1972 года [26], как подчеркнули авторы, «скейлинг рассматривался и интерпретировался в терминах «кварков, рассматриваемых формально». При этом «обсуждение не было укоренено в квантовой теории поля; большая его часть, касающаяся сильных взаимодействий, относилась к теории S-матрицы...». Правда, кратко обсуждалась «как одна из нескольких возможность использования октета цветных глюонов, но в контексте алгебры токов на световом конусе, а опять-таки не в рамках квантовой теории поля» [31]. Даже в статье Гелл-Манна, Фрича и Лейтвилера [27], опубликованной в октябре 1973 года, вскоре после решающих статей Гросса и Вильчека, а также Политцера [32; 33], с которыми они уже были знакомы, где была развита калибровочно-полевая теория кварков и октета глюонов, уверенность в правильности этой теории была выражена недостаточно определенно. «По мере развития событий наиболее глубокие и плодотворные аспекты квантовой хромодинамики и асимптотической свободы, – заключали Гросс и Вильчек, – оказались прочно связанными с квантовой теорией поля, их можно было проверить, предсказывая отклонения от скейлинга. Однако именно эти аспекты авторы (имеются в виду Гелл-Манн и его соавторы. – *B.B.*) не решились принять даже после того, как они были проанализированы» [31].

Таким образом, если Фрич и Гелл-Манн, которые уже в 1972 году рассматривали теорию цветных кварков и глюонов как возможный вариант теории сильных взаимодействий, считали себя основными создателями КХД (тем более, что и сам термин «хромодинамика» был введен Гелл-Манном), то Гросс и Вильчек, открывшие понятие асимптотической свободы и связавшие его с квантово-полевой теорией цветных кварков и глюонов, полагали, что завершающие шаги на пути к КХД сделали именно они с Политцером. К тому же Гелл-Манн, так много сделавший в изобретении модели кварков, все время колебался как в отношении реального существования кварков и глюонов, так и того, что эта модель укоренена в квантовой теории поля.

Более взвешенная точка зрения на вопрос о главных творцах КХД принадлежит еще одному классическому стандартной модели С. Вайнбергу [34]. Он отмечает и важность работ Гелл-Манна с соавторами по цветной теории кварков и глюонов: «Тогда уже (то есть накануне работ по асимптотической свободе. – *B.B.*) было известно... что кварки каждого аромата... должны быть трех цветов. Поэтому было естественно принять калибровочную симметрию сильного взаимодействия SU(3)-группу, действующую на трехзначное цветное квантовое число кварков» [34. Р. 110]. Безусловно, прорывом были, по его мнению, и работы Гросса и др. по асимптотической свободе, связавшие заряженные партоны с кварками. «Но оставалась большая проблема, – подчеркивал далее Вайнберг, – что делать с безмассовыми SU(3)-калибровочными бозонами, глюонами? В первых статьях Гросса с Вильчеком и Политцера

предполагалось, что причиной ненаблюдаемости безмассовых глюонов было спонтанное нарушение калибровочной симметрии, точно так же, как в электрослабой теории. Тогда можно было думать, что глюоны слишком тяжелы, чтобы их можно было наблюдать. Но очень скоро после этого многие авторы (включая, прежде всего, Гелл-Манна с соавторами [27], двухчастную статью Гросса и Вильчека в «Phys. Rev.» [35] и работу самого Вайнберга 1973 года [36]. – *В.В.*) независимо предложили альтернативное объяснение, заключающееся в том, что калибровочная симметрия вовсе не нарушена и что глюоны фактически безмассовы, но мы их не видим по той же причине, по которой не видим и кварки, то есть в результате особых инфракрасных свойств неабелевых калибровочных теорий, а именно конфайнмента, или плененности, цвета; цвет частиц, подобно самим кваркам и глюонам, никогда нельзя изолировать» [34. Р. 111].

