

П.С.Исаев

Некоторые проблемы физики элементарных частиц в области высоких энергий

Физика элементарных частиц за вторую половину XX века сделала такой гигантский шаг вперед, продвинулась с такой громадной скоростью в область новых явлений и закономерностей, ввела так много новых понятий, во многом, тем не менее, не отрываясь от квантово-механических представлений, развитых в 20-х — 30-х годах нашего столетия, что настало время осмотреться, осмыслить пройденный за полвека путь и ответить на ряд фундаментальных вопросов: был ли пройденный путь единственным? Почему не был решен ряд важных проблем, поставленных перед учеными самой природой? Не оказалась ли физика элементарных частиц вследствие неосмотрительно быстрого (и потому не всегда должным образом обоснованного) движения вперед в идейном тупике?

В предисловии к немецкому изданию своей книги «Физика в жизни моего поколения» лауреат Нобелевской премии Макс Борн писал: «...В 1921 году я был убежден, и это убеждение разделялось большинством моих современников-физиков, что наука дает объективное знание о мире, который подчиняется детерминистическим законам. Мне тогда казалось, что научный метод предпочтительнее других, более субъективных способов формирования картины мира — философии, поэзии, религии. Я даже думал, что ясный и однозначный язык науки должен представлять собой шаг на пути к лучшему пониманию между людьми.

В 1951 году я уже ни во что не верил. Теперь грань между объектом и субъектом уже не казалась мне ясной; детерминистические законы уступили место статистическим; и хотя в своей области физи-

ки всех стран хорошо понимали друг друга, они ничего не сделали для лучшего взаимопонимания народов, а, наоборот, лишь помогли изобрести и применить самые ужасные орудия уничтожения.

Теперь я смотрю на мою прежнюю веру в превосходство науки перед другими формами человеческого мышления и действия как самообман, происходящий оттого, что молодости свойственно восхищение ясностью физического мышления, а не туманностью метафизических спекуляций¹.

Со дня написания этих строчек прошло более сорока лет, однако, я думаю, что точка зрения Борна на научное знание не потеряла своей актуальности и сегодня, а для меня, прежде всего, может быть потому, что я уже вышел из возраста «восхищения ясностью физического мышления» и перешел в категорию людей, задумывающихся над философской, поэтической, религиозной картиной мира.

Есть смысл взглянуть на проблемы современной физики элементарных частиц с более общих научно-методических, научно-философских, а не только чисто научных, позиций, не обращаясь за доказательствами к строгой математике.

Современное состояние физики элементарных частиц разными специалистами оценивается по-разному. Обычно его оценивают как имеющее большие успехи. И это верно. Однако с большой убедительностью его можно оценить как кризисное, ибо трудности финансовые, научно—методические и трудности стандартной модели ведут к затяжному застою периоду.

В конце 1993 года конгресс США принял решение прекратить финансирование строительства SSC, выделив сравнительно небольшую сумму на «терминацию» проекта. Более 2000 ученых, инженеров, строителей остались без дела. Это — трагедия научная и человеческая. Если бы СССР как великая держава не распался, сверхпроводящий суперколлайдер (SSC) на энергии протонов 2×20 ТэВ был бы построен в США к 1999 г. (хотя бы из соображений конкуренции) и приглашение директора SSC проф. Швितтерса ученым мира принять участие в научной конференции в Далласе в 1999 г., посвященное первым научным результатам, полученными на SSC, осталось бы в силе.

Продвижение «в глубь материи» в связи с созданием мощных ускорителей, огромных экспериментальных установок, с участием в каждом эксперименте большого числа людей (иногда более сотни исследователей) стало весьма дорогостоящим делом.

Такие науки, как физика элементарных частиц или космология, являются науками, прикладное значение которых в наше время кажется не очень заметным (хотя бесспорно, что фундаментальные

открытия Фарадея и Максвелла окупили расходы на фундаментальную науку на многие столетия вперед). «...Современное развитие науки происходит в обществе, главная концепция рационализма которого следует доктрине инструментализма: истина ценится меньше, чем полезность...»². Не этой ли доктриной объясняется тот факт, что ныне прикладные исследования в США получают все большую финансовую поддержку по сравнению с фундаментальными исследованиями?

