

ЗЕРКАЛЬНАЯ

асимметрия в атомных явлениях

К 30-летию открытия новосибирских физиков



2009

«НАУКА из первых рук», № 1(25)

Тридцать лет назад в новосибирском Академгородке был проведен эксперимент, результаты которого если не потрясли, то сильно встряхнули научный мир. Выполнили его в Институте ядерной физики СО АН СССР Л. М. Барков и М. С. Золоторев, а «идеологом» был теоретик И. Б. Хриплович. Сибирские ученые открыли эффект несохранения четности в слабом взаимодействии электронов с атомным ядром. Эксперимент вошел в энциклопедии. Сегодня академик Барков (на фото — слева) и член-корреспондент Хриплович (справа), несмотря на солидный возраст, продолжают трудиться в стенах родного института, Золоторев с 1980-х гг. живет в США. Герои настоящей публикации достигли в жизни самых высоких — и заслуженных! — степеней общественного и научного признания: Лев Митрофанович Барков — лауреат Государственной премии (1989), награжден несколькими орденами; Иосиф Бенционович Хриплович удостоен таких престижных наград в области теоретической физики, как медаль Дирака (2004) и премия им. И. Я. Померанчука (2005).

Журнал «НАУКА из первых рук» решил познакомить читателей с историей (и предысторией) выдающегося эксперимента, чтобы вы из первых уст узнали те колоритные подробности, о которых обычно не пишут в монографиях и не докладывают на научных конференциях

Времена одиночек в физическом эксперименте давно прошли. Физики элементарных частиц это касаются в наибольшей степени. Размеры и стоимость ускорителей и ядерных реакторов, с помощью которых получают основные экспериментальные результаты, постоянно растут, и этой тенденции уже много десятилетий.

Тем удивительней сделанный в 1978 г. в ИЯФе опыт Баркова и Золоторева, ключевую идею которого предложил Хрипович. Им удалось исследовать фундаментальные вопросы слабых взаимодействий методами оптической спектроскопии. Нарушение зеркальной симметрии, или, как говорят физики, пространственной четности, во взаимодействии электронов с нуклонами новосибирские ученые обнаружили, наблюдая вращение плоскости поляризации света в парах висмута. Можно сказать, малыми силами исследователи добыли большое знание.

Пространственная инверсия и четность

Для объяснения понятия четности следует углубиться еще на двадцать лет назад — в середину прошлого века. До 1950-х гг. казалось незыблемым постулат, что природа обладает зеркальной симметрией. Что это означает?

Представим себе преобразование, при котором направления координатных осей изменяются на противоположные ($x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$). Такое преобразование называется *пространственной инверсией*. Эту операцию удобно рассматривать как три последовательных отражения относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей («зеркал»). Часто при анализе вопроса, что происходит в той или иной физической

ситуации при пространственной инверсии, можно ограничиться одним зеркалом — только нужно его правильно выбрать.

Ученые считали, что законы физики устроены таким образом, что в зеркале они выглядят так же. То есть, имея описание какого-либо физического явления (зависимость от времени координат, скоростей, полей и т. д.), нельзя определить, наблюдается оно непосредственно или в зеркале. Утверждение, что процессы природы симметричны относительно отражения координат, в квантово-механической формулировке называют *законом сохранения пространственной четности* (или просто четности).

Подозрения, что иногда четность все-таки не сохраняется, возникли в связи с наблюдаемыми распадами K^+ -мезонов, обусловленными слабыми взаимодействиями. Разгорелась жаркая дискуссия. Гениальный Ландау публично заявлял: «Я повешусь, если четность не сохраняется!» Наконец, в 1957 г. в научном споре была поставлена точка: эксперименты нескольких исследовательских групп убедительно продемонстрировали несохранение четности в распадах ядер и элементарных частиц. Ландау своего обещания, конечно, не сдержал, но зеркальная симметрия мира рухнула.

Опыт Ву

Самым наглядным среди экспериментов 1957 г. был, пожалуй, опыт мадам Ву из Колумбийского университета. В чем заключалась его суть? Радиоактивный образец изотопа кобальта ^{60}Co помещался в магнитное поле кругового тока, под действием которого спины ядер выстраивались вдоль направления поля. У ядра кобальта-60 величина спина $J = 5$ и, соответственно, большой магнитный момент, что позволяло получить высокую сте-

пень поляризации ядер в магнитном поле. Чтобы тепловое движение не уничтожило поляризацию, образец охлаждался значительно ниже температуры жидкого гелия.

