

Прощайте, частицы!

Б.П. Косяков

Представлена попытка очертить ход дел в экспериментальной и теоретической областях физики ядра и элементарных частиц, определивший её финал, и дано несколько отрывочных замечаний о нынешнем состоянии этих областей. Речь идёт о событиях и их участниках, известных из литературы, но представленных здесь с позиции человека, чья 50-летняя (1972–2022 гг.) трудовая деятельность протекала во Всесоюзном НИИ экспериментальной физики, г. Саров. Чтобы прогнозировать судьбу физики частиц и близких ей астрофизики и космологии, полезно познакомиться с фактами, относящимися к другому разделу физики, уже пережившему стадию заката ~ 30 лет назад, — физики ядерного оружия. Эти факты важны не сами по себе, а как свидетельство нарастающих проблем науки и социальной жизни, которые не только далеки от удовлетворительного разрешения, но даже не были предметом сколько-нибудь серьёзного обсуждения.

Ключевые слова: судьба фундаментальной физики, закат эры физики ядерного оружия, проблемы ядерных реакторов, особенности национального развития науки

PACS numbers: 01.10.Hx, 01.60.+q, 01.78.+p, 03.70.+k, 04.70.-s,
21.10.-k, 21.90.+f, 27.90.+b, 28.50.-k, 29.20.-c

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.06.t139>

Содержание

1. О чём эта статья (1).
 2. Вехи расставания (2).
 3. Прощай, оружие! (4).
3.1. А что потом? А что потом? 3.2. Словно девочки-сёстры из непрожитых лет, выбегая на остров, машут мальчику вслед.
 4. Ядра — чистый изумруд; но, быть может, люди врут (8).
4.1. Зри в корень. 4.2. Суди, дружок, не свыше сапога. 4.3. Это гады-физики на пари раскрутили шарик наоборот.
 5. Особенности национальной науки (16).
 6. Остров Тяпина (18).
 7. Заключение (20).
- Список литературы (20).

1. О чём эта статья

Заголовок статьи перефразирует название знаменитого романа "A Farewell to Arms" Эрнеста Хемингуэя, в свою очередь заимствованное из названия сонета английского драматурга XVI века Джорджа Пиля. Эпоха исследований, связанных с физикой элементарных частиц и её теоретической базой, — квантовой теорией поля, близится к завершению. Авансцену захватывают астрофизика и космология. Внимательный сторонний наблюдатель может судить об изменении "мейнстрима" по достиже-

ниям, которые за последнюю пару десятилетий были удостоены Нобелевской премии. Этот факт, конечно, не является доказательством, но как примета вполне годится. Более веский довод состоит в следующем. Физика, при всех должных оговорках, — это всё же экспериментальная наука. Великие экспериментальные открытия потрясают своей неожиданностью. Из галилеевских опытов мы узнали, что свободное падение любых тел происходит одинаково, независимо от их массы; резерфордские опыты научили нас тому, что атом состоит из массивного ядра размером $\sim 10^{-13}$ см, вокруг которого вращаются лёгкие электроны на расстояниях $\sim 10^{-8}$ см, иначе говоря, вещество состоит в основном из пустот; а из сравнительно недавних астрономических наблюдений мы выяснили, что Вселенная расширяется с нарастающим ускорением. Наука, в которой иссякает поток экспериментальных сюрпризов, уходит из центра внимания. Как раз это и происходит с физикой элементарных частиц.

Я попытаюсь — в меру своей осведомлённости и своего понимания — очертить ход дел в экспериментальной и теоретической областях физики частиц, определивший её финал, и приведу несколько отрывочных замечаний, касающихся её нынешнего состояния. Очерк повествует о событиях и их участниках, известных из литературы, но представленных здесь с позиции человека, чья 50-летняя (1972–2022 гг.) трудовая деятельность протекала во Всесоюзном НИИ экспериментальной физики, г. Саров¹. Первые 20 лет я был привлечён к разработке и

Б.П. Косяков

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
просп. Мира 37, 607188 Саров, Нижегородская обл.,
Российская Федерация
E-mail: kosyakov.boris@gmail.com, kosyakov@vniief.ru

Статья поступила 22 июня 2023 г.

¹ Первоначальное название организации: Конструкторское бюро-11 (КБ-11). Оно размещалось в посёлке Саров Мордовской АССР, который стал закрытым объектом. Ныне это Всероссийский НИИ экспериментальной физики (ВНИИЭФ). Посёлок вырос в город, одно время носивший имя Арзамас-16. Теперь это Саров. Город по-прежнему закрыт.

совершенствованию систем ядерного оружия, поэтому мог уделить лишь малую часть своего времени и сил изучению текущих проблем в теории поля и физике частиц, но с 1991 г. отошёл от оборонных дел и полностью погрузился в эти проблемы. Я был знаком с рядом отечественных и зарубежных учёных — героев обсуждаемой эпопеи, и излагаю сведения, полученные из первых рук; в противном случае даю ссылки на их источники.

Научные исследования ведутся в конкретных исторических условиях. Их итоги и последствия определяются не только объективной логикой развития предмета, но и множеством субъективных обстоятельств. Чтобы прогнозировать судьбу физики частиц и близких ей астрофизики и космологии, полезно познакомиться с фактами, относящимися к другому разделу физики, уже пережившему стадию заката ~ 30 лет назад, — физики ядерного оружия. Не являясь носителем государственной тайны более четверти века, я могу говорить открыто о ряде вещей, обсуждаемых как в научной литературе, так и в Интернете.

Надеюсь, широта охваченных тем не отпугнёт читателя. Если он не согласен с выраженной здесь точкой зрения по каким-либо конкретным вопросам, то я готов внимательно выслушать критику — пусть жёсткую, но ясную и аргументированную.

2. Вехи расставания

21 октября 1993 г. Конгресс США решил свернуть строительство Сверхпроводящего суперколлайдера (англ. Superconducting Super Collider, SSC). К этому моменту было истрачено свыше 2 млрд долл., вырыто 23 км тоннеля, построено 17 шахт с поверхности, начато строительство зданий и подземных экспериментальных залов; короче говоря, выполнено $\sim 20\%$ общего объёма работ.

Проект предполагал создание протон-протонного коллайдера периметром 87 км для разгона протонов до энергии 20×20 ТэВ со светимостью в пучке $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Официальной причиной закрытия проекта названо большое превышение сметы: от начальной оценки 5,9 млрд долл. до запрашиваемых в конце 11 млрд. Между тем решение было принято через три недели после расстрела Белого дома в Москве 3–4 октября 1993 г., так что подлинная причина, на мой взгляд, совершенно ясна: наука, развивавшаяся в СССР, прекратила своё существование.

Гонка в исследовании элементарных частиц, скажем прямо, — дань моде XX в. По стечению обстоятельств научное сообщество ринулось в глубины микромира, а не, допустим, в биологию. Стоит ли Америке и дальше тратить десятки миллиардов долларов, притворяясь, будто испытываешь бескорыстный интерес к физике частиц, если соперника больше нет? Перед кем хвастать Нобелевскими премиями? Иисус учил: "Не мечите бисер перед свиньями".

Такой настрой ведёт к постепенному закрытию в США больших ускорительных систем. Стэнфордский линейный ускоритель (англ. Stanford Linear Accelerator, SLAC) — крупнейший в мире ускоритель электронов на 50 ГэВ, перепрофилируется в источник рентгеновского излучения для приложений в физике твёрдого тела, химии, биологии и медицине. Тэватрон — протон-антипротонный коллайдер с энергией в системе центра масс 1,96 ТэВ — завершил работу в 2011 г. Единственная

крупная установка — Релятивистский коллайдер тяжёлых ионов (англ. Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC), предназначенный для разгона ионов золота до энергии 100 ГэВ на нуклон с целью образования кварк-глюонной плазмы при столкновениях ионов, работающий с 2000 г. до настоящего времени, находится на грани останковки.

В 2008 г. ЦЕРН запустил Большой адронный коллайдер (англ. Large Hadron Collider, LHC), кольцевой ускоритель частиц на встречных пучках периметром 26,7 км, предназначенный для разгона протонов до 6,5 ТэВ или ионов свинца до 1,4 ТэВ на нуклон. Европейский проект LHC осуществлён через 15 лет после закрытия американского проекта SSC, но имеет более скромные показатели. Впрочем, нужно ли удивляться? Как однажды заметил Михаил Юрьевич Лермонтов, "мода, начав с высших слоёв общества, спустилась к низшим, которые её донашивают".

Учёные убедили европейские правительства выделить им 6 млрд евро на создание LHC для экспериментальной проверки существования завершающего строительного блока Стандартной модели физики частиц — скалярного бозона Хиггса, и выяснения, действительно ли лобовое столкновение тяжёлых ионов превращает "нормальную ядерную материю" в кварк-глюонную плазму, или американские коллеги на RHIC выдают желаемое за действительное. Обе задачи успешно выполнены, и физики приступили к разработке коллайдеров с более высокими энергиями и светимостями. После LHC предполагалось построить Кольцевой коллайдер будущего (англ. Future Circular Collider, FCC) периметром 80–100 км для разгона встречных пучков протонов с энергией 100 ТэВ, создания электрон-позитронной фабрики с энергией пучков 45–175 ГэВ и их комбинации, открывающей путь к изучению всевозможных адронных, лептонных и адрон-лептонных реакций [1].

Жизнеспособны ли эти замыслы? Представим себе такой полуфантастический сюжет. Встречаются авторитетный физик (Ф), крупный европейский чиновник (Ч) и богатый благотворитель (Б). Атмосфера встречи непринуждённая, располагающая к откровенности. Ф пытается выяснить возможность финансирования проекта FCC. Завязывается следующий разговор:

(Б) — Каков предполагаемый масштаб затрат на строительство FCC?

(Ф) — Смета, я надеюсь, не превысит 10 млрд евро. Финансовую нагрузку можно разумно распределить по странам и компаниям и растянуть во времени, если начать готовиться уже сегодня. Вклад наверняка внесут русские, определённо — китайцы, скорее всего — японцы, вполне возможно — американцы. Перепадёт отовсюду — от австралийцев, индусов, канадцев, корейцев.

(Б) — Русские?

(Ф) — Да. Насколько мне известно, участие России в строительстве международного термоядерного реактора во Франции продолжается. Чем строительство FCC хуже?

(Ч) — Что вы намерены открыть с помощью столь дорогого инструмента?

(Ф) — Мы попытаемся выйти за рамки Стандартной модели элементарных частиц.

(Б) — Зачем? Разве само слово "стандартный" не синоним слова "совершенный"?

(Ф) — Нет, модель далеко не совершенна. Она не является теорией единства трёх фундаментальных взаимодействий природы: сильных, электромагнитных и

слабых. Начнём с того, что группа внутренней симметрии модели $SU(2) \times U(1) \times SU_c(3)$ не полупроста, а значит, нет единой калибровочной константы связи....

(Ч) — Ой-вей, у модели плохая карма! А что, FCC эти взаимодействия объединит?

(Ф) — Нет, конечно. Энергии частиц, разгоняемых с помощью FCC, далеко не хватит, чтобы добраться до слияния этих трёх взаимодействий. Слияние ожидается где-то в области $10^{14} - 10^{16}$ ГэВ. Но пути трёх бегущих констант взаимодействия пересекутся в одной точке этой области, если в микромире присутствует суперсимметрия [2], проще говоря, если у всех наблюдаемых частиц имеются тяжёлые суперпартнёры. К сожалению, на LHC никаких следов суперсимметрии не обнаружено....

(Ч) — И как прикажете доступно и убедительно втолковать среднему европейцу, что 10 млрд евро из его налогов нужно отдать на постройку FCC лишь потому, что у жрецов чистого разума не получается свести их чакры к точке $E = 10^{16}$ ГэВ?

(Ф) — Юмор оценил! Однако давайте переключимся на более деловой тон.

(Ч) — Что ж, давайте. Всё познаётся в сравнении. Отто Ган и Фриц Штрассман установили, что ядро ^{235}U можно разделить нейтроном на два осколка плюс 2–3 нейтрона, с выделением 200 МэВ энергии. Таким образом, был открыт источник, энергия которого в 10^8 раз больше энергии химических источников, основанных на разрыве молекулярных или атомных связей. Вскоре создаются ядерные бомбы и атомные электростанции. Их появление — второе по значимости событие в истории, если первым считать изгнание Адама и Евы из Рая. Тогда человек утратил личное бессмертие, но сохранил надежду, что жизнь продолжится в потомках. Ныне цена познания ещё дороже. Неосторожный Номо sapiens может вообще исчезнуть с планеты. Чтобы жить в новой реальности, человечеству нужно быстро взрослеть. Итак, прикладная сторона ядерной физики всем ясна! В конце 1940-х гг. начинается бум экспериментальных открытий элементарных частиц. К данному моменту их открыто великое множество, а их свойства подробно изучены. Ну, и каковы же практические плоды исследований? Как повлияло знание о частицах на наш быт, технику?

(Ф) — Оставим в стороне мировоззренческое и культурное значение открытий....

(Ч) — Да, предоставим эту честь гуманитариям. Поговорим на утилитарные темы.

(Ф) — Я хочу обратить внимание на две важные вещи. Во-первых, мы пришли к пониманию, что лептоны не имеют внутренней структуры; на сегодняшний день они считаются элементарными. Адроны, напротив, оказываются составными системами. Они построены из кварков. Существует стойкое убеждение², что извлечь кварк из адрона невозможно; в изолированном виде кварк не наблюдается. Во всяком случае не нужно возлагать надежд на открытие новых источников энергии, обусловленных расщеплением адронов. Самый ёмкий поставщик энергии — аннигиляция частиц и античастиц. Но этот источник нам практически недоступен, так как в естественных условиях антивещество отсутствует (в нашем мире царит барионная асимметрия), а на искусственное накопление антивещества требуются огромные

затраты энергии. Во-вторых, знание законов микромира снимает страхи насчёт реальных и мнимых опасностей, таящихся в микромире. Например, перед испытанием первой водородной бомбы на атолле Эниветок была тщательно исследована вероятность инициирования незатухающей термоядерной детонации дейтерия, растворённого в океанской воде. Перед запуском RHIC состоялись дебаты в массмедиа и научной литературе о том, может ли кварк-глюонная плазма превратиться в стрейнджит³, что грозило бы Земле стать её странным двойником [5, 6]. До запуска LHC широкой общественности были предъявлены доказательства, что, если при столкновении протонов родится микроскопическая чёрная дыра, то она не засосёт в себя всю Землю или хотя бы Женевское озеро.

(Ч) — Но вернёмся к коллайдерам. Вы ведь не ставите вопрос о непосредственном экспериментальном исследовании физики в области Великого объединения $E \sim 10^{15}$ ГэВ? Это неудивительно. При нынешнем уровне развития ускорительной техники на участке длиной 1 км максимальный разгон протона достигает $\leq 10^3$ ГэВ. Поэтому периметр коллайдера, предназначенного для столкновений при 10^{15} ГэВ, должен быть не менее одного светового года, т.е. 10^{13} км. Отзвуки процессов из области Великого объединения вы пытаетесь уловить, регистрируя редчайшие отклонения в обычных процессах, происходящих при энергиях порядка 1–100 ТэВ. А вероятность редкого явления можно оценить из соотношения неопределённости для флуктуации энергии ΔE и времени его осуществления Δt , которое (в естественных единицах $\hbar = 1, c = 1$) имеет вид $\Delta E \Delta t \sim 1$. При флуктуации $E = 10^{15}$ ГэВ находим, что такое крайне мимолётное явление происходит на протяжении $\Delta t \sim 10^{-40}$ с. Другими словами, вероятность того, что оно случится в течение данной секунды, равна 10^{-40} . Чтобы нарастить статистику, нужно повторить ситуацию с большим числом участвующих частиц. В переводе на бытовой язык это означает, что процессы, наблюдаемые на современных коллайдерах, сообщат нам кое-что интересное о Великом объединении, если мы будем готовы съесть чудовищное количество электроэнергии⁴. Принесёт ли европейское "общество потребления" такую жертву на алтарь познания?

(Б) — Ну, если коллайдер стал пустой забавой, почему прагматичные американцы не закрывают RHIC вот уже 22 года, хотя в статьях по исследованию кварк-глюонной плазмы нельзя уловить и слабых намёков на открытия, способные претендовать на Нобелевскую премию? Напомню, что функционирование RHIC ежегодно обходится в 100–150 млн долл.; суммарные затраты, вероятно, превысили 3 млрд долл.

(Ф) — Это тем более странно, если учесть, что те же исследования на LHC проводят при более высоких энергиях столкновений, с использованием ядер ^{82}Pb , которые тяжелее, чем ядра ^{79}Au . Разумно предположить, что кто-то (не военные ли?) лелеет надежду на открытие нового механизма получения энергии из фазового превращения

³ Strangelet — гипотетический объект, представляющий собой связанное состояние u-, d- и s-кварков в равных долях [3, 4]. Такие объекты являются элементами странной материи. Предполагается, что она более стабильна, чем обычная материя. Поэтому контакт стрейнджлита с обычной материей превращает её в странную материю.

⁴ Для справки: в рабочем режиме LHC потребляет $\sim 10\%$ электроэнергии всего кантона Женева.

² Хотя строгое, общепризнанное доказательство этой концепции отсутствует.

ядерной материи в кварк-глюонную плазму или из превращения кварк-глюонной плазмы в многочисленные разлетающиеся адроны. В самом деле, температура этих переходов ~ 200 МэВ, что в 10^4 раз выше температуры при взрыве термоядерной бомбы. Возможно, продвижение по шкале энергий на 4 порядка и служит стимулом к продолжению финансирования чисто научного поиска.

(С) — При вольном понимании ваших слов вы, похоже, не исключаете возможность, что тяжёлое ядро можно не только разделить на два осколка плюс 2–3 нейтрона, но даже полностью расщепить на составляющие его нуклоны, если превратить это ядро в сгусток кварк-глюонной плазмы. Но ведь начальный этап требует затрат энергии на разгон и столкновение ядер, заметно превышающей энергию продуктов распада сгустка кварк-глюонной плазмы. Где же тут энергетическая выгода?

(Ф) — Неформальный характер нашей беседы допускает свободные аналогии между физикой ядра и проблемными областями квантовой хромодинамики. Деление ядра было труднообразимым явлением, пока не открыли "снаряд", легко проникающий в ядро и нарушающий его стабильность, — нейтрон. Такого рода снаряд, способный, войдя в ядро, возбудить его настолько, чтобы превратить в сгусток кварк-глюонной плазмы, ещё не известен. Возможно, на эту роль подошёл бы глюбол — частица, не содержащая кварков, а состоящая из одних глюонов. Существование этой частицы, предсказанной на заре развития квантовой хромодинамики, с определённой уверенностью не установлено экспериментально. Глюбол нейтрален, бесцветен, обладает нулевыми значениями констант связи слабого изоспина и слабого гиперзаряда. Он вообще не взаимодействует с окружающей средой как связанное адронное состояние и может беспрепятственно проникнуть в ядро. Чтобы вступить в сильное взаимодействие, глюбол должен расщепиться на два глюона, т.е. подвергнуться деконфайнменту. Но фазовый переход конфайнмент-деконфайнмент означает перестройку структуры вакуума, а это, в свою очередь, может превратить ядро, внутри которого застрял глюбол, в сгусток кварк-глюонной плазмы.

