

*Новиков Н.Б.  
Институт психологии РАН  
Россия, г. Москва*

*Novikov N.B.  
Institute of Psychology RAS  
Russia, Moscow*

## **СИЛА АНАЛОГИЙ. ТВОРЧЕСТВО МЮРРЕЯ ГЕЛЛ-МАННА**

***Аннотация:** Мюррей Гелл-Манн окончил школу в 14 лет, а в 18 получил диплом бакалавра Йельского университета (США). Спустя три года он защитил докторскую диссертацию в Массачусетском технологическом институте, выполненную под руководством физика-ядерщика Виктора Вайскопфа. Наибольшую известность М.Гелл-Манну принесла разработанная им в 1961 г. систематика элементарных частиц, а также формулировка идеи о существовании кварков (фермионов с дробным электрическим зарядом, из которых должны состоять все адроны). Честь создания указанной систематики он разделяет с израильским физиком Ювалом Нееманом, а авторство гипотезы кварков – с Джорджем Цвейгом. В 1969 г. М.Гелл-Манн удостоен Нобелевской премии по физике с формулировкой «За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий». Цель настоящей статьи – рассмотреть, как рождались идеи этого выдающегося физика, насколько часто он использовал аналогию в своей творческой деятельности (при изобретении новых гипотез).*

***Ключевые слова:** новые идеи, физические теории, обнаружение сходства, проведение аналогии.*

**Abstract:** Murray Gell-Mann graduated from high school at the age of 14, and at 18 received a bachelor's degree from Yale University (USA). Three years later, he defended his doctoral dissertation at the Massachusetts Institute of Technology, carried out under the supervision of nuclear physicist Victor Weisskopf. Among the main scientific achievements of M. Gell-Mann is the systematics of elementary particles developed by him in 1961, as well as the formulation of the idea of the existence of quarks. He shares the honor of creating this systematics with the Israeli physicist Yuval Neeman, and the authorship of the quark hypothesis with George Zweig. In 1969, M. Gell-Mann was awarded the Nobel Prize in Physics with the wording "For discoveries related to the classification of elementary particles and their interactions". The purpose of this article is to consider how the ideas of this outstanding physicist were born, how often he used analogy in his creative activity (when inventing new hypotheses).

**Key words:** new ideas, physical theories, discovery of similarities, drawing analogies.

## **1. Аналогия первая: идея о зарядовой независимости гиперонов и К-мезонов (каонов)**

В 1947 г. британские физики Джордж Рочестер и Клиффорд Батлер открыли элементарные частицы, обладавшие необычными свойствами. Они рождались парами в процессах сильных ядерных взаимодействий, а распадались поодиночке за счет слабых ядерных взаимодействий, причем время их жизни было больше теоретически ожидаемого. Примерно в то же время были открыты частицы, названные гиперонами и также демонстрировавшие необычные свойства. Объяснить поведение этих частиц Д.Рочестер и К.Батлер не смогли. Это сделали М.Гелл-Манн и А.Пайс, которые приписали К-мезонам и гиперонам новое квантовое число, названное странностью. Кроме того, М.Гелл-Манн и К.Нишиджима сформулировали

предположение о зарядовой независимости (изотопической инвариантности) этих частиц, для которых был придуман термин «странные адроны», т.е. странные частицы, участвующие в сильных ядерных взаимодействиях.

Как же М.Гелл-Манн и К.Нишиджима (1953) пришли к идее о зарядовой независимости каонов и гиперонов? По аналогии с зарядовой независимостью протонов, нейтронов и пионов. Концепция зарядовой независимости (изотопической инвариантности) элементарных частиц появилась благодаря исследованиям Вернера Гейзенберга, создателя матричной механики и автора знаменитого принципа неопределенности. В 1932 г. В.Гейзенберг обратил внимание на поразительное сходство двух известных к тому времени частиц – протона и нейтрона. Их массы отличались всего на десятую долю процента. И у него возникло предположение: если бы протон был лишен электрического заряда, он превратился бы в самый настоящий нейтрон. Отсюда появилась интересная идея: протон и нейтрон представляют собой различные состояния одной частицы - нуклона.

В дальнейшем идею В.Гейзенберга развили Грегори Брейт и Юджин Финберг (1936). Они учитывали, что протон и нейтрон участвуют в сильных взаимодействиях одинаковым (симметричным) образом, как бы «забывая» о том, что у одной из них есть электрический заряд. Это обстоятельство и привело к формулировке понятия зарядовой независимости (изотопической симметрии) указанных частиц. Затем Энрико Ферми и другие исследователи сочли необходимым приписать зарядовую независимость  $\pi$ -мезонам (пионам), открытым командой Джузеппе Оккилиани (1947). Напомним, что  $\pi$ -мезоны были теоретически предсказаны японским физиком Хидеки Юкавой (1935) в качестве переносчиков сильных взаимодействий. Основываясь на работах, развивавших концепцию изотопической инвариантности (в том числе работах Юджина Вигнера), М.Гелл-Манн и К.Нишиджима по аналогии пришли к заключению, что странные адроны также должны описываться при помощи этой концепции. Другими словами, они распространили на странные адроны

понятие зарядовой независимости, ранее применявшееся для описания нуклонов и пионов.

Д.Иваненко и А.Старцев в статье «Классификация элементарных частиц» [1] пишут: «Для преодоления трудностей, возникающих при изучении процессов рождения и распада странных частиц (гиперонов и К-мезонов), Гелл-Манн [5] и Нишиджима [6] предложили классификацию частиц по зарядовым мультиплетам. Она основана на распространении понятия изотопического спина (изоспина) на странные частицы и на введении феноменологическим путем нового квантового числа  $S$  – странности, физический смысл которого – смещение центра заряда мультиплета» [1, с.766-767].

Об этом же сообщает К.Н.Мухин во 2-м томе книги «Экспериментальная ядерная физика» [2]: «Для объяснения удивительных свойств странных частиц американский физик Гелл-Манн и японский физик Нишиджима в 1953-1954 гг. предложили провести дальнейшее обобщение принципа изотопической инвариантности (зарядовой независимости сильного взаимодействия), распространив его на К-мезоны и гипероны. Это обобщение вполне естественно: К-мезоны и гипероны сильно взаимодействуют с нуклонами и  $\pi$ -мезонами, для которых зарядовая независимость справедлива. В соответствии с этим обобщением для К-мезонов и гиперонов (в процессе их рождения) предполагается выполнение закона сохранения изотопического спина, причем, так же, как и в случае нуклонов и  $\pi$ -мезонов, частицы с данным значением полного изотопического спина представляют собой мультиплет тождественных (по ядерным свойствам) частиц с ядерными зарядами» [2, с.275].

Примечательно, что В.Гейзенберг разработал математическое описание изотопического спина для нуклонов по аналогии с тем, как В.Паули ввел такое же описание для обычного спина электронов. Р.Х.Сафаров в монографии «Физика атомного ядра и элементарных частиц» [3] констатирует: «При

создании квантовой механики Паули предложил математический аппарат для описания состояний электрона со спином  $s = \frac{1}{2}$ , принимающих только два значения  $s_z = \pm 1/2$ . Гейзенберг применил этот аппарат для описания двух состояний нуклона, введя новое квантовое число  $T = \frac{1}{2}$ , называемое изоспином. Состояния протона и нейтрона различаются 3-ей компонентой изоспина  $T_3 = \pm 1/2$ » [3, с.9]. Этот факт известен также авторам книги [4], которые указывают: «Квантовая теория изоспина построена по аналогии с теорией спина» [4, с.36].

## **2. Аналогия вторая: получение дисперсионных соотношений для рассеяния пионов на нуклонах**

В 1954 г. М.Гелл-Манн (совместно с М.Гольдбергером и В.Тиррингом) впервые получил дисперсионные формулы, описывающие рассеяние пионов на нуклонах. Возник новый инструмент исследования рассеяния упомянутых частиц – метод дисперсионных соотношений. Специалисты называют его непрямым методом, поскольку в нем не используется динамический принцип и уравнения движения.