Как известно, в каждом акте β -распада испускается электрон (называемый β -частицей) и антинейтрино:



Частицы летят по всем направлениям, но в эксперименте измерялось только количество электронов, испущенных по направлению магнитного поля (спинов ядер) и в противоположном направлении.

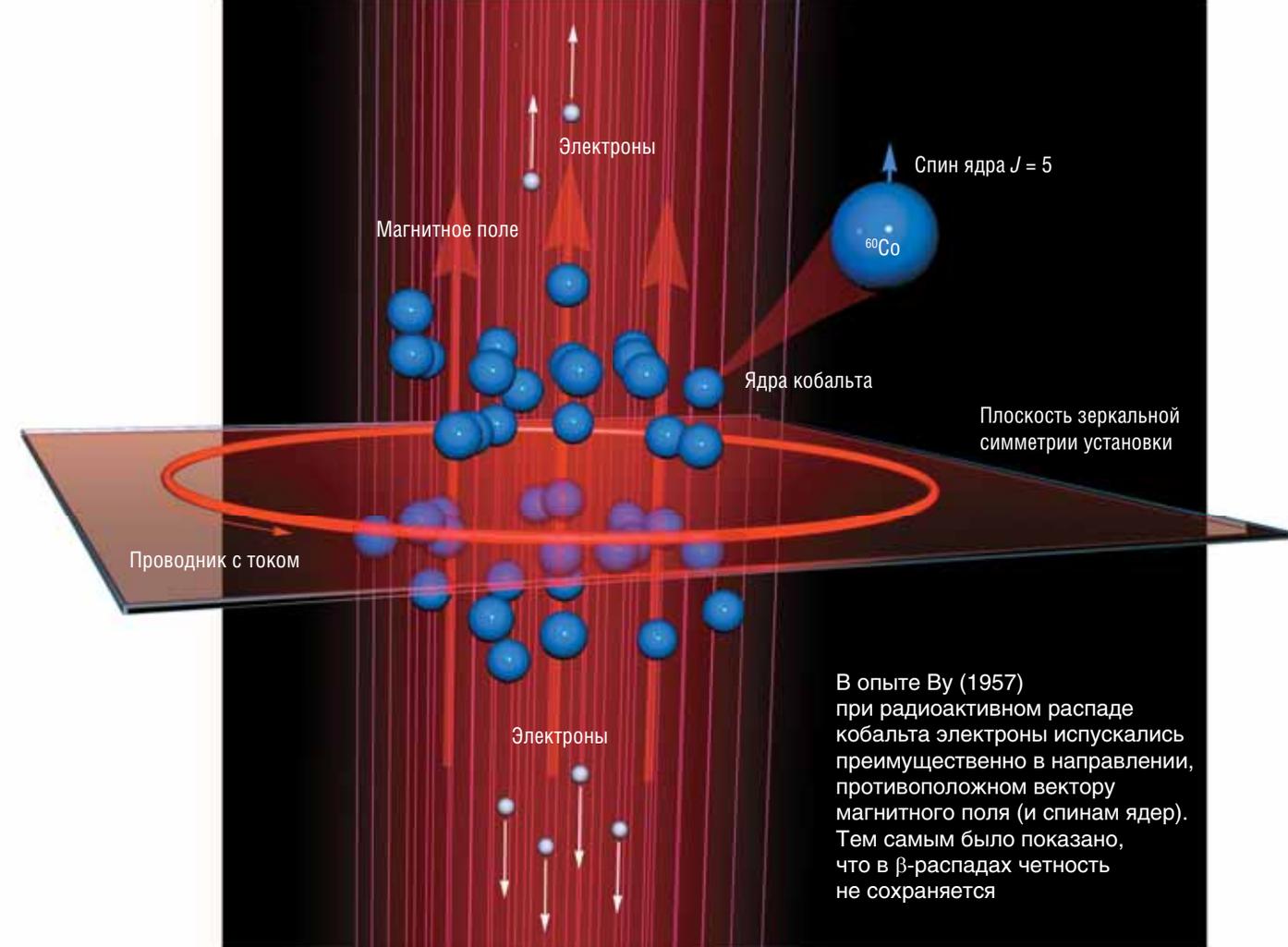
Теперь обратите внимание, что вся установка зеркально симметрична относительно плоскости, в которой расположен круговой ток. При зеркальном отражении импульс (полярный вектор) меняет знак, а напряженность магнитного

ПОЛЯРНЫЕ И АКСИАЛЬНЫЕ ВЕКТОРЫ

При отражении координатных осей (пространственной инверсии) различные физические векторные величины ведут себя по-разному. Одни из них меняют свой знак на противоположный (сохраняясь по модулю), другие — нет.

