

Из истории естествознания *From the History of Science*

DOI: 10.31857/S0205960624020025

EDN: XRDGIE

КАК В ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ ПОЯВИЛИСЬ КВАРКИ? (К 60-ЛЕТИЮ ВЕЛИКОГО ОТКРЫТИЯ)

ВИЗГИН Владимир Павлович — *Институт истории естествознания и техники*
им. С. И. Вавилова РАН; Россия, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14;
эл. почта: vlvizgin@gmail.com

© Вл. П. Визгин

В статье рассматривается история возникновения в 1963–1964 гг. понятия кварков и кварковой модели в теории элементарных частиц. Кварки имеют дробный электрический заряд и существуют только внутри сильно взаимодействующих частиц (адронов), являясь, таким образом, совершенно новой формой материи. Развитие этой модели привело к современной теории сильных взаимодействий, называемой квантовой хромодинамикой (КХД), которая включена в стандартную модель, являющуюся современной теорией элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в микромире. Показано, что это открытие практически одновременно и независимо сделали американские теоретики М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг (термин «кварк» ввел Гелл-Манн, Цвейг же использовал слово «туз», которое в дальнейшем не получило признания). Отмечено также более раннее предвосхищение кварковой модели в работе израильских ученых Ю. Неемана и Х. Гольдберга. Все они исходили из симметрии сильного взаимодействия, открытой в 1961 г. Гелл-Манном и Нееманом и названной Гелл-Манном «восьмеричным путем». Различие же их подходов заключалось в разном понимании проблемы реальности кварков: Нееман и его соавтор в реальность дробно заряженных частиц вообще не верили, Цвейг считал, что они могут существовать в свободном виде, Гелл-Манн был наиболее близок к современному пониманию, полагая, что они существуют только внутри адронов. Отмечен ряд особенностей процесса открытия кварков (феномены упущенных возможностей, одновременного и независимого открытий, вторжения метафизики в физику и др.). К статье приложен краткий словарь используемых в статье специальных терминов.

Ключевые слова: элементарные частицы, кварки, сильные взаимодействия, симметрии, «восьмеричный путь», калибровочные поля, квантовая хромодинамика, стандартная модель, проблема реальности кварков, историко-научные феномены, М. Гелл-Манн, Дж. Цвейг, Ю. Нееман.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2023 г.

HOW DID QUARKS APPEAR IN THE THEORY OF ELEMENTARY PARTICLES? (TOWARDS THE 60TH ANNIVERSARY OF THE GREAT DISCOVERY)

VIZGIN Vladimir Pavlovich — *S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences; Ul. Baltiyskaya, 14, Moscow, 125315, Russia;*
E-mail: vlvizgin@gmail.com

© Vl. P. Vizgin

Abstract: The article examines the history of the emergence of the concept of quarks and the quark model in the theory of elementary particles in 1963–1964. Quarks have a fractional electric charge and only exist inside strongly interacting particles (hadrons), thus being a completely new form of matter. The development of this model led to a modern theory of strong interactions, called quantum chromodynamics (QCD), which is included in the standard model that is the modern theory of elementary particles and fundamental interactions in the microcosm. It is shown that this discovery was made almost simultaneously and independently by the American theorists M. Gell-Mann and G. Zweig (the term “quark” was coined by Gell-Mann while Zweig used the word “ace” which, however, did not become common). There has been an earlier anticipation of the quark model in the work of Israeli scientists Y. Ne’eman and H. Goldberg. All of these physicists proceeded from the symmetry of the strong interaction, discovered by Gell-Mann and Ne’eman in 1961 and called the “eightfold way” by Gell-Mann. Their approaches differed in the understanding of the problem of the reality of quarks: Ne’eman and his co-author did not believe in the reality of fractionally charged particles; Zweig believed that they could exist in a free form while Gell-Mann was closest to the modern understanding, believing that they only exist inside hadrons. Some features of the process of the discovery of quarks (the phenomena of missed opportunities, simultaneous and independent discoveries, the invasion of metaphysics into physics, etc.) are noted. The article is accompanied by a brief dictionary of special terms used in the article.

Keywords: elementary particles, quarks, strong interactions, symmetries, “eightfold path”, “eightfold way”, gauge fields, quantum chromodynamics, standard model, problem of the reality of quarks, historico-scientific phenomena, M. Gell-Mann, G. Zweig, Y. Ne’eman.

For citation: Vizgin, Vl. P. (2024) Kak v teorii elementarnykh chastits poiavilis’ kvarki? (k 60-letiiu velikogo otkrytiia) [How Did Quarks Appear in the Theory of Elementary Particles? (Towards the 60th Anniversary of the Great Discovery)], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 45, no. 2, pp. 250–277, DOI: 10.31857/S0205960624020025, EDN: XRDGIE.

Как бы ни было больно рассказывать эту историю, наполненную неразберихой, пробелами в знании, ошибками, трудностями и метаниями, она, вероятно, и является наиболее интересной особенностью нашего уголка истории науки. Такой ретроспективный подход к описанию событий осуждается многими историками науки, однако сами ученые, работающие в этой области науки, его вполне принимают. Для меня важно не только поместить научные идеи в контекст эпохи, но и попытаться понять, как был связан тогда ход мыслей исследователей с решениями, признанными верными сейчас, разобраться в том, насколько близко они подошли к ним или почему упустили их.

М. Гелл-Манн

Введение

1963—1964 гг. в теории элементарных частиц ознаменовались открытием самого высокого ранга, а именно открытием «совершенно нового фундаментального типа материи, атомизма нового типа». Так его оценил Я. Б. Зельдович в середине 1965 г., говоря о гипотезе кварков, выдвинутой М. Гелл-Манном и независимо от него Дж. Цвейгом. «Можно сказать на основании всего исторического опыта, — продолжал Зельдович, — что такие открытия, свидетелями которых мы были в последние два-три года, как правило, кардинально перестраивают наши представления о природе»¹. Кварковая гипотеза возникла на весьма прочном основании, а именно на открытой в 1961 г. Гелл-Манном и Ю. Нееманом фундаментальной симметрии сильных взаимодействий, именуемой «восьмеричным путем» и связанной с восьмимерной группой $SU(3)$. Эта симметрия внесла определенный порядок в хаотичный и, по словам С. Вайнберга, «невероятно сложный зоопарк частиц», разбив его на мультиплеты, соответствующие представлениям этой группы. Оказалось, что эта мультиплетная структура получает элегантное объяснение, если, взяв за основу минимальное триплетное представление $SU(3)$ -симметрии, отождествить члены этого первичного триплета с подлинно элементарными частицами, которые, правда, имели дробные электрический и барионный заряды (кратные трем). Конечно, это их свойство подрывало веру в кварковую модель. Тем не менее ряд теоретиков всерьез отнеслись к кваркам, особенно после того, как правильность и эвристическая мощь $SU(3)$ -симметрии (как раз в 1964 г.) была триумфально подтверждена экспериментальным открытием омега-минус-гиперона, вершины $SU(3)$ -барионного декуплета. А кварки, в свою очередь, были физическим обоснованием этой симметрии. Кроме

¹ Зельдович Я. А. Классификация элементарных частиц и кварки «в изложении для пешеходов» // Успехи физических наук. 1965. Т. 86. № 2. С. 312.

того, появились несколько программ поиска свободных кварков как частиц, обладающих дробным электрическим зарядом. Так или иначе, кварки стали точкой роста теории сильных взаимодействий. Это привело вначале к идее «цвета» («цветового заряда») как квантового числа кварков, а затем к «цветной» $SU(3)$ -симметрии, локализация которой вела, в свою очередь, к калибровочным векторным бозонам (получившим впоследствии название «глюонов»). Путь к построению квантовой хромодинамики был открыт. Но в настоящей работе мы сосредоточим основное внимание на начальном периоде истории кварков. Ниже мы дадим краткую хронологию событий в окрестности 1964 г. (1964-й плюс-минус два года, т. е. с 1962 по 1966 г.) и затем последовательно рассмотрим основные вехи на пути к открытию кварков. В результате станет очевидным, что открытие кварков было как бы растянуто во времени и вполне обоснованно может быть отнесено к периоду с весны 1963 до начала 1964 г. Поэтому 60-летний юбилей этого открытия было вполне резонно отмечать уже в 1963 г. В заключение мы коснемся некоторых ранних работ об идее четвертого кварка и о концепции нового квантового числа кварков, получившего название «цвета» (1964—1966) и приведшего к именованию кварковой теории сильных взаимодействий квантовой хромодинамикой (КХД). В конце статьи мы поместили краткий словарь используемых в статье терминов, которые дополняют соответствующие пояснения в тексте.

Краткая хронология событий

1962—1963 гг.: Ю. Неeman и Х. Гольдберг — идея о том, что каждый барион состоит из трех фундаментальных дробно заряженных частиц, в реальность которых не верили сами авторы (опубликована в 1963 г.).

1963—1964 гг.: М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг практически одновременно и независимо предложили кварковую модель адронов; «кварки», название Гелл-Манна, эквивалентные «тузам» Цвейга, соответствуют фундаментальному триплетному представлению группы $SU(3)$ и обладают дробными электрическими зарядами. В работе Гелл-Манна была предложена идея существования частиц, передающих взаимодействие между кварками, названных впоследствии глюонами.

Уточненная хроника открытия кварков (1962—1964)

Февраль 1962 г.: Ю. Неeman и Х. Гольдберг — триплетная модель адронов, объясняющая мультиплеты «восьмеричного пути»; из-за того что первичные элементы триплета имели дробные барионные заряды, они не рассматривались как частицы, и модель имела только математический смысл. Опубликована в журнале «Иль нуово чименто» в 1963 г. (хотя статья получена в феврале 1962 г.)². Справедливо расценивается как раннее предвосхищение кварковой модели.

² *Goldberg H., Ne'eman Y. Baryon Charge and R-Inversion in the Octet Model // Il Nuovo Cimento. 1963. Vol. 27. No. 1. P. 1—5.*

Конец марта 1963 г.: кварковая (триплетная) модель, объясняющая мультиплеты «восьмеричного пути», возникла у Гелл-Манна после его беседы с Р. Сербером, которому была высказана благодарность в конце решающей публикации «Схематическая модель барионов и мезонов». Примерно в это же время к аналогичной модели в ЦЕРНе пришел Цвейг.

