

К XVII Международному конгрессу по истории науки

РАННИЕ РАБОТЫ ПО СЛАБЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМ В СССР *

М. А. МАРКОВ

В своей статье я обращаюсь к событиям в основном более чем 20—25-летней давности, т. е. произошедшим примерно более четверти столетия тому назад.

Задача исторического описания событий, по моему мнению, это не просто перечень приуроченных к каким-то датам фактов, существенным образом вошедших в современное представление о природе слабых взаимодействий. История науки — это в какой-то степени воспроизведение научной атмосферы времен возникновения различных теоретических идей и экспериментальных результатов. Здесь поучительны не только успехи идей, но и их иногда временные неудачи, тяжелые поражения. История — это и связи времен, связи прошлого с настоящим и даже связи, ведущие в будущее; это люди различных взглядов, характеров, конкретные участники обсуждаемых событий.

Для очевидца исторических событий история — это в первую очередь воспоминания, которые неизбежно в той или иной степени субъективны, как это справедливо подчеркивается Б. Понтекорво в его обстоятельном обзоре [1].

Исторический обзор, о котором пойдет речь, по-видимому, следует начать с работы Ю. Б. Румера «Волновая теория нейтрино» [2, 3], которая в 1934 г. была представлена С. И. Вавиловым в ДАН.

Содержание статьи формулируется в первых ее фразах: «Новейшие исследования в области физики ядра говорят в пользу существования нейтрино, частиц с массой, равной нулю, и со спином, равным половине. В дальнейшем мы покажем, что в случае, если такие частицы существуют, волновая теория для них непосредственно следует из общих принципов волновой механики. Мы исследуем общий случай частицы с массой нуль и специализируем затем теорию на случай фотона и нейтрино». Далее уравнение $\Delta\psi - 1/c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$ заменяется системой четырех линейных уравнений, и последние выбором соответствующих матриц специализируются для описания фотона и нейтрино.

Видимо, статья Ферми, которая появилась также в 1934 г., не была известна автору.

Правда, описание фотона системой линейных уравнений могло само по себе инициировать интерес к проблемам описания частиц с массой нуль. В [3] Румер предлагает характеризовать нейтрино его моментом импульса, плотность которого M_{ilm} представляет собой тензор третьего ранга. В спинорной форме плотность момента записывается спинтензором шестого ранга $M_{\lambda\mu\nu\rho\sigma}$. Пишется система уравнений данного поля.

* Под таким заглавием был объявлен доклад в повестке дня Международной конференции 1984 г. (Висконсин, май 1984 г.), посвященный 50-летию теории слабых взаимодействий; настоящая статья подготовлена на материале этого доклада.

Автор полагает, что в случае равенства нулю массы и заряда частицы обычные выражения $\psi\psi^*$ и $\psi\alpha\psi^*$ физически не интерпретируются.

После появления теории слабых взаимодействий Ферми и Румера привлекают различные возможности экспериментальной проверки теории. В 1936 г. Ю. Б. Румер посылает в ЖЭТФ статью «О превращении протона в нейтрон под влиянием γ -излучения». В варианте этой статьи на немецком языке [4] имеется примечание при корректуре о том, что только что появилась аналогичная работа М. Фирца с теми же результатами [5]. Работа Румера заканчивалась словами: «Мы видим, что эффект вследствие малости константы Ферми лежит вне пределов экспериментальных возможностей».

Скепсис относительно возможности экспериментальной проверки многих аспектов слабых взаимодействий, возводимый чуть ли не в закон природы, сопровождал теорию слабых взаимодействий на многих этапах ее развития. Предлагать для печати работы такого рода было чуть ли не признаком нарушения хорошего тона в науке. Даже основополагающая статья Ферми не была принята редакцией журнала «Nature» так как предмет статьи казался слишком далеким от конкретных задач физики¹. Кстати, следует заметить, что эффекты, обсуждаемые в работах Румера, не лишены интереса и в настоящее время, особенно для будущих фотонных фабрик.

Излагать историю развития теории слабых взаимодействий нельзя, не упомянув о работах 1934 г. Д. Иваненко, И. Тамма [6], И. Тамма [7], впервые теоретически проанализировавших взаимодействие между нуклонами в случае существования Ферми-поля.

В работе И. Тамма (1936 г.) « β -Радиоактивность и ядерные силы» [7] на 40 страницах дается обзор возникшей новой теоретической и экспериментальной области физики (обзор во многом аналогичен обзору Г. Бете и Р. Бечер) [8], появившемуся в то же время.

Вследствие малости констант Ферми эти силы оказались не в состоянии обеспечить сильные взаимодействия между нуклонами. Но обсуждения этих неудач и сама физическая модель возможных взаимодействий как обмен соответствующими квантами поля² сыграли существенную роль в науке.

Х. Юкава свою знаменитую работу о природе ядерных сил начинает с цитирования статей Гейзенберга, Ферми, Тамма и Иваненко [10]. По-видимому, мало кто знает, что в 1934 г. в «Nature» была опубликована статья Тамма [11], в которой рассматривалось взаимодействие нуклонов через обмен $\nu\nu$ -квантами. По существу, в этой работе впервые речь шла о «нейтральных токах» в слабых взаимодействиях.

Теория слабых взаимодействий тесным образом связана с теорией Дирака для фермионов.

Впервые в Советском Союзе об уравнении Дирака (до публикации уравнения) рассказал П. Эренфест на семинаре, руководимом Л. И. Мандельштамом, в Московском университете. Вспоминается, как присутствовавший гостем на этом семинаре П. Эренфест вынул из кармана смятое письмо, — как он сказал, письмо Дирака — и начал сообщение словами, что написанное в этом письме настолько странно, что если бы это писал не Дирак, то оно не стоило бы упоминания. «Но ведь, — добавил он

¹ Возможно, сам Паули — автор гипотезы о существовании нейтрино — повинен в этом. По свидетельству близкого друга Паули, астронома В. Бааде, Паули принадлежит фраза: «Я сегодня сделал что-то ужасное. Физику-теоретика никогда не следует делать такое. Я предложил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально».

² Кстати, идея о том, что такие частицы, как электрон и нейтрино, могут не содержаться как готовые, а рождаются в распадающихся частицах, была отнюдь не тривиальна. Другими словами, нетривиально было рассматривать нейтрон еще в 1932 г. как элементарную частицу [9].

