

**К 70-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ им. А.И. АЛИХАНОВА**

## Некоторые результаты, полученные теоретиками ИТЭФ за 70 лет работы института

М.И. Высоцкий, А.Д. Долгов, В.А. Новиков

*Дан обзор ряда выдающихся результатов, полученных теоретиками Института теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова (ИТЭФ) за 70 лет работы ИТЭФ.*

**Ключевые слова:** теория, физика элементарных частиц, теория поля, суперсимметрия, правила сумм квантовой хромодинамики, тяжёлые кварки, аномалии

PACS numbers: 01.65. + g, 11.10. – z, 12.10. – g

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037733

### Содержание

1. Введение (869).
  2. Квантовая электродинамика (869).
  3. Нуль-заряд и асимптотическая свобода (872).
  4. Аномалии (872).
  5. Слабые взаимодействия (873).
  6. Сильные взаимодействия (875).
  7. Точные результаты в квантовой теории поля (875).
  8. Гравитация, космология (875).
  9. Кинетика и термодинамика (876).
- Список литературы (876).

**М.И. Высоцкий, В.А. Новиков.** Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, ул. Большая Черёмушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация;

Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация;

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Московский инженерно-физический институт), Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация  
E-mail: vysotsky@itep.ru, novikov@itep.ru

**А.Д. Долгов.** Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, ул. Большая Черёмушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация;  
Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, Polo Scientifico e Tecnologico – Edificio C, Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy;  
Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация  
E-mail: dolgova@fe.infn.it

*Статья поступила 25 декабря 2015 г.*

### 1. Введение

Перед организованной в декабре 1945 года Лабораторией № 3 (впоследствии переименованной в Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), сейчас — ИТЭФ им. А.И. Алиханова) были поставлены конкретные задачи по созданию ядерных реакторов. Позднее, в конце 1950-х–1960-х годов, перед ИТЭФ стояла задача проектирования протонных ускорителей с жёсткой фокусировкой. Теоретики ИТЭФ внесли важный вклад в решение этих задач, однако прикладная тематика в работе теоретического отдела всегда сопровождалась фундаментальными исследованиями. Полученным в теоретическом отделе ИТЭФ фундаментальным результатам и посвящена настоящая статья.

В декабре 1945 г. руководителем всех теоретических работ Лаборатории № 3 был назначен Лев Давидович Ландау (1908–1968), а в 1946 г. главой теоретического отдела стал его ученик Исаак Яковлевич Померанчук (1913–1966). Л.Д. Ландау до 1958 г. работал в ИТЭФ по совместительству и регулярно участвовал в семинарах. В штат теоретического отдела с момента организации ИТЭФ наряду с И.Я. Померанчуком входили Владимир Борисович Берестецкий и Алексей Дмитриевич Галанин.

В завершение этого краткого введения дадим ссылку на написанную в связи с 60-летием ИТЭФ статью [1], посвящённую выполненным в ИТЭФ теоретическим работам.

### 2. Квантовая электродинамика

В 1939–1946 гг. И.Я. Померанчуком была разработана теория излучения релятивистских электронов в магнитном поле (магнитотормозное, или синхротронное, излучение) [2, 3]. В применении к космическим лучам это излучение устанавливает верхний предел энергий, с которыми могут поступать на поверхность Земли электроны и позитроны, входящие в состав первичных кос-



Сотрудники теоретических лабораторий ИТЭФ (1985 г.). 1 — В.М. Беляев, 2 — Б.В. Мартемьянов, 3 — И.Л. Грач, 4 — Н.А. Волчкова, 5 — Н.В. Рожнова, 6 — М.Н. Маркина, 7 — А. В. Добровольская, 8 — Я.И. Коган, 9 — А.Б. Кайдалов, 10 — К.А. Тер-Мартirosян, 11 — Ю.С. Калашникова, 12 — Е.П. Шабалин, 13 — И.М. Народецкий, 14 — Л.Б. Окунь, 15 — Н.Я. Смородинская, 16 — Н.С. Либова, 17 — Л.Н. Богданова, 18 — А.М. Бадалян, 19 — И.Ю. Кобзарев, 20 — Б.В. Гешкенбейн, 21 — М.Г. Шепкин, 22 — К.Г. Селиванов, 23 — М.А. Ольшанецкий, 24 — П.Э. Волковицкий, 25 — В.И. Захаров, 26 — В.В. Судаков, 27 — Ю.А. Симонов, 28 — А.П. Рудик, 29 — М.А. Шифман, 30 — А.С. Горский, 31 — А.Д. Долгов, 32 — М.И. Поликарпов, 33 — В.М. Вайнберг, 34 — В.Р. Золлер, 35 — В.А. Колкунов, 36 — М.И. Высоцкий, 37 — М.В. Терентьев, 38 — Л.А. Кондратюк, 39 — В.П. Юров, 40 — Д.Р. Лебедев, 41 — А.В. Смилга, 42 — Н.А. Воронов, 43 — И.С. Цукерман, 44 — Б.Л. Иоффе, 45 — В.Г. Ксензов, 46 — В.А. Новиков, 47 — ?, 48 — В.Л. Елецкий, 49 — А.Ю. Морозов, 50 — А.В. Турбинер, 51 — М.Б. Волошин, 52 — Ю.М. Макеевко.

мических лучей. Это же излучение делает невозможным построение кольцевых  $e^+e^-$ -коллайдеров на очень высокие энергии: планируемые в настоящее время  $e^+e^-$ -коллайдеры на полную энергию в несколько сотен ГэВ (несколько ТэВ) являются либо линейными (ILC (International Linear Collider) — Международный линейный коллайдер, CLIC (Compact Linear Collider) — Компактный линейный коллайдер), либо имеют очень большой радиус при относительно низкой энергии (FCC-ee, будущий кольцевой  $ee$ -коллайдер (Future Circular Collider — FCC) с длиной кольца 100 км). В настоящее время электронные кольцевые накопители используются как источники синхротронного излучения, эксперименты с которым дают существенный вклад в развитие атомной и молекулярной физики, физики твёрдого тела, в изучение катализа, в материаловедение и биофизику.

Для нахождения волновых функций фотона В.Б. Берестецким в 1947 г. была разработана теория шаровых векторов, и с её помощью построена теория бета-гамма-корреляций при распадах ядер [4].

В 1948 г. Померанчук обратил внимание на то, что два сорта позитрониев ( $e^+e^-$ -атомов): ортопозитроний, в котором спины электрона и позитрона складываются в суммарный спин, равный единице, и парапозитроний, в котором они составляют суммарный спин, равный нулю, — должны иметь существенно различные времена жизни (речь идёт об основных состояниях позитрониев с нулевым орбитальным моментом) [5]. Дело в том, что для ортопозитрония двухфотонная аннигиляция запрещена и он распадается на три фотона, обладая временем жизни, примерно в тысячу раз большим, чем парапозитроний. Невозможность распада ортопозитрония на два

фотона легко пояснить, используя сохранение зарядовой чётности ( $C$ ) в электромагнитных взаимодействиях.  $C$ -чётность  $e^+e^-$ -пары равна  $(-1)^{l+s}$ , где  $l$  — орбитальный момент пары,  $s$  — суммарный спин. В основном состоянии  $l = 0$ , поэтому у парапозитрония основное состояние  $C$ -чётно, а у ортопозитрония —  $C$ -нечётно. Отрицательная зарядовая чётность фотона запрещает распад  $C$ -нечётного основного состояния ортопозитрония на два фотона. Аналогичный механизм приводит к большому времени жизни  $J/\psi$ -мезона, являющегося связанным состоянием очарованных  $c\bar{c}$ -кварков. Имеющий спин, равный единице,  $J/\psi$  не может распадаться на два глюона; распад идёт на три глюона, и его вероятность подавлена кубом константы сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Тот же механизм объясняет узость  $\Upsilon$ -мезона, состоящего из прелестных  $b\bar{b}$ -кварков (важна также большая масса  $c$ - и  $b$ -кварков; "константа"  $\alpha_s$  уменьшается с возрастанием характерной энергии, роль которой играет масса тяжёлого кварка).

Ознакомившись с результатом Померанчука об отсутствии распадов ортопозитрония на два фотона, Ландау в том же 1948 г. доказал общую теорему, согласно которой два фотона не могут находиться в состоянии с полным моментом, равным единице [6]. В литературе это утверждение носит название теоремы Ландау–Янга; Ч.Н. Янг (США) пришёл к такому же утверждению [7] в 1950 г. Эта теорема сыграла важную роль в определении квантовых чисел бозона  $H$  с массой 125 ГэВ, открытого в 2012 г. на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider — LHC): детектирование распада  $H$  на два фотона доказало, что его спин не может равняться единице (наиболее вероятно, согласно эксперименталь-

ным данным, равенство спина нулю, как и должно быть для бозона Хиггса).

