

УДК 001

*А.В. Хмелев*

### **Квантовая теория поля: история триумфов, кризисов и великих идей**

#### **Аннотация:**

Показана эволюция квантовой теории поля от зарождения до создания квантовой хромодинамики. Рассмотрены ключевые этапы развития теории: создание квантовой электродинамики, проблема бесконечностей, доминирование альтернативных программ, появление кварковой модели и введение цвета. Особое внимание уделено открытию «нуль-заряда» Ландау, появлению Неабелевых калибровочных теорий Янга-Миллса, методу квантования Фадеева-Попова, доказательству перенормируемости Хоофта и открытию асимптотической свободы Гроссом, Вильчеком и Политцером. Каждый этап эволюции теории сопровождался открытиями, которые несли в себе как потенциал для общественного блага, так и угрозы.

**Ключевые слова:** физика высоких энергий, физика элементарных частиц, ядерная физика, квантовая теория поля, квантовая электродинамика, квантовая хромодинамика.

**Об авторе:** Хмелев Александр Васильевич, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), младший научный сотрудник Лаборатории информационных технологий; Государственный университет «Дубна», аспирант кафедры фундаментальных проблем физики микромира; эл. почта: [xmelev@jinr.ru](mailto:xmelev@jinr.ru)

Сегодня трудно представить мир без технологий, рожденных квантовой физикой. Лазеры, транзисторы, магнитно-резонансный томограф – все это плоды исследований микромира. Однако не менее основательна и другая революция – создание квантовой теории поля (далее – КТП), которая описывает взаимодействие элементарных частиц, лежащих в основе устройства материи. От первых работ Дирака по квантованию электромагнитного поля до современной квантовой хромодинамики (КХД) – теории сильных взаимодействий, КТП прошла целый путь, полный кризисов, парадоксальных открытий и триумфальных прорывов.

Каждый этап этого пути имел не только теоретическое, но и прикладное значение. Квантовая электродинамика (КЭД), подтвержденная опытами Лэмба и Куша, подарила метод перенормировок, который сегодня имеет применение в физике конденсированного состояния для расчета свойств новых материалов. Осознание «Нуль-заряда» и последовавший отказ от полевого подхода способствовали созданию альтернативных программ, которые в свою очередь привели к созданию кварковой модели – основы для понимания спектра адронов, что важно для интерпретации данных с ускорителей, используемых в медицине. Наконец, появление КХД с асимптотической свободой и конфайнментом не только смогло объяснить, почему кварки не существуют в свободном виде, но и дало инструменты для моделирования кварк-глюонной плазмы – явления, которое помогает разрабатывать новые подходы в гидродинамике.

Эволюция КТП поднимает острые этические и социальные вопросы. Каждое фундаментальное открытие в физике высоких энергий несло в себе потенциал как для блага, так и для угрозы. Как общество может избежать рисков? Вся эта история выступает модельным примером того, как научное сообщество проходит через глубокие кризисы, сменяет парадигмы, борется с внутренними противоречиями и в конце концов меняет само представление о реальности. Это чистый материал для лаборатории гуманитарного знания, позволяющей изучать механизмы научного творчества, роль авторитетов, кризисов и случайных открытий. Понимание того, как развивалась эта теория, необходимо не только физикам, но и философам науки, историкам, социологам и даже политикам, принимающим решения о финансировании фундаментальных исследований.

### **Зарождение квантовой теории поля**

После создания матричной механики (Гейзенберг, Борн, Йордан, 1925) и волновой механики (Шредингер, 1926) Борн, Гейзенберг и Йордан в 1926 г. в работе «Квантовая механика. II» (Zur Quantenmechanik II) показали, что свободное электромагнитное поле можно формально представить как совокупность независимых гармонических осцилляторов и подвергнуть процедуре квантования [6]. Однако они не рассмотрели взаимодействие поля с материей. В 1927 г. П.А. М. Дирак в работе «Квантовая теория излучения и поглощения» (The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation) [7] развил эту идею: он не только проквантовал электромагнитное поле как набор осцилляторов, но и ввел операторы рождения и уничтожения фотонов, заложив основы квантовой электродинамики (КЭД). Дирак показал, как описывать спонтанное и

вынужденное излучение в единой схеме. Хотя он и мыслил с позиции своего времени, рассматривая фотоны как частицы, а вакуум как состояние содержащее бесконечное число таких частиц с нулевой энергией и импульсом, сама идея квантования поля возникла у него как способ описания рождения и уничтожения этих частиц [7, с. 260-261]. Именно этот формализм впоследствии привел к формированию онтологической картины, в которой поле первично, а частицы выступают его квантами.

