Август 2004 г. *Том 174, № 8*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации

(к 90-летию со дня рождения академика Я.Б. Зельдовича)

(25 февраля 2004 г.)

25 февраля 2004 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации, посвященная 90-летию со дня рождения академика Я.Б. Зельдовича. На сессии были заслушаны доклады:

1. Рубаков В.А. (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *Проблема иерархии масштабов в физике частиц и космологии.*
2. Старобинский А.А. (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва). *Современная стандартная космологическая модель и перспективы ее развития.*
3. Сюняев Р.А. (Институт космических исследований РАН, Москва). *Реликтовое излучение и ранняя Вселенная: первые звезды, первые скопления галактик, вторичная ионизация вещества.*
4. Имшенник В.С. (Институт теоретической и экспериментальной физики РАН, Москва). *Нейтринная корона протонейтринной звезды.*
5. Герштейн С.С. (Институт физики высоких энергий РАН, Протвино). *Работы Я.Б. Зельдовича и современная физика частиц.*

Краткое содержание последнего доклада публикуется ниже.

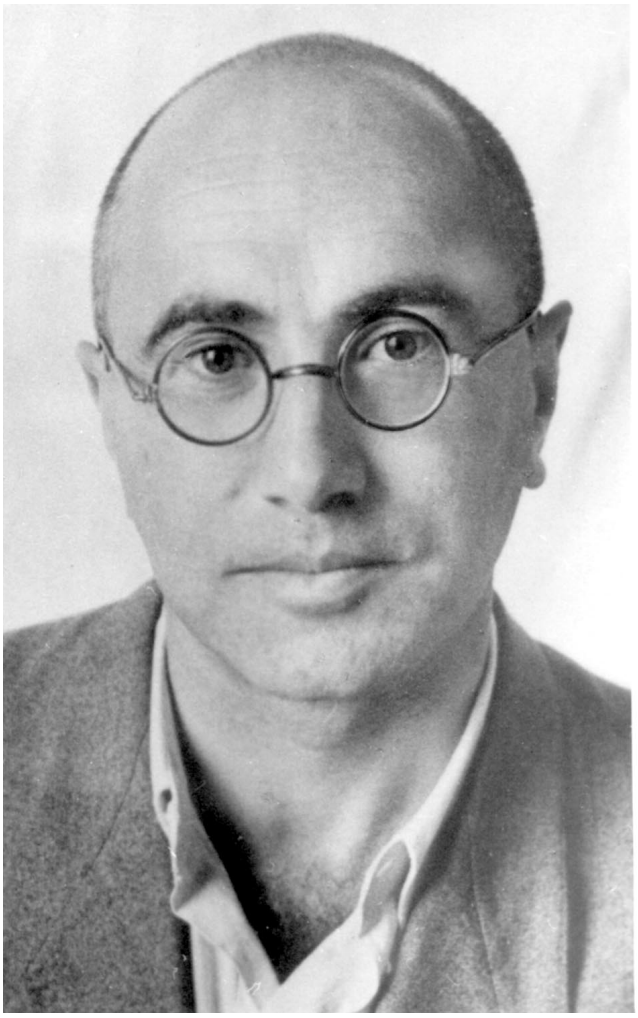
PACS numbers: **01.65.+g**, **12.10–g**

Работы Я.Б. Зельдовича и современная физика частиц

С.С. Герштейн

1. Введение

Яков Борисович Зельдович был, возможно, одним из последних универсалов прошедшего XX века, внесшим фундаментальный вклад в самые разные области науки. В течение жизни он несколько раз менял основное направление своей деятельности, с поразительной интуицией выбирая наиболее интересные проблемы, в которых можно было ожидать научного прорыва.



Яков Борисович Зельдович
(08. 03.1914 – 02.12.1987)

В начале 50-х годов таким направлением для него стала физика элементарных частиц. Это было обуслов-

© С.С. Герштейн 2004

лено, во-первых, новейшим развитием квантовой электродинамики и, во-вторых, открытием довольно большого числа новых частиц — пионов — и множества странных частиц, классификация которых еще оставалась неясной. Первые работы Якова Борисовича в области физики элементарных частиц были посвящены поиску законов, определяющих рождение и распады вновь открытых частиц.

2. Барионное и лептонное числа

Анализируя распад Λ-гиперона (его относили тогда к типу V-частиц) на протон и пион, Я.Б. Зельдович предложил в 1952 г. ввести понятие ядерного заряда [1], соответствующего закону сохранения тяжелых частиц (нуклонов и гиперонов). Тем самым он распространил на гипероны понятие тяжелого заряда, предложенное в 1938 г. Е. Штюкельбергом для нуклонов и обсуждавшееся в 1949, 1952 гг. Е. Вигнером. (Я.Б. не знал об этих работах, так как они были опубликованы в малодоступных для него журналах: соответственно в *Helv. Phys. Acta* и *Proc. Amer. Philos. Soc.*). Одновременно с Я.Б. Зельдовичем понятие тяжелого заряда было распространено на гипероны А. Пайсом, который предложил для него современный термин — "барионный заряд" и ввел термин "барионы". Эти понятия имеют фундаментальное значение для современной классификации элементарных частиц.