задумчиво, — Дирак гений!» Пожимая недоуменно плечами, Эренфест говорил, что речь идет о сплошном фоне частиц отрицательных энергий, а дырки в этом фоне — частицы положительного заряда и энергии (тогда, видимо, речь шла еще о протонах).

Роль состояний частиц с отрицательной энергией и в последующие годы как-то трудно укладывалась в привычные представления. Во всяком случае, в это время естественны были попытки различать электрон и позитрон лишь по знаку заряда, не привлекая состояния с отрицательной энергией, что, по-видимому, являлось предметом размышлений еще Э. Шредингера (1931 г. [12]), Э. Майорана, П. Прока и др.

В 1935 г. мне казалось, что такой симметрии можно достичь в рамках уравнения второго порядка для спинорных функций Дирака, для которого плотность заряда неопределенна.

Это уравнение можно переписать системой двух уравнений Дирака: одного — для электрона и второго — для позитрона (1937 г. [13]):

$$(i\hat{p} + m)\psi_{e-} = 0,$$

$$(i\hat{p} - m)\psi_{e+} = 0.$$

В этой теории действительно осуществляется симметрия между электроном и позитроном. Симметрия достигается с помощью удвоения числа частиц. Согласно этой теории, должны бы существовать два электрона (e_- , e'_-) и два позитрона (e_+ и e'_+) разной природы. Второй электрон — e'_- — это дырка в распределении позитронов вакуума³. Возник вопрос: можно ли на основании экспериментальных данных того времени решить, что все наблюдаемые электроны одной и той же природы. Паули в ответ на посланную ему статью сделал одно замечание, которое представляет нетривиальный исторический интерес.

Паули писал, что попытку предложить другое уравнение для электрона делал недавно Прока. Но на самом деле его уравнение описывало не электрон, а частицу со спином единица...

В последующие годы возникла, казалось бы, естественная мысль предлагать, что восьмикомпонентное уравнение Дирака описывает не электрон и позитрон, а электрон и μ -мезон, массы которых делаются различными лишь после некоторых взаимодействий, нарушающих симметрию восьмикомпонентного уравнения Дирака⁴ [14].

Казалось привлекательным то обстоятельство, что теория автоматически содержала идею Зельдовича [15], Махмуда — Конопинского [16]. Частицы e_- и μ_+ являются частицами $\tilde{e}_+$ и $\tilde{\mu}_-$ — античастицами. Кстати, в формализме можно усмотреть также наиболее древний вариант идеи двух нейтрино, различия которых связаны с соответствующими законами сохранения лептонных чисел. Этот формализм подробнее изложен в книге о нейтрино [14, а].

Возможности экспериментального обнаружения нейтрино в 30-е годы очень активно обсуждались в Харьковском институте А. Лейпунским, В. А. Петуховым и др.

Как известно, первый эксперимент (отдача ядер при β -распаде) был выполнен Лейпунским в Кембридже [17]. Впоследствии β -распад нейтрона привлек внимание советских экспериментаторов. Тщательные по тому времени измерения были выполнены в 1958 г. П. Е. Спиваком [18].

³ Идея запретить появление «дыр» (т. е. e^- и $e^{+'}$) теперь в электрически нейтральном вакууме, казалось бы, давала искомую симметрию между электроном и позитроном, но эта симметрия в некотором смысле оказывается слишком большой — электрон и позитрон оказываются оба частицами (аналог идеи Махмуда — Конопинского) и не могут аннигилировать.

⁴ Например, добавочным взаимодействием вида $\mu\bar{\nu}\eta\psi$, где η — константа, $\bar{\nu}$ — скалярное поле, которое в свою очередь может быть составлено из спиноров ψ ; n — число, приводящее к «вакуумным средним», отличным от нуля.

В связи с открытием в космических лучах относительно долгоживущего мезона (μ -мезона) важно было выяснить, является ли эта частица частицей Ферми или Бозе. К этому времени в Советском Союзе возникла довольно обширная школа физиков, работавших в области космических лучей.

Почему-то трудно было убедить их в желательности постановки простого эксперимента — изучения спектра электронов в случае распада остановившихся в веществе мезонов. Только осенью 1948 г. я получил с Памира записку от Г. Б. Жданова, в которой сообщалось, что предложенный мною эксперимент наконец выполнен и что μ -мезон представляет собой частицу Ферми [19]. Только вернувшись с Памира, Г. Б. Жданов узнал, что такие же результаты с той же методикой получили Дж. Стейнбергер [20], а также Е. П. Хинкс и Б. Понтекорво [21]. Последние работы выполнены на уровне моря. До этого времени на уровне моря был выполнен ряд работ с камерой Вильсона с целью определения энергии продуктов распада остановившихся мезонов, но они были не столь целенаправленны [22].

В 1955 г. на Международной конференции по физике элементарных частиц в Пизе присутствовали и такие ветераны науки, как Паули, Гейзенберг, Шредингер, и представители нового поколения, которые в существенной части определили дальнейшее развитие этой области физики — Гелл-Манн и его сверстники.

Как-то в перерыве между заседаниями я сообщил Паули об отрицательных результатах опытов Б. Понтекорво в попытках зарегистрировать одиночное рождение Λ -частиц на ускорителе протонов в Дубне [23]. Ускоритель давал, казалось бы, очень удобную возможность для этого эксперимента, так как энергия ускоренных в нем протонов была недостаточна для совместного рождения Λ - и K -частиц. Паули заметил, что, по видимому, Гелл-Манн сможет ответить на этот вопрос; он подозревал Гелл-Манна, и тот подтвердил, что действительно может объяснить этот результат. В это время к нашей группе подошел, кажется, Лоу и, дружески ткнув пальцем в грудь Гелл-Манна, с добродушной иронией произнес: «Ты, конечно, все объяснить можешь...», и Гелл-Манн, действительно, объяснил отрицательный результат опыта Понтекорво на основании только что введенного им понятия «сохранения странности».

Открытие гиперонов породило ряд вопросов о природе этих прежде неизвестных частиц.