В 1928 г. Поль Дирак предпринял решающий шаг к объединению квантовой механики со специальной теорией относительности, выведя знаменитое уравнение Дирака [8]. Это уравнение не только описывало электрон релятивистски, но и предсказывало существование у него спина, который ранее в теорию приходилось добавлять нарочно. Однако из этого уравнения следовало, что вместе с решениями, описывающими частицу с положительной энергией, существовали решения с отрицательной энергией, что создавало серьезную физическую проблему. Согласно квантовой механике, в состоянии с положительной энергией электрон мог бы непрерывно излучать энергию, переходя во все более глубокие состояния с отрицательной энергией. Для того, чтобы разрешить этот парадокс, Дирак в 1930 г. выдвинул предположение о том, что так называемый вакуум – не пустота, а состояние, в котором все уровни с отрицательной энергией уже заполнены электронами, а при переходе электрона с отрицательного уровня на положительной возникает дырка – частица с положительной массой и положительным электрическим зарядом [9]. В 1932 г. Карлом Андерсоном был открыт позитрон – античастица электрона. Открытие стало блестящим подтверждением теории Дирака и ввело в физику понятие антивещества. В 1933 г. Дирак совместно со Шредингером был удостоен нобелевской премии «За открытие новых продуктивных форм атомной теории».

Параллельно с развитием релятивистской квантовой механики формировался математический аппарат, способный описывать системы с переменным числом частиц, который впоследствии стал называться методом вторичного квантования. Решающий шаг был сделан в 1928 г. Вигнером и Йорданом, которые обобщили формализм, введя операторы рождения и уничтожения для фермионов, которые удовлетворяют антикоммутиационным соотношениям [21]. В 1929-1930 гг. Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули использовали эти идеи для создания общей релятивистски инвариантной формулировки квантовой электродинамики, а в 1932 г. Дирак сформулировал свой подход [19].

В 1934 г. Энрико Ферми построил первую последовательную квантовую теорию  $\beta$ -распада, применив формализм вторичного квантования, который по его собственному признанию аналогичен теории излучения Дирака [12]. Значение работы Ферми выходило за рамки описание конкретного ядерного процесса. Она продемонстрировала универсальность квантовополевого языка, показав, что одна и та же математическая схема применима и к электромагнитным, и к слабым взаимодействиям. Это был важный шаг будущей универсальности. Уже на этом этапе в академической среде проявились расхожимости, которые станут центральными в последующие десятилетия.

### **Проблема бесконечностей и ранний кризис 1930-1940-х гг.**

Уже в первых вычислениях в рамках КЭД 1930-х гг. физики столкнулись с фундаментальной трудностью. Такая величина, как собственная энергия электрона оказывалась бесконечной. При ее вычислении по теории возмущений возникали расходящиеся интегралы – такие бесконечности еще называли ультрафиолетовыми расхожимостями. В поисках выхода физики прибегали к процедуре обрезания, которая была предложена Гейзенбергом в 1938 г. Суть заключалась в том, чтобы искусственно ввести предельную длину или энергию, за пределами которой теория переставала действовать. Однако такой подход порождал проблему зависимости от произвольно выбранного обрезания.

Многие физики того времени, такие как Поль Дирак, Вернер Гейзенберг, Вольфганг Паули относились к КТП со скептицизмом. Для них расхожимости были не просто технической неприятностью, а более глубокой неполнотой теории. Таким образом, к концу 1940-х гг. КЭД, несмотря на свои впечатляющие успехи в описании некоторых эффектов, находилась в состоянии глубокого кризиса. Расхожимости ставили под сомнение саму возможность построения локальной квантовой теории поля. Многие физики, особенно в СССР, были готовы окончательно отказаться от КТП.