В 1953 г. Яков Борисович для объяснения отсутствия на опыте распада $\mu^{\pm} \to e^{\pm}\gamma$ и безнейтринного двойного β-распада выдвигает гипотезу о существовании особого сохраняющегося лептонного числа (или, как он называл, "нейтринного заряда") [2]. Одновременно с ним это понятие предложили Е. Конопинский и Х. Махмуд, а также Г. Маркс. В то время было известно о существовании только одного типа нейтрино и его антинейтрино. Поэтому Я.Б. Зельдович предложил считать одинаковыми нейтринные заряды электрона (e^-), положительно заряженного мюона (μ^+) и нейтрино, а нейтринные заряды позитрона (e^+), отрицательно заряженного мюона (μ^-) и антинейтрино — обладающими противоположными значениями. В этом случае распад $\mu^{\pm} \to e^{\pm}\gamma$ и двойной β-распад оказывались запрещенными законом сохранения "нейтринного заряда", а распады $\pi^- \to \mu^- + \nu$ и $\pi^- \to e^- + \tilde{\nu}$ должны были бы происходить с образованием разных частиц: соответственно нейтрино и антинейтрино. После экспериментов Л. Ледермана, Дж. Штейнберга и М. Шварца, доказавших нетождественность электронных и мюонных нейтрино, понятие "нейтринного заряда" (или, точнее, "лептонного заряда") было расширено, и сейчас установлено существование трех семейств лептонов: (e^-, ν_e), (μ^-, ν_μ) и (τ^-, ν_τ), каждое из которых имеет свой собственный лептонный заряд (или лептонное число).

Важнейшим для современности было замечание Я.Б. Зельдовича о принципиальном отличии ядерного (барионного) и нейтринного (лептонного) зарядов от электрического заряда, являющегося источником дальнодействующих (безмассовых) электромагнитных полей [2]. Последнее, как мы знаем, связано с тем, что *точному* сохранению электрического заряда соответствует локальная симметрия, благодаря которой сохраняющийся электрический заряд становится источником безмассового электромагнитного поля. Отсутствие дальнодействующих полей, создаваемых барионным и лептонным зарядами, может служить указанием на то, что законы сохранения являются лишь приближенными, а не точными. Этот вопрос весьма интересовал Якова Борисовича. Поэтому он настойчиво обращал внимание на необходимость проведения опытов по поиску безнейтринного двойного β-распада. Эта задача и сейчас остается одной из важнейших.

В 1957 г. Б. Понтекорво [3] еще в схеме с одним нейтрино заметил, что наиболее чувствительным экспериментом по проверке нарушения лептонного числа является поиск осцилляций нейтрино, так как расстояние, на котором могут происходить осцилляции за счет нарушения лептонного числа, пропорциональны амплитуде, а не вероятности перехода под воздействием "сверхслабого" взаимодействия. (В схеме с одним нейтрино эти осцилляции должны были переходить в так называемое стерильное состояние: $\nu \to \tilde{\nu}_{CT}$, которое не могло вызывать реакций обратного β-распада.) Б. Понтекорво отметил также, что наличие осцилляций свидетельствовало бы о том, что нейтрино имеет ненулевую массу покоя. После открытия мюонного, а затем τ-нейтрино идея Б. Понтекорво была распространена на осцилляции между нейтрино различных ароматов. В простейшем варианте процесс $\nu_e \to \nu_\mu$ был количественно рассмотрен в 1969 г. В.Н. Грибовым и Б. Понтекорво [4], предсказавшими, что благодаря этому процессу в начавшихся экспериментах Дэвиса по регистрации солнечных нейтрино может обнаружиться дефицит электронных нейтрино, вызывающих реакцию $\nu_e + {}^{37}Cl \to {}^{37}A^* + e^-$. Указанный дефицит солнечных (электронных) нейтрино в течение 30 лет представлял загадку. Сейчас она разрешена. Это является одним из самых выдающихся открытий последних лет. Открытие осцилляций солнечных ν_e-нейтрино, $\nu_\mu \to \nu_\tau$-осцилляций в атмосферных нейтрино, $\tilde{\nu}_e \to \tilde{\nu}_\mu$-осцилляций в реакторных нейтрино, а также в ускорительных экспериментах дает в настоящее время согласованную (в пределах экспериментальных ошибок) картину осцилляций между нейтрино различных ароматов и позволяет определить по модулю разности квадратов масс собственных состояний нейтрино и углы смешивания. Нарушение сублептонных зарядов может быть включено в рамки современной Стандартной модели. Вместе с тем уточнение опытных данных по осцилляциям нейтрино и безнейтринному 2β-распаду может дать сведения о нарушении лептонного заряда, которое в моделях Великого объединения связано с нарушением барионного. Все это подтверждает фундаментальную значимость для современной физики понятий лептонного и барионного зарядов, введенных в физику Я.Б. Зельдовичем.

3. Слабое взаимодействие. Баролептон (лептокварк)

В начале 50-х годов после открытия распада $\pi \to \mu$, распада мюона и его захвата атомными ядрами перед физикой встала чрезвычайно интригующая проблема о тождественности сил, вызывающих эти процессы, и сил, вызывающих β-распад ядер, или, иначе говоря, идея об универсальном характере слабых взаимодействий, единственным проявлением которых до этого был только β-распад. Эта идея основывалась на том, что все указанные процессы можно было объяснить четырехфермионным

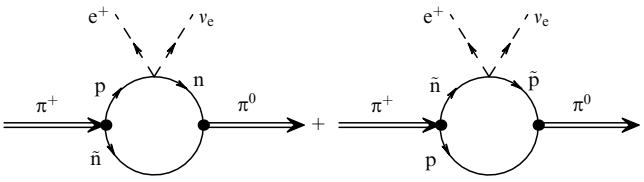


Рис 1. β-распад пиона: $\pi^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu_e$.