Чтобы понять, как М.Гелл-Манн нашел дисперсионные формулы (соотношения), описывающие пион-нуклонное рассеяние, нам нужно обратиться к воспоминаниям В.Гейзенберга. Эти воспоминания документируют начальный период работы нидерландского физика Хендрика Антона Крамерса (1894-1952) над теорией дисперсии. Именно эта работа завершилась в 1927 г. тем, что Х.Крамерс получил свои знаменитые дисперсионные соотношения, связывающие частотные зависимости действительной и мнимой частей тензора диэлектрической проницаемости. Аналогичные соотношения годом раньше нашел Ральф Крониг (один из авторов гипотезы о спине электрона), поэтому они часто называются

«соотношениями Крамерса - Кронига» и рассматриваются как важный результат, относящийся к оптике.

В.Гейзенберг в статье «Квантовая теория и ее интерпретация» [5] вспоминает: «Осенью я был назначен ассистентом Макса Борна при университете в Геттингене и принял участие в дискуссиях по проблемам атомной теории. Только в зимний семестр 1924-1925 года я снова мог возвратиться в Копенгаген в Институт на Блегдамсвай, 15, на этот раз в качестве рокфеллеровского стипендиата по рекомендации Бора. С первых дней между Бором, его ближайшим сотрудником Крамерсом и мной установилось тесное научное сотрудничество. Беседы, которые мы вели вдвоем или втроем, скоро стали постоянными и имели для меня более важное значение, чем семинары и лекции. Основным предметом наших споров была теория дисперсии, то есть распространение света в атомах, о чем Крамерс только что опубликовал очень важную работу» [5, с.23].

Итак, В.Гейзенберг указывает, что Х.Крамерс начал работать над теорией дисперсии – разделом оптики – еще в 1924 г. А спустя 3 года, как отмечено нами выше, он уже нашел универсальные «соотношения Крамерса - Кронига», справедливые для любой среды безотносительно к конкретным механизмам дисперсии и поглощения. Крупные ученые знают: каждый научный результат можно развить, расширив область его применения. Примером такого расширения как раз и является работа М.Гелл-Манна, выполненная совместно с М.Гольдбергером и В.Тиррингом (1954): они перенесли соотношения Крамерса – Кронига из оптики в теорию рассеяния пионов ( $\pi$ -мезонов) на протонах и нейтронах. Точнее, экстраполировали из оптики в теорию рассеяния пионов на нуклонах теоретический подход, реализованный в соотношениях Крамерса – Кронига. В результате такого переноса (аналогии) в физике элементарных частиц и появился метод дисперсионных соотношений.

Д.В.Ширков, Б.В.Медведев и В.П.Павлов в статье «Теория квантованных полей» [6] пишут: «В 1954 г. был предложен метод дисперсионных соотношений – не прямой метод, не использующий для получения соотношений между физическими величинами ни динамического принципа, ни уравнений движения. В квантовую теорию поля его основную идею перенесли из физической оптики М.Гелл-Манн, М.Гольдбергер и В.Тирринг. Они обратили внимание на давно известный результат: из одной только причинности следуют определенные аналитические свойства для величин, описывающих волновые процессы. В квантовой теории поля такие следствия формулируются для матричных элементов матрицы рассеяния (для наблюдаемых величин) в терминах их аналитических свойств в комплексной плоскости энергетической переменной» [6, с.10].

Этот же вопрос обсуждает Э.И.Дубовой в книге «По следам невидимок» [7]: «В физике элементарных частиц дисперсия проявляется в зависимости вероятности рассеяния волн-частиц от энергии-частоты (напомним, что согласно квантовой механике частицы – это волны, а их энергии – это частоты), роль показателя преломления играет вероятность рассеяния как функция энергии. Действительно, частицы-волны рассеиваются на ядрах мишени и летят в разные стороны в зависимости от начальной энергии и вероятности рассеяния. Исходя из принципа причинности для вероятностей также выводятся формулы, связывающие вместе вероятности рассеяния при разных энергиях частиц по аналогии с формулой Крамерса-Кронига для показателя преломления» [7, с.125].

«В физике элементарных частиц, - добавляет автор, - дисперсионные соотношения впервые были предложены в 1954 году теоретиками В.Тиррингом, М.Гелл-Манном и М.Гольдбергером. Они записали дисперсионное соотношение для рассеяния фотонов и частиц с нулевым спином на нуклонах» [7, с.126].



Строгое доказательство первых дисперсионных соотношений (для пион-нуклонного рассеяния) было дано в 1956 г. Н.Н.Боголюбовым [8]. Кстати, в книге [8] авторы откровенно говорят, что результат Крамерса – Кронига послужил отправным пунктом (источником аналогии) для исследований М.Гелл-Манна и других ученых: «Заметим, что сами по себе дисперсионные соотношения отнюдь не являются в физике чем-то новым, и различные их виды были известны уже до создания квантовой теории поля. Еще в 1926-1927 гг. Крониг [1] и Крамерс [2] получили в классической электродинамике дисперсионное соотношение между вещественной и мнимой частями показателя преломления...» [8, с.8].

М.Гелл-Манн и его соавторы использовали также интегральную теорему Коши, о чем в книге [8] сообщается: «Первый вывод дисперсионных соотношений в формализме квантовой теории поля был предложен Гелл-Манном, Гольдбергером и Тиррингом, которые воспользовались теоремой Коши, установив предварительно должные аналитические свойства амплитуды рассеяния вперед» [8, с.16-17].

### **3. Аналогия третья: предположение о спиральности всех фермионов**

В 1958 г. на страницах одного из номеров журнала «Physical Review» появилась статья М.Гелл-Манна, подготовленная им совместно с Р.Фейнманом. В этой работе была предложена теория слабого взаимодействия, которая учитывала несохранение четности в этом взаимодействии, а также уточняла теорию  $\beta$ -распада Ферми. Итальянский физик Энрико Ферми считал, что в  $\beta$ -распаде (радиоактивном распаде атомов, в котором образуется нейтрино) реализуется векторное взаимодействие, то есть имеет место векторный ток. М.Гелл-Манн и Р.Фейнман уточнили, что в слабом взаимодействии мы имеем дело с сочетанием векторного (V) и аксиального (A) токов. В связи с этим теория, построенная М.Гелл-Манном



(совместно с Р.Фейнманом), получила название «V-A-теории». Добавим, что V-A форма тока, характеризующая слабые ядерные силы, была впервые понята М.Гелл-Манном, а не Р.Фейнманом.

Д.Гриббин и М.Гриббин в книге «Ричард Фейнман: жизнь в науке» [9] описывают момент возвращения Р.Фейнмана из Бразилии в США: «Возвращаясь из Рио, Фейнман поехал через Нью-Йорк и заглянул в Колумбийский университет, намереваясь обсудить последние экспериментальные результаты по проблеме слабого взаимодействия с  $W$  (она экспериментально доказала несохранение четности в этом взаимодействии – Н.Н.Б.). Ее там не оказалось. Но один из коллег объяснил Фейнману настоящее положение дел: по сути, это всё еще была путаница. Ко времени возвращения Фейнмана в Калтех Гелл-Манн уехал в отпуск, однако Ричард продолжал обсуждать эту задачу с экспериментаторами. Те согласились, что дела в полном хаосе. «Черт те что, - сказали они ему. - Мюррей говорит, что, может быть, бета-распад идет за счет V- и A-связи». Фейнмана словно током ударило» [9, с.161].

Важным шагом на пути создания правильной теории слабого взаимодействия (правильной V-A-теории) явилось понимание того, что все фермионы (частицы с полуцелым спином), участвующие в этом взаимодействии, должны быть спиральными. Впервые гипотеза о спиральности всех фермионов возникла у М.Гелл-Манна (а также Р.Фейнмана) накануне разработки V-A-концепции. Фактором, определившим рождение этой гипотезы, была аналогия со спиральностью нейтрино, которую теоретически предсказали сразу несколько исследователей: Т.Ли, открывший несохранение четности, А.Салам, который вскоре создаст электрослабую теорию, и Л.Д.Ландау, автор феноменологической теории сверхпроводимости. Можно сказать, что М.Гелл-Манн сформулировал гипотезу о спиральности частиц, участвующих в слабом взаимодействии, по аналогии с гипотезой Т.Ли, А.Салама и Л.Д.Ландау о спиральности нейтрино.