К 1954 г. можно было считать установленным, что Λ -частицы могут входить в состав сложных ядер наравне с нуклонами. Возник вопрос: насколько далеко простирается родство Λ -частиц с нейтроном? Например, может ли Λ быть β -активна. По моему предложению в 1954 г. эта оценка была сделана студентом МГУ В. Стахановым в его дипломной работе; краткие результаты были опубликованы в 1955 г. в ЖЭТФ [24]. Впоследствии экспериментальные данные обнаружили слабую β -активность Λ , но грубые оценки оказались сильно завышенными [24].

В истории физики первой половины текущего столетия возникла своеобразная точка зрения на дальнейшее развитие наших представлений о свойствах явлений в микромире. Свойства микромира мы, макроскопические существа, обнаруживаем по, если можно так сказать, проекциям их свойств на макромир в наших (по необходимости) макроскопических приборах. И естественна мысль о том, что, чем глубже мы пытаемся проникнуть в микромир, тем труднее оказывается в макроскопических понятиях и терминах отобразить свойства микромира; свойства микромира начинают описываться макроскопическими «кентаврами» (волна — корпускула и т. п.).

Это обстоятельство породило точку зрения, что теория, призванная описывать неизвестные пока свойства микромира, должна в этом смысле быть все более и более «сумасшедшей». Эта точка зрения четко форму-

лировалась Бором и сказала очень успешной в его полуклассической модели атома водорода. Но следствием этой же точки зрения была легкость, с которой Бор видел возможность объяснить своеобразие эффектов β -распада нарушением закона сохранения энергии. Здесь эта точка зрения потерпела жестокое поражение.

С другой стороны, естествен и законен «здоровый», подчас жесткий консерватизм, т. е. стремление понять новое лишь в рамках классически приемлемых представлений. Ярким представителем этого направления по своему научному характеру был Паули.

Попытка такого понимания нового на своем счету также имела случай жесткого поражения. Я имею в виду в свое время забракованную Паули идею о существовании у электрона спина.

Мне кажется, что идея существования нейтрино — это не результат особой гениальной интуиции Паули, а скорее естественный результат того здорового консерватизма, который так был свойствен его гению.

Появление в эксперименте и теории частиц со спином $1/2$ создало новые возможности для различных теоретических спекуляций. То обстоятельство, что из спинорных функций, описывающих частицы со спином половина, можно строить системы с любым спином, конечно, сразу же привлекло к себе внимание физиков-теоретиков и математиков. Так, еще в 30-е годы возникла идея нейтринной теории света Л. де Бройля (1934), П. Иордана (1935), О. Шерцера, Л. Кронинга (1935), П. Иордана, Л. Кронинга (1936).

В Советском Союзе эту идею развивали Д. Д. Иваненко, А. А. Соколов (1936 г.) [25]. В 1937 г. в Советском Союзе появилась статья В. А. Фока, посвященная критике нейтринной теории света [26]. Конкретнее: В. А. Фок указывал на внутренние противоречия в формализме работы П. Иордана [27], реализующего эту идею.

Дискуссия на эту тему продолжалась и позже. В некотором, более общем смысле вряд ли ее можно считать законченной и сегодня.

Положить в основу основ всего существующего частицы Ферми значило бы придать четырехфермионному взаимодействию частиц универсальный характер.

Эти идеи в прошлом имели большую притягательную силу. Так, в рамках уравнения типа Бете—Сальпетера делались попытки контактным четырехфермионным взаимодействием нуклонов и антинуклонов строить π -мезон. Речь идет о конкретной реализации известной идеи Ферми—Янга. В Советском Союзе подобные уравнения решались И. Полубариновым [28].

В систематике частиц, предложенной в 1955 г. М. А. Марковым [29], предполагалось, что фундаментальные частицы: фермионы два нуклона и гипероны — образуют бозоны контактным взаимодействием⁵.

В систематике Сакаты [30] все мезоны и барионы состоят из трех фундаментальных частиц: протона, нейтрона, Λ -частицы и их античастиц. Она по духу близка к систематике [29], но в своей структуре более экономична [32]. Многие свойства модели Сакаты в аспекте слабых взаимо-

⁵ По поводу этой систематики Саката [30, 31] писал: «Markov (Rep. Acad. Sci. USSR, 1955) proposed also a composite model, which is very similar to ours. It should be remarked that our model may be considered as a generalization of π -meson model proposed by Fermi and Yang (Phys. Rev. 76 (1948) 1739) and that it will throw a new light on Heisenberg's theory of elementary particles (Nature for Sci. 9a (1954) 291; 10a (1955) 425) in which only one kind of «Urmaterie» is assumed». (Марков (Rep. Acad. Sci. USSR, М., 1955) также предложил составную модель, очень сходную с нашей. Следует отметить, что нашу модель можно рассматривать как обобщение модели π -мезона, предложенной Ферми и Янгом (Phys. Rev., 1948, 76, 1739), и что она прольет новый свет на теорию элементарных частиц Гейзенберга (Nature for Sci., 1954, 9a, 291, 1955, 10a, 425), в которой предполагается существование только одного типа «праматерии».) В ряде статей [31] систематика [29] обсуждается в связи с систематикой Сакаты.

действий рассмотрены в книге Л. Б. Окуня «Слабые взаимодействия элементарных частиц» [32].

На Пизанской конференции летом 1955 г. В. Гейзенберг делал сообщение о своем нелинейном уравнении для фермионов как фундаментальном уравнении, описывающем элементарные частицы. Присутствовавший на докладе Гейзенберга Паули молчал. После доклада Гейзенберга я спросил Паули о его отношении к этой идее Гейзенберга. Паули, похлопав по плечу Гейзенберга, сказал примерно следующее: «Сколько раз я говорил Вернеру, чтобы он бросил заниматься этой чепухой!»

Но надо заметить, что потом Паули на короткое время сам был увлечен идеей этого нелинейного уравнения. Ландау, который по своему научному кредо и вообще критическому характеру был, пожалуй, наиболее близок Паули, одно короткое время настолько проникся идеями уравнения Гейзенберга, что полагал, что уравнением Гейзенберга может кончиться теоретическая физика элементарных частиц.

События последних лет — открытие промежуточных мезонов — торпедировали в существенном месте саму идею контактных взаимодействий фермионов. Но, может быть, еще больший урон этой идее нанесли нефермионные янг-миллсовские поля, источником которых являются фермионы.