(Ц) — "Снаряд", вы сказали, не открыт. Не уверен, что его открытие сулит нам благо.

(Б) — Складывается впечатление, что мы подошли к пределу затрат на вещи, по своему характеру оторванные от насущных потребностей человека. Такое уже не раз случалось в истории. Например, строительство пирамид в древнем Египте достигло верхнего предела в расходовании ресурсов при сооружении пирамиды Хеопса.

(Ч) — Да, уроки истории полезно помнить. Современность породила много видов деятельности, полезных по замыслу, но не представляющих собой категорического императива, например, занятие спортом. Результаты физических состязаний рано или поздно достигают естественных границ, и тогда возникает профессиональный спорт. Люди массово жертвуют здоровьем и калечат свои и чужие судьбы. Однако и здесь достижения быстро подходят к пределу. И в дело вступает допинг. Я далёк от прямых сравнений спорта и науки о микромире. Но всё же....

Разумеется, это метафора. В жизни такая встреча заполнена благопристойными умолчаниями. Но от этого её итог оказывается не менее жестоким.

В конце XX в. произошёл коллапс другого раздела физики. Этому посвящено не так уж много слов⁵. Но было бы, мне кажется, нелишним упомянуть и его тоже.

3. Прощай, оружие!

10 сентября 1996 г. на 50-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН было принято решение заключить Договор⁶ о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [8]. Договор носит бессрочный характер и предусматривает выход из него лишь в случае угрозы высшим национальным интересам.

Как такое могло произойти, чтобы правительства всех ведущих ядерных держав синхронно исполнились миролюбия? Это событие, на мой взгляд, порождено двумя обстоятельствами.

Во-первых, отыскание новых перспектив ядерного оружия в США и СССР вышло на насыщение. Дальнейшее продвижение в этой науке становилось напрасной тратой сил. Все мыслимые варианты физических схем ядерных и термоядерных зарядов были уже опробованы в расчётах и полигонных опытах, а надёжность и безопасность созданных систем достигли приемлемого уровня.

Критическим событием оказался провал стратегической оборонной инициативы Рональда Рейгана, известной в публичном обсуждении под названием "Программы звёздных войн". Не только учёным, но и самым консервативным политикам стало очевидно, что создать боевой рентгеновский лазер в ближнем космосе не по силам ни одной из стран в сколько-нибудь обозримом будущем⁷.

Во-вторых, Запад пребывал в эйфории от успехов по умирению "Империи зла", политические лидеры которой сами развалили сначала Варшавский блок, а затем и СССР. Односторонний мораторий на ядерные испытания СССР объявил в 1990 г. Казалось, уступчивости русских нет предела.

Перед заключением Договора Англия и Франция отстаивали право ядерных стран на периодическое проведение ядерных испытаний для поддержания боеготовности существующих арсеналов. Эту инициативу отклонили другие члены ядерного клуба и неядерные страны. Случилось ли это по недальновидности или из конъюнктурных соображений — не знаю. Но само предложение кажется мне разумным, и к нему, я надеюсь, ещё можно вернуться.

Ядерные боеприпасы, изготовленные полвека назад, нельзя воспроизвести по прежним технологиям. Изменилась металлургия, механическая обработка, напыление, сварка, робототехника, химия, нанотехнологии. Много производственных процессов запрещены как вредные для здоровья персонала или экологически неприемлемые. Ряд технологических цепочек, отлаженных в СССР, разрушен в 1990-е гг. Хотя США не испытывали таких потрясений экономики, там тоже произошла масштабная перестройка индустрии, связанная с окончанием гонки вооружений и сокращением государственных заказов на ядерную продукцию.

⁵ Начальный этап "пути к причалу" подробно описан в книге [7].

⁶ Для краткости будем использовать термин "Договор".

⁷ Пробовали — не получилось. Я был свидетелем тех событий, но участия в них не принимал и допуска к документам не имел. По моим убеждениям (и мою оценку разделяли многие мои более искушённые в разработке ядерного оружия коллеги), ничего не могло выйти ни у американцев, ни у нас. Ветераны этой истории от комментариев в открытой литературе воздерживаются.

Ядерный боеприпас, произведённый в России или США на замену боеприпаса с истёкшим регламентным сроком, может оказаться не равным его предшественнику по эксплуатационным свойствам. Действие ядерного устройства обязано множеству нелинейных физических процессов, которые чувствительны к начальным условиям, в частности к заводскому исполнению ядерного заряда. Отдельные ядерные заряды, предназначенные для замены зарядов, стоящих на боевом дежурстве, необходимо трижды в столетие испытывать. Если этого не делать, то боевая единица вполне может утратить свою функцию — быть реальным средством сдерживания.

Другой довод состоит в том, что творческая активность научного специалиста укладывается в интервал 30–45 лет. Передача эстафеты от поколения специалистов с опытом разработки, испытания и сдачи на вооружение систем ядерного оружия новому поколению не терпит отлагательства. Ветеранов советской ядерной эпохи, продолжающих трудовую деятельность, осталось мало. В США ситуация такая же.

В строгом смысле слова создание ядерного оружия не является наукой. В нём заключён элемент искусства. Систематически учесть все существенные физические процессы в работе ядерного заряда — затея безнадежная даже с учётом огромных достижений в расчётах на современных компьютерах. Научить профессии можно лишь на практике, пройдя весь путь от разработки физической схемы до полигонного испытания. Роль опытного наставника может здесь оказаться критически важной.

Договор подписали 183 государства. Среди 44 государств, владеющих ядерным потенциалом, не подписали Индия, КНДР и Пакистан. Ратифицировали Договор 164 государства. Из числа стран, входящих в "список 44-х" не ратифицировали Египет, Израиль, Индия, Иран, Китай, КНДР, Пакистан и США. Договор официально не вступил в силу. Тем не менее в настоящее время все страны соблюдают отказ от полномасштабных ядерных испытаний.

Опыт показывает, что человечество не готово к полному ядерному разоружению. Благодаря ракетно-ядерному равновесию, на протяжении почти восьми десятилетий удавалось предотвратить развязывание третьей мировой войны. Возможно, Договор будет легче подписать и ратифицировать всеми странами, если пересмотреть его текст с учётом упоминавшегося предложения Англии и Франции. Разумеется, не может быть и речи о возможности испытаний каких-либо новых или даже слегка усовершенствованных систем ядерного оружия. Обсуждать следует лишь проверку отдельных стоящих на вооружении страны ядерных боеприпасов в полномасштабных подземных испытаниях — и при надлежащем международном контроле.

Сейчас не самый подходящий момент для подобных инициатив. Противостояние Запада и России приняло опасный характер и близится к кульминации. Поэтому разговор о возобновлении ядерных испытаний может выглядеть как провокационный выпад одного из оголтелых ядерщиков. Но я просил бы не спешить с выводами.

За ударной волной всегда следует волна разрежения. Мир успокоится. И тогда, возможно, ещё вспомнят мои доводы и сочтут их заслуживающими обсуждения. Не уверен, что доживу до той поры. Впрочем, это не так важно, свой долг я исполнил.

3.1. А что потом? А что потом?

Лаврентий Павлович Берия закладывал основы ядерно-оружейного комплекса СССР, близко следуя успешно функционировавшему американскому образцу. Например, в создании новых и совершенствовании существующих типов ядерных боеприпасов, возложенном на ВНИИЭФ, скопировано назначение Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL)⁸. В структуре и численности штата LANL и ВНИИЭФ тоже много сходства. Но были и серьёзные отличия, например, объём финансирования.

Позднее в США был создан ещё один ядерный объект — Ливерморская национальная лаборатория им. Эрнеста Лоуренса (LLNL), а в СССР — Всесоюзный НИИ приборостроения в г. Челябинск-70⁹.

Сегодня в США существуют три основных ядерных оружейных центра — это LANL, LLNL и Сандийские национальные лаборатории (SNL) с общим числом постоянных сотрудников 25000 человек. Суммарный бюджет этих центров в 2015 г. по данным Википедии превысил 6 млрд долл. Траты такого масштаба на протяжении 30 лет¹¹ требуется как-то объяснять налогоплательщику.

После подписания Договора исходные функции LANL, LLNL и SNL оказываются утраченными¹⁰. Из прежнего круга задач осталось поддержание боеготовности и безопасности ранее созданных ядерных боеприпасов. Но для решения этой задачи, казалось бы, не нужны огромные институты и миллиардные траты. Достаточно небольшой группы узких специалистов, знающих устройство ядерных боеприпасов. С другой стороны, если Договор будет нарушен в обозримом будущем — а это вполне допустимо, — то как ответить на такой вызов, не имея коллектива оружейных разработчиков, в частности, специалистов с реальным опытом разработки и испытаний ядерных зарядов?

LANL, LLNL и SNL постоянно снабжались наиболее передовой вычислительной техникой. Наконец, там были установлены суперкомпьютеры из списка TOP500 [9], предназначенные для расчётов работы ядерных боеприпасов в рамках программы Advanced Simulation and Computing Program. Отметим, что ядерное и термоядерное оружие СССР и США создавалось с использованием одномерных или двумерных расчётов. Мощность компьютеров тогда была на два порядка ниже, чем у нынешних смартфонов. Для описания термоядерного взрыва в трёхмерных расчётах необходим компьютер мощностью свыше 100 Тфлопс. В 2005 г. с вводом в строй компьютера ASC Purple в LLNL эта программа достигла поставленной цели.

Возвратимся к доказательству "теоремы существования" LANL, LLNL и SNL. Здесь остаётся единственный

⁸ Работники КБ-11 иногда между собой называли в шутку свой объект Лос-Арзамасом.

⁹ Ныне Всероссийский НИИ технической физики (ВНИИТФ) им. академика Евгения Ивановича Забабахина. Челябинск-70 переименован в Снежинск.

¹⁰ Человеку "с улицы", вероятно, нужно пояснить, что создание нового образца ядерного оружия без полномасштабных испытаний невозможно. Здравый смысл и некоторый опыт обращения с механическими устройствами подсказывают, что без серии испытаний не получится произвести даже боеготовной модификации обычного стрелкового оружия. Что уж говорить о гораздо более сложных и "капризных" системах ядерного оружия.

¹¹ США остановили свои ядерные испытания в 1992 г.

неотразимый довод: "Да, гонка вооружений позади.... Но Россия-то сохраняет свои ядерные центры!"

Этот довод, вероятно, предвидел Вашингтон, когда в 1990-е гг. потребовал от Кремля продолжать кормить Арзамас-16 и Челябинск-70, ибо Ельцинское правительство в отношении этого советского наследия напоминало петуха из басни, который нашёл жемчужное зерно, и говорит: "Куды оно? Какая вещь пустая!" [10]. США оставались единственной супердержавой, они не могли допустить растекания по континентам ядерных технологий и учёных¹². Американцы, будучи хозяевами положения, всё же подчёркивали, что не станут его использовать для выкачивания сведений о советском ядерном оружии или переманивания наших ядерных специалистов. А возможностей для этого было сколько угодно (думаю, достаточно напомнить историю бакатинского подарка американским разведслужбам). Главная задача состояла в том, чтобы не подпустить к ядерным секретам России вообще никого: ни партнёров по ядерному клубу — англичан и французов, ни потенциальных противников — китайцев и индусов. Из данных разведки специалисты ВНИИЭФ и ВНИИП знали всё принципиально важное о достижениях в LANL, LLNL и SNL. Столь же осведомлёнными о нашем состоянии дел были и наши коллеги за океаном¹³. После прекращения испытаний уровень знаний о работе ядерного оружия остаётся фактически замороженным в обеих странах. Поэтому российские ядерно-оружейные секреты специалистов США мало интересуют — в общих чертах они им известны.

США передали России технологии и средства для создания системы мониторинга делящихся материалов в российских ядерных центрах. Что же касается проблемы удержания ядерщиков, то она решена вполне научным способом. Как известно, в системе из N частиц статистические флуктуации пропорциональны \sqrt{N} . Например, в организации численностью 10000 сотрудников найдётся ~ 100 человек, способных создать проблему. Они активны, и потому легко выявляемы. Остальные массы живут в пределах усреднённого потока; их достаточно чуть подкармливать, давая понять, что всем вокруг значительно хуже. Выделенную группу \sqrt{N} следует разделить на две части. К первой относятся люди властолюбивого типа. Их нужно усадить в кресла начальников. Тогда они станут не просто управляемыми, а будут соображать без подсказки, что от них требуется. Вторая часть состоит из людей активных и творческих, но "с левой резьбой", т.е. не способных к бюрократической карьере. Для них нужно создать Международный научно-технический центр (МНТЦ), официальной целью которого будет "помощь в переориентации талантов учёных и инженеров оборонных ведомств в русло мирного соиздания и вхождения во всемирный научно-исследовательский и инновационный процесс". Они сами явятся

туда со своими замыслами и примут участие в конкурсе проектов. Финансирование их проектов (скромное оборудование, командировки за границу, умеренное жалование) уведёт беспокойный ум с опасных направлений, по крайней мере, русская портянка не будет перемотана в мусульманскую чалму. В 1992 г. США инициировали открытие в Москве такого центра.

Президент РФ Дмитрий Анатольевич Медведев прекратил участие в нём России в 2010 г. без всякого объяснения причин. До этого были втихую свёрнуты все другие иностранные благотворительные фонды. Даже Дмитрий Борисович Зимин в 2015 г. был вынужден закрыть свой семейный благотворительный фонд "Династия". Кто-то ещё продолжает удивляться "утечке мозгов" из России?! Лезть в управление наукой, не имея представления о том, как она функционирует, это, используя талейрановское замечание, хуже преступления — это ошибка. Подводя итог событиям 1990-х гг. в России, лауреат Нобелевской премии Жорес Иванович Алфёров делает вывод: "Сохранение научного потенциала было отчасти успешным благодаря участию в международном научном сотрудничестве, международным проектам и грантам" [11]. А я бы добавил: выживанию оружейно-ядерных центров России в тот период мы по большому счёту обязаны 41-му и 42-му президентам США.

Жесты доброй воли Вашингтона и гуманистические декларации в поддержку науки в России, разумеется, не порождали заблуждения — за ними просматривался холодный расчёт. Не стоит, однако, впадать в другую крайность, перенося скрытые мотивы администрации США на простых людей. Учёные, инженеры, чиновники низших звеньев, вовлечённые в научное сотрудничество, были полны энтузиазма и идеалистического настроения. Я руководил тремя проектами МНТЦ, общался с этими людьми и знаю, о чём говорю. Помочь "перевернуть последнюю страницу в истории холодной войны и враждебных отношений между нашими странами"¹⁴ многие из них считали делом чести. Страница, к сожалению, осталась неперевернутой.

Ссылка на наличие российских ядерных центров не способна вечно впечатлять среднего американца. Отсутствие стратегии национальных лабораторий тревожит и Вашингтон. Признаки беспокойства можно заметить даже невооружённым глазом. Например, за последние 25 лет необычно часто менялись директора LANL и LLNL, перекраивалась система служб безопасности, круто менялся ландшафт открытых исследований. Впервые за 60 лет в LANL была заменена управляющая организация.

Возможно, было искушение "оптимизировать расходы", т.е. сократить тематику исследований и кадры, прямо не связанные с проблемой поддержания боеспособности ядерных систем. Но в таком усечённом, изолированном от большой науки мире невозможно предотвратить падение качества исследований, снижение квалификации сотрудников Национальных лабораторий до уровня, когда они уже не будут способны критически оценивать полученные ими результаты.

Так нужны ли ядерные центры России и Национальные лаборатории США с их немалыми бюджетами? Если да, то каково их назначение сегодня и в будущем?

¹² Они в полной мере уяснили серьёзность положения в ядерно-оружейном комплексе России после самоубийства 30 октября 1996 г. Владимира Зиновьевича Неча — директора ВНИИП, который не добился в Москве погашения долгов института.

¹³ Сведения о ядерном и термоядерном оружии США и СССР всегда представляли собой систему сообщающихся сосудов. На начальном этапе мы сразу проглотили пороговый объём информации об атомной бомбе. Потом американские "бомбоделы" не стеснялись "списывать" из советской тетрадки. Дальнейшая история была более гладкой и сбалансированной; специалист-ядерщик мог бы сказать своему антиподу: "Я знаю, что ты знаешь, что я знаю".

¹⁴ Привожу формулировку, как я её слышал не раз от американских коллег, почти дословно.

Я обсуждал эти вопросы с авторитетными ветеранами Атомного проекта СССР Николаем Александровичем Дмитриевым, Юрием Алексеевичем Трутневым, Львом Васильевичем Овсянниковым, Дмитрием Васильевичем Ширковым, с крупнейшим на тот момент представителем теоретической физики в России Исааком Марковичем Халатниковым, двумя научными руководителями "объектов", Юлием Борисовичем Харитоновым и Евгением Ивановичем Забабахиним, и двумя экс-министрами МСМ¹⁵ Львом Дмитриевичем Рябевым и Виктором Никитовичем Михайловым. Это были серьёзные обсуждения. К сожалению, ни к какой единой, более или менее строго обоснованной позиции прийти не удалось. Поэтому за все содержащиеся в этой статье суждения, оценки и предложения (а также возможные упущения и ошибки) я несу личную ответственность.

3.2. Слово девочки-сёстры из непрожитых лет, выбегая на остров, машут мальчику вслед

Обратимся к страницам прошлого. К началу 1960-х годов большинство ключевых фигур Манхэттенского проекта свою деятельность в нём завершают [12]. Такая же картина и в Атомном проекте СССР. ВНИИЭФ покидают математические лидеры Николай Николаевич Боголюбов и Михаил Алексеевич Лаврентьев — со своими учениками. Уезжают крупнейшие физики Яков Борисович Зельдович, Игорь Евгеньевич Тамм, Исаак Яковлевич Померанчук, Лев Владимирович Альшулер, Давид Альбертович Франк-Каменецкий. Вне "объекта" закрыты работы оставляют Израиль Моисеевич Гельфанд, Александр Андреевич Самарский, Андрей Николаевич Тихонов, Виталий Лазаревич Гинзбург, а также все участники проекта из школы Льва Давидовича Ландау. Близится момент, когда и Андрей Дмитриевич Сахаров объявит: "Прощай, оружие!" И хотя главные принципы действия ядерного и термоядерного оружия установлены, предстоит долгий период его усовершенствования, систематического накопления знаний о процессах газодинамики, детонации химических взрывчатых веществ, цепных ядерных реакций и термоядерного синтеза¹⁶.

Юлий Борисович Харитон — научный руководитель ВНИИЭФ¹⁷, разворачивая широкую программу изучения ядра, предлагает блестящему молодому теоретику из Курчатовского института Альфреду Ивановичу Базю [14] взрастить для этой цели теоретическую группу из ~ 10 лучших выпускников вузов. Оставаясь сотрудником Курчатовского института, Базь совершает длительные визиты во ВНИИЭФ, где он не прикасается к секретным темам и располагает полной свободой действий.

За несколько лет Базь создаёт школу теории ядра. Казалось, школе остался один шаг до мирового признания... Увы, жизнь Альфреда Ивановича обрывает нелепая случайность. Коллектив молодых теоретиков вскоре

после этого рассыпается. Одни продолжают деятельность, начатую под руководством Базя: раскрывают структуру ядер, рассчитывают их свойства. Другие уходят в "бомбоделу".