### **Триумф КЭД**

Все изменили два экспериментальных результата, полученные в 1947 г. Уиллис Лэмб и его аспирант Роберт Ризерфорд в колумбийском университете поставили задачу измерить тонкую структуру спектра водорода. Результат оказался сенсационным, поскольку отличался от предсказаний теории Дирака, уровни  $2S_{1/2}$  и  $2P_{1/2}$  не были вырождены. Разница энергий составила около 1000 МГц. Это небольшое расщепление получило название лэмбовского сдвига. Статья Лэмба и Резерфорда «Тонкая структура

атома водорода, измеренная микроволновым методом» (Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method) была опубликована 1 августа 1947 г. в журнале Physical Review и сразу вызвала огромный резонанс [22]. В июле 1947 г. на острове Шелтер была проведена конференция «Остров Шелтер» (The Shelter Island Conference) посвященная основам квантовой механики. Это собрание стало поворотным моментом в истории физики. Среди участников были Ханс Бете, Ричард Фейнман, Джулиан Швингер, Исидор Раби, Джон Фон-Нейман и другие ведущие физики того времени. Многие из присутствовавших там теоретиков сразу поняли, что лэмбовский сдвиг связан с проблемой собственной энергии электрона, которая порождает бесконечности в КЭД.

Почти одновременно с измерениями Лэмба были получены данные об аномальном магнитном моменте электрона. В 1947 г. Поликарп Куш и его сотрудники в колумбийском университете измерили магнитный момент электрона с высокой точностью и обнаружили, что его значение превышает предсказание уравнения Дирака.

Легендарный эпизод, который стал символом нового подхода, произошел сразу после конференции на острове Шелтер. Ханс Бете, возвращаясь поездом в Нью-Йорк, за одну поездку провел нерелятивистский расчет лэмбовского сдвига, используя идею перенормировки массы, предложенную Гансом Краммерсом [5]. Идея заключалась в том, что бесконечная собственная энергия электрона не должна наблюдаться непосредственно. Вместо этого она перенормируется в наблюдаемую массу электрона. Остается лишь разность между собственной энергией электрона в связанном состоянии и в свободном. Бете ввел обрезание на верхнем энергетическом пределе и получил значение сдвига, которое удивительно хорошо согласовалось с экспериментом.

Существуют, однако, и предположения, что первым, кто открыл этот сдвиг был вовсе не Лэмб. Уже в 1938 г. Дмитрий Иванович Блохинцев подготовил к печати работу «Смещение спектральных линий, вызванное обратным действием поля излучения», которая была представлена на семинаре Физического института академии наук (ФИАН) СССР, а после направлена в редакцию журнала экспериментальной и теоретической физики «ЖЭТФ». Редакцией работа была отклонена и опубликована только в 1958 г. в сборнике научных работ и статей Д. И. Блохинцева в Дубне [1]. По этой причине вышло так, что именем Лэмба был назван эффект, в том числе за который он был удостоен нобелевской премии в 1955 г.

После работы Бете три физика независимо разработали релятивистскую перенормированную КЭД. Джулиан Швингер представил свою версию на конференции в Поконо (1948) и опубликовал серию статей в *Physical review*. Его подход был основан на операторном формализме и каноническом квантовании [23]. Швингер получил точное выражение для аномального магнитного момента электрона, а также для Лэмбовского сдвига. Син-Итиро Томонага независимо разработал ковариантную формулировку КЭД в Японии в условиях послевоенной изоляции. Его работы, начавшиеся еще в 1946 г., были опубликованы в *Progress of theoretical Physics* в 1946-1948 гг. [24]. Томонага ввел понятие «сверхмноговременного формализма», которое позволило строить релятивистски-инвариантную теорию волновых полей. Ричард Фейнман предложил принципиально иной подход, основанный на пространственно-временной картине взаимодействий. На конференции в Поконо он показал свою диаграммную технику, которая наглядно представляла амплитуды процессов в виде графов с линиями и вершинами. Фейнман ввел интегралы по траекториям и развил метод вычисления амплитуд рассеяния [13]. Такая техника стала настоящей революцией в квантовой теории поля. Финальный вклад в построение перенормированной КЭД внес Фримен Дайсон, который в то время был еще молодым физиком. Он построил систематическую теорию возмущений для S-матрицы Гейзенберга и дал явные правила вычисления диаграмм Фейнмана. Дайсон доказал перенормируемость КЭД во всех порядках теории возмущений [10].