взаимодействием, константы которых по порядку величины совпадали с константой подобного взаимодействия (G_F), введенного Э. Ферми для объяснения β-распада. Предстояла огромная теоретическая и экспериментальная работа по проверке этой гипотезы. Однако к началу 50-х годов даже сам закон β-распада оставался неизвестным. Существовало пять вариантов четырехфермионного взаимодействия, приводящего к распаду $n \to p + e^- + \tilde{\nu}$: скалярный (S), векторный (V), тензорный (T), аксиально-векторный (A) и псевдоскалярный (P). Было известно существование одного из вариантов Гамова – Теллера (A или T), приводящих к разрешенному β-распаду с изменением на единицу спина ядра. (Эксперименты по электрон-нейтральной корреляции ошибочно свидетельствовали в пользу T-варианта.) Были указания на существование разрешенного $0 \to 0$-перехода ($^{14}O \to {}^{14}N^*$), ответственным за который должен был быть один из фермиевских вариантов (S или V). В этой ситуации Я.Б. Зельдович попытался вывести теоретически закон β-взаимодействия. Он говорил, что руководящей идеей для него было требование перенормируемости четырехфермионного взаимодействия. (Как известно, подобная идея сыграла впоследствии важную роль при создании теории электрослабых взаимодействий). Поскольку была доказана перенормируемость теории со скалярными мезонами, Яков Борисович предположил, что именно они могут быть переносчиками четырехфермионного взаимодействия. (В этом предположении сыграло роль и ошибочное мнение Я.Б. Зельдовича, что векторный мезон в качестве переносчика четырехфермионного взаимодействия не может обеспечить в β-распадах разрешенный $0 \to 0$-переход.) Используя схему, предложенную в 1936 г. Г. Вентцелем, согласно которой β-распад $n \to pe^-\tilde{\nu}$ может происходить в результате последовательности процессов $n \to \tilde{\nu} + L$, $L \to p + e^-$ или $n \to e^+ + K$, $K \to p^+ + \tilde{\nu}$ (где L и K — соответственно нейтральный и положительно заряженный скалярные бозоны), Я.Б. Зельдович указал [5], что эта схема приводит к (V + T)-закону β-распада (который представлялся в то время наиболее предпочтительным с точки зрения экспериментальных данных). Вскоре, однако, экспериментаторы, анализируя β-спектры в однажды запрещенных переходах, стали склоняться к тому, что фермиевским вариантом в законе β-распада является не вектор (V), а скаляр (S). Только после открытия несохранения четности и на основе гипотезы спирального нейтрино Р. Фейнману и М. Гелл-Ману [6], а также независимо Р. Маршаку и Е. Сударшану [7] удалось в 1958 г. из теоретических соображений предсказать правильный (V – A)-закон β-распада.

Работа [5] была первым опытом Якова Борисовича в теории β-распада. В настоящее время она практически забыта, однако имеет отношение к современным исследованиям. Дело в том, что бозоны L и K в схеме Зельдовича обладают барионным и лептонным зарядами, т.е. представляют баролептоны (Яков Борисович называл их изобарами нуклона). Аналогами таких частиц в некоторых теориях Великого объединения выступают лептокварки. Согласно предположению Якова Борисовича подобные частицы могли бы проявиться в виде резонансов в ер-рассеянии. Несколько лет тому назад в экспериментах по $e^{\pm}p$-рассеянию на коллайдере ГЕРА даже появились указания на существование лептокварков. При дальнейших исследованиях они, однако, не подтвердились. Но остается возможность получить определенные сведения о существовании лептокварков (в том случае, когда энергия сталкивающихся частиц недостаточна для прямого их рождения), изучая экспериментально с прецизионной точностью вопрос, не появляется ли в законах слабого взаимодействия помимо (V, A)-вариантов Стандартной модели каких-либо других, например T-варианта, возникающего согласно [5] в случае обмена лептокварками. Некоторые указания на примесь тензорного варианта получены в экспериментах по радиационному распаду пиона: $\pi \to e\nu_e\gamma$ (В.Н. Болотов, В.М. Лобашев и др.). Однако это требует дальнейших подтверждений. Современный предел на массу скалярного лептокварка составляет $M_{LQ} > 113$ ГэВ c^{-2}.

4. β-распад заряженного пиона $\pi^+ \to \pi^0 e^+ \nu$

Идея универсальности слабых взаимодействий с самого начала увлекла Я.Б. Зельдовича. Исходя из нее, он в 1954 г. рассмотрел неизвестный ранее процесс β-распада заряженного пиона: $\pi^+ \to \pi^0 e^+ \tilde{\nu}$ (или $\pi^- \to \pi^0 e^- \nu$) [8]. Прежде всего он указал, что этот распад может происходить только под влиянием векторного (V) варианта β-взаимодействия, и вычислил матричный элемент перехода, оказавшийся равным $\sqrt{2}$. Это значение в амплитуде перехода $\pi^+ \to \pi^0$ соответствовало двум возможным путям перехода, представленным на рисунке. Яков Борисович заметил, что такое значение должно получиться, если в соответствии с моделью Ферми – Янга рассматривать изотопический триплет (π^+, π^0, π^-) в качестве зеркальных ядер, составленных из нуклонов и антинуклонов. В этом случае волновые функции для нуклонов и антинуклонов в заряженных и нейтральных мезонах должны быть одинаковыми, а матричный элемент для изоспина $T = 1$

$$M = \langle 1 \rangle = \sqrt{T(T+1) - T_3(T_3 - 1)} = \sqrt{2}.$$

(Очевидно, что подобный результат в предположении универсальности слабых взаимодействий и изотопической инвариантности будет справедлив и для кваркового строения пионов.)