Эхо тех событий донеслось до меня на международной конференции "Mysteries, Puzzles and Paradoxes in Quantum Mechanics", состоявшейся в Италии на озере Гарда в сентябре 1999 г. В докладах то и дело упоминался метод Базя–Рыбаченко. Я был знаком с этим красивым результатом¹⁸, полученным в 1966–1967 гг. [15, 16], но не думал, что он окажется столь популярным на Западе по прошествии более 33 лет. В кулуарах я узнал, что военные хотят получить в своё распоряжение квантовый компьютер и квантовую криптографию. Очевидно, такие задачи требуют глубокого понимания концептуальных основ квантовой механики. Поэтому на исследования в этой области, включая тончайшие и дорогие эксперименты¹⁹, денег не жалеют. Что касается метода Базя–Рыбаченко, то здесь ситуация немного иная. Она связана с современными технологиями в электронике, где размер микросхем уже подбирается к атомным масштабам, так что подбарьерная жизнь частицы становится предметом забот других богатых покровителей — из гражданского сектора.

В Италию прибыла из LANL большая делегация молодых, полных энтузиазма исследователей микромира. Однажды в разговоре с ними я обронил, что работаю в одном институте с Владимиром Фёдоровичем Рыбаченко.

— Как, неужели он жив?

— Жив, здоров и вполне упитан.

— Но мы знаем, что Зельдович и Базь умерли. В США думают, что и Рыбаченко нет в живых. Может, он сидел в тюрьме, как Ландау?

— Нет. С какой стати? Он не призывал к свержению власти в стране.

— Тогда почему он так внезапно прекратил публиковать свои работы?

— Не знаю. Приеду домой — спрошу.

Вернувшись в Саров, я обратился к Рыбаченко с просьбой рассказать, что с ним тогда произошло. Вот что я услышал. Володе было 27 лет. Он успел опубликовать около десятка хороших работ в хороших журналах. Но чего он хотел больше всего, несясь в потоке исследований, организованных Базем, — дать определение оператора времени \hat{t} в квантовой механике. Зельдович был заинтригован этой идеей (ведь она оказалась не по силам отцам-основателям квантовой механики), подталкивая Базя и Рыбаченко к попытке получения результатов в обзорной статье, для которой Зельдович

¹⁸ Суть дела такова. Пусть частица со спином s и магнитным моментом $2\mu s$ туннелирует сквозь потенциальный барьер. Требуется найти среднее время её пребывания под барьером (τ) и другие такого рода величины, например, дисперсию $(\Delta\tau)^2 = \langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2$. В интересующей нас области включим слабое магнитное поле \mathbf{B} . Спин начнёт прецессировать вокруг \mathbf{B} с ларморовской частотой $\omega = 2\mu s \times \mathbf{B}/\hbar$. Поэтому $\langle \tau \rangle$ можно связать с углом поворота спина в области действия магнитного поля. Замечательно, что хронометрические эффекты остаются конечными при $\mathbf{B} \rightarrow 0$.

¹⁹ Когда писались эти строки, пришло известие, что Нобелевскую премию по физике в 2022 г. получили Ален Аспе, Джон Клаузер и Антон Цайлингер за эксперименты с запутанными фотонами, установление принципа нарушения неравенств Белла и открытия в области науки о квантовой информации, т.е. эксперименты, направленные на выяснение основ квантовой механики.

¹⁵ Министерство среднего машиностроения управляло всей ядерной индустрией СССР с 1953 г. После двух переименований на рубеже веков оно становится в 2007 г. госкорпорацией "Росатом".

¹⁶ Некоторое представление о результатах в фундаментальной физике, полученных теоретиками ВНИИЭФ, так сказать, в промежутках между занятиями по созданию бомб, может дать книга [13].

¹⁷ Должность, аналогичная той, которую занимал Роберт Оппенгеймер в LANL. Но Оппенгеймер был теоретиком, питомцем школы Нильса Бора, а Харитон — экспериментатором с квалификацией, приобретённой в Кавендишской лаборатории под руководством Эрнеста Резерфорда.

уже зарезервировал место в портфеле ближайших публикаций *УФН* — центрального физического журнала СССР. Черновик статьи был готов. Но что-то разладилось в жизни Базя; он остыл к идее оператора \hat{I} . Завершить проект самостоятельно Володя не решался. Зельдович в это время был полностью поглощён делами созданной им школы астрофизики и космологии. Это был сильнейший в мире гравитационный коллектив [12], а лидерство требовало от руководителя крайнего напряжения сил [17].

Володя не нашёл ничего лучшего, чем обратиться за моральной поддержкой к Сахарову. Тот уволился из ВНИИЭФ, и это был его последний приезд на "объект". За Сахаровым прислали на вокзал служебный автомобиль. Было солнечное майское утро. Сахаров предложил Володе прокатиться на голубой "Волге" до института, и по дороге изложить свой вопрос. Всё складывалось весьма удачно. Володя говорил с вдохновением. Сахаров молча слушал, потом закрыл глаза, и, по-видимому, уснул. Володя смущённо умолк. Тогда Сахаров открыл глаза, и в мягком тоне, кратко, но решительно посоветовал Володе бросить схоластику и заняться чем-нибудь более полезным. Сахаров, бесспорно, осознавал, что личный пример несравненно сильнее любых наставлений, и что сам он, отстраняясь от практического дела на "объекте" в пользу занятий академическими науками, лишает свой совет убедительности. С другой стороны, ему было ясно, что перед ним человек, вряд ли готовый в одиночку устоять перед ударами, с которыми не замедлит обрушиться на него большая наука. А потому, дружок, не ломай себе жизнь — не отступай далеко от интересов своего коллектива. И Сахаров оказался прав. Володя аккуратно собрал свои публикации, назвав эту антологию кандидатской диссертацией, успешно её защитил, простился с теорией ядра и другими более или менее абстрактными исследованиями и целиком посвятил свой талант "бомбоделию".

4. Ядра — чистый изумруд; но, быть может, люди врут

Ядерная физика олицетворяла собой передний край науки приблизительно полвека. В 1911 г. Резерфорд открыл атомные ядра и предложил сам термин "ядро", но уже в 1954 г. вступила в строй первая в мире атомная электростанция в Обнинске, в 1958 г. Оге Бор, Бен Моттelson и Дэвид Пайнс изобрели сверхтекучую модель ядра. Затем внимание к ядру быстро растаяло. В настоящее время физика ядра отодвинута на периферию физических исследований. По крайней мере, в Нобелевском комитете интерес к её достижениям, похоже, совсем иссяк.

Практическое применение ядра вылилось в небывалые по масштабу свершения — ядерное оружие, атомный флот, атомные электростанции. Но означает ли это, что мы понимаем физику микромира в такой степени, чтобы не ощущать озабоченности за её приложения и судьбу её теоретических основ? Попытаюсь дать ответ на этот вопрос, вынужденно срезая углы и опуская множество важных технических деталей.

4.1. Зри в корень

С 1950-х годов поток передовых исследований стал определяться квантовой теорией поля и физикой час-

тиц²⁰. Творчество многих талантливых физиков вошло в этот поток. Однако история субъядерной физики содержит не только победные страницы. Первый десятилетний кризис пришёлся на 1960-е годы.

Успешность использования теории возмущений в квантовой электродинамике [18] стимулировала попытки применить её к юкавской модели сильных взаимодействий и четырёхфермионной модели слабых взаимодействий. Трудность заключалась в том, что константы связи сильного взаимодействия адронов по модулю превышают 1, поэтому, в отличие от постоянной тонкой структуры $\alpha \approx 1/137$, они непригодны на роль малых параметров в теории возмущений. Что касается четырёхфермионных взаимодействий, то совместить метод перенормировок с этой моделью оказалось в принципе невозможным.

В довершение всего, Ландау и его коллеги получили ошеломляющий результат, названный в СССР "нуль-зарядом", а на Западе — "московским нулём", суть которого состоит в следующем. Вокруг точечной заряженной частицы квантовые флуктуации порождают пары виртуальных частиц и античастиц. Выстраиваясь в виде диполей, пары экранируют исходный заряд. Такое явление, характерное для релятивистской квантовой теории, называется поляризацией вакуума. Авторы работ [19, 20] делают вывод: в перенормируемых теориях поляризация вакуума так велика, что исходный заряд оказывается целиком заэкранированным, другими словами, взаимодействие между частицами с перенормированными константами связи выключено. Ещё одна трудность, связанная с проблемой нуль-заряда, — "духовое" состояние фотона [21].

Ландау считал, что нулификация заряда означает логическую противоречивость перенормируемых теорий, а заодно и крах концепции локального взаимодействия [22]. На Западе к этому вердикту отнеслись вполне серьёзно: "Под влиянием Ландау и Померанчука теория поля оказалась под запретом для целого поколения физиков" [23]. В США теоретики приступили к изучению взаимодействий частиц с помощью аналитической теории S -матрицы, унитарных симметрий и алгебры токов. А каковы были дальнейшие действия теоретиков в СССР?

Померанчук закрывает еженедельный семинар по теории поля в ИТЭФ, но пару месяцев спустя возобновляет его работу, переключив внимание его участников на феноменологические описания амплитуд рассеяния, не связанные с фейнмановской техникой в теории возмущений. Исследования в этом направлении принесли много интересных результатов, в частности, теореме Померанчука [24] о равенстве полных сечений взаимодействия частиц P и античастиц \bar{P} с мишенью T в пределе, когда энергии P и \bar{P} стремятся к ∞ . Словарь частиц обогатился термином "померон", обозначающим микрообъект с квантовыми числами вакуума.

С другой стороны, Боголюбов счёл траур по квантовой теории поля неуместным. Действительно, проблема нуль-заряда возникла в результате суммирования части членов ряда теории возмущений по степеням α . Но ещё Фриман Дайсон установил [25], что такой ряд является

²⁰ На современном языке это, соответственно, теоретическая и феноменологическая ветви физики высоких энергий (англ. High Energy Physics, HEP).

расходящимся, поэтому его следует рассматривать лишь как асимптотический ряд. Хорошо известны приёмы суммирования расходящихся рядов, но результаты этих операций дают не однозначное аналитическое выражение, а набор функций, отличающихся одна от другой на целую функцию (т.е. функцию, голоморфную всюду в конечной части комплексной плоскости параметра α).

Попадание в центр внимания теоретиков амплитуд рассеяния, ведущих себя как целые функции, даёт сигнал к штурму нелокальных, существенно нелинейных и перенормируемых теорий поля. Атака имела успех в 1960–1970-е гг. Определилась чёткая граница между локализуемой и нелокальной теориями поля [26–28]. Было выяснено, как построить S -матрицу для взаимодействующих полей с нелокальным формфактором, свободную от ультрафиолетовых расходимостей и удовлетворяющую всем общим условиям квантовой теории поля — лоренц-ковариантности, унитарности и причинности [29–31]. Удалось обобщить важнейшие результаты аксиоматической квантовой теории поля (РСТ-инвариантность, теорему о связи спина со статистикой) на случай, когда вакуумные средние полей экспоненциально возрастают с энергией, что характерно для нелокальных взаимодействий квантованных полей [32]. Изобретены приёмы обращения с неполиномиальными лагранжианами [33–35].

И тем не менее магистральное направление в описании трёх фундаментальных взаимодействий — слабого, электромагнитного и сильного, как показал естественный ход событий, было связано с локальной перенормируемой квантовой теорией поля. Её рамки заметно сужаются. К допустимым формам взаимодействий теперь относят те, которые порождаются полями Янга–Миллса [36, 37]. Что же сияло путеводной звездой? Прежде всего — вдохновляющий пример квантовой электродинамики²¹, где взаимодействие переносит калибровочное векторное поле. Киральная симметрия сильных взаимодействий и векторно–псевдовекторный (более точно, $V-A$) характер слабых взаимодействий намекали на то, что переносчиками этих взаимодействий могут быть частицы со спином 1. Отсюда столь пристальное внимание к векторным полям калибровочных теорий как агентам сильных и слабых взаимодействий.

Объединение электромагнитного и слабого взаимодействий происходит на основе калибровочной группы $SU(2) \times U(1)$ [38, 39], подразумевающей наличие векторных бозонов A_μ , W_μ^\pm и Z_μ . Что касается сильных взаимодействий, то здесь на авансцену выходят кварки в роли элементарных составляющих адронов [40, 41].

Впрочем, эти находки воспринимались не совсем всерьёз. Во-первых, в начале 1960-х гг. ещё не умели квантовать теории Янга–Миллса. Во-вторых, хотя безмассовое поле Янга–Миллса и пригодно в роли переносчика далекодействующих сил, подобно фотону, ответственному за электромагнитное взаимодействие, для переноса слабых взаимодействий, ограниченных радиу-

сом действия $\sim 10^{-16}$ см, нужны массивные векторные бозоны. В третьих, если попытаться видоизменить теорию Янга–Миллса, снабдив калибровочные поля W_μ^\pm и Z_μ массами, то получившаяся теория окажется перенормируемой. В четвёртых, кварки никак не удавалось извлечь из адронов и экспериментально изучить их свойства в изолированном состоянии [42]. Поэтому сам Мюррей Гелл-Манн, предложивший идею кварков, трактовал их как математически удобные объекты, не претендующие, однако, на статус реальных частиц. И, наконец, калибровочные теории страдали от квантовых аномалий [43, 44], наличие которых угрожало R -операции (единственному инструменту перенормируемых теорий [45–48]) лишением её рабочего качества.

Квантование полей Янга–Миллса, не нарушающее унитарности и калибровочной инвариантности [49], привело к появлению на свет причудливых созданий — "духов Фаддеева–Попова". Они представляют собой поля, которые не подчиняются правилу связи спина со статистикой. Духи живут лишь в виртуальных состояниях, а именно в петлях диаграмм Фейнмана. Не существует реальных частиц, соответствующих квантам этих полей.

Возможность наделить массами калибровочные бозоны, не затрагивая свойств перенормируемости, удалось найти, как только было усвоено понятие спонтанного нарушения симметрии [50] и хиггсовский механизм [51–53], позволяющий сохранить калибровочную инвариантность, хотя некоторые поля Янга–Миллса, переносящие взаимодействие, приобретают массу.

На базе этих открытий была предложена реалистичная модель электрослабого взаимодействия, в которой группа симметрии $SU(2)_L \times U(1)_Y$ спонтанно нарушена до калибровочной группы электродинамики $U(1)_{em}$ [54, 55]. Перенормируемость этой модели строго доказана пять лет спустя [56]. Параллельно развивалась идея цветовой степени свободы [57–59], которая легла в основу калибровочной теории сильных взаимодействий с ненарушенной группой цветовой калибровочной симметрии $SU(3)_c$ [60, 61]. Эту теорию, сформулированную в терминах кварков и глюонов, называют сейчас квантовой хромодинамикой²² (КХД).

Важнейшая особенность КХД представлена явлением асимптотической свободы. Как установлено в [62, 63]²³, перенормированная константа связи логарифмически слабеет с ростом перенормировочного масштаба энергии, $\alpha_s(E) \sim (\ln E)^{-1}$, $E \rightarrow \infty$, иными словами, когда расстояние между кварками стремится к нулю, цветовая связь между ними выключается. Этим объяснялись таинственные особенности углового поведения сечений глубокоэластичных лептон-адронных столкновений [66].

В техническом отношении благоприятное следствие асимптотической свободы состоит в том, что при достаточно больших значениях энергии E константа связи КХД, $\alpha_s(E)$, становится малой²⁴. Поэтому её можно использовать в качестве малого параметра в теории возмущений при вычислении высших поправок в амплитудах, описывающих кварк-глюонные и глюон-глюонные взаимодействия.

²² От греч. *χρόμα* — цвет.

²³ Фактически тот же результат был получен в СССР несколько раньше [64, 65], но авторы этих работ не оценили должным образом значения своих находок.

²⁴ Правильнее говорить не об энергии, а о квадрате переданного 4-импульса.

²¹ Этот пример и вдохновлял, и обескураживал. Действительно, проблема нуль-заряда касается воображаемого точного решения локальной квантовой теории поля. Но, как это ни удивительно, если нас интересует приближённое решение, то в электродинамике имеется и хорошо работающая схема для его отыскания, и прекрасное согласие теоретически вычисленных и экспериментально измеренных эффектов. Парадокс, таким образом, состоит в том, что теория в целом считается логически противоречивой, тогда как её приближённые решения физически безупречны.

С позиции основ субъядерной физики КХД могла бы показаться контрпримером доктрине нуль-заряда. В отличие от квантовой электродинамики, в которой поляризация вакуума экранирует затравочный заряд, в КХД имеет место соревнование эффектов экранировки и антиэкранировки (обусловленной тем, что глюоны обладают цветом и могут взаимодействовать друг с другом), и если число разновидностей кварков n_f невелико ($n_f \geq 16$), то побеждает антиэкранировка. Тем не менее "духовый" полюс не исчез из глюонного пропагатора, а просто перебрался из ультрафиолетовой области в инфракрасную. Вопрос о логической непротиворечивости остаётся и в КХД.

Замечательный факт состоит в том, что если n_f равно числу разновидностей лептонов, то квантовые аксиальные аномалии сократятся [67, 68]. На данный момент экспериментально выявлено наличие шести разновидностей кварков (u, d), (c, s), (t, b) и шести разновидностей лептонов (e, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ), причём не видно причин ожидать изменения этой ситуации в дальнейшем. Условие сокращения аномалий, требующее соблюдения "кварк-лептонной симметрии", сыграло ключевую роль в определении элементного состава материи с тремя "поколениями" кварков и лептонов.

Так шаг за шагом построена Стандартная модель элементарных частиц (СМ) [69, 70]. Далее стартует триумфальный процесс её экспериментальных подтверждений, важнейшими этапами которого становятся открытия с-, b- и t-кварков, τ -лептона, векторных W- и Z-бозонов, хиггсовского скалярного бозона. Но экспериментальная картина оставляла странное впечатление, ибо её содержание продолжали наполнять прямые измерения в динамике адронов, а не кварков и глюонов. Чтобы объяснить отсутствие свободных кварков и глюонов, выдвигается гипотеза удержания цветовых объектов в адронах — гипотеза конфайнмента²⁵. Все наблюдаемые состояния систем цветовых объектов должны образовывать синглеты группы $SU(3)_c$, попросту говоря, быть бесцветными [71–73]. Судьба оставаться навеки "заперти" не казалась совсем уж немислимой для цветовых объектов, после того как "гражданство" в субъядерных мирах получили духи Фаддеева – Попова. В пользу предположения о конфайнменте свидетельствует возрастание константы связи КХД $\alpha_s(E)$ в инфракрасном пределе, т.е. в области значений E , заметно меньших характерной энергии КХД, $\Lambda_s \sim 100$ МэВ, или, что то же самое, на расстояниях, значительно превышающих $r \sim 10^{-13}$ см. Правда, при $\alpha_s \geq 1$ вычисления с помощью теории возмущений невозможны, так что приведённый довод оказывается лишь качественным указанием на осуществление конфайнмента. Другой довод доставляют результаты вычислений на решётках [74, 75]. Строго доказать гипотезу конфайнмента далеко не просто. Это составная часть решения проблемы четырёхмерной квантовой теории Янга – Миллса, одной из семи "проблем тысячелетия", объявленных Математическим институтом Клэя [76].