Успех перенормированной КЭД был ошеломляющим. Казалось, что проблема бесконечностей наконец решена. Однако отношение к перенормировке оставалось неоднозначным. Поль Дирак, – один из основателей КТП, – критиковал перенормировку, называя ее «Паллиативом» в своих лекциях по квантовой теории поля.

### **«Нуль-заряд» и поздний кризис КЭД**

В 1954 г. Ландау и его сотрудники провели систематический анализ поведения эффективной константы связи в КЭД при высоких энергиях [2; 3, с. 249]. Они показали, что в локальной квантовой теории поля эффективный заряд экранируется до нуля. Это явление получило название «Нуль-заряд». Такой результат означал, что локальная КЭД не может быть последовательной теорией, поскольку взаимодействие выключается на малых расстояниях, и теория теряет предсказательную силу.

Влияние работы Ландау и Померанчука на физическое сообщество оказалось огромным, особенно в Советском Союзе. Многие физики восприняли «нуль-заряд» как

фатальный приговор локальной квантовой теории поля. По сути результат, полученный Ландау, Померанчуком и их учениками, привел к отказу большинства советских физиков от теории поля и к их переходу на позиции бесполевого феноменологической программы (основанной на S-матричной теории) в построении теории элементарных частиц – это был настоящий парадигмальный сдвиг, поскольку вместо того, чтобы пытаться исправить квантовую теорию поля, многие теоретики решили полностью отказаться от нее как от основы для описания сильных взаимодействий.

В 1950-1960-е гг. доминирующей стала S-матричная теория. Она опиралась на унитарность и аналитичность амплитуд рассеяния, избегая вопросов о малых расстояниях и дала важные результаты, но не привела к фундаментальной теории. Параллельно развивалась алгебра токов предложенная Мюрреем Гелл-манном, которая стала мостом между феноменологией и будущей полевой теории. Вместе с тем, несмотря на доминирование S-матричной программы, некоторые группы продолжали развивать полевой подход. В СССР это были, прежде всего Н. Н. Боголюбов, А. А. Славнов, Д. В. Ширков, Л. Д. Фаддеев. Позже их работы по ренормгруппе и квантованию неабелевых теорий станут основой Квантовой хромодинамики.

### **Кварки и цвет, как фундамент новой теории**

К 1964 г. экспериментальная физика столкнулась с огромным и постоянно растущим числом адронов, которые необходимо было систематизировать. В 1961 г. Ю. Нейман и М. Гелл-Манн все также независимо и одновременно открыли фундаментальную симметрию сильных взаимодействий связанную с группой SU(3), которую последний назвал «восьмеричным путем» [15]. Эта симметрия внесла порядок в хаос, разбив его на мультиплеты, соответствующие представлениям этой группы.

Оказалось, что мультиплетная структура получает отличное объяснение, если за основу брать минимальное триплетное представление группы SU(3) и отождествить члены первичного триплета с фундаментальными элементарными частицами. В 1964 г. Гелл-Манном опубликована статья «Схематическая модель барионов и мезонов» (A Schematic Model of Baryons and Mesons), в которой он предложил идею о том, что все адроны состоят из более фундаментальных частиц [16]. Эти частицы Гелл-Манн назвал кварками. Независимо от Гелл-Мана Джордж Цвейг предложил похожую модель, в которой фундаментальные частицы назвал «Тузами». Первоначально кварки воспринимались лишь как математические объекты, удобные для классификации адронов.

Однако кварковая модель столкнулась с трудностью, поскольку принцип запрета Паули не позволял частицам с полуполым спином пребывать в одном и том же квантовом состоянии. Однако, для объяснения свойств  $\Omega^-$ -гипериона, содержащего три s-кварка, приходилось считать, что все они находились в одном и том же состоянии. Для решения такой проблемы было предложено ввести новую внутреннюю степень свободы, которая получила название «Цвет». Независимо друг от друга гипотезу о том, что каждый кварк обладает тремя различающимися состояниями, высказали советские физики Н. Н. Боголюбов, А. Н. Тавхелидзе, Б. В. Струминский из ОИЯИ, а также американские физики М. Хан и Й. Намбу. Струминский подготовил препринт, в котором заявил о необходимости введения дополнительного квантового числа, а немногим позже Боголюбов со своей группой представили результаты [4]. В этом же году Хан и Намбу опубликовали статью в *Physical Review*, где была предложена модель на основе трех триплетов кварков и вводится новая внутренняя степень свободы, подчиняющаяся симметрии  $SU(3)$  [18]. Появление цвета заложило основу для квантовой хромодинамики и «хромо» она обязана именно ему.