Заслуживает упоминания и точка зрения еще одного классика стандартной модели Г. 'т Хоофта, доказавшего в 1971 году перенормируемость как безмассовых, так и массивных неабелевых калибровочных теорий. Обычно отмечается, что он уже в 1972 году открыл феномен асимптотической свободы теорий Янга – Миллса и объявил об этом результате на небольшой конференции в Марселе (июнь 1972 г.) [15]. «Когда я услышал о работах Политцера, Гросса и Вильчека (по асимптотической свободе. – *В.В.*), то был сильно удивлен, – вспоминал 'т Хоофт в конце 1990-х годов, – но не самим результатом, поскольку давно о нем знал, а тем переполохом, который они вызвали. И вот тогда люди начали говорить о чистой SU(3)-калибровочной теории как о теории для описания кварков (речь идет о последующей работе Гросса и Вильчека, а также об упоминавшейся ранее работе Фрича, Гелл-Манна и Лейтвилера. – *В.В.*). Но я по-прежнему полагал, что ничего кроме догадок в этом не было, потому что, как учил меня Вельтман, действительно важным был вопрос кваркового конфайнмента. И к тому времени никаких успехов на этом поприще достигнуто не было. Я намеревался понять конфайнмент, исходя из основных принципов. КХД была на полпути к завершению» [15. С. 107]. С другой стороны, он считал упоминавшуюся ранее работу М. Хана и Ё. Намбу (1965) по цветной SU(3)-симметрии, «очень близкой к современной КХД», добавляя при этом, что «в 1972 году У. Бардин, Х. Фрич и М. Гелл-Манн описали чистую систему SU(3) не как теорию поля, но как алгебру токов. Затем, в 1973 году, Гросс и Вильчек, а также Фрич, Гелл-Манн и Лейтвилер предложили чистую систему SU(3) Янга-Миллса» [Там же. С. 20]. Для принципиального завершения КХД оставалось решить проблему конфайнмента кварков, «первое указание на реальный механизм которого дала идея К. Вильсона» рассмотрения теории Янга-Миллса в решеточном приближении (1974) [Там же. С. 21].

Кстати говоря, 'т Хоофт отмечал также ранние предвосхищения этого феномена асимптотической свободы в работах советских теоретиков, сначала В.С. Ваняшина и М.В. Терентьева (1965), а затем – И.Б. Хриповича (1969) [Там же. С. 18, 105]. Такова весьма сложная картина создания основ КХД и стандартной модели в целом. Эту сложность подчеркнул в названии своей

Нобелевской лекции и Х.Д. Политцер «Нелегкая задача установления авторства» [28. С. 753]. Об этой сложности свидетельствует и следующий фрагмент этой лекции: «Среди тех, кто сразу принял неабелеву калибровочную симметрию с цветной $SU(3)$ -группой как теорию сильных взаимодействий, были Стив Вайнберг и Мюррей Гелл-Манн. В случае Гелл-Манна это было в немалой степени потому, что он уже ее ввел (!) вместе с Харальдом Фричем и назвал ее КХД... Решающим доводом стала асимптотическая свобода, то есть отрицательная бета-функция» [Там же. С. 760].

Таким образом, в этой истории явно выделяются две основные и одна дополнительная компактные группы исследователей:

- 1) группа М. Гелл-Манна, включающая Х. Фрича, а также У. Бардина и Г. Лейтвилера;
- 2) группа Д. Гросса, Ф. Вильчека и Х.Д. Политцера;
- 3) нидерландские теоретики Г. 'т Хоофт и М. Вельтман.

Третью группу мы называем дополнительной потому, что их главный вклад относится к электрослабой теории (в 1999 г. они были удостоены Нобелевской премии «за выяснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий»). Но их результаты по перенормируемости неабелевых калибровочных теорий относились и к сильным взаимодействиям, а кроме того, 'т Хоофт уже в 1972 году открыл, как уже говорилось, явление асимптотической свободы, хотя и не придавал этому того значения, которое оно заслуживало.