Заметную роль в развитии кризиса фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц может играть изменение взглядов на принцип редукционизма, согласно которому все явления природы можно свести к нескольким элементарным, первичным законам и из них путем чистой дедукции вывести строение и развитие Вселенной и, может быть, развитие жизни на Земле. Редукционистский взгляд на науку придавал физике элементарных частиц статус «самой главной», «фундаментальной» науки среди всех других фундаментальных наук. В последней четверти XX в. начинает утверждаться иная точка зрения: каждый уровень науки, каждая наука (физика, химия, биология и т.д.) имеет свои собственные фундаментальные законы, не сводимые к нескольким элементарным, первичным.

Швебер пишет, что Эйнштейн выступил сторонником всеобщего единства, связанного с радикальной формой теории редукционизма. В 1918 году Эйнштейн сказал: «Наивысшей проверкой физики будет достижение тех универсальных элементарных законов, из которых космос может быть построен путем чистой дедукции». В частности, гипотеза Большого Взрыва есть реализация эйнштейновской теории редукционизма в самом рафинированном виде. По Швеберу, всеобщее единство и редукция являются двумя принципами, которые доминировали в фундаментальной теоретической физике в течение двадцатого столетия. Один характеризовал надежду дать единое описание всех физических явлений, другой стремился уменьшить число независимых концепций, необходимых для формулировки фундаментальных законов. Огромные успехи физических наук и молекулярной биологии подтверждали подобную точку зрения. Однако вскоре стало очевидным, что описание явлений, например, в физике конденсированных сред не нуждается в знании законов взаимодействия элементарных частиц на малых расстояниях (при очень высоких энергиях). Две ветви физики – физика элементарных частиц и физика конденсированных сред – становятся в некотором смысле «разделенными», например, в том смысле, что су-

существование t -кварка или какой-либо новой тяжелой частицы в физике элементарных частиц не оказывало влияния на описание явлений в другой ветви физики.

В 1972 году Филипп Андерсон, известный специалист в области физики конденсированных сред, бросил вызов радикальной теории редукционизма. Он заявил: «...гипотеза редукционизма не означает ничего более, как «конструкционизм»: возможность свести все явления природы к простым фундаментальным законам не означает возможности исходя из этих законов реконструировать Вселенную. В действительности, чем больше физика элементарных частиц говорит нам о природе фундаментальных законов, тем менее отношения они, кажется, имеют к реальным проблемам остальной науки, и еще менее к самому обществу. Гипотеза конструкционизма нарушается, когда приходит в столкновение с двойными трудностями шкалы и сложности...»³. Андерсон верит в существование дополнительных законов, которые не менее фундаментальны, чем в физике элементарных частиц. Исследования материи на каждом уровне ее сложности, по Андерсону, так же фундаментальны, как и в физике элементарных частиц.

Большую роль в возникновении кризиса физики элементарных частиц играет постулат о «принципиальной ненаблюдаемости кварков» в смысле принципиальной невозможности видеть кварки в свободном состоянии – тезис, неприемлемый с точки зрения научно-философской. Физики начинают изучать свойства кварков и глюонов не в результате непосредственного наблюдения взаимодействия свободных кварков и глюонов со свободными элементарными частицами и друг с другом, а опосредованно, через наши представления о возможной природе кварков и глюонов. Много ли нового и верно-го мы могли бы сказать сегодня о строении ядра атома, если бы Резерфорд постулировал в свое время, что ядро атома существует, но оно «принципиально не наблюдаемо» (в смысле невозможности видеть его в свободном состоянии)?

Вводя понятие материального, но принципиально не наблюдаемого объекта, физика начинает терять статус экспериментальной науки и превращается в объект теоретических спекуляций. Грань, отделяющая науку экспериментальную от спекулятивной, становится неясной. Утверждается вера в то, что физика «принципиально ненаблюдаемых» кварков и глюонов – это все еще физика реально существующих объектов. Струйность явлений воспринимается как фрагментация ненаблюдаемых, но реально существующих кварков и глюонов в адроны. «Post hoc ergo propter hoc». Мы имеем дело с

хорошо известной нам аналогией: Бог есть, но Бог принципиально не наблюдаем. Каждый воспринимает его по-своему. Можем ли мы составить научный портрет Бога?

Физики уже на сегодняшнем этапе не имеют морального права мириться с современной теорией, научно-философские установки которой противоречат статусу экспериментальной науки.