Но кто может поручиться, что все эти нефермионные поля в недалеком или далеком будущем не окажутся построенными снова из фермионов?

В Советском Союзе пионерные работы по нелинейным фермионным уравнениям принадлежат Д. Д. Иваненко [33].

Физика нейтрино высоких энергий

В 50-е годы в Дубне начал работать ускоритель протонов на 10 ГэВ. Мне приходилось принимать участие как в проектировании этого ускорителя (расчет защиты), так и в организации теоретического отдела этой лаборатории Объединенного института ядерных исследований. Дубнинский ускоритель был в то время ускорителем с рекордной энергией протонов и, следовательно, рекордной энергией вторичных частиц. Естественно, что в то время появилась идея оценить возможность нейтринных экспериментов на ускорителях. Штат сотрудников этой лаборатории частично состоял из физиков, которые, как и директор лаборатории В. И. Векслер, прежде занимались физикой космических лучей. Возможности нейтринных экспериментов с космическими нейтрино также были, естественно, объектами обсуждения.

Но лишь в 1957 г. я отважился предложить эти темы в качестве дипломных работ студентам МГУ.

В 1958 г. в МГУ были защищены две дипломные работы: И. М. Железных — «О взаимодействии нейтрино больших энергий в космических лучах с веществом» и Д. Г. Факировым (Болгария) — «О возможности исследования взаимодействия нейтрино с веществом на ускорителях».

В заключении работы Железных сказано: «Эксперимент с нейтрино, рожденными в атмосфере, труден, но не безнадежен. Во всяком случае, имеет смысл обсуждение возможностей такого эксперимента. Благоприятным обстоятельством является то, что эксперимент возможно проводить на любых глубинах под землей, достаточных для устранения фона». В работе Железных рассматривалась и возможность существенного вклада в наблюдаемый эффект и нейтрино, возникающих вне нашей атмосферы — в сверхновых и новых звездах и т. д.

Обсуждение нейтринного эксперимента в космических лучах было продолжено в статьях Железных и Маркова [34, 35] и ранее на Рочестерской конференции 1960 г. в докладе М. А. Маркова [36, с. 579].

В этом докладе предложено детектирование космических нейтрино в глубоководном эксперименте: «Для определения направления заряженных частиц по излучению Черенкова мы предполагаем опустить аппаратуру на дно озера или глубоко в океан», т. е. впервые речь шла о том, что впоследствии получило название проекта ДЮМАНД.

Доклад вызвал оживленную дискуссию, в которой приняли участие Янг, Шварц, Бернардини, Ледерман, Бладман, Примаков, Фейнберг.

После Рочестерской конференции в Беркли было совещание по инструментальной физике высоких энергий. Присутствовавший на ней Д. И. Блохинцев сообщил мне, что на этой конференции К. Грейзен [37] обсуждал также возможности детектирования нейтрино космических лучей и что Блохинцев информировал участников совещания о моем докладе на прошедшей Рочестерской конференции.

В дискуссии на Рочестерской конференции Янг спросил: «Имеются ли планы проведения таких экспериментов в России?» Я ответил, что этот вопрос обсуждается.

Действительно, в то время идея экспериментов благоприятно обсуждалась среди физиков, работавших в области космических лучей, особенно Г. Т. Зацепиным, который был рецензентом по дипломным работам Железных и Факирова. Г. Т. Зацепин со своими учениками существенно уточнил потоки μ -мезонов в атмосфере [38] и обдумывал реальную постановку эксперимента.

Но только в 1966 г. состоялось постановление Президиума АН СССР о создании нейтринной лаборатории в Физическом институте им. П. Н. Лебедева. Заведование лабораторией было поручено Г. Т. Зацепину. Задачи лаборатории были определены как в области солнечных нейтрино, так и нейтрино космических. В постановлении был пункт о привлечении к работам лаборатории Б. Понтекорво и М. Маркова.

В дальнейшем Понтекорво принимал активное участие в работах по нейтринной физике в СССР как председатель Научного совета по нейтринной физике, созданного при Отделении ядерной физики АН СССР, а забота об этой лаборатории входила в мои обязанности как академика-секретаря Отделения ядерной физики⁶.

К сожалению, готовых удобных подземных пустот в нашей стране не оказалось, и проект эксперимента реализовывался в условиях создания искусственного тоннеля в горе Андерчи на Кавказе. Только в 1977 г. на специальной нейтринной конференции мы смогли продемонстрировать нейтринный сцинтилляционный телескоп, помещенный на глубину 850 м водного эквивалента, имеющий массу 300 т (White Spirit), содержащийся в 3150 модулях. Модули расположены слоями примерно с 3-метровыми интервалами, дающими возможность по запаздываниям выделить сигналы, идущие снизу вверх. Создатель этой установки и руководитель работ на ней — А. Чудаков. Защищая проект этой подземной лаборатории, я всегда подчеркивал, что речь идет о создании низкофоновой лаборатории многоцелевого назначения, все аспекты которого заранее трудно предвидеть. И действительно, на этой установке были получены первые результаты о времени жизни протона, данные о нейтринных осцилляциях и пока уникальные данные относительно магнитного монополя Дирака. Накапливается статистика нейтринных событий, в частности для анализа возможностей локальных источников нейтрино во Вселенной.

Что касается солнечных нейтрино, то только в настоящее время на пути тоннеля в 3,5 км сооружено помещение объемом $15 \times 15 \times 40$ м³ для галлиевого эксперимента и начинается монтаж установки. Отделение

⁶ В 1970 г. был основан Институт ядерных исследований АН СССР. Одна из главных задач Института — исследование солнечных нейтрино и нейтрино космических лучей. Для этих целей были организованы низкофоновые подземные и подводные лаборатории (директор института — проф. А. Н. Тавхелидзе).

ядерной физики понадобились немалые усилия, чтобы обеспечить эксперимент достаточным количеством галлия.

Группой ученых Института ядерных исследований АН СССР, руководимой Г. Т. Зацепиным, разработана методика экстрагирования германия из металлического галлия. Метод ждет своей апробации в условиях низкофоновой лаборатории.