М. Гелл-Манн вместе с Х. Фричем и др. в 1971–1972 годы рассматривал цветную $SU(3)$ -калибровочную симметрию как одну из возможных моделей сильного взаимодействия. При этом кварки в этой модели вначале связывались не с теорией поля, а с алгеброй токов и рассматривались скорее как вычислительная схема, а не как реальные частицы. На основе этой модели Гелл-Манн и Фрич объясняли скейлинг и истолковывали фейнмановские партоны как кварки. Они же ввели термин «глюоны» и назвали такую теорию сильных взаимодействий «квантовой хромодинамикой». Свой очерк о создании квантовой хромодинамики в цитированном выше обзоре «50 лет КХД» Х. Фрич заключил словами: «В конце 1973 года я был убежден, что Гелл-Манн и я открыли правильную теорию сильных взаимодействий: квантовую хромодинамику. Почти каждый день тогда я обсуждал эту теорию с Р. Фейнманом, и он тоже считал, что теория правильна. В 1974 году Фейнман читал лекции по квантовой хромодинамике. Гелл-Манн однако продолжал думать, что правильная теория сильных взаимодействий должна быть основана на теории струн. В последующие (после 1973 г.) годы стало ясно, что КХД – правильная теория сильных взаимодействий. И я горжусь тем, что внес определенный вклад в рождение этой теории, которая теперь является главной частью Стандартной теории в физике частиц» [38. Р. 17]. Обратим внимание на то, что Фрич назвал стандартную модель Стандартной теорией и на то, что, в отличие от него, его старший коллега М. Гелл-Манн не считал тогда ее правильной, полагая, что таковой должна быть теория, основанная на теории струн. Впрочем, Гелл-Манн и Фрич по достоинству оценили работы второй группы по

асимптотической свободе и на их основе показали, что только «бесцветные» (или нейтральные по цвету) частицы могут существовать изолированно.

Теоретики второй группы сделали решающий вклад в создание КХД, поскольку, как отмечал впоследствии С. Вайнберг, «именно открытие... явления асимптотической свободы в неабелевых калибровочных теориях подобного вида убедило теоретиков в том, что изложенная выше модель (достаточно далеко продвинутая первой группой. – В.В.) является правильной теорией сильных взаимодействий». И дело было не только в том, что сразу прояснились загадочные результаты по глубоко неупругому рассеянию электронов на нуклонах: «Историческое значение открытия асимптотической свободы... впервые продемонстрировало возможность проведения надежных пертурбативных вычислений в теориях с сильными взаимодействиями, по крайней мере, при высоких энергиях» [37. С. 168–169].

Кстати говоря, как уже отмечалось, и сам С. Вайнберг, еще совсем недавно говоривший Гроссу, что его не интересует все, что касается кварков, в которые он не верит (см. [5. С. 734]), сразу после открытия асимптотической свободы становится активным участником развития кварк-глюонной теории. В частности, вместе с Г. Стерманом он в 1977 году объяснил экспериментальное проявление реальности кварков в виде так называемых адронных струй (джетов), возникающих при высокоэнергетичных соударениях [37. С. 169].

Открыватели асимптотической свободы подчеркивали, что, в отличие от первой группы теоретиков, они строили теорию сильного взаимодействия как квантово-полевую теорию кварков и глюонов, в реальности которых они не сомневались. Что касается третьей группы, то ее вклад был связан, в первую очередь, с решением проблемы перенормируемости неабелевых калибровочных теорий, как с массивными (электрослабая теория), так и с безмассовыми калибровочными бозонами (КХД). Занимаясь этим, ученик Вельтмана 'т Хоофт, как уже говорилось, фактически обнаружил феномен асимптотической свободы, но считал более важным связать его с конфайнментом кварков и занялся этой проблемой. Наиболее важным в этой истории он считал предложение «чистой», то есть точной, ненарушенной цветной SU(3)-симметрии, предложенной теоретиками первой группы сначала как алгебры токов, а затем и теоретиками обеих в рамках квантовой теории поля [37. С. 20], хотя и признавал, что обстоятельное исследование цветной калибровочно-полевой теории сильного взаимодействия началось после работ второй группы по асимптотической свободе. Учитывая все сказанное, мы должны признать, что основы стандартной модели к концу 1973 года были фактически созданы.