В работе Берестецкого и Ландау [8] 1949 г. получен гамильтониан, описывающий систему  $e^+e^-$  с точностью до членов  $\sim v^2/c^2$ . В работе Берестецкого [9] того же года этот гамильтониан использован для определения тонкой структуры уровней позитрония, в частности, найдено, что основной уровень ортопозитрония лежит выше основного уровня парапозитрония на величину  $\Delta = (4/3 + 1)m\alpha^4/4$  (второй член в скобках соответствует аннигиляционной диаграмме). В работе [9] отмечена также особенность эффекта Зеемана в позитронии: линейный по магнитному полю сдвиг уровней отсутствует; в магнитном поле происходит смешивание орто- и парапозитрония. Экспериментальное исследование влияния магнитного поля на распад позитрония позволило в начале 1950-х годов измерить орто-парапарасщепление [10]. Теоретическая точность вычисления  $\Delta$  находится сейчас на уровне поправок  $\sim \alpha^7$ , отвечающих трёхпетлевым диаграммам, и согласуется с экспериментальными результатами, имеющими сравнимую точность [11].

В 1951 г. Берестецким [12] установлена фундаментальная теорема о противоположности внутренней пространственной чётности фермиона и антифермиона. Эта теорема важна не только при изучении позитрония, но и при определении пространственной чётности мезонов, являющихся связанными состояниями пары кварк-антикварк:  $s$ -волновые состояния с полным спином 0 и 1 (скажем,  $\pi$ - и  $\rho$ -мезоны)  $P$ -нечётны, так как  $(-1)^{l+1} = -1$ .

В 1952 г. Галанин и Померанчук [13] рассмотрели лэмбовский сдвиг в мюонном водороде — атоме, в котором место электрона занимает мюон. Мюон вследствие своей большой массы находится в  $m_\mu/m_e \approx 210$  раз ближе к ядру, чем электрон. Это приводит к качественному эффекту — в лэмбовском сдвиге мюонного водорода, в отличие от такового в обычном водороде, доминирует изменение кулоновского потенциала протона на малых расстояниях, вызванное возрастанием постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . К этому возрастанию потенциала более чувствительны  $s$ -уровни, поэтому уровень  $2s$  оказывается связанным сильнее, чем  $2p$ , в то время как в обычном водороде уровень  $2s$  за счёт лэмбовского сдвига поднимается выше  $2p$ -уровня. К сдвигу атомных уровней приводит также конечный зарядовый радиус протона  $r_p$ . Извлекаемое из спектра мюонного водорода с учётом лэмбовского сдвига значение  $r_p$  сильно (на уровне 5–8 стандартных отклонений) отличается от значения, следующего из спектра обычного водорода и экспериментов по  $e^-$ -рассеянию. В этом противоречии заключается современная проблема зарядового радиуса протона [14].

Сечение аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ , вычисленное Берестецким и Померанчуком в 1954 г., используется для нормировки сечений, измеряемых на  $e^+e^-$ -коллайдерах [15].

В 1956 г. В.В. Судаков [16] выделил и вычислил так называемые дважды логарифмические члены, определяющие асимптотическое поведение вершинных диаграмм в квантовой электродинамике (КЭД) при высокой энергии в произвольном порядке теории возмущений и просуммировал эти члены. Появление дважды логарифмических членов связано с тем, что переносчиком взаимодействия в КЭД является фотон, частица со спином единица. Согласно Стандартной модели пере-

носчиками сильных и слабых взаимодействий являются также частицы со спином единица, глюоны и  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозоны соответственно. Поэтому формфактор Судакова играет важную роль не только в КЭД, но и в сильных и слабых взаимодействиях при высоких энергиях. В качестве относительно недавнего применения квантово-электродинамического формфактора Судакова отметим, что учёт виртуальных и реальных фотонов ведёт к подавлению инклюзивного сечения рождения  $Z$ -бозона в  $e^+e^-$ -аннигиляции фактором

$$\exp\left(-\frac{2\alpha}{\pi} \ln \frac{M_Z^2}{m_e^2} \ln \frac{M_Z}{\Gamma_Z}\right) \approx 0,7,$$

где  $\Gamma_Z$  — полная ширина  $Z$ . Малость константы  $\alpha$  компенсируется дважды логарифмическим множителем благодаря большой массе  $Z$ -бозона,  $M_Z \approx 91$  ГэВ ( $\Gamma_Z \approx 2$  ГэВ).

Согласно решению уравнения Дирака для электрона в поле точечного ядра с зарядом  $Z$  энергия основного состояния водородоподобного иона  $W = m_e[1 - (\alpha Z)^2]^{1/2}$  обращается в нуль при  $Z = 137$  и при больших  $Z$  становится чисто мнимой. В работе [17] 1945 г. Померанчук с Я.А. Смородинским отметили, что учёт конечного размера ядра устраняет корневую особенность в зависимости энергии от  $Z$ . С возрастанием  $Z$  энергия становится отрицательной и при некотором заряде, названном в [17] критическим, достигает величины  $-m_e$ . При этом, как отметили С.С. Герштейн и Я.Б. Зельдович [18], энергетически возможным становится рождение двух  $e^+e^-$ -пар из вакуума, при котором электроны занимают атомный уровень с энергией  $-m_e$ , а позитроны уходят на бесконечность (см. также [19]). В работах В.С. Попова [20–22] проведено вычисление критического заряда, уточняющее результат Померанчука и Смородинского; показано, что волновая функция сильно связанного электрона сосредоточена вблизи ядра на расстояниях  $\sim 1/m_e$ , и найдено время, за которое  $e^+e^-$ -пары рождаются из вакуума. Эти и многие другие результаты изложены в обзоре Зельдовича и Попова [23]. В дальнейших работах В.С. Попова с соавторами [24–27] решается задача о рождении пар при столкновениях двух тяжёлых ядер в случае, когда эффективный заряд адиабатически возрастает и достигает критической величины. Так как  $Z_{cr} \approx 175$ , обычно обсуждается столкновение двух ядер урана.

Величина  $Z_{cr}$  уменьшается во внешнем магнитном поле, так как происходит "поджатие" электронной орбиты к ядру, увеличивающее энергию связи электрона. Эффект становится существенным при магнитных полях  $B \gtrsim B_0 \equiv m_e^2/e$ . Согласно результатам В.Н. Ораевского, А.И. Реза и В.Б. Семикоза (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)) [28] при  $B \approx 100B_0$  ядро урана становится критическим, а при  $B = 3 \times 10^4 B_0$  критическим становится ядро с  $Z = 40$ . Однако учёт поляризации вакуума в сверхсильном магнитном поле  $B > m_e^2/e^3$ , приводящий к экранированию кулоновского потенциала (В.В. Усов, А.Е. Шабад (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)) [29], качественно меняет описанную картину. Согласно полученным М.И. Высоцким, С.И. Годуновым и Б. Маше (Франция) результатам [30, 31] ядра с  $Z < 60$  не становятся критическими ни при каком  $B$ , а ядра с зарядами в интервале  $60 < Z < 210$  становятся критическими при существенно больших магнитных полях, чем в отсутствие учёта

экранирования, и являются критическими в конечном интервале изменения  $V$ . В то же время ядра с  $Z > 210$  являются критическими при любых значениях внешнего магнитного поля. Учёт конечного размера ядра важен для определения области критичности.

Основой аналитического описания ионизации атомов, ионов и твёрдых тел интенсивным лазерным излучением является работа Л.В. Келдыша (ФИАН) [32]. А.М. Переломовым, В.С. Поповым и М.В. Терентьевым был развит метод мнимого времени для построения теории многофотонной ионизации атомов интенсивным лазерным светом [33, 34]. Этот метод широко применялся В.С. Поповым с соавторами в физике сильных лазерных полей, в том числе в проблеме рождения  $e^+e^-$ -пар лазерным излучением из вакуума [35–37].

Написанные В.Б. Берестецким в соавторстве с А.И. Ахиезером и с Е.М. Лифшицем и Л.П. Питаевским монографии *Квантовая электродинамика* [38] и *Релятивистская квантовая теория* [39] (переименованная в *Квантовую электродинамику* в более поздних изданиях) сегодня остаются одними из лучших учебников в этой области. Первое издание [38] появилось в 1953 г., и, как написал Ф. Дайсон (США), "эта книга является первой хорошей монографией по квантовой электродинамике и, вероятно, на долгое время останется лучшей".