Метод (галлий — германий) предложил В. Кузьмин в давнее время, когда он был еще учеником Г. Т. Зацепина. В дальнейшей институтской программе Г. Т. Зацепина в области солнечных нейтрино содержится идея литий-бериллиевого эксперимента и повторения в больших масштабах хлор-аргонового варианта. Совокупность этих трех экспериментальных установок обещает дать важные сведения о внутреннем строении солнца и звезд вообще.

По идее Г. Т. Зацепина Институтом создана специальная установка в соляных коях Артемьевска для регистрации случаев коллапса звезд. Другая установка совместно с итальянскими физиками реализуется под Монбланом. Вместе с Баксанской нейтринной станцией эти установки будут осуществлять долговременную службу коллапса.

Что касается будущего физики нейтрино сверхвысоких энергий, то в Советском Союзе создано — правда, не очень мощное — но довольно широкое сотрудничество институтов, задача которого — рассматривать, а в случае возможности реализовывать различные идеи детектирования нейтрино сверхвысоких энергий. Речь идет о своеобразных экспериментах типа ДЮМАНД. Согласно нашей точке зрения, по аналогии с тем, что в ускорительной технике одни поколения ускорителей сменяются другими, в будущих установках, регистрирующих нейтрино сверхвысоких энергий в космических лучах, появятся новые, более совершенные установки (последующие поколения ДЮМАНДов), основанные на новых идеях детектирования.

Детектирование потоков заряженных частиц, вызываемых в средах нейтрино очень высоких энергий, возможно по черенковскому свечению, акустическим волнам [39] и радионизлучению [40].

Для регистрации этих эффектов требуется соответствующая организация экспериментов, которая будет совершенствоваться в последующих проектах ДЮМАНДов. Эта деятельность организационно оформлена созданием соответствующего отдела в Институте ядерных исследований (Москва, Марков) и лаборатории с конкретной задачей проектирования системы ДЮМАНД на оз. Байкал (руководитель Г. В. Домогацкий).

DUMAND мы расшифровываем как Deep Under Water, Deep Under Ground, Deep Under Atmosphere и даже Deep Under Ice Neutrino Detector⁷.

Предложение Аскаряна о возможности детектирования потоков заряженных частиц, вызываемых, в частности, во льду, нейтрино высоких энергий в Антарктике подробно обсуждается в работе Гусева и Железных [41]. Оно привлекательно тем, что при низкой температуре (до -50°) в глубоких слоях льда поглощение радиоволн в области 10^9 Гц на порядки ослабляется и соответствующие сигналы могут детектироваться чуть ли не с километровых расстояний. Это обстоятельство можно рассматривать как ценный подарок природы.

Если объем Баксанского сцинтилляционного нейтринного телескопа $v \sim 10^3$ м³, проектируемого на Байкале — $v \sim 10^7$ м³, то во льду Антарктики — $v \sim 10^9$ – 10^{11} м³ при относительно небольшом числе регистрирующих антенн, расположенных на поверхности льда. Видимо, было бы большой ошибкой не обсудить серьезно этот проект, здесь есть свои технические возможности и свои энтузиасты.

⁷ Детектор нейтрино глубоко под водой, глубоко под землей, глубоко под атмосферой и даже глубоко подо льдом.

Следует сказать, что первоначальный проект нейтринных экспериментов в космических лучах, о котором идет речь, встретил сильные возражения авторитетной научной общественности 50-х годов.

В это время теоретики полагали, что сечение процесса $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu$ могло бы расти до энергии нейтрино 1 ГэВ; затем формфактор нуклона останавливает рост сечения и детектирование сечений процесса $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu$ при энергии 10^{10} — 10^{11} эВ будет невозможно потому, что число нейтрино в космических лучах быстро падает с энергией.

Предложение о возможном росте с энергией полного сечения эффекта считалось в это время еретическим.

Приведу свои слова, сказанные в то время в защиту проекта эксперимента: «Строго говоря, в обсуждаемом нами проекте эксперимента с космическими нейтрино измеряется не эффект «упругого» процесса $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu$, а, в сущности, дело идет об измерении полного сечения $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu + \text{все, что только может быть}$. Не исключено, что большое количество каналов новых реакций, возникающих с ростом энергии нейтрино, вносит столь существенный вклад в полное сечение, что этот эффект в целом может линейно расти до значений, близких к критическим» [14а, с. 80—81].

Исходя из изложенных выше положений, на семинаре ЦЕРН — Дубна — Серпухов в 1957 г. предлагалась широкая программа наблюдений неупругих процессов на ускорителях⁸ [42].

Программа не встретила сочувствия у аудитории.

Если наше предложение космических экспериментов в какой-то мере учитывалось при реализации нейтринных экспериментов как в шахтах Южной Африки (F. R. Reines), так и индо-японо-английской совместной работы в индийской золотоносной шахте, то наши предложения нейтринных экспериментов на ускорителях больших энергий (Д. Г. Факиров и др.) остались практически неизвестными широкой научной общественности. Заметка Факирова была напечатана в Софии [43] (см. замечание по поводу работы Факирова в докладе Бернадини о проекте нейтринных экспериментов в ЦЕРНе) [36, с. 579].

Доклад на тему «К физике нейтрино высоких энергий» был заявлен группой теоретиков Дубны (Р. А. Асанов, В. Н. Валуев, М. А. Марков, И. В. Полубаринов) на киевскую конференцию по высоким энергиям 1959 г. Мои младшие коллеги по этой работе были смущены малостью сечений. Под влиянием кулуарных обсуждений комплекс неполноценности, часто возникающий у авторов, пытающихся обсуждать количественные эффекты слабых взаимодействий, привел к желанию взять обратно заявленный доклад. Как-то за обедом Р. Маршак, который был, кажется, ответственным за секцию слабых взаимодействий, спросил меня о теме моего доклада. Когда я назвал тему моего доклада, Маршак только сказал: «Вы серьезно...», — и я не мог противиться желаниям моих младших коллег... Наш доклад на эту тему не состоялся. Содержание этого доклада частично излагается в статьях И. В. Полубаринова, В. С. Барашенкова, И. М. Железных и М. А. Маркова [44, 45].