Осень 1963 г.: ранняя версия статьи «Схематическая модель...», которую Гелл-Манн показывал С. Мандельштаму; последний оценил ее как «контр-революцию» по отношению к концепции «ядерной демократии».

4 января 1964 г.: статья Гелл-Манна «Схематическая модель барионов и мезонов» получена редакцией журнала «Физикс леттерс», опубликована 1 февраля 1964 г.³ В ней развита кварковая модель адронов, появился термин «кварки» для первичных дробно заряженных частиц триплета, существующих только внутри адронов.

Февраль 1964 г.: статья Дж. Чу, М. Гелл-Манна и А. Розенфельда «Сильно взаимодействующие частицы», опубликованная в февральском выпуске «Сайентифик эмерикен» и свидетельствующая о том, что Гелл-Манн в теории адронов отдает предпочтение концепции «зашнуровки» (*bootstrap*, о кварковой модели вообще не упоминается!)⁴.

Начало 1964 г.: Дж. Цвейг в ЦЕРНе подготовил отчет, в котором была также предложена триплетная модель адронов. Соответствующий препринт датирован 17 января 1964 г.⁵ Первичные элементы триплета, аналогичные кваркам, рассматривались автором как реальные частицы и были названы им «тузами» (*aces*). Впоследствии было признано, что Гелл-Манн и Цвейг практически одновременно предложили равнозначные модели адронов, хотя новые фундаментальные частицы стали именоваться кварками, а не тузами.

11 февраля 1964 г.: редакцией «Физикал ревью леттерс» получена статья — сообщение об открытии омега-минус-гиперона в Брукхейвене (опубликовано 24 февраля), подтвердившее существование декуплета с этой частицей в вершине⁶. Это явилось эффектным подтверждением $SU(3)$ -симметрии («восьмеричного пути») и сразу привлекло внимание к гипотезе о ее структурной физической основе, т. е. модели кварков, опубликованной также в феврале 1964 г.

1964 г. (продолжение)

О. Гринберг выдвинул идею о том, что кварки, чтобы не нарушать принцип Паули, соединяясь внутри барионов, должны быть парафермионами, т. е. каждый кварк должен быть нескольких типов. Развитие этой идеи привело к понятию цветового заряда.

³ *Gell-Mann M. A Schematic Model of Baryons and Mesons // Physics Letters. 1964. Vol. 8. No. 3. P. 214–215.*

⁴ *Chew G. F., Gell-Mann M., H. Rosenfeld A. H. Strongly Interacting Particles // Scientific American. 1964. Vol. 210. No. 2. P. 74–93.*

⁵ *Zweig G. An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking. CERN Preprint 8419/TH-401 (January 17, 1964) // <https://cds.cern.ch/record/352337>.*

⁶ *Barnes V. E., Connolly P. L., Crennell D. J. et al. Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three // Physical Review Letters. 1964. Vol. 12. No. 8. P. 204–206.*

Ш. Глэшоу и Дж. Бьеркен, опираясь на идею кварк-лептонной симметрии, предложили дополнить трехкварковую модель четвертым кварком, который они назвали очарованным. И хотя мотивация этого предложения была отчасти ошибочной, сама идея четвертого кварка оказалась пророческой.

1965 г.

Е. Намбу и М. Хан, а также практически одновременно и независимо от них Н. Н. Боголюбов, Б. В. Струминский и А. Н. Тавхелидзе (в Дубне) предложили утроить число кварков за счет введения нового квантового числа, получившего позже название «цвета» (каждый кварк при этом мог быть одного из трех цветов). Отсюда и название будущей кварк-глюонной теории сильных взаимодействий — квантовая *хромодинамика* (КХД).

1966 г.

Е. Намбу — идея локальной цветной кварковой $SU(3)$ -симметрии с векторными калибровочными бозонами, названными впоследствии глюонами.

Положение в теории сильных взаимодействий накануне открытия кварков: S -матричная феноменология, дисперсионные соотношения, полюса Редже и бутстрап

Несмотря на то что с 1954 г. была известна элегантная квантово-полевая модель сильных взаимодействий, предложенная Ч. Янгом и Р. Миллсом и основанная на локализации изоспиновой группы симметрии $SU(2)$, доверие физиков к ней и полевым теориям вообще в это время и в 1960-е гг. было сильно подорвано. Это было вызвано тем, что теория Янга — Миллса приводила к безмассовости калибровочных бозонов, что явно противоречило опыту. Кроме того, теоретическое обнаружение эффекта обращения в нуль взаимодействия в квантовой электродинамике и тем более аналогичного эффекта в случае сильных взаимодействий (Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосов, И. М. Халатников, И. Я. Померанчук, а также Е. С. Фрадкин и М. Гелл-Манн с Ф. Лоу, 1954—1955 гг.) поставило под сомнение вообще ретико-полевой подход в физике элементарных частиц. В результате сформировалась альтернативная программа, основанная на концепции матрицы рассеяния, S -матрицы, выдвинутой В. Гейзенбергом еще в 1943 г. Согласно этой феноменологической по существу программе,

в качестве основных элементов теории стали рассматриваться не поля, а более близкие к непосредственно измеряемым величинам амплитуды — элементы матрицы рассеяния ⁷.

⁷ Берестецкий В. Б. Проблемы физики элементарных частиц. М.: Наука, 1979. С. 243.



М. Гелл-Манн

На эту матрицу накладываются условия унитарности и аналитичности амплитуд, связанные с требованиями квантовой механики. При этом используются так называемые дисперсионные соотношения, являющиеся соотношениями между непосредственно измеряемыми величинами и описывающими реакцию физической системы на внешнее воздействие. Дополняя S -матричную феноменологию методом комплексных угловых моментов (Т. Редже) и концепцией «зашнуровки», или «бутстрапа», провозглашавшей принцип «ядерной демократии», т. е. объявлявшей все элементарные частицы в равной степени фундаментальными (Дж. Чу и С. Фраучи), физики в начале 1960-х гг. получили ряд важных результатов по сильным взаимодействиям. «Энтузиасты, например, Чу, считали, что теория сильных взаимодействий близка к завершению»⁸.

Положение в физике элементарных частиц, прежде всего сильно взаимодействующих, накануне открытия кварков хорошо передано в обзорно-научно-популярной статье одного из главных открывателей кварков Гелл-Манна, написанной им совместно с Розенфельдом и Чу и опубликованной в 1964 г. в февральском выпуске «Сайентифик эмерикен»⁹ как раз тогда же, когда вышла первая статья Гелл-Манна о кварках¹⁰. Заслуживает внимания краткая общая оценка этого положения, по существу расходящаяся с идеей кварков как своего рода подлинно элементарных частиц:

Частицы, реагирующие на сильнейшую из четырех известных в природе сил, по-видимому, уже не могут считаться «элементарными». Они могут быть составлены одна из другой¹¹.

Этот вывод говорит о том, что тогда доминирующей в физике частиц и прежде всего сильно взаимодействующих частиц была S -матричная и дисперсионная программа, связанная с теорией полюсов Редже и концепцией

⁸ Там же. С. 244.

⁹ Chew, Gell-Mann, Rosenfeld. Strongly Interacting Particles... (русский перевод: Гелл-Манн М., Розенфельд А., Чу Дж. Сильно взаимодействующие частицы // Успехи физических наук. 1964. Т. 83. № 4. С. 695–727).

¹⁰ Gell-Mann. Schematic Model of Baryons and Mesons...

¹¹ Гелл-Манн, Розенфельд, Чу. Сильно взаимодействующие частицы... С. 695 (сноска).

бутстрапа, которая противостояла калибровочно-полевой программе, связанной с идеей существования элементарных частиц. Один из соавторов, а именно Чу, был как раз одним из главных лидеров «дисперсионизма» — «реджистики» — бутстрапа, концепции, которая поначалу представлялась перспективной и Гелл-Манну. И хотя, как мы увидим, эта концепция сыграла определенную эвристическую роль на пути Гелл-Манна к кваркам, в конечном счете именно кварки похоронили ее, возродив безраздельное господство калибровочно-полевой программы в теории элементарных частиц.

Составные модели и «восьмеричный путь» как предпосылки кварковой модели

В цитированной статье трех авторов (Чу, Гелл-Манна и Розенфельда) говорилось о двух системах классификации адронов: «...одна система опирается на представление о “траекториях Редже”; другая — это восьмеричный путь»¹². Первая система также дополнялась концепцией «ядерной демократии», связанной с теорией «зашнуровки» и S -матричной феноменологической программой. Вторая была основана на выделении мультиплетных структур, которые удалось представить на языке теории представлений унитарной унимодулярной восьмимерной группы $SU(3)$, названной Гелл-Манном «восьмеричным путем». Можно было думать, что вторая система связана с составными моделями частиц в духе модели японского теоретика С. Сакаты (т. е. с «ядерно-аристократическими» представлениями, согласно которым все адроны состоят из нескольких фундаментальных частиц). В модели Сакаты, выдвинутой в 1956 г., такими частицами были протон, нейтрон и лямбда-частица (эти частицы или их аналоги иногда назывались тогда «сакатонами»); изучение этой модели в работах учеников Сакаты также вело к $SU(3)$ -симметрии. В работе 1962 г. «Симметрия барионов и мезонов» Гелл-Манн отмечает связь «восьмеричного пути» (и, соответственно, восьмимерной унитарной симметрии, связанной с группой $SU(3)$) с составной («аристократической») моделью Сакаты¹³. Однако Гелл-Манн в 1963—1964 гг. верил в «ядерную демократию» и полагал, что «восьмеричный путь» не противоречит ей. Противоречивость ситуации усиливалась еще и тем, что в самом начале 1964 г. Гелл-Манн уже пришел к модели кварков, тоже триплетной, скорее, более близкой к представлениям о «ядерной аристократии» и перекликающейся с моделью Сакаты (обе на основе идеи о трех фундаментальных частицах как бы объясняли существование всех остальных адронов и их мультиплетность). В статье же трех авторов о кварках нет упоминания! Группа симметрии, эквивалентная «восьмеричному пути» Гелл-Манна, а именно $SU(3)$, была открыта также Неemanом, и он, как и Гелл-Манн, ссылался на работу японских теоретиков, первыми предложивших эту группу:

¹² Там же. С. 696.

¹³ *Gell-Mann M. Symmetries of Baryons and Mesons // Physical Review. 1962. Vol. 125. P. 1067–1084.*

Кроме того, мы <...> используем группу, впервые исследованную Икедой, Огавой и Онуки в связи с построением связанных состояний в модели Сакаты (здесь имеется в виду группа $SU(3)$ и соответствующая работа 1959 г. учеников Сакаты ¹⁴. – В. В.) ¹⁵.