Если при пространственной инверсии вектор меняет знак, он называется *полярным*. Примеры: радиус-вектор, скорость, импульс.

Аксиальный вектор не меняет знака при отражении координатных осей. Примеры: векторное произведение обычных (полярных) векторов, например момент импульса $M = r \times p$ (r — радиус-вектор, p — импульс), или напряженность магнитного поля $H = \text{rot } A = \nabla \times A$ (A — векторный потенциал). Следует понимать, что направление аксиального вектора в известной степени условно, так как зависит от принятого при определении условия



В опыте Ву (1957) при радиоактивном распаде кобальта электроны испускались преимущественно в направлении, противоположном вектору магнитного поля (и спином ядер). Тем самым было показано, что в β -распадах четность не сохраняется

поля, магнитный момент, спин (аксиальные векторы) знака не меняют. Если бы четность сохранялась, что эквивалентно неизменности физической картины при зеркальном отражении, то должно было бы регистрироваться одинаковое количество электронов как по направлению магнитного поля, так и в противоположном направлении. Однако оказалось, что электроны летят преимущественно против вектора магнитного поля. Так было впервые показано, что в слабых взаимодействиях не сохраняется пространственная четность.

Одновременно с этой классической работой были выполнены эксперименты, обнаружившие несохранение четности в распадах мюонов и пионов. А вот не в распадах, а в процессах с так называемыми нейтральными токами (о которых речь впереди) вопрос, сохраняется

ли четность, оставался открытым в течение двадцати лет, до эксперимента Баркова—Золоторева.

Нейтральные токи

К 1970-м годам нарушение зеркальной симметрии в известных процессах слабого взаимодействия элементарных частиц уже никем не оспаривалось. Чем же был обусловлен интерес исследователей, в том числе в новосибирском Академгородке, к поискам новых эффектов несохранения четности? Чтобы объяснить причину этого, нужно хотя бы вкратце коснуться понятий, используемых на рубеже 1960—1970-х гг. некоторыми теориями электрослабого объединения.

В то время в физике элементарных частиц одним из центральных оказался вопрос о существовании и

ЧТО ТАКОЕ СПИН?

Спин (от англ. *spin* — вращаться) — собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы. Частица может находиться в $2J + 1$ спиновых состояниях (где спиновое число J — целое или полуцелое), что эквивалентно дополнительной степени свободы. Наличие у электрона спина, равного $1/2$, объяснило тонкую структуру атомных спектров, особенности расщепления спектральных линий в магнитном поле (эффект Зеемана), закономерности периодической системы элементов. Как разновидность момента импульса, спин является аксиальным вектором

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

Дух высоких энергий	72
Лазер, фотодиоды и военпред	75



ДУХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И.Б. Хриплович: И Лев Митрофанович Барков, и я — мы оба родом из физики высоких энергий. Лев Митрофанович к тому же экспериментатор, поэтому привык к большим установкам. В 1960-х — начале 1970-х основным рабочим инструментом были ускорители, а это, как вы понимаете, сооружения размером в десятки-сотни метров и коллективы из сотен людей. И вот году в 1974-м у меня возникла мысль, что можно получить важный результат в физике элементарных частиц с помощью фактически комнатной установки. Речь идет о поиске несохранения четности в атомных переходах посредством наблюдения вращения плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов. Идея многим показала фантастической, но Барков и Макс Золоторев стали ее энтузиастами. Надо сказать, что одновременно подобную идею выдвинули еще две исследовательские группы — в Оксфордском университете и в Университете штата Вашингтон в Сиэтле. Не знаю, была ли согласованность действий у англичан с американцами, но у нас с ними никакой корреляции не было. И что интересно: мы ведь не были специалистами в атомной физике, грубо говоря, мы были дилетантами, но как раз из-за отсутствия опыта действовали во всей этой эпопее решительно, быстро и часто правильно. Мы подошли к нашей научной задаче не как спектроскописты... Я бы сказал так: дух физики высоких энергий был привнесен в это дело.

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА 75

структуре нейтральных слабых токов. Что это такое? Рассмотрим, например, обычный β -распад нейтрона

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

или распад мюона

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Как нетрудно видеть, эти слабые процессы сопровождаются изменением электрического заряда адронов (нейтрона, протона) и лептонов (электрона, мюона, электронного и мюонного нейтрино и антинейтрино). Обо всех подобных процессах говорят, что они обусловлены слабым взаимодействием *заряженных токов*.

