

Новиков Н.Б.

Аспирант Института психологии РАН

Россия, г. Москва

Novikov N.B.

Postgraduate student, Institute of Psychology RAS

Russia, Moscow

Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧ – ТВОРЕЦ УДИВИТЕЛЬНЫХ АНАЛОГИЙ

Аннотация: В свое время американский физик и математик Станислав Улам, развивая взгляд С.Банаха на роль аналогий в прогрессе научного знания, сказал: «И то, что мы называем талантом или гением, в значительной степени зависит от умения искусно пользоваться своей памятью, с тем, чтобы найти аналогии – в прошлом, настоящем и будущем – которые, как говорил Банах, необходимы для развития новых теорий» [1, с.160]. Разумеется, чтобы эффективно пользоваться аналогиями, позволяющими «перебрасывать мосты» между разными научными дисциплинами, нужно иметь широкую эрудицию, избегать «статуса» узкого специалиста. Этими качествами – качествами универсала, не знавшего границ между многочисленными областями физики – в полной мере владел выдающийся отечественный физик Яков Борисович Зельдович (1914-1987). Количество полученных им результатов столь велико, а широта интересов была столь поразительна, что знаменитый английский физик С.Хокинг до знакомства с Зельдовичем полагал, что фамилия Зельдович – псевдоним группы ученых (как Бурбаки). Мы хотим рассмотреть генезис наиболее важных идей Я.Б.Зельдовича, который, как мы увидим, был генератором потрясающих аналогий.

Ключевые слова: научное творчество, генезис идеи, выявление аналогий, перенос понятий из одной области в другую.

Abstract: At one time, the American physicist and mathematician Stanislaw Ulam, developing the view of S. Banach on the role of analogies in the progress of scientific knowledge, said: “And what we call talent or genius depends to a large extent on the ability to skillfully use one’s memory in order to find analogies - in the past, present and future - which, as Banach said, are necessary for the development of new theories” [1, p.160]. Of course, in order to effectively use analogies that allow you to “throw bridges” between different scientific disciplines, you need to have broad erudition, to avoid the “status” of a narrow specialist. These qualities - the qualities of a universal, who knew no boundaries between numerous areas of physics - were fully owned by the outstanding Russian physicist Yakov Borisovich Zeldovich (1914-1987). The number of results obtained by him is so great, and the breadth of interests was so striking that the famous English physicist S. Hawking, before meeting Zeldovich, believed that the name Zeldovich was a pseudonym for a group of scientists (like Bourbaki). We want to consider the genesis of the most important ideas of Ya. B. Zeldovich, which, as we will see, was a generator of amazing analogies.

Key words: scientific creativity, genesis of an idea, identification of analogies, transfer of concepts from one area to another.

1. Основные этапы научной биографии

Я.Б. Зельдович родился 8 марта 1914 г. в доме своего деда в Минске, но с середины года семья постоянно жила в Петрограде (Санкт-Петербурге). Закончив в пятнадцать лет среднюю школу, Зельдович поступил на курсы лаборантов при Ленинградском институте «Механобр» (институте механической обработки полезных ископаемых). В марте 1931 г. с экскурсией сотрудников «Механобра» он посетил отдел химической физики

Ленинградского физико-технического института. В лаборатории С.З.Рогинского юноша удивил сотрудников своими серьезными вопросами и рассудительностью, поэтому ему предложили в свободное время работать в лаборатории. Вскоре встал вопрос об официальном переводе. Ко времени зачисления (15 марта 1931 г.) отдел превратился в самостоятельный Институт химической физики. Оказавшись в ИХФ, Я.Б.Зельдович выполнил там ряд блестящих теоретических и экспериментальных работ в области адсорбции, химической кинетики, горения и детонации. И хотя диплома о высшем образовании у него не было, в 1936 г. по результатам своих работ по адсорбции и катализу он защищает кандидатскую диссертацию. «Благословенные времена, - вспоминал Зельдович, - когда ВАК давал разрешение на защиту лицам, не имеющим высшего образования!» [2, с.232].

Темой его докторской диссертации, защищенной в конце 1939 г., была теория окисления азота. Для Якова Борисовича теория горения всегда оставалась незабываемой первой любовью. Обращение к ней в более позднее время (в 1970-1980-е годы) оказывало на Зельдовича физически омолаживающее воздействие. После того, как О.Ган и Ф.Штрасман (1938) открыли деление урана, Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон опубликовали серию статей и обзоров по данной теме. Самым значительным их вкладом в этот период стала разработка теории развития цепной ядерной реакции в уране. Элементы данной теории были изложены в статье «О цепном распаде урана под действием медленных нейтронов» [3].

Во время войны Я.Б. Зельдович совместно с О.И. Лейпунским создали и «пробили через консерваторов» новую теорию нестационарного горения пороха в ракетной камере, которая блестяще была подтверждена экспериментами ОИ. Лейпунского. На основе этой теории в 1943-1945 гг. были проведены усовершенствования в производстве знаменитых «Катюш»: удалось существенно увеличить вес заряда, дальность полета снарядов, предотвратить их преждевременные взрывы или самозатухание [4].

Яков Борисович сыграл исключительную роль в создании атомной и водородной бомбы. Недаром участники советского атомного проекта называли его «главным теоретиком атомной бомбы» - по аналогии с тем, что М.В.Келдыша называли «главным теоретиком космонавтики». В частности, в 1948-1949 гг. Л.В.Альтшулер и Е.И.Забабахин на основе анализа, проделанного Я.Б.Зельдовичем, предложили новую (оригинальную) схему обжатия плутониевого заряда. Созданная с использованием этой схемы атомная бомба оказалась в два раза мощнее той, которую планировалось создать изначально [5]. Кроме того, Я.Б.Зельдович, А.Д.Сахаров и В.А.Давиденко разделяют авторство идеи о возможности создания двухступенчатой водородной бомбы на принципе радиационной имплозии. Успешное испытание двухступенчатого «изделия» (РДС-37) завершилось 22 ноября 1955 г. [6].

В начале 1950-х гг. в связи с открытием новых частиц и их распадов первостепенный интерес приобрела физика элементарных частиц. ЯБ занялся ею, еще работая на «объекте», стараясь при этом держать сотрудников в курсе новейших открытий. В 1953 г. он выдвинул идею о сохранении лептонного числа (ученый называл его «нейтринным числом»). Зельдович (1955) установил, что в векторном варианте радиоактивного β -распада должен сохраняться «слабый» заряд. Это было открытие закона сохранения слабого векторного тока адронов. Р.Фейнман и М.Гелл-Манн, независимо сформулировавшие данный закон, всегда признавали приоритет Зельдовича.

В 1964 г. Яков Борисович официально переходит в Институт прикладной математики. 19 лет его работы в этом институте стали ярким периодом развития отечественной теоретической астрофизики и космологии. «Он пришел в эту область, - отмечает С.С.Герштейн, - с уникальным знанием ядерной физики, физики элементарных частиц, химической кинетики, свойств вещества в экстремальных условиях высоких плотностей и температур. Именно благодаря его работам осуществился современный синтез физики

частиц и космологии» [5, с.67]. Его деятельность, а также активность созданной им научной школы вооружили наблюдательную астрономию «проницательной силой понимания физических процессов, определяющих структуру и эволюцию звезд, галактик, скоплений, Вселенной в целом» [2, с.234].

Теперь мы переходим к анализу истории физических идей Я.Б.Зельдовича, анализу процесса возникновения его гипотез (концептуальных взглядов), многие из которых получили «статус» научных открытий и вошли в современные учебники. Мы увидим, что в основе творческого мышления Я.Б.Зельдовича лежала способность обнаруживать аналогии между разными сферами знания и осуществлять перенос идей, принципов и методов из одной теории в другую. Другими словами, мыслительная (ментальная) операция аналогии была одним из главных инструментов, с помощью которых ему удавалось «выйти за грань известного». На самом деле в этой операции нет ничего мистического, ею может овладеть любой человек, планирующий связать свою жизнь с наукой. Повторимся, что здесь важно избегать «ограниченности» узкого специалиста. К сожалению, объем статьи вынуждает нас быть краткими, поэтому при описании генезиса идей Я.Б.Зельдовича нам придется акцентировать внимание лишь на самых важных аспектах этого генезиса.