И если в отношении семейства мезонов модель Сакаты, опирающаяся на фундаментальный триплет (протон, нейтрон и лямбда-частица) и ее $SU(3)$ -симметричное дополнение, была достаточно успешной, то для описания семейств барионов она сталкивалась с непреодолимыми препятствиями ¹⁶. Это могло означать, что среди известных элементарных частиц не было или не доставало первичных, или фундаментальных, элементарных частиц, связанных с $SU(3)$ -симметрией, которые еще предстояло открыть. И именно на этом пути были открыты кварки, которые и в самом деле по своим свойствам мало отличались от первичных частиц модели Сакаты (как носители изоспина и странности) помимо одной совершенно поразительной особенности: они имели дробные электрические заряды. По пути японских теоретиков шел и Л. Б. Окунь, который с 1957 г. разрабатывал аналогичную составную модель с тремя первичными частицами одинаковой массы, похожими на протон, нейтрон и лямбда-частицу, но не совпадающими с ними («модель Сакаты — Окуня») ¹⁷ (цитируемая статья, написанная к 50-летию юбилею открытия кварков, была названа автором «О пути от сакатонов к кваркам»).

Фундаментальные дробно заряженные частицы появляются в трех вариантах

Но Гелл-Манн был не единственным, кто открыл кварки. Примерно в то же время эти «фундаментальные объекты» были теоретически открыты также студентом и аспирантом Гелл-Манна и Р. Фейнмана Дж. Цвейгом, который в это время стажировался в ЦЕРНе (Европейской организации ядерных исследований вблизи Женевы). Он назвал их тузами. Его первый церновский отчет об этом, который был разослан заинтересованным лицам, датирован январем 1964 г. ¹⁸, правда, опубликовать его Цвейгу не удалось. Но раньше Гелл-Манна и Цвейга вплотную к открытию кварков, считая их, впрочем, чисто математическими абстракциями, подошел Нееман (вместе с другим израильским теоретиком Гольдбергом) ¹⁹, тот самый Нееман,

¹⁴ Ikeda M., Ogawa Sh., Ohnuki Y. A Possible Symmetry in Sakata's Model for Bosons-Baryons System // Progress of Theoretical Physics (Kyoto). 1959. Vol. 22. No. 5. P. 715.

¹⁵ Нееман Ю. Вывод сильных взаимодействий из принципа калибровочной инвариантности // Элементарные частицы и компенсирующие поля. Сборник статей / Ред. Д. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. С. 177 (см. оригинал этой статьи в: Ne'eman Y. Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance // Nuclear Physics. 1961. Vol. 26. P. 222–229).

¹⁶ Намбу Ё. Кварки. М.: Мир, 1984. С. 100–102.

¹⁷ Okun L. B. On the Way from Sakatons to Quarks // International Journal of Modern Physics A. 2015. Vol. 30. No. 1. 1530008 (см. ту же статью в: 50 Years of Quarks / H. Fritzsch, M. Gell-Mann (eds.). Singapore: World Scientific, 2015. P. 57–94).

¹⁸ Zweig. An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry...

¹⁹ Goldberg, Ne'eman. Baryon Charge and R-Inversion... P. 1–2.

который в 1961 г., как мы помним, почти одновременно с Гелл-Манном открыл $SU(3)$ -симметрию сильных взаимодействий. Таким образом, эти три фигуры (Гелл-Манн, Цвейг и Нееман) внесли решающий вклад в открытие кварков при определенном лидерстве Гелл-Манна. Каждый из них шел своим путем. Поэтому мы попробуем восстановить эти пути, опираясь не только на анализ их оригинальных работ, но и на их собственные рассказы об этом, зафиксированные в соответствующих статьях (или докладах) мемуарного характера или интервью²⁰. Забегая вперед, сразу подчеркнем основные предпосылки и мотивы, общие для каждого из трех теоретиков. Главным здесь была открытая Гелл-Манном и Нееманом $SU(3)$ -симметрия и попытки сведения соответствующих октетных и декуплетных представлений к более элементарным триплетным представлениям. При этом на такую возможность указывали составные модели в духе теории Сакаты, которые опирались на существование фундаментального триплета реальных барионов (p , n и лямбда-частица), также ведущего к $SU(3)$ -симметрии. Общим для них было и повышенное внимание к аргументам экспериментального характера. Наиболее же существенные различия, как мы увидим, заключались в понимании онтологического статуса «фундаментальных триплетов».



Дж. Цвейг

Путь Ю. Неемана и Х. Гольдберга

Начнем с наиболее ранней работы Неемана и Гольдберга, сделанной в форме отчета в начале 1962 г. и опубликованной через год в «Иль нуово чименто»²¹. В своем мемуарном докладе на конференции «Симметрии

²⁰ Gell-Mann M. Particle Theory from S-Matrix to Quarks // Symmetries in Physics (1600–1980). Proceedings of the 1st International Meeting on the History of Scientific Ideas. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. September 20–26, 1983 / M. Doncel, A. Hermann, L. Michel, A. Pais (eds.). Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 1987. P. 473–497; Fritzsche H. The Development of Quantum Chromodynamics // Ibid. P. 593–609; Ne’eman Y. Hadron Symmetry, Classification and Compositeness // Ibid. P. 499–540; Charitos P. Interview with George Zweig (13th December 2013) // <https://ep-news.web.cern.ch/content/interview-george-zweig>; Zweig G. Concrete Quark // 50 Years of Quarks / H. Fritzsche, M. Gell-Mann (eds.). Singapore: World Scientific, 2015. P. 25–56.

²¹ Goldberg, Ne’eman. Baryon Charge and R-Inversion...

в физике (1600—1980)», состоявшейся в Каталонии в 1983 г., Нееман так рассказывал об этой работе:

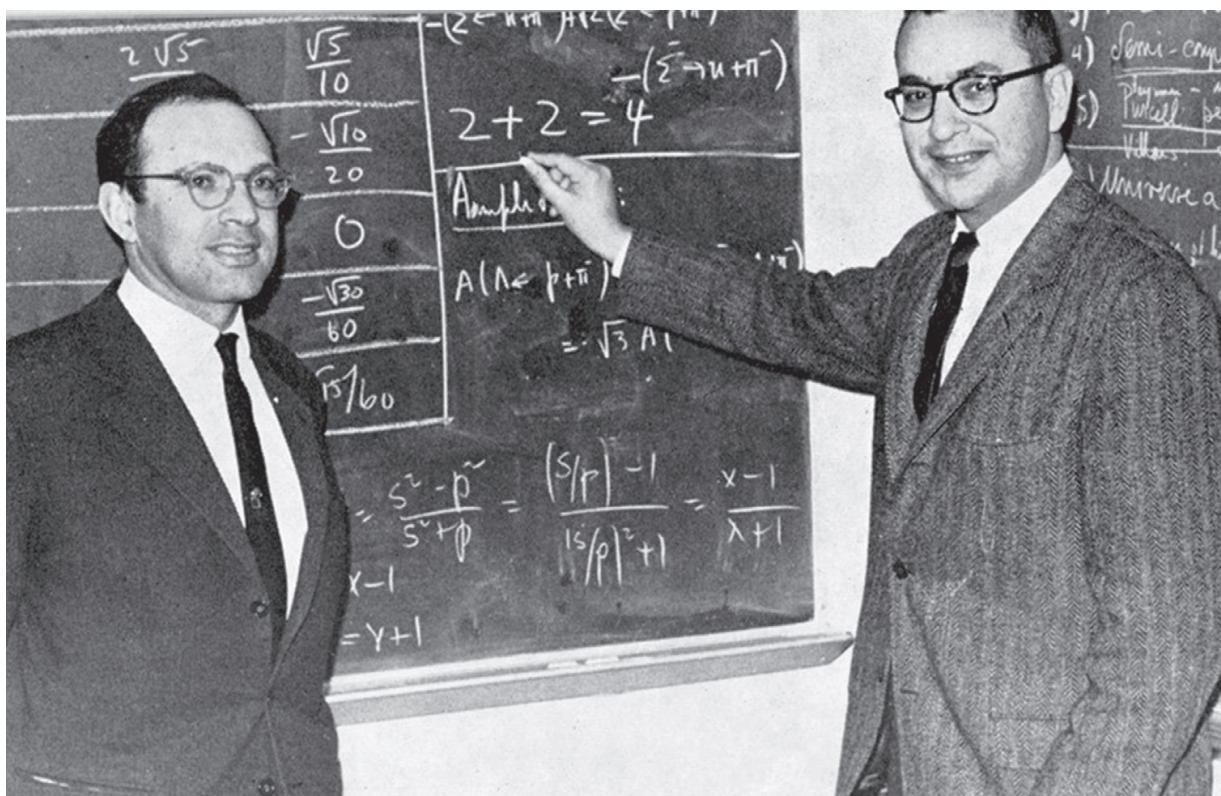
С конца мая 1961 г. в Лондоне я думал по двум направлениям, связанным с $SU(3)$ и выбором октетов (первое относилось к возможности объединения внутренней симметрии $SU(3)$ с пространственно-временной симметрией, т. е. группой Пуанкаре, на котором мы не будем останавливаться. – В. В.) <...> Во-вторых, меня интересовало более фундаментальное представление $SU(3)$, чем октетное, а именно триплетное, которое не фигурировало в теории. Статья Весса ²² наводила меня на мысль о составимости октета из трех триплетов. Можно было думать о лептонном триплете (нейтрино, электрон, мю-мезон), подобном триплету Сакаты <...> Мог ли какой-либо барион состоять из трех лептонов? Я спросил об этом Салама. Он рассмеялся, но добавил, что это совсем не глупо, если это работает <...> Вопрос продолжал беспокоить меня. Лептонами эти первичные составляющие, вероятно, не были, но почему они не могли быть сакатоподобным фундаментальным полем? В Израиле первым, кто начал сотрудничать со мной, был Хаим Гольдберг. Он знал теорию групп и написал диссертацию по ядерной физике под руководством Дж. Рака. Я предложил ему вместе со мной заняться триплетной моделью, объясняющей наблюдаемые октеты. Результаты были изложены в форме препринта (Israel AEC report IA-725) в феврале 1962 г. и затем посланы для публикации в *Nuovo Cimento* (получено 22 февраля 1962 г.). Мы показали, что фундаментальным является не барионный октет, а, скорее, сакатоподобный фундаментальный триплет с барионным зарядом $B = 1/3$ ²³.