С.С.Герштейн в статье «От бета-сил к универсальному взаимодействию» [10] подчеркивает: «Гипотеза спирального нейтрино и стала той подсказкой, которая помогла найти универсальный закон слабого взаимодействия. Фейнман и Гелл-Манн предположили, что не только нейтрино (тогда считавшееся безмассовым), но и массивные частицы дают вклад в плотность энергии слабого взаимодействия своими левыми спиральными компонентами. В этом случае единственной возможностью для взаимодействия четырех фермионов остается произведение векторных токов, предложенное Ферми, за тем исключением, что входящие в них волновые функции заменяются их левыми спиральными проекциями. Такие произведения соответствуют суперпозиции векторного (V) и аксиального (A) токов, а сам закон получил название (V-A)-взаимодействия» [10, с.10].

Этот же факт рассматривается в статье С.С.Герштейна «Великий универсал XX века» [11], посвященной научной деятельности Л.Д.Ландау, одного из авторов гипотезы спирального нейтрино: «Идея спирального нейтрино **подказала** Фейнману и Гелл-Манну гипотезу о том, что, может быть, и все другие частицы (с ненулевой массой) участвуют в слабом взаимодействии, как и нейтрино, своими левыми спиральными компонентами» [11, с.20].

Ценность идеи о спиральном (двухкомпонентном, продольном) нейтрино с точки зрения инициирования идеи о спиральности всех фермионов, участников слабого взаимодействия, подчеркивается Б.М.Понтекорво в работе «Страницы развития нейтринной физики» [12]: «Важность продольного (безмассового) нейтрино и состоит в том, что оно указывает нам прототип поведения всех других (массивных) фермионов в слабом взаимодействии. Простое мнемоническое правило звучит так: при слабом взаимодействии все фермионы – левые, а все антифермионы – правые. Нейтриноподобное поведение фермионов – главное физическое содержание

известного универсального слабого взаимодействия V-A Фейнмана – Гелл-Манна...» [12, с.689].

Вот еще один источник. В.Г.Левич, Ю.А.Вдовин и В.А.Мямлин во 2-ом томе книги «Курс теоретической физики» [13] указывают: «Гелл-Манн и Фейнман [1] высказали гипотезу, что свойство спиральности имеет общий характер и является характеристикой всех фермионов, а не только нейтрино» [13, с.500].

Здесь [1] - Feynman R., Gell-Mann M. // Physical Review. – 1958. – Vol.109. – P.193.

#### **4. Аналогия четвертая: систематизация (классификация) элементарных частиц**

30 мая 1832 г. молодой французский математик Эварист Галуа написал письмо своему другу Огюсту Шевалье: «Я открыл в анализе кое-что новое. Некоторые из этих открытий касаются теории уравнений, другие – функций, определяемых интегралами. В теории уравнений я исследовал, в каких случаях уравнения разрешаются в радикалах, что дало мне повод углубить эту теорию и описать все возможные преобразования уравнения, допустимые даже тогда, когда оно не решается в радикалах. Из этого можно сделать три мемуара. Обратись публично к Якоби и Гауссу и попроси их высказать свое мнение, но не о верности теорем, а об их значении. Я надеюсь, что после этого найдутся люди, которые сочтут для себя полезным навести порядок во всей этой неразберихе» [14].

В тот же день, закончив писать, Э.Галуа участвовал в дуэли и получил ранение, от которого скончался на следующий день (в возрасте 20-ти лет). В приведенном письме он сообщал, что разработал новую математическую теорию – теорию групп. Рукопись с изложением этой теории он посылал крупным математикам своего времени О.Л.Коши и С.Д.Пуассону. Однако

первый, скорее всего, потерял ее, а второй дал не очень доброжелательный отзыв на работу Э.Галуа. Лишь в 1843 г. открытия Э.Галуа заинтересовали Ж.Лиувилля, а в 1870 г. вышел знаменитый «Трактат о подстановках» К.Жордана, содержащий первое систематическое изложение и развитие революционных идей Э.Галуа.

В 1867 г. К.Жордан показал, что математическая теория групп может быть эффективно использована в кристаллографии, при описании симметрии кристаллов [15]. Однако эти исследования, по-видимому, не были известны крупному астрофизику Джеймсу Джинсу, автору закона излучения «Рэля - Джинса». Он был уверен, что теория групп никогда не найдет применения в физике.

Фримен Дайсон в статье «Математика и физика» [16] пишет: «В 1910 г. математик Освальд Веблен и физик Джеймс Джинс пересматривали программу по математике Принстонского университета. Джинс сказал: «Вполне можно выбросить теорию групп; этот предмет никогда не найдет применения в физике». Неизвестно, возражал ли Веблен Джинсу или просто отстаивал теорию групп из чисто математических соображений. Известно только, что теорию групп продолжали изучать. <...> По иронии судьбы теория групп стала позднее одним из центральных звеньев теоретической физики и в настоящее время царит в мыслях тех, кто занимается исследованием фундаментальных частиц» [16, с.351].

Теория групп появилась в квантовой механике благодаря работам Юджина Вигнера (Нобелевская премия, 1963 г.), который использовал ее для классификации спектров многоэлектронных атомов в 1927-1928 годах. Целесообразность такого использования теории групп была подсказана ему Джоном фон Нейманом (1903-1957). М.И.Монастырский в очерке «Джон фон Нейман» [17] говорит о работах Ю.Вигнера: «В этих работах были впервые применены методы теории представлений групп (симметрической и ортогональной) для классификации спектров многоуровневых атомов. Как

вспоминал позднее Вигнер, эти статьи писал непосредственно он, но фон Нейман оказал ему неоценимую помощь, указав на работы Г.Фробениуса и И.Шура, которые содержат необходимый математический аппарат. Ценность такого рода советов в подобных общих задачах специалист, безусловно, оценит» [17, с.1376].

Наконец, рано или поздно ученые, специализирующиеся на физике элементарных частиц, должны были осознать аналогию между проблемами этой области физической науки и теми средствами, которые содержались в математической теории групп. Эту аналогию в свое время осознали М.Гелл-Манн и независимо от него израильский физик Ю.Нееман (1961). Им стало ясно, что множество элементарных частиц можно классифицировать на основе теории групп преобразований, созданной норвежцем Софусом Ли (1842-1899), который перенес групповые идеи Э.Галуа с алгебраических уравнений на уравнения дифференциальные.

Особенно ценной оказалась подгруппа трехмерной унитарной группы – группа  $SU(3)$ . Эта группа Ли также называется «группой трехмерных унитарных унимодулярных матриц». Группа  $SU(3)$  впервые привлекла внимание японских физиков М.Икеды, С.Огавы и др. (1958), но они применяли эту группу в модели строения адронов, предложенной С.Сакатой, которая не выдержала проверку временем. «...В 1961 г. М.Гелл-Манн и независимо Ю.Нееман, опираясь на предшествующие работы японских теоретиков С.Сакаты, его учеников М.Икеды, С.Огавы и И.Онуки, а также работавшего в США Дж.Сакураи, обнаружили подходящую группу глобальной симметрии – простую группу Ли унитарных унимодулярных матриц  $SU(3)$ . Впервые эта группа была исследована в связи с составной моделью Сакаты (с тремя фундаментальными барионами протоном, нейтроном и лямбда-частицей) в работе Икеды, Огавы и Онуки 1958 г.» [18, с.199].

Следует отметить, что в том интеллектуальном процессе, в котором М.Гелл-Манн переносил математическую теорию групп в физику элементарных частиц, а именно экстраполировал группу  $SU(3)$  в область систематизации этих частиц, не обошлось без использования метода проб и ошибок. Другими словами, та аналогия, на основе которой американский ученый считал возможным систематизировать частицы при помощи  $SU(3)$ , представляла собой одну из проб (попыток). И если бы эта проба не увенчалась успехом, М.Гелл-Манну пришлось бы искать другую группу симметрии, сохраняя веру в наличие связи между физикой и математикой.