### 3. Нуль-заряд и асимптотическая свобода

Ландау и Померанчук в 1955 г. обнаружили, что поляризация вакуума полностью экранирует конечный точечный заряд в квантовой электродинамике [40]. Идея об исчезновении заряда независимо была высказана Е.С. Фрадкиным (ФИАН). В работах 1955–1956 гг. Померанчука [41] и Померанчука, Судакова и Тер-Мартirosяна [42] было установлено, что такое же поведение заряда имеет место в юкавских теориях. Это явление было названо "нуль-заряд" (или московский нуль). Малость постоянной тонкой структуры приводит к тому, что связанные с нуль-зарядом проблемы в КЭД начинаются при очень высоких энергиях,  $\sim m_e \exp(1/\alpha)$  (или на очень малых расстояниях,  $\sim \exp(-1/\alpha)/m_e$ ). Однако в случае сильных взаимодействий большая величина заряда делает квантовую теорию поля абсолютно неприменимой. Открытие нуль-заряда привело к тому, что в последующие 15 лет развивались методы, основанные на таких общих принципах, как унитарность и аналитичность матрицы рассеяния. Теорией поля, основанной на лагранжевом подходе, мало кто занимался. Впоследствии оказалось, что, как и в случае многих других "запрещающих" ("no-go") теорем в физике, утверждение о нуль-зарядном поведении всех квантовых теорий поля имеет исключение. А именно, в неабелевых калибровочных теориях заряд ведёт себя противоположным образом: с возрастанием энергии (или уменьшением расстояния) он убывает, имеет место асимптотическая свобода. Это делает современную теорию сильных взаимодействий, основанную на неабелевой группе  $SU(3)$ , самосогласованной на малых расстояниях, на которых константа  $\alpha_s$  становится малой. Проблемы появляются на больших расстояниях, когда заряд становится порядка единицы и методы теории возмущений неприменимы. Приходится ограничиться качественной картиной конфайнмента (пленения) кварков и глюонов и результатами численных вычислений свойств адронов.

Впервые с поведением заряда, противоречащим нуль-зарядному, в четырёхмерной теории столкнулись в 1965 г. В.С. Ваняшин (Днепропетровский университет) и М.В. Терентьев при изучении электродинамики массивных заряженных векторных бозонов [43]<sup>1</sup>. В частности, в работе [43] можно найти первый коэффициент функции Гелл-Мана–Лоу КЭД, равный  $-7$  за счёт вклада массивных  $W^\pm$ -бозонов. Амплитуда обнаруженного в 2012 г. в эксперименте распада бозона Хиггса на два фотона содержит множитель  $-7 + 16/9$ , где  $-7$  — вклад  $W^\pm$ , а  $16/9$  — вклад  $t$ -кварковой петли. Свой результат по аномальному поведению заряда авторы [43] связали с перенормируемостью теории с массивными векторными бозонами (то, что механизм Хиггса делает такую теорию перенормируемой, было выяснено значительно позднее). В 1968 г. И.Б. Хриплович (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ), Новосибирск) вычислил бег заряда в неабелевой калибровочной теории с безмассовыми векторными частицами, основанной на группе  $SU(2)$  [45]. Его результат для первого коэффициента функции Гелл-Мана–Лоу оказался равным  $-22/3$ , что превращается в  $-7$  при учёте вклада голдстоуновской моды, делающей векторные бозоны массивными, — заряженного бозона Хиггса:  $-22/3 + 1/3 = -7$ . Примерно в те же годы в экспериментах по глубоконепругому рассеянию было обнаружено, что если сильные взаимодействия описываются квантовой теорией поля, то заряд в такой теории с возрастанием энергии должен уменьшаться. В начале 1970-х годов основанная на неабелевой группе  $SU(3)$  теория с цветными глюонами и кварками (квантовая хромодинамика — КХД) уже рассматривалась как теория сильных взаимодействий. В 1972 г. на конференции в Марселе  $\gamma$  Хофт в ходе обсуждений заметил, что, согласно его вычислениям в этой теории, заряд с возрастанием энергии уменьшается. Подробное рассмотрение этих вопросов, включая анализ эволюции структурных функций протона в КХД, было проведено в работах Политцера [46, 47] и Вильчика и Гросса (США) [48–50] 1973 года. С тех пор КХД рассматривается как правильная теория сильных взаимодействий. Стандартная модель физики элементарных частиц основана на группе  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  с калибровочными зарядами  $g_3$ ,  $g_2$  и  $g_1$  соответственно. Заряды  $g_3$  и  $g_2$  имеют асимптотически свободное поведение, а  $g_1$  — нуль-зарядное. Один из важных принципов построения теорий при высоких энергиях — отсутствие в них полюса Ландау, как стало сейчас называться явление нуль-заряда.

### 4. Аномалии

Иногда симметрии классической теории нарушаются при учёте петлевых поправок. Наиболее известный пример — приводящая к сохранению аксиального тока в квантовой электродинамике безмассовых электронов аксиальная симметрия, нарушаемая при учёте треугольных диаграмм, описывающих переход аксиаль-

<sup>1</sup> Отсутствие обнуления заряда в четырёхфермионной теории в двумерном пространстве-времени ранее обнаружил А.А. Ансельм (Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова — ПИЯФ) [44]. (Здесь, как и всюду в настоящей статье, даются современные названия институтов.)

ного тока в два фотона через электронную петлю. Рассмотрение дивергенции нейтрального изотриплетного аксиального тока позволило вычислить ширину распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  [51]. В работе М.В. Терентьева [52] аналогичное рассмотрение позволило найти амплитуду перехода  $\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в пределе малых импульсов пионов (см. также [53]). В работе [54] Терентьевым была предложена экспериментальная проверка полученного результата в фоторождении нейтрального пиона при когерентном рассеянии заряженного пиона на тяжёлом ядре, осуществлённая на ускорителе Института физики высоких энергий (ИФВЭ) [55]. Аналогичные процессы с участием К-мезонов в пределе малой массы s-кварка были изучены Вессом и Зумино [56]; их описание в терминах эффективного лагранжиана дано Витеном [57]. В настоящее время в ИФВЭ идёт эксперимент по поиску аномалии в реакции  $K^+\gamma \rightarrow K^+\pi^0$  [58]; формулы, необходимые для анализа экспериментальных данных, получены в недавней работе [59].

Причиной аномалий является плохая сходимостъ интегралов, отвечающих фейнмановским диаграммам, в области большого импульса интегрирования. Однако, как отметили А.Д. Долгов и В.И. Захаров [60], аномальные амплитуды имеют ненулевые мнимые части  $\sim \delta(q^2)$ , где  $q^2$  — импульс, входящий в вершину аксиального тока. Этот инфракрасный аспект аномалии позволяет из наличия аномальных амплитуд получить некоторые заключения о спектре адронов, что на сегодня невозможно сделать на основании лагранжиана КХД, так как на массовой оболочке взаимодействие является сильным. Особенности  $\sim \delta(q^2)$  в диаграммах с виртуальными безмассовыми кварками u, d и s должны воспроизводиться диаграммами, в которых по внутренним линиям распространяются адроны. Единственная возможность реализации такого требования — это наличие в спектре адронов безмассовых в пределе  $m_{u,d,s} \rightarrow 0$  скалярных (псевдоскалярных) состояний. Таким состоянием является октет псевдоголдстоуновских бозонов  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ,  $K^\pm$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ,  $\eta$ . Это следствие инфракрасного аспекта аномалий отмечено Е. Витеном и С. Коулменом [61].

## 5. Слабые взаимодействия

В 1956 г. для решения  $\theta$ - $\tau$ -проблемы в распадах заряженных каонов Ли и Янг (США) предположили, что в этих распадах нарушается Р-чётность. Для проверки своей гипотезы о нарушении Р-чётности в слабых взаимодействиях они предположили, что в  $\beta$ -распадах поляризованных ядер может наблюдаться корреляция импульса рождающихся электронов и спина ядра вида  $\bar{p}$ . Так как эта корреляция является Т-чётной, в силу СРТ-теоремы её экспериментальное обнаружение означало бы также нарушение С-чётности. В свою очередь нарушение С-чётности разрушало объяснение установленной картины распадов нейтральных К-мезонов, согласно которой короткоживущий  $K_S$ , являющийся С-чётным, распадался на два  $\pi$ -мезона, а С-нечётный  $K_L$  жил долго, так как не мог распадаться на два  $\pi$ -мезона. Однако, как заметили Б.Л. Иоффе, Л.Б. Окунь и А.П. Рудик [62] в 1957 г., сохранение Т-чётности означает сохранение произведения С на Р, а этого достаточно для запрета распадов  $K_L \rightarrow 2\pi$ , так как два  $\pi$ -мезона в s-волне образуют не только С-чётное, но и СР-чётное состояние, тогда как  $K_L$  СР-нечётен.

Таким образом, наблюдение корреляции  $\bar{p}$  не противоречит существованию долгоживущего  $K_L$ , а свидетельствует о нарушении С-чётности в слабом взаимодействии. В то же время вышла работа Ли, Оме и Янга (США) [63], в которой также указывалось, что корреляция спина и импульса (вскоре обнаруженная в эксперименте Ц.С. Ву (США)) будет свидетельствовать о нарушении как пространственной, так и зарядовой чётности.