Таким образом, идеи фундаментального триплета, формально-алгебраического или реального, подобного сакатовской барионной тройке, в начале 1960-х гг. витали в воздухе. Нееман и Гольдберг, опираясь на теорию групп и алгебр Ли, пришли к парадоксальному выводу, что такой фундаментальный триплет существует, но с квантовыми числами, кратными $1/3$ барионного и электрического зарядов. О том, как они интерпретировали полученный результат, Нееман говорил так:

Однако физическая картина, представленная в этой статье, была до некоторой степени амбивалентной, потому что «формирование» (*production*) из физических частиц иногда путалось с «составимостью» (*composition*) в терминах математических триплетов (обсуждение взаимодействий между барионами возвращало нас к мезонам как комбинациям барионов и антибарионов!). Однако на семинаре в Институте Вейцмана (в Реховоте в Израиле) в мае 1962 г. физика описывалась мною более согласованно и последовательно. Я говорил, что барионы «как бы» действительно сделаны из трех фундаментальных триплетов. Октет формально заменялся «математической моделью», основанной на поле с $B=1/3$. Х. Г. Липкин в своем основательном обзоре по кваркам

²² Wess J. E. Investigation of the Invariance Group in the Three Fundamental Fields Model // II *Nuovo Cimento*. 1960. Vol. 15. No. 1. P. 52.

²³ Ne'eman. Hadron Symmetry... P. 518.



Ю. Неeman (слева) и М. Гелл-Манн (справа)

1973 г.²⁴ кратко описал эту нашу работу как раннюю стадию формирования модели кварков. Отчет IA-725 был разослан по многим адресам и вызвал некоторый интерес, но в целом встретил очень скептическое отношение из-за того, что сами эти октеты (которые предлагалось объяснить) вызывали серьезные сомнения у большинства теоретиков²⁵.

Таким образом, и сами авторы, и те, кто знакомился с выпущенными ими отчетом и публикацией 1963 г., считали этот фундаментальный триплет с дробными зарядами не более чем математической моделью, дополняющей теорию $SU(3)$ -симметрии и удобной для объяснения предсказываемых этой симметрией октетов и декуплета, а не в какой бы то ни было степени реальными частицами. Далее Неeman рассказывает о работах Гелл-Манна и Цвейга, вышедших через год после его и Гольдберга публикации, и объясняет, почему именно статья Гелл-Манна о кварках была быстро и позитивно воспринята:

Гелл-Манн назвал свои фундаментальные объекты «кварками», это название сохранилось. Статья Гелл-Манна появилась в февральском выпуске «Физикс леттерс» почти в то же самое время, когда были объявлены результаты экспериментов по обнаружению омега-минус-гиперона (предсказанного восьмеричным путем тяжелого странного бариона. – В. В.)²⁶.

²⁴ Lipkin H. J. Quarks for Pedestrians // Physics Reports. 1973. Vol. 8. No. 3. p. 173–268.

²⁵ Ne'eman. Hadron Symmetry... P. 519.

²⁶ Ne'eman. Hadron Symmetry... P. 519.

Несколько слов о том, откуда Гелл-Манн взял название «кварки». В первой же своей статье по кваркам ²⁷ он без пояснений ссылается на источник — это роман Дж. Джойса «Поминки по Финнегану». Из последующих пояснений мы узнаем, что герою романа снится сон, в котором чайки кричат: «Три кварка для мистера Марка!» А первичных частиц, из которых конструировались адроны, было как раз три. Экспериментальное обнаружение омега-минус-гиперона, продолжал Нееман,

подтвердило существование декуплета с этой частицей в его вершине и тем самым также и барионного октета со спином $\frac{1}{2}$. Триумфальное совпадение теории и эксперимента вызвало волну энтузиазма в отношении $SU(3)$ и интерес к его структурным основаниям (т. е. кваркам. — В. В.). Современный взгляд на статус кварков как плененных (*confined*) объектов находится между нашим их пониманием как абстрактных полей и более «прямой» и смелой трактовкой их как свободных частиц с дробным зарядом, осторожно, но явно сформулированной в работах Гелл-Манна и Цвейга ²⁸.

В отличие от Неемана и Гольдберга, Гелл-Манн допускал реальное существование кварков. Допуская такую возможность, он все-таки отдавал предпочтение представлению об их скрытой реальности, т. е. реальности их существования только внутри адронов. Цвейг же с самого начала считал вполне правдоподобной возможность реального существования своих «тузов» — кварков. Вот соответствующая фраза из его январского препринта:

Есть и некоторая возможность, что модель (т. е. предлагаемая им модель дробно заряженных базовых адронов. — В. В.) ближе к природе, чем мы думаем, и что мы состоим из множества тузов с дробным зарядом ²⁹.

Переходя к воспоминаниям Гелл-Манна об открытии им и Цвейгом кварков, еще раз подчеркнем, что амбивалентное представление Гелл-Манна о реальности кварков почти полностью соответствует современному взгляду, хотя вполне ясным это стало только в начале 1970-х гг. после введения концепции «цвета» и развития понятий «асимптотической свободы» и «конфайнмента» в работах Г. 'т Хоофта, Д. Гросса, Ф. Вильчека, Х. Д. Политцера и самого Гелл-Манна (с соавторами).

Путь М. Гелл-Манна и его кварки

Обратимся теперь к воспоминаниям Гелл-Манна, с которыми он выступил на конференции в Каталонии в 1983 г. (обширное цитирование оправдывается нашим стремлением понять все обстоятельства и сложную, порою противоречивую логику рассуждений одного из главных первопроходцев):

²⁷ *Gell-Mann. A Schematic Model of Baryons and Mesons...*

²⁸ *Ne'eman. Hadron Symmetry...* P. 519–520.

²⁹ *Zweig. An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry...* P. 17.

В начале 1963 г. я взял отпуск и уехал из Калтеха ³⁰. Я читал лекции в МТИ ³¹ и одновременно, готовясь к лекциям, пытался выяснить минимальное число фундаментальных адронных сущностей (здесь и далее курсив мой. – В. В.). Я нашел несколько различных комбинаций из четырех объектов, если придерживаться идеи целочисленных зарядов, но ни одна из этих схем не выглядела особенно привлекательной. Затем в марте я посетил Колумбийский университет (в Нью-Йорке. – В. В.) и там в факультетском клубе Боб Сербер ³² спросил меня, почему для нахождения первичных адронов нельзя воспользоваться моей формулой: $3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$ для получения барионов (это бы означало, что барионные октет и декуплет можно было описать тремя фундаментальными сущностями. – В. В.). Я ответил, что пытался получить барионы этим путем, но тогда заряды фундаментальных сущностей получались дробными и равными $2/3$ и $-1/3$ и тут же (на бумажной салфетке) показал ему это. Он воскликнул с экспрессией: «О, я понимаю, почему ты не сделал этого тогда!» Но, когда я размышлял об этих вещах весь день и утро следующего дня, мне пришло в голову, что если бутстрапный подход правилен, то фундаментальные адроны могут оказаться не наблюдаемыми и не способными покинуть барионы и мезоны и, таким образом, существовать индивидуально. Если же это так и они не наблюдаемы, то они могут иметь и дробные заряды. Позже, назвав их кварками, я считал эти как бы пойманные в ловушки (*trapped*) сущности «математическими кварками», постоянно находящимися внутри барионов и мезонов. (Я предполагал, что они почти всегда заперты там и только крайне редко их можно обнаружить в очень чувствительных экспериментах – и тогда их можно было бы назвать «реальными кварками».) Но обычно и с первого дня я думал о кварках как объектах, постоянно плененных (*trapped*). Кроме идеи бутстрапа и понятия «ядерной демократии» (которые отвергали реальное существование подлинно элементарных частиц, из которых бы состояли все остальные сильно взаимодействующие частицы. – В. В.), у меня не было других доводов в пользу ненаблюдаемых фундаментальных адронов с дробными зарядами. Конечно, было известно, что дробных зарядов нет в природе, или, если они все-таки существуют, то чрезвычайно редки ³³.

Дальше Гелл-Манн говорил о не слишком привлекательных альтернативных моделях с большим количеством целочисленно заряженных фундаментальных адронов, «более подходящих считаться реальными, чем кварки» ³⁴. Но при этом он

никоим образом не отвергал идею кварков, полагая только, что были эмпирические основания не считать дробно заряженные кварки «реальными», т. е. непосредственно наблюдаемыми ³⁵.

³⁰ Гелл-Манн был профессором в знаменитом Калифорнийском технологическом институте, крупнейшем центре теоретической физики во главе с Р. Фейнманом.

³¹ Массачусетский технологический институт.

³² Р. Сербер — легендарная фигура американского атомного проекта, в это время — профессор Колумбийского университета.

³³ *Gell-Mann. Particle Theory from S-Matrix to Quarks...* P. 493.

³⁴ Ibid.

³⁵ Ibid.

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M. GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

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

6) James Joyce, *Finnegan's Wake* (Viking Press, New York, 1939) p. 383.

Фрагмент статьи М. Гелл-Манна, в которой впервые было использовано слово «кварк» (quark), с ссылкой на роман Дж. Джойса, из которого оно было заимствовано

Для моделей с целочисленно заряженными фундаментальными адронами таких эмпирических оснований не было. Далее, заметив, что он использовал термины «математические» и «реальные» для кварков соответственно «плененных» (*confined*) и «не полностью плененных» (*incompletely confined*), Гелл-Манн поясняет далее, почему он это делал:

Вероятно, потому, что опасался философских дискуссий о том, можно ли считать частицы реальными, если они постоянно находятся в плененном состоянии <...> Даже в своем первом письме о кварках, опубликованном в начале 1964 г. ³⁶, я подчеркнул их совместимость с программой дисперсионной теории и вероятность того, что они (как частицы. – В. В.) так и не появятся ³⁷.