Кварки возникли из преувеличенного внимания к симметриям, господствующим в теории элементарных частиц на протяжении всей второй половины XX века. В лагранжиан взаимодействия стандартной модели кварки вошли как точное следствие неточной $SU(3)$ -симметрии, выполняющейся на эксперименте с точностью $\sim 10\%$ (кварки вошли как фундаментальное представление $SU(3)$ -симметрии).

Я вполне допускаю мысль, что именно недостаточно обоснованное (физически) введение кварков в физику элементарных частиц привело к необходимости провозгласить совершенно неприемлемый постулат о «принципиальной ненаблюдаемости кварков» — в смысле принципиальной невозможности наблюдать их в свободном состоянии.

Доказательств существования кварков много. Однако и веры в то, что кварки — всего лишь способ описания экспериментальных данных (и не более того!) тоже довольно много.

Помимо неприемлемости тезиса о «принципиальной ненаблюдаемости кварков и глюонов» (с точки зрения научно-философской), стандартная модель обладает рядом других недостатков. Она содержит 18 свободных параметров: две константы связи (e и $\alpha(q^2)$), двенадцать масс фермионов и бозонов (массы кварков — u, d, s, c, b, t , массы лептонов — e, μ, τ , массы бозонов W^{\pm}, Z^0, χ , (χ — хиггсовский бозон)), четыре угла смешивания в матрице Кобаяши—Маскава. Если у нейтрино есть масса (а по моему глубокому убеждению масса покоя нейтрино равна нулю — об этом ниже я буду говорить), то в лагранжиан взаимодействия стандартной модели следует добавить еще 7 параметров — три массы лептонных нейтрино ν_e, ν_μ, ν_τ и еще 4 угла смешивания. Таким образом, общее число свободных параметров увеличивается до 25, что, конечно, недопустимо для хорошей теории. До сих пор не открыт хиггсовский бозон. Хиггсовский бозон является обязательно существующей частицей в стандартной модели. Если он не будет найден, то стандартную модель придется считать неверной, от нее придется отказаться. Однако до тех пор, пока нет другой общепринятой теории, мы не можем говорить о какой-либо иной реальности, кроме той, которая содержится в лагранжиане стандартной модели.

«В каждой естественной науке заключено столько истины, сколько в ней математики» (И. Кант). Однако только сама природа решает, какая математика адекватна ее закономерностям, а какая — нет. Но даже если наши представления о структуре материи, о ее составляющих — кварках и глюонах — окажутся неверными и нам придется отказаться от них в будущем, то мы не можем жалеть о пройденном пути — за это время мы успели узнать удивительно много нового о природе микромира. Кстати, Пуанкаре писал, что в физике невозможно обойтись без гипотез (верных или неверных) «...и часто ложные гипотезы оказывали больше услуг, чем верные»⁴.

Усилия, потраченные на создание стандартной модели? настолько велики, сама стандартная модель настолько выстрадана и настолько глубоко пронизана всеми достижениями теоретической и экспериментальной физики элементарных частиц, что отречься от нее или как-то изменить ее простым путем невозможно. Такое кризисное состояние несоответствия теории реальному миру элементарных частиц может оказаться весьма затяжным.

Выход из создавшегося положения может быть найден на пути решения ряда проблем, могущих кардинальным образом изменить наши представления о микромире. С моей точки зрения? до сих пор не существует окончательного ответа на ряд вопросов.

Я думаю, что до сих пор не ясно, существует в природе одна Λ^0 -частица или их две? Экспериментальные данные, публикуемые Particle Data Group, допускают возможность существования двух, разных по массе Λ^0 -частиц. Я обсуждал эту возможность в работе⁵.

Неясно, по какому закону кинетическая энергия сталкивающихся частиц переходит в массу покоя (например, в реакции $\pi + \Lambda \rightarrow \pi + K$). Соотношение Эйнштейна $E = mc^2$ лишь постулирует эквивалентность массы и энергии, но не отвечает на поставленный вопрос. Дискретный спектр масс элементарных частиц явно указывает на существование условий, при которых энергия сталкивающихся частиц определенными квантами переходит в массу покоя. В работе⁶ я высказал положение о том, что энергия сталкивающихся частиц переходит в массу покоя в том случае, когда действие⁷ пропорционально целочисленному значению постоянной Планка.