2. Аналогия первая: вывод нелинейного уравнения распространения пламени

В 1938 г. Я.Б.Зельдович и Д.А.Франк-Каменецкий вывели нелинейное уравнение распространения пламени. Данный результат явился важным вкладом в область, называемую «теорией горения». Как Зельдович и Франк-Каменецкий пришли к этому результату? Историкам науки хорошо известен ответ на этот вопрос: по аналогии с нелинейным уравнением Колмогорова-

Петровского-Пискунова (КПП), описывающим процесс распространения нового биологического вида в пространстве биосферы. Это же уравнение, о котором А.Н.Колмогоров говорил, что он с коллегами вывел его, желая описать чисто биологический процесс экспансии новых генов, применимо для описания распространения эпидемии и нервного импульса (возбуждения) в нервной системе. Таким образом, Я.Б.Зельдович перенес уравнение КПП, относящееся к математической биологии, в теорию теплового распространения пламени. Согласитесь, удивительная экстраполяция!

Об этой аналогии пишут многие авторы. А.Т.Филиппов в книге «Многоликий солитон» [7] отмечает: «В 1937 г. А.Н.Колмогоров, И.Г.Петровский и Н.С.Пискунов опубликовали замечательную математическую работу (между прочим, также связанную с биологической проблемой). Они показали, что нелинейность может уравновесить диффузию и что в результате может появиться бегущая уединенная волна с постоянной скоростью и формой. По сути дела, была открыта и изучена простейшая математическая модель нервного импульса, но, к сожалению, никто этого не понял. Нельзя сказать, что эта работа вообще не была замечена. Год спустя Я.Б.Зельдович и Д.А.Франк-Каменецкий применили ее результаты к теории горения...» [7, с.244].

Этот же вопрос рассматривает В.М.Тихомиров [8]: «В 1937 г. А.Н.Колмогоров совместно с И.Г.Петровским и Н.С.Пискуновым публикует статью «Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме». Эта работа дала импульс к развитию разнообразных проблем физики и биологии, в частности теории теплового распространения пламени, начала разработки которой принадлежали Я.Б.Зельдовичу и Д.А.Франк-Каменецкому, теории горения и взрыва, теории распространения нервных импульсов и др.» [8, с.104].

Приведем еще один источник. Р.Р.Мухин [9] указывает: «До появления работы КПП почти все виды волновых движений описывались гиперболическими уравнениями. Использование параболического уравнения КПП для описания распространения волн было принципиально новым шагом, оно является одной из базовых моделей для описания автоволновых процессов. Промежуточно асимптотические решения параболических уравнений в виде бегущей волны оказались очень плодотворными для теории горения (Я.Б.Зельдович, Д.А.Франк-Каменецкий)» [9, с.24].

3. Аналогия вторая: идея о цепном механизме реакции деления урана

В 1940 г. Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон разработали теорию цепной реакции деления урана. В этой теории были заложены основы физики атомных реакторов и описаны первые подходы к решению проблемы взрывного освобождения ядерной энергии. Ряд понятий, использованных Зельдовичем и Харитоном в теории деления урана (в которой отмечается необходимость размножения нейтронов в геометрической прогрессии), были заимствованы из совсем другой теории. Мы имеем в виду теорию цепных химических реакций, построенную Н.Н.Семеновым. Другими словами, Зельдович и Харитон перенесли в теорию деления урана совокупность понятий и принципов, относящихся к теории цепных химических процессов. Этот перенос облегчался тем, что в 1928 г. именно Ю.Б.Харитон совместно с З.Вальта открыл первую цепную разветвленную химическую реакцию – взаимодействие фосфора с кислородом [10, 11]. Изучение этого взаимодействия и привело Н.Н.Семенова к формулировке теории цепных процессов, идущих с разветвлением цепи, за что он удостоен в 1956 г. Нобелевской премии по химии. Конечно, Зельдович и Харитон использовали в своей теории цепного распада урана многие другие результаты: опыты

Жолио-Кюри, формулу Брейта-Вигнера и т.д. Но влияние теории Н.Н.Семенова в любом случае было стимулирующим.

Рассматриваемая нами аналогия обсуждается в следующих источниках. Ю.Б.Харитон в статье «Счастливейшие годы моей жизни» [12] вспоминает о начале своего сотрудничества с Я.Б.Зельдовичем: «Вместе мы начали работать в 1939 г. Тогда появилась первая статья о наблюдении деления ядер урана, авторами которой были О.Ган и Ф.Штрассман, а затем работа Л.Мейтнер и О.Фриша, объяснивших это явление делением ядер урана под действием нейтронов. Прочитав об этом, мы поняли, что в данном случае возможны не обычные цепные реакции, а ядерные, которые могли бы быть и разветвленными, т.е. приводящими к ядерному взрыву с выделением огромной энергии. Дело в том, что в нашем институте много занимались вопросами, связанными с цепными реакциями. Директором института Н.Н.Семеновым была построена теория разветвленных цепных химических реакций. Поэтому нам было довольно легко **перекинуть мостик** к ядерным разветвленным цепным реакциям, и мы договорились заняться этим вплотную» [12, с.100].

Об этом же сообщает А.Э.Калмансон в статье «Электроны и жизнь» [13] «Глубокие и разносторонние исследования кинетики свободно-радикальных реакций позволили вскрыть основные закономерности развития таких важных для практики процессов, как горение и взрывы, основой которых служат цепные реакции. В последующие годы вскрытые закономерности цепных реакций были использованы в работах, открывших путь к практическому использованию атомной энергии в различных целях. И не случайно поэтому, что именно ближайшие ученики и сотрудники Н.Н.Семенова – Ю.Б.Харитон и Я.Б.Зельдович – внесли наиболее значительный вклад в разработку этой важнейшей для судеб человечества проблемы» [13, с.131].

Аналогичные сведения содержатся в статье [10], где авторы констатируют: «Идея разветвленно-цепной химической реакции послужила в

свое время основой для теории деления урана, созданной, кстати, ближайшими учениками и сотрудниками Семенова, академиками Я.Б.Зельдовичем и Ю.Б.Харитоном» [10, с.77].

Интересна реакция Игоря Евгеньевича Тамма (Нобелевская премия, 1958 г.) на работу Зельдовича и Харитона, посвященную цепному процессу деления урана. Ю.Н.Вавилов в книге «В долгом поиске» [14] повествует: «Многие ученые, включая Иоффе и Капицу, относились скептически к возможности использования атомной энергии, но Тамм в августе 1939 года, услышав от Якова Зельдовича и Юлия Харитона об их вычислениях числа нейтронов, испускаемых при делении, сказал: «Вы знаете, что означает это открытие? Оно означает, что может быть создана бомба, которая сможет разрушить город в пределах радиуса десяти километров» [14, с.268].

4. Аналогия третья: термоядерный синтез легких ядер в земных условиях

В 1945 г. на одном из закрытых научных заседаний Я.Б.Зельдович выступил с докладом «О возможности возбуждения реакций в легких ядрах». В этом докладе была сформулирована мысль о том, что термоядерный синтез легких атомных ядер можно осуществить в земных условиях. Для этого необходимо разогреть дейтерий (тяжелый водород с атомной массой 2) ударной волной, инициированной атомным взрывом. В этой мысли Я.Б.Зельдовича содержался принцип устройства водородной (термоядерной) бомбы. Как же ученый пришел к этой идее? По свидетельству специалистов, эта идея была стимулирована аналогией с другой идеей, которую высказал И.Я.Померанчук. Советский физик-теоретик Исаак Яковлевич Померанчук предположил, что источником энергии звезд может быть участие дейтерия в реакции синтеза легких атомных ядер. Он обсуждал свое предположение с Я.Б.Зельдовичем и Ю.Б.Харитоном. «Оторвавшись» от космического

(астрофизического) ракурса, сквозь который Померанчук рассматривал синтез легких ядер, Зельдович и Харитон нашли его идею иное применение – служить механизмом (принципом действия) водородной бомбы.

Если когда-нибудь инженеры создадут космические транспортные системы с двигателем, использующим синтез легких ядер, им нужно будет помнить, кто первый придумал этот механизм. Что касается двигателя, основанного на механизме радиоактивного распада атомов, то уже существует принципиальная схема такого двигателя и проводятся соответствующие эксперименты (ядерный буксир «Зевс»).

Приведем работы, в которых раскрывается история упомянутой технической идеи Я.Б.Зельдовича. Ю.Б.Харитон, В.Г.Адамский и Ю.Н.Смирнов в статье «О создании советской водородной (термоядерной) бомбы» [15] пишут: «По воспоминаниям И.И.Гуревича, дейтерий в реакции с легкими ядрами интересовал его и И.Я.Померанчука в качестве источника энергии звезд. Они обсуждали эту проблему с Я.Б.Зельдовичем и Ю.Б.Харитоном, которые, в свою очередь, увидели, что термоядерный синтез легких ядер может оказаться осуществимым в земных условиях, если разогреть дейтерий ударной волной, инициированной атомным взрывом. Научный отчет четырех авторов был отпечатан на машинке как несекретный документ, никогда не был засекречен и до сих пор хранится в открытых фондах архива Курчатовского института» [15, с.202].