Вернёмся на миг в 1960–1970-е гг. — к атаке на не-локальные, неперенормируемые и существенно нелинейные теории поля. Каковы последствия кипения тех научных страстей? Возможно, всё было пустой тратой сил? Нет, — такое впечатление неверно! В тот период была чётко обрисована стратегия отыскания точных решений

теорий квантованных полей. Точные решения нетривиальных четырёхмерных квантовых²⁶ моделей, увы, до сих пор отсутствуют.

Большую популярность в поиске точных решений КХД приобрёл сегодня метод Монте-Карло в евклидовой решёточной формулировке калибровочных теорий [82]. Этот подход, однако, применим лишь к области упругих процессов, т.е. ограничен энергиями ниже порога множественного рождения частиц. Кроме того, непонятно, можно ли результат вычислений на евклидовой решётке аналитически продолжить в четырёхмерный континуум Минковского. Сенсационных прорывов здесь пока не происходит. Не удаётся даже переформулировать СМ в решёточных терминах.

Нужны ли вообще точные решения? Почему бы не ограничиться приближёнными решениями, если они хорошо согласуются с экспериментальными данными? Я мог бы здесь просто сослаться на урок, преподнесённый проблемой нуль-заряда. Но важнее отметить, что ответы на глубокие вопросы дают именно точные решения.

Рассмотрим, например, вопрос о стабильности системы двух частиц с зарядами противоположных знаков. Если ограничиться статичной классической картиной, то система окажется нестабильной. В рамках ньютоновской динамики центробежная сила способна придать системе стабильность. Но при учёте эффекта релятивистского запаздывания в распространении электромагнитного взаимодействия система вновь окажется нестабильной [83]. А принимая во внимание потери энергии на излучение ускоренно движущихся зарядов, мы тем более приходим к выводу о неизбежности падения частиц на центр инерции системы. В начале прошлого века такой вывод привёл к кризису классического описания стабильной материи, и это способствовало рождению квантовой теории. В борновском и шрёдингеровском вариантах квантовой механики системы вновь обретают стабильность [84–86]. Что скажет о стабильности точное решение уравнений релятивистских квантовых полей? Эксперимент не даёт подсказки. Действительно, атом водорода стабелен на Земле, но, попав в нейтронную звезду, коллапсирует и превращается в нейтрон с испусканием антинейтрино.

Продолжим сагу о частицах. В начале 1970-х гг., когда до наведения порядка в делах СМ было ещё совсем недалеко, теоретики сгорали от нетерпения нестись по шкале энергий вплоть до планковского предела $E_{Pl} = \sqrt{\hbar c^5/G_N} \approx 1,2 \times 10^{19}$ ГэВ, лишь с остановкой в точке Великого объединения²⁷ слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий $E_{GU} \sim 10^{16}$ ГэВ. Выше этой энергии лептоны и кварки превратятся в компоненты единого фермионного поля, а промежуточные бозоны W и Z станут безмассовыми, подобно глюонам и фотону, образуя вместе с векторными полями X и Y компоненты единого калибровочного поля, — всё почти по Исайе: "И

²⁵ Англ. confinement — тюремное заключение, запиранье, пленение.

²⁶ Имеется много точных решений классической теории Янга – Миллса [77]. Но за их отысканием не последовало экспериментальных открытий. Монополю 'т Хоофта – Полякова [78, 79] существует полвека только на бумаге. Инстантон [80] не дал ключа к механизму конфайнмента. Интересно, что некоторые обитатели микромира вообще не имеют наглядного образа, порождаемого решением классических полевых уравнений. Поэтому невозможно ничего сказать об их характерных размерах и конфигурациях. Сидней Коулмен установил [81], что именно таким объектом является глобол — бесцветное связанное состояние двух или трёх глюонов.

²⁷ Англ. Grand Unification, GU.

лев, как вол, будет есть солону". Создание моделей Великого объединения [87–89] обошлось без революционных потрясений. Группу симметрии $SU(2) \times U(1) \times SU_c(3)$ следовало вложить в полупростую группу, например $SU(5)$ [88]. Динамика моделей Великого объединения связана с динамикой СМ посредством ренормализационной группы. Обратные величины бегущих констант связи слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий $\alpha_w^{-1}(E)$, $\alpha^{-1}(E)$ и $\alpha_s^{-1}(E)$ при больших E , как оказалось, зависят линейно от $\ln E$, хотя коэффициенты пропорциональности у них различны. Если все три линии сойдутся к одной точке, то место их встречи разумно считать энергией Великого объединения E_{GU} .

Самое яркое феноменологическое предсказание теории Великого объединения — распад протона. Действительно, если возможны взаимные превращения кварков и лептонов, то барионное и лептонное числа не являются сохраняющимися величинами. Простейшая схема распада протона $p \rightarrow e^+ + \pi^0$, допустимая в модели с группой $SU(5)$, состоит в том, что левый и правый u -кварки в составе протона аннигилируют в X^+ -бозон, который распадается в e^+ - и \bar{d} -кварк, а последний вместе с d -кварком протона образует π^0 . Согласно этому механизму распад протона происходит через $\sim 10^{31}$ лет. Распад протона с превращением кварка в мюон обсуждал Сахаров [90] задолго до появления моделей Великого объединения, когда ещё не были известны ни характерные для этого процесса энергия $E \geq M_{X^+} \approx 2,5 \times 10^{14}$ Гэв, ни сила связи $\alpha_{GU}(M_{X^+}^2) \approx 0,024$. Исходя из нескольких произвольных предположений о подобных величинах, Сахаров оценил время жизни протона в $\sim 10^{50}$ лет.

Это предсказание вряд ли могло вызвать энтузиазм у экспериментаторов. Другое дело — проверка нестабильности протона со сроком жизни $\sim 10^{31}$ лет. В тонне воды содержится $\approx 3 \times 10^{28}$ протонов. Поэтому в шаре с водой радиусом ≥ 10 м можно ожидать несколько распадов протонов за год. Шар следует облепить несколькими тысячами фотоумножителей и опустить как можно глубже под землю, чтобы отсечь фон космических лучей. Дюжина таких установок была готова к работе в середине 1980-х гг. Но на них так и не зарегистрировано ни одного случая распада. Эксперимент продолжается на единственной установке Super-Kamiokande с массой воды 50000 т, совместимой с предельным уровнем чувствительности измерительной аппаратуры, и, по-прежнему, не даёт обнадеживающих результатов. По текущим данным нижний предел времени жизни протона в этом канале составляет $1,6 \times 10^{34}$ лет [91].

Поиск распада протона — экспериментальный проект большого масштаба. С ним связывались огромные надежды. К началу 1990-х гг. стало ясно: проект потерпел неудачу. Появляло холодом от надвигающегося заката физики высоких энергий.

В 1971 г. физики СССР и Запада изобрели суперсимметрию — группу симметрии между фермионными и бозонными степенями свободы [92–97]. Обнаружено, что в суперсимметризованных теориях Янга–Миллса ультрафиолетовые расходимости сокращаются в однопетлевом приближении, а некоторые из этих теорий оказались конечными во всех порядках теории возмущений. Возникла надежда на построение конечной теории всех четырёх фундаментальных сил природы. Начальный вариант теории, названный супергравитацией, был суперсимметричной комбинацией модели Великого объединения и общей

теории относительности [98]. Но ни титанические усилия, ни чудеса находчивости теоретиков не увенчались успехом. Расходимости в супергравитации оказались неустранимыми.

В 1968 г. Габриэле Венециано приспособил эйлеровскую B -функцию к описанию амплитуды рассеяния двух частиц в дуально-резонансной модели [99]. Идею тут же подхватили исследователи, занятые феноменологией сильных взаимодействий. Вскоре выяснилось, что в этой амплитуде закодирована динамика релятивистской струны с действием, пропорциональным площади замкнутой мировой поверхности струны [100, 101]. В картине микромира поселился протяжённый объект — струна.

Но непротиворечивое квантование бозонных струн оказалось возможным лишь в пространстве–времени 26 измерений, а квантование суперструн — в многообразиях 10 измерений. Кроме того, в спектре замкнутых струн содержатся возбуждения со спином 2, а частиц с таким спином среди адронов не наблюдалось. Всё это подрывало интерес к струнному описанию сильных взаимодействий.

Спустя пять лет сильные взаимодействия обретают квантово-полевую основу — КХД. Струнам же отводится новая роль. Они становятся объектами, ответственными за все фундаментальные силы природы [102]. Чтобы связать мир струн с наблюдаемым миром, лишние измерения компактифицируются, следуя рецепту Калуцы–Клейна. Струнные возбуждения со спином 2 трактуются как гравитоны. Поведение струн описывает двумерная конформно-инвариантная квантовая теория поля. Слияния и разрывы — единственная форма взаимодействия струн в рамках теории возмущений. Предполагается, что характерный размер струны сопоставим с планковской длиной $\ell_{Pl} = \sqrt{\hbar G_N/c^3} \approx 1,6 \times 10^{-33}$ см. Таков же размер для компактифицированных измерений.

Далее происходят три "суперструнных революции". Две из них подробно описаны в учебниках [103] и [104]. Первая революция справилась с квантовыми аномалиями, в результате чего приемлемыми оказываются лишь пять типов струнных теорий: I, II, III и две гетеротические с группами симметрий $SO(32)$ и $E_8 \times E_8$. Теории типа II имеют по две десятимерные суперсимметрии, остальные три теории имеют по одной суперсимметрии. Теория типа I описывает открытые и замкнутые струны; открытая струна может стать замкнутой или расщепиться на две струны, причём эти процессы обратимы. В остальных теориях струны всегда остаются замкнутыми.

Струны свободны от ультрафиолетового недуга. Суперсимметричное сокращение расходимостей здесь ни при чём, так как теория бозонных струн тоже конечна²⁸. Можно встретить утверждение, что эти теории конечны в связи с протяжённостью струн. Ошибочность такого утверждения становится очевидной, если рассмотреть другой протяжённый объект — двумерную мембрану с действием, пропорциональным её мировому объёму v_3 . Пытаясь построить локальную квантовую теорию поля на v_3 , мы оказываемся в сумрачном лесу ультрафиолетовых расходимостей.

Компактификация ($E_8 \times E_8$)-гетеротических струн на многообразиях Калаби–Яо и орбифолдах даёт логически непротиворечивую теорию, названную "теорией

²⁸ Правда, в спектре бозонных струн имеется тахион, удаляемый с помощью суперсимметрии.

всего сущего". В пределе низких энергий ($E \ll 10^{19}$ ГэВ) она содержит классическую супергравитацию и модель Великого объединения с киральными представлениями для кварков и лептонов.

Но в наше распоряжение поступил не один, а пять вариантов непротиворечивой теории. Какой отдать предпочтение? Компактификация лишь усугубляет трудность выбора. Имеется гигантское количество конфигураций Калаби–Яо, описывающих вакуумные состояния с одинаковой энергией, и непонятно, как сузить круг приемлемых теорий.

Вторая струнная революция показала, что все они оказываются проявлениями одной и той же физики, но в разных контекстах, например, в режимах сильной и слабой связи. Любые две из этих теорий связаны преобразованием дуальности [105]. Суперструны и солитоноподобные объекты супергравитации туго опутаны паутиной дуальностей в единую схему, получившую название "*M*-теории" [106].

Строгое доказательство этих дуальностей станет возможным лишь с отысканием непертурбативных решений рассматриваемых теорий. Решения в режиме сильной связи пока за пределами наших возможностей. Поэтому многие дуальности остаются правдоподобными предположениями. Одно из свойств *M*-теории состоит в наличии объектов с разным числом измерений, способных к взаимным превращениям. Не ясно, однако, какие степени свободы фундаментальны в *M*-теории, во всяком случае, это не частицы, не струны, и не браны (протяжённые объекты размерности 2 и более).

Из-за умоузорительного характера, сложности и отсутствия предсказаний интерес к *M*-теории быстро остыл. Мы не можем использовать конечность струнных теорий для расчёта процессов с кварками и лептонами при доступных энергиях, ибо не знаем подлинного механизма редукции от 10 к 4 измерениям. Для сравнения напомним, что классическая релятивистская механика позволяет рассчитать движение частиц как со скоростями, близкими к скорости света, так и с малыми скоростями, причём нередко такой расчёт оказывается более простым, чем в ньютоновой механике.

Третья струнная революция объявила о наличии голографического отображения физики струн в физику явлений при энергиях современных ускорителей [107–109]. Этот подход известен под названиями "калибровочно-гравитационной дуальности" и "соответствия между гравитацией в антидеситтеровском пространстве и конформной теорией поля", AdS/CFT. Идеи и техника систематически изложены в [110] и [111].

Голографический принцип является предположением, согласно которому часть субъядерной физики в нашем четырёхмерном мире моделирует физика чёрных дыр и подобных объектов (чёрных бран, чёрных колец) в пятимерном антидеситтеровском пространстве, AdS₅, границей которого и является этот четырёхмерный мир²⁹. Зная

²⁹ Происхождение голографии AdS/CFT объясняется так. AdS₅ можно представлять себе в виде пятимерного гиперболоида в шестимерном псевдоевклидовом пространстве $\mathbb{R}_{2,4}$. Этот гиперболоид инвариантен относительно ортогональной группы SO(2, 4). Но группа SO(2, 4) изоморфна группе конформных преобразований C(1,3), действующей на четырёхмерном пространстве Минковского $\mathbb{R}_{1,3}$. Таким образом, сама геометрия многообразия AdS₅ индуцирует конформную симметрию своего четырёхмерного голографического образа.

решения классической гравитации в AdS₅³⁰, мы пытаемся понять, что происходит в КХД в режиме сильной связи. Например, шварцшильдовская чёрная дыра в AdS₅ голографически отображается в сгусток кварк-глюонной плазмы на четырёхмерном экране [112]. За четверть века было опубликовано огромное количество статей по калибровочно-гравитационной дуальности с объяснениями явлений микромира. Но ни одного экспериментально подтверждённого предсказания так и не предложено. Предсказательная сила голографии всё ещё остаётся неясной.

И вот развязка трагедии. Понятие частицы становится ненужным в квантовой гравитации [113]. Вряд ли это можно считать сюрпризом. Под частицей в квантовой теории поля понимается возбуждение над энергетически наименьшим состоянием в гильбертовом пространстве состояний. А само понятие энергии как сохраняющейся величины в произвольно искривлённом пространственно–временном многообразии определить невозможно. Поэтому понятие частицы здесь тоже лишено смысла.

К концу XX в. теоретическая часть физики высоких энергий оторвалась от её экспериментальной части настолько, что проблемы субпланковской области (и даже области Великого объединения) часто не относят к теоретической физике, считая их предметом умоузорительных построений в рамках абстрактной математики [114].

4.2. Суди, дружок, не свыше сапога

Героический прорыв в физике высоких энергий увенчался созданием СМ, Великого объединения, супергравитации, суперструн, *M*-теории, петлевой гравитации [115] и калибровочно-гравитационной дуальности. Но вне пределов применимости СМ мы ступаем на зыбкую почву. Поиски распада протона положительного результата не дали. В начале XXI в. победное шествие в субъядерный мир завершилось.

Это, разумеется, не повод для уныния и агностических стенаний "ignoramur et ignorabimus"³¹. В самом деле, ни в каком обозримом будущем мы не будем способны путешествовать за пределы Солнечной системы. Но отсюда не следует, что мы не сможем добыть достоверных знаний о дальних мирах. И потом, психологически нас успокаивает тот факт, что и внутри Солнечной системы нас ждут великие открытия.

Равным образом сто́ит признать, что и в СМ остаётся немало белых пятен, где до сих пор неуместными оказываются не только "почему", но и "как". Например, *u*- и *d*-кварки пребывают в двух обликах: "токовом" и "конституентном". Для остальных кварков граница между токовым и конституентным загадочным образом стирается. Физики редко вторгаются в область гносеологии, спрашивая: почему это так? Но даже скромный технический вопрос: как рассчитать реакцию $d \rightarrow u + e + \bar{\nu}_e$, не имеет сегодня удовлетворительного ответа. Расчёт величин для слабых распадов возможен лишь в простых связанных системах кварков; примером может служить β -распад свободного нейтрона. Вероятность β -распада ядер мы узнаём из эксперимента.

Объяснение механизма связи кварков в КХД не протирается дальше систем с двумя и тремя кварками. В его

³⁰ Классическая гравитация — наследие суперструн на многообразиях типа $S^5 \times \text{AdS}_5$, проявляемое в области низких энергий.

³¹ Не знаем и не узнаем — лат.

основе лежит дуальный эффект Мейсснера, а именно в КХД вакуум уподобляется сверхпроводящей среде, где слабое цветное поле целиком вытесняется, а сильное продолжает существовать в вихрях, пронизывающих объём сверхпроводника. Поток хромозлектрических линий между кварком и антикварком, образующих мезон, сжат в струну. Этим и обеспечивается удержание кварков, ибо сила взаимного притяжения кварков не зависит от расстояния между ними. Вся эта конфигурация напоминает гантель³². Для трёхкварковой системы, соединённой цветовыми струнами (в результате чего образуется барион), возможны конфигурации двух типов: треугольник, в углах которого расположены кварки, и звезда с тремя лучами, на концах которых подвешены кварки.

Нуклоны — бесцветные трёхкварковые объекты. Принято думать, что нуклоны связаны в ядрах остаточными цветовыми силами вроде сил Ван дер Ваальса между нейтральными молекулами. Но это лишь качественное соображение. Конкретных аналитических вычислений остаточного цветового мультипольного взаимодействия, напоминающего юкавский потенциал притяжения $-ge^{-m_\pi r}/r$, я не встречал. А верна ли вообще идея остаточных цветовых сил? Альтернативная точка зрения состоит в отказе от модели ядра как системы A нуклонов, связанных между собой благодаря обмену мезонами. Можно представить себе ядро как совокупность $3A$ кварков, не принуждаемых к проживанию в "трёхместных номерах". Действительно, свободный нейтрон, соединяясь с протоном в ядро дейтерия, теряет свою индивидуальность. Это видно хотя бы из того, что время жизни относительно β -распада увеличивается с $T \approx 15$ мин до $T = \infty$, т.е. нейтрон перестаёт отвечать за судьбы своих кварков. Устройство ядра в виде "кибуца" $3A$ кварков потребует заново осмыслить проблему конфайнмента в более широком контексте, включающем ядерную физику.

Стремительно продвигаясь в глубины микромира, теория оставила ядро в виде ещё более загадочном, чем в 1930-е годы. Глюонное поле, как и электромагнитное, является безмассовым, поэтому цветовые силы должны быть дальнедействующими. Но электромагнитные силы позволяют образование стабильных молекул с любым числом атомов, а массовое число стабильных ядер ограничено значением $A = 208$, соответствующим свинцу. И что же особенного в числе 208? Существуют гигантские системы кварков — нейтронные звёзды, но в них стабильность обеспечивается не законами КХД, а балансом между гравитационным сжатием большой массы звезды и сопротивлением этому сжатию, обусловленным давлением квантового вырождения.