До сих пор не было проведено целенаправленного поиска частиц со странностью $S \geq 4$. Может быть, теперь, когда создание SSC откладывается на неопределенный срок, экспериментаторы смогут в более спокойной творческой атмосфере, с большей статистикой определить, существуют ли две разных Λ^0 -частицы, и ответить на вопрос, существуют ли частицы со странностью $S \geq 4$.

Закономерности в природе существуют потому, что существует стабильность материи и повторяемость событий. Это негласно принятые нами постулаты. Однако сроки существования естественных экспериментальных наук слишком малы (всего несколько столетий), чтобы мы настаивали на неизменности форм фундаментальных составляющих материи. Русский ученый Н.И.Пирогов был ярким противником раз и навсегда данных неизменных атомов: «...Остановиться мыслью на вечно движущихся и вечно существовавших атомах я не могу теперь — вещество бесконечно делимое, движущееся и бесформенное само по себе, как-то случайно делается ограниченным и оформленным...»⁸.

Пирогов (1810—1881 гг.) считал, что «возможно допустить образование вещества из скопления силы»..., т.е. он угадал и словами выразил то, что было позднее сформулировано Эйнштейном в его знаменитом соотношении $E=mc^2$.

Я допускаю существование двух основных принципов развития форм материи во Вселенной.

1. Принцип рождения себе подобных видов материи. Этот принцип обеспечивает стабильность материи во Вселенной и повторяемость событий, обеспечивает существование закономерностей, а следовательно, постулируется познаваемость мира.

2. Принцип случайного отклонения от рождения себе подобных, что обеспечивает динамику развития Вселенной, поиск новых закономерностей развития Вселенной, сохраняет ту вечную тайну, которая составляет вечную сущность научно-исследовательского труда.

С точки зрения философской, здесь высказаны тезис, антитезис и синтез — знаменитая Гегелевская триада (развития Вселенной). Мы должны отказаться от принципа тождественности элементарных частиц одинакового сорта, если допускаем изменение масс во времени и пространстве.

Как понимается тождественность частиц в современной теоретической физике? Тождественные частицы невозможно различить ни по их внутренним свойствам, ни по их взаимодействию друг с другом, или с другими, отличающимися от них по внутренним свойствам, частицами. Например, все электроны имеют одинаковые значения масс, электрических зарядов, одинаковые спины, одинаковые внутренние четности, одинаковые размеры протяженности в пространстве. (Физики считают, что электроны имеют точечные размеры.) Их нельзя различить по их взаимодействиям с другими частицами (например, протонами, π -мезонами и др.).

В классической механике существует понятие траектории отдельной взятой частицы, что позволяет в принципе различать тождественные частицы в продолжении всего опыта. Даже при взаимодействии тождественных частиц друг с другом можно различать по траекториям частицы первую и вторую до и после взаимодействия. В квантовой механике невозможно различить две тождественные частицы, если волновые пакеты, описывающие эти частицы, перекрывались в процессе взаимодействия, т.е. в квантовой механике невозможно локализовать частицы, не нарушая при этом процесса взаимодействия. В результате возникают квантово-механические эффекты, не имеющие классических аналогий.

Под тождественными частицами понимаются такие частицы, при перестановке которых физическая система, в которую они входили, остается неизменной.

Труднее по сравнению с точечными электронами вообразить себе тождественность таких сложных частиц, как протоны, или мезоны. По современным представлениям протоны состоят из кварков и глюонов. Распределение кварков и глюонов, например, по импульсам в каждом протоне должно быть тождественным распределению кварков и глюонов по импульсам в любом другом протоне. Даже после взаимодействия какого-либо протона, допустим, с ядром какого-либо вещества, которое описывается с современной точки зрения как обмен глюонами или кварками, в рассеянном протоне не должно произойти какого-либо перераспределения по импульсам кварков и глюонов, отличного от невзаимодействовавшего какого-либо другого протона (с той же энергией, импульсом, массой). Вот такое «мгновенное» тождественное выравнивание внутренних распределений кварков и глюонов по импульсам у тождественных частиц кажется уже чрезмерным, непостижимым требованием современной квантовой хромодинамики даже для искушенных теоретиков. Например, в реакции рождения π -мезонов γ -квантами на протонах ($\gamma + p \rightarrow \pi + p$) во вновь возникшем π -мезоне с бесконечно большим набором кварк-антикварковых пар и глюонов, их распределения по импульсам должно сразу принять вполне определенный математически строгий, тождественный с другими π -мезонами, вид. Если кварк-глюонное строение вещества признать верным, признать, что кварки и глюоны существуют реально, то с точки зрения «здорового смысла» в него трудно поверить. Если же гипотеза кварк-глюонного строения вещества есть способ математического описания структуры элементарных частиц, позволяющий объяснить все наблюдаемые явления с единой точки зрения, то такое понимание структуры частиц не должно вызывать возражений.