Эта история рассматривается также Р.И.Илькаевым в уже упоминавшемся очерке [6]: «В конце 1945 года Я.Б.Зельдович был привлечен и к рассмотрению возможности создания водородной бомбы. 17 декабря 1945 года на заседании Технического Совета Специального Комитета был заслушан доклад Я.Б.Зельдовича «О возможности возбуждения реакций в легких ядрах». Доклад был основан на материалах представленного к этому заседанию отчета И.И.Гуревича, Я.Б.Зельдовича, И.Я.Померанчука и Ю.Б.Харитона «Использование ядерной энергии легких элементов». Этот

отчет явился первым отечественным исследованием по проблеме создания водородной бомбы» [6, с.95].

5. Аналогия четвертая: идея о сохранении ядерного (барионного) заряда

Занявшись физикой элементарных частиц, Я.Б.Зельдович быстро определил наиболее актуальные направления исследований в этой области. В 1952 г. он выдвинул идею о сохранении ядерного (барионного) заряда, т.е. заряда элементарных частиц, участвующих в сильном ядерном взаимодействии. Как Яков Борисович пришел к этой идее, которая ныне составляет фундамент теории элементарных частиц? По аналогии с законами, которые уже существовали к тому времени. На сохранение барионного заряда «намекал» давно известный закон сохранения электрического заряда, т.е. заряда частиц, участвующих в электромагнитном взаимодействии. Иначе говоря, сохранение барионного заряда подсказывалось аналогией с одним из принципов электродинамики.

Кроме того, мысль о сохранении барионного заряда стимулировалась работами немецкого физика Эрнста Штюкельберга (1905-1984), который в 1938 г. говорил о сохранении ядерного («тяжелого») заряда для нуклонов – протонов и нейтронов. Эта проблематика обсуждалась Э.Вигнером, американским физиком венгерского происхождения, лауреатом Нобелевской премии по физике 1963 г. Нужно было перенести мысль Штюкельберга о «тяжелом» заряде с нуклонов на другие частицы, в том числе на странные частицы, называемые гиперонами. Именно это впервые и сделал Я.Б.Зельдович (1952). Можно сказать, что ЯБ, ознакомившись с результатами Штюкельберга для нуклонов, обобщил (экстраполировал) их на странные частицы – гипероны, получив общую формулировку закономерности, которую «предчувствовали» другие физики (Шифф, Онеда).

С.С.Герштейн в статье «Работы Я.Б.Зельдовича и современная физика частиц» [16] пишет: «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, соответствующего закону сохранения тяжелых частиц (нуклонов и гиперонов). Тем самым он распространил на гипероны понятие тяжелого заряда, предложенное в 1938 г. Е.Штукельбергом для нуклонов и обсуждавшееся в 1949, 1952 гг. Е.Вигнером...» [16, с.912].

В.С.Готт в книге [17] детализирует историю идеи о сохранении барионного заряда: «...Стабильность ядерной материи может быть сформулирована как закон сохранения числа нуклонов. С учетом гиперонов и античастиц его можно сформулировать так: разность числа тяжелых частиц и числа соответствующих античастиц является константой движения. Впервые в применении к нуклонам и λ^0 -частице это положение было высказано Шиффом. Онеда независимо развил аналогичные соображения в общетеоретической форме. Наконец, Зельдович предложил ввести понятие ядерного заряда аналогично электрическому заряду. Протону и нейтрону приписывается ядерный заряд +1, антинуклонам -1, частицам с массой, меньшей массы нуклона, -0. Согласно известным схемам распада, получено, что гипероны и антигипероны имеют ядерные заряды соответственно +1 и -1. Так как общим названием двух групп «элементарных» частиц – нуклонов и гиперонов – является барион, то и закон сохранения называется законом сохранения барионного заряда. Таким образом, сохранение числа частиц принимает совершенно простую наглядную форму: при всех взаимодействиях должен сохраняться полный барионный заряд замкнутой системы» [17, с.273].

6. Аналогия пятая: идея о сохранении лептонного заряда

В 1953 г. Я.Б.Зельдович сформулировал гипотезу о сохранении лептонного («нейтринного») заряда, т.е. заряда частиц, участвующих в слабом ядерном взаимодействии. Здесь ситуацию можно выразить словами: «открытие одного физического закона мотивировало (инициировало) открытие другого». Иначе говоря, вводя в физику элементарных частиц принцип сохранения барионного числа (барионного заряда), Я.Б.Зельдович по аналогии пришел к открытию принципа сохранения лептонного числа (лептонного заряда). Независимо от него этот принцип описали в своих работах Г.Маркс, Э.Конопинский, Е.Махмуд – «идея висела в воздухе».

Ю.Б.Харитон в предисловии к книге Я.Б.Зельдовича «Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика» [18] отмечает: «В середине 1950-х годов было открыто несохранение четности и создана универсальная теория – (V-A)-теория слабого взаимодействия. Началось построение составных моделей адронов. Была создана первая неабелева калибровочная теория. В эти годы ЯБ внес важный вклад в целый ряд из перечисленных выше направлений. В 1952 г. он формулирует закон сохранения ядерного (барионного) заряда, распространяя его на незадолго до того открытые в космических лучах нестабильные частицы, в дальнейшем получившие название странных частиц. В 1953 г. ЯБ вводит закон сохранения лептонного (нейтринного) заряда как один из основных строгих законов природы. Оба эти закона важны для классификации элементарных частиц в процессах, идущих с их участием» [18, с.30].

Примечательно, что Г.Маркс (1953) независимо от Я.Б.Зельдовича пришел к выводу о том, что слабому взаимодействию соответствует лептонный заряд, по аналогии с результатами Э.Вигнера, который показал, что сильному ядерному взаимодействию соответствует барионный заряд. Э.Дубовой [19] пишет: «В 1952 году Г.Маркс из Института физики при

университете имени Роланда Этвеша в Будапеште обратил внимание на то, что постоянная слабого взаимодействия одна и та же для процессов распада трех частиц – нейтрона, пиона и мю-мезона, идущих с образованием нейтрино, и для реакции захвата мюона ядром с превращением нейтрона в протон (или наоборот) также с образованием нейтрино. Это могло свидетельствовать только о том, что управляющее распадами слабое взаимодействие универсально. Как раньше Вигнер, исходя из универсальности ядерного взаимодействия, предположил, что у тяжелых частиц есть свой вид заряда – барионный, так и теперь Маркс высказал мысль, что универсальность слабого взаимодействия требует (или, наоборот, является следствием) существования у слабовзаимодействующих частиц нового типа квантового числа – лептонного заряда» [19, с.37].

Информацию о том, что Г.Маркс, Э.Конопинский и Х.Махмуд разделяют с Я.Б.Зельдовичем приоритет формулировки принципа сохранения барионного числа, можно найти в [20]. Вкратце научные достижения Э.Штюкельберга, который, помимо всего прочего, является одним из авторов знаменитого метода ренормализационной группы, рассматриваются в работе [21].

7. Аналогия шестая: закон сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях

В 1955 г. Я.Б.Зельдович (совместно с С.С.Герштейном) вписал еще одну блестящую страницу в физику элементарных частиц. Он сформулировал идею о сохранении векторного тока в слабых взаимодействиях. Впоследствии эта идея была названа «законом сохранения векторного тока» и признана фундаментальным законом природы. Как подчеркивает С.С.Герштейн [16], открытие закона сохранения векторного тока послужило указанием на то, что слабые взаимодействия должны описываться на основе калибровочной теории Янга-Миллса. А после того, как была обнаружена эквивалентность (сходство)

между теорией слабых взаимодействий и электродинамикой, применение калибровочного принципа привело к созданию калибровочной теории электрослабых сил, т.е. концепции, объединяющей слабые ядерные и электромагнитные силы. Как известно, эта концепция была разработана в 1960-е гг. усилиями А.Салама, С.Вайнберга и Ш.Глэшоу, которые в 1979 г. были награждены Нобелевской премией. Таким образом, открыв закон сохранения векторного тока, Я.Б.Зельдович проложил дорогу исследованиям, завершившимся созданием электрослабой теории.