#### **Рождение квантовой хромодинамики как синтез идей (1971-1973 гг.)**

История КХД началась ровно за 20 лет до ее официального рождения. В 1954 г. Чжэньнин Янг и Роберт Миллс опубликовали статью «Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность» (*Conservation of isotopic Spin and isotopic Gauge invariance*), в которой предложили обобщение калибровочного принципа [25]. В КЭД калибровочные преобразования описываются абелевой группой  $U(1)$ , Янг и Миллс решили использовать неабелеву группу  $SU(2)$ , преобразования которой не коммутируют. Это меняет свойства теории и калибровочные поля, введенные ими начинают взаимодействовать друг с другом, что описывается нелинейными уравнениями. Квантами таких полей выступают частицы со спином 1, изотопическим спином 1 и электрическим зарядом  $\pm e$  или 0. Эти кванты должны были быть безмассовыми, как фотоны, и теория столкнулась с волной критики.

Затем уже в 1967 г. возникло решение проблемы квантования неабелевых полей, предложенное Людвигом Фадеевым и Виктором Поповым в их методе функционального интегрирования для неабелевой теории [11]. Во всей полноте оно было изложено в Киевском препринте того же года. Ключевая идея заключалась во введении фиктивных полей, которые хоть и не соответствовали реальным частицам, но были необходимы для

восстановления трансверсальности амплитуд рассеяния и унитарности S-матрицы. Их работа заложила основы квантования теорий Янга-Миллса и построения КХД.

В начале 1970-х гг. у теории Янга-Миллса была математическая структура и метод квантования, однако, физическая теория должна делать еще и осмысленные предсказания. В 1971 г. молодой физик Хоофт под руководством Мартинуса Вельтмана сумел перенормировать теорию Янга-Миллса [20]. Перенормируемость обозначала, что, несмотря на сложность и нелинейность уравнений, все бесконечности, которые возникают в уравнениях, можно контролировать. Теперь теория Янга-Миллса стала не просто красивой математической абстракцией, а превратилась в полноценный физический инструмент.

В свое время группа Ландау уже показала, что в КЭД взаимодействие на малых расстояниях становится бесконечно слабым. Это была проблема «нуль заряда». Такой эффект мог возникнуть и в теории Янга-Миллса. В 1973 г. Дэвид Гросс вместе со своим аспирантом Фрэнком Вильчиком, а также независимо от них Дэвид Политцер, открыли асимптотическую свободу [17]. Они показали, что константа связи убывает с ростом энергии. Чем ближе частицы друг к другу, тем слабее они взаимодействуют. Это идеально подходило под эксперименты по глубоко неупругому рассеянию, которые показывали, что внутри протонов кварки ведут себя почти как свободные частицы. Открытие сняло последние сомнения правильности выбранной теории. Именно за него Гросс, Вильчек и Политцер были удостоены Нобелевской премии в 2004 г.

В 1973 г. Харальд Фрич, Мэррей Гелл-Манн и Генрих Лейтвайлер предложили использовать для описания сильных взаимодействий калибровочную теорию на основе группы SU(3) [14]. Кварки были помещены в триплетное фундаментальное представление этой группы, а глюонные в октетное присоединенное. Из синтеза нескольких ключевых идей: неабелевых калибровочных теорий Янга-Миллса, давших математическую основу; метода Фаддеева-Попова, позволившего квантовать теорию; доказательства перенормируемости Хоофта и Вельтмана, ставшего теоретическим обоснованием; и, наконец, асимптотической свободы, открытой Гроссом, Вильчеком и Политцером и явившейся ключевым физическим свойством – родилась квантовая хромодинамика.