Таким образом, проблема тождественности элементарных частиц в наше время оказывается тесно связанной с проблемой наблюдаемости кварков и глюонов.

Допуская постоянное изменение масс во времени во всей Вселенной, можно прийти к выводам о существовании новых форм относительно стабильной материи, новым типам делимости материи, что и будет составлять сущность вечно меняющейся Вселенной. Может ли современная физика элементарных частиц уловить эти изменения на Земле и во Вселенной в наше время – это подлежит научной проверке. Вводя в теорию новые принципы развития Вселенной, мы придем к совершенно новому лагранжиану взаимодействия элементарных частиц, поймем, что дальше некоторого временного предела и назад, и вперед мы, находясь на Земле, Вселенную изучить не можем, поскольку законы ее развития менялись на разных этапах в прошлом пока не известным нам путем и будут меняться в будущем тоже пока не известным образом и только проникновение человека в космос (лично или его приборов) на дальние расстояния позволит расширить наши знания о путях развития Вселенной и приспособить род человеческий к ее эволюции. Ныне существующий довольно прямолинейный и я бы даже сказал примитивный способ использования стандартной модели для сценария развития Вселенной в виде Большого взрыва уступит место не менее захватывающему и динамичному сценарию, когда одна форма стабильности материи в одной из областей Вселенной будет в грандиозных масштабах превращаться в другую форму стабильности и когда эволюционные периоды развития материи в отдельных областях Вселенной могут меняться фантастическими по своим размерам катаклизмами.

Отказ от принципа тождественности элементарных частиц приведет к обычному пониманию причинности, наступит эра пересмотра ряда статистических закономерностей. Разброс «тождественных» частиц по массам вместе с признанием принципа изменения масс во времени внесет в понимание развития Вселенной, да и самой жизни на Земле, тот необходимый принцип необратимости явлений во времени, который все мы признаем и испытываем на себе, но от которого сегодня отказываемся при описании явлений в физике микромира. Таким образом, **P**-нечетность, **T**-неинвариантность, ныне существующие в теории, получают естественное толкование.

В современной физике элементарных частиц предполагается, что масса элементарной частицы определяется ее взаимодействием с себе подобными или какими-либо другими частицами. Это предположение вместе с принципом тождественности элементарных частиц ло-

гически приводит к представлению об абсолютной неподвижности Вселенной. Действительно, во Вселенной существует огромное число пар электронов, тождественных по массе, спину, четности, заряду (или пар других тождественных частиц, например пар протонов и т.д.). Если скорости частиц пары будут разными, то можно найти такую систему координат, в которой они будут двигаться с одинаковыми скоростями относительно начала координат этой системы. Но тогда вся остальная часть Вселенной обязана двигаться симметрично относительно данной пары электронов, чтобы «обеспечить» тождественность их масс. Так как тождественных пар частиц во Вселенной бесконечно много, то будет бесконечно много точек, относительно которых движения всех частей Вселенной должны быть симметричными. Разумным образом удовлетворить такому представлению о движении всех частей Вселенной можно, пожалуй, только предполагая, наоборот, неподвижность всех тел во Вселенной. Очевидно, проще отказаться от принципа тождественности элементарных частиц, либо от постулата о зависимости масс частиц от взаимодействия с другими частицами, чем признать неподвижность тел во Вселенной.

Мы не знаем, изменяется ли масса частиц во Вселенной в зависимости от времени и пространства. Нам трудно предположить, как будут меняться законы физики, химии, биологии и других наук в связи с изменением масс во времени и пространстве. Следовательно, остается неизвестной и эволюция Вселенной. Можно, в частности, предположить, что красное смещение спектральных линий, наблюдаемое в астрофизике, связано не только с расширением Вселенной, но и изменением масс элементарных частиц во Вселенной в зависимости от времени и пространства.