Ю.Нееман в статье «Счастливым случаем, наука и общество: эволюционный подход» [19] пишет о «пробах и ошибках» М.Гелл-Манна: «Простая группа Ли – это множество непрерывных преобразований. Такова, например, группа вращений в обычном пространстве, известная в своей квантовой версии как группа  $SU(2)$ . Сама модель Янга-Миллса была создана на основе  $SU(2)$  с ее тремя параметрами – углами Эйлера.  $SU(3)$  – также простая группа Ли и имеет восемь параметров (отсюда и «восьмеричный путь»). Гелл-Манн первым попытался построить группу с четырьмя параметрами – и получил вращения плюс одну трансляцию, но не новую «простую» (т.е. неприводимую) группу. Гелл-Манн пошел дальше и попробовал построить группы с пятью параметрами (и получил вращения плюс две трансляции), шестью параметрами (либо два вращения, либо одно вращение и три трансляции) и дошел до группы с семью параметрами (два вращения плюс одна трансляция). Здесь у него пропал интерес, поскольку стало ясно, что не появилось никакой новой «простой» группы. И Гелл-Манн прекратил поиски» [19, с.81].

Далее Ю.Нееман указывает, что американскому физику помогла консультация с математиком Дж.Рака: «Вернувшись к проблеме через два года после консультации с этим математиком, Гелл-Манн понял, что ему следовало дойти до восьми параметров, тогда его ждала бы  $SU(3)$ » [19, с.81].

Аналогичные сведения о «пробах и ошибках» М.Гелл-Манна можно найти в книге Джима Бэгготта «Бозон Хиггса. От научной идеи до открытия «частицы Бога» [20]. Автор пишет, что М.Гелл-Манн начал поиск с варианта  $SU(2) \times U(1)$ , который был предложен Шелдоном Глэшоу в качестве основы теории, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия: «Гелл-Манна заинтриговала его теория  $SU(2) \times U(1)$ . Он начал понимать, каким образом можно расширить группу симметрии на более высокие размерности. Вдохновленный, он стал пробовать теории всё с большими и большими размерностями. Он пробовал три, четыре, пять, шесть и семь измерений, пытаясь найти структуру, которая не соответствовала произведению  $SU(2)$  и  $U(1)$ . «И тогда я сказал: «Всё, хватит!» [20].

Мы должны разделить радость М.Гелл-Манна, который спустя два года возобновил свои поиски и все-таки нашел (в восьмом пространственном измерении) группу  $SU(3)$ , которую положил в основу классификации адронов.

## **5. Аналогия пятая: теоретическое предсказание элементарной частицы под названием «омега-минус-гиперон»**

Первоначально М.Гелл-Манн считал, что фундаментом его классификации элементарных частиц должны быть семейства, состоящие из восьми частиц, по аналогии с существованием восьмимерного пространства, в котором может действовать математическая группа  $SU(3)$ . Но позже физики-экспериментаторы открыли частицу, которую нужно было включать в уже существующее семейство из восьми частиц. Однако такое «включение» ставило под сомнение гипотезу М.Гелл-Манна о том, что все частицы разбиваются на мультиплеты их восьми объектов, то есть девятая частица нарушала схему «восьмеричного пути», предложенную им. Следовало найти выход из сложившейся ситуации. И здесь М.Гелл-Манн вспомнил, что группа  $SU(3)$  может также действовать в десятимерном пространстве. Отсюда он



постулировал, что должны существовать семейства, состоящие из десяти частиц. После этого американский физик предсказал новую элементарную частицу, названную «омега-минус-гипероном», которая должна была стать «десятой» в том семействе, которое уже содержало девять частиц. Таким образом, М.Гелл-Манн предсказал существование омега-минус-гиперона и семейств, состоящих из десяти элементарных частиц, по аналогии с тем, что группа  $SU(3)$  может действовать в десятимерном пространстве.

И.М.Яглом в статье «Герман Вейль и идея симметрии» [21] описывает один из эпизодов научной жизни американского физика: «В 1961 г. М.Гелл-Манн присутствовал на конференции по физике элементарных частиц, на которой было объявлено об открытии еще одной частицы со свойствами, близкими к свойствам восьми уже известных частиц, не укладывающихся в схему «восьмеричного пути». Гелл-Манн сразу же заметил, что теперь частиц уже стало девять и что если добавить к ним еще одну, то получится семейство из десяти частиц, полностью соответствующее десятимерному пространству, в котором также может действовать группа  $SU(3)$ . Тут же он объявил, что должна существовать эта «десятая» частица – «омега-минус-барион», обладающая строго определенными свойствами. И в действительности в феврале 1964 г. американские экспериментаторы У.Фаулер и Н.Сеймиос, исходившие из предсказаний М.Гелл-Манна, открыли элементарную частицу, свойства которой в точности совпали с описанными Гелл-Манном свойствами «омега-минус-бариона» [21, с.24].

Обнаружение омега-минус-гиперона послужило важным аргументом в пользу того, что классификация частиц, разработанная М.Гелл-Манном, скорее всего, является верной. Как отмечает П.Халперн в книге «Квантовый лабиринт» [22], «в 1964 году исследователи из национальной лаборатории Брукхэйвена обнаружили предсказанную частицу, названную «омега-гиперон». Тем самым они заполнили модель и обеспечили важное

доказательство того, что гипотеза Гелл-Манна верна. Это был настоящий триумф приложения принципа симметрии к физике частиц» [22].

## **6. Аналогия шестая: гипотеза о том, что адроны состоят из кварков**

В 1964 г. М.Гелл-Манн сформулировал предположение о том, что все частицы, участвующие в сильных взаимодействиях и называемые адронами (или барионами), состоят из более фундаментальных частиц, обладающих дробным электрическим зарядом. Ученый окрестил их «кварками». Совершенно независимо и практически одновременно к такой же гипотезе пришел его соотечественник Джордж Цвейг (род. 1937 г.), который назвал упомянутые частицы «тузами», но этот термин не прижился в физике.

И вновь мы вынуждены констатировать, что гипотеза кварков появилась на свет благодаря аналогии: М.Гелл-Манн перенес в физику элементарных частиц идеи математической теории групп, а именно соображение о том, что группа  $SU(3)$  – это группа преобразований трехмерного пространства. Данное соображение наталкивало на мысль, что трем векторам трехмерного пространства, в котором действует группа  $SU(3)$ , должны соответствовать три частицы с дробными зарядами.

И.М.Яглом в той же статье «Герман Вейль и идея симметрии» [21] приводит ход рассуждений М.Гелл-Манна: «Но ведь группа  $SU_3$  – это группа преобразований трехмерного пространства; следовательно, она может действовать и в трехмерном пространстве. И Гелл-Манн смело указывает, что трем векторам такого трехмерного пространства должны отвечать три частицы с совсем уж фантастическими свойствами: так, например, заряд этих частиц должен равняться  $1/3$  заряда электрона (который всегда считался наименьшим из возможных зарядов!). Никто никогда не видел таких частиц, - но если они существуют, то они должны быть «самыми элементарными» из всех новых частиц (так как трехмерное пространство – простейшее из всех, в

которых может действовать группа  $SU_3$ , и все остальные пространства можно, в определенном смысле, построить из векторов трехмерного пространства)» [21, с.24-25]. Напрасно О.Л.Коши и С.Д.Пуассон отвергли математическую теорию групп Э.Галуа!

Конечно, гипотеза кварков также подсказывалась М.Гелл-Манну моделями строения частиц, предложенными его предшественниками: Э.Ферми, С.Сакатой и т.д. В 1949 г. Э.Ферми (совместно с Ч.Янгом) предложил модель, согласно которой истинно фундаментальными частицами являются нуклоны (протоны и нейтроны) и антинуклоны (антипротоны и антинейтроны). По мысли Э.Ферми, положительно заряженный пион – это комбинация протона и антинейтрона, а отрицательно заряженный пион – связка нейтрона и антипротона. В 1956 г. С.Саката развил подход Э.Ферми, предложив модель, в которой подлинно фундаментальные частицы – это протон (p), нейтрон (n) и лямбда-гиперон ( $\lambda$ ).