Как же Я.Б.Зельдович и С.С.Герштейн пришли к идее о сохранении векторного тока в слабых взаимодействиях? Опять же по аналогии с электродинамикой! Зельдович и Герштейн первоначально сформулировали принцип сохранения векторного тока как утверждение о том, что константа векторного взаимодействия нуклонов не модифицируется сильными взаимодействиями. К этому утверждению они пришли по аналогии с тем фактом, что электрический заряд сильновзаимодействующих частиц не модифицируется виртуальными частицами. Можно сказать иначе: когда Зельдович и Герштейн обнаружили, что взаимодействие с пионом (пи-мезоном) не меняет векторной константы β -распада нуклонов, они поняли, что здесь наблюдается аналогия с электрическим зарядом протона, который не изменяется, несмотря на взаимодействие с пионами. Отечественные ученые не могли пройти мимо этой аналогии, которая указывала на то, что эмпирически обнаруженный факт не является случайным, а имеет характер закономерности.

История исследовательского успеха Я.Б.Зельдовича и С.С.Герштейна (1955) рассматривается во многих работах. Так, Ю.Б.Харитон в предисловии к книге [18] пишет о том, как Зельдович совместно с Герштейном исследовал распад заряженного пи-мезона (пиона): «Продолжая теоретическое исследование этого распада в работе 1955 г., ЯБ совместно с С.С.Герштейном заключает, что константа векторного взаимодействия нуклонов не

модифицируется сильными взаимодействиями, подобно тому, как не модифицируется виртуальными частицами электрический заряд сильновзаимодействующих частиц. Замечание ЯБ и С.С.Герштейна, сделанное в то время, когда общепринято было считать, что в β -распаде осуществляется не векторное, а скалярное взаимодействие, сыграло важную роль при создании универсальной теории слабого взаимодействия. В 1957 г., формулируя в рамках этой теории идею сохраняющегося векторного тока, М.Гелл-Манн и Р.Фейнман (США) возрождают гипотезу С.С.Герштейна и ЯБ. В докладе Роксбергской конференции в 1960 г. Р.Фейнман сказал: «Идея о том, что если в β -распаде имеется векторный ток, то этот ток может быть сделан сохраняющимся, была впервые выдвинута С.С.Герштейном и Я.Б.Зельдовичем. М.Гелл-Манн и я не знали об этом, когда разрабатывали ее» [18, с.30].

С.С.Герштейн в статье «От бета-сил к универсальному взаимодействию» [22] описывает события 1950-х годов: «В то время считалось твердо установленным, что гамов-теллеровским взаимодействием является тензорное, а фермиевским – скалярное. Поскольку я тогда только учился технике расчетов, я решил провести их в качестве упражнения для всех вариантов взаимодействия. После того как мы с Яковом Борисовичем сверили свои расчеты и учли в векторном варианте β -распад пиона, мы обнаружили, что взаимодействие с пионом не меняет векторной константы β -распада нуклонов. Мы поняли, что в этом случае мы имеем аналогию с электрическим зарядом протона, не изменяющимся, несмотря на взаимодействие с пионами. Мы не могли пройти мимо этой аналогии...» [22, с.12].

Отмечая научную ценность результата, полученного Зельдовичем и Герштейном (1955), авторы работы [23] пишут: «Фундаментальный закон Природы – Сохранение Векторного тока и аналогия между слабым и электромагнитными взаимодействиями сыграли исключительно важную роль в создании современной картины микромира» [23, с.807].

Справедливости ради укажем, что выдающиеся физики Р.Фейнман и М.Гелл-Манн пришли к идее о сохранении векторного тока в слабых взаимодействиях, также руководствуясь аналогией. Л.И.Липидус и Л.Б.Окунь в статье «Физика высоких энергий» [24] констатируют: «Известно, например, что из-за наличия так называемого виртуального облака π -мезонов, окружающего протон или нейтрон, изменяются магнитные свойства этих частиц, возникает аномальный магнитный момент. Однако не менее хорошо известно, что полный заряд протона или нейтрона при этом не меняется: у протона он равен заряду позитрона, который не обладает сильным взаимодействием, у нейтрона – нулю. Возникает вопрос: не обладает ли таким же свойством слабое взаимодействие, т.е. нет ли аналогии между β -распадным и электромагнитным взаимодействиями? Указание Фейнмана и Гелл-Манна на возможность существования такой аналогии было вызвано удивительной точностью, с которой совпадают константы распада μ -мезона и векторного варианта β -распада. Это совпадение указывает на то, что константа векторного взаимодействия, подобно электрическому заряду, не меняется под действием сильного взаимодействия. На такую возможность еще в 1955 г. обратили внимание Герштейн и Зельдович. Аналогия между векторным β -распадным и электромагнитным взаимодействиями была использована Гелл-Манном для расчета поправок к разрешенным β -спектрам, возникающим за счет «слабого магнетизма» [24, с.652].

8. Аналогия седьмая: гипотеза о выделении огромной энергии при захвате вещества черной дырой

Черные дыры (звезды, не позволяющие свету покинуть свою поверхность) были теоретически предсказаны французским математиком Пьером Лапласом. В своем знаменитом труде «Система мира» (1796) он заявил, что если масса звезды превысит массу, при которой свет способен

преодолеть силу тяготения звезды и покинуть ее, то световые корпускулы навсегда останутся «запертыми» в гравитационной ловушке небесного тела. Джон Арчибальд Уилер (1911-2008) предложил назвать такие звезды «черными дырами», космическими объектами, поглощающими всё, что попадает в поле их тяготения. Еще в середине XX века многие ученые не верили в существование подобных объектов, однако исследование природы квазаров (распологающихся в центрах галактик) нанесло удар по этому скептицизму.

Изучая свойства черных дыр, Я.Б.Зельдович (1964) выдвинул гипотезу о том, что в процессе захвата вещества черной дырой должна выделяться чудовищная энергия. Независимо от него и практически одновременно к этой мысли пришел американский астрофизик Эдвин Солпитер (Edwin Salpeter). Каким образом у Якова Борисовича возникла эта гипотеза? По аналогии с эффектом возникновения ударных волн, которые возбуждаются, когда тело движется в воздухе со скоростью, превышающей скорость звука. Физики называли это явление «эффектом Маха», так как немецкий физик Эрнст Мах (1888) впервые сфотографировал ударные волны.

Эта аналогия Я.Б.Зельдовича и Э.Солпитера описывается в книге Калеба Шарфа «Двигатели гравитации» [25] «В 1964 г. оба – и Зельдович, и Солпитер – пришли к выводу, что существуют специфические процессы захвата вещества черной дырой с выделением чудовищной энергии. Идея возникла **по аналогии** с известным поведением газовых струй с большими скоростями. При падении (аккреции) вещества на черную дыру его частицы сталкиваются и накапливаются – возникают ударные волны. Они подобны волнам, которые возбуждаются вокруг сверхзвукового самолета и приводят к звуковому удару (хлопку). Температура в аккреционном газе может достигать миллионов градусов, в результате чего окрестность черной дыры будет «светиться» рентгеновскими фотонами» [25, с.96].

Разумеется, Я.Б.Зельдович смог перенести результаты теории ударных волн в физику черных дыр, поскольку он хорошо владел знаниями, относящимися к области гидродинамики и газовой динамики. С.С.Герштейн в статье «Человек универсальных результатов» [5] приводит слова Л.Д.Ландау о «гидродинамической» эрудиции Якова Борисовича: «Характерно для работ Зельдовича широкое использование им, наряду с методами «обычной» теоретической физики, также и гидродинамики. Такое параллельное владение обеими областями – крайне редкое среди физиков-теоретиков – является характерной и очень ценной особенностью Зельдовича, делающей для него доступными вопросы, недоступные ни для гидродинамиков, ни для физиков-теоретиков «обычного» типа» [5, с.66].

9. Аналогия восьмая: разработка математической модели взрыва массивных звезд

В 1960-е гг. встал вопрос о разработке математической модели взрыва массивных звезд, т.е. модели эволюции звезд, обладающих большой массой. Когда в недрах звезды сгорает водород – основной источник термоядерных реакций, она расширяется и превращается в красный гигант. В дальнейшем красный гигант проходит стадию взрыва, при которой звезда сбрасывает с себя оболочку, освобождаясь от излишков вещества. После такого взрыва - в зависимости от массы – гигант превращается в нейтронную звезду или черную дыру. Гравитационный коллапс звезды, иначе называемый «схлопыванием», был описан еще в 1939 г. Робертом Оппенгеймером («отцом» американской атомной бомбы) и его сотрудником Хартландом Снайдером. Но в их модели содержались произвольные допущения, и ряд физиков (например, Джон Уилер) не относились к ней слишком серьезно. В 1960-е гг. исследователи вновь направили свои усилия на моделирование эволюции массивных звезд. В 1966 г. в США такую модель разработали Стирлинг Колгейт (Stirling Colgate)

и Ричард Уайт (Richard White), а в СССР – Я.Б.Зельдович, который привлек к решению задачи В.С.Имшенника, Д.К.Надежина и М.С.Подурца.