Проблема двух сортов нейтрино

Терминологически (т. е. в обозначении ν и n , μ_0) идею двух нейтрино, видимо, впервые высказал в 1942 г. Саката [46] при обсуждении распада возможного промежуточного мезона, введенного Юкавой

$$Y_-^+ \rightarrow e_-^+ + \nu; \quad Y_-^+ \rightarrow \mu_-^+ + n.$$

Впоследствии при описании трехчастичного распада μ -мезона ради осторожности две нейтральные частицы обозначались различными сим-

⁸ От ЦЕРНа присутствовал проф. Ван-Хов; профессор Пановский, кажется, также принимал участие в работе семинара.

волами ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \mu_0$) [48, 49] μ -мезон $\rightarrow$ электрон + нейтрино + нейтретто [50].

Однако полагать, что вводимые различия для обозначения нейтрино ν и n являются самым ранним предвидением нетождественности нейтрино, в сущности, меньше оснований, чем утверждать, что описание различных атомов веществ у Лукреция является в какой-то степени аналогом современных представлений о своеобразиях в строении атомов.

Дело в том, что в этих различных обозначениях не было самого существенного — идеи сохранения чего-то нового, что характеризует различие двух нейтрино даже в случае равных масс и спинов. Необходимость в двух различных по свойствам нейтрино реально возникла, когда встретилась задача понять запреты в слабых распадах элементарных частиц.

В 1957 г. появился ряд работ, предлагавших рассматривать различие двух сортов нейтрино на основе сохранения приписываемых им специфических квантовых чисел (Дж. Швингер, Н. Нишиджима и др.).

Возможность экспериментального различения двух сортов нейтрино на ускорителях больших энергий в эффекте

$$\nu_\mu + n \rightarrow \begin{cases} p + \mu \\ p + e \end{cases}$$

обсуждался в примечании при корректуре в книге «Гипероны и К-мезоны» [51].

Все примечания при корректуре, как это следует из замечания редактора, сделаны не позднее конца 1959 г.

В [44] собраны доклады семинаров, проходивших в Дубне в 1957—1960 гг. Названия докладов свидетельствуют об атмосфере обсуждения в 1957—1960 гг. в Дубне проблем физики нейтрино высоких энергий⁹. Особого внимания заслуживает предложение Б. Понтекорво исследовать ν_μ и ν_e различия в экспериментах с нейтрино малых энергий, возникших от распада остановившихся π -мезонов, если они не в состоянии порождать во взаимодействии с веществом электроны.

В подготовленной в то время (1957—1958 гг.) к печати книге «Гипероны и К-мезоны» [51] сделана также попытка в описании распада

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + x$$

частицу x трактовать как второе нейтрино $x \equiv \nu'$, с другим сохраняющимся «странным» числом, чем нейтрино.

Лишь одно курьезное обстоятельство делает целесообразным уместность этих воспоминаний. В этой книге, опубликованной в 1958 г. [51], содержится такая фраза: «Но даже ценой введения второго нейтрино нельзя надеяться получить все существующие запреты и разрешенные переходы с участием легких частиц... Например, нельзя запретить реакцию

$$\pi \rightarrow e + \nu \text{ или } \pi \rightarrow e + \nu + \gamma.»$$

Дело в том, что в то время экспериментальные данные свидетельствовали, казалось бы, с большей точностью о наличии такого запрета

⁹ М. А. Марков. К физике нейтрино высоких энергий; И. М. Железных, М. А. Марков. К нейтринной физике высоких энергий в космических лучах; Б. М. Понтекорво. Электронные и мюонные нейтрино; Б. М. Понтекорво, Р. М. Рындин. О промежуточной бозоне в слабых взаимодействиях; Б. М. Понтекорво. О постановке опытов при помощи пучков нейтрино мезонной природы, Мезоний и антимезоний, Универсальное взаимодействие Ферми и астрофизика; Д. И. Блохинцев. Когда слабое взаимодействие становится сильным?, О возможном пределе применимости квантовой электродинамики; Ван Жун, Я. Фишер, И. Чулли, С. Чулли. Фоторождение нейтрино-антинейтринных пар на электронах; В. С. Барашенков, Сянь Дин-чан. О генерации пучков быстрых нейтрино; И. В. Полубаринов. Взаимодействие нейтрино, рожденных параллельным монохроматическим пучком π -мезонов; Р. А. Асанов, Б. Н. Валуев. О роли высших приближений для слабых четырехфермионных взаимодействий.

[52]. Но впоследствии в ЦЕРНе было показано, что на самом деле такой запрет отсутствует [53].

Видимо, на теоретические рассмотрения экспериментальных фактов распространяется постулат, который, кажется, принадлежит Паули: «Экспериментальный результат лишь тогда имеет объективный смысл, если он повторяется независимо по меньшей мере в двух лабораториях».

Несохранение четности в слабых взаимодействиях

Описание атмосферы научных дискуссий среди физиков Советского Союза в то время, когда возникла эта проблема, заслуживало бы особого внимания. Путь Ландау к формулировке сохранения комбинированной четности был отнюдь непрост. Дело в том, что несохранение четности в слабых взаимодействиях вызвало у Ландау на первых порах, видимо, так же как и у Паули, отрицательное отношение. «В принципе это не невозможно, но такой кособокий мир был бы мне настолько противен, что думать об этом не хочется» (из воспоминаний И. С. Шапиро).

Впоследствии Ландау нашел возможность совместить это свойство слабых взаимодействий со своим научным «кредо» в сохранении комбинированной четности, где акцентируется все-таки не нарушение, а сохранение, но чего-то более фундаментального.

Естественно, что в Советском Союзе возник ряд теоретических работ, посвященный роли несохранения четности во взаимодействиях лептонов с нуклонами, например работы И. С. Шапиро с сотр. [55], Я. Б. Зельдовича «Несохранение четности в атомах» 1959 г. [56].

По результатам вычислений Шапиро и по его инициативе был поставлен эксперимент по детектированию слабых ядерных сил (Ю. Абэ и др.) [57].

Обсуждению этих же эффектов посвящены работы В. М. Лобашева (1957 [58]). В более поздней работе Лобашева содержатся и коррективы к одной из его старых работ, в которой получены завышенные значения сил для одного из исследованных им объектов [59].

К этому времени относятся и наблюдения продольной поляризации μ -частиц.

Б. М. Понтекорво поднял вопрос о возможности эффекта $\mu^- e^+ \rightarrow \mu^+ e^-$ осцилляции (1957 [44]).