³⁶ Имеется в виду статья: *Gell-Mann. A Schematic Model of Baryons and Mesons...*

³⁷ *Gell-Mann. Particle Theory from S-Matrix to Quarks. P. 494.*

О сложности и изменчивости представлений Гелл-Манна о реальности кварков говорит следующий фрагмент:

Понятие плененных кварков хорошо согласовывалось с абстрактным подходом к описанию барионного октета, на который я опирался в 1961 г. Я вовсе не настаивал на наблюдаемости фундаментальных адронов, подобных реальным частицам p , n и лямбда (в составных моделях сакатовского типа. – В. В.). В 1961 г. я думал, что $SU(3)$ -симметрия может быть абстрагирована от чего-то, подобного p -, n - и лямбда-модели, и использовал ее как приближенную симметрию <...> а в 1963 г. я придерживался идеи, что кварки не были «реальными» и могли быть только субстратом операций группы $SU(3)$ ³⁸.

Таким образом, уже на самом раннем этапе формирования концепции кварков физике пришлось вторгнуться в метафизику. Об этом свидетельствует и эпизод, связанный с поездкой Гелл-Манна весной 1964 г. в Японию и его встречей с учениками Сакаты. Гелл-Манн вспоминал:

Все эти люди были резко против моего абстрактного подхода, который, по их мнению, был сродни «буржуазному или ревизионистскому идеализму» <...> Они настаивали на том, что если базовые адроны существуют, то они должны быть целочисленно заряженными и наблюдаемыми <...> Интересно было видеть, как эти вполне разумные (*intelligent*) теоретические физики, работающие над разумно поставленными проблемами и применяющие адекватные математические методы, упускали правильные решения из-за определенных философских взглядов (курсив мой. – В. В.) ³⁹.

Путь Дж. Цвейга и его тузы

Третьим открывателем кварков стал, как мы уже говорили, Цвейг. Он был калтеховец, но открытие сделал в ЦЕРНе (его первый основной черновоский препринт датирован 17 января 1964 г. ⁴⁰), где он стажировался в 1963–1964 гг. Фундаментальные адроны, образующие триплет, он назвал тузами, и путь его к ним, как и его решение вопроса об их реальности, были существенно иными, чем у Гелл-Манна и Неемана (с Гольдбергом). Не вдаваясь в детали его биографии, все-таки заметим, что он родился в 1937 г. в Москве, где оказались его родители после прихода фашистов к власти. Его отец был инженером-строителем и работал по контракту в СССР. Вскоре после истечения срока контракта отца семья переехала в США, где Цвейг окончил Мичиганский университет, получив степень бакалавра по математике. Свою же исследовательскую деятельность он начал в области физики высоких энергий сначала экспериментатором (не слишком удачно), а затем теоретиком. Предполагалось, что он будет работать под руководством Гелл-Манна, но после ухода последнего в длительный отпуск его руководителем стал Фейнман.

³⁸ *Gell-Mann*. Particle Theory from S-Matrix to Quarks. P. 494.

³⁹ *Ibid*.

⁴⁰ *Zweig*. An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry...

В интервью, которое взял у Цвейга П. Чаритос в 2013 г. в ЦЕРНе, на вопрос «Как вы пришли к идее кварков как конкретных объектов, из которых сделаны адроны?» он отвечал следующее (цитируя Цвейга, мы опускаем детали, останавливаясь только на самом существенном):

Была замечательная проблема, которая требовала решения, несмотря на то, что существование этой проблемы не было широко признанным. Фи-мезон не распадался по каналу ро-мезон + пи-мезон, который должен был быть доминирующим типом распада. Вместо этого он распадался по кинематически неблагоприятному каналу К-мезон + анти-К-мезон <...> Я был прикован к этой проблеме и обсуждал ее с Фейнманом весной 1963 г. Рассмотрение мезонов как композиций из объектов, которые я называл тузами (*aces*), обеспечивало решение проблемы при условии, что содержащиеся в мезонах тузы имеют соответствующие квантовые числа (т. е. дробные заряды. – В. В.) и если тузы в распадающихся мезонах законсервированы, т. е. становятся обязательными составляющими продуктов распада ⁴¹.

Конечно, в рассказе самого Цвейга главным мотивом введения кварков (тузов) было стремление объяснить одну конкретную загадку, связанную с распадом фи-мезона. Но авторы книги о Фейнмане Дж. и М. Гриббин пишут, что после появления работы Гелл-Манна об $SU(3)$ -симметрии

Цвейг был мгновенно покорен красотой и простотой восьмеричного пути и быстро понял, что модель, образованную октетами, можно было бы объяснить, если бы мезоны и барионы состояли из пар и триплетов элементарных объектов, которые он называл «тузами» и с самого начала считал их реальными частицами, а не «абстрактными полями», его ничуть не смутил тот факт, что для действия подобной схемы каждый из его «тузов» должен был иметь заряд <...> $2/3$ или $1/3$ <...> заряда электрона ⁴².

Заслуживает внимания и более детальный рассказ Цвейга о том, как он пришел к своим тузам ⁴³, с которым я познакомился, когда настоящая статья была закончена. В нем, в частности, он объясняет происхождение названия «туз» для фундаментальных частиц, которое он связывает с обозначением сторон игрового кубика (для игры в кости). Интересные детали, касающиеся различия в подходах и понимании статуса кварков-тузов у Гелл-Манна и Цвейга, мы находим в цитированных выше воспоминаниях Гелл-Манна:

Он (Цвейг. – В. В.) никогда не думал о них (тузах-кварках. – В. В.) как о «плененных» (*confined*); тогда (в ЦЕРНе. – В. В.) он изучал их возможную роль в качестве своего рода катализатора для управляемых термоядерных реакций (вероятно, в духе идеи мюонного катализа. – В. В.). Конечно, теперь мы знаем, что кварки должны быть достаточно хорошо «пленены» (*confined*), хотя оставалась возможность их незначительного просачивания (за пределы адронов. – В. В.),

⁴¹ Charitos. Interview with George Zweig...

⁴² Гриббин Дж., Гриббин М. Ричард Фейнман: жизнь в науке. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. С. 185.

⁴³ Zweig. Concrete Quark...

Both mesons and baryons are constructed from a set of three fundamental particles called aces. The aces break up into an isospin doublet and singlet. Each ace carries baryon number $\frac{1}{3}$ and is consequently fractionally charged. SU_3 (but not the Eightfold Way) is adopted as a higher symmetry for the strong interactions. The breaking of this symmetry is assumed to be universal, being due to mass differences among the aces. Extensive space-time and group theoretic structure is then predicted for both mesons and baryons, in agreement with existing experimental information. An experimental search for the aces is suggested.

Фрагмент из препринта Дж. Цвейга, в котором впервые было использовано слово «туз» (ace), эквивалентное слову «кварк»

что могло бы привести к существованию кварков в виде изолированных частиц в окружающей среде. Джордж (Цвейг. – В. В.) готов был держать пари на существование такой утечки. Было бы замечательно, если бы он оказался прав; тогда возникла бы кваркониевая (*quarconics*) индустрия и было бы не трудно найти деньги для исследований физики частиц ⁴⁴.

За фундаментальными дробно заряженными и загадочными частицами закрепилось крылатое гелл-манновское именование «кварки» и потому, что оно принадлежало уже признанному мэтру в области физики элементарных частиц (в отличие от никому не известного теоретика), и потому, что в кварковой модели этих частиц было три, как и в странных криках чаек «три кварка для мистера Марка» (как уже говорилось, эти чайки снились герою романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану»).

Сравнение трех путей к кваркам и восприятие кварковой модели

Были различия и в процессах публикации полученных результатов по кваркам. Работа Неемана и Гольдберга, сначала распространявшаяся в виде отчета, а затем в очень сжатой и физически не интерпретированной форме выпущенная в журнале, в котором допускалась публикация сомнительных гипотез, прошла совершенно незамеченной. Это было еще и потому, что тогда октетно-декуплетные выводы $SU(3)$ -симметрии казались весьма предположительными. Ситуация резко изменилась, когда эти выводы подтвердились в экспериментах на ускорителях. Публикация об открытии

⁴⁴ *Gell-Mann. Particle Theory from S-Matrix to Quarks... P. 495.*

вершины декуплета, омега-минус-гиперона, вышла практически одновременно с публикацией Гелл-Манна о кварках, которая позволяла наглядно и физично интерпретировать октеты и декуплет $SU(3)$ -симметрии. Если у Гелл-Манна особых проблем с публикацией статьи о кварках не было, поскольку он был признанным теоретиком, то у Цвейга, который только начинал свои исследования, стажирясь в ЦЕРНе, возникли с этим немалые сложности⁴⁵. Гелл-Манн в своих воспоминаниях, как мы видели, приводил немало свидетельств труднейшего восприятия кварков. Достаточно ярко об этом сказано в цитированной выше книге Гриббинов:

Большинство ученых считали кварковую модель безумием (к ней негативно относились в ЦЕРНе, а также такие выдающиеся теоретики, как Р. Фейнман (поначалу), С. Вайнберг, Ф. Дайсон, Дж. Чу и др. – В. В.); даже Гелл-Манн был в лучшем случае уверен в ней лишь наполовину, а единственный человек, который прикладывал все силы, чтобы протолкнуть ее, в результате своих усилий испортил себе все перспективы дальнейшей карьеры (понятно, что речь идет о Цвейге. – В. В.)⁴⁶.

Тем не менее Гелл-Манн только в 1964 г. побывал в ряде университетов США и Европы, в Японии и в СССР, пропагандируя теорию кварков. Есть замечательное свидетельство позитивного восприятия кварков в СССР, связанное как раз с пребыванием Гелл-Манна в Советском Союзе, а именно в Дубне на конференции в августе 1964 г. Оно содержится в одной из первых советских публикаций о кварках, а именно в опубликованной в «Успехах физических наук» в июне 1965 г. статье Я. Б. Зельдовича «Классификация элементарных частиц и кварки “в изложении для пешеходов”». Рассказав о модели кварков, Зельдович продолжил:

Но, может быть, в действительности кварков нет? Может быть, есть только (теперь уже бесспорно) (это «бесспорно» связано, по-видимому, со свершившимся в это же время открытием омега-минус-гиперона. – В. В.) симметрия свойств частиц, как раз такая, как если бы кварки существовали? В августе 1964 г. в Дубне Гелл-Манн сказал по этому поводу: *Who knows?* (Кто знает?). Боюсь, что нужно было бы другое перо, перо писателя, чтобы передать все, что он вложил в эти два коротких слова. Здесь звучало огромное уважение к эксперименту, который в последнем счете решает и ведет науку вперед; здесь была и присущая Гелл-Манну интеллектуальная смелость, и чувство нового, и готовность принять все, что дает природа, и создать из этого новую теорию, вызвать к жизни новые эксперименты⁴⁷.