Вычисленная Я.Б. Зельдовичем относительная вероятность β-распада пиона оказалась очень малой: $Br(\pi^+ \to \pi^0 e^+ \nu) \simeq 10^{-8}$, и в 1954 г. было мало надежд даже на возможность зарегистрировать этот процесс экспериментально. Особое принципиальное значение измерение вероятности β-распада пиона приобрело в связи с проверкой закона сохранения векторного тока CVC (Conservation of Vector Current), о котором будет сказано ниже. Это обстоятельство подвигло экспериментаторов изыскать возможности зарегистрировать и измерить вероятность указанного процесса. Впервые он был зарегистрирован в 1962 г. группой Ю.Д. Прокош-

кина в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ [9] и группой К. Руббиа в ЦЕРНе [10]. После ряда уточнений (в том числе разности масс заряженного и нейтрального пиона, времени жизни π^+, константы векторного взаимодействия, взятой из $0 \to 0$-переходов в β-распаде ядер), а также накопления статистики β-распадов пиона измеренная вероятность процесса с точностью 3 % совпала с теоретической. Прецизионное измерение вероятности β-распада пиона в настоящее время представляет большой интерес для уточнения матричного элемента V_{ud}, определяющего слабый переход $u \to d$ кварков. В случае β-распада пиона этот переход не осложнен сильными взаимодействиями нуклонов в ядре, а уточнение величины V_{ud} может дать указание, не выходят ли современные данные за пределы Стандартной модели. К настоящему времени вероятность β-распада пиона измерена на Швейцарской мезонной фабрике в SINe с точностью 0,3 %. Такая точность превосходит точность выполнения изотопической инвариантности, если судить о последней по относительной разности масс заряженных и нейтральных пионов:

$$\frac{m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0}}{m_\pi} \simeq 3\% .$$

Но, как отметил Яков Борисович в своей предыдущей работе [11], указанная разность масс связана в модели Ферми – Янга с дополнительным кулоновским взаимодействием протона и антипротона в π^0-мезоне, понижающем его массу. (Точка зрения Зельдовича на происхождение разности масс пионов сохраняется и в кварковой модели, так как заряженные пионы состоят из кварков одноименного электрического заряда, а нейтральный пион — из разноименных.) Поскольку кулоновские силы носят дальнодействующий характер, они, создавая разность масс заряженных и нейтральных пионов, не могут заметно влиять на тождественность волновых функций частиц, составляющих пионы, поскольку последние определяются короткодействующим сильным взаимодействием. (Аналогичная ситуация имеет место и для волновых функций "зеркальных ядер", принадлежащих одному и тому же изотопическому мультиплету.) Поэтому из данных по β-распаду пиона могут быть получены наиболее точные сведения о величине матрицы V_{ud}.

5. Мезонные поправки в теории β-распада и закон сохранения векторного тока

Для Я.Б. Зельдовича была характерна вера в красоту и симметрию фундаментальных законов Природы. Он считал, что нарушение этой симметрии вызывается некими побочными эффектами. Поэтому, когда было установлено, что отношение гамов – теллеровской и фермиевской констант β-распада близко к единице, а именно $G_{G-T}/G_F \simeq 1{,}3$, Яков Борисович предположил, что для "голого" нуклона это отношение в точности равно единице, а отклонение от единицы связано с пионными поправками. Расчет, проведенный нами для принятых в то время S- и T-вариантов β-распада, подтвердил справедливость этого предположения. Одновременно для векторного варианта было обнаружено, что при учете β-распада пиона, рассмотренного Я.Б. Зельдовичем ранее, все мезонные поправки сокращаются и константа векторного взаимодействия не перенормируется за счет сильных взаимодействий (в прямой аналогии с электрическим зарядом протона). Красота этой аналогии настолько понравилась Якову Борисовичу, что в нашей статье [12], несмотря на существовавшее ошибочное мнение об отсутствии V-варианта β-взаимодействия, появился следующий вывод: "*Не имеет практического значения, но методически интересно, что в случае векторного* (V) *варианта взаимодействия следовало бы ожидать тождественно*

$$g_V(\text{голый}) = g_V(\text{эффективный})$$

в любом порядке по константе связи мезона с нуклоном ... Такой результат можно предвидеть по аналогии с теоремой Уорда, относящейся к взаимодействию заряженных частиц с электромагнитным полем; в этом случае виртуальные процессы, происходящие с частицами, не ведут к перенормировке электрического заряда частицы".

Позднее, после открытия универсального (V – A)-взаимодействия, к такому же выводу пришли Фейнман и Гелл – Ман, заметив, что векторная константа β-распада с точностью до 2 % совпадает с константой μ-распада [6]. (Сейчас мы понимаем, что указанное различие, в основном, связано с углом Кабиббо: $G_V^\beta = G\cos\Theta_c$.) Для обоснования своего вывода они ввели в качестве *гипотезы* связь заряженного векторного тока пионов с векторным током лептонов, записав первый в виде повернутого в изотопическом пространстве изотопически векторной части электромагнитного тока. В действительности эта гипотеза была излишней, так как наличие такого тока непосредственно следовало из рассмотренного Я.Б. Зельдовичем β-распада заряженного пиона. В 1958 г. Л.Б. Окунь сообщил о нашей работе на международной конференции, в результате чего и Р. Фейнман, и М. Гелл-Ман сразу же благородно признали наш приоритет и в последующем всегда ссылались на работу [12].

На Рочестерской конференции по физике высоких энергий в 1960 г. Р. Фейнман говорил: "*The idea that, if there is a vector current in* β*-decay this current could be made to be conserved, was first suggested by Gerstein and Zeldovich. We were not familiar with that when Gell-Mann and I were working it out.*" [1]

Открытие универсального (V – A)-взаимодействия вело к высказанной еще в 1938 г. О. Клейном гипотезе о том, что слабое взаимодействие между заряженными токами может переноситься векторными бозонами $W^\pm$. Поскольку и электромагнитное взаимодействие также переносится векторными частицами — фотонами, возник вопрос: почему именно векторные поля являются переносчиками взаимодействий? Ответ на этот вопрос, по-существу, содержался в работе Янга и Миллса, согласно которой сохраняющиеся заряды и их токи с необходимостью должны являться источниками векторных калибровочных полей. Открытие закона сохранения векторного тока (CVC) послужило указанием на то, что слабые взаимодействия должны описываться на основе калибровочной теории Янга – Миллса, а

[1] "*Идея о том, что если в* β*-распаде участвует векторный ток, то он может быть сделан сохраняющимся, была впервые предложена Герштейном и Зельдовичем. Во время нашей работы с Гелл-Маном мы об этом не знали.*"

аналогия слабых и электромагнитных взаимодействий почти сразу же привела к идее объединения этих взаимодействий (см. А. Салам и Дж. Уорд) [13]. В результате этого подхода в конечном счете и была создана калибровочная теория электрослабых взаимодействий. В дальнейшем идея калибровочных полей была применена и к сильным взаимодействиям. Когда в появившихся одновременно и независимо работах Н.Н. Боголюбова, А.Н. Тавхелидзе, Б.А. Струминского и М. Хана, Й. Намбу была высказана гипотеза о существовании триплетов кварков каждого аромата, отличающихся особым сохраняющимся квантовым числом (цветом), М. Хан и Й. Намбу предположили, что эта характеристика является сохраняющимся *зарядом*, принимающим три значения и генерирующим восемь калибровочных полей (глюонов). Развитие этой идеи привело к созданию КХД и общему принципу построения калибровочных полей.