Между тем законами сохранения не запрещены и процессы, не сопровождающиеся передачей заряда, например упругое рассеяние нейтрино на протоне

$$\nu_e + p \rightarrow \nu_e + p.$$

Нейтрино, рассеиваясь на протоне за счет слабого взаимодействия, просто передает ему энергию и импульс. О процессах такого рода, в которых не изменяется заряд лептонов и составляющих адроны *кварков*, принято говорить, что они обусловлены *нейтральными слабыми токами*.

После того как было выдвинуто предположение о существовании нейтральных токов, на протяжении многих лет физика не ощущала особой необходимости в этой гипотезе. Ситуация изменилась после появления теоретических моделей, единым образом описывающих слабые, электромагнитные и сильные взаимодействия элементарных частиц. Ясно, что подобная теория, подтвержденная к тому же экспериментально, оказалась бы достижением того же класса, что и создание Максвеллом единой теории электромагнитного поля вместо разрозненного описания электростатических и магнитных явлений, существовавшего до него. Так вот, большинство упомянутых моделей естественным образом содержит нейтральные токи.

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

- p — протон,
- n — нейтрон,
- e^- — электрон,
- ν_e — электронное нейтрино,
- μ^- — мюон,
- ν_μ — мюонное нейтрино.

Примечание: античастица помечается чертой над буквенным обозначением соответствующей частицы

Когда в 1973 г. нейтральные токи были экспериментально обнаружены, целый класс единых моделей оказался закрытым. В экспериментах наблюдались реакции, в которых мюонное нейтрино, рассеиваясь на протоне или нейтроне, рождает адроны с суммарным зарядом, равным заряду начального адрона:

$$\nu_\mu + p (n) \rightarrow \nu_\mu + \text{адроны.}$$

То, что нейтральные токи впервые были открыты в реакциях с участием нейтрино, не случайно. Поскольку эта частица не обладает ни сильным, ни электромагнитным взаимодействием, нейтринные нейтральные токи легче обнаружить: они ничем не маскируются. Для заряженных частиц слабое взаимодействие маскируется на много порядков более сильным электромагнитным.

Как же выделить вклад слабого взаимодействия электрона с атомным ядром, обусловленного нейтральными токами, в реакции

$$e^- + p (n) \rightarrow e^- + p (n)?$$

На помощь физике элементарных частиц пришла оптика с ее прецизионной точностью измерений.

«Слабая» оптика

Популярные в то время теории электрослабого объединения, в том числе модель Вайнберга и Салама (1968), предсказывали существование слабого взаимодействия между электроном и ядром, не сохраняющего четность. Следует отметить, что впервые принципиальная возможность поиска нейтральных токов по эффектам несохранения четности в атомных оптических переходах обсуждалась еще в 1959 г. советским физиком Я.Б. Зельдовичем.

Вспомним из школьного курса физики, как излучает атом. Со-

КВАРКИ, ЛЕПТОНЫ И ТРИ ТИПА ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Все вещество состоит из 12 фундаментальных частиц, являющихся истинно элементарными, т.е. не имеющих внутренней структуры: 6 кварков (u, d, s, c, b, t) и 6 лептонов (электрон, мюон, τ -лептон и соответственно 3 сорта нейтрино). Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, τ -лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях. Гравитационное взаимодействие в физике элементарных частиц пренебрежимо мало.

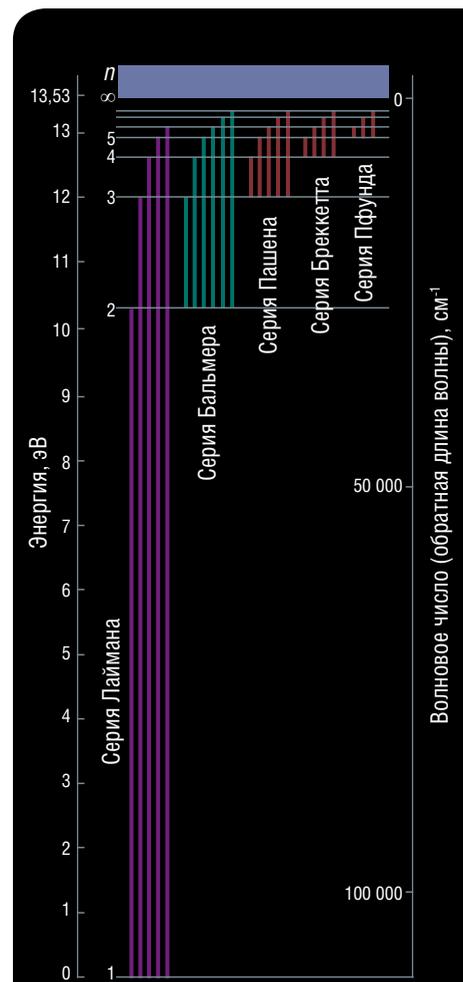
Из кварков состоят адроны, в частности, протоны и нейтроны (из трех кварков), а также мезоны (из одного кварка и одного антикварка). По современным представлениям, кварки не могут существовать в свободном виде