Литература

1. *Fritzsch H.* The development of quantum chromodynamics // *Symmetries in physics (1600–1980). Proceedings of the 1st Intern.Meeting on the history of scientific ideas.* Sant Feliu de Guixols. Catalonia. Spain. September 20–26, 1983 / ed. by M.G. Doncel et al. Bellaterra (Barcelona) Spain : Universitat Autònoma de Barcelona, 1987. P. 593–609.
2. *Визгин В. П.* У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // *Исследования по истории физики и механики.* 2019–2020. Москва : Янус-К, 2021. С. 249–293.

3. *Визгин В. П.* Как в теории элементарных частиц появились кварки? (к 60-летию великого открытия) // Вопросы истории естествознания и техники. 2024. Т. 45, № 2. С. 250–277.
4. *Вайнберг С.* Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. Москва : УРСС, 2004. 256 с.
5. *Гросс Д. Дж.* Открытие асимптотической свободы и появление КХД. Нобелевская лекция 2004 г. // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004. Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2009. С. 727–752.
6. *Кендалл Г. У.* Глубоко неупругое рассеяние: эксперименты // УФН. 1991. Т. 161, № 12. С. 75–106.
7. *Pais A.* Inward bound of matter and forces in the physical world. Oxford : Clarendon Press; N.Y.: Oxford University Press, 1986 –XVI+666 pp.
8. *Sao T. Yu.* Conceptual developments of 20th century field theories. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. XX+433 p.
9. 50 years of Yang-Mills theory / ed. by G.'tHooft. New Jersey etc. : World Scientific, 2005. X+487 p.
10. 60 years of Yang-Mills gauge field theories. C.N. Yang's contributions to physics / ed. by L.D. Brink, K.K. Phua. New Jersey etc. : World Scientific, 2016. XV+521 p.
11. Symmetries in physics (1600–1980). Proceedings of the 1st Intern.Meeting on the history of scientific ideas. Sant Feliu de Guixols. Catalonia. Spain. September 20–26, 1983 / ed. by M.G. Doncel et al. Bellaterra (Barcelona). Spain : Universitat Autònoma de Barcelona, 1987. XVI+ 678 p.
12. *Фридман Дж. А.* Глубоко неупругое рассеяние: сравнение с кварковой моделью. Нобелевская лекция 1990 г. // УФН. 1991. Т. 161, № 12. С. 106–127.
13. *Гриббин Дж. И. М.* Ричард Фейнман: жизнь в науке. Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. 288 с.
14. *Вильчек Ф.* Асимптотическая свобода: от парадоксов к парадигмам. Нобелевская лекция 2004 г. // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004 гг. Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2009. С. 767–795.
15. *'т Хоофт Г.* Избранные лекции по математической физике. Москва – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 228 с.
16. *Окунь Л. Б.* Лептоны и кварки. Москва : Наука, 1981. 304 с.
17. *Вайнберг С.* Все еще неизвестная Вселенная, Мысли о физике, искусстве и кризисе науки. Москва : Альпина нон-фикшн, 2020. 330 с.
18. *Зи Э.* Квантовая теория поля в двух словах. Москва – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 632 с.
19. *Brink L., Phua K.K.* Preface // 60 years of Yang-Mills gauge field theories. C.N. Yang's contributions to physics / ed. by L.D. Brink, K.K. Phua. New Jersey etc. : World Scientific, 2016. P. I–XV
20. *Бэгготт Дж.* Бозон Хиггса. От научной идеи до открытия «частицы Бога». Москва : Центрполиграф, 2014. 255 с.
21. *'t Hooft G.* Renormalisation of massless Yang – Mills fields // Nuclear Phys. 1971. Vol. B33. P. 173–199.
22. *'t Hooft G.* Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields // Nuclear Phys. 1971. Vol. B35. P. 167–188.
23. *Fritzsch H.* The history of QCD. 27 sept. 2012. P. 21. URL: cerncourier.com/a/the-history-of-qcd
24. Commentary Notes // M. Gell-Mann. Selected papers / ed. by H. Fritzsch. New Jersey etc. // World Scientific. 2010. P. 1–23.
25. *Bardin W., Fritzsch H., Gell-Mann M.* Light cone current algebra π_0 decay and $e^+ e^-$ annihilation // Scale and conformal symmetry in hadron physics / ed. by R. Gatto. N.Y.: Wiley, 1973. P. 139–153.
26. *Fritzsch H., Gell-Mann M.* Current algebra: quarks and what else? // Proc. of the Intern. Conference of high energy physics. Vol. 2. Chicago. NAL, 1972. P. 135–165.
27. *Fritzsch H., Gell-Mann M., Leutwyler H.* Advantages of the color octet gluon picture // Phys. Lett. 1973. Vol. 47B. P. 365–368.
28. *Политцер Х.Д.* Нелегкая задача установления авторства: Нобелевская лекция 2004 г. // Нобелевские лекции по физике. 1995. С. 753–766.