³² Такой образ мезона можно проверить экспериментально, если в нашем распоряжении имеется достаточно сильное магнитное поле или поле плоской электромагнитной волны. Кварк и антикварк, образующие π^0 -мезон, обладают противоположными электрическими зарядами. В магнитном поле они движутся по окружностям в разных направлениях. Поэтому гантель растянется, волновые функции кварков станут перекрываться в меньшей области, вероятность их аннигиляции, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, снизится, время жизни π^0 -мезона возрастёт. Дальнейшее растяжение гантели приведёт к разрыву цветовой струны, т.е. количество π^0 -мезонов увеличится. Заметим, что π^0 — истинно нейтральная частица, поэтому её клонирование вполне согласуется с принципами квантовой теории поля. Для проведения такого эксперимента понадобятся поля с напряжённостью, близкой к швингеровскому пределу. Возможность создания лазерных полей такой напряжённости обсуждается в работе [116].

Мы далеки от понимания структуры таблицы Менделеева. Лёгкие стабильные ядра вплоть до $A = 40$ состоят в равных долях из протонов и нейтронов, $Z = N$. Точнее говоря, среди стабильных изотопов данного элемента всегда найдётся такой, для которого это равенство имеет место, за исключением бериллия, представленного единственным стабильным изотопом с $N/Z = 1,25$. При $A > 40$ стабильные ядра становятся нейтронно-избыточными, и избыток нейтронов возрастает линейно с увеличением Z до $Z = 82$. Затем ядра перестают вообще быть стабильными. Что-то препятствует образованию стабильных ядер из одних нейтронов. Нам нужно найти объяснение этим фактам, пусть не из первых принципов КХД, а хотя бы в рамках эффективной теории, которую порождает КХД в области низких энергий.

Касаясь теоретических основ физики высоких энергий, мы можем с уверенностью полагаться лишь на аксиоматическую квантовую теорию поля [117–120]. Интересно понять, почему строгие результаты остаются в силе, если система аксиом раздвигает свои рамки до включения в них нелокально взаимодействующих полей, но этого не происходит при попытке расширить арену событий, заменив пространство–время Минковского на искривлённые многообразия. Означает ли это, например, что при учёте гравитации теорема о связи спина со статистикой перестает выполняться.

Пересмотру, вероятно, подвергнется и сама теория гравитации. Представление о гравитации как искривлении пространства, восходящее к Карлу Фридриху Гауссу, Бернхарду Риману, Уильяму Клиффорду и Анри Пуанкаре, было воплощено в общей теории относительности (ОТО) Альбертом Эйнштейном и Давидом Гильбертом. Но Пуанкаре полагал, что выбор геометрии — вопрос соглашения. Истинной геометрии физического мира не существует. Геометрия выбирается из соображений удобства. Пуанкаре считал евклидову геометрию самой удобной. Можно взять иное описание свойств пространства–времени, если должным образом изменить физические законы; в итоге множество физических событий и связей между ними останется прежним [121]. Это своего рода принцип дополнительности геометрии и физики.

Приняв ОТО, физики принесли в жертву великое научное завоевание XVIII и XIX вв. — законы сохранения энергии–импульса и момента импульса, связанные, как это следует из теоремы Эми Нётер, со свойствами симметрии пространства–времени: однородностью пространства–времени и изотропией пространства³³. К

³³ Основанием для сохранения импульса в ньютоновой механике Макс Планк считал принцип действия и противодействия [122]. Этот принцип допускает обобщение и на электродинамику, где электрический заряд e играет двоякую роль: e как мера воздействия поля на частицу (e входит множителем в выражение для силы Лоренца) и e как мера мощности источника поля (e входит множителем в выражение для плотности тока). В ОТО принцип действия и противодействия явным образом нарушен. Действительно, движение частицы массы m описывает геодезическое уравнение $(d^2z^\lambda/d\tau^2) + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda (dz^\mu/d\tau)(dz^\nu/d\tau) = 0$, которое не зависит от m , а из уравнения гравитационного поля с точечным источником $(R^{\mu\nu} - (1/2)Rg^{\mu\nu})(x) = 8\pi G_N m \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \dot{z}^\mu(\tau)\dot{z}^\nu(\tau)\delta^4[x - z(\tau)]$ следует, что чем больше m , тем сильнее порождаемое этой частицей гравитационное поле. Гравитационное поле действует на любую частицу одинаково, независимо от m , а влияние частицы на гравитационное поле различно при разных m . Принцип эквивалентности несовместим с принципом действия и противодействия. Поэтому основание для сохранения 4-импульса в ОТО отсутствует.

спасению этих законов в рамках ОТО прилагались неимоверные усилия, главным образом, применительно к модели "островной Вселенной", в которой вся материя компактно сосредоточена в конечной части пространства, а вокруг неё — вакуум. В такой модели при любой структуре "острова" пространство оказывается асимптотически плоским, и это служит предпосылкой к гамилтонову описанию такой системы [123–125].

Но даже формально определив гамильтониан, мы не в состоянии закрыть глаза на тот факт, что во Вселенной, эволюционирующей в нестационарном режиме, время не может быть однородным. Во-первых, выделенной точкой на оси времени является момент Большого взрыва. Во-вторых, происходит непрерывное скопление материи и последующий коллапс с образованием чёрных дыр, причём этот процесс необратим. В-третьих, топологическая сложность системы, содержащей чёрные дыры, ведёт к обрыву времениподобных направлений, точнее, к явлению геодезической неполноты.

Само понятие асимптотически плоского пространства не имеет математически однозначного определения. Качественно речь идёт об исчезновении кривизны на пространственной бесконечности, $R_{\beta\gamma\delta}^{\alpha} \rightarrow 0$, $r \rightarrow \infty$, и выборе координат, который обеспечит сходимости аддитивных величин, таких как гамильтониан и лагранжиан. Однако эти требования недостаточно ограничительны, для того чтобы устранить произвол в выборе расслоения пространства – времени на пространственноподобные сечения в согласии с условием асимптотической плоскостности. Свобода выбора масштабной сетки приводит к тому, что энергия швацшильдовской чёрной дыры, порождённой частицей массы m , может принимать любое значение: большее или равное m [126].

Вывод о наличии плохо определённых аддитивных величин в ОТО напоминает теорему Банаха–Тарского [127]³⁴. Согласно этой теореме трёхмерный шар можно разбить на несколько отдельных частей, которые затем собираются непрерывным перемещением в пространстве, без изменения их формы и без проникновения одной части сквозь другую, и в итоге возникает плотный шар, вдвое больший исходного. Объём шара в теореме Банаха–Тарского даётся обычной трёхмерной мерой Лебега, а энергию чёрной дыры описывает мера линейного функционала, форма которого определяется гамильтонианом Арновита – Дезера – Мизнера [123–125].

Обсуждать парадокс Банаха–Тарского в физическом контексте не принято по той банальной причине, что макроскопические объекты состоят из атомов. Разбиение математического континуума на части не имеет отношения к раздроблению твёрдых тел; нельзя разрезать апельсин на конечное число кусков, а затем собрать их так, чтобы образовался шар размером с Солнце. Но в этом рассуждении упущен один важный случай — чёрная дыра. Любая изолированная стационарная чёрная дыра полностью характеризуется тремя параметрами: её массой m , моментом импульса J и электрическим зарядом e . Индивидуальные свойства коллапсирующей системы не отпечатываются на облике получающейся чёрной дыры, ибо её внешнюю часть описывает решение Керра – Ньюмена. Чёрная дыра лишена зернистой структуры. В отличие от обычных квантово-механических связанных

систем, чёрная дыра не обладает дискретным спектром энергии. А линейный функционал, ассоциируемый с энергией чёрной дыры, допускает превращения в духе теоремы Банаха – Тарского.

Гравитация в ОТО не является обычным физическим полем, эволюционирующим в пространстве – времени Минковского $\mathbb{R}_{1,3}$, с однозначно определёнными энергией и импульсом. Этим она кардинально отличается от трёх остальных фундаментальных взаимодействий, описываемых СМ. Можно ли, следуя конвенциональной доктрине Пуанкаре, вернуться к теоретико-полевой трактовке гравитации, выбирая в качестве арены действия всех физических процессов $\mathbb{R}_{1,3}$? Это возможно [129], если допустить, что гравитация, описываемая тензорным полем второго ранга $\phi_{\mu\nu}$, всегда остаётся "достаточно слабой", т.е. в соотношении $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \phi_{\mu\nu}$, где $\eta_{\mu\nu}$ — метрический тензор в плоском фоновом пространстве $\mathbb{R}_{1,3}$, тензор $\phi_{\mu\nu}$ имеет малые компоненты в любой инерциальной системе отсчёта, $|\phi_{\mu\nu}| \ll 1$. Однородность $\mathbb{R}_{1,3}$ обеспечивает закон сохранения энергии – импульса в силу стандартных аргументов теоремы Нётер. Теоретико-полевая трактовка остаётся в силе, пока отображение $g_{\mu\nu} \mapsto \phi_{\mu\nu}$ является биективным гладким отображением, иначе говоря, любая допустимая конфигурация многообразия с метрикой $g_{\mu\nu}$, ассоциируемая с гравитационным эффектом, может быть гладко покрыта одним координатным листом. Однако решения динамических уравнений ОТО соответствуют пространству, изрытому чёрными дырами. Попытки придумать механизм, исключающий решения с нетривиальной топологией, привели к теории [130], не нашедшей широкого признания. А нужно ли вообще исключать такие решения? Может быть, в теоретико-полевом подходе следует рассматривать чёрную дыру как сингулярное решение типа сферической ударной волны? Известно, что наличие ударных волн в газодинамике вполне совместимо с законами сохранения энергии и импульса.

4.3. Это гады-физики на пари раскрутили шарик наоборот

Население планеты на сегодняшний день насчитывает 8 млрд жителей. Необходимое условие его развития — энергетика. Мир достаточно искущён и в законах физики, и в науках о Земле, чтобы осознать простую истину: мы добываем и потребляем энергию крайне нерациональным способом. Пора, наконец, прекратить сжигать ископаемые углеводороды — уголь, нефть, газ. Сеть атомных электростанций³⁵, работающих в замкнутом цикле, — оптимальное решение для всей Земли на будущие тысячелетия.

В отношении спектра нейтронов атомные реакторы разделяются на два типа: тепловые реакторы и реакторы на быстрых нейтронах (быстрые реакторы). В настоящее время почти все существующие энергетические (коммерческие и военные) реакторы — тепловые. Топливом для них служит изотоп урана ^{235}U .

Природный уран на 99,3 % состоит из ^{238}U , а доля ^{235}U составляет лишь 0,7 %. Но топливо должно содержать хотя бы 3–5 % ^{235}U . Топливо такого состава по-

³⁴ Подробному современному обсуждению теоремы Банаха–Тарского посвящена книга [128].

³⁵ В этом разделе использованы обычные в реакторной технике сокращения: АЭС — атомная электростанция, МОХ-топливо — топливо, содержащее оксиды делящихся материалов (англ. Mixed-OXide fuel), ОЯТ — отработанный ядерное топливо.

лучается из природного урана путём его обогащения. В тепловой реактор мощностью 1 ГВт загружают ~ 20 т обогащённого урана. Примерно через год топливо заменяют на свежее. За год сгорела лишь 1 т из 20, но заменять его всё равно нужно, так как изменилась реактивность топлива. С таким трудно дальше работать. Возникло 19 т ОЯТ. Учтём ещё, что исходные 20 т обогащённого урана получены из 200 т природного урана, иначе говоря, 180 т урана после процедуры обогащения идут в отвал. И так, сжигая 1 т урана, мы отправили 180 т в отвал плюс 19 т в ОЯТ.

Земной запас ^{235}U невелик. Если исходить из разведанных месторождений, то его запасы при современном темпе потребления этого изотопа кончатся раньше, чем запасы нефти и газа. ОЯТ тепловых реакторов содержат энергетический плутоний (доля ^{239}Pu в нём 60 %, остальное приходится на высшие изотопы Pu). Плутонием тоже можно "топить" тепловые реакторы, однако здесь он менее эффективен, чем ^{235}U , а процесс получается более дорогим. Переработка и хранение тысяч тонн ОЯТ, жидких отходов его переработки и накопившегося плутония, а также гор отвалов обогащения — одна из самых затратных частей атомной энергетики. Хранение 50 т плутония обходится в ~ 100 млн долл. в год. Обычно ОЯТ хранят на той же АЭС, где оно произведено. Но это не может длиться вечно. Ищут возможности его геологического захоронения. Только найти место захоронения и получить согласие местного населения на оборудование могильника радиоактивных веществ задача не из лёгких. Как правило, решение просто откладывают на будущее.

Топливом реакторов на быстрых нейтронах является смесь плутония и ^{238}U . Из ^{238}U такой реактор может произвести столько плутония, сколько он потребит урана. Реактору требуется начальная порция плутония, а далее нужно лишь добавлять ^{238}U , который дешевле, и запасы его велики. Возможен режим, когда производится как электроэнергия, так и добавочная порция плутония для других реакторов или оружия. Такой реактор называется размножителем. Но возможен и режим, когда количество плутония уменьшается; такую установку называют выжигателем. Одним словом, проблемы исчерпания запасов ^{235}U для реакторов на быстрых нейтронах не существует. Они работают фактически на ^{238}U .

Разработан также реактор, в котором расходуемым топливом является широко распространённый в природе изотоп тория ^{232}Th . Этот реактор может работать и на быстрых, и на тепловых нейтронах. Разведанных запасов ^{238}U и ^{232}Th хватит для всей мировой энергетики на многие тысячелетия.

Технология быстрых реакторов отвечает на вопрос, как поступить с плутонием, накопленным в ОЯТ тепловых реакторов, и огромным количеством ^{238}U в отвалах обогатительного производства. Всё может быть использовано как топливо быстрых реакторов. Быстрые реакторы сглаживают одну из самых острых проблем атомной энергетики — проблему накопления радиоактивных ОЯТ. Когда из ОЯТ извлечён плутоний и младшие актиниды, которые будут вновь загружены в реактор в качестве топлива, радиоактивность ОЯТ, состоящего из одних осколков деления, снижена в десятки раз. Вопросы захоронения отходов без экологически опасных последствий становятся теперь решаемыми.

Реактор на быстрых нейтронах сложнее реактора на тепловых нейтронах. Его нельзя охлаждать водой: вода

хорошо замедляет нейтроны. Нужен теплоноситель из относительно тяжёлых элементов. Пробовали ртуть, смесь натрия и калия, смесь висмута и свинца, пока не остановились на натрии. Хотя натрий горюч и активно реагирует с водой, по совокупности технологических и экономических показателей и с точки зрения безопасности этот теплоноситель на сегодня самый оптимальный.

Реактор со свинцовым теплоносителем кажется привлекательным ввиду простоты конструкции. В России эксплуатируются реакторы с натриевым теплоносителем: с 1980 г. БН-600 на 600 МВт и с 2016 г. БН-800 на 880 МВт. Строится реактор со свинцовым теплоносителем — БРЕСТ-300 на 300 МВт³⁶. Планируется создание БН-1200 с натриевым теплоносителем на 1200 МВт.

Одна из проблем реакторов на быстрых нейтронах — сложность приготовления топлива для таких реакторов. Другая серьёзная проблема — способность реактора выжигать α -активный ^{241}Am . Для замыкания ядерно-топливного цикла необходим высокий темп выжигания ^{241}Am реактором и малая длительность радиохимической стадии переработки ОЯТ. В реакторах БН-600 и БН-800 при существующей скорости радиохимии эта цель не достигается, ибо темп выжигания ^{241}Am не превышает здесь темпа его образования из ^{241}Pu . Поэтому необходимы дополнительные выжигатели. Теоретически БРЕСТ-300 способен выжечь не только образующийся в нём ^{241}Am , но и до 30 % америция, загружаемого в реактор извне. Оправдается ли такой прогноз на практике — узнаем в скором будущем.

Что касается ^{232}Th , то, в отличие от урана, он не образует богатых месторождений, хотя запасы тория в земной коре в 3–4 раза превышают запасы урана. Технология извлечения ^{232}Th из руды довольно сложна. В данное время единственный реактор на 40 МВт с топливом, содержащим ThO_2 , работает в Индии. Это ненормально. Ториевыми реакторами нужно заниматься в полную силу.

Реактор, работающий в режиме размножителя, позволяет легко накопить ^{239}Pu в количествах, необходимых для создания ядерного оружия. Чтобы предотвратить появление новых стран (или крупных террористических групп), обладающих таким оружием, США пытались ввести международный запрет на любую деятельность по созданию быстрых реакторов, включая установки исследовательского типа. Запрету подчинились все страны Запада, кроме Франции. В 1960–1970-е гг. Франция успешно справилась с проблемой изготовления МОХ из $(\text{U}_{0,8}\text{Pu}_{0,2})\text{O}_2$ и ввела в коммерческую эксплуатацию реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: в 1974 г. "Феникс" на 250 МВт, а в 1985 г. "Суперфеникс" на 1200 МВт. Но из-за технических просчётов, административных и политических причин реакторы были остановлены, к концу XX столетия деятельность на них прекращена. Сейчас энергетические реакторы на быстрых нейтронах работают только в России.

³⁶ Ряд специалистов относятся к его строительству скептически. Новые элементы — нитридное топливо $(\text{U}_{0,8}\text{Pu}_{0,2})\text{N}$ и свинцовый теплоноситель — следовало бы, считают они, изучить прежде на малых реакторах. Тревожат, например, слабо изученная проблема термохимической стабильности нитридов (грозящая распуханием топливного сердечника и коррозией оболочки) и неустойчивость кислородного потенциала (грозящая неконтролируемым осаждением оксидов свинца на стенках контура). Не опробован радиохимический передел на миниатюрных прототипах данной системы.

Атомная энергетика возникла как побочный продукт военной программы. Когда военные технологии реакторов на тепловых нейтронах вышли на промышленный уровень, явилась мысль использовать их в энергетике. Имелись два типа реакторов: газографитные для наработки плутония и водо-водяные (в которых вода забирает тепло у топлива и замедляет нейтроны) для подводных лодок. Реакторы первого типа оказались для энергетике не очень надёжными, а водо-водяные проявили себя лучше. На их основе и создавалась индустрия атомной энергетике.

Четверть века эта линия бурно развивается в США, СССР и Западной Европе. Она даёт сбой в результате аварии на американской АЭС Три-Майл-Айленд в 1979 г. Работы по ликвидации её последствий длились 14 лет и потребовали $\sim 10^9$ долл. Требования к безопасности резко возросли, стоимость строительства АЭС в США подскочила на порядок. До аварии было заложено 400 новых энергоблоков в дополнение к 100 уже действовавшим; после аварии все эти проекты остановлены как нежизнеспособные. С тех пор количество энергоблоков в США остаётся почти неизменным — в основном, благодаря решению о продлении сорокалетнего срока их эксплуатации ещё на 20 лет, но доля АЭС в энергетике непрерывно снижается.

В 1986 г. происходит авария на Чернобыльской АЭС, а в 2011 г. — авария на АЭС Фукусима-1. Мир познаёт последствия аварий и оценивает свою готовность оплачивать весь жизненный цикл таких систем с учётом затрат на дополнительные системы безопасности и проблему накопления ОЯТ. Развитые страны отказываются от ввода у себя новых энергоблоков, некоторые закрепляют отказ законодательно. Американский концерн Westinghouse продан японской фирме Toshiba; британскую корпорацию BNFL пытались приватизировать, но не нашлось покупателя; Франция делит государственную компанию Areva на части, передавая её управление другим компаниям; немецкий Siemens сворачивает свой ядерный бизнес. Эпоха энергетике с реакторами на тепловых нейтронах близится к логическому завершению.