гласно постулатам Бора электрон в атоме может находиться в некоторых стационарных состояниях (на орбиталях), в которых он не излучает. Каждой орбитали соответствует свой уровень энергии. Значения возможных энергий квантованы (дискретны). Когда электрон переходит с одной орбитали на другую, излучается (или поглощается) квант. Энергия кванта E_{mn} равна разности энергий электрона до и после перехода:

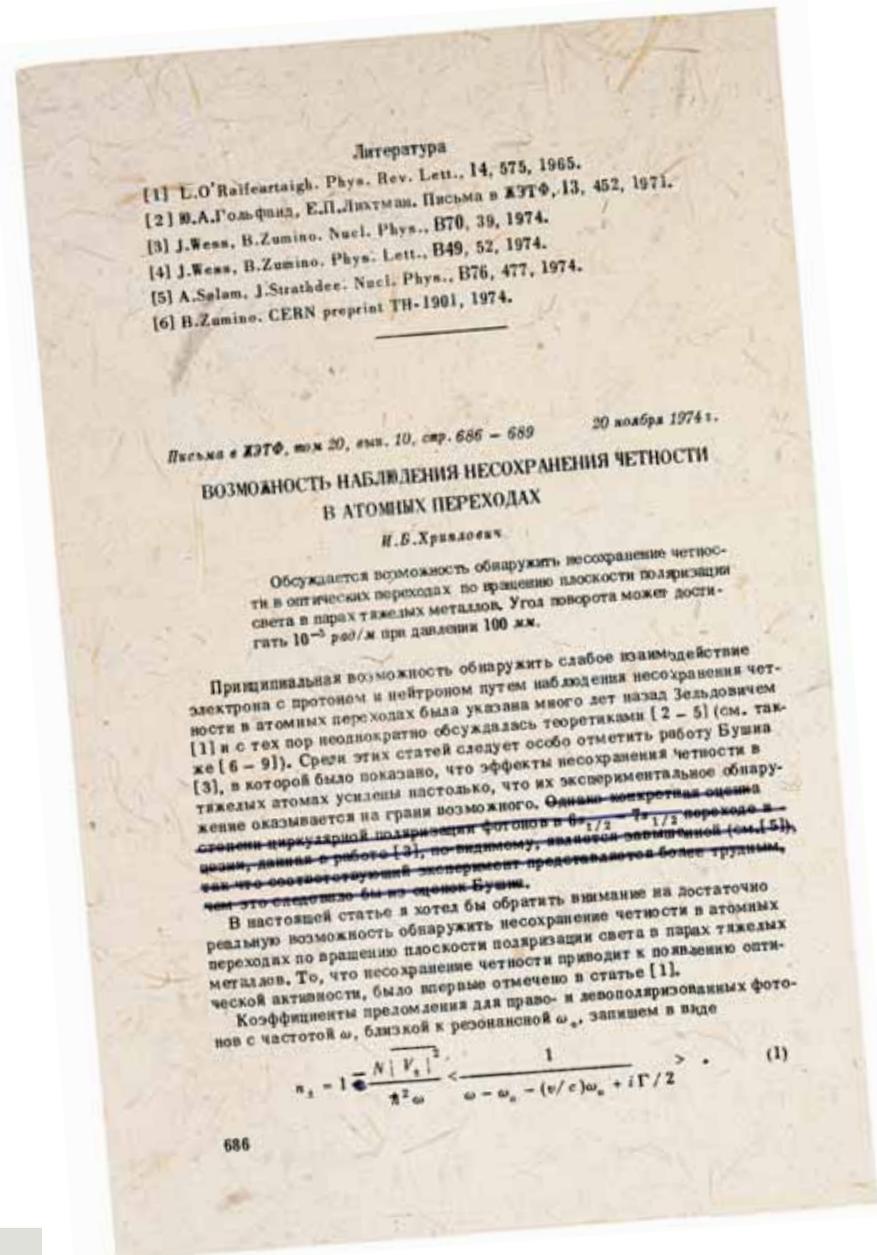
$$E_{mn} = h \nu_{mn} = E_m - E_n,$$

где h — постоянная Планка, ν_{mn} — частота кванта, m и n — номера энергетических уровней.