Нарушение дискретных симметрий в слабом взаимодействии стало причиной появления статей Ландау [64, 65]. Статья [64], как в ней указано, возникла вследствие дискуссии с Л. Окунем, Б. Иоффе и А. Рудиком. Как отмечено в [64], если предположить, что операция Р-инверсии должна сопровождаться заменой частиц античастицами, то законы природы остаются инвариантными относительно этого преобразования, названного в [64] комбинированной инверсией. Подчёркивается, что вследствие этой симметрии элементарные частицы не могут иметь дипольных моментов. Как мы знаем сейчас, комбинированная симметрия, или СР-чётность, не является фундаментальным законом природы: в 1964 г. были обнаружены распады долгоживущего нейтрального  $K_L$ -мезона на два  $\pi$ -мезона, нарушающие СР-чётность. Тем не менее само понятие СР-симметрии оказалось исключительно плодотворным, как и поиски её нарушения в распадах К- и В-мезонов. Дипольные моменты элементарных частиц в Стандартной модели чрезвычайно малы, и до сих пор на их поиски направлены огромные усилия (см. ниже).

В статье [65] замечено, что нарушение Р-чётности приводит к возможности существования новых свойств у безмассового нейтрино. В случае нулевой массы фермиона уравнение Дирака распадается на два не связанных между собой уравнения, переходящих друг в друга при инверсии (уравнения Вейля). При отсутствии Р-инвариантности нейтрино может описываться одним уравнением Вейля. Тогда нейтрино всегда будет продольно поляризованным, а антинейтрино — противоположно поляризованным. Из экспериментальных данных по спектру электронов, образующихся в распаде мюона, делается вывод о том, что в распаде мюона рождается пара  $\nu\bar{\nu}$ . Из операторов продольных нейтрино и антинейтрино можно составить только четырёхмерный вектор, при этом из операторов мюона и электрона можно составить две комбинации: вектор и псевдовектор. Найдено распределение вылетающих электронов по энергии и углу между направлениями движения электрона и мюона (последнее направление задаёт поляризацию мюона, рождённого в  $\pi \rightarrow \mu\nu$ -распаде). Отметим, что при построении Стандартной модели все фермионные волновые функции выбираются в виде вейлевских спиноров. Массы первоначально безмассовым фермионам даёт механизм Хиггса. Теория двухкомпонентного нейтрино одновременно была предложена Ли и Янгом и Саламом (Великобритания).

В 1957 г. Л.Б. Окунь и Б.М. Понтекорво (Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ)) заметили, что малая разность масс  $K_1^0$  и  $K_2^0$  означает отсутствие переходов с  $\Delta S = 2$  в первом порядке по слабому взаимодействию [66]. В 1960 г. Л.Б. Окунь отметил, что вклад второго порядка определяется величиной обрезания  $\Lambda$ , которая должна быть порядка 1 ГэВ [67]. Надежда на то, что столь низкое обрезание будет обеспечено сильным взаимодействием, не оправдалась: в работе

Б.Л. Иоффе и Е.П. Шабалина [68] 1967 г. было показано, что сильные взаимодействия не приводят к обрезанию амплитуд процессов, идущих во втором порядке по слабому взаимодействию. Как мы знаем сейчас, это обрезание обеспечивается относительно малой массой с-кварка,  $m_c \approx 1,3$  ГэВ, а соответствующий механизм (ГИМ) был предложен в 1970 году Ш.Л. Глэшоу, Дж. Илиопулосом и Л. Майяни (США, Франция, Италия) ещё до открытия с-кварка.

После открытия b-кварка М.И. Высоцкий вычислил [69] (1980 г.) амплитуду  $K^0 - \bar{K}^0$ -перехода в модели шести кварков, не предполагая малости массы t-кварка по сравнению с массой W-бозона (в литературе функции, описывающие эту амплитуду, получили название функций Инами – Лима [70, 71]). В главном логарифмическом приближении были найдены также глюонные поправки к этой амплитуде. Отсутствие декаплинга ("отщепления") тяжёлых частиц в электрослабой теории ярко демонстрирует амплитуда  $K^0 - \bar{K}^0$ -перехода, в которой имеются вклады, возрастающие как  $m_t^2$  при  $m_t \gg M_W$ . Именно эти вклады определяют CP-нарушение в смешивании  $K^0 - \bar{K}^0$  в рамках шестикварковой модели Kobayashi–Maskawa. Эти же вклады отвечают за смешивание  $B^0 - \bar{B}^0$ . Открытие в 1986 г. в исследовательском центре DESY (от нем. Deutsches Elektronen-Synchrotron) коллаборацией АРГУС при активном участии экспериментаторов ИТЭФ неожиданно большого  $B^0 - \bar{B}^0$ -смешивания дало первое указание на аномально большую массу t-кварка.

В 1957–1958 гг. Л.Б. Окунь предложил составную модель [72], в которой все известные в то время адроны (этот общепринятый сейчас термин введён в научный оборот Л.Б. Окунем в 1962 г.) предлагалось строить из трёх "прачастиц". В этом заключалось отличие от более ранней модели Сакаты, в которой адроны состояли из физических частиц: протона, нейтрона и лямбда-гиперона. На основании предложенной модели Окунем предсказано существование нонета псевдоскалярных мезонов и свойства двух его недостающих частиц ( $\eta$ - и  $\eta'$ -мезонов). Сформулированы правила отбора для лептонных распадов странных частиц:  $|\Delta S| = 1$ ,  $\Delta Q = \Delta S$ ,  $\Delta T = 1/2$ . На основе SU(3)-симметрии сильного взаимодействия И.Ю. Кобзарев и Л.Б. Окунь в 1962 г. получили следствия для лептонных распадов мезонов [73]. Полный анализ лептонных распадов мезонов и барионов был проведён Н. Кабиббо (Италия) в 1963 г. Модель легла в основу известной монографии Л.Б. Окуня *Слабое взаимодействие элементарных частиц* (первое издание 1963 г.) [74]. Эта модель была непосредственной предшественницей модели кварков.

Современная калибровочная теория электрослабых взаимодействий изложена в монографии Л.Б. Окуня *Лептоны и кварки* [75].

В работе М.В. Терентьева [76] доказано отсутствие линейных по нарушению изотопической симметрии поправок к слабому векторному току. Это утверждение позволяет определить численное значение элемента матрицы Kobayashi–Maskawa  $V_{ud}$  из анализа  $\beta$ -распадов ядер, обусловленных векторным током. В литературе оно известно как теорема Адемолло–Гатто — аналогичное утверждение относительно нарушения SU(3)-симметрии, доказанное для меняющегося странности векторного тока [77].

В 1974 г. М.Б. Волошин, И.Ю. Кобзарев и Л.Б. Окунь впервые рассмотрели в рамках квантовой теории поля

вопрос о распаде ложного вакуума [78]. Актуальность этого вопроса связана с тем, что экстраполяция хиггсовского потенциала Стандартной модели в область планковских значений поля Хиггса при современных значениях масс t-кварка и бозона Хиггса приводит к утверждению о метастабильности вакуума электрослабой теории.

А.И. Вайнштейн (ИЯФ), В.И. Захаров и М.А. Шифман в 1978 г. построили эффективный гамильтониан нелептонных слабых распадов с учётом обменов глюонами в главном логарифмическом приближении [79]. Был обнаружен новый механизм усиления переходов с  $\Delta T = 1/2$ , обусловленный так называемыми пингвинными диаграммами, — s  $\rightarrow$  d-переход с изучением глюонов. Эти результаты, которые в дальнейшем были обобщены для случая шести кварков, имеют многочисленные приложения.

При исследовании моделей техницвета П. Сикиви (США), Л. Заскинд (США), М.Б. Волошин, В.И. Захаров обнаружили [80] глобальную SU(2)-симметрию в модели Глэшоу–Вайнберга–Салама, которая остаётся ненарушенной при выпадении конденсата поля Хиггса. Эта симметрия, названная в англоязычной литературе "custodial" ("охранная"), отвечает за близость масс W- и Z-бозонов. Важность охранной симметрии стала ясна при изучении радиационных поправок в электрослабой теории: именно нарушение охранной симметрии большой массой t-кварка позволило извлечь значение этой массы из прецизионных данных о параметрах W- и Z-бозонов с точностью  $\pm 30$  ГэВ, что облегчило экспериментальное открытие в 1995 г. t-кварка на Тэватроне в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США).

Е.П. Шабалин в 1978 г. показал, что бытовавшая в литературе оценка величины дипольного момента нейтрона в шестикварковой модели CP-нарушения Kobayashi–Maskawa ошибочна: суммарный эффект двухпетлевых диаграмм равен нулю (обнуление дипольного момента дейтрона  $d_n$  в одной петле очевидно) [81]. Ненулевой дипольный момент возникает на уровне трёх петель, и, согласно вычислению И.Б. Хриповича (ИЯФ), он на много порядков меньше современного экспериментального ограничения [82]. Этот факт служит сильным стимулом к поиску ненулевого  $d_n$ : его обнаружение будет свидетельствовать о существовании Новой физики за рамками Стандартной модели.

В работе [83] 1980 года И.Ю. Кобзарев, Л.Б. Окунь, Б.В. Мартемьянов и М.Г. Щепкин параметризовали матрицу смешивания нейтрино в наиболее общем случае наличия как дираковских, так и майорановских массовых членов.