CVC стимулировало также развитие таких новых плодотворных направлений, как векторная доминантность, частичное сохранение аксиального тока (PCAC), алгебра токов. С помощью новой техники получила строгое подтверждение гипотеза Я.Б. Зельдовича о том, что отклонение от единицы отношения G_A/G_V связано именно с пионными поправками.

CVC является одним из основных положений современной теории электрослабых взаимодействий, позволяющих, в частности, определить слабый векторный заряд кварков.

6. Гипотеза существования нейтральных токов и способы их наблюдения

В 1959 г., еще до создания электрослабой теории, Я.Б. Зельдович указал на эффекты, в которых могли бы проявиться слабые нейтральные токи, не сохраняющие четность [14]. Одним из них было вращение плоскости поляризации света при рассеянии на атомах, а другим — асимметрии, возникающие при рассеянии продольно-поляризованных $e^{\mp}$ (или $\mu^{\pm}$) на ядрах. Оба этих эффекта впоследствии были использованы для подтверждения электрослабой теории Салама – Вайнберга. Первый из них удалось наблюдать благодаря усилению вращения плоскости поляризации в тяжелых атомах (указанному М.А. Бушья и И.Б. Хрипловичем) в чрезвычайно тонких и остроумных экспериментах Л.М. Баркова и М.Г. Золотарева в Новосибирске, а второй — в экспериментах по рассеянию электронов в SLAC и рассеянию мюонов в ЦЕРНе.

Именно эта работа Якова Борисовича стимулировала нас в 1962 г. на поиск эффектов, вызываемых нейтральными токами в экспериментах с нейтрино средних энергий [15]. Мы не сомневались, что при высоких энергиях нейтральные токи, если они существуют, будут обязательно обнаружены по безмюонным нейтринным событиям в подготавливавшихся тогда нейтринных экспериментах ЦЕРНа. (Нейтральные токи действительно были обнаружены впервые в нейтринных экспериментах при высокой энергии. Но это произошло на 11 лет позже, в 1973 г.) В качестве эффекта, вызываемого нейтральными токами, мы рассмотрели возбуждение ядерных уровней при рассеянии нейтрино (или антинейтрино) на ядрах. Выбранный нами пример нейтринного возбуждения уровней ядра лития оказался неудачным с точки зрения экспериментального наблюдения. Но зато в последующей работе Ю.В. Гапонова и И.В. Тютина был указан весьма эффективный для регистрации процесс нейтринной диссоциации дейтона. Именно этот процесс имел решающее значение в экспериментах канадской установки SNO для подтверждения существования осцилляции солнечного электронного нейтрино и справедливости принятой Стандартной модели Солнца.

7. Электромагнитные взаимодействия при нарушении четности

Рассматривая электромагнитные взаимодействия частиц при нарушении пространственной четности, Я.Б. Зельдович обнаружил новую специфическую характеристику частиц, отвечающую взаимодействию $V \sim \mathbf{s}\,\mathbf{j} \sim \mathbf{s}\,\mathrm{rot}\,\mathbf{H}$, где $\mathbf{s}$ — спин частицы, а $\mathbf{j}$ — электромагнитный ток [17]. По аналогии с монопольным моментом он назвал эту характеристику "анапольным" моментом и привел наглядную модель анаполя. Если моделью монопольного момента может служить сферический конденсатор, электрическое поле которого обнаруживается, когда заряженная частица попадает между его обкладками, то моделью анапольного момента служит свернутый в тор соленоид, по поверхности которого течет электрический ток, так что магнитное поле действует только на ток внутри соленоида. (Интересно, что указание на существование подобной структуры обнаруживается сейчас в некоторых кристаллах.)

На примере Λ-гиперона Яков Борисович дал наглядное объяснение, почему при нарушении P-четности (приводящем к асимметрии распада) и сохранении CP-симметрии не возникает электрический дипольный момент частицы, и обратил внимание на то, что обнаружение электрического дипольного момента может дать важные сведения о природе нарушения CP-симметрии [18].

Наиболее точные эксперименты, ограничивающие в настоящее время дипольный момент нейтрона, дают для его верхнего предела $d < 0{,}63 \times 10^{-25} e$ см (В.М. Лобашев и др.). Эти эксперименты выполнены на основе метода удержания ультрахолодных нейтронов, предложенного Я.Б. Зельдовичем [19] и впервые осуществленного Ф.Л. Шапиро и его сотрудниками в ОИЯИ. (Электромагнитный способ удержания нейтронов был предложен В.В. Владимирским.) Прогресс в экспериментальном обнаружении электрического дипольного момента (или значительном понижении верхнего предела на его существование) представляет большой интерес для выяснения природы CP-нарушения. Поэтому соответствующие эксперименты в настоящее время представляются очень важными.