Как может сказаться существование нейтральных токов на атомных явлениях? Прежде всего, слабое взаимодействие приведет к смещению уровней, а значит, повлияет на частоты переходов. Частоты



Это спектр простейшего атома — водорода. Макроскопическая структура спектральных линий определяется разницей в энергетических уровнях атомных орбиталей. Однако при более детальном исследовании каждая линия проявляет свою тонкую структуру, обусловленную малыми возмущениями, которые немного сдвигают и расщепляют энергетические уровни. Поправки могут возникать из-за релятивистских эффектов, связи спин-орбита, влияния внешнего магнитного поля (эффект Зеемана) и т.д.



Оттиск теоретической статьи И. Б. Хрипловича 1974 г. в журнале «Письма в ЖЭТФ» (с авторской правкой), давшей стартовый импульс эксперименту Баркова—Золоторева

в спектроскопии измеряются с огромной точностью. Но в данном случае абсолютные измерения частот сразу не внушали оптимизма из-за того, что величина смещения очень мала по сравнению с точностью нашего знания мировых констант (через которые выражаются частоты переходов без учета слабых взаимодействий). Поэтому единственной реальной надеждой было наблюдение

ние эффектов, которые сами по себе могут вызываться только слабыми взаимодействиями.

В 1974 г. французские физики супруги Бушиа заметили, что эффекты несохранения четности, обусловленные нейтральными токами, усилены в тяжелых атомах настолько, что их обнаружение оказывается на грани экспериментальных возможностей. Они предложили искать эти эффекты в очень маловероятном переходе в цезии. Ожидалось, что вероятности поглощения атомом право- и левополяризованных фотонов (т.е. фотонов, у которых направленные вращения вектора поляризации образует с направлением скорости, соответственно, правый и левый винт) будут отличаться.

В том же году сотрудник новосибирского Института ядерной физики И. Б. Хриплович предложил другой эксперимент, а именно наблюдение вращения плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов, в частности таллия, свинца и висмута. Мы знаем, что величина коэффициента преломления определяется взаимодействием света с атомами (молекулами) среды. Если вероятности поглощения и испускания для право- и левополяризованных фотонов отличаются, разными окажутся и коэффициенты преломления. А поскольку линейно поляризованную волну всегда можно представить как наложение двух циркулярно поляризованных волн с противоположным направлением вращения (правым и левым), то при прохождении через среду эти составляющие будут распространяться с разными скоростями, приобретая разность хода, линейно зависящую от длины пути. В результате плоскость поляризации должна поворачиваться.

Свойство среды вызывать вращение плоскости поляризации света имеет специальное название — *оптическая активность*. Вообще, это явление давно известное. Оптически



активным веществом является, например, обычный раствор сахара. Причина здесь в том, что молекула сахара обладает винтовой структурой. Оптическая же активность газа из неполяризованных атомов в отсутствие внешних полей — эффект, до того времени никогда не наблюдавшийся. Пожалуй, трудно представить себе более наглядное проявление несохранения четности, неравноправия левого и правого в физике.

Эксперимент — дело тонкое

Летом 1974 г. в Институте ядерной физики СО АН Барков и Золоторев при теоретической поддержке Хрипловича приступили к подготовке эксперимента по поиску оптической активности паров тяжелых металлов. В качестве рабочего вещества в конце концов был выбран висмут: выбор определялся и ожидаемой величиной эффекта, и наличием мощного лазера с подходящей длиной волны. Исследования велись напряженно, в обстановке острой конкуренции: одновременно аналогичные опыты с висмутом начались в Англии и США.