Развитие атомной энергетике, основу которой составляют реакторы на тепловых нейтронах, — историческая ошибка. Цена этой ошибки стремительно возрастает. Чем раньше человечество полностью перейдёт на энергетике, использующую ториевые реакторы и урановые реакторы на быстрых нейтронах с замкнутым циклом, тем скорее оно приобретёт черты единого разумного организма.

Очевидно, что "зелёная" энергетике (ветряки, гидроэлектростанции, солнечные батареи), сколь бы успешно она ни развивалась, сможет удовлетворить лишь малую долю энергетической потребности и лишь в некоторых местах на Земле, причём с изменением климата география этих мест будет непредсказуемо смещаться. С другой стороны, продолжать жечь уголь, нефть и природный газ — значит бесстыдно грабить своих потомков. Нужно остановить этот процесс в международном объёме.

Серьёзным вызовом для прикладной физики и техники ближайшего будущего станет отыскание способов передачи электрической энергии на дальние расстояния без существенных омических потерь. Интересно, что, расставаясь с "бомбоделием", Сахаров обдумывал перспективу погрузиться в исследование именно этой проблемы, но обстоятельства толкнули его к правозащитной и политической деятельности.

На пути к тотальной атомной энергетике нас, возможно, ждут неожиданности и беды. Проблема замыкания ядерно-топливного цикла очень сложна. На каждом шагу встречается множество неизведанных путей; правильный выбор одного из них требует не только наличия ума, опыта и воли, но и терпения (испытания длятся годами), слаженности усилий, системной стратегии. К решению этой проблемы на Западе приступили ещё в конце 1940-х гг.; в СССР этим серьёзно занимались несколько десятилетий, создавая системы БР-2, БР-5, БР-10, БОР-60, БН-350, БН-600. Вместе с тем понятно, что при ответственном подходе к энергетике будущего мы должны решить проблему замыкания. Альтернатив не существует.

Неотъемлемым атрибутом современности стал автомобильный, авиационный и водный транспорт, приводимый в движение сжиганием нефтепродуктов. Что придёт ему на смену при переходе к чисто электрическому образу жизни? Можно обсудить различные варианты замены, например, использование водорода, производимого при разложении воды, или жидкого топлива сельскохозяйственного происхождения, но, по-видимому, здесь будет уместней отметить два общих непреложных факта.

Во-первых, назрела необходимость в городах, особенно мегаполисах, перемещать практически все людские массы общественным транспортом на электрической тяге. Во-вторых, развитие робототехники и средств связи делает физическое присутствие людей в местах их трудовой деятельности всё менее необходимым. Их передвижение на дальние расстояния скоростными поездами может стать в большинстве случаев по оперативности и экономичности предпочтительней воздушных полётов.

В целом это, конечно, угрожает ущемлением привычных индивидуальных прав "избранной части" нынешнего буржуазного мира в пользу другой части, практически лишённой большинства средств к цивилизованному существованию.

5. Особенности национальной науки

Широко распространено утверждение, что наука интернациональна. С этим нельзя не согласиться, если иметь в виду её международное предназначение. XX век снёс немало барьеров на пути к научным исследованиям, и в них влились представители разных рас и государств. Но сейчас идеалы интернационализма в функционировании науки подвергаются серьёзному испытанию в связи с конфликтом между Россией и Западом. Научное сообщество с этим испытанием может не справиться. Замячил рецидив национальной розни. Чтобы этому противостоять, следует, по крайней мере, не замалчивать источники этого заболевания — явные и скрытые.

Проявление национального характера неизгладимо в любой сфере человеческой деятельности. Физика не является исключением. Рассмотрим, к примеру, проблему конфайнмента. В самом названии этого явления и "насильственно-силовом" подходе к его истолкованию [74] прослеживается характерный стиль американцев. Японцев такое истолкование не устроило. В их духовной жизни важное место занимает преодоление чувства стыда. Цветовая природа кварков и глюонов "постыдна". Нужны средства её надёжного сокрытия. И средства ($Q_B|phys\rangle = Q_C|phys\rangle = 0$) были найдены [71].

Но — шутки в сторону. Рассудительно обсуждать этнические темы — дело трудное и опасное. Тем не менее сейчас это крайне необходимо.

Деление науки на "арийскую" и "неарийскую" в нацистской Германии не было из ряда вон выходящим явлением. Заблуждается тот, кто думает, что такого не может происходить в странах, достигших современного уровня цивилизации, и уж заведомо в Советском Союзе — оплоте дружбы народов. В середине 1930-х гг. Ландау мог заявить студентам харьковского механико-машиностроительного института: "Теоретическая физика — занятие не для славян" [131]. Конечно, этот высокомерный пассаж можно было бы отнести к одностороннему развитию вундеркинда и его малому жизненному опыту. Через 20–30 лет ему бы это в голову не пришло, и даже не потому, что он год провёл в тюрьме, приучившей его к сдержанности при посторонних людях. Он повстречал коллег славянского происхождения (Боголюбов, Сахаров), достижения которых в теоретической физике по глубине и значимости не только не уступали, но в ряде случаев намного превосходили его собственные. Друг его юности Георгий Антонович Гамов, которого он, казалось бы, знал, как облупленного, в конечном итоге оказался как учёный дальновидней и продуктивней Ландау.

Молодой Ландау с его дурными манерами — не единственный пример скептического и презрительного отношения к таланту славян. Это — система взглядов, укоренённая и на Западе, и у нас в стране. Образ её русского носителя, Смердяков, запечатлён в романе "Братья Карамазовы" Фёдора Михайловича Достоевского. Ум сам по себе не значится в числе главных качеств, воспитываемых у русского ребёнка. "У крестьянина три сына: старший умный был детина, средний сын и так и сяк, младший вовсе был дурак" [132]. Действительно, ни в народном эпосе, ни в русской литературе не сыщется героя, который бы, подобно гомеровскому Одиссею, не только достиг успеха в жизни, но и решил исход противостояния народов за счёт исключительной умственной изворотливости.

У славян значение ума не лежит на поверхности. Они ценят ум лишь в сочетании с честностью, смелостью и приверженностью добрым делам. Вне этого сочетания для проявлений ума используются другие термины. Эллины были менее взыскательны. Их не смущал оппортунизм Одиссея. Вспомним хотя бы, как тот пытался "откосить" от похода на Троию. Другой императив состоит в том, чтобы не тратить ум на мелочи (*aquila non captat muscas*³⁷). Талант предназначен для решения крупных задач³⁸. А если ты сумел их решить, то хлопотать о почестях — значит унижать своё дарование.

На Западе особенность русского мировосприятия часто либо не понимают, либо игнорируют. Классический пример — отношение к открытию Дмитрием Ивановичем Менделеевым периодического закона химических элементов, на основе которого он в 1869 г. предсказал существование и свойства неизвестных тогда

элементов — галлия, германия, скандия, и вычислил их атомные веса. Открытие этого фундаментального закона природы не удостоили Нобелевской премии³⁹. И даже таблицу Менделеева принято называть "the periodic table" — без упоминания имени её автора.

История науки знает множество примеров предвзятого отношения к достижениям русских. Кто-то может возразить, мол, сто́ит ли ворошить страницы древних времён с их грубыми обычаями? Что ж, вернёмся в цивилизованный период истории.

Физический мейнстрим определяют сегодня астрофизика и космология. Но нигде не мелькнёт даже намёка назвать отцами-основателями этого мейнстрима выходцев из России. Нередко их пионерские находки вызвали недоверие или насмешки. В 1922 г. Александр Александрович Фридман опубликовал теорию нестационарной Вселенной [133]. Эйнштейн назвал её подозрительной [134], но позднее признал свою неправоту [135] и объявил введённый им космологический член своей крупнейшей научной ошибкой. Сахаров показал, что с учётом квантовой теории присутствие этого члена неизбежно⁴⁰ [136]. Итак, Фридман установил, каков режим эволюции Вселенной. Его ученик Гамов дополнил описание термодинамикой, введя понятия Большого взрыва и горячей Вселенной. Он вычислил пропорции лёгких элементов, возникших в первичном нуклеосинтезе [137–139], предсказал реликтовое излучение, а в 1950 г. оценил его температуру в 3 К [140, 141]. Эти открытия американские коллеги ставили в один ряд с "хохмами", которыми фонтанировал одессит Гамов. Идеи Большого взрыва и горячей Вселенной получили ныне всеобщее признание, а для температуры реликтового излучения измерения дали 2,7 К. В 1967 г. Сахаров нашёл объяснение, почему ранняя Вселенная, содержащая в равных долях вещество и антивещество, утратила эту симметрию, представ перед нами заполненной лишь веществом [90]. В космологии ранней Вселенной механизм барионной асимметрии стал краеугольным камнем. В 1965 г. Эраст Борисович Глинер предложил считать космологический член величиной, ответственной за антигравитацию в модели пустой расширяющейся Вселенной с метрикой де Ситтера и уравнением состояния $p = -\varepsilon$, где p — давление, а ε — плотность энергии вакуума. С этим он пришёл к Зельдовичу в Институт прикладной математики. На его пути встал Игорь Дмитриевич Новиков, работавший ассистентом Зельдовича. Новикову идеи Глинера не понравились, ибо они противоречили канонам теоретической физики, начертанным в курсе Ландау и Лифшица. Глинера (потерявшего руку на фронтах Великой Отечественной войны и прошедшего 10 лет в лагерях) это не смутило. Он отстранил Новикова и предстал перед Зельдовичем. Тот не стал апеллировать к авторитету Ландау, а лишь заметил Глинеру, что из его уравнения состояния следует мнимое значение скорости звука. На том и расстались. В Москве побывал Стивен Хокинг. В беседе с ним о рож-

³⁷ Орёл мух не ловит — лат.

³⁸ Живи Гомер в наши дни, он не упустил бы возможности отправить Одиссея в Россию. Это — его конечный пункт. Герой стряхивает с себя остатки плейбойского налёта; здесь он познаёт жизнь в её трагическом величии. Одиссей прикипает сердцем к России. — Прощай, Итака! Прощай, любимая Пенелопа! Русскую инкарнацию Одиссея и выдумывать не понадобилось бы. В качестве прототипа вполне подошёл бы Григорий Яковлевич Перельман.

³⁹ Менделеев умер в 1907 г. Нобелевские премии по химии в 1901–1906 гг. были присуждены за результаты значительно меньшего масштаба.

⁴⁰ Качественное объяснение таково. Положительная энергия нулевых колебаний бозонных полей и отрицательная энергия дираковского моря фермионных полей суммарно порождают лагранжиан, содержащий скалярную кривизну пространства–времени и космологический член, другими словами, вакуум материи индуцирует упругость пространства–времени, проявляющую себя как гравитация.

дении частиц в гравитационном поле всплыло уравнение состояния Глинера, и Зельдович повторил Хокингу своё критическое замечание. Но Хокинг ответил, что вакуум не обязательно рассматривать как среду, по которой бегут звуковые волны. Зельдович согласился. Работа Глинера [142] была принята к печати. Сейчас космологический член считается воплощением антигравитации. Его природу связывают с "тёмной энергией". А раздувание ранней Вселенной переоткрыто 16 лет спустя теоретиками США и СССР. Теперь это устоявшийся элемент космологии.

Носят ли эти грандиозные открытия имена своих авторов? Единственное из них — открытие Фридмана. Однако к нему цепляют хвост других имён. Рискую погрешить против правил хорошего тона, но называть стандартную космологическую модель "миром Фридмана, Лемэтра, Робертсона, Уокера" — это, на мой взгляд, примерно то же, что произносить имя наполеоновского маршала через запятую с именами маркитантов.

Пока что речь шла о теоретических основах космологии. Экспериментальные же открытия в астрофизике и космологии принадлежат Западу. Может быть, русские не умеют сочетать работу мозга с работой руками? Очевидно, это не так, если говорить о вещах серьёзных. В Великую Отечественную войну Красная армия имела оружие, по качеству не уступавшее оружию гитлеровской армии, а о реактивной артиллерии ("Катюше") генералы вермахта могли только мечтать. С чудовищными людскими потерями и разрушенной послевоенной экономикой СССР сумел создать ядерную индустрию и ракетную технику того же уровня, что и США. Понадобились изобретательность и слаженность больших коллективов. Всё нужно было сделать "с нуля" самостоятельно — купить или заимствовать было просто не у кого. Я знал этих искусных людей, видел чудеса их мастерства. А в середине 1960-х гг. Северный Вьетнам воевал с США советским оружием и одержал победу.

Что касается экспериментальных открытий в фундаментальных исследованиях, то здесь наше отставание объясняется скудостью ресурсов. Сошлось на директора ВНИИЭФ, по словам которого бюджет института в конце 1970-х гг. был примерно равен бюджету Академии наук СССР с её 330 научными учреждениями и штатом в 10 раз большим штата ВНИИЭФ. В действительности экспериментальное отставание в фундаментальных областях — вопрос не совсем простой. Возьмём лишь один пример.

В 1962 г. Михаил Евгеньевич Герценштейн и Владислав Иванович Пустовойт предложили детектировать гравитационные волны лазерным интерферометром [143]. Через 10 лет появился современный учебник по гравитации [144], глава 37 которого посвящена гравитационным волнам и методам их обнаружения. В ней нет ни слова о методе Герценштейна–Пустовойта. Но гравитационные волны зарегистрированы LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) в 2015 г. именно этим методом. В 2017 г. Нобелевскую премию за это открытие получили американские сотрудники LIGO Барри Бэриш, Райнер Вайс и Кип Торн. О Пустовойте, который в то время был жив, в Нобелевском комитете не вспомнили. А как же сами лауреаты отозвались в своих нобелевских лекциях [145] о первоисточнике их славы? Бэриш не упомянул его вовсе. Он, как можно понять из

его выступления, большой начальник, отвечающий за финансы и управленческие кадры. Вайс ограничился замечанием, что в начале 1970-х гг. он размышлял над возможностью детектировать гравитационные волны при помощи установки типа майкельсоновского интерферометра, и такую же идею в 1963 г.⁴¹ предложили незнакомые ему русские — Герценштейн и Пустовойт. Торн заявил, что главным изобретателем лазерного интерферометра считает Вайса, ибо тот распознал наиболее серьёзные источники шумов, указал, как с ними иметь дело, и предложил L-образную установку километровых масштабов⁴² в отчёте [146]. Герценштейн и Пустовойт, по словам Торна, предложили голую идею прибора ранее и независимо от Вайса. С этим не поспоришь. Эйнштейн тоже выдвинул голую идею гравитационных волн ранее и независимо от Торна, и Торн провозгласил себя иконой консорциума LIGO [145], впервые открывшего гравитационные волны⁴³.

6. Остров Тяпина

Благодаря открытию ядер с атомными номерами 114 и 116, выполненному в Дубне международными коллективами экспериментаторов во главе с Юрием Цолаковичем Оганесяном [147, 148], мы узнали, что Периодическая система элементов Менделеева не обрывается где-то примерно на $Z = 105$. Чуть поодаль вырисовывается контур острова сравнительно долгоживущих ядер. Существование этого острова не было неожиданностью, он предсказан давно, но подтвердить предвидение удалось лишь в начале XXI в. Кто был предсказателем острова? Интернет намекает на Георгия Николаевича Флёрова. Скорее всего, Флёров действительно высказывался на этот счёт. Но для него как экспериментатора дело могло ограничиваться интуитивными догадками, связанными с многолетним опытом исследований синтеза трансурановых ядер. Что же касается чёткого теоретического предсказания, то его автор — Анатолий Сергеевич Тяпин. В его работе [149] сказано: "В интервале значений $Z = 114–124$ нет ярко выраженного магического числа, но все ядра с указанными значениями заряда будут обладать относительно большей стабильностью, чем соседние ядра с другими значениями заряда". Хотя предсказание группы относительно стабильных тяжёлых ядер, как говорят, носилось в воздухе [150], в 1971 г. это был единственный строгий результат, полученный с использованием всей математической мощи метода оболочечной поправки, развитого в пионерских работах [149, 151–157].

⁴¹ На самом деле — в 1962 г. Перевод на английский язык номера *ЖЭТФ* со статьёй [143] вышел в 1963 г., но там была указана дата оригинальной публикации.

⁴² Почему Герценштейн и Пустовойт рассматривали прибор размером ~ 10 м? Одна из причин состояла в том, что лазер в оптическом диапазоне был впервые создан за два года до публикации их работы; понятно, о какой мощности лазера можно было рассуждать в то время. Для установки километровых размеров требовался стабильно работающий лазер со средней мощностью излучения 200 Вт. Такой лазер стал доступен значительно позже, и он был использован как один из элементов проекта LIGO. Что же касается шумов, то предстоял трудный полувековой путь их идентификации и преодоления; центральную роль в этом опять сыграли русские — Владимир Борисович Брагинский и его коллеги, о чём откровенно сказано в книге Торна [12].

⁴³ Эйнштейн считал эти волны слишком слабыми, чтобы их можно было детектировать.

Исследователи, погружённые в тему, знакомы с этим предсказанием Тяпина и его теоретической основой, но уклоняются от его явного упоминания. Как это понять? Объективная причина состоит в том, что открытие Тяпина опередило время, ибо его экспериментальная проверка становится возможной лишь через три десятилетия. Вероятно, по этой причине ему сначала не придали значения, а потом слегка забыли, благо автор о нём не трубил.

Это напоминает историю о том, как в 1899 г. Оливер Хевисайд открыл δ -функцию (он называл её импульсной функцией) и нашёл выражение для её фурье-образа, заложив основы операционного исчисления. Но большая наука для его находки ещё не созрела. Тридцать лет спустя к этому же понятию пришёл Поль Дирак. Сегодня физик скажет: " δ -функция Дирака", и ему горя мало. Ладно, хоть за первообразной $\delta(x)$ закрепилось название ступенчатой функции Хевисайда [158].

Но имеется и субъективная сторона дела. Я много лет знал Тяпина и хотел бы привести свои соображения. Вторя пушкинскому "чёрт догадал меня родиться в России с душой и талантом", о Тяпине можно сказать: "Чёрт догадал его родиться жутко сообразительным и способным сканировать человеческие души". Толя был вундеркиндом, но родился не в еврейской семье, готовой воспитать вундеркинда⁴⁴ и терпеливо лечить типичную для таких созданий болезнь, условно обозначаемую термином "зазнайство", ибо неисцелённый вундеркинд может остаться инфантильным, навлекая на свою голову жестокие удары судьбы. Ходить за примерами далеко не надо. Двадцатичетырёхлетний Ландау заявил высокоцитимому патриарху советской физики Абраму Фёдоровичу Иоффе: "Теоретическая физика — наука сложная и не каждому дано её понять" [159] (сентенция по сути верная, но произнесённая в непристойном тоне), за что поплатился должностью в Ленинградском физико-техническом институте.

Примерно через три десятка лет подобная история случилась с Тяпиным, когда он учился в МИФИ. Его научный руководитель Александр Соломонович Компанец⁴⁵ предлагал Толе задачи всё возрастающей сложности и удивлялся, как быстро тот справляется с ними. Наконец, он дал Толе задачу по физике плазмы, которую не смог решить сам Ландау. Толя вмиг обнаружил камень преткновения и наметил путь преодоления трудности. На радостях Компанец потащил Тяпина к Ландау. Толя со свойственной юному дарованию бестактностью указал мэтру, где тот споткнулся и как следовало бы ему действовать, чтобы добиться успеха. Ландау молча проглотил этот вызов, а Компанецу сказал, что в дальнейшем видеть его протеже не желает.