Так завершилась почти полувековая эпопея. От первых шагов квантовой электродинамики через кризис и отказ от полевого подхода к триумфальному возвращению в виде неабелевых калибровочных теорий. Рождение КХД утвердило калибровочный принцип как фундаментальный язык описания природы.

### **Заключение**

Проделанный в работе историко-научный анализ показывает, что эволюция квантовой теории поля (КТП) от первых работ П. Дирака до создания квантовой хромодинамики (КХД) представляет собой не линейное накопление знаний, а череду глубоких концептуальных кризисов и парадигмальных сдвигов. Каждый из рассмотренных этапов – от «триумфа» квантовой электродинамики до «кризиса нуль-заряда» – не только преодолевал технические трудности, но и пересматривал сами философские основания теории.

История КТП опровергает представление о науке как о линейном накоплении знаний. Проблема бесконечностей в 1930-х гг., «Нуль-заряд» Ландау в 1950-х гг., доминирование S-матричной программы и почти полный отказ от полевой теории – примеры того, как научное сообщество оказывается в тупике. Однако все эти кризисы становились не концом, а стимулом к пересмотру оснований. Перенормировка КЭД, а затем рождение КХД на основе неабелевых калибровочных теорий показали, что выход из кризиса часто требует радикального переосмысления парадигмы.

Для философии науки – это урок о том, что научный прогресс носит нелинейный характер; кризисы науки – не патология, а двигатель развития. Квантовая электродинамика привела к созданию лазеров и транзисторов, на которых работают почти все современные электронные устройства. Развитие ее идей, наряду с другими разделами квантовой физики, способствовало появлению концепции квантовых вычислений, основанных на фундаментальных принципах суперпозиции и запутанности. Например, резонаторная квантовая электродинамика (Cavity QED) подчиняется принципам КЭД. Эта технология, хотя и находится на ранних этапах развития, уже демонстрирует потенциал для решения задач, недоступных классическим компьютерам, что несет как огромные возможности, так и новые вызовы. КХД объясняет удержание кварков в адронах, что косвенно необходимо для протонной терапии рака, но в перспективе может привести и к экологическим катастрофам из-за экспериментов на ускорителях. Представляется, что у фундаментальной науки нет встроенной этической оценки. Ответственность за применение таких открытий лежит на обществе в целом. В этой связи необходим диалог между физиками, философами и политиками.

Развитие КТП служит наглядной иллюстрацией многих закономерностей, изучаемых социологией научного знания. Влияние авторитета Ландау в СССР привело к

массовому отказу от теории поля и переключению на S-матричную программу – пример того, как мнение лидера определяет направление целой научной школы. Работы Боголюбова, Ширкова, Фаддеева и Попова, продолжавших развивать полевой подход, показывают, что периферийные направления развития науки могут становиться главными. Изоляция Японии после Второй мировой войны не помешала Томонаге независимо разработать ковариантную формулировку КЭД – научное творчество осуществлялось в отсутствие прямых контактов с мировым сообществом. Знание не рождается в «чистом виде», оно зависит от авторитетов, распределения ресурсов, международной обстановки и даже случайностей.

Таким образом, эволюция квантовой теории поля – от бесконечностей и «нуль-заряда» до асимптотической свободы и КХД – не только история физики. Это универсальная модель того, как человеческое постижение проходит через кризисы, пересматривает свои познания и находит неожиданные пути к истине. Понимать эту историю необходимо не только физикам, но и социологам, философам, историкам, политикам и всем, кто хочет осмысленно участвовать в управлении наукой.

#### **Библиографический список:**

1. Блохинцев Д.И. Сборник научных работ и статей : работы по теоретической физике. Дубна, 1958. Т. 1. 251 с.
2. Ландау Л.Д. Об устранении бесконечностей в квантовой электродинамике / Л.Д. Ландау, А.А. Абрикосов, И.М. Халатников // Собрание трудов; под ред. Е. М. Лифшица, И. М. Халатникова. М.: Наука, 1969. Т. 2. С. 195-199.
3. Ландау Л.Д. О точечном взаимодействии в квантовой электродинамике / Л.Д. Ландау, И.Я. Померанчук // Собрание трудов; под ред. Е. М. Лифшица, И. М. Халатникова. М.: Наука, 1969. Т. 2. С. 247-251.
4. Боголюбов Н.Н. О составных моделях в теории элементарных частиц / Н.Н. Боголюбов, Б.В. Струминский, А.Н. Тавхелидзе. Дубна: ОИЯИ, 1965. 12 с.
5. Bethe H. The Electromagnetic Shift of Energy Levels // Physical Review. 1947. Vol. 72. Pp. 339-341.
6. Born M. Zur Quantenmechanik II / M. Born, W. Heisenberg, P. Jordan // Zeitschrift für Physik. 1926. Bd. 36. S. 557.