И дальше идет следующий патетический фрагмент, свидетельствующий о признании фундаментальности и масштабности открытия кварков:

Дилемму, перед которой стоит физика, можно сформулировать так: либо выяснена только классификация и свойства симметрии известных частиц, либо

⁴⁵ См., например: *Гриббин, Гриббин*. Ричард Фейнман... С. 185–187.

⁴⁶ Там же. С. 187.

⁴⁷ *Зельдович*. Классификация элементарных частиц... С. 312.

эти симметрии являются следствием существования кварков, т. е. совершенно новой фундаментальной типа материи, атомизма нового типа. Современные физики имеют право повторить строки Тютчева:

Счастлив, кто посетил сей мир
В его минуты роковые –
Его призвали всеблагие
Как собеседника на пир;
Он в их совет допущен был
И заживо, как небожитель,
Из чаши их бессмертье пил!

Можно сказать на основе всего исторического опыта, что такие открытия, свидетелями которых мы были в последние два-три года, как правило, кардинально перестраивают наши представления о природе ⁴⁸.

Кстати говоря, примерно тогда же Зельдович вместе с Л. Б. Окунем и С. Б. Пикельнером опубликовали в УФН статью «Кварки: астрофизический и физико-химический аспекты» ⁴⁹, посвященную поискам свободных дробно заряженных частиц. В комментарии к этой статье, помещенном в «Избранных трудах» Зельдовича, говорится:

Верхние пределы, достигнутые в поисках свободных дробно заряженных частиц, полностью исключили возможность того, что взаимодействия кварков похожи на взаимодействия обычных адронов (и, фактически, возможность существования свободных кварков. – В. В.), и натолкнули теоретиков на идею невылетания кварков – «конфайнмента» ⁵⁰.

Уже на раннем этапе формирования теории кварков, т. е. в 1964–1966 гг., возникли первые идеи, касающиеся проблемы статистики кварков и цветового заряда. Краткое описание этих проблем и идей, нацеленных на их разрешение, дал в своем докладе на конференции «Симметрии в физике (1600–1980)» в Каталонии в 1983 г. соавтор Гелл-Манна по работам по квантовой хромодинамике начала 1970-х гг. Х. Фрич (*H. Fritzsch*). Подчеркнем, что именно в этих работах были введены понятия «цветовых зарядов» и «квантовой хромодинамики» и сами эти термины. В докладе говорилось:

Наиболее серьезной была проблема связи спина со статистикой <...> Если кварки подчиняются статистике Ферми – Дирака, то возникает проблема (связанная с нарушением принципа Паули. – В. В.). Было предпринято много попыток, чтобы решить эту проблему, большинство из них были тщетны. Правильным решением было введение нового квантового числа: цвета. Однако потребовалось семь лет (с 1964 по 1971 г.) на то, чтобы достичь окончательного понимания роли цвета. О. Гринберг предложил новую статистику для кварков – парастатистику ранга 3 (это было сделано уже в 1964 г. – В. В.). Эта новая статистика была своего рода промежуточной между статистиками

⁴⁸ Там же.

⁴⁹ Зельдович Я. Б., Окунь Л. Б., Пикельнер С. Б. Кварки: астрофизический и физико-химический аспекты // Успехи физических наук. 1965. Т. 87. № 1. С. 113–124.

⁵⁰ Зельдович Я. Б. Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная. М.: Наука, 1985. С. 131.

Ферми и Бозе. Она разрешала загадку спина-статистики, но в то же самое время приводила к появлению в адронном спектре новых, еще не наблюдавшихся состояний, например барионов, подчиняющихся Бозе-статистике, и мезонов, подчиняющихся статистике Ферми, не говоря о других состояниях, которые не были ни фермионами, ни бозонами. Хан и Намбу (в 1965 г.) предложили так называемую трех-триплетную модель. Предполагалось, что каждый кварк может быть трех различных типов (на современном языке, трех цветов). Это решает непосредственно загадку спина-статистики <...> Намбу обсудил в 1966 г. динамические аспекты своей схемы. Он рассмотрел калибровочную теорию, в которой калибровке подвергались как цветовые, так флейворные индексы (т. е. концепция Янга – Миллса применялась как к цветовой $SU(3)$, так и к приближенной ароматической, или флейворной, симметрии $SU(3)$, связанной с восьмеричным путем. – В. В.). Калибровочные бозоны, связанные с цветовыми индексами, отождествлялись с частицами, генерирующими сильное взаимодействие (и названными впоследствии глюонами. – В. В.). В то же самое время эти частицы смешивались с калибровочными бозонами в пространстве ароматов и фотоном. Подобно кваркам, эти бозоны предполагались реальными частицами (с массой порядка 2 ГэВ) <...> Хотя Намбу в своей статье 1966 г. близко подошел к формулировке КХД в ее современном смысле, ему не удалось, по существу, разделить сильные и электрослабые калибровочные поля. В результате удержание (*confinement*) цвета не могло рассматриваться как основное свойство сильного взаимодействия, так как в электромагнитных взаимодействиях адронов должны были возникать цветные частицы. Тот калибровочный конфликт в теории Намбу – характерный поучительный пример той путаницы, которая преобладала в то время во взаимовлиянии сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий ⁵¹.

Пришлось, следуя Фричу, забежать несколько вперед, чтобы понять, насколько близко Намбу, отчасти вместе с Ханом ⁵², уже в 1965–1966 гг. подошел вплотную к квантовой хромодинамике. Из цитированных ранее воспоминаний Гелл-Манна видно, что он с самого начала думал о статистике кварков и получил некоторые важные результаты, которые были получены несколько позже О. Гринбергом:

Возникает вопрос, какой статистике подчиняются кварки? В сентябре 1963 г. я исследовал парастатистику Ферми с тремя индексами <...> Я показал, что в этом случае некоторые барионы могли бы не подчиняться статистике Ферми – Дирака и возникли бы «парабарионы», которые мне казались неприемлемыми. Поэтому я отказался от фиксации типа статистики. Несколько позже Гринберг опубликовал идею парастатистики для кварков, но, насколько я знаю, и ему не удалось решить проблему параадронов. В 1966 г. в своей лекции в Королевском институте в Лондоне я заметил, что «математические», т. е.

⁵¹ *Fritzsch*. The Development of Quantum Chromodynamics... P. 597–598.

⁵² *Han M., Nambu Y.* Three-Triplet Model with Double $SU(3)$ Symmetry // *Physical Review*. 1965. Vol. B 139. P. 1006–1015; *Nambu Y.* A Systematics of Hadrons in Subnuclear Physics // *Preludes in Theoretical Physics in Honor of V. Weisskopf / A. De-Shalit, H. Feshbach, L. Van Hove* (eds.). Amsterdam: North-Holland; New York: Wiley, 1966. P. 133–142.

плененные (*confined*), кварки могли бы облегчить решение проблемы статистики, но я недостаточно ясно сформулировал мысль, что пленение (*confinement*) паракварков может повлечь за собой и конфайнмент парастатистики, в результате чего адроны остались бы фермионами и бозонами. Такой ситуация оставалась вплоть до 1971 г., когда в сотрудничестве с Х. Фричем я понял, что цвет и запрещение появления цветных объектов эквивалентны парастатистике и запрещению параобъектов ⁵³.

Проблема статистики кварков оказалась своеобразной точкой роста кварковой модели и уже через год-два привела Намбу (отчасти в соавторстве с Хаом) и независимо советских теоретиков Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского и А. Н. Тавхелидзе к трех-триплетному расширению кварковой модели, связанному с введением нового квантового числа кварков, названного впоследствии «цветом» ⁵⁴. Вот как об этом позднее писал сам Намбу:

Оказалось, что в данном случае требование пара-ферми-статистики равносильно допущению об утроении числа обычных фермионов <...> Если это так, то не лучше ли оставить кварки фермионами, но принять, что число их видов втрое больше? Утроение числа кварков означает, что вводятся три разновидности каждого из «старых» кварков *u*, *d*, *s*; вновь вводимые кварки имеют общие квантовые числа изоспина и странности, маркирующие состояния в теории $SU(3)$ ⁵⁵.

Намбу в 1966 г. применил теорию Янга — Миллса к обеим группам симметрии $SU(3)$ и фактически предсказал существование глюонов, но все это было несколько преждевременно и не было воспринято научным сообществом.

И о последнем предвосхищении 1964 г. — предсказании Ш. Глэшоу и Дж. Бьеркеном четвертого кварка, названного ими очарованным (*charmed*). Через 10 лет именно открытие очарованных частиц привело к так называемой «ноябрьской революции 1974 г.» в физике элементарных частиц ⁵⁶. Вот что по поводу этого прозрения сказал в своей Нобелевской лекции сам Глэшоу:

Весной 1964 г. я находился в короткой командировке в Копенгагене, где мы вместе с Бьеркеном предложили дополнить систему из трех кварков Гелл — Манна и Цвейга до четырех (у других исследователей в это же время появилась та же идея) ⁵⁷. Мы назвали четвертый кварк очарованным. Мотивация его введения базировалась отчасти на ошибочных представлениях об адронной спектроскопии. Но нам хотелось также усилить аналогию между слабыми

⁵³ *Gell-Mann*. Particle Theory from S-Matrix to Quarks... P. 496.

⁵⁴ *Исаев П. С.* Обыкновенные, странные, очарованные, прекрасные...: об истории развития теоретических идей в физике элементарных частиц. М.: ЛЕНАНД, 2015. С. 208–209.

⁵⁵ *Намбу*. Кварки... С. 114.

⁵⁶ *Исаев*. Обыкновенные, странные, очарованные, прекрасные... С. 215–225.

⁵⁷ Ссылки на работы этих исследователей можно найти в монографии А. Пайса: *Pais A.* Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World. Oxford, N. Y.: Clarendon Press, Oxford University Press, 1986.

лептонным и адронным токами. Мы полагали, что, так как имелось два слабых дублета лептонов, слабых кварковых дублетов должно быть также два ⁵⁸.