Еще в 1932 году наблюдалась реакция $\gamma + \text{ядро} \rightarrow \text{ядро} + (e^+e^-)$, т.е. наблюдалось превращение γ -кванта в пару (e^+e^-), без затраты энергии на создание электрического заряда. Природа более шестидесяти лет назад указала на принципиальную возможность рождения элементарной единицы электричества в соударении элементарных частиц, но у нас до сих пор нет ясного представления о динамике возникновения заряда, о природе происхождения электричества.носителем заряда является масса, однако размер заряда не зависит от величины массы элементарной частицы – он всегда равен $\pm e$. Современные экспериментальные данные указывают на следующие закономерности⁹:

1) в свободном состоянии все нейтральные частицы с массой покоя, отличной от нуля, нестабильны;

2) в свободном состоянии стабильные частицы с массой покоя, не равной нулю (протон, электрон и их античастицы), имеют электрический заряд.

Из этих закономерностей следует, что

1) если заряд нейтрино равен нулю, а его масса отлична от нуля, то нейтрино – нестабильная частица;

2) если нейтрино имеет массу покоя, отличную от нуля, и нейтрино – стабильная частица, то у нейтрино должен быть отличный от нуля электрический заряд, каким бы малым он ни был. Заряженные нейтрино тоже могут быть нестабильными. Однако после цепочки возможных распадов должны оставаться стабильные заряженные нейтрино, ибо, как мы знаем, единственным носителем заряда является масса. Естественнее всего, конечно, предположить, что у нейтрино нет электрического заряда и его масса равна нулю.

Итак, современная теория физики элементарных частиц не имеет решения ряда крупных физических проблем: происхождение массы, электрического заряда, тождественности масс частиц, изменение массы элементарных частиц во времени и некоторых других. Естественнее, надо считаться с тем, что некоторые проблемы не могут быть решены на сегодняшнем этапе развития науки – для них не настало время. Можно привести исторический пример. В конце XIX – начале XX вв. теоретиками обсуждалась проблема структуры атома и электрона. Модель строения атома была дана Резерфордом. Структура электрона рассматривалась в начале XX в. в работах Абрагама, Лоренца, Пуанкаре. Однако до сих пор физики считают электрон точечной частицей, и у них нет необходимости отказаться от этого представления.

В цитированной мной в начале статьи книге Макс Борн пишет: «...Человек Запада, не в пример созерцательному жителю Востока, любит рискованную жизнь и физика является одним из его рискованных предприятий»¹⁰. Я не знаю к человеку какого типа (западного или восточного) относит Макс Борн российских физиков, но из его высказывания видно, что чтобы стать настоящими физиками, российские физики обязаны рисковать и в том числе в области создания новой теории физики элементарных частиц. Если в основу теории были бы положены некоторые из упомянутых мною идей и выше названных закономерностей (например, отказ от тождественности элементарных частиц, изменение масс частиц во времени и пространстве, переход энергии в массу и др.), то теория элементарных частиц могла бы пойти иным путем, обогатившись новыми, вполне реальными закономерностями.

Примечания

- ¹ *Борн М.* Физика в жизни моего поколения. М., 1963.
- ² *Schweber S.S.* Physics, community and the crisis in physical theory // physics today. 1993. November. P. 34-40.
- ³ *Anderson P.W.* Science. 1972. № 177. P. 393.
- ⁴ *Пуанкаре А.* Избранные труды. Т. 3. М., 1974. С. 659.
- ⁵ *Исаев П.С.* Существует ли закон Гейгера-Неттола для распадов гиперонов. Препринт ОИЯИ, 32-6447, 1972 // *Isaev P.S.* Does Geiger-Nuttol rull exit for Hiperon decays? Preprint JINR. 1972. E2-6544.
- ⁶ *Исаев П.С.* Замечание о спектре масс элементарных частиц // Препринт ОИЯИ, Д-824. Дубна, 1961.
- ⁷ «Действием» в физике элементарных частиц называется интервал по всем пространственным и временной координатам от лангражиана взаимодействия, зависящего от разных переменных, в том числе от пространственных и временной координат.
- ⁸ *Пирогов Н.И.* Соч. Т. II. Киев, 1910ю С. 13 и далее.
- ⁹ *Златев И.С., Исаев П.С.* О массе,электрическом заряде и осциляциях нейтрино. Сообщения ОИЯИ, Д-2-81-287. 1981.
- ¹⁰ *Борн М.* Физика в жизни моего поколения. М., 1966.