Один из первых в мировой литературе обзоров по низкоэнергетической суперсимметрии был написан М.И. Высоцким [84].

Обсуждавшуюся в литературе антикорреляцию потока солнечных нейтрино и активности Солнца М.Б. Волошин, М.И. Высоцкий и Л.Б. Окунь [85, 86] связали с возможным проявлением магнитного момента нейтрино. Эти работы стимулировали постановку ряда экспериментов по поиску магнитного момента нейтрино в России и за рубежом.

В 1978 г. Б.Л. Иоффе и В.А. Хозе (ПИЯФ) предложили [87] искать бозон Хиггса в реакции  $e^+e^- \rightarrow ZH$ , что и было осуществлено на ускорителе LEP (Large Electron-Positron collider) в ЦЕРНе. Отрицательный результат

поисков привёл к нижнему ограничению на массу бозона Хиггса:  $m_H > 114$  ГэВ.

Высокая точность измерения параметров Z-бозона на  $e^+e^-$ -коллайдерах LEP I (ЦЕРН) и SLC (Stanford Linear Collider, SLAC National Accelerator Laboratory) и массы W-бозона на  $e^+e^-$ -коллайдере LEP II и Тэватроне позволила провести проверку электрослабой теории с учётом радиационных поправок. Перенормируемость электрослабой теории делает возможным вычисление таких поправок. М.И. Высоцкий, В.А. Новиковым, Л.Б. Окунем и А.Н. Розановым [88–90] были получены соответствующие формулы, выражающие измеряемые в эксперименте параметры через наиболее точно измеренные значения фермиевской константы  $G_F$ , массу Z-бозона  $M_Z$  и постоянную тонкой структуры на масштабе массы Z-бозона  $\alpha(M_Z)$ . На первом этапе (1991–1995 гг.) эти результаты использовались для предсказания массы t-кварка. После открытия t-кварка на Тэватроне и измерения его массы было получено предсказание для массы бозона Хиггса в рамках Стандартной модели  $M_H = 80^{+30}_{-20}$  ГэВ, подтвердившееся её измерением в 2012 г. на LHC:  $M_H = 125 \pm 1$  ГэВ.

## 6. Сильные взаимодействия

Научная слава теоретического отдела ИТЭФ во многом обязана фундаментальным результатам Померанчука, полученным в области сильных взаимодействий. В 1958 г. исходя из дисперсионных соотношений Померанчук доказал асимптотическое равенство полных сечений взаимодействий частиц и античастиц с фиксированной мишенью (теорема Померанчука) [91]. В работах В.Н. Грибова (ПИЯФ) и Померанчука [92–94] квантово-механическая теория полюсов Редже была использована для создания последовательной картины процессов при асимптотически высоких энергиях. В честь Померанчука реджевский полюс с квантовыми числами вакуума, ответственный за выполнение теоремы Померанчука, был назван за рубежом помероном. Дальнейшее развитие реджистика получила в работах К.А. Тер-Мартirosяна и А.Б. Кайдалова.

После создания КХД и открытия асимптотической свободы в сильных взаимодействиях теоретиками ИТЭФ был получен ряд фундаментальных результатов, ставших классическими. Так, в работе [95] была предложена наивная кварковая модель для глубоконеупругих процессов, позволяющая "сшить" составную модель нуклонов с распределениями кварков и глюонов при больших переданных импульсах. В дальнейшем эти идеи были развиты в работах европейских теоретиков.

В работе [96] было осознано, что масса с-кварка  $m_c$  велика в масштабах  $\Lambda_{QCD}$  и можно учесть сильные взаимодействия в процессах с тяжёлыми кварками, разлагая по малой константе связи  $\alpha_s(m_c)$ . Так были вычислены сильные поправки к разности масс  $K_L - K_S$  и к фоторуждению очарованных частиц.

После открытия J/ψ-мезона в работах А.И. Вайнштейна, М.Б. Волошина, В.И. Захарова, В.А. Новикова, Л.Б. Окуня и М.А. Шифмана была построена дисперсионная теория чармония и были написаны знаменитые обзоры [97, 98], ставшие настольной книгой для всех, кто занимался физикой тяжёлых кварков. Дальнейшее развитие этих идей А.И. Вайнштейном, В.И. Захаровым и М.А. Шифманом [99] привело к знаменитым правилам

сумм КХД, позволившим вычислять свойства адронов, построенных из лёгких u-, d- и s-кварков, в терминах вакуумных конденсатов. В работах В.М. Беляева, Б.Л. Иоффе, Я.И. Когана, В.Л. Елецкого и А.В. Смильги [100–103] этот подход был использован в различных приложениях.

В работе [104] (1977 г.) М.Б. Волошин и Л.Б. Окунь обсуждали возможность существования кварковых "молекул" — связанных состояний мезонов, содержащих тяжёлые с-кварки. В последние годы такие состояния обнаружены в системах с- и b-кварков. Их свойства активно обсуждаются в литературе; М.Б. Волошиным развивается "молекулярный" подход; имеются и другие подходы к проблеме (в ИТЭФ физикой экзотических адронов занимаются А.М. Бадалян, Ю.С. Калашникова, А.Е. Кудрявцев, А.В. Нефедьев и Ю.А. Симонов [105, 106]).

## 7. Точные результаты в квантовой теории поля

Теоретиками ИТЭФ получено несколько точных результатов в квантовой теории поля. Так, в работе Е.Б. Богомольного [107] найден новый класс решений классических уравнений для теории калибровочных полей со скалярным конденсатом. Это так называемые BPS-монополь (монополь Богомольного–Прасада–Зоммерфельда). Эти решения играют исключительно важную роль в (N = 2)- и (N = 4)-суперсимметричных теориях. В работе [108] получены многочисленные точные соотношения для корреляторов и показано, что в сильных взаимодействиях глюолов и гибридных состояний масштаб масс может в несколько раз превышать  $\Lambda_{QCD}$ .

В работе [109] для суперсимметричных теорий построен формализм для описания суперинстантонов. Доказаны теоремы об отсутствии поправок к инстантоновым амплитудам. В результате были точно вычислены глюонный конденсат для суперсимметричных КХД и β-функция (так называемая β-функция Новикова–Шифмана–Вайнштейна–Захарова). В дальнейшем пристонская группа показала, что суперинстантоны могут приводить к динамическому нарушению суперсимметрии.

## 8. Гравитация, космология

В работе В.В. Судакова, Е.М. Лифшица (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (ИФП)) и И.М. Халатникова (ИФП) [110] (1961 г.) обсуждалась сингулярность в основанных на общей теории относительности (ОТО) космологических моделях.

В работе В.И. Захарова [111] 1970 года было показано, что введение сколь угодно малой массы гравитона противоречит наблюдательным следствиям ОТО (так называемая сингулярность Вельтмана–ван Дама–Захарова). Механизм построения теории гравитации, которая имеет непрерывный предел при стремлении массы гравитона к нулю, был предложен А.И. Вайнштейном [112] и обсуждался в ряде последующих работ.

В работе Зельдовича, Окуня и Пикельнера [113] в 1965 г. была вычислена космологическая концентрация реликтовых кварков при предположении, что они могут существовать в свободном виде. Полученный результат противоречил имевшимся ограничениям на обилие кварков во Вселенной и, таким образом, однозначно свиде-

тельствовал в пользу невылетания (конфайнмента) кварков. В [113] для расчёта космологической концентрации тяжёлых частиц использовалось кинетическое уравнение, которое впоследствии, в 1977 г., было переоткрыто Б. Ли и С. Вайнбергом и носит их имена.

Кобзаревым, Окунем и Померанчуком предложена и рассмотрена идея о зеркальной материи [114, 115]. Это была пионерская теоретическая работа о возможном существовании тёмного вещества во Вселенной. Впоследствии идеи о зеркальной тёмной материи развивались в ИТЭФ С.И. Блинниковым (см. обзор [116]).

В работах Зельдовича, Кобзарева и Окуня [117, 118] было обнаружено, что модель спонтанного нарушения CP-симметрии противоречит наблюдаемым данным об изотропии Вселенной, так как гигантская плотность энергии стенки, разделяющей домены вещества и антивещества, разрушит изотропию микроволнового фона. Эти работы инициировали исследования механизмов "расщепления" доменных стенок. Возможные решения данной проблемы описаны в недавней работе [119].

Вычисление космологической концентрации слабо взаимодействующих реликтовых частиц во Вселенной было проведено М.И. Высоцким, А.Д. Долговым и Я.Б. Зельдовичем [120] в 1977 г. Практически одновременно появились аналогичные работы Б. Ли и С. Вайнберга (США), Хута (Нидерланды) и К. Сато и М. Кобаяси (Япония). Результаты этих работ являются основополагающими при расчётах плотности массивных частиц тёмной материи, в частности нейтрально.