29. *Gross D.* Twenty five years of asymptotic freedom. Talk delivered at the QCD Euroconference 98 on quantum chromodynamics. Montpellier July 1998. arXiv: hep-th/9809060v1 10 sep. 1998.
30. *Gross D.* Quantum chromodynamics – the perfect Yang-Mills gauge field theory // 60 years of Yang-Mills gauge field theories. C.N. Yang's contributions to physics / ed. by L.D. Brink, K.K. Phua. New Jersey etc. : World Scientific, 2016. P. 11–24.
31. *Gross D., Wilczek F.* A watershed: the emergence of QCD. 28 January 2013. URL: cerncourier.com/a/a-watershed-the-emergence-of-qcd
32. *Gross D., Wilczek F.* Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories // *Phys. Rev. Lett.* 1973. Vol. 30. P. 1343–1346.
33. *Politzer H. D.* Reliable perturbative results for strong interactions // *Phys. Rev. Lett.* 1973. Vol. 30. P. 1346–1349.
34. *Weinberg S.* *The making of the Standard model* // 60 years of Yang-Mills gauge field theories. C.N. Yang's contributions to physics / ed. by L.D. Brink, K.K. Phua. New Jersey etc. : World Scientific, 2016. P. 99–117.
35. *Gross D., Wilczek F.* Asymptotic free gauge theories // *Phys. Rev.* 1973. Vol. D8. P. 3633–3652
36. *Weinberg S.* Non-Abelian gauge theories of the strong interactions // *Phys. Rev. Lett.* 1973. Vol. 31. P. 494–497.
37. *Вайнберг С.* Квантовая теория поля : современные приложения. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 528 с.
38. 50 Years of quantum chromodynamics. Introduction and Review // *European Physical Journal.* 2023. Vol. 83, no. 1125. 636 p.
39. *Gell-Mann M.* Quarks // *Acta Phys. Austriaca Suppl.* Vol. 9. P. 733–761.

FROM QUARKS TO PARTONS AND FROM THEM TO QUANTUM CHROMODYNAMICS

V.P. Vizgin

*S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology
of the Russian Academy of Science
14 Baltiyskaya St, Moscow, 125315, Russian Federation*

Abstract. The article examines the history of the creation of quantum chromodynamics (QCD), which is a modern theory of strong interactions and part of the standard model in elementary particle physics. The main stages in this development associated with the turning events on the way to QCD are identified and studied: 1) the creation of the quark model (1964); 2) detection of quasi-point objects inside nucleons in experiments on deep-inelastic scattering of leptons on nucleons and the hypothesis of partons (1968–1969); 3) proof of the renormalizability of gauge theories (1971); 4) the creation of the gauge theory of quarks and gluons (the achievement of M. Gell-Mann with colleagues, 1971–1973); 5) the discovery of the phenomenon of asymptotic freedom as the physical basis of QCD (D. Gross et al., 1973). The conclusion is made about the importance and consistency of the achievements of each of these groups at the end of the QCD.

Keywords: standard model, quantum chromodynamics, quarks, partons, gluons, renormalizability of gauge theories, asymptotic freedom