Еще раньше С. С. Герштейном обсуждался вопрос о сохранении векторного слабого тока (1955 г.).

Заслуживают внимания и различные обсуждения роли нейтрино в астрофизических проблемах, таких, как существование нейтринного моря, — Б. Понтекорво, Я. Смородинский (1959 г. [60]); космологический верхний предел количества невидимой энергии во Вселенной — Я. Зельдович, Я. Смородинский (1961 г. [60]); предел может лишь на порядок превышать критическую плотность $\rho \sim 10^{-29}$ г/см³; испускание нейтрино горячими звездами — Б. Понтекорво (1959 г. [44]), Гандельман и Пинаев [62].

Я. Зельдович, С. Лукьянов, Я. Смородинский (1954 г. [63]) в большой обзорной статье «Свойства нейтрино и двойной β -распад» касаются многих проблем нейтринной физики, в частности нейтрино Майорана. Здесь же указывается, что в статье Фарри, в которой впервые (1939 г.) было обращено внимание на двойной β -распад как эффект, исследование которого может дать ответ на вопрос о справедливости теории нейтрино, предложенной Майорана, неверно оценена вероятность процесса. Эта оценка была исправлена в работе Л. Слива [64].

Естественно, что всегда возникал вопрос о массе нейтрино, особенно когда объектами обсуждения стали два сорта нейтрино.

Преодолевая комплекс неполноценности, о котором шла речь выше, я осмелился опубликовать соображения о возможном существовании не-

бесных тел, состоящих из массивных нейтрино (1963 г. [66]), [14, а]. Соответствующая формула для массы таких объектов отличается от массы нейтронных звезд квадратом отношения массы нейтрона к массе нейтрино. Об этой работе сейчас вспоминают в связи с проблемой недостающих масс в астрофизике [67, 68]. Будучи в Кембридже в 1982 г., я дал оттиск этой старой работы проф. С. Хокингу, он сказал: «Вы слишком рано опубликовали Вашу заметку...».

Вероятно, не так мало можно было бы еще добавить к работам, о которых шла речь выше, касающихся в какой-то мере близких проблем. Так, еще в 1964 г. появилась работа Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского, А. Н. Тавхелидзе [69] о кварках с целочисленным электрическим зарядом.

Я бы хотел добавить, что работы, выполненные после 1964 г., как правило, мною не цитируются, если только в этих случаях не возникали очень сильные цепочки связей между прошлым, настоящим и будущим.

Литература

1. *Понтекорво Б.* Страницы развития нейтринной физики.— УФН, 1983, т. 141, вып. 4, с. 175.
2. *Румер Ю. Б.* Докл. АН СССР, 1934, IV, 21.
3. *Rumer G. C.* r. Acad. sci., 1936, v. 202, 1948.
4. *Rumer G.* Phys. Z. Sowjetunion, 1937, B. 11, № 5, S. 48.
5. *Fierz M.* Helv. acta, 1936, v. 9, p. 254.
6. *Ivanenko D., Tamm I. E.* Nature, 1934, v. 33, p. 981.
7. *Tamm I.* Phys. Z. Sowjetunion, 1936, v. 10, p. 567.
8. *Bethe H., Bacher R.* Rev. Mod. Phys., 1936, v. 8, p. 22.
9. *Ivanenko D. C.* r. Acad. sci., 1932, v. 195, p. 439.
10. *Yukawa H.* Proc. Phys. Math. Soc. Japan, 1935, v. 17, p. 48.
11. *Tamm I. E.* Nature, 1934, v. 134, p. 1010; см. также *Понтекорво Б.* Пары и гипотетические нейтринные точки (1) (1963).
12. *Schrödinger E.* Berl. Ber., 1931, S. 63.
13. *Markov M. A.* Phys. Z. Sowjetunion, 1937, B. 11, S. 284.
14. *Markov M. A.* а) Neutrino. Preprint D 1269. Dubna, 1963; б) *Марков М. А.* Нейтрино. М.: Наука, 1964.
15. *Зельдович Я. Б.* Докл. АН СССР, 1952, 86, 505.
16. *Kopirinsky E., Mahmoud H.* Phys. Rev., 1953, v. 97, p. 1045.
17. *Leipinsky A.* Proc. Cambr. Philos. Soc., 1936, v. 32, p. 301.
18. *Спивак Р. Е.* ЖЭТФ (1958).
19. *Жданов Г. Б., Хайдаров А. А.* Докл. АН СССР, 1949, 65, 287.
20. *Steinberger G.* Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 300.
21. *Hinks E. P., Pontecorvo B.* Phys. Rev. 1948, v. 74, p. 697.
22. *Франк И. М., Шапиро Н. С.* Докл. АН СССР, 1948, 61, 825.
23. *Понтекорво Б.* ЖЭТФ, 1955, 29, 140.
24. *Марков М. А., Стаханов В.* ЖЭТФ, 1955, т. 28, 740.
25. *Ivanenko D., Sokolov A.* Sow. Phys., 1936, v. 9, p. 692.
26. *Fock V.* Sow. Phys., 1937, v. 11, p. 1.
27. *Jordan P.* Zs. für Phys., 1935, v. 93, p. 464.
28. *Polubarinov I.* Nucl. Phys., 1958, v. 8, p. 444.
29. *Markov M. A.* Rep. Acad. Sci. USSR, 1955; Proc. 6-th Conf. on High Energy Phys. Rochester, 1956.
30. *Sakata Shoichi.* Progr. Theor. Phys., 1956, v. 16, p. 687.
31. *Suppl. progr. theor. phys.*, 1961, N 19.
32. *Окунь Л. Б.* Слабые взаимодействия элементарных частиц. М.: Физматгиз, 1963.
33. *Ivanenko D.* Sow. Phys., 1938, v. 13, p. 141.
34. *Markov M. A., Zheleznykh I. M.* Preprint. On High Energy Physics, D-77, Dubna, 1960.
35. *Markov M. A., Zheleznykh I. M.* Nucl. Phys., 1961, v. 27, p. 385.
36. *Markov M. A.* Proc. of 1960 Ann. Conf. on High Energy Physics at Rochester.
37. *Greisen K.* Proc. Intern. Conf. Instrumentation High Energy Physics. Berkeley, 1960.
38. *Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А.* ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 1818.
39. *Askarjan G. A., Dolgoshein B. A.* Preprint. 160 Acoustic Detection of High Energy Neutrino at Big Depths. Moscow, 1976.
40. *Аскарьян Г. А.* ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 616; 1969, т. 48, с. 988.
41. *Гусев Г. А., Железных И. М.* Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 505.
42. *Марков М. А.* Предисловие к японскому изданию «Нейтрино».
43. *Fakirov D.* Fac. Sci. Sofia, 53, livre, 1958, v. 2.