Название одного из разделов книги Намбу о кварках, посвященных очарованным частицам, звучит так: «Четвертый кварк s , введение которого придало модели кварков заверченный вид» ⁵⁹, что подчеркивает особое значение гипотезы о четвертом, очарованном, кварке, к которой, впрочем, физики всерьез отнеслись только в начале 1970-х гг. ⁶⁰ Кстати говоря, не лишним будет заметить, что среди тех, кто в 1964 г. поддержал идею четвертого кварка и предложил искать очарованные частицы в нейтринных экспериментах, был и советский теоретик Окунь ⁶¹. Такова сложная, даже запутанная история появления кварков в окрестности 1964 г., в которой главной фигурой был, безусловно, Гелл-Манн, хотя и тут было несколько сооткрывателей. Об этой особенности калибровочной революции и месте Гелл-Манна в ней удачно и точно высказался А. Е. Левин в небольшом тексте, посвященном памяти скончавшегося в 2019 г. творца $SU(3)$ и кварков:

В новейшей истории фундаментальной физики ни о чем нельзя сказать «только Гелл-Манн», но зато о многом – «Гелл-Манн и коллеги». Не так уж удивительно для человека, который на четверть века оседлал гребень волны второй физической революции XX столетия ⁶².

Выводы и заключительные замечания

Итак, 1963–1964 гг. в истории создания стандартной модели были поворотными прежде всего потому, что в эти годы были открыты кварки. Подчеркнем, что это открытие следует рассматривать как процесс, который был начат уже в 1963 г. В 1964-м же году был создан метод, позволяющий решить одну из главных проблем теории калибровочных полей, а именно проблему массы калибровочных частиц, передающих взаимодействие. Но этой истории мы в настоящей статье не касаемся. Подлинный же масштаб открытия кварков поначалу в значительной степени оставался скрытым. Хотя были некоторые исключения. Например, Зельдович в статье 1965 г. в связи с открытием кварков цитировал Тютчева: «Счастлив, кто посетил сей мир в его минуты роковые...» Не нашли понимания и ранние (в 1965–1966 гг.) предвосхищения квантовой хромодинамики (КХД) в работах Намбу (а также Намбу и Хана) и др. Возвращаясь к поворотным событиям 1963–1964 гг., отметим их некоторые особенности, которые можно назвать своего рода «историко-научными феноменами».

⁵⁸ Глэшоу Ш. На пути к объединенной теории — нити в гобелене. Нобелевская лекция // Успехи физических наук. 1980. Т. 132. № 2. С. 224.

⁵⁹ Намбу. Кварки... С. 126.

⁶⁰ Глэшоу. На пути к объединенной теории...

⁶¹ Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981. С. 248.

⁶² Левин А. Е. Восьмеричный путь Вселенной: умер Марри Гелл-Манн — создатель современной модели субатомных частиц // <https://web.archive.org/web/20190604101438/https://nplus1.ru/material/2019/05/29/rip-murray-gell-mann>.

1) «Феномен одновременных и независимых открытий» (по кваркам — это Гелл-Манн, Нееман с Гольдбергом и Цвейг).

2) «Феномен “спящей красавицы”» (прекрасная кварковая модель «спала» до начала 1970-х, пока коллективный «сказочный принц» в лице Г. 'т Хоофта, М. Гелл-Манна и Х. Фрича, Д. Гросса — Ф. Вильчека — Х. Д. Политцера не разбудили ее (во многом благодаря введению понятия «асимптотическая свобода») и она не предстала перед теоретиками как КХД).

3) «Феномен “комедии ошибок”» (кварки открыли, но статус их как реальных частиц был недостаточно ясен, так же как и симметрия, с ними связанная, поначалу была в известном смысле ошибочной; осознание этих ошибок и их исправление произошло в начале 1970-х гг. при завершении основ КХД).

4) «Феномен “упущенных возможностей”» (Нееман вместе с Гольдбергом упустили возможность открыть кварки, их открывателями считаются Гелл-Манн и Цвейг; вполне вероятно, что Намбу, выдвинувший идеи цветового заряда кварков и существования глюонов, упустил возможность значительно дальше продвинуться в создании КХД; в порядке шутки можно сказать, что Нобелевский комитет, который взвешенно и справедливо наградил многих создателей СМ, явно упустил возможность отметить «полновесной» Нобелевской премией открытие кварков, Цвейг остался без премии).

5) «Феномен вторжения метафизики в физику» (особенно явным и важным это вторжение было при обсуждении проблемы реальности кварков).

6) «Феномен продолжающегося роста исследовательской программы меньшинства» (речь идет о том, что кварковая модель находит свое настоящее место только в квантовой калибровочно-полевой программе, становясь своего рода ее точкой роста, хотя, как заметил в своей Нобелевской лекции Д. Гросс, «до 1973 г. считалось неприличным использовать теорию поля без извинений») ⁶³.

7) «Феномен первого среди равных» (таковым из тройки первооткрывателей кварков можно считать Гелл-Манна, вклад которого по совокупности был наибольшим, если иметь в виду не только его работы первой половины 1960-х гг., но и более ранние работы по частицам и особенно более поздние (начала 1970-х гг.) работы по КХД. Все эти работы Гелл-Манна с комментариями его ученика Фрича собраны в двух отчасти дублирующих друг друга книгах ⁶⁴.

Приложение. Словарь некоторых терминов

Адроны. Элементарные частицы, фигурирующие в сильных взаимодействиях (понятие введено Л. Б. Окунем). Частицы с полуцелым спином называются *барионами* (понятие, введенное А. Пайсом). За частицами с целым спином закрепилось название *мезоны*. К барионам, помимо легчайших протона и нейтрона, именуемых *нуклонами*, относятся более тяжелые и нестабильные частицы, называемые *гиперонами*.

⁶³ Гросс Д. Открытие асимптотической свободы и появление КХД. Нобелевская лекция // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 12. С. 1308.

⁶⁴ Gell-Mann M. Selected Papers. Singapore: World Scientific, 2010; Murray Gell-Mann and the Physics of Quarks / H. Fritzsch (ed.). Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 2018.

Аромат (от англ. *flavour*). Характеристика (квантовое число) типа кварков и лептонов. Существуют шесть ароматов кварков, обозначаемых u , d , s , c , b , t и называемых соответственно верхний, нижний, странный, очарованный, прелестный и истинный кварки, и шесть ароматов лептонов, т. е. частиц с половинным спином, не участвующих в сильных взаимодействиях: e , μ , τ (электрон, мюон и тау-лептон) и три соответствующих нейтрино: ν_e , ν_μ , ν_τ (электронное, мюонное и таонное). Соответствующие квантовые числа, в том числе странность, очарование и др., представляют различные ароматы. Если три первых аромата кварков были введены в работах Гелл-Манна и Цвейга 1964 г., то следующая тройка значительно позже: очарованный кварк c (от квантового числа *charm*, очарование) — в 1974 г., прелестный (красивый) кварк b (от квантового числа *beauty*, красота, или прелесть) — в 1977 г., истинный кварк t (от квантового числа *truth*, истина) — в 1995 г. Помимо того, что каждому кварку соответствует анти-кварк, 12 кварков и лептонов разбиваются на три группы, называемые поколениями. Каждое из них включает в себя по четыре частицы. Наиболее легкие частицы образуют первое поколение, из них вместе с фотоном состоит материя современной Вселенной. В двух последующих поколениях заряженные частицы тяжелее, чем в предыдущем. Эти поколения, скорее всего, были важны на ранних этапах развития Вселенной. Названия характеристик кварков «аромат», «странность», «очарование», «цвет» и др. не имеют никакого отношения к общепринятым значениям этих слов.

Барионы. См.: *Адроны.*

Бозоны и фермионы. Бозоны — частицы, обладающие целым спином. Подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, согласно которой в одном квантовом состоянии может находиться любое число частиц. К бозонам относятся фотон, мезоны, калибровочные векторные бозоны, связанные с локализацией внутренних симметрий и описывающие электрослабые и сильные взаимодействия (массивные промежуточные W - и Z -бозоны и безмассовые глюоны). Фермионы — частицы, обладающие полуцелым спином и подчиняющиеся статистике Ферми — Дирака. В одном квантовом состоянии может находиться только один фермион (принцип Паули). К фермионам относятся лептоны и кварки, а также все барионы.

Бутстрап. Радикальный вариант теории элементарных частиц, связанный с отказом от квантовополевой концепции, а также от признания какой-то группы частиц подлинно элементарными (или фундаментальными). Иначе говоря, при этом все частицы в равной степени являются фундаментальными (принцип «ядерной демократии» в отличие от стандартной модели, в которой реализуется принцип «ядерной аристократии» с кварками и лептонами в качестве фундаментальных). Иногда бутстрап называют «*зашнуровкой*».

Восьмеричный путь. Приближенная глобальная симметрия сильного взаимодействия, описываемая специальной унитарной группой $SU(3)$ и открытая в 1961 г. Гелл-Манном и Нееманом. Гелл-Манн назвал эту группу, имеющую размерность 8, восьмеричным путем по аналогии с восьмеричным путем буддистов в нирване. Исследуя особенности этой симметрии, Гелл-Манн и Цвейг пришли к идее кварков. Именно эта группа связана с ароматами кварков, и потому иногда ее называют флейворной, или ароматической,

в отличие от цветной $SU(3)$, локализация которой приводит к глюонам и которая является точной симметрией квантовой хромодинамики.

Глюоны (от англ. *glue* — клей). Восемь безмассовых электрически нейтральных калибровочных бозонов со спином 1, обладающих цветовым зарядом и являющихся переносчиками сильного взаимодействия между кварками. Глюоны могут взаимодействовать и между собой, изменяя при этом свой цвет. Теорию кварков и глюонов называют квантовой хромодинамикой (КХД), являющейся калибровочной теорией сильного взаимодействия.

Изоспин. Одна из внутренних характеристик (квантовых чисел) адронов, определяющая число частиц в изотопическом мультиплете (группе адронов с примерно равными массами и одинаковыми спином, барионным зарядом, странностью, но разными электрическими зарядами и магнитными моментами). Существование таких изомультиплетов связано с изотопической симметрией, присущей сильному взаимодействию и связанному со специальной унитарной группой $SU(2)$. Локализацию именно этой группы симметрии предложили Янг и Миллс в 1954 г. для описания сильных взаимодействий. Позже выяснилось, что правильной группой симметрии адронов является цветная $SU(3)$ -симметрия, частью которой является изотопическая симметрия. Локализация цветной $SU(3)$ приводит к глюонам (см.: *Глюоны, Восьмеричный путь*).

КХД, квантовая хромодинамика. См.: *Глюоны, Восьмеричный путь*.

Лептоны. Элементарные частицы со спином $1/2$, не участвующие в сильных взаимодействиях, но принимающие участие в слабых и электромагнитных взаимодействиях. Известны шесть лептонов (и шесть антилептонов): три заряженных — электрон, мюон, тау-лептон и их античастицы и три нейтральных нейтрино — электронное, мюонное и тау-нейтрино (см.: *Аромат, Бозоны и фермионы*).