8. Опыты по проверке квантовой электродинамики на малых расстояниях

В 1955 г. Я.Б. Зельдович указал на то, что важные сведения о пределах применимости квантовой электродинамики могут дать точные измерения магнитного момента электрона [20]. Затем в работе В.Б. Берестецкого, О.Н. Крохина и А.К. Хлебникова [21] было замечено, что при той же точности измерений магнитного момента мюона можно достичь в 200 раз большего

предела на границу обрезания КЭД (соответственно отношению масс m_μ/m_e). Недавно эксперимент $(g-2)$ в Брукхейвенской национальной лаборатории по прецизионному измерению КЭД-поправок к магнитному моменту мюона оказался в центре внимания физиков из-за наметившихся расхождений его результатов с теорией (использующей, правда, экспериментальные данные о вкладе адронов в поляризацию вакуума). К настоящему времени указанные расхождения уменьшились и не выходят за пределы двух стандартных ошибок, так что тревога, по-видимому, оказалась напрасной.

В упомянутой работе Якова Борисовича содержалось замечание о том, что наилучшей прямой проверкой КЭД на малых расстояниях были бы эксперименты на встречных электронных пучках, однако, как полагал Я.Б. Зельдович, они вряд ли осуществимы из-за малой интенсивности пучков. Впоследствии А.М. Будкер писал, что именно это замечание стимулировало его на создание коллайдера. Первый созданный в ЯФ СОАН электрон-электронный коллайдер имел в качестве одной из важнейших целей именно проверку КЭД. Таким образом, краткое замечание Якова Борисовича способствовало созданию современной коллайдерной техники (по крайней мере, в нашей стране)[2].

9. Пятикварковые барионы

Яков Борисович с воодушевлением встретил гипотезу кварков. Его обзор "Кварки для пешеходов", опубликованный в 1965 г. в *УФН* [23], значительно способствовал популяризации этой идеи. В совместной работе с А.Д. Сахаровым [24] он рассмотрел в 1966 г. возможность существования пятикварковых барионов, сообщения об открытии которых недавно появились и сейчас интенсивно обсуждаются.

10. Экзотические ядра и нейтронная материя

Следует упомянуть некоторые работы Я.Б. Зельдовича в области физики ядра, имеющие важное значение для современных исследований. Он предсказал существование ряда ядер, обогащенных нейтронами, в частности ядра ^{8}He. Сейчас многие из предсказанных им изотопов открыты, а пучки ^{8}He и других радиоактивных ядер уже используются для исследований в экспериментах КЕК в Японии и планируются в других центрах. Яков Борисович предполагал возможность существования нейтронной материи, т.е. ядер, состоящих из одних нейтронов или с малой примесью протонов. Подтвердить это строгими расчетами ему не удалось. Тем не менее открытие нестабильных ядер, таких, как ^{10}He, ^{4}H и др. (А.А. Коршенинников и др.), является, по-видимому, свидетельством в пользу гипотезы Я.Б. Зельдовича. Об этом же свидетельствует то, что нестабильный изотоп $Z = 108$, содержащий наибольшее число нейтронов среди ядер с этим атомным номером (открытый группой Ю.Ц. Оганесяна в ОИЯИ), обладает наибольшим временем жизни.

11. Мюонный катализ

Я.Б. Зельдович заложил основы теории различных мезомолекулярных явлений в водороде и мюонного катализа ядерных реакций синтеза. Впервые идея мюонного катализа в дейтерии была высказана А.Д. Сахаровым еще в 1948 г., сразу же после открытия мюона. Он указал, что реакция синтеза должна происходить в мезомолекулярном ионе ddμ после его образования. Но при оценке вероятности образования мезомолекулы А.Д. Сахаров допустил ошибку, считая, что в процессе столкновения мезоатома dμ с ядром дейтерия, приводящего к образованию мезомолекулы, энергия связи мезомолекулы передается испускаемому γ-кванту. Я.Б. Зельдович в 1954 г., не зная о засекреченной работе А.Д. Сахарова, указал, что основным механизмом образования мезомолекул является передача энергии атомному электрону (а это на 2–3 порядка более вероятно, чем радиационный переход). Кроме того, им было высказано весьма полезное замечание о возможности резонансного образования мезомолекул при наличии у них возбужденного уровня с малой энергией связи. Это замечание послужило путеводной нитью для объяснения температурной зависимости μ-катализа в дейтерии, обнаруженной В.П. Джелеповым и др. в ЛЯП ОИЯИ, и привело к открытию резонансного синтеза мезомолекул ddμ с образованием мезомолекулярного комплекса. В дальнейшем, когда расчеты Л.И. Пономарева и его сотрудников обнаружили существование слабосвязанного состояния в мезомолекуле дейтерия-тирития dtμ, оказалось возможным предсказать, что в смеси дейтерия и трития один мюон может произвести за время своей жизни (~ 2 мкс) более 100 актов ядерного синтеза [25]. В результате изучение мюонного катализа стало предметом многолетних теоретических и экспериментальных исследований на ускорителях ОИЯИ, ПИЯФ с участием РФЦ НИИЭФ и на всех мезонных фабриках мира (в Швейцарии, Японии, США, Канаде). Полученные результаты позволяют уже сейчас проектировать создание на основе μ-катализа источника нейтронов с энергией 14 МэВ и интенсивностью до 10^{14} см$^{-2}$ с$^{-1}$.

После экспериментального открытия мюонного катализа Л. Альварецом в 1957 г. Я.Б. Зельдович и А.Д. Сахаров в совместной работе [26] оценили эффективное сечение перехода мюона от протона к дейтрону, скорость образования мезомолекул pdμ и вероятность ядерного синтеза $p + d \to {}^3$He в мезомолекуле pdμ с передачей энергии мюону. (Процесс, который, собственно, послужил для экспериментального открытия μ-катализа.) В следующей работе [27] Яков Борисович указал, что максимальная эффективность мюонного катализа в любом случае лимитируется эффектом прилипания мюона к гелию (т.е. захватом его на мезоатомную орбиту ядра гелия, образующегося в результате реакции ядерного синтеза). Именно это ограничение не позволяет получить при проведении μ-катализа в смеси дейтерия–трития в среднем более 200 актов ядерного синтеза на один мюон.