А.Д. Долговым и Я.Б. Зельдовичем в 1980 г. был опубликован широко известный обзор "Космология и элементарные частицы" [121], содержащий значительное количество оригинальных результатов. Обзор [121] в заметной степени инициировал развитие этой области, в частности, на Рочестерских конференциях появилась секция, название которой повторяет название этого обзора. (Современное состояние проблемы описано в [122].)

Значительный вклад в исследование проявлений нейтрино в космологии внесён А.Д. Долговым с соавторами. Было выведено кинетическое уравнение для матрицы плотности осциллирующих нейтрино [123], которое в настоящее время является основным инструментом при изучении эффектов нейтринных осцилляций в ранней Вселенной и при взрыве сверхновых. На основе решения этого уравнения Барбиери и Долговым [124, 125] получены пионерские ограничения на параметры осцилляций нейтрино по наблюдаемым обилиям лёгких элементов. Этот результат позднее был обобщён для более реалистического случая перемешивания всех активных нейтрино [126]. Кроме того, в цитированных выше работах [124, 125] (см. также [127]) был разработан метод вычисления космологической концентрации стерильных нейтрино, который лежит в основе вычислений плотности тёплой тёмной материи, если она состоит из стерильных нейтрино. Этот метод получил название метода Додельсона–Видроу по более поздней работе указанных авторов. В работах [128–131] был обнаружен новый эффект разогрева нейтрино за счёт поздней аннигиляции более горячих электрон-позитронных пар. Согласно результатам этих работ стало общепринятым, что каноническое эффективное число типов нейтрино в космологии равно не трём, как можно было бы naивно ожидать, а 3,046. Долговым с соавторами получено наиболее сильное ограничение на химический потенциал космологических

нейтрино [132], которое исключает влияние нейтринного вырождения на структуру Вселенной и реликтовое излучение, вопреки прежним представлениям.

А.Д. Долговым с соавторами проведены пионерские вычисления по разогреву Вселенной после инфляции как в рамках теории возмущений [133], так и непертурбативно [134].

Блинников с соавторами [135] предложили новый метод прямого определения параметра Хаббла, основанный на наблюдении сверхновых типа II. Этот метод свободен от неоднозначностей классического подхода к построению лестницы космических расстояний. Его применение к известным сверхновым, расстояние до которых было надёжно измерено другими способами, показало замечательное согласие нового подхода с традиционными.

В цикле работ Долгова с соавторами изучалась теория модифицированной  $F(R)$ -гравитации, предложенной в качестве одного из возможных механизмов объяснения ускоренного расширения Вселенной. Был открыт эффект сильной неустойчивости большого класса таких теорий [136], получивший в литературе название неустойчивости Долгова–Кавасаки. В результате потребовалось изменение модифицированных теорий, чтобы избежать этой неустойчивости. При дальнейших исследованиях таких теорий был открыт целый ряд новых явлений, таких как высокочастотные осцилляции скаляра кривизны  $R$  [137, 138], антигравитация (гравитационное отталкивание) в системах конечного размера [139], новые эффекты в гравитационной неустойчивости, отличающиеся от известной неустойчивости Джинса [140]. Проверка этих предсказаний позволит либо однозначно подтвердить модель, либо получить ограничения на её параметры, либо её отвергнуть.

## 9. Кинетика и термодинамика

После открытия в 1964 г. CP-нарушения в распадах K-мезонов стало практически очевидным, что в силу CPT-теоремы нарушается также T-инвариантность, т.е. инвариантность относительно обращения времени. Тогда возник вопрос о справедливости канонических равновесных распределений в квантовой статистике, которые стандартным образом выводились на основе условия детального баланса, следующего из T-инвариантности. В работе А.Д. Долгова [141] в связи с этим было показано, что "равновесная кинетика сильнее T-нарушения". Унитарность  $S$ -матрицы обеспечивает справедливость стандартных равновесных распределений, несмотря на то что нарушается условие детального баланса. Равновесие между прямыми и обратными реакциями достигается за счёт нескольких цепочек реакций. По этой причине на смену детальному балансу при T-нарушении приходит циклический баланс, как это названо в цитируемой выше работе.

М.И.В. и В.А.Н. поддерживаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований 14-02-00995, 16-02-00342, А.Д.Д. поддержан грантом правительства РФ 11.Г34.31.0047.

## Список литературы

1. Окунь Л Б *ЯФ* **69** 1796 (2006); Okun L B *Phys. Atom. Nucl.* **69** 1759 (2006)