Еще раз отметим, что впервые группа  $SU(3)$  стала использоваться в рамках модели Сакаты. Джон Сакураи в монографии «Токи и мезоны» [23] сообщает: «Группа  $SU(3)$  [или  $U(3)$ ] была впервые введена в физику элементарных частиц в рамках симметричной модели Сакаты в 1960 г. (Икеда, Огава, Онуки; Весс; Ямагучи). В этой модели в качестве фундаментальных компонент выбираются физические частицы p, n,  $\lambda$ , из которых можно построить все адроны. Хотя модель Сакаты удовлетворительна для классификации мезонов, она непригодна для классификации барионов» [23, с.13].

Еитиро Намбу в книге «Кварки» [24] высоко оценивает вклад С.Сакаты в физику элементарных частиц: «Не будет преувеличением сказать, что в настоящее время теория элементарных частиц в значительной мере развивается по пути, предсказанному Сакатой» [24, с.98].

Разумеется, предсказывая кварки на основе аналогии между семействами частиц и математическими группами, М.Гелл-Манн понимал, что до момента

экспериментального подтверждения его гипотеза кварков будет оставаться плодом теоретических рассуждений. Поэтому в определенный период времени (до открытия кварка очарования в 1974 г. Б.Рихтером и С.Тингом) М.Гелл-Манн не был полностью уверен в справедливости своей гипотезы. Как отмечает Л.Краусс в книге «Почему мы существуем?» [25], «Гелл-Манн допускал, что его схема может быть всего лишь математической конструкцией, полезной для классификации, а на самом деле кварков не существует, и за этим термином не стоит реальных частиц» [25, с.312].

Аналогичные сведения можно найти в Нобелевской лекции Д.Д.Гросса «Открытие асимптотической свободы и появление КХД» [26, с.1308-1309].

## **7. Аналогия седьмая: идея о природе резонансов элементарных частиц**

В начале 1950-х годов в Чикагском университете (США) был запущен новый ускоритель элементарных частиц – синхротрон, энергия которого достигала 450 МэВ. Автором проекта был Энрико Ферми, который намеревался изучить процесс рождения пионов ( $\pi$ -мезонов) и свойства этих частиц. Бомбардируя пучками пионов различные мишени, Э.Ферми сделал неожиданное открытие: рассеяние пионов на протонах имеет резонансный характер. Резонансная природа рассеяния впервые была понята Кейтом Бракнером (1924-2014). Далек идущие выводы из этого открытия Э.Ферми сделал советский физик, лауреат Нобелевской премии, Игорь Евгеньевич Тамм, построивший теорию явления. И.Е.Тамм высказал идею о том, что при взаимодействии с пионом нуклон может переходить в возбужденное (изобарное) состояние, то есть в частицу, подобную нуклону, но более тяжелую и с большим разнообразием свойств: у изобары большой собственный момент и четыре зарядовых состояния (а не два, как у нуклона). В исследование резонансных (изобарных) состояний частиц И.Е.Тамм вовлек большое число молодых физиков. По его поручению В.И.Ритус построил

теорию фоторождения пионов на нуклонах, которая хорошо описывала полученные экспериментальные результаты. Этот успех В.И.Ритус резюмировал словами: «Правильность изобарной идеи Тамма была подтверждена» [27, с.194].

К сожалению, Л.Д.Ландау и И.Я.Померанчук скептически относились к этим исследованиям И.Е.Тамма и его сотрудников, полагая, что его идея о существовании резонансных (короткоживущих) частиц не соответствует физической реальности. Как указывает Е.Л.Фейнберг в очерке «Ландау и другие» [28], «Ландау высмеивал введение изобар, или резонансов, на равных правах с другими частицами, осуществленное Таммом при рассмотрении взаимодействия пионов с нуклонами в 1952 г.» [28, с.262].

Сегодня справедливость «изобарной» идеи И.Е.Тамма уже не подвергается сомнению, поскольку после 1952 г., когда Э.Ферми открыл нуклонный резонанс, названный  $\Delta$ -изобарой, было обнаружено огромное множество резонансных состояний частиц. Достаточно сказать, что открытый в 1974 г. Б.Рихтером и С.Тингом кварконий (чармоний), описываемый как связка кварка и антикварка, также является резонансным состоянием.

Д.В.Ширков в послесловии к книге Р.Фейнмана «Теория фундаментальных процессов» [29] пишет: «...В современной физике частиц резонансы играют очень важную, если не сказать – определяющую – роль. Число резонансных состояний (изотопических мультиплетов) почти в десять раз превышает число ядерно-стабильных адронных состояний. То, что 15 лет назад представлялось экзотическим исключением (к 1960 году был известен пион-нуклонный резонанс  $I = 3/2$ ) и не включалось в таблицы частиц, в наши дни составляет основной объект экспериментального исследования и является источником новых идей и глубоких качественных закономерностей. Достаточно напомнить здесь, что на основе первых, обнаруженных в начале 60-х годов, резонансов возникла модель унитарной SU(3) (или трехкварковой) симметрии, приведшая к предсказанию и открытию  $\Omega^-$  - гиперона со

странностью  $S = -3$ , а также концепция полюсов и траекторий Редже, связавшая в семейства стабильные адроны и резонансы... В наши дни обнаружение мезонных резонансных состояний  $J/\psi$  (3100) и  $\psi$  (3700) тесно связано с установлением нового квантового числа «очарования» (или «чарма») и соответствующей модификацией симметричных схем  $[SU(3) \rightarrow SU(4)]$  для адронов» [29, с.188].

Сказанное позволяет понять, почему в 1964 г. М.Гелл-Манн (совместно с А.Розенфельдом и Дж.Чу) обратился к проблеме резонансных состояний частиц и задался целью объяснить природу этих состояний. По-видимому, М.Гелл-Манн понял, что настало время попытаться пролить свет на поведение нестабильных (короткоживущих) частиц, называемых резонансами, используя уже имеющуюся в физике теоретическую и экспериментальную информацию. Как же М.Гелл-Манн объяснил природу резонансных состояний частиц? Он провел аналогию между свойствами этих резонансных (изобарных) частиц и свойствами классических акустических и электромагнитных резонаторов. Иначе говоря, он счел возможным перенести на элементарные частицы особенности так называемых резонансных мод акустических и электромагнитных резонаторов. После М.Гелл-Манна данную аналогию развивали отечественные физики Ф.А.Гареев, М.Ю.Барабанов и Г.С.Казаха.

В частности, в статье «Новая систематика спектра масс резонансных элементарных частиц» [30] они отмечают: «Чтобы понять, как нестабильная частица (резонанс) может сообщаться с несколькими открытыми каналами, мы сочли необходимым провести **аналогию** между поведением нестабильных частиц и резонирующих полостей, таких, как органые трубы, электромагнитные резонаторы. Здесь лишь укажем, что впервые на такую **аналогию** еще в 1964 году обратили внимание Чью, Гелл-Манн и Розенфельд [26]. В указанной работе они подробно обсуждали возможность представления резонансов элементарных частиц в виде резонирующих полостей в полной аналогии с нашим подходом» [30, с.20].

Сами М.Гелл-Манн, А.Розенфельд и Дж.Чу в статье «Сильно взаимодействующие частицы» [31] аргументируют: «Чтобы объяснить, каким образом нестабильная частица может находиться в коммуникации с несколькими открытыми каналами, полезно провести **аналогию** между поведением нестабильной частицы и свойствами резонансных полостей, таких, скажем, как органные трубы и электромагнитные резонаторы. Электромагнитные резонаторы (например, магнитные лампы, используемые в радарных устройствах) применяются в электронике с целью получения интенсивных электромагнитных волн необходимой частоты; эта частота как раз и является резонансной частотой резонатора» [31, с.707].