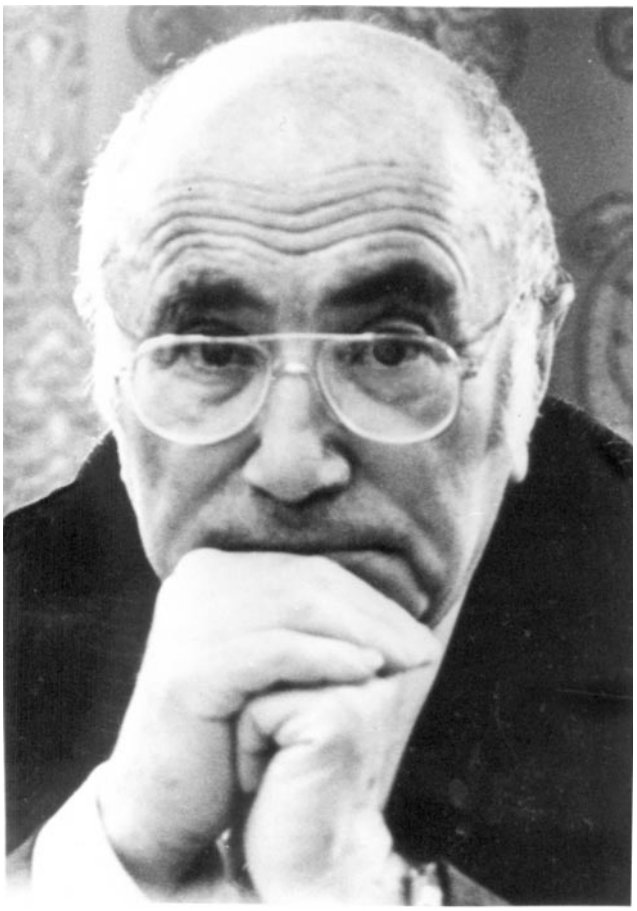
[2] Одним из многих примеров того, как замечания Я.Б. Зельдовича были осуществлены при проведении экспериментов фундаментальной важности, служит его работа [22] о возможности измерения циркулярной поляризации γ-квантов по их отражению от намагниченного ферромагнетика. Остроумное использование этой методики позволило определить спиральность электронного антинейтрино в опытах М. Гольдхабера и др., а также с уникальной точностью измерить эффекты нарушения четности в ядерных процессах (В.М. Лобашев, В.А. Назаренко и др.).

12. Синтез физики частиц и космологии

В середине 60-х годов, после открытия пульсаров и реликтового излучения, главные научные интересы Якова Борисовича сместились в астрофизику и космологию. И здесь он, имея фундаментальные результаты в физике частиц, заложил основы одного из главных достижений науки XX века — синтеза физики элементарных частиц и космологии. Благодаря этому синтезу из космологических данных удается извлекать важные сведения об элементарных частицах, а космология стала полигоном для проверки различных моделей Великого объединения.

В 1965 г. в совместной работе с Л.Б. Окунем и С.Б. Пикельнером [28], исходя из модели горячей Вселенной, он оценил возможную концентрацию свободных кварков в окружающей среде и инициировал эксперименты В.Б. Брагинского и др. по их поиску (в которых он сам принял активное участие) [29]. Отрицательный результат этих опытов, установивших верхний предел на концентрацию свободных кварков на несколько порядков меньшим предсказанного, явился одним из главных аргументов в пользу невылетания (конфайнмента) кварков. В 1966 г. из космологических данных Яков Борисович оценил верхний предел на суммарную массу стабильных нейтрино [30]. В течение многих лет эта оценка имела важное значение, так как она соответственно на три и почти на пять порядков улучшала пределы на массы мюонного и тау-нейтрино, полученные в лабораторных экспериментах. В настоящее время, после обнаружения нейтринных осцилляций и установления, что максимальная разность масс нейтрино различных ароматов составляет не более 0,1 эВ, а предел на массу электронного нейтрино, определенный по β-распаду трития, меньше 2,5 эВ, эта оценка имеет лишь историческое значение. Работа [30] была одной из первых, способствовавших синтезу физики частиц и космологии. Аналогичное историческое значение имеют работы Я.Б. Зельдовича и его сотрудников по нейтринной Вселенной, выполненные сразу после того, как появилось ошибочное экспериментальное указание, что нейтрино имеет массу $m_\nu \simeq 20$ эВ. Зато не потеряла своей актуальности оценка Я.Б. Зельдовича и М.Ю. Хлопова [31] концентрации реликтовых магнитных монополей, с которой они должны были бы остаться в окружающей среде после Большого Взрыва. Установленное на опыте отсутствие монополей с концентрацией, на много порядков меньшей, чем указанная оценка, стало одним из важных аргументов в пользу изменения сценария эволюции ранней Вселенной.

Исследования в области частиц и КЭД стимулировали Якова Борисовича на важные открытия в космологии. Так, рассмотрев рождение позитронов в поле сверхкритических ядер ($Z > 137$) [32], он пришел в своих знаменитых работах с А.А. Старобинским и Л.П. Питаевским к идее рождения частиц и античастиц в сильном гравитационном поле — эффекту, позволяющему наполнить веществом "пустую" раннюю Вселенную. Я не имею возможности говорить здесь ни о торжестве многих идей Я.Б. Зельдовича в астрофизике и космологии, ни о многих кандидатах в "черные дыры", открытых согласно его предложению по рентгеновскому излучению акрецирующего на них вещества, ни о подтверждении спектра первичных флуктуаций по наблюдению



Одна из последних фотографий Якова Борисовича Зельдовича.