2. Померанчук И Я *Собрание научных трудов* Т. 1–3 (М.: Наука, 1972)
3. Померанчук И *Изв. АН СССР Сер. физ.* **10** 316 (1946)
4. Берестецкий В *ЖЭТФ* **17** 12 (1947)
5. Померанчук И *ДАН СССР* **60** 213 (1948)
6. Ландау Л *ДАН СССР* **60** 207 (1948); Landau L, in *Collected Papers of L D Landau* (Ed. D ter Haar) (Oxford: Pergamon Press, 1965) p. 471
7. Yang C N *Phys. Rev.* **77** 242 (1950)
8. Берестецкий В, Ландау Л *ЖЭТФ* **19** 673 (1949); Berestetskii V, Landau L *Guide Russ. Sci. Period Lit. Brookhaven* **4** 33 (1951)
9. Берестецкий В *ЖЭТФ* **19** 1130 (1949)
10. Deutsch M, Dulit E *Phys. Rev.* **84** 601 (1951)
11. Baker M et al. *Phys. Rev. Lett.* **112** 120407 (2014)
12. Берестецкий В *ЖЭТФ* **21** 43 (1951)
13. Галанин А Д, Померанчук И Я *ДАН СССР* **86** 251 (1952)
14. Carlson C E *Prog. Part. Nucl. Phys.* **82** 59 (2015); arxiv:1502.05314
15. Берестецкий В Б, Померанчук И Я *ЖЭТФ* **29** 864 (1955); Berestetskii V B, Pomeranchuk I Ya *Sov. Phys. JETP* **2** 580 (1956)
16. Судаков В В *ЖЭТФ* **30** 87 (1956); Sudakov V V *Sov. Phys. JETP* **3** 65 (1956)
17. Pomeranchuk I, Smorodinsky Ya *J. Phys. USSR* **9** 97 (1945)
18. Герштейн С С, Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **57** 654 (1969); Gershtein S S, Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **30** 358 (1970)
19. Воронков В В, Колесников Н Н *ЖЭТФ* **39** 189 (1960); Voronkov V V, Kolesnikov N N *Sov. Phys. JETP* **12** 136 (1961)
20. Попов В С *ЯФ* **12** 429 (1970); Popov V S *Sov. J. Nucl. Phys.* **12** 235 (1971)
21. Попов В С *Письма в ЖЭТФ* **11** 254 (1970); Popov V S *JETP Lett.* **11** 162 (1970)
22. Попов В С *ЖЭТФ* **59** 965 (1970); Popov V S *Sov. Phys. JETP* **32** 526 (1971)
23. Зельдович Я Б, Попов В С *УФН* **105** 403 (1971); Zel'dovich Ya B, Popov V S *Sov. Phys. Usp.* **14** 673 (1972)
24. Попов В С *ЯФ* **64** 421 (2001); Popov V S *Phys. Atom. Nucl.* **64** 367 (2001)
25. Маринов М С, Попов В С, Столин В Л *Письма в ЖЭТФ* **19** 76 (1974); Marinov M S, Popov V S, Stolín V L *JETP Lett.* **19** 49 (1974)
26. Lisin V I, Marinov M S, Popov V S *Phys. Lett. B* **69** 141 (1977)
27. Lisin V I, Marinov M S, Popov V S *Phys. Lett. B* **91** 20 (1980)
28. Ораевский В Н, Рез А И, Семикоз В Б *ЖЭТФ* **72** 820 (1977); Oraevskii V N, Rex A I, Semikoz V B *Sov. Phys. JETP* **45** 428 (1977)
29. Shabad A E, Usov V V *Phys. Rev. D* **77** 025001 (2008)
30. Godunov S I, Mached B, Vysotsky M I *Phys. Rev. D* **85** 044058 (2012)
31. Godunov S I, Vysotsky M I *Phys. Rev. D* **87** 124035 (2013)
32. Келдыш Л В *ЖЭТФ* **47** 1945 (1964); Keldysh L V *Sov. Phys. JETP* **20** 1307 (1965)
33. Переломов А М, Попов В С, Терентьев М В *ЖЭТФ* **50** 1393 (1966); Perelomov A M, Popov V S, Terent'ev M V *Sov. Phys. JETP* **23** 924 (1966)
34. Переломов А М, Попов В С, Терентьев М В *ЖЭТФ* **51** 309 (1966); Perelomov A M, Popov V S, Terent'ev M V *Sov. Phys. JETP* **24** 207 (1967)
35. Попов В С *УФН* **174** 921 (2004); Popov V S *Phys. Usp.* **47** 855 (2004)
36. Карнаков Б М, Мур В Д, Попруженко С В, Попов В С *УФН* **185** 3 (2015); Karnakov B M, Mur V D, Popruzhenko S V, Popov V S *Phys. Usp.* **58** 3 (2015)
37. Попов В С, Мур В Д, Нарожный Н Б, Попруженко С В *ЖЭТФ* **149** 623 (2016); Popov V S, Mur V D, Narozhnyi N B, Popruzhenko S V *JETP* **122** 539 (2016)
38. Ахиезер А И, Берестецкий В Б *Квантовая электродинамика* (М.: Гостехиздат, 1953); *Квантовая электродинамика* 2-е изд. (М.: Физматгиз, 1959); Перевод на англ. яз.: Akhiezer A I, Berestetskii V B *Quantum Electrodynamics* (New York: Interscience Publ., 1965); Ахиезер А И, Берестецкий В Б *Квантовая электродинамика* 3-е изд. (М.: Наука, 1969); *Квантовая электродинамика* 4-е изд. (М.: Наука, 1981)
39. Берестецкий В Б, Лифшиц Е М, Питаевский Л П *Релятивистская квантовая теория* Т. 1 (М.: Наука, 1968); Пер. на англ. яз.: Berestetskii V B, Lifshitz E M, Pitaevskii L P *Relativistic Quantum Theory* Vol. 1 (Oxford: Pergamon Press, 1971); Берестецкий В Б, Лифшиц Е М, Питаевский Л П *Квантовая электродинамика* (М.: Физматлит, 2001); Пер. на англ. яз.: Berestetskii V B, Lifshitz E M, Pitaevskii L P *Quantum Electrodynamics* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999)
40. Ландау Л Д, Померанчук И Я *ДАН СССР* **102** 489 (1955)
41. Померанчук И Я *ДАН СССР* **105** 461 (1955)
42. Pomeranchuk I Ya, Sudakov V V, Ter-Martirosyan K A *Phys. Rev.* **103** 784 (1956)
43. Ваняшин В С, Терентьев М В *ЖЭТФ* **48** 565 (1965); Vanya-shin V S, Terent'ev M V *Sov. Phys. JETP* **21** 375 (1965)
44. Ансельм А А *ЖЭТФ* **36** 863 (1959); Ansel'm A A *Sov. Phys. JETP* **9** 608 (1959)
45. Хриплович И Б *ЯФ* **10** 409 (1969); Khriplovich I B *Sov. J. Nucl. Phys.* **10** 235 (1970)
46. Politzer H D *Phys. Rev. Lett.* **30** 1346 (1973)
47. Politzer H D *Phys. Rep.* **14** 129 (1974)
48. Gross G J, Wilczek F *Phys. Rev. Lett.* **30** 1343 (1973)
49. Gross D J, Wilczek F *Phys. Rev. D* **8** 3633 (1973)
50. Gross D J, Wilczek F *Phys. Rev. D* **9** 980 (1974)
51. Adler S L *Phys. Rev.* **177** 2426 (1969)
52. Терентьев М В *Письма в ЖЭТФ* **14** 140 (1971); Terent'ev M V *JETP Lett.* **14** 94 (1971)
53. Терентьев М В *УФН* **112** 37 (1974); Terent'ev M V *Sov. Phys. Usp.* **17** 20 (1974)
54. Terent'ev M V *Phys. Lett. B* **38** 419 (1972)
55. Antipov Yu M et al. *Phys. Rev. D* **36** 21 (1987)
56. Wess J, Zumino B *Phys. Lett. B* **37** 95 (1971)
57. Witten E *Nucl. Phys. B* **223** 422 (1983)
58. Буртовой В С *Ядерная физика и инжиниринг* **5** 724 (2014); Пер. на англ. яз.: Burtovoy V S *Phys. Atom. Nucl.* **78** 1470 (2015)
59. Vysotsky M I, Zhemchugov E V *Phys. Rev. D* **93** 094029 (2016)
60. Долгов А Д, Захаров В И *ЯФ* **13** 608 (1971); Dolgov A D, Zakharov V I *Sov. J. Nucl. Phys.* **13** 345 (1971)
61. Coleman S, Witten E *Phys. Rev. Lett.* **45** 100 (1980)
62. Иоффе Б Л, Окунь Л Б, Рудик А П *ЖЭТФ* **32** 396 (1957); Ioffe B L, Okun' L B, Rudik A P *Sov. Phys. JETP* **5** 328 (1957)
63. Lee T D, Oehme R, Yang C N *Phys. Rev.* **106** 340 (1957)
64. Ландау Л Д *ЖЭТФ* **32** 405 (1957); Landau L D *Sov. Phys. JETP* **5** 336 (1957)
65. Ландау Л Д *ЖЭТФ* **32** 407 (1957); Landau L D *Sov. Phys. JETP* **5** 337 (1957)
66. Окунь Л Б, Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **32** 1587 (1957); Okun' L B, Pontecorvo B M *Sov. Phys. JETP* **5** 1297 (1957)
67. Okun L B, in *Proc. of the 1960 Annual Intern. Conf. on High Energy Physics at Rochester* (Eds E C G Sudarshan, J H Tinlot, A C Melissinos) (Rochester, N.Y.: Univ. of Rochester, 1960) p. 743
68. Иоффе Б Л, Шабалин Е П *ЯФ* **6** 828 (1967); Ioffe B L, Shabalin E P *Sov. J. Nucl. Phys.* **6** 603 (1968)
69. Высоцкий М И *ЯФ* **31** 1535 (1980); Vysotskii M I *Sov. J. Nucl. Phys.* **31** 797 (1980)
70. Inami T, Lim C S *Prog. Theor. Phys.* **65** 297 (1981)
71. Inami T, Lim C S *Prog. Theor. Phys.* **65** 1772 (1981)
72. Окунь Л Б *ЖЭТФ* **34** 469 (1958); Okun' L B *Sov. Phys. JETP* **7** 322 (1958)
73. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б *ЖЭТФ* **42** 1400 (1962); Kobzarev I Yu, Okun' L B *Sov. Phys. JETP* **15** 970 (1962)
74. Окунь Л Б *Слабое взаимодействие элементарных частиц* (М.: ГИФМЛ, 1963); Пер. на англ. яз.: Okun' L B *Weak Interactions of Elementary Particles* (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965)
75. Окунь Л Б *Лептоны и кварки* (М.: Наука, 1981); Пер. на англ. яз.: Okun L B *Leptons and Quarks* (Amsterdam: North-Holland, 1982); *Leptons and Quarks* 2nd ed. (Amsterdam: North-Holland, 1984); Окунь Л Б *Лептоны и кварки* 2-е изд. (М.: Наука, 1990)
76. Терентьев М В *ЖЭТФ* **44** 1320 (1963); Terent'ev M V *Sov. Phys. JETP* **17** 890 (1963)
77. Ademollo M, Gatto R *Phys. Rev. Lett.* **13** 264 (1964)
78. Волошин М Б, Кобзарев И Ю, Окунь Л Б *ЯФ* **20** 1229 (1974); Voloshin M B, Kobzarev I Yu, Okun L B *Sov. J. Nucl. Phys.* **20** 644 (1975)
79. Вайнштейн А И, Захаров В И, Шифман М А *ЖЭТФ* **72** 1275 (1977); Vainshtein A I, Zakharov V I, Shifman M A *Sov. Phys. JETP* **45** 670 (1977)
80. Sikivie P, Susskind L, Voloshin M, Zakharov V *Nucl. Phys. B* **173** 189 (1980)
81. Шабалин Е П *ЯФ* **28** 151 (1978); Shabalin E P *Sov. J. Nucl. Phys.* **28** 75 (1978)
82. Khriplovich I B *Phys. Lett. B* **173** 193 (1986)
83. Кобзарев И Ю, Мартемьянов Б В, Окунь Л Б, Щепкин М П *ЯФ* **32** 1590 (1980); Kobzarev I Yu, Martem'yanov B V, Okun' L B, Shchepkin M G *Sov. J. Nucl. Phys.* **32** 823 (1980)
84. Высоцкий М И *УФН* **146** 591 (1985); Vysotskii M I *Sov. Phys. Usp.* **28** 667 (1985)