Яков Борисович понимал: чтобы описать ключевые механизмы взрыва звезды, нужно создать математическую модель, в которой учитывались бы такие параметры, как термическое давление, ядерные реакции, ударные волны, нагрев и выброс массы. В свою очередь, чтобы рассчитать эти параметры, сначала нужно разработать метод их расчета. В конце концов, Я.Б.Зельдовичу и его сотрудникам удалось разработать данный метод расчета. Каково же происхождение этого метода, откуда он его взял? Здесь снова помогла аналогия! Он взял его из своих прежних исследований, связанных с моделированием взрыва водородной (термоядерной) бомбы. Таким образом, Я.Б.Зельдович и его коллеги разработали математическую модель взрыва массивных звезд, руководствуясь аналогией «взрыв звезды – взрыв термоядерной бомбы». Кстати, С.Колгейт и Р.Уайт (1966) опирались на ту же самую аналогию.

Кип Торн в книге «Черные дыры и складки времени» [26] пишет: «Обратившись к астрофизике, Зельдович сохранил свой стиль. Схлопывание звезд было одной из астрофизических проблем, захвативших его воображение. Так же, как и Уилеру, Колгейту, Мэю и Уайту в Америке, ему было очевидно, что методы, разработанные при конструировании водородной бомбы, идеально подходили для математического моделирования схлопывающихся звезд. Чтобы детально разобраться в загадке схлопывания, Зельдович взял в оборот нескольких молодых коллег: Дмитрия Надежина, Владимира Имшенника из Института прикладной математики и Михаила Подурца с «Объекта». В ходе интенсивных дискуссий он передал им свое видение того, как схлопывание звезд может моделироваться на компьютере, при учете всех ключевых эффектов, которые были столь же важны и для водородных бомб: давления, ядерных реакций, ударных волн, теплоты, излучения, выброса массы. Вдохновленные этими дискуссиями, Имшенник и Надежин

смоделировали схлопывание звезд малой массы, а также – независимо от Колгейта и Уайта в Америке – представления Цвикки о сверхновых. <...> Результаты Подурца, опубликованные почти одновременно с результатами Мэя и Уайта, были почти идентичны американским. Сомнений не оставалось: схлопывание порождает черные дыры, и именно таким образом, как предсказали Оппенгеймер и Снайдер» [26, с.238].

Дополнительные сведения о результатах В.С.Имшенника и Д.К.Надежина можно найти в [27]. В частности, в [27] обсуждается тот факт, что отечественные ученые использовали гидродинамический подход к описанию взрыва массивной звезды. Перед нами еще одна аналогия – перенос методов гидродинамики в теорию эволюции звезд.

10. Аналогия девятая: предсказание эффекта рассеяния космического реликтового излучения на свободных электронах ранней Вселенной

Развивая гипотезу М.Планка о существовании квантов (отдельных порций) энергии излучения абсолютно черного тела, А.Эйнштейн (1905) применил ее к фотоэффекту и постулировал, что этот физический эффект объясняется существованием квантов света. Однако многие ученые, привыкшие к волновой теории света, не признавали новую концепцию А.Эйнштейна. Ее не признавал и знаменитый Нильс Бор, который говорил: «Даже если бы Эйнштейн послал мне радиogramму с сообщением, что отныне он владеет окончательным доказательством реальности световых частиц, даже тогда эта радиogramма сумела бы добраться до меня только с помощью электромагнитных волн, из каковых состоит излучение!» [28, с.41]. Ситуация значительным образом изменилась лишь после того, как в 1922 г. американский физик Артур Комптон открыл эффект рассеяния квантов рентгеновского излучения на свободных электронах, когда фотон передает часть своей энергии электрону. Был открыт и обратный эффект Комптона – в

этом случае, напротив, электрон передает часть своей энергии фотону. Таким образом, А.Комптон открыл эффект, доказавший квантовую теорию света, предложенную А.Эйнштейном. Однако А.Комптон не догадывался, что его эффект может иметь «космическое» приложение, а именно «работать» на самых ранних стадиях эволюции Вселенной.

В 1965 г. А.Пензиас и Р.Уилсон сообщили об открытии космического микроволнового реликтового излучения, обладающего высокой степенью изотропности и равномерно заполняющего Вселенную. Реликтовое излучение явилось одним из главных подтверждений теории Большого взрыва, предложенной Г.Гамовым (1948).

Включившись в теоретическое исследование реликтового излучения, Я.Б.Зельдович совместно Р.А.Сюняевым (1969) предсказал новый физический эффект – рассеяние реликтовых волн на свободных электронах ранней Вселенной. Как Яков Борисович пришел к этой идее? Читатель, наверняка, уже догадался: по аналогии с эффектом Комптона. Да, Зельдович и Сюняев перенесли (экстраполировали) прямой и обратный эффект Комптона на космические масштабы, на ранние этапы развития Вселенной. Этот перенос позволил объяснить, как после Большого взрыва кванты света и свободные электроны, заполнявшие космическое пространство, взаимодействовали друг с другом, как в процессе этого взаимодействия изменялся спектр реликтового излучения, температура которого ныне составляет около 3 Кельвинов. В 1984 г. теоретическое предсказание Зельдовича и Сюняева подтверждено экспериментально [29]. После этого оно получило название «эффект Зельдовича - Сюняева».

Конечно, эффект Комптона «работал» не только в молодой Вселенной, когда не было галактик и их скоплений, он повсеместно действовал и позже, уже в «галактическую» эпоху. Об этом, в частности, сообщается в автореферате докторской диссертации Р.А.Сюняева [30].

Интересен вопрос: применял ли Я.Б.Зельдович эффект Комптона до того, как осознал возможность описать с помощью этого эффекта реликтовое излучение Пензиаса-Уилсона? Оказывается, применял, причем, в тот период своей научной деятельности, когда он был участником советского атомного проекта. Тогда этот эффект ему понадобился для расчета баланса энергии, без чего невозможно определить осуществимость самоподдерживающейся ядерной реакции (взрыва водородной бомбы, которую ученый первоначально называл «трубой»). Чрезмерное рассеяние квантов света на электронах блокирует течение ядерной реакции.

Б.Л.Иоффе в статье «Кое-что из истории атомного проекта в СССР» [31] пишет об этих работах Я.Б.Зельдовича: «Для расчета баланса энергии чрезвычайно важно знать, во сколько раз энергия, уносимая γ -квантами из системы, превосходит энергию первоначального излучения. (Эта величина получила название коэффициента комптонизации). Группа Зельдовича провела расчеты «трубы», включая гидродинамику плазмы, и расчет коэффициента комптонизации, и получила результат, что баланс энергии нулевой, т.е. что энергия, рождающаяся за счет ядерных реакций, равна энергии, вылетающей из системы» [31, с.71].

Таким образом, используя эффект Комптона для описания взаимодействия фотонов и электронов в ранней Вселенной, Я.Б.Зельдович был подготовлен к этому своими предыдущими работами, касающимися военной тематики. И.М.Халатников подчеркивает, что эффект Зельдовича-Сюняева (поскольку он получил экспериментальное подтверждение) вполне заслуживал Нобелевской премии. В статье «Человек осведомленный» [32] он пишет: «Часто возникает вопрос: получил бы Зельдович Нобелевскую премию, если бы дожил, и за какую именно работу? У него, безусловно, было много выдающихся трудов. Среди них есть одна, очень важная, ее результат назван эффектом Зельдовича-Сюняева. Это некое явление, связанное с черным излучением, - тонкий, малый эффект, показывающий, как влияет окружающее

пространство на черное излучение. За эту работу Яков Борисович посмертно получил премию Фридмана. <...> Не исключено, что если бы Яков Борисович прожил дольше, он бы получил за это и Нобелевскую премию» [32, с.73].

11. Аналогия десятая: вывод уравнения, описывающего эволюцию спектра фотонного газа при его комптоновском рассеянии

Взрыв водородной бомбы – это неуправляемая (неконтролируемая) реакция синтеза атомов гелия из атомов водорода (дейтерия), сопровождающаяся выделением огромной энергии. Но в недрах звезд та же реакция идет без каких-либо взрывов, главным образом, благодаря тому, что там постоянно поддерживается чрезвычайно высокая температура, а электрон-ионная плазма сжимается и удерживается сильным гравитационным полем. В 1950 г. соратник Я.Б.Зельдовича А.Д.Сахаров, задумавшись над проблемой управляемого термоядерного синтеза (УТС), решил, что процессы, происходящие в звездных недрах, можно попытаться реализовать в земных условиях. Он предложил удерживать высокотемпературную плазму с помощью магнитного поля, а позже появилось множество идей относительно того, как нагреть плазму до температур, при которых начинают идти термоядерные реакции. В 1956 г. И.В.Курчатов, посетив Британский ядерный центр «Харуэлл», высказал предложение о сотрудничестве ученых-атомщиков разных стран в решении проблемы УТС. Наиболее известное достижение отечественных ученых в рамках проекта УТС – изобретение «токамака», установки для магнитного удержания плазмы, в которой разогрев плазмы осуществляется электрическим током. Важный вклад в создание этой установки внесли такие ученые, как Л.А.Арцимович, И.Н.Головин, Н.А.Явлинский, Б.Б.Кадоццев и многие другие.