«Таким образом, - продолжают авторы, - резонансной энергии в физике частиц может быть сопоставлена резонансная частота акустического или электромагнитного резонатора. Но что является «резонатором» в физике частиц? Это уже примышляемая структура: один резонатор, обладающий специфическими свойствами для каждого набора квантовых чисел, сохраняющихся при сильных взаимодействиях. **Аналогия** между нестабильными частицами и резонансными модами электромагнитных резонаторов может быть продолжена. С электромагнитным резонатором можно соединить длинную трубу, называемую волноводом; волновод обладает тем свойством, что весьма эффективно передает электромагнитные волны высокой частоты, но почти не передает низкочастотных волн. Когда длина электромагнитных волн чуть превышает размеры волновода, то волновод «отказывается» передавать такие волны. В этом смысле волновод ведет себя, как канал частицы, открывающийся только для энергий, превышающих пороговую. Если резонатор соединен с несколькими волноводами разных размеров, высокочастотное излучение может втекать в резонатор через какой-то один волновод, а вытекать либо через тот же самый волновод, либо через другие волноводы. По **анalogии** с этим энергия может



поступать в ядерные взаимодействия через один канал и выходить наружу через один или несколько каналов» [31, с.707].

Далее М.Гелл-Манн и соавторы резюмируют: «...Привлекая внимание к сходному характеру явлений в двух, на первый взгляд, совершенно различных областях физики, нам хотелось показать единство физики как науки и тем самым избавиться от налета таинственности, возникающей при рассмотрении поведения частиц. Более существенное значение этой **аналогии** состоит, однако, в том, что она позволяет физикам-теоретикам осознать весьма глубокие обстоятельства, связанные с резонансами частиц, о которых мы не имеем возможности рассказать здесь» [31, с.709].

Любопытно, что описанная аналогия М.Гелл-Манна и его коллег сыграла роль одного из мотивирующих факторов для того, чтобы рассматривать Солнечную систему как волновую динамическую систему и вычислять спектр волновых частот этой системы. Другим мотивирующим фактором была, конечно, идея Э.Резерфорда и Н.Бора описывать атом водорода по аналогии с планетарной Солнечной системой. Ф.А.Гареев, Г.С.Казача и Ю.Л.Ратис в статье «Резонансы в субатомной физике и принципы подобия и размерности» [32] констатируют: «Первоначальная теория атома водорода, по существу, была построена Бором по **аналогии** с планетарной Солнечной системой и называлась «планетарная теория атома водорода». Это было стартовой точкой развития современной квантовой теории или «волновой механики» по старой терминологии. Наоборот, по **аналогии** с теорией водородоподобных атомов сейчас начинают рассматривать Солнечную систему как волновую динамическую систему [169]. При этом оказалось, что спектр волновых частот Солнечной системы можно представить в форме, напоминающей схему спектроскопических уровней водородоподобного атома. Концепция волнового резонанса Солнечной системы оказалась весьма успешной при описании ритмов астродинамики (подробности смотрите в [169]). Метод

**аналогии** очень широко и успешно применяется при исследовании самых разнообразных явлений» [32, с.153-154].

Здесь [169] – Чечельницкий А.М. Экстремальность, устойчивость, резонансность в астродинамике и космонавтике. – М.: «Машиностроение». 1980.

## **8. Аналогия восьмая: идея о целесообразности использовать теорию Янга-Миллса при разработке математического аппарата для описания гравитации**

В 1962 г. Р.Фейнман принял участие в научной конференции, которая состоялась в Варшаве (Польша). Эта конференция была посвящена обсуждению проблем гравитации. Р.Фейнман выступил с докладом, на котором рассказал о своих попытках описать гравитацию с помощью нового математического аппарата, разработанного им в квантовой электродинамике, - метода континуального интегрирования (метода интегрирования по траекториям). Использовалась также изобретенная им диаграммная техника – графическое представление уравнений, описывающих взаимодействие субатомных частиц. Р.Фейнман рассуждал: если интеграл по траекториям (путям) работает для электромагнетизма, то почему бы не приложить его к гравитации? Справедливости ради отметим, что впервые о таком приложении задумался Виктор Вайскопф: именно он посоветовал Р.Фейнману распространить диаграммную технику и метод континуального интегрирования на проблемы, изучаемые общей теорией относительности А.Эйнштейна (релятивистской теорией гравитации).

Однако когда Р.Фейнман принялся вычислять в теории гравитации квантовые поправки (диаграммы с петлями) по аналогии с процедурой вычисления этих поправок в электродинамике, он получил неудовлетворительные результаты. Такие вычисления были очень

трудоемкими. И тут существенную роль сыграл М.Гелл-Манн, знакомый с калибровочной теорией Янга-Миллса. В этой теории Ч.Янг и Р.Миллс использовали идею локальных калибровочных симметрий, взятую из работ Г.Вейля (1929), пытавшегося объединить гравитацию с электромагнетизмом. Теорию Янга-Миллса критиковал В.Паули, поскольку она предсказывала существование мультиплета заряженных частиц, не обладавших массой, но возникшая позже концепция спонтанного нарушения симметрии показала, как эти частицы приобретают массу, и проблема была снята.

По сути дела, М.Гелл-Манн, посоветовавший Р.Фейнману начать работать с теорией Янга-Миллса, приблизил момент, когда ученые осознали необходимость переноса этой теории в область описания сильных (ядерных) взаимодействий, а также в электрослабую концепцию. Последняя – это теория, объединяющая электромагнетизм и слабые взаимодействия (данная теория была построена С.Вайнбергом, Ш.Глэшоу и А.Саламом). Кроме того, М.Гелл-Манн приблизил момент, когда физики-теоретики Л.Д.Фаддеев и В.Н.Попов нашли способ квантования полей Янга-Миллса, а нидерландский исследователь Г.Хоофт доказал перенормируемость электрослабой концепции. Мы можем сказать, что М.Гелл-Манн обнаружил аналогию между математическими трудностями, с которыми столкнулся Р.Фейнман, распространяя диаграммную технику в теорию гравитации, и теми математическими средствами, которые содержались в теории Янга-Миллса. Исходя из этого, он рекомендовал Р.Фейнману обратить внимание на эту теорию, которую несправедливо забраковал В.Паули.

Выполняя совет своего коллеги, Р.Фейнман стал искать процедуру квантования полей Янга-Миллса. Он нашел такую процедуру (метод) для однопетлевого приближения, то есть для однопетлевых диаграмм. В 1967 г. Л.Д.Фаддеев и В.Н.Попов, обобщая приемы Р.Фейнмана, разработали метод квантования полей Янга-Миллса для произвольного петлевого порядка. Они применили метод введения фиктивных частиц («духов Фаддеева - Попова») по

аналогии с тем, как ранее этот метод фиктивных частиц использовался Р.Фейнманом в работе с теорией Янга-Миллса. Наконец, ассимилируя приемы и идеи Л.Д.Фаддеева и В.Н.Попова, физик-теоретик Г.Хоофт математически строго доказал перенормируемость теории Вайнберга – Салама – Глэшоу, получив за это в 1999 г. Нобелевскую премию по физике. А началом этих исследований, как отмечено выше, послужил совет М.Гелл-Манна (данный Р.Фейнману) избавиться от математических трудностей путем использования теории Янга-Миллса как упрощенной модели для гравитации.

На этом пути Р.Фейнман не построил квантовую теорию гравитации (она не создана до сих пор), но зато обеспечил успех исследований, завершившихся изобретением процедуры перенормировки в электрослабой концепции. А это, согласитесь, тоже достижение.

Л.Д.Фаддеев в очерке «Моя жизнь среди квантовых полей» [33] вспоминает: «...Фейнман занялся теорией Эйнштейна под влиянием В.Вайскопфа, который предложил ему посмотреть, как диаграммные методы работают в теории Эйнштейна. Фейнман быстро вывел все известные эффекты классической теории гравитации на основании диаграмм без петель и стал искать квантовые поправки по аналогии с электродинамикой. К своему недоумению он получил неудовлетворительный результат. Счет с полем тяготения очень громоздок. И М.Гелл-Манн, компаньон Фейнмана в Пасадене, посоветовал ему потренироваться на бессмысленной с физической точки зрения, но более удобной с технической точки зрения модели Янга-Миллса» [33, с.14].