7. Dirac P. The quantum theory of the absorption and emission of radiation // Proc. Roy. Soc. A. 1927. Vol. 114. P. 243.
8. Dirac P. The Quantum Theory of the Electron // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1928. Vol. 117, No. 778. Pp. 610-624.
9. Dirac P. A Theory of Electrons and Protons // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1930. Vol. 126, No. 801. Pp. 360-365.
10. Dyson F. The S Matrix in Quantum Electrodynamics // Physical Review. 1949. Vol. 75. Pp. 1736-1755.
11. Faddeev L. Feynman Diagrams for the Yang-Mills Field / L.D. Fadeev, V.N. Popov // Physics Letters B. 1967. Vol. 25. Pp. 29-30.
12. Fermi E. Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I // Zeitschrift für Physik. 1934. Bd. 88. S. 161-177.
13. Feynman R. Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics // Physical Review. 1949. Vol. 76, No. 6. Pp. 769-789.
14. Fritzsche H. Advantages of the Color Octet Gluon Picture / H. Fritzsche, M. Gell-Mann, H. Leutwyler // Physics Letters B. 1973. Vol. 47. Pp. 365-368.
15. Gell-Mann M. The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry. California Institute of Technology Synchrotron Laboratory Report CTSL-20, 1961. 52 p.
16. Gell-Mann M. A Schematic Model of Baryons and Mesons // Physics Letters. 1964. Vol. 8, No. 3. Pp. 214-215.
17. Gross D. Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories / D. Gross, F. Wilczek // Physical Review Letters. 1973. Vol. 30. Pp. 1343-1346.
18. Han M. Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry / M. Han, Y. Nambu // Physical Review. 1965. Vol. 139, No. 4B. Pp. B1006-B1010.
19. Heisenberg W. Zur Quantentheorie der Wellenfelder. II / W. Heisenberg, W. Pauli // Zeitschrift für Physik. 1930. Bd. 59. S. 168-190.
20. Hooft G. Renormalization of massless Yang-Mills fields // Nuclear Physics B. 1971. Vol. 33. Pp. 173-199.
21. Jordan P. Über das Paulische Äquivalenzverbot / P. Jordan, E. Wigner // Zeitschrift für Physik. 1928. Bd. 47, Nr. 9. S. 631-651.
22. Lamb W.E. Jr. Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method / W.E. Jr. Lamb, R.C. Retherford // Physical Review. 1947. Vol. 72. P. 241.

23. Schwinger J. Quantum Electrodynamics. I. A Covariant Formulation // Physical Review. 1948. Vol. 74, No. 10. Pp. 1439-1461.

24. Tomonaga S. On a Relativistically Invariant Formulation of the Quantum Theory of Wave Fields // Progress of Theoretical Physics. 1946. Vol. 1. Pp. 27-42.

25. Yang C. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance / C. Yang, R. Mills // Physical Review. 1954. Vol. 96. Pp. 191-195.

***Khmelev A.V. Quantum Field Theory: A History of Triumphs, Crises, and Great Ideas***

The paper traces the evolution of quantum field theory from its inception to the creation of quantum chromodynamics. The key stages of this path are considered: the development of quantum electrodynamics, the problem of infinities, the dominance of alternative programs, the appearance of the quark model, and the introduction of color. Special attention is paid to the discovery of the «zero charge» Landau pole. The emergence of non-Abelian gauge theories of Yang–Mills, the Faddeev–Popov quantization method, the proof of renormalizability by Hooft, and the discovery of asymptotic freedom by Gross, Wilczek and Politzer are also discussed. Philosophical and methodological lessons are outlined.

**Keywords:** high energy physics, particle physics, nuclear physics, quantum field theory, quantum electrodynamics, quantum chromodynamics.