Но плазма оказалась состоянием вещества, в котором постоянно возникают неустойчивости, нарушающие условия стационарности

(устойчивости), необходимые для ядерного синтеза. Специалистам известно, по крайней мере, 60 разновидностей нестабильности плазмы, с которыми приходится бороться, чтобы минимизировать вариации (колебания) параметров плазмы. Это заставило физиков и математиков бросить силы на исследование свойств плазмы, обуславливающих ее «непредсказуемое» поведение.

Одним из тех, кто изучал электрон-ионную плазму, был Александр Соломонович Компанец (1914-1974), советский физик-теоретик, доктор физико-математических наук, ученик Л.Д.Ландау. Он, в частности, прославился тем, что первым сдал знаменитый теоретический минимум Ландау (сложные экзамены, сдача которых позволяла ученому работать вместе с Ландау). В 1956 г. А.С.Компанец опубликовал работу «Об установлении теплового равновесия между квантами и электронами» [33]. В ней содержится результат, полученный А.С.Компанейцем впервые в мире еще в 1949 г., - уравнение, описывающее эволюцию спектра фотонного газа при его комптоновском рассеянии (рассеянии на электронах) в разреженной нерелятивистской электронной плазме. Часто этот результат называют уравнением теплового равновесия между квантами излучения и электронами вещества или просто «уравнение Компанейца».

В 1969 г. А.Д.Зельдович (совместно с Р.А.Сюняевым), теоретически исследуя физические процессы, происходившие в ранней Вселенной, поставил перед собой задачу описать эволюцию спектра фотонов при их комптоновском рассеянии на «горячих» электронах, образовавшихся после Большого взрыва. Нужно было найти уравнение, адекватно отражающее эволюцию этого спектра (спектра реликтовых волн). И вскоре он его нашел! Яков Борисович перенес в теорию ранней Вселенной уравнение Компанейца, относящееся к теории плазмы – той плазмы, которую физики изучали в рамках проекта УТС. Фантастическая аналогия! Таким образом, Я.Б.Зельдович и Р.А.Сюняев (1969, 1971) догадались, что уравнение Компанейца может быть средством описания

физических процессов, происходивших во Вселенной после ее «рождения» в результате Большого взрыва.

С.А.Каплан и В.Н.Цытович в книге «Плазменная астрофизика» [34] полагают, что С.А.Компанеец открыл свое уравнение взаимодействия квантов света и электронов в 1965 г. Это, конечно, неверно. Он получил его, как мы уже отметили, еще в 1949-м, а опубликовал в 1956-м (но авторы «Плазменной астрофизики» не знали этого, так как результат долго был засекречен). Однако авторы [34] правы в том, что уравнение Компанейца было перенесено в науку о звездах и Вселенной: «В последнее время нелинейные уравнения переноса излучения стали объектом многочисленных исследований. Существует много причин нелинейности уравнений, и общей теории нелинейного переноса пока нет. Например, нелинейность может быть связана с зависимостью населенности уровней от поля самого излучения, с изменением в этом поле диэлектрической проницаемости и т.д. Есть, однако, еще одна существенная причина появления нелинейности в уравнении переноса – это учет индуцированных процессов. В частности, для случая индуцированного комптоновского рассеяния на тепловых электронах плазмы подобное уравнение было получено Вейманом (1965) и Компанейцем (1965). Заметим, что это уравнение было использовано для ряда астрофизических исследований [Зельдович, Сюняев (1969); Сюняев (1971)]» [34, с.140].

Аналогичные сведения можно найти в книге П.Д.Насельского, Д.И.Новикова и И.Д.Новикова «Реликтовое излучение Вселенной» [35].

Наконец, сам Я.Б.Зельдович в статье «Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением» [36] откровенно признается в том, что он экстраполировал результат Компанейца из физики плазмы в физику ранней Вселенной: «А.С.Компанейцу принадлежит заслуга четкой постановки вопроса об особенностях установления термодинамического равновесия в разреженной плазме [1]. Точная постановка задачи приводит к интегральному уравнению для спектра фотонов. Однако в силу того, что мала

передача энергии при отдельном акте рассеяния, изменение спектральной плотности на данной частоте зависит только от спектральной плотности на соседних частотах, и потому интегральное уравнение эффективно заменяется дифференциальным уравнением. Дифференциальное уравнение Компанейца послужило надежной основой и для решения других задач, возникших позже» [36, с.165]. «Вселенная – горячая Вселенная, заполненная фотонами, - подчеркивает автор, - является частным случаем астрофизической системы, к которой применимо уравнение Компанейца [4-7]» [36, с.165].

Здесь [1] – Компанеец А.С. // ЖЭТФ. – 1956. – Том 31. - № 5 (11). – С.876-885.

12. Аналогия одиннадцатая: идея о рождении частиц и античастиц в гравитационном поле черной дыры

В 1969 г. в ЖЭТФ была опубликована статья А.И.Никишова «Образование пар постоянным внешним полем» [37]. В ней он рассмотрел вопрос о рождении электрон-позитронных пар в сильном электромагнитном поле. Эта работа послужила стимулом для появления многих других работ, в которых ученые развивали идею А.И.Никишова. Во-первых, логично было предположить, что в сильном поле могут рождаться не только электрон-позитронные пары, но и пары «протон - антипротон», «мезон - антимезон» и т.д. Во-вторых, можно было перенести представления А.И.Никишова с электромагнитного поля на гравитационное, то есть признать возможность рождения пар частиц в сильном гравитационном поле. Наконец, можно было отказаться от требования «постоянства поля» и рассмотреть быстропеременное поле. Это сделал отечественный физик-теоретик, академик Моисей Александрович Марков (1908-1994) совместно со своим сотрудником В.П.Фроловым [38].

Независимо к таким же выводам пришел Я.Б.Зельдович (1970). Чтобы перенести на гравитационное поле механизм рождения частиц, описанный А.И.Никишовым для электромагнитного поля, достаточно было сформулировать вопрос: где, в каких космических условиях возникают мощные гравитационные поля? Разумеется, они возникают на ранних стадиях эволюции Вселенной, когда вещество сконцентрировано в малом объеме и еще не образовались галактики. Кроме того, они возникают в окрестности черных дыр, обладающих невероятно огромной массой. Черные дыры и вещество ранней Вселенной – вот объекты, оправдывавшие идею Я.Б.Зельдовича (1970), которую он в дальнейшем разрабатывал совместно с Л.П.Питаевским и А.А.Старобинским (1971).

Отметим, что еще в 1951 г. американский физик, лауреат Нобелевской премии 1965 г. Джулиус Швингер получил точный результат для вероятности рождения электрон-позитронных пар в постоянном электрическом поле, который позднее стали называть формулой Швингера, а само явление вакуумного рождения частиц в поле – механизмом Швингера. Однако Швингер не рассматривал возможность реализации данного механизма в мощных гравитационных полях. Это сделали, как мы уже отметили, М.А.Марков, В.П.Фролов и независимо от них Я.Б.Зельдович, Л.П.Питаевский и А.А.Старобинский.

В.П.Фролов в статье «Черные дыры и квантовые процессы в них» [39] описывает аналогию Зельдовича, Старобинского и Маркова: «На ранних этапах развития Вселенной, характеризующихся быстрым изменением гравитационного поля, рождение пар происходит в полной **аналогии** со случаем быстропеременного электромагнитного поля. Подобные процессы, представляющие значительный интерес для космологии, в настоящее время интенсивно исследуются. **Аналогия** с электромагнитным полем подсказывает нам, что в случае стационарного гравитационного поля можно надеяться на значительные эффекты рождения пар только в случае очень сильных полей.

Подобные поля описываются в общей теории относительности как искривление пространства-времени. Сильные поля могут существовать только вблизи тел, обладающих большой массой и плотностью» [39, с.478]. В примечаниях автор отмечает: «Рождение скалярных частиц в изотропных моделях Вселенной было рассмотрено в работах [9-11]. В работах [12-13] была выяснена важная роль анизотропии расширения пространства в процессах рождения частиц» [39, с.478].