ЛАЗЕР, ФОТОДИОДЫ И ВОЕНПРЕД

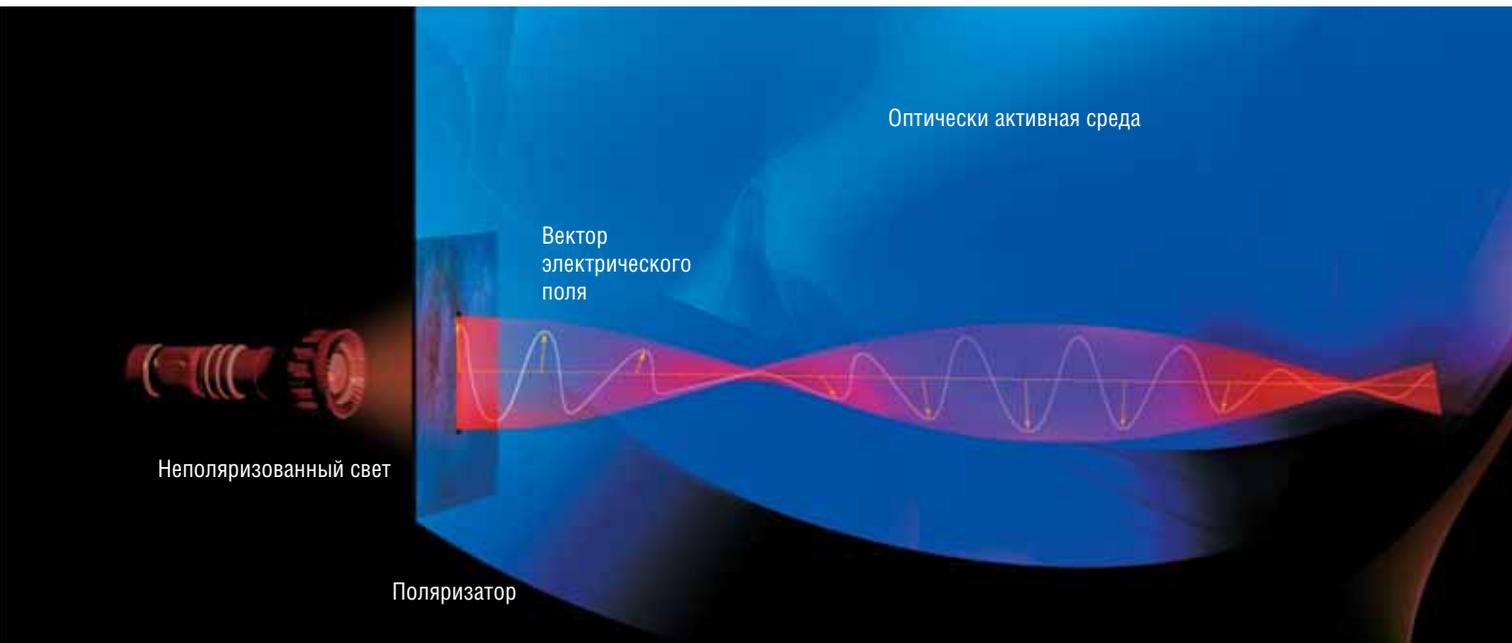
И. Б. Хриплович: Нам был нужен перестраиваемый лазер. Мы знали, что в стране существуют полупроводниковые лазеры с необходимыми параметрами: судя по сообщениям прессы, такие приборы делал Алферов в Ленинграде. Но на определенном этапе переговоров один из его сотрудников заявил Золотореву буквально следующее: «Ты что, дурак? Откуда вы это взяли — из газет? Неужели до сих пор верите газетам? Если хотите хороший лазер, покупайте на Западе». В результате мы заказали лазер на красителе фирмы Spectra Physics, как сейчас помню, за 17 тысяч инвалютных рублей, или 21 тысячу долларов. По имеющейся у меня информации, это был почти весь валютный запас института. Будкер в нас поверил. Будкер умел принимать решения. И дело завертелось. Впрочем, и до получения лазера подготовка эксперимента шла полным ходом. Лазерная часть установки должна была состоять из двух блоков. Лазер накачки приобрели без особых приключений. А вот с лазером на красителе и дефицитными фотодиодами произошла история, которую стоит рассказать. Золоторев и я прилетели на семинар в Москву. Мы знали, что лазер уже

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

отгружен, знали все входящие и исходящие номера. Самолет почему-то посадили в Шереметьево вместо Внукова. Склад находился неподалеку, мы узрели в этом перст судьбы, разыскали склад, выяснили, что экспедитор Министерства внешней торговли за два дня до того получил этот лазер.

Макс мне говорит: «Ты займись лазером, а я — фотодиодами, на них документов нет, ты не сумеешь». Отправился я в Минвнешторг. На проходной — куча народу, некоторые мыкаются здесь уже по две недели. А у меня на завтра билет на самолет. В общем, с большим трудом пробился на прием. Мне заявляют: «Это еще не пришло». — «Как не пришло, когда ваш экспедитор три дня назад получил?!» Конечно, я проявил редкостную наивность. Если бы поставил бутылку коньяка, а лучше две, думаю, проблема разрешилась бы сразу. Но я взял их измором, и на второй день мне выдали вожделенный ящик.

У Золоторева было колоритней. Макс явился на завод, который выпускал фотодиоды, и узнал, что всю продукцию забирает Министерство обороны. Он потребовал военпреда. Состоялся мужской разговор, офицер попросил Золоторева предъявить паспорт, после чего отлучился на полчаса. Когда вернулся, они зашли куда-то за угол, и этот офицер насыпал Максу фотодиоды пригоршней — без счета, бесплатно. ...Был ночной рейс. Утром прилетели в Новосибирск с лазером. А к вечеру он уже работал! Кстати сказать, конкурирующая организация в Советском Союзе — ФИАН (оптическое подразделение) — тоже покупала импортный лазер, только другой марки — Coherent Radiation. Профессиональные оптики, они несколько недель ждали представителя фирмы, чтобы запустить его. Сами не решились.