С тяжёлым сердцем Александр Соломонович понял, что отныне в московской академической среде раскрыться таланту его питомца будет невозможно. Всё, что он мог сделать — это уговорить Толю по окончании вуза принять распределение на работу в закрытый

Арзамас-16, чтобы там у опытного педагога Базя подчерпнуть профессиональный навык работы в теории ядра.

Базь был благожелательным человеком с тонким чувством юмора [14]. Но Тяпин сразу же выявил в нём нечто глубоко скрытое от большинства окружающих, и это породило взаимное отталкивание. Базь избегал конфликтов. Он предложил Тяпину отправиться в Курчатовский институт на годовую стажировку, чтобы там найти и теоретическую работу по вкусу, и товарищей по душе. Тяпин согласился.

В Курчатовском институте судьба сводит Тяпина с Виталом Митрофановичем Струтинским, в то время пытавшимся объединить полуэмпирическую капельную модель ядра с более фундаментальной квантово-механической оболочечной моделью. За месяц они успешно преодолевают трудности и публикуют статью [151]. Однако их дальнейшее сотрудничество не складывается. Струтинский пользовался репутацией человека приятного во всех отношениях [160], но и на этом "Солнце" Тяпин умудрился разглядеть пятна. Тяпин прерывает стажировку и возвращается во ВНИИЭФ. Он уже ощутил себя самостоятельным исследователем ядра.

1960-е годы были периодом прощания с теорией ядра как физическим мейнстримом. Признанные лидеры переклюнулись на исследования в теории элементарных частиц, астрофизике и космологии. Тяпин мог бы тоже совершить вираж с заходом на одну из этих полос. Но он шёл собственным курсом — всегда на переднем фронте ядерных исследований, обретавших в его статьях математическую строгость и физическую основательность. Конечно, много сил и времени уходило на вычисления, связанные с планами закрытых работ ВНИИЭФ.

Круг его интересов был весьма широк. Он изучал распространение сейсмических волн в двухслойной среде, создавал методы численных расчётов для кинетических моделей разрушения материалов. И всё же его главной страстью была теория ядра.

Тяпин понимал, что фундаментального описания ядра не создано. Имеется лишь разрозненный набор моделей, приспособленных для объяснения отдельных явлений. КХД уверенно отстаивала свои претензии на статус официально признанной теории сильных взаимодействий при высоких энергиях ≥ 100 МэВ. Но юкавский механизм, согласно которому нуклоны удерживаются в ядре за счёт обмена мезонами, пока оставался краугольным камнем ядерной физики⁴⁶. В середине 1990-х гг. практически весь

⁴⁴ Возможно, в древности пристальное внимание к ментальным особенностям новорождённого у иудеев было связано с ожиданием пришествия мессии в человеческом облике, а в наше время, в основном утратив религиозный смысл, сохранилось как бытовая традиция. О ней напоминают такие еврейские фамилии, как Излюбленный сын и Сладостное дитя (нем. Liebersohn и Süsskind).

⁴⁵ Ученик Ландау, первым выдержавший все экзамены по знаменитому "теорминимуму".

⁴⁶ Юкавский механизм, оснащённый рядом новшеств, таких как спонтанное нарушение киральной симметрии, лагранжианы эффективных теорий, разложения по производным [161], доминирует в этой области и поныне [162, 163], хотя описание ядер в терминах кварков было сразу же включено в повестку дня 1970-х гг. как одно из актуальных направлений КХД. Простейшая возможность состояла в том, чтобы ядро с массовым номером A представить как связанную систему из $N = 3A$ кварков, заключённую в "мешок" размером R [164]. Между тем условие стабильности мешка [165] требует, чтобы N и R были связаны соотношением $R \sim N^{1/4}$, которое противоречит твёрдо установленному феноменологическому соотношению $R \sim N^{1/3}$, причём расхождение в предсказаниях этих формул становится особенно заметным для тяжёлых ядер. Более того, магнитные моменты таких мешков заметно отличаются от экспериментально установленных магнитных моментов [166, 167]. Попытки описать статические свойства ядер путём устранения глюонных степеней свободы были чуть более успешны [168], но дело ограничивалось лёгкими ядрами D, T и He.

арсенал средств юкавской концепции был исчерпан, и Тяпин приходит к выводу, что дальнейшее продвижение в теории ядра невозможно без радикального обновления её основ, например, путём описания динамики ядра как связанной системы кварков в рамках некоторой эффективной теории КХД в инфракрасном пределе.

К сожалению, в это время у него возникают серьёзные проблемы со здоровьем. Последние десять лет Тяпина напоминают последние шесть лет Ландау в том смысле, что оба не могли включить в действие всё богатство ума и воли, свойственные им от рождения. Но имелись и отличия. В 1962 г. Ландау удостоился Нобелевской премии. В 2012 г. мне становится известно о существовании премии имени Лизы Мейтнер, и я пытаюсь номинировать Тяпина как учёного, теоретически предсказавшего "остров стабильности". Условия конкурса включали в себя предоставление отзывов от трёх известных специалистов в теории ядра. На тот момент подходящих людей оставалось очень мало. К тому же об этой премии я узнал случайно и с запозданием. У меня просто не хватило времени, чтобы до окончания срока подачи заявок связаться с тремя авторитетными ядерщиками и организовать написание отзывов. Чуть позже в тот год Анатолия Сергеевича не стало.

Тяпин как личность являл собой сгусток противоречий. Со славянским лицом — простым, как сельская местность, и потрясающим даром видеть человека насквозь; с детской прямолинейностью в общении и огромным запасом терпимости к чужим слабостям; с индивидуальным стилем исследователя и готовностью впрячься в дело коллектива. Для иллюстрации упомяну лишь один факт: Тяпин вступает в КПСС в 1979 г., т.е. за год до провозглашённого полного построения коммунизма в СССР, провал которого был всем очевиден, причём этот шаг не преследовал ни карьерных, ни корыстных целей, ибо Тяпин никогда не был начальником. Он мог спасти коллегу, тонущего в научных затруднениях, считая такой поступок в порядке вещей⁴⁷. У него не было врагов. Но само его присутствие некоторые воспринимали как немой укор совести, как напоминание о чём-то неблагоприятном или даже постыдном в их биографии. Иногда от этих людей зависело, отметить ли своим упоминанием находку учёного, привлекая к ней дополнительное внимание, или обойти её молчанием.

Вклад Анатолия Сергеевича в физику ядра, я думаю, сильно недооценён. Было бы правильно в честь этой незаурядной фигуры времён окончания "золотого века" ядерной физики присвоить какому-нибудь из элементов предсказанной им группы относительно стабильных ядер с $114 \leq Z \leq 124$ его имя.

Или, может, просто назвать всю группу "островом Тяпина"?

7. Заключение

Не знаю, как завершить историю, в которой happy end выглядел бы насмешкой над реальностью. Может, уместно обратиться к знаменитой байроновской элгии:

⁴⁷ Таким был внутренний мир человека, встретившего реальность войны в четырёхлетнем возрасте и выросшего в условиях испытаний, которые выпали на долю простых советских людей в ту пору.



Анатолий Сергеевич Тяпин
(23.01.1938 – 12.07.2012)

I only know — we loved in vain —
I only feel — Farewell! — Farewell!⁴⁸
или шемящей прощальной ноте Гийома Аполлинера:
J'ai cueilli ce brin de bruyère
L'automne est morte souviens-t'en
Nous ne nous verrons plus sur terre
Odeur du temps brin de bruyère
Et souviens-toi que je t'attends⁴⁹

Я описал ряд эпизодов научной и социальной жизни, приведших в конечном счёте к закату физики высоких энергий. Я не мог пройти мимо участников этих событий. Благотворное или пагубное влияние они оказали на ход событий — покажет будущее. Я не моралист, я физик. Для меня важны факты, их причинная взаимосвязь, логика их появления. Оценки читатель сделает самостоятельно.

Список литературы

1. Benedikt M, Zimmermann F *The Future Circular Collider Study*. *CERN Courier* 28 March 2014. Available at: <https://cerncourier.com/a/the-future-circular-collider-study/>

⁴⁸ Лишь знаю я (и мог снести),

Что тщетно в нас жила любовь, —
Лишь чувствую — прости! — прости!
Перевод М. Ю. Лермонтова.

⁴⁹ Я сорвал этот вереск лиловый
Осень кончилась, значит, в путь
На земле нам не встретиться снова
Запах времени вереск лиловый
Но я жду тебя. Не забудь
Перевод Эльги Линецкой.

2. Dimopoulos S, Raby S A, Wilczek F "Unification of couplings" *Phys. Today* October 25 (1991)
3. Bodmer A R "Collapsed nuclei" *Phys. Rev. D* **4** 1601 (1971)
4. Witten E "Cosmic separation of phases" *Phys. Rev. D* **30** 272 (1984)
5. Dar A, De Rujula A, Heinz U "Will relativistic heavy-ion colliders destroy our planet?" *Phys. Lett. B* **470** 142 (1999) ArXiv: hep-ph/9910471
6. Jaffe R L et al. "Review of speculative "disaster scenarios" at RHIC" *Rev. Mod. Phys.* **72** 1125 (2000); ArXiv: hep-ph/9910333
7. Сахаров А *Воспоминания* (Нью-Йорк: Изд-во им. Чехова, 1990)
8. Заседание сессии ООН A/50/PV.125. Результаты голосования: за 158, против 3, воздержались 5. Номер документа A/RES/50/245
9. TOP500 — программа опубликования (дважды в год) перечня 500 созданных в мире наиболее мощных суперкомпьютеров
10. Строфа из басни Ивана Андреевича Крылова "Петух и жемчужное зерно"
11. Ж. Алфёров *Власть без мозгов. Кому меиают академики* (М.: Алгоритм, 2013)
12. Thorne K S *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (New York: Norton, 1994); Перевод: Чёрные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна (М.: Физматлит, 2009)
13. Trutnev Yu A (Ed.) *In the Intermissions... Collected Works on Research into the Essentials of Theoretical Physics in Russian Federal Nuclear Center, Arzamas-16* (Singapore: World Scientific, 1998)
14. Галицкий В М и др. Памяти Альфреда Ивановича Базя *УФН* **127** (2) 335 (1979); Galitskii V M et al. Alfred Ivanovich Baz' (Obituary) *Sov. Phys. Usp.* **22** 119 (1979)
15. Базь А И "Время жизни промежуточных состояний" *ЯФ* **4** 252 (1966); Baz' A I "Life-time in intermediate states" *Sov. J. Nucl. Phys.* **4** 182 (1967)
16. Рыбаченко В Ф "Время прохождения частицы через барьер" *ЯФ* **5** 895 (1967); Rybachenko V F "The time it takes for a barrier to be penetrated" *Sov. J. Nucl. Phys.* **5** 635 (1967)
17. Подробности этого периода жизни Зельдовича см. в книге *Знакомый незнакомый Зельдович (в воспоминаниях друзей, коллег, учеников)* (Ред. С.С. Герштейн, Р.А. Сюняев) (М.: Наука, 1993); English translation: *Zeldovich: Reminiscences* (Ed. R.A. Sunyaev) (New York: Taylor & Francis, 2004)
18. Schweber S S *QED and the Men Who Made It* (Princeton: Princeton University Press, 1994)
19. Ландау Л, Померанчук И "О точечном взаимодействии в квантовой электродинамике" *ДАН* **102** 489 (1955)
20. Фрадкин Е С "К вопросу об асимптотике функций Грина в теории мезонов со слабой псевдоскалярной связью" *ЖЭТФ* **29** 377 (1955); Fradkin E S "The problem of the asymptote of the Green function in the theory of mesons with pseudoscalar coupling" *Sov. Phys. JETP* **2** 340 (1956)
21. Landau L D, Abrikosov A A, Khalatnikov I M "On the quantum theory of fields" *Nuovo Cimento Suppl.* **3** 80 (1955)
22. Landau L D "Fundamental problems" In: *Theoretical Physics in the Twentieth Century. A Memorial Volume to Wolfgang Pauli* (Cambridge: Cambridge University Press, 1960) pp. 245-249; Перевод на рус. яз.: *Теоретическая физика 20 века* (М.: ИЛ, 1962) с. 285-289
23. Gross D J "Twenty five years of asymptotic freedom" *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **74** 424 (1999); ArXiv: hep-th/9809060
24. Померанчук И Я "Равенство полных сечений взаимодействия нуклонов и антинуклонов при больших энергиях" *ЖЭТФ* **34** 725 (1958); Pomeranchuk I Ya "Equality of the nucleon and antinucleon total interaction cross section at high energies" *Sov. Phys. JETP* **7** 499 (1958)
25. Dyson F J "The S matrix in quantum electrodynamics" *Phys. Rev.* **75** 1736 (1949)
26. Мейман Н Н "Принцип причинности и асимптотическое поведение амплитуды рассеяния" *ЖЭТФ* **47** 1966 (1964); Meiman N N "The causality principle and the asymptotic behavior of the scattering amplitude" *Sov. Phys. JETP* **20** 1320 (1965)
27. Jaffe A M "High-energy behavior in quantum field theory. I. Strictly localizable fields" *Phys. Rev.* **158** 1454 (1967)
28. Efimov G V "On a class of relativistic invariant distributions" *Commun. Math. Phys.* **7** 138 (1968)
29. Ефимов Г В *Нелокальные взаимодействия квантованных полей* (М: Наука, 1977)
30. Alebastrov V A, Efimov G V "A proof of the unitarity of S-matrix in a nonlocal quantum field theory" *Commun. Math. Phys.* **31** 1 (1973)
31. Alebastrov V A, Efimov G V "Causality in quantum field theory with nonlocal interaction. Commun" *Math. Phys.* **38** 11 (1974)
32. Иофа М З, Файнберг В Я "Вайтмановская формулировка для нелокализуемой теории поля" *ЖЭТФ* **56** 1644 (1969); Iofa M Z, Fainberg V Ya "Wightman formulation for a nonlocalizable field theory" *Sov. Phys. JETP* **29** 880 (1969)
33. Fradkin E S "Application of functional methods in quantum field theory and quantum statistics: I. Divergence-free field theory with local non-linear interaction" *Nucl. Phys.* **49** 624 (1963)
34. Efimov G V "Formulation of a scalar field theory with an essentially non-linear interaction" *Nucl. Phys.* **74** 657 (1965)
35. Волков М К, Первушин В Н *Существенно нелинейные квантовые теории, динамические симметрии и физика мезонов* (Ред. Д.И. Блохинцев.) (М.: Атомиздат, 1978)
36. Yang C N, Mills R "Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance" *Phys. Rev.* **96** 191 (1954)
37. Utiyama R "Invariant theoretical interpretation of interaction" *Phys. Rev.* **101** 1597 (1956)
38. Glashow S L "Partial-symmetries of weak interactions" *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961)
39. Salam A, Ward J C "Electromagnetic and weak interactions" *Phys. Lett.* **13** 168 (1964)
40. Gell-Mann M "A schematic model of baryons and mesons" *Phys. Lett.* **8** 214 (1964)
41. Zweig G "An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking I, and II" CERN preprints No. 8182/TH.401, and 8419/TH.412. Reprinted in: *Developments in the Quark Theory of Hadrons.* **1** 1964 (Eds D.B. Lichtenberg, S.P. Rosen) (Reading: Hadronic Press, 1980), pp. 22-101
42. Lyons L "Quark search experiments at accelerators and in cosmic rays" *Phys. Rept.* **129** 225 (1985)
43. Adler S L "Axial-vector vertex in spinor electrodynamics" *Phys. Rev.* **177** 2426 (1969)
44. Bell J S, Jackiw R "A PCAC puzzle: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ in the σ -model" *Nuovo Cimento A* **60** 47 (1969)
45. Боголюбов Н Н "Условие причинности в квантовой теории поля" *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **19** 237 (1955)
46. Bogoliubov N N, Parasiuk O A "Über die Multiplikation der Kausalfunktionen in der Quantentheorie der Felder" *Acta Math.* **97** 227 (1957)
47. Hepp K "Proof of the Bogoliubov-Parasiuk theorem on renormalization" *Commun. Math. Phys.* **2** 301 (1966)
48. Zimmerman W In: *Lectures on Elementary Particles and QFT* Brandies Lectures (Massachusetts: MIT Press, 1971)
49. Faddeev L D, Popov V N "Feynman diagrams for the Yang-Mills field" *Phys. Lett. B* **25** 29 (1967)
50. Goldstone J "Field theories of "superconductor" solutions" *Nuovo Cimento* **19** 154 (1961)
51. Englert F, Brout R "Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons" *Phys. Rev. Lett.* **13** 321 (1964)
52. Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B "Global conservation laws and massless particles" *Phys. Rev. Lett.* **13** 585 (1964)
53. Higgs P S "Broken symmetries, massless particles and gauge fields" *Phys. Lett.* **12** 132 (1964)
54. Weinberg S "A model of leptons" *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)
55. Salam A "Weak and electromagnetic interactions" In: *Proc. of the 8th Nobel Symposium* (Ed. Svartholm) (Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1968), pp. 367-377; Republication 1994: *Selected Papers of Abdus Salam (with Commentary)* (Ed. A. Ali et al.) (Singapore: World Scientific, 1968), pp. 244-254
56. Hooft G 't, Veltman M "Regularization and renormalization of gauge fields" *Nucl. Phys. B* **44** 189 (1972)
57. Greenberg O W "Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons" *Phys. Rev. Lett.* **13** 598 (1964)
58. Han M Y, Nambu Y "Three-triplet model with double SU(3) symmetry" *Phys. Rev. B* **139** 1006 (1965)
59. Боголюбов Н Н, Струминский Б В, Тавхелидзе А Н "О составных моделях в теории элементарных частиц" (Дубна: Препринт ОИЯИ D-1968, 1965); Bogoliubov N N, Struminsky B V,