Здесь [12] – Зельдович Я.Б. // Письма в ЖЭТФ. – 1970. – Том 12. – С.443; [13] – Зельдович Я.Б., Старобинский А.А. // ЖЭТФ. – 1971. – Том 61. – С.2161.

Исследование А.И.Никишова [37] – не единственный источник, подсказавший Я.Б.Зельдовичу мысль о рождении частиц в сильном гравитационном поле. Она подсказывалась также собственными исследованиями Якова Борисовича, касающимися свойств поля сверхкритических ядер, масса которых больше 137 единиц. Рождение позитронов в таком поле по аналогии наводило на гипотезу о рождении частиц в поле тяготения. С.С.Герштейн в статье [16] указывает: «Исследования в области частиц и КЭД стимулировали Якова Борисовича на важные открытия в космологии. Так, рассмотрев рождение позитронов в поле сверхкритических ядер ($Z > 137$), 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» [16, с.917]. Аналогичные сведения можно почерпнуть из публикации Я.Б.Зельдовича и его соавторов «Рождение пар в поле тяжелых ядер и в гравитационном поле» [40].

Идея рождения частиц в сильном гравитационном поле с необходимостью вела к осознанию того, что черные дыры на самом деле «не такие уж черные» – их окрестность способна порождать частицы (а, следовательно, и электромагнитные волны). Британский физик С.Хокинг первоначально не верил в такую возможность, аргументируя свой скептицизм

теми же доводами, которые использовались Р. Пенроузом (1965) при доказательстве возникновения сингулярности при гравитационном коллапсе массивных звезд. Однако Я.Б. Зельдович и Л.П. Питаевский показали, что поляризация вакуума обесценивает эти доводы.

В книге Я.Б. Зельдовича [41] содержится статья «О возможности рождения частиц классическим гравитационным полем», впервые опубликованная им и Л.П. Питаевским в 1971 г. В комментариях к данной статье сообщается: «...Незадолго до приведенной работы появилась статья С. Хокинга, цитируемая в комментируемой статье, **с доказательством невозможности рождения частиц.** Это доказательство использовало то же предположение, что и общепризнанное доказательство неизбежности сингулярности, а именно утверждение об энергодоминантности полей и частиц. В помещенной выше работе Л.П. Питаевского и ЯБ было доказано, что поляризация вакуума может нарушать условие энергодоминантности. Тем самым был снят трудный парадокс и открыт путь для дальнейшего исследования рождения частиц. Этим воспользовались ЯБ и А.А. Старобинский в следующих работах данного цикла, а также и сам Хокинг, создавший теорию рождения частиц гравитационным полем черных дыр» [41, с.154].

Таким образом, аналогия, проведенная Я.Б. Зельдовичем между процессом рождения частиц в электромагнитном и гравитационном полях, позволила ему сформулировать мысль о том, что черные дыры могут быть источником частиц и волн. А эта мысль, в свою очередь, стала причиной радикальной трансформации во взглядах знаменитого физика С. Хокинга. Под влиянием Я.Б. Зельдовича он «обратился из Савла в Павла»: первоначально отрицая способность черных дыр излучать электромагнитные волны, он отказался от этой точки зрения и принял теорию Якова Борисовича. В книге «Краткая история времени» [42] С. Хокинг признал это влияние отечественного ученого: «Будучи в Москве в сентябре 1973 г., я беседовал о

черных дырах с ведущими советскими учеными – Я.Б.Зельдовичем и А.А.Старобинским. Они убедили меня в том, что в силу квантово-механического принципа неопределенности вращающиеся черные дыры должны рожать и излучать частицы. Я согласился с физическими доводами...» [42, с.129-130].

13. Аналогия двенадцатая: вращающаяся черная дыра похожа на вращающийся проводящий цилиндр

В июне 1971 г. молодой американский физик Кип Торн приехал в Москву. Я.Б.Зельдович устроил его в гостинице, в комфортабельных апартаментах на улице Вавилова, рядом с Октябрьской площадью. Разумеется, тогда К.Торн еще не знал, что в 2017 г. ему будет вручена Нобелевская премия по физике за участие в открытии гравитационных волн, образовавшихся при столкновении двух черных дыр. Тогда ученые только начинали постигать загадки черных дыр, и никто еще не приступал к созданию обсерватории LIGO, которая в 2015 г. впервые в мире зафиксировала гравитационные волны (волны Эйнштейна). В 7.00 утра К.Торн был разбужен телефонным звонком Зельдовича: «Приходите ко мне домой, Кип! У меня новая идея о вращении черных дыр!» На самом деле Зельдович намеревался рассказывать своему молодому коллеге не о вращении космических объектов, обладающих невероятной массой, а о новом механизме излучения электромагнитных и других типов волн этими объектами.

ЯБ придумал этот механизм или, лучше сказать, догадался о существовании данного механизма опять же по аналогии с поведением вращающихся поглощающих тел. В гидродинамике был известен эффект усиления волны при отражении от поверхности раздела сред, движущейся со скоростью, большей фазовой скорости звука (сверхотражение). Сначала этот эффект, весьма похожий на эффект Вавилова-Черенкова, навел (натолкнул)

Зельдовича на идею о том, что электромагнитные волны усиливаются при отражении от вращающегося проводящего цилиндра. А затем он перенес указанный эффект в физику черных дыр. Именно об этой аналогии Зельдович рассказал К.Торну, когда он, разбуженный ранним утром, приехал к нему домой.

В статье «Зельдович предсказывает излучение черных дыр» [43] К.Торн описывает свою беседу с ЯБ июньским утром 1971 г.: «Зельдович посадил меня к длинному обеденному столу в центре комнаты, и начал рисовать эскиз на доске. Его глаза искрились. «Предположим, у нас имеется быстро вращающийся металлический цилиндр, размером в несколько сантиметров, - сказал он. – И предположим, что налетающие электромагнитные волны с длиной волны порядка сантиметра или около того падают на поверхность цилиндра. Переменное электрическое поле, переносимое волнами, будет индуцировать электрические токи на поверхности металла, и эти токи будут излучать свои собственные волны. Это называется стимулированным излучением, поскольку налетающие волны стимулируют излучение новых волн цилиндром».

«Если цилиндр вращается достаточно быстро, и налетающие волны соответствующим образом поляризованы, - утверждал Зельдович, - то стимулированные волны будут исходить от цилиндра с фазой, совпадающей с фазой налетающих волн, взаимно усиливая друг друга. Энергия исходящей волны будет больше энергии налетающей; падающие волны будут усиливаться за счет вращения цилиндра. Это очевидно», - заявил Зельдович (это было далеко не очевидно мне, но я должен был положиться на интуицию Зельдовича; конечно, я мог проверить это сам дома вечером)» [43, с.370].

Аналогия, которую открыл Я.Б.Зельдович, обсуждается во многих источниках. И.Д.Новиков и В.П.Фролов в книге «Физика черных дыр» [44] пишут: «На возможность эффекта усиления волн вращающимися черными дырами было впервые обращено внимание Зельдовичем (1971, 1972), который

исходил из аналогии таких черных дыр с вращающимися поглощающими телами. Для последних описанный Зельдовичем эффект усиления родствен в известной мере по своей природе эффекту Вавилова-Черенкова» [44, с.159].

Те же сведения читатель найдет в книге [41], а именно в комментариях к статье Я.Б.Зельдовича «Генерация волн вращающимся телом», которая была впервые опубликована в 1971 г.

14. Заключение

Итак, мы рассмотрели историю (механизм возникновения) наиболее известных научных идей Я.Б.Зельдовича и его коллег. Проведенный анализ показывает, что, выдвигая гипотезы, которые, конечно, требовали экспериментальной проверки, отечественный ученый часто использовал мыслительную операцию аналогии. Данная операция не содержит в себе процессуальных компонентов, которые были бы недоступны обычным людям. Это свидетельствует о том, что выдающиеся ученые не обладают какой-то врожденной пронизательностью, интуитивной (мистической) прозорливостью. Сталкиваясь с новыми экспериментальными данными, они осмысливают их с помощью тех же индуктивных стратегий (процедур), которым ребенок обучается еще на школьной скамье. Единственное преимущество, в котором нельзя отказать этим ученым, - чрезвычайно широкая эрудиция, знание фактов и принципов, относящихся к разным научным дисциплинам. Однако подобная энциклопедическая осведомленность – вещь приобретаемая. Она приобретается в процессе постоянной самостоятельной работы (самообразования). Я.Б.Зельдович даже на склоне лет анализировал новейшие научные открытия и пытался использовать их для решения тех или иных научных проблем. Понимая, что универсальные знания «не сваливаются с неба», их нужно постоянно приобретать, Яков Борисович формировал в своих учениках (студентах и

аспирантах) «наступательный стиль», готовность «штурмовать неизведанные области». Он говорил о недопустимости «перекрывать недостаток сведений дешевым скепсисом».