крупномасштабных структур Вселенной, ни об эффекте Сюняева – Зельдовича, позволяющем измерять пекулярные скорости далеких галактик и т.п. Это специальная тема. Можно только восхищаться, как много сделал Яков Борисович в этих областях, занявшись ими в возрасте около 50 лет, когда, по мнению многих, творческая активность теоретиков уже угасает. Я хотел бы остановиться лишь на работе Р.А. Сюняева и Я.Б. Зельдовича [33], в которой отмечается, что измерение чрезвычайно малой угловой асимметрии реликтового излучения (на углах $\leqslant 1^\circ$) дает уникальную информацию о космологических параметрах. Сенсационные результаты таких измерений, проведенных в самое последнее время на установке Boomerang и, особенно, в эксперименте WMAP, показали, что плотность привычной нам барионной материи составляет лишь 4 – 5 % от средней плотности вещества во Вселенной. Вместе с темной массой неизвестного (небарионного) происхождения, сосредоточенной в галактиках и их скоплениях, она составляет менее 30 % средней плотности, а около 70 % сосредоточено в равномерно распределенной "темной энергии", природа которой также неизвестна. Раскрытие загадки "темной массы" и "темной энергии" — задача нынешнего XXI века. Ее решение может быть получено только на основании синтеза физики частиц (как ускорительной, так и неускорительной) и космологии — синтеза, основу которого заложил своими трудами Яков Борисович Зельдович.

Таким образом, большинство результатов и идей, высказанных Яковом Борисовичем 30 – 50 лет назад, по-

Одни их главных создателей ядерного щита нашей страны: Яков Борисович Зельдович и Юлий Борисович Харитон. Совместный юбилей 150 лет = 70 лет (Я.Б. Зельдовичу) + 80 лет (Ю.Б. Харитону) (Москва, Институт химической физики РАН, 1984 г.)

прежнему находятся в центре внимания теоретических и экспериментальных исследований современной физики частиц и ее связи с космологией.

Если добавить к этому, что многие фундаментальные результаты получены Я.Б. Зельдовичем в то время, когда он почти целиком был занят ответственнейшей работой на "объектах" и внес огромный (а в ряде вопросов решающий) вклад в создание "ядерного щита" нашей страны, вспомнить ту необычайную щедрость, с которой он дарил свои идеи ученикам и коллегам, ту поддержку, которую он оказывал новым направлениям в науке, а также его помощь молодым начинающим исследователям, то становится очевидным, какой уникальной личностью был Яков Борисович Зельдович.

Список литературы

1. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **86** 505 (1952) [3]; Stuekelberg E C G *Helv. Phys. Acta* **11** 299 (1938); Wigner E P *Proc. Am. Philos. Soc.* **93** 521 (1949)
2. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **91** 1317 (1953) [3]; Konopinski E J, Mahmoud H M *Phys. Rev.* **92** 1045 (1953); Marx G *Acta Phys. Sci. Hung.* **3** 55 (1953)
3. Pontecorvo B M, Preprint P-95 (Dubna: JINR, 1957); Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **34** 247 (1958)
4. Gribov V, Pontecorvo B *Phys. Lett. B* **28** 493 (1969)
5. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **89** 33 (1953)
6. Feynman R P, Gell-Mann M *Phys. Rev.* **109** 193 (1958)
7. Sudarshan E C G, Marshak R E, *Phys. Rev.* **109** 1860 (1958)
8. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **97** 421 (1954) [3]
9. Дунайцев А Ф и др. *ЖЭТФ* **42** 632 (1962); Dunaitsev A F et al. *Phys. Lett.* **1** 138 (1962)
10. Depommier et al., in *Proc. 1962 Intern. Cong. on High Energy Phys. at CERN* (Geneve, 1962) p. 441
11. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **97** 225 (1954)
12. Зельдович Я Б, Герштейн С С *ЖЭТФ* **29** 698 (1955) [3]
13. Salam A, Ward J C *Nuovo Cimento* **XI** 568 (1959); Салам А, Ворд Д, в сб. *Элементарные частицы и компенсирующие поля* (Под ред. Д Д Иваненко) (М.: Мир, 1964) с. 186
14. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **36** 964 (1959) [3]
15. Герштейн С С, Нгуен Ван Хьеу, Эрамжян Р А *ЖЭТФ* **43** 1554 (1962)
16. Гапонов Ю В, Тютин И В *ЖЭТФ* **47** 1826 (1964)
17. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **33** 1531 (1957) [3]
18. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **33**1488 (1957) [3]
19. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **36** 1952 (1959) [3]
20. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **105** 445 (1955) [3]
21. Берестецкий В Б, Крохин О Н, Хлебников А К *ЖЭТФ* **30** 788 (1956)
22. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **83** 63 (1953) [3]
23. Зельдович Я Б *УФН* **86** 445 (1965)
24. Зельдович Я Б, Сахаров А Д *ЯФ* **4** 395 (1966)
25. Gerstein S S, Ponomarev L P *Phys. Lett. B* **72** 80 (1977)
26. Зельдович Я Б, Сахаров А Д *ЖЭТФ* **32** 947 (1957)
27. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **33** 310 (1957)
28. Зельдович Я Б, Окунь Л Б, Пикельнер С Б *УФН* **97** 113 (1965) [3] Zeldovic Ya B, Okun L B, Pikelner S B *Phys. Lett.* **17** 164 (1965) [3]
29. Брагинский В Б и др. *ЖЭТФ* **52** 29 (1967); *ЖЭТФ* **54** 91 (1968)
30. Герштейн С С, Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **4** 174 (1966) [3]
31. Khlopov M Yu, Zeldovich Ya B *Phys. Lett. B* **79** 239 (1978) [3]
32. Зельдович Я Б, Попов В С *УФН* **105** 403 (1971)
33. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astrophys. Space Sci.* **7** 1 (1970) [3]

[3] Статья с комментариями содержится в книге Я.Б. Зельдовича *Избранные труды* Т. 2 *Частицы, ядра, Вселенная* (М.: Наука, 1985)