Очарование (от англ. *charm*). Внутренняя характеристика (квантовое число) кварков и адронов. Адроны с ненулевым значением очарования называются очарованными. Очарование частицы определяется разницей входящих в нее очарованных кварков (c) и очарованных антикварков ($\bar{c}$).

Полюсов и траекторий Редже метод. Метод описания и исследования элементарных частиц, основанный на формальном аналитическом продолжении значений момента количества движения в комплексную область. Введен Т. Редже в начале 1960-х гг. и оказался эффективным для описания возбужденных и связанных состояний частиц при использовании S -матричного подхода.

Стандартная модель, СМ. Современная квантовополевая теория элементарных частиц и трех фундаментальных взаимодействий между ними (электромагнитного, слабого и сильного), все предсказания которой хорошо согласуются со всеми известными экспериментальными данными. В основе ее лежит калибровочная группа симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. $SU(3)$ является симметрией КХД, а $SU(2) \times U(1)$ — симметрией единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий. СМ включает в себя следующие частицы, считающиеся подлинно элементарными: шесть кварков, шесть лептонов и шесть бозонов — пять калибровочных бозонов (фотон, глюон, положительный и отрицательный W - и нейтральный Z -бозоны, а также нейтральный бозон Хиггса) (см. также: *Аромат, Бозоны и фермионы*).

Странность. Внутренняя характеристика (квантовое число), присущее адронам. Адроны с ненулевой странностью называются странными. Сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Странность некоторых адронов обусловлена тем, что в них входит один или несколько странных кварков (s), странность которых равна -1 . Понятие странности было введено Гелл-Манном.

Цвет, цветовой заряд. Внутренняя характеристика (квантовое число) кварков и глюонов. Кварк каждого аромата может находиться в одном из трех цветовых состояний. Наблюдаемые адроны не имеют цветового заряда (бесцветны). Цветовые заряды и соответствующий закон сохранения связан с группой цветовой $SU(3)$. Локализация ее приводит к восьми калибровочным безмассовым цветным бозонам, называемым глюонами. Эта симметрия лежит в основе КХД. Важную роль в развитии и признании кварковой модели сыграли результаты экспериментов по глубоко неупругому рассеянию электронов на нуклонах, проведенные в Стэнфорде (США) в 1968–1969 гг. Они заключались в том, что нуклоны содержали квазиточечные образования, которые Фейнман назвал *партонами*. Вскоре выяснилось, что партоны — это и есть кварки. В соответствии с КХД, партонами могут быть и глюоны (см. также: *Глюоны, КХД*).

Ядерная демократия и ядерная аристократия. См.: *Бутстреп*.

References

- Barnes, V. E., Connolly, P. L., Crennell, D. J. et al. (1964) Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three, *Physical Review Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 204–206.
- Berestetskii, V. B. (1979) *Problemy fiziki elementarnykh chastits [Problems in Particle Physics]*. Moskva: Nauka.
- Charitos, P. (2013) Interview with George Zweig (13th December 2013), <https://ep-news.web.cern.ch/content/interview-george-zweig>.
- Chew, G. F., Gell-Mann, M., and H. Rosenfeld, A. H. (1964) Strongly Interacting Particles, *Scientific American*, vol. 210, no. 2, pp. 74–93.
- Fritzsch, H. (1987) The Development of Quantum Chromodynamics, in: Doncel, M., Hermann, A., Michel, L., and Pais, A. (eds.) *Symmetries in Physics (1600–1980). Proceedings of the 1st International Meeting on the History of Scientific Ideas. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. September 20–26, 1983*. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, pp. 593–609.
- Fritzsch, H. (ed.) (2018) *Murray Gell-Mann and the Physics of Quarks*. Basel, Boston and Berlin: Birkhäuser.
- Fritzsch, H., and Gell-Mann, M. (eds.) (2015) *50 Years of Quarks*. Singapore: World Scientific.
- Gell-Mann, M. (1962) Symmetries of Baryons and Mesons, *Physical Review*, vol. 125, pp. 1067–1084.
- Gell-Mann, M. (1964) A Schematic Model of Baryons and Mesons, *Physics Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 214–216.
- Gell-Mann, M. (1987) Particle Theory from S-Matrix to Quarks, in: Doncel, M., Hermann, A., Michel, L., and Pais, A. (eds.) *Symmetries in Physics (1600–1980). Proceedings of the 1st International Meeting on the History of Scientific Ideas. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. September 20–26, 1983*. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, pp. 473–497.
- Gell-Mann, M. (2010) *Selected Papers*. Singapore: World Scientific.
- Gell-Mann, M., Rozenfel'd, A., and Chu, Dzh. (Gell-Mann, M., Rosenfeld, A., and Chew, G.) (1964) Sil'no vzaimodeistvuiushchie chastitsy [Strongly Interacting Particles], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 83, no. 4, pp. 695–727.
- Gleshou, Sh. (Glashow, Sh.) (1980) Na puti k ob"edinennoi teorii — niti v gobelene. Nobelevskaia leksiia [Towards a Unified Theory — Threads in a Tapestry. Nobel Lecture], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 132, no. 2, pp. 219–228.

- Goldberg, H., and Ne'eman, Y. (1963) Baryon Charge and R-Inversion in Octet Model, *Il Nuovo Cimento*, vol. 27, no. 1, pp. 1–2.
- Gribbin, Dzh., and Gribbin, M. (Gribbin, J., and Gribbin, M.) (2002) *Richard Feynman: zhizn' v nauke [Richard Feynman: A Life in Science]*. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy.
- Gross, D. (Gross, D.) (2005) Otkrytie asimptoticheskoi svobody i poiyavlenie KKhD. Nobelevskaia leksiia [The Discovery of Asymptotic Freedom and the Emergence of QCD. Nobel Lecture], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 175, no. 12, pp. 1306–1318.
- Han, M., and Nambu, Y. (1965) Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry, *Physical Review*, vol. B 139, pp. 1006–1015.
- Ikeda, M., Ogawa, Sh., and Ohnuki, Y. (1959) A Possible Symmetry in Sakata's Model for Bosons-Baryons System, *Progress of Theoretical Physics (Kyoto)*, vol. 22, no. 5, pp. 715–724.
- Isaev, P. S. (2015) *Obyknovennye, strannye, ocharovannye, prekrasnye...: ob istorii razvitiia teoreticheskikh idei v fizike elementarnykh chastits [Ordinary, Strange, Charmed, Beautiful...: On the History of the Development of Theoretical Ideas in Particle Physics]*. Moskva: LENAND.
- Levin, A. E. (2019) Vos'merichnyi put' Vselennoi: umer Marri Gell-Mann — sozdatel' sovremennoi modeli subatomnykh chastits [Eightfold Way of the Universe: Murray Gell-Mann, Creator of the Modern Model of Subatomic Particles, Has Died], <https://web.archive.org/web/20190604101438/https://nplus1.ru/material/2019/05/29/rip-murray-gell-mann>.
- Lipkin, H. J. (1973) Quarks for Pedestrians, *Physics Reports*, vol. 8, no. 3, pp. 173–268.
- Nambu, Y. (1966) A Systematics of Hadrons in Subnuclear Physics, in: De-Shalit, A., Feshbach, H., and Van Hove, L. (eds.) *Preludes in Theoretical Physics in Honor of V. Weisskopf*. Amsterdam: North-Holland and New York: Wiley, pp. 133–142.
- Nambu, Io. (Nambu, Y.) (1984) *Kvarki [Quarks]*. Moskva: Mir.
- Ne'eman, Y. (1961) Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance, *Nuclear Physics*, vol. 26, pp. 222–229.
- Ne'eman, Y. (1987) Hadron Symmetry, Classification and Compositeness, in: Doncel, M., Hermann, A., Michel, L., and Pais, A. (eds.) *Symmetries in Physics (1600–1980). Proceedings of the 1st International Meeting on the History of Scientific Ideas. Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain. September 20–26, 1983*. Bellaterra, Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, pp. 499–540.
- Neeman, Iu. (Ne'eman Y.) (1964) Vyvod sil'nykh vzaimodeistvii iz printsipa kalibrovochnoi invariantnosti [The Derivation of Strong Interactions from the Principle of Gauge Invariance], in: Ivanenko, D. D. (ed.) *Elementarnye chastitsy i kompensiruiushchie polia. Sbornik statei [Elementary Particles and Compensating Fields. A Collection of Papers]*. Moskva: Mir, pp. 176–185.
- Okun', L. B. (1981) *Leptony i kvarki [Leptons and Quarks]*. Moskva: Nauka.
- Okun, L. B. (2015) On the Way from Sakatons to Quarks, in: Fritzsche, H., and Gell-Mann, M. (eds.) *50 Years of Quarks*. Singapore: World Scientific, pp. 57–94.
- Okun, L. B. (2015) On the Way from Sakatons to Quarks, *International Journal of Modern Physics A*, vol. 30, no. 1, 1530008.
- Pais, A. (1986) *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford and New York: Clarendon Press and Oxford University Press.
- Wess, J. E. (1960) Investigation of the Invariance Group in the Three Fundamental Fields Model, *Il Nuovo Cimento*, vol. 15, no. 1, pp. 52–72.
- Zel'dovich, Ia. A. (1965) Klassifikatsiia elementarnykh chastits i kvarki “v izlozhenii dlia peshekhodov” [Classification of Elementary Particles and Quarks “for Pedestrians”], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 86, no. 2. S. 303–314.
- Zel'dovich, Ia. B. (1985) *Izbrannye trudy. Chastitsy, iadra, Vselennaia [Selected Works. Particles, Nuclei, Universe]*. Moskva: Nauka.
- Zel'dovich, Ia. B., Okun' L. B., and Pikel'ner, S. B. (1965) Kvarki: astrofizicheskii i fiziko-khimicheskii aspekty [Quarks: Astrophysical and Physicochemical Aspects], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 87, no. 1, pp. 113–124.
- Zweig, G. (1964) An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking. CERN Preprint 8419/TH-401 (January 17, 1964), <https://cds.cern.ch/record/352337>.
- Zweig, G. (2015) Concrete Quark, in: Fritzsche, H., and Gell-Mann, M. (eds.) *50 Years of Quarks*. Singapore: World Scientific, pp. 25–56.

Received: March 27, 2023.