Б.В.Комберг в статье «Наставник молодежи» [45] приводит одно из писем Я.Б.Зельдовича, в котором он обращается к своим ученикам: «В школе, в вузе можно быть отличником, не имея характера, самостоятельности. Здесь, в ИПМ (институте прикладной математики, где ЯБ проработал 19 лет – Н.Н.Б.) или в аспирантуре, без самостоятельности, без продумывания тематики, на чужом горбу только с послушанием в рай не въедешь. Надо читать литературу, думать о прочитанном, выбирать важное. Планировать возможные опыты, не опускать руки, не исчерпав всего остроумия, всей фантазии. Иначе окажетесь на краю даже не пропасти, а илистого болота, которое засосет, если не начнете шевелиться во всю силу. И еще одно – ощутите себя группой, объедините силы и мозги» [45, с.76].

В 1869 г. британский ученый, двоюродный брат Ч.Дарвина, Фрэнсис Гальтон опубликовал книгу «Наследственный гений». В ней он попытался обосновать мысль о том, что гениальность – это совокупность интеллектуальных способностей, которые передаются по наследству, т.е. закодированы, как мы сказали бы теперь, в структуре молекулы ДНК [46]. В дальнейшем было потрачено много усилий на то, чтобы превратить гипотезу Гальтона в эмпирически доказанный факт. Творческая жизнь Я.Б.Зельдовича – наглядное опровержение этой гипотезы. Причина его успехов не в молекуле ДНК, а в непрерывном поиске, желании овладеть максимумом знаний, чтобы использовать их для исследования законов природы. На этом пути он постигал основы теории адсорбции, химической кинетики, горения и детонации. Изучал баллистику снарядов «Катюши», принципы гидродинамики и газодинамики, цепные химические и ядерные реакции. Занимался физикой элементарных частиц, квантовой электродинамикой, которую постигал по работам

Л.Д.Ландау, физикой черных дыр и теорией ранних стадий эволюции Вселенной.

Литература:

1. Улам С. Приключения математика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 272 с.
2. Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. Драма идей в познании природы. – М.: «Наука», 1988. – 240 с.
3. Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. О цепном распаде урана под действием медленных нейтронов // ЖЭТФ. – 1940. – Том 10. - № 1. – С.29-36.
4. Рухадзе А.А. События и люди. – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2016. – 308 с.
5. Герштейн С.С. Человек универсальных результатов // Природа. – 2014. - № 6. – С.65-67.
6. Ильяев Р.И. К 90-летию со дня рождения Я.Б.Зельдовича // Яков Борисович Зельдович (воспоминания, письма, документы). Под ред. С.С.Герштейна и Р.А.Сюняева. – М.: «Физматлит», 2008. - С.94-100.
7. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: «Наука», 1990. – 286 с.
8. Тихомиров В.М. Андрей Николаевич Колмогоров (1903-1987): жизнь, преисполненная счастья. – М.: «Наука», 2006. – 199 с.
9. Мухин Р.Р. Развитие концепции динамического хаоса в СССР. 1950-1980-е гг. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – М.: ИИЕТ РАН, 2010. – 29 с.
10. Арутюнов В.С., Козлов С.Н. Всего одна реакция // Химия и жизнь. – 1983. - № 12. – С.75-79.
11. Семенов Н.Н. Таким образом, я пришел к идее... // Химия и жизнь. – 1986. - № 4. – С.39-44.

12. Харитон Ю.Б. Счастливейшие годы моей жизни // сборник «Знакомый незнакомый Зельдович». Под ред. С.С.Герштейна и Р.А.Сюняева. – М.: «Наука», 1993. – С.99-107.
13. Калмансон А.Э. Электроны и жизнь // Чародей эксперимента. Сборник воспоминаний об академике Е.К.Завойском. - М.: «Наука», 1993. - С.127-135.
14. Вавилов Ю.Н. В долгом поиске. – М.: ФИАН, 2008. – 368 с.
15. Харитон Ю.Б., Адамский В.Г., Смирнов Ю.Н. О создании советской водородной (термоядерной) бомбы // Успехи физических наук. - 1996. – Том 166. - № 2. – С.201-205.
16. Герштейн С.С. Работы Я.Б.Зельдовича и современная физика частиц // Успехи физических наук. – 2004. – Том 174. - № 8. – С.911-918.
17. Готт В.С. Философские вопросы современной физики. – М.: «Высшая школа», 1972. – 416 с.
18. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. – М.: «Наука», 1984. – 374 с.
19. Дубовой Э.И. По следам невидимок. – М.: «Знание», 1985. – 191 с.
20. Понтекорво Б. Страницы развития нейтринной физики // Успехи физических наук. – 1983. – Том 141. - № 4. – С.675-709.
21. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А. и др. Памяти Эрнста Штюкельберга // Успехи физических наук. – 1986. – Том 150. - № 1. – С.171-172.
22. Герштейн С.С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа. – 2010. - № 1. – С.3-14.
23. Аллилуев С.П., Андреев А.Ф., Беляев С.Т. и др. Семен Соломонович Герштейн // Успехи физических наук. – 2009. - Том 179. - № 7. – С.807-808.
24. Лapidус Л.И., Окунь Л.Б. Физика высоких энергий // Атомная энергия. - 1959. – Том 6. - № 6. – С.648-656.
25. Шарф К. Двигатели гравитации. Как черные дыры управляют галактиками, звездами и жизнью в космосе. – М.: «Бином. Лаборатория знаний», 2014. – 262 с.

26. Торн К. Черные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна. – М.: «Физматлит», 2007. – 616 с.
27. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: «Наука», 1984. – 384 с.
28. Данин Д.С. Труды и дни Нильса Бора. – М.: «Знание», 1985. – 80 с.
29. Любарский Ю.Э. Эффект Сюняева – Зельдовича подтвержден экспериментально // Природа. – 1984. - № 11. – С.76-77.
30. Сюняев Р.А. Взаимодействие вещества и излучения в горячей Вселенной и компактных источниках рентгеновского и радиоизлучения // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – М.: МГУ, 1973. – 15 с.
31. Иоффе Б.Л. Кое-что из истории атомного проекта в СССР // Сибирский физический журнал. – 1995. - № 2. – С.67-87.
32. Халатников И.М. Человек осведомленный // Природа. – 2014. - № 6. – С.68-73.
33. Компанеец А.С. Об установлении теплового равновесия между квантами и электронами // ЖЭТФ. – 1956. – Том 31. - № 5 (11). – С.876-885.
34. Каплан С.А., Цытович В.Н. Плазменная астрофизика. – М.: «Наука», 1972. – 440 с.
35. Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д. Реликтовое излучение Вселенной. – М.: «Наука», 2003. – 390 с.
36. Зельдович Я.Б. Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением // Успехи физических наук. – 1975. - Том 115. - № 2. – С.161-197.
37. Никишов А.И. Образование пар постоянным внешним полем // ЖЭТФ. - 1969. - Том 57. - № 4. – С.1210-1216.
38. Марков М.А., Фролов В.П. Метрика закрытого мира Фридмана, возмущенная электрическим зарядом (к теории электромагнитных

«фридмонов») // Теоретическая и математическая физика. – 1970. – Том 3. – С.3-17.

39. Фролов В.П. Черные дыры и квантовые процессы в них // Успехи физических наук. – 1976. - Том 118. - № 3. - С.473-503.

40. Зельдович Я.Б., Питаевский Л.П., Попов В.С., Старобинский А.А. Рождение пар в поле тяжелых ядер и в гравитационном поле // Успехи физических наук. – 1971. – Том 105. – С.780-781.

41. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Том 2. Частицы, ядра, Вселенная. – М.: «Наука», 1985. – 464 с.

42. Хокинг С. Краткая история времени. – СПб.: «Амфора», 2007. – 231 с.

43. Торн К. Зельдович предсказывает излучение черных дыр // Яков Борисович Зельдович (воспоминания, письма, документы). Под ред. С.С.Герштейна и Р.А.Сюняева. – М.: «Физматлит», 2008. – С.369-377.

44. Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика черных дыр. – М.: «Наука», 1986. – 328 с.

45. Комберг Б.В. Наставник молодежи // Природа. – 2014. - № 6. – С.74-77.

46. Канаев И.И. Фрэнсис Гальтон. – Ленинград: «Наука», 1972. – 134 с.