Оптическая активность — свойство среды вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через нее линейно поляризованного света (на рисунке показана фигура, описываемая вектором электрического поля световой волны). К примеру, оптическая активность сахарного раствора обусловлена несимметричным строением молекул сахара. В магнитном поле возникает искусственная (наведенная) оптическая активность — это продольный магнитооптический эффект Фарадея (следствие эффекта Зеемана)

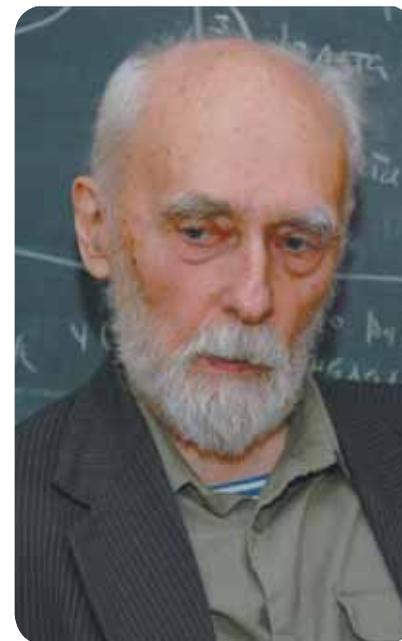
Эксперимент этот оказался чрезвычайно трудным и занял годы. Начнем с того, что углы поворота, которые необходимо было измерять, не превышали 10^{-7} радиан*. Для иллюстрации того, насколько мала эта величина, заметим, что при повороте километровой стержня на такой угол вокруг оси, проходящей через один из его концов, другой конец сместится всего на 0,1 миллиметра! Была разработана оригинальная методика для измерения столь малых углов (причем с помощью призм, неидеальность которых много больше измеряемых углов). Особые меры принимались для подавления паразитного магнитного поля, которое также приводит к вращению плоскости поляризации света (эффект Фарадея). Даже поле, составляющее 10^{-3} от магнитного поля Земли, достаточно для имитации искомого эффекта и представляет серьезную помеху.

Оптические измерения проводились на компонентах сверхтонкой структуры красной линии 6477 \AA , соответствующей определенному переходу в атомарном висмуте. Источником света служил лазер, в который был введен элемент, позволяющий сканировать длину волны излучения на частоте 1 кГц. Поляризатор и

анализатор представляли собой одинаковые призмы из исландского шпата, развернутые на 90° . Лазерный луч проходил через поляризатор, кювету с парами висмута, анализатор и попадал на фотоприемное устройство, сигнал с которого обрабатывала сложная радиоэлектронная схема с использованием синхронных детекторов, обратной связи и схемы вычитания. В итоге искомый эффект измерялся посредством детектирования полезного сигнала по первой гармонике частоты сканирования (1 кГц).

Есть эффект!

Международная эпопея по поиску эффектов несохранения четности в атомах развивалась довольно драматично. Первыми (в 1976 г.) были опубликованы экспериментальные результаты американцев и англичан. Группа Сандарса из Оксфордского университета работала на той же красной линии, что и Барков с Золоторевым; Фортсон из Университета штата Вашингтон — на инфракрасном переходе. Знак эффекта в этих группах получился разный. Надо сказать, что физики Оксфорда, Сизтла и Новосибирска при расчетах использовали одну и ту же модель электромагнитных и слабых взаи-



модействий — Вайнберга и Салама. Теория определенно предсказывала, что знак должен быть одинаковым в обоих переходах. Осознавая противоречивость полученных данных, авторы совместной англо-американской публикации склонились к мнению, что эффект близок к нулю или во всяком случае много меньше предсказываемого моделью.

В 1977 г. новые публикации Фортсона и Сандарса опять засвидетельствовали отсутствие ожидаемого эффекта. Наконец, в январе 1978 г. первые результаты появились у Баркова и Золоторева. В февралемарте они были подтверждены в новых сериях измерений. На всех рабочих частотах в парах висмута наблюдался поворот плоскости поляризации света, причем численные значения углов поворота демонстрировали хорошее согласие с теорией!

Результатов оптического эксперимента в ИЯФе с нетерпением ждали многие физики, занимающиеся элементарными частицами. Ход опытов с висмутом интересовал и самих авторов популярной теории — будущих