85. Волошин М Б, Высоцкий М И *ЯФ* **44** 845 (1986); Voloshin M B, Vysotskii M I *Sov. J. Nucl. Phys.* **44** 544 (1986)
86. Волошин М Б, Высоцкий М И, Окунь Л Б *ЖЭТФ* **91** 754 (1986); Voloshin M B, Vysotskii M I, Okun' L B *Sov. Phys. JETP* **64** 446 (1986)
87. Иоффе Б Л, Хозе В А *ЭЧАЯ* **9** 118 (1978); Ioffe B L, Khoze V A *Sov. J. Part. Nucl.* **9** 50 (1978)
88. Novikov V A, Okun L B, Vysotsky M I *Nucl. Phys. B* **397** 35 (1993)
89. Высоцкий М И, Новиков В А, Окунь Л Б, Розанов А Н *УФН* **166** 539 (1996); Vysotskii M I, Novikov V A, Okun L B, Rozanov A N *Phys. Usp.* **39** 503 (1996)
90. Novikov V A, Okun L B, Rozanov A N, Vysotsky M I *Rep. Prog. Phys.* **62** 1275 (1999)
91. Померанчук И Я *ЖЭТФ* **34** 725 (1958); Pomeranchuk I Ya *Sov. Phys. Usp.* **7** 499 (1958)
92. Gribov V N, Pomeranchuk I Ya *Phys. Rev. Lett.* **8** 343 (1962)
93. Грибов В Н, Померанчук И Я *ЖЭТФ* **42** 1141 (1962); Gribov V N, Pomeranchuk I Ya *Sov. Phys. JETP* **15** 788 (1962)
94. Грибов В Н, Померанчук И Я *ЖЭТФ* **43** 1970 (1962); Gribov V N, Pomeranchuk I Ya *Sov. Phys. JETP* **16** 1387 (1963)
95. Novikov V A, Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Ann. Physics* **105** 276 (1977)
96. Novikov V A, Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Phys. Rev. D* **16** 223 (1977)
97. Вайнштейн А И, Волошин М Б, Захаров В И, Новиков В А, Окунь Л Б, Шифман М А *УФН* **123** 217 (1977); Vainshtein A I, Voloshin M B, Zakharov V I, Novikov V A, Okun' L B, Shifman M A *Sov. Phys. Usp.* **20** 796 (1977)
98. Novikov V A, Okun L B, Shifman M A, Vainshtein A I, Voloshin M B, Zakharov V I *Phys. Rep.* **41** 1 (1978)
99. Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Nucl. Phys. B* **147** 385 (1979); *Nucl. Phys. B* **147** 448 (1979); *Nucl. Phys. B* **147** 519 (1979)
100. Ioffe B L *Nucl. Phys. B* **188** 317 (1981)
101. Беляев В М, Иоффе Б Л *ЖЭТФ* **83** 869 (1982); Belyaev V M, Ioffe B L *Sov. Phys. JETP* **56** 493 (1982)
102. Eletsky V L, Kogan Ya I *Z. Phys. C* **28** 155 (1984)
103. Ioffe B L, Smilga A V *Nucl. Phys. B* **232** 109 (1984)
104. Волошин М Б, Окунь Л Б *Письма в ЖЭТФ* **23** 369 (1976); Voloshin M B, Okun' L B *JETP Lett.* **23** 333 (1976)
105. Hanhart C, Kalashnikova Yu S, Kudryavtsev A E, Nefediev A V *Phys. Rev. D* **85** 011501(R) (2012)
106. Badalian A M, Simonov Yu A, Bakker B L G *Phys. Rev. D* **91** 056001 (2015)
107. Богомольный Е Б *ЯФ* **24** 861 (1976); Bogomol'nyi E B *Sov. J. Nucl. Phys.* **24** 449 (1976)
108. Novikov V A, Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Nucl. Phys. B* **191** 301 (1981)
109. Novikov V A, Shifman M A, Vainshtein A I, Zakharov V I *Nucl. Phys. B* **223** 445 (1983)
110. Лифшиц Е М, Судаков В В, Халатников И М *ЖЭТФ* **40** 1847 (1961); Lifshitz E M, Sudakov V V, Khalatnikov I M *Sov. Phys. JETP* **13** 1298 (1961)
111. Захаров В И *Письма в ЖЭТФ* **12** 447 (1970); Zakharov V I *JETP Lett.* **12** 312 (1970)
112. Vainshtein A I *Phys. Lett. B* **39** 393 (1972)
113. Зельдович Я Б, Окунь Л Б, Пикельнер С Б *УФН* **87** 113 (1965); Zel'dovich Ya B, Okun L B, Pikel'ner S B *Sov. Phys. Usp.* **8** 702 (1966)
114. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б, Померанчук И Я *ЯФ* **3** 1154 (1966); Kobzarev I Yu, Okun L B, Pomeranchuk I Ya *Sov. J. Nucl. Phys.* **3** 837 (1966)
115. Окунь Л Б *УФН* **177** 397 (2007); Okun L B *Phys. Usp.* **50** 380 (2007)
116. Блинные С И *УФН* **184** 194 (2014); Blinnikov S I *Phys. Usp.* **57** 183 (2014)
117. Зельдович Я Б, Кобзарев И Ю, Окунь Л Б *ЖЭТФ* **67** 3 (1974); Zel'dovich Ya B, Kobzarev I Yu, Okun' L B *Sov. Phys. JETP* **40** 1 (1975)
118. Kobsarev I Yu, Okun L B, Zeldovich Ya B *Phys. Lett. B* **50** 340 (1974)
119. Dolgov A D, Godunov S I, Rudenko A S, Tkachev I I *JCAP* (10) 027 (2015)
120. Высоцкий М И, Долгов А Д, Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **26** 200 (1977); Vysotskii M I, Dolgov A D, Zel'dovich A D *JETP Lett.* **26** 188 (1977)
121. Долгов А Д, Зельдович Я Б *УФН* **130** 559 (1980); Dolgov A D, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **53** 1 (1981)
122. Долгов А Д *УФН* **184** 211 (2014); Dolgov A D *Phys. Usp.* **57** 199 (2014)
123. Долгов А Д *ЯФ* **33** 1309 (1981); Dolgov A D *Sov. J. Nucl. Phys.* **33** 700 (1981)
124. Barbieri R, Dolgov A *Phys. Lett. B* **237** 440 (1990)
125. Barbieri R, Dolgov A *Nucl. Phys. B* **349** 743 (1991)
126. Dolgov A D, Villante F L *Nucl. Phys. B* **679** 261 (2004)
127. Dolgov A D *Phys. Rep.* **370** 333 (2002)
128. Dolgov A D, Fukugita M *Письма в ЖЭТФ* **56** 129 (1992); *JETP Lett.* **56** 123 (1992)
129. Dolgov A D, Fukugita M *Phys. Rev. D* **46** 5378 (1992)
130. Dolgov A D, Hansen S H, Semikoz D V *Nucl. Phys. B* **503** 426 (1997)
131. Dolgov A D, Hansen S H, Semikoz D V *Nucl. Phys. B* **543** 269 (1999)
132. Dolgov A D et al. *Nucl. Phys. B* **632** 363 (2002)
133. Dolgov A D, Linde A D *Phys. Lett. B* **116** 329 (1982)
134. Долгов А Д, Кирилова Д П *ЯФ* **51** 273 (1990); Dolgov A D, Kirilova D P *Sov. J. Nucl. Phys.* **51** 172 (1990)
135. Бакланов П В, Блинные С И, Поташов М Ш, Долгов А Д *Письма в ЖЭТФ* **98** 489 (2013); Baklanov P V, Blinnikov S I, Potashov M Sh, Dolgov A D *JETP Lett.* **98** 432 (2013)
136. Dolgov A D, Kawasaki M *Phys. Lett. B* **573** 1 (2003)
137. Arbuzova E V, Dolgov A D *Phys. Lett. B* **700** 289 (2011)
138. Arbuzova E V, Dolgov A D, Reverberi L *Eur. Phys. J. C* **72** 2247 (2012)
139. Arbuzova E V, Dolgov A D, Reverberi L *Astropart. Phys.* **54** 44 (2014)
140. Arbuzova E V, Dolgov A D, Reverberi L *Phys. Lett. B* **739** 279 (2014)
141. Долгов А Д *Письма в ЖЭТФ* **29** 254 (1979); Dolgov A D *JETP Lett.* **29** 228 (1979)

## 70 years of ITEP: some theoretical results

M.I. Vysotsky<sup>(1,2,3)</sup>, A.D. Dolgov<sup>(1,4,5)</sup>, V.A. Novikov<sup>(1,2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> National Research Center 'Kurchatov Institute', A.I. Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, ul. Bol'shaya Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation;

<sup>(2)</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University),

*Institutskii per. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation;*

<sup>(3)</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),

*Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation;*

<sup>(4)</sup> Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, Polo Scientifico e Tecnologico – Edificio C, Via Saragat 1, 44122 Ferrara, Italy;

<sup>(5)</sup> Novosibirsk State University,

*ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation*

*E-mail: (1, 2, 3) vysotsky@itep.ru, novikov@itep.ru, (1, 4, 5) dolgov@fe.infn.it*

Some important results of the 70 years of theoretical research at the Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics (ITEP) are reviewed.

**Keywords:** theory, high energy physics, field theory, supersymmetry, QCD sum rules, heavy quarks, anomaly

PACS numbers: **01.65. +g**, **11.10. –z**, **12.10. –g**

Bibliography — 141 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **186** (8) 869–878 (2016)

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037733

Received 25 December 2015

*Physics – Uspekhi* **59** (8) (2016)

DOI: 10.3367/UFNe.2015.12.037733