44. Preprint. On High Energy Neutrino Physics (Reports on GINR seminars, 1957—1960). D-577 Dubna.
45. IX Ann. Intern. Conf. on High Energy Physics. Kiev, 1959.
46. *Sakata S.* Progr. Theor. Phys., 1946, v. 1, p. 43.
47. *Klein O.* Nature, 1948, v. 161, p. 897.
48. *Wheeler G. A.* Amer. Phys. Soc. Meeting. April, 1948.
49. *Horowitz N. et al.* Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 713.
50. *Hincks E. P., Pontekorvo B.* Phys. Rev., 1950, v. 77, p. 102.
51. *Марков М. А.* Гипероны и K -мезоны. Физматгиз, 1958; *Markov M. A.* Hyperonen und K -Mesonen. Veb. Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin, 1960, S. 292.
52. *Lokontan S., Steiberger G.* Phys. Rev., 1955, v. 98, p. 240.
53. *Faszini T.* Phys. Rev. Lett., 1958, v. 1, p. 247.
54. *Ландау Л. Д.* ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 405.
55. *Shapiro I. S., Blokhinsev L. D., Dolinsky E. I.* Nucl. Phys., 1957, v. 4, p. 273.
56. *Зельдович Я. Б.* ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 1531; 1959, т. 36, с. 964.
57. *Abov Yu. G., Krupchizky P. A., Oratovsky Yu. A.* Phys. Lett., 1963, v. 12, p. 25.
58. *Лобашев В. М.* Письма в ЖЭТФ, 1965, т. 2, с. 957.
59. *Лобашев В. М.* Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 138.
60. *Понтекорво Б., Смородинский Я.* ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 239.
61. *Зельдович Я. Б., Смородинский Я. А.* ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 90.
62. *Гандельман Г. М., Пипаев В. С.* ЖЭТФ, 1959, т. 37, с. 1072.
63. *Зельдович Я. Б., Лукьянов Я. А., Смородинский Я. А.* УФН, 1954, т. 54, с. 364.
64. *Слив Л.* ЖЭТФ, 1950, т. 20, с. 1035.
65. *Герштейн С. С., Зельдович Я. Б.* ЖЭТФ, 1955, т. 29, с. 698.
66. *Markov M. A.* Phys. Lett., 1964, v. 10, p. 122.
67. *Fabri R., Jantzen R. T., Ruffini R.* Astrophys., 1982, v. 114, p. 219.
68. *Бисноватый-Коган Г. С., Новик И. Д.* Астр. жур., 1982, т. 57, с. 899.
69. *Боголюбов Н. Н., Струминский Б. В., Тавхелидзе А. Н.* Препринт. Дубна, 1968, 25 января 1965. Д—2(4), 1965.

EARLY SOVIET WORKS ON THE WEAK INTERACTIONS

M. A. MARKOV

The author considers in the article the history of the early theoretical and experimental studies on the weak interactions, which took place in the Soviet Union from the appearance of the theory of weak interactions up to the 60-ties.

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ — НАУЧНАЯ ОСНОВА ГЕОТЕХНИКИ

П. Ф. ШВЕЦОВ

Физическая геология — наука, изучающая изменения состава, строения и свойств горных пород, движения их частей и целых массивов. Она исследует процессы энерго- и массообмена литосферы с почвой, атмосферой и водоемами, обусловленные большими, как правило, градиентами физических и геологических полей (давления, температуры, концентрации — плотности твердых частиц и водных растворов, дисперсности и др.). Отличие этой науки от геологической физики (геофизики) сходно с различием между физической химией и химической физикой. Физическая геология возникла раньше геофизики.

1. Возникновение физической геологии

Одним из истоков физической геологии был малоизвестный сейчас доклад акад. Г. П. Гельмерсена собранию Петербургской Академии наук (1864) «Физические и геологические условия Петербурга», ставший первым шагом на пути применения принципов и методов физики в исследованиях современных геологических процессов [2, с. 139—149]. Изучались они в новой столице России, расположенной при устье большой и необычной по режиму р. Невы, чтобы ответить на запросы практики. С доклада Г. П. Гельмерсена и следует начинать летопись геологии городов, получившей блестящее развитие лишь в середине XX в.

Вторым шагом на пути укрепления связи геологии с физикой можно считать издание в Англии (1882) учебного пособия «Физическая геология» У. Грина [28]. Третий, решающий шаг в развитии этой отрасли геологии сделал ученик Гельмерсена профессор Петербургского горного и путейского институтов И. В. Мушкетов. «Тяготение к вопросам физической геологии» возникло у Мушкетова, по мнению известного геолога и гидрогеолога С. Н. Никитина, во время многолетних (1873—1880) исследований Туркестана [14, с. 645—653]. Известно, что горы Средней Азии характеризуются изменчивым и подвижным почвенно-грунтовым комплексом в связи с огромными суточными теплообменами и большими амплитудами колебаний температуры почвы.

После окончания полевых работ в Туркестане Мушкетов в течение 10 лет занимался решением основных физико-геологических вопросов. В 1891 г. опубликовано составленное им оригинальное учебное пособие «Физическая геология» [11]. Это была фундаментальная научная монография, не уступающая по теоретическому значению «Основам геологии» Ч. Лайеля (1830—1833). Логика развития геологии и сильно возросшие в конце XIX в. практические запросы к ней со стороны транспортного строительства требовали перехода от описательной стадии этой науки к объяснительной и предсказательной.

«Создание необходимости изучения современных геологических процессов в связи с историей Земли породило особый, более объяснительный, чем описательный отдел геологии (подчеркнуто мною. — П. Ш.), который вследствие своего недавнего возникновения не только определяется, но и называется различно: геогенией (Лаппаран), динамической