Об этом же пишет Г.Хоофт в книге «Избранные лекции по математической физике» [34]: «Когда Ричард Фейнман исследовал загадки квантования гравитации [8], он вновь использовал теорию Янга-Миллса. <...> Именно Гелл-Манн предложил Фейнману исследовать вместо гравитации теорию Янга-Миллса, поскольку это проще, тем более что Фейнмана беспокоила неабелева природа симметрии, а система Янга-Миллса этим

качеством обладала. Фейнман выяснил, что для восстановления унитарности этой теории надо добавить к правилам Фейнмана фиктивные компоненты. Он называл их «духами» и не смог выйти за пределы однопетлевых диаграмм» [34, с.9-10].

## **9. Аналогия девятая: разработка алгебры адронных токов**

В том же 1962 г., когда Р.Фейнман доложил на конференции в Варшаве о своих попытках проквантовать гравитационные поля, М.Гелл-Манн заложил основы алгебры адронных токов – теории, в которой изучаются одновременные коммутационные соотношения для токов, участвующих в слабых и электромагнитных взаимодействиях адронов. Алгебра токов – это система перестановочных соотношений между компонентами различных локальных токов в один и тот же момент времени. Она была сформулирована М.Гелл-Манном в качестве эвристического утверждения (смелой гипотезы) до появления современной теории ядерных взаимодействий (квантовой хромодинамики) и теории, объединяющей электромагнетизм и слабые ядерные силы. Алгебра токов дала возможность получить ряд соотношений, допускающих непосредственное сравнение с опытом. Эти соотношения носят характер правил сумм (предсказаний для интегралов от наблюдаемых сечений). Как ни удивительно, после создания квантовой хромодинамики (КХД) алгебра токов сохранила свое значение, оставаясь надежным способом описания взаимодействий адронов при низких энергиях.

Ключевое предположение, сформулированное М.Гелл-Манном на стадии формирования алгебры токов, состояло в следующем: хотя симметрия адронов нарушена, тем не менее, адронные токи, участвующие в слабом и электромагнитном взаимодействии, удовлетворяют тем же коммутационным соотношениям, которым они удовлетворяли бы и в случае точной симметрии [35, с.5].

В общем случае можно сказать, что алгебра адронных токов была создана по аналогии с алгеброй операторов, которая давно использовалась в квантовой механике. Л.Мишель и М.Шааф в монографии «Симметрия в квантовой физике» [36] отмечают: «...Физики всё же предпочитают считать алгебру токов гипотезой. Им нравится **аналогия** с квантовой механикой, которая выражается алгеброй операторов  $p$  и  $q$  в данный момент времени (т.е. алгеброй Ли группы Гейзенберга)» [36, с.107].

Этот же вопрос (вопрос о том, что М.Гелл-Манн основывался на аналогии с алгеброй операторов «старой» квантовой механики) рассматривают С.Трейман, Р.Джекив и Д.Гросс в «Лекциях по алгебре токов» [37]: «...Блестяще развив идеи операторной квантовой механики, Гелл-Манн предложил [1] свою знаменитую алгебру зарядов, обобщенную затем на локальную алгебру плотностей зарядов и токов» [37, с.68].

А различные правила сумм, сформулированные в алгебре токов, могут рассматриваться как обобщение на элементарные частицы того правила сумм, которое называется «соотношением Томаса – Рейхе - Куна» и которое широко применялось в той же квантовой механике. В. Де Альфаро, С.Фубини и др. в книге «Токи в физике адронов» [38] констатируют: «Рассматривая одночастичные матричные элементы зарядовых плотностей в пределе бесконечно большого импульса, можно получить большой набор дисперсионных правил сумм. Эти правила сумм могут рассматриваться как естественное **обобщение** на элементарные частицы соотношения Томаса – Рейхе – Куна. **Аналогия** станет еще более очевидной, если мы вспомним, что старое правило сумм базировалось на фундаментальном коммутаторе квантовой механики  $[p, q]$ ; новые же дисперсионные правила сумм опираются на коммутаторы между токами, которые считаются «наблюдаемыми» в теории частиц. Дисперсионные правила сумм дают общие соотношения между различными видами экспериментальных данных, а также позволяют выводить

интересные соотношения между массами и константами связи различных частиц» [38, с.16].

Эта же аналогия не ускользнула от внимания авторов работы [37], которые сообщают: «Хорошо известно, что нерелятивистский коммутатор Гейзенберга между импульсом  $p$  и координатой  $q$ ,  $I [p, q] = 1$ , не зависит от явного вида лагранжиана и приводит к не зависящим от взаимодействия точным результатам типа Томаса – Райхе - Куна [3]. Точно так же и в релятивистской динамике должны существовать не зависящие от вида взаимодействия соотношения, дающие физическую информацию без явного решения теории. Развитие этих идей и привело к алгебре токов...» [37, с.68].

### **10. Ошибался ли М.Гелл-Манн, используя метод аналогии?**

Интеллектуальная стратегия под названием «аналогия» является весьма продуктивным инструментом порождения нового научного знания, но иногда она может приводить к неверным заключениям. Иначе говоря, при всей своей плодотворности аналогия как процедура не может быть неким универсальным алгоритмом, который всегда гарантирует правильное решение. Поэтому неудивительно, что в творчестве М.Гелл-Манна можно найти идеи, возникшие на базе этой процедуры, но не получившие экспериментального подтверждения. Одной из таких идей является его гипотеза о существовании «глобальной симметрии» (аналогичную гипотезу сформулировал американский физик, лауреат Нобелевской премии 1965 г., Д.Швингер, который, разумеется, тоже ошибся). В 1957 г. М.Гелл-Манн (и независимо Д.Швингер) предположил, что сильные взаимодействия обладают более фундаментальной симметрией, чем зарядовая независимость (изотопическая инвариантность). Эта гипотеза стимулировалась рассуждениями Ю.Вигнера о существовании аналогии между электрическим и барионным зарядами. Также она мотивировалась идеей Ю.Вигнера об аналогии между сохранением



электрического заряда и сохранением барионного заряда. Однако, как впервые показали Абрахам Пайс и Джон Сакураи, гипотеза М.Гелл-Манна о «глобальной симметрии» расходится с эмпирическими данными.

Описание этой гипотезы М.Гелл-Манна можно найти в монографии С.Швебера «Введение в релятивистскую квантовую теорию поля» [39]: «...Гелл-Манн [313] и Швингер [723] предложили разделить сильные взаимодействия на два класса: взаимодействия промежуточной силы, состоящие из К-мезон-барионных взаимодействий, и очень сильные, или  $\pi$ -мезонные, взаимодействия. В соответствии со свойством, присущим известным взаимодействиям (чем сильнее взаимодействие, тем большим числом симметрий оно обладает), Гелл-Манн и Швингер независимо постулировали более глубокое, чем зарядовая независимость, свойство симметрии для очень сильных взаимодействий, которое они назвали «глобальной симметрией. Глобальная симметрия означает, что если пренебречь  $\pi$ -мезонными взаимодействиями, то барионы будут образовывать вырожденный мультиплет, все члены которого имеют одну и ту же массу и одинаковые взаимодействия с  $\pi$ -мезонами» [39, с.285].

Далее автор пишет о том, какая аналогия заставила М.Гелл-Манна и Дж.Швингера выдвинуть гипотезу «глобальной симметрии»: «...Мы сделаем два замечания о сильных взаимодействиях. Первое из них относится к мотивировке попыток ввести «глобальное» взаимодействие, а второе касается ограничений такой схемы. Происхождение этой мотивировки связано с замечанием Вигнера [861] об **аналогии** между электрическим и барионным зарядами и об **аналогии** между сохранением электрического заряда и сохранением барионного заряда (т.е. сохранением числа тяжелых частиц). Вигнер высказал мысль, что мезонное поле играет такую же роль по отношению к барионному заряду, какую играет электромагнитное поле по отношению к электрическому заряду. Иначе говоря, точно так же, как электромагнитное поле «приводит к различиям» между электрически

заряженными и нейтральными частицами, мезонное поле приводит к различиям между барионами и «легкими» частицами и непосредственно взаимодействует только с барионами. Проводя эту **аналогию** дальше, мы могли бы ожидать, что как при электромагнитных взаимодействиях, при которых все частицы с одинаковым зарядом взаимодействуют одним и тем же образом с электромагнитным полем, взаимодействия всех барионов с мезонным полем в точности одинаковы (если не считать различий в знаке). Глобально симметричную схему Гелл-Манна и Швингера можно рассматривать как реализацию этих замечаний Вигнера» [39, с.286].