- Tavkhelidze A N "On composite models in the theory of elementary particles" (Dubna: JINR Preprint D-1968, 1965)
60. Weinberg S "Non-Abelian gauge theories of the strong interactions" *Phys. Rev. Lett.* **31** 494 (1973)
 61. Fritzsche H, Gell-Mann M, Leutwyler H "Advantages of the color octet gluon picture" *Phys. Lett. B* **47** 365 (1973)
 62. Gross D J, Wilczek F "Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories" *Phys. Rev. Lett.* **30** 1343 (1973)
 63. Politzer H D "Reliable perturbative results for strong interactions?" *Phys. Rev. Lett.* **30** 1346 (1973)
 64. Ваянин В С, Терентьев М В "Поляризация вакуума заряженных векторных полей" *ЖЭТФ* **48** 565 (1965); Vanyashin V S, Terent'ev M V "The vacuum polarization of a charged vector field" *Sov. Phys. JETP* **21** 375 (1965)
 65. Хриплович И Б "Функции Грина в теориях с неабелевой калибровочной группой" *ЯФ* **10** 409 (1969); Khriplovich I B "Green's functions in theories with non-Abelian gauge group" *Sov. J. Nucl. Phys.* **10** 235 (1969)
 66. Feynman R P *Photon-Hadron Interactions* (Reading: Benjamin, 1972); Перевод на рус. яз.: *Взаимодействие фотонов с адронами* (М.: Мир, 1975)
 67. Gross D, Jackiw R "Effect of anomalies on quasirenormalizable theories" *Phys. Rev. D* **6** 477 (1972)
 68. Bouchiat C, Iliopoulos J, Meyer P "An anomaly-free version of Weinberg's model" *Phys. Lett. B* **38** 519 (1972)
 69. Gaillard M K, Grannis P D, Sciulli F J "The standard model of particle physics" *Rev. Mod. Phys.* **71** S96 (1999)
 70. Окунь Л Б *Физика элементарных частиц* 2-е изд. (М.: Наука, 1988)
 71. Kugo T, Ojima I "Manifestly covariant canonical formulation of Yang-Mills theories physical state subsidiary conditions and physical S-matrix unitarity" *Phys. Lett. B* **73** 459 (1978)
 72. Mandelstam S "General introduction to confinement" *Phys. Rept.* **67** 109 (1980)
 73. Bander M "Theories of quark confinement" *Phys. Rept.* **75** 205 (1981)
 74. Wilson K G "Confinement of quarks" *Phys. Rev. D* **10** 2445 (1974)
 75. Creutz M *Quarks, Gluons and Lattices* (Cambridge: Cambridge University Press, 1983); Перевод на рус. яз.: *Кварки, глюоны и решетка* (М.: Мир, 1987)
 76. Jaffe A, Witten E "Quantum Yang-Mills theory" In: *The Millennium Prize Problems* (Eds J. Carlson, A. Jaffe, A. Wiles) (Cambridge: The Clay Mathematics Institute, 1999)
 77. Actor A "Classical solutions of SU(2) Yang-Mills theories" *Rev. Mod. Phys.* **51** 461 (1979)
 78. Hooft G 't "Magnetic monopoles in unified gauge theories" *Nucl. Phys. B* **79** 276 (1974)
 79. Polyakov A M "Particle spectrum in quantum field theory" *JETP Lett.* **20** 194 (1974)
 80. Belavin A A et al. "Pseudoparticle solutions of the Yang-Mills equations" *Phys. Lett. B* **59** 85 (1975)
 81. Coleman S "There are no classical glueballs" *Commun. Math. Phys.* **55** 113 (1977)
 82. Briceño R A, Dudek J J, Young R D "Scattering processes and resonances from lattice QCD" *Rev. Mod. Phys.* **90** 025001 (2018); ArXiv: hep-lat/1706.06223
 83. Sygne J L "On the electromagnetic two-body problem" *Proc. Roy. Soc. (London) A* **177** 118 (1940)
 84. Dyson F J, Lenard A "Stability of matter. I" *J. Math. Phys.* **8** 423 (1967)
 85. Dyson F J "Ground-state energy of a finite system of charged particles" *J. Math. Phys.* **8** 1538 (1967)
 86. Dyson F J, Lenard A "Stability of matter. II" *J. Math. Phys.* **9** 698 (1968)
 87. Pati J, Salam A "Lepton number as the fourth color." *Phys. Rev. D* **10** 275 (1974)
 88. Georgy H, Glashow S "Unity of all elementary-particle forces" *Phys. Rev. Lett.* **32** 438 (1974)
 89. Langacker P "Grand unification" *Scholarpedia* **7** (10) 11419 (2012)
 90. Сахаров А Д "Нарушение CP-инвариантности, C-асимметрия и барионная асимметрия вселенной" *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967); Sakharov A D "Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe" *Sov. Phys. Usp.* **34** 392 (1991)
 91. Zyla P A et al. (Particle Data Group) *Rev. Particle Phys. Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020** 083C01 (2020)
 92. Березин Ф А, Кац Г И "Группы Ли с коммутирующими и антикоммутирующими параметрами" *Матем. сб.* **82** 343 (1970); Berezin F A, Kats G I "Lie groups with commuting and anticommuting parameters" *Math. USSR-Sb.* **11** 311 (1970)
 93. Гольфанд Ю А, Лихтман Е П "Расширение алгебры генераторов группы Пуанкаре и нарушение P-инвариантности" *Письма в ЖЭТФ* **13** 452 (1971); Gol'fand Yu A, Likhman E P "Extension of the algebra of Poincaré group generators and violation of P-invariance" *JETP Lett.* **13** 323 (1971)
 94. Neveu A, Schwarz J H "Factorizable dual model of pions" *Nucl. Phys. B* **31** 86 (1971)
 95. Gervais J-L, Sakita B "Field theory interpretation of supergauges in dual models" *Nucl. Phys. B* **34** 632 (1971)
 96. Ramond P "Dual theory for free fermions" *Phys. Rev. D* **3** 2415 (1971)
 97. Волков Д В, Акулов В П "Возможное универсальное взаимодействие нейтрино" *Письма в ЖЭТФ* **16** 621 (1972); Volkov D V, Akulov V P "Possible universal neutrino interaction" *JETP Lett.* **16** 438 (1972)
 98. van Nieuwenhuizen P "Supergravity" *Phys. Rept.* **68** 189 (1981)
 99. Veneziano G "Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories" *Nuovo Cimento A* **57** 190 (1968)
 100. Nambu Y "Duality and hydrodynamics. Lectures in the Copenhagen High Energy Symposium 1970. Reproduction: *Broken Symmetry: Selected Papers of Y. Nambu* (Eds T. Eguchi, K. Nishijima) (Singapore: World Scientific, 1995), pp. 280-301
 101. Goto T "Relativistic quantum mechanics of one-dimensional mechanical continuum and subsidiary condition of dual resonance model" *Progr. Theor. Phys.* **46** 1560 (1971)
 102. Scherk J, Schwarz J H "Dual models for non-hadrons" *Nucl. Phys. B* **81** 118 (1974)
 103. Green M B, Schwarz J H, Witten E *Superstring Theory* Vol. 1, 2 (Cambridge: Cambridge University Press, 1987)
 104. Polchinski J *String Theory* Vol. 1, 2 (Cambridge: Cambridge University Press, 1998)
 105. Polchinski J "String duality" *Rev. Mod. Phys.* **68** 1245 (1996); ArXiv: hep-th/9607050
 106. Witten E "String theory dynamics in various dimensions" *Nucl. Phys. B* **443** 85 (1995); ArXiv: hep-th/9503124
 107. Maldacena J "The large N limit of superconformal field theories and supergravity" *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** 231 (1998); ArXiv: hep-th/9711200
 108. Witten E "Anti-de Sitter space and holography" *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** 253 (1998); ArXiv: hep-th/9802150
 109. Gubser S S, Klebanov I R, Polyakov A M "Gauge theory correlators from noncritical string theory" *Phys. Lett. B* **428** 105 (1998); ArXiv: hep-th/9802109
 110. Ammon M, Erdmenger J *Gauge/Gravity Duality* (Cambridge: Cambridge University Press, 2015)
 111. Năstase H *Introduction to the AdS/CFT Correspondence* (Cambridge: Cambridge University Press, 2015)
 112. Herzog C P "A holographic prediction of the deconfinement temperature" *Phys. Rev. Lett.* **98** 091601 (2007); ArXiv: hep-ph/0608151
 113. Witten E "Why does quantum field theory in curved spacetime make sense? And what happens to the algebra of observables in the thermodynamic limit?"; ArXiv: hep-th/2112.11614
 114. Woit P *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Continuing Challenge to Unify the Laws of Physics* (London: Jonathan Cape, 2006)
 115. Rovelli C *Quantum Gravity* (Cambridge: Cambridge University Press, 2004)
 116. Bulanov S S et al. "Schwinger limit attainability with extreme power lasers" *Phys. Rev. Lett.* **105** 220407 (2010)
 117. Streater R F, Wightman A S *PCT, Spin and Statistics and All That* (New York: Benjamin, 1964); Перевод на рус. яз.: Стритер Р, Вайтман А С *PCT, спин и статистика и всё такое* (М.: Наука, 1966)

118. Боголюбов Н Н и др. *Общие принципы квантовой теории поля* (М: Наука, 1987)
119. Glimm J, Jaffe A *Quantum Phys. A Functional Integral Point of View* (Berlin: Springer, 1981); Перевод на рус. яз.: Глимм Дж, Джаффе А *Математические методы квантовой физики. Подход с использованием функциональных интегралов* (М: Мир, 1984)
120. Haag R *Quantum Physics. Fields, Particles, Algebras* 2nd ed. (Berlin: Springer, 1996)
121. Poincaré H. (1902) *La Science et l'Hypothèse* (Paris: Flammarion, 1952); Перевод на рус. яз.: Пуанкаре А *Наука и гипотеза* В сб. *О науке* (М: Наука, 1983)
122. Planck M "Bemerkungen zum Prinzip der Aktion Reaktion in der allgemeinen Dynamik" *Phys. Z.* **9** 828 (1908)
123. Arnowitt R, Deser S, Misner C W "Canonical variables for general relativity" *Phys. Rev.* **117** 1595 (1960)
124. Arnowitt R, Deser S, Misner C W "Energy and the criteria for radiation in general relativity" *Phys. Rev.* **118** 1100 (1960)
125. Arnowitt R, Deser S, Misner C W "Coordinate invariance and energy expressions in general relativity" *Phys. Rev.* **122** 997 (1961)
126. Денисов В И, Соловьёв В О "Энергия, определяемая в ОТО на основе традиционного гамильтонова подхода, не имеет физического смысла" *ТМФ* **56** 301 (1983); Denisov V I, Solov'ev V O "The energy determined in general relativity on the basis of the traditional Hamilton approach does not have physical meaning" *Theor. Math. Phys.* **56** 832 (1983)
127. Banach S, Tarski A "Sur la décomposition des ensembles de points en parties respectivement congruentes" *Fund. Math.* **6** 244 (1924)
128. Wagon S *The Banach–Tarski Paradox* (Cambridge: Cambridge University Press, 1994)
129. Rosen N "General relativity and flat space I; and II" *Phys. Rev.* **15** 147-150 and 150-153 (1940)
130. Логунов А А *Релятивистская теория гравитации* (М: Наука, 2006)
131. Джоозефсон П, Шевченко О С, Ранюк Ю Н "Ещё раз об "антисоветской забастовке" харьковских физиков" *ВИЕТ* **3** 69 (2007)
132. Ершов П П *Конёк-горбунок*
133. Friedmann A "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **10** 377 (1922)
134. Einstein A, Bemerkung zu der Arbeit von A Friedmann "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **11** 326 (1922)
135. Einstein A, Notiz zu der Arbeit von A Friedmann "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **16** 228 (1923)
136. Сахаров А Д "Вакуумные квантовые флуктуации в искривлённом пространстве и теория гравитации" *ДАН СССР* **177** 70 (1967)
137. Gamow G "Expanding Universe and the origin of elements" *Phys. Rev.* **70** 572 (1946)
138. Gamow G "The origin of elements and the separation of galaxies" *Phys. Rev.* **74** 505 (1948)
139. Gamow G "On relativistic cosmogony" *Rev. Mod. Phys.* **21** 367 (1949)
140. Gamow G "Half an hour of creation..." *Phys. Today* **3** (8) 16 (1950)
141. Чернин А Д "Как Гамов вычислил температуру реликтового излучения, или немного об искусстве теоретической физики" *УФН* **164** 889 (1994); Chernin A D "How Gamow calculated the temperature of the microwave background radiation or a few words about the fine art of theoretical physics" *Phys. Usp.* **37** 813 (1994)
142. Глинер Э Б "Алгебраические свойства тензора энергии-импульса и вакуумо-подобные состояния вещества" *ЖЭТФ* **49** 542 (1965); Gliner E B "Algebraic properties of the energy-momentum tensor and quasi-vacuum states of matter" *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1965)
143. Герценштейн М Е, Пустовойт В И "К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот" *ЖЭТФ* **43** 605 (1962); Gertsenshtein V E, Pustovoyt V I "On the detection of low-frequency gravitational waves" *Sov. Phys. JETP* **16** 433 (1963)
144. Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A *Gravitation* (San Francisco: Freeman, 1973) Ch. 37; Перевод на рус. яз.: Мизнер Ч, Торн К, Уилер Дж *Гравитация* (М: Мир, 1977) Гл. 37
145. Weiss R. Nobel Lecture *LIGO and the Discovery of Gravitational Waves, I* Barrish B C. Nobel Lecture. *LIGO and the Discovery of Gravitational Waves, III* Available at: nobelprize.org/prizes/physics/2017/weiss/lecture/; nobelprize.org/prizes/physics/2017/barrish/lecture/; nobelprize.org/prizes/physics/2017/thorne/lecture/
146. Weiss R "Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna" *Quarterly Prog. Rep.* **105** MIT Res. Lab. Electron. 54 (April 15, 1972)
147. Oganessian Yu Ts et al. "Measurements of cross sections and decay properties of the isotopes of elements 112, 114, and 116 produced in the fusion reactions ^{233}U , ^{242}Pu and $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ " *Phys. Rev. C* **70** 06469 (2004)
148. Khuyagbaatar J, Yakushev A, Düllmann Ch E et al. " $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ fusion reaction leading to element $Z = 117$: Long-lived α -decaying ^{270}Db and discovery of ^{266}Lr " *Phys. Rev. Lett.* **112** 172501 (2014)
149. Тяпин А С "Статистическая оценка плотности одночастичных состояний в слабдеформированном нильссоновском потенциале" *ЯФ* **14** 88 (1971); Туарин А С "Statistical estimate of the one-particle state density in the slightly deformed Nilsson potential" *Sov. J. Nucl. Phys.* **14** 50 (1972)
150. Malik F B "Superheavies — There Or Not There: To Be Or Not To Be? In: *Magic Without Magic: John Archibald Wheeler* A Collection of Essays in Honor of his Sixtieth Birthday (Ed. J.R. Klauder) (San Francisco: Freeman, 1972), pp. 47-69
151. Струтинский В М, Тяпин А С "Квазистатистическая капельная модель ядра как приближение к статистической модели" *ЖЭТФ* **18** 960 (1963); Strutinsky V M, Tuarin A S "Quasistatic drop model of a nucleus as an approximation to the statistical model" *Sov. Phys. JETP* **18** 664 (1964)
152. Тяпин А С "Сжимаемость и поляризуемость ядерного вещества" *ЯФ* **1** 581 (1965); Туарин А С "Compressibility and polarizability of nuclear matter" *Sov. J. Nucl. Phys.* **1** 416 (1965)
153. Тяпин А С "Метод оболочечной поправки" *ЯФ* **11** 98 (1970); Туарин А С "Method of shell correction" *Sov. J. Nucl. Phys.* **11** 53 (1970)
154. Тяпин А С "Статистическое выражение для энергии ядра" *ЯФ* **13** 32 (1971); Туарин А С "Statistical expression for the nuclear energy" *Sov. J. Nucl. Phys.* **13** 18 (1971)
155. Тяпин А С "Влияние кривизны поверхности и кулоновского поля ядра на распределение нуклонов" *ЯФ* **17** 968 (1973); Туарин А С "Effect of the surface curvature and nuclear Coulomb field on the nucleon distribution" *Sov. J. Nucl. Phys.* **17** 507 (1973)
156. Тяпин А С "Влияние размытости края ядра на высоту барьеров деления и форму делящихся ядер в седловой точке" *ЯФ* **20** 279 (1974); Туарин А С "The effect of the diffuseness of the nuclear boundary on the height of fission barrier and the shape of fissionable nuclei at the saddle point" *Sov. J. Nucl. Phys.* **20** 148 (1975)
157. Тяпин А С "Самосогласование в методе оболочечной поправки" *ЯФ* **19** 263 (1974); Туарин А С "Self-consistency in the shell-correction method" *Sov. J. Nucl. Phys.* **19** 129 (1974)
158. Впрочем, примеров других "преждевременных" открытий сколько угодно. Уже в древнем Вавилоне умели решать квадратные уравнения, хотя это знание не использовалось ни в торговле, ни в земельных вопросах, ни в военном деле. Это знание унаследовали Древний Египет, Древняя Греция и Древний Рим. Затем оно было утрачено и переоткрыто в эпоху Возрождения, когда ему нашлись многочисленные применения. Сечения конуса (парабола, гипербола и эллипс), свойства которых в III в. до н. э. изучил Аполлоний, оставались игрой ума до XVII в., когда Иоганн Кеплер открыл их фундаментальную роль в описании движения планет. Первые калибровочную теорию с калибровочными полями — фотоном, нейтральным и двумя заряженными промежуточными векторными бозонами — предложил Оскар Клейн в 1938 г. Но физика элементарных частиц ещё не была готова к освоению этой идеи. Лишь работа Янга Дженна и Роберта Миллса 1954 г. пробудила общий интерес к такому механизму взаимодействия частиц.
159. Бессараб М Я *Ландау. Страницы жизни* 4-е изд. (М: Московский рабочий, 1990) с. 58
160. Brack M "Vilen Mitrofanovich Strutinsky's impact on nuclear and many particle physics"; ArXiv: nucl-th/1006.5539
161. Weinberg S "Nuclear forces from chiral lagrangians" *Phys. Lett. B* **251** 288 (1990)

162. Epebaum E, Hammer H-W, Meißner U-G "Modern theory of nuclear forces" *Rev. Mod. Phys.* **81** 1773 (2009); ArXiv: nucl-th/0811.1338
163. Machleidt R, Entem D R "Chiral effective field theory and nuclear forces" *Phys. Rept.* **503** 1 (2011); ArXiv: nucl-th/1105.2919
164. Pety H R et al. "An application of QCD in nuclear structure" *Phys. Lett. B* **159** 363 (1985)
165. Close F E *An Introduction to Quarks and Partons* (New York: Academic, 1979); Перевод на рус. яз.: Клоуз Ф *Кварки и партоны. Введение в теорию* (М.: Мир, 1982)
166. Arima A, Yazaki K, Bohr H "A quark shell model calculation of nuclear magnetic moments" *Phys. Lett. B* **183** 131 (1987)
167. Talmi I "The nuclear shell model — of nucleons or quarks?" *Phys. Lett. B* **205** 140 (1988)
168. Maltman K, Stephenson Jr G J, Goldman T "A relativistic quark model of nuclear substructure in the $A = 3$ system" *Phys. Lett. B* **324** 1 (1994)

A farewell to particles!

B.P. Kosyakov

*Russian Federal Nuclear Center—All-Russian Research Institute,
prosp. Mira 37, 607188 Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation
E-mail: kosyakov.boris@gmail.com, kosyakov@vniief.ru*

We outline the course of affairs in the experimental and theoretical fields of nuclear and particle physics which determined its finale, and give several fragmentary remarks on its present state. The essay tells about events and their participants, known from the literature, but presented here from the perspective of a person whose 50-year labor activity, 1972–2022, proceeded at the All-Union Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov. In order to predict the fate of particle physics and related astrophysics and cosmology, it is useful to become aware of the facts about another branch of physics that has already gone through its decline ~ 30 years ago, the physics of nuclear weapons. These facts are important not in themselves, but as evidence of the growing problems of science and social life, which are not only far from a satisfactory solution, but have not even been the subject of any serious discussion.

Keywords: fate of fundamental physics, failure of nuclear weapons physics, nuclear power plant issues, peculiarities of the national science development

PACS numbers: 01.10.Hx, **01.60. + q**, **01.78. + p**, **03.70. + k**, **04.70. – s**, **21.10. – k**, **21.90. + f**, **27.90. + b**, **28.50. – k**, **29.20. – c**

Bibliography — 168 references

Received 22 June 2023

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.06.t139>