Здесь [313] – Gell-Mann M. // Physical Review. – 1957. – Vol.106. – P.1296.

[723] – Schwinger J. // Annals of Physics. – 1957. – Vol.2. – P.407.

[861] – Wigner E.P. // PNAS. – 1952. – Vol.38. – P.449.

## 11. Заключение

Современная нейробиология, используя такие эффективные методы визуализации мозга, как функциональная магнитно-резонансная томография (ФМРТ) и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), уже приступила к исследованию нейронных механизмов мышления. Ставится задача выяснить, каким образом активность ансамблей нервных клеток (нейронов) головного мозга определяют нашу способность к творчеству, в том числе к созданию новых научных идей. Учитывая важную роль аналогии как метода творческого преобразования имеющейся информации, автор этих строк склоняется к заключению, что в основе мыслительной операции аналогии лежит процесс фазовой и амплитудно-фазовой синхронизации удаленных нейронов. Повторим аргументы, изложенные нами в статье [40]. Известно, что знания, которыми мы владеем, размещаются в разных областях мозга, соответственно, в разных (удаленных друг от друга) ансамблях нейронах. При реализации аналогии мозг, как правило, обнаруживает сходство между «далекими» по

содержанию идеями, то есть выявляет связь между ними. Правило обучения Д.Хебба, которое часто формулируется как «возбуждаемся вместе – связаны вместе», относится к близко расположенным нейронным группам, поэтому не может быть нейронным коррелятом феномена аналогии. Диффузное распространение нейромедиаторов от клетки к клетке является слишком медленным процессом, поэтому тоже не может объяснить ассоциативность нашего мышления. Высокой скоростью обладает лишь фазовая синхронизация импульсной активности нервных клеток. Это говорит о том, что лишь фазовая синхронизация удаленных нейронных ансамблей, хранящих разные идеи (знания), может быть реальным механизмом мышления, основанного на аналогиях. И, скорее всего, именно эта синхронизация (в сочетании с большим багажом физических знаний) обеспечила творческую продуктивность М.Гелл-Манна.

### **Литература:**

1. Иваненко Д., Старцев А. Классификация элементарных частиц // Успехи физических наук. – 1960. - Том 72. - № 4. – С.765-798.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Том 2. Физика элементарных частиц. – М.: «Энергоатомиздат», 1993. – 408 с.
3. Сафаров Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с.
4. Гончарова Н.Г., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Частицы и атомные ядра. Задачи с решениями и комментариями. – М.: «Физматлит», 2013. – 448 с.
5. Гейзенберг В. Квантовая теория и ее интерпретация // сборник «У истоков квантовой теории». – М.: изд-во «Тайдекс Ко», 2004. – С.20-33.
6. Ширков Д.В., Медведев Б.В., Павлов В.П. Теория квантованных полей // сборник «Развитие физики в СССР». Книга 1. – М.: «Наука», 1967. - С.3-18.
7. Дубовой Э.И. По следам невидимок. – М.: «Знания», 1985. – 191 с.

8. Боголюбов Н.Н., Медведев Б.В., Поливанов М.К. Вопросы теории дисперсионных соотношений. – М.: «Физматгиз», 1958. – 203 с.
9. Гриббин Д., Гриббин М. Ричард Фейнман: жизнь в науке. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 288 с.
10. Герштейн С.С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа. – 2010. - № 1. – С.3-14.
11. Герштейн С.С. Великий универсал XX века // Природа. – 2008. - № 1. – С.15-33.
12. Понтекорво Б.М. Страницы развития нейтринной физики // Успехи физических наук. – 1983. – Том 141. - № 4. – С.675-709.
13. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Том 2. – М.: «Наука», 1971. – 936 с.
14. Ротман Т. Короткая жизнь Эвариста Галуа // В мире науки. – 1983. - № 1. – С.84-93.
15. Стюарт И. Укрощение бесконечности. История математики от первых чисел до теории хаоса. – М.: изд-во «Манн, Иванов и Фербер», 2019. – 448 с.
16. Дайсон Ф. Математика и физика // Успехи физических наук. – 1965. - Том 85. - № 2. – С.351-364.
17. Монастырский М.И. Джон фон Нейман // Успехи физических наук. – 2004. - Том 174. - № 12. – С.1371-1380.
18. Визгин В.П. О двух программах синтеза фундаментальной физики XX в. // Управление наукой: теория и практика. – 2021. – Том 3. - № 2. – С.185-210.
19. Неeman Ю. Счастливый случай, наука и общество: эволюционный подход // Путь. – 1993. - № 4. – С.70-90.
20. Бэгготт Дж. Бозон Хиггса. От научной идеи до открытия «частицы Бога». – М.: «Центрполиграф», 2014. – 255 с.
21. Яглом И.М. Герман Вейль и идея симметрии // Вейль Г. Симметрия. Издание 3-е. – М.: изд-во «ЛКИ», 2007. – С.5-32.

22. Халперн П. Квантовый лабиринт. Как Ричард Фейнман и Джон Уилер изменили время и реальность. – М.: «Эксмо», 2017. – 352 с.
23. Сакураи Дж. Токи и мезоны. – М.: «Атомиздат», 1972. – 168 с.
24. Намбу Е. Кварки. На переднем крае физики элементарных частиц. – М.: «Мир», 1984. – 225 с.
25. Краусс Л. Почему мы существуем? – М.: «Альпина нон-фикшн», 2019. – 420 с.
26. Гросс Д.Д. Открытие асимптотической свободы и появление КХД // Успехи физических наук. – 2005. – Том 175. - № 12. – С.1306-1318.
27. Ритус В.И. Двадцать близких лет // сборник «Воспоминания о И.Е.Тамме». Под ред. Е.Л.Фейнберга. – М.: «Наука», 1986. - С.192-197.
28. Фейнберг Е.Л. Ландау и другие // сборник «Воспоминания о Л.Д.Ландау». Под ред. И.М.Халатникова. – М.: «Наука», 1988. – С.253-267.
29. Ширков Д.В. Послесловие редактора // Фейнман Р. Теория фундаментальных процессов. – М.: «Наука», 1978. – С.187-189.
30. Гареев Ф.А., Барабанов М.Ю., Казача Г.С. Новая систематика спектра масс резонансных элементарных частиц // Препринт ОИЯИ Р2-97-292. – Дубна: 1997. – 22 с.
31. Гелл-Манн М., Розенфельд А., Чу Дж. Сильно взаимодействующие частицы // Успехи физических наук. – 1964. – Том 83. - № 4. – С.695-727.
32. Гареев Ф.А., Казача Г.С., Ратис Ю.Л. Резонансы в субатомной физике и принципы подобия и размерности // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1996. - Том 27. - № 1. - С.97-172.
33. Фаддеев Л.Д. Моя жизнь среди квантовых полей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Физико-математические науки». – 2014. - № 3. - (201). - С.9-19.
34. Хоофт Г. Избранные лекции по математической физике. - Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 228 с.

35. Адлер С., Дашен Р. Алгебры токов и их применение в физике частиц. – М.: «Мир», 1970. – 435 с.
36. Мишель Л., Шааф М. Симметрия в квантовой физике. – М.: «Мир», 1974. – 251 с.
37. Трейман С., Джекив Р., Гросс Д. Лекции по алгебре токов. – М.: «Атомиздат», 1977. – 232 с.
38. Де Альфаро В., Фубини С., Фурлан Г., Росетти К. Токи в физике адронов. – М.: «Мир», 1976. – 670 с.
39. Швебер С. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. – М.: изд-во иностранной литературы, 1963. – 842 с.
40. Новиков Н.Б. Нейроны аналогии – это нейроны памяти, возбуждающиеся на основе фазовой синхронизации. Часть 1 // Аллея науки. – 2021. – Том 1. - № 10 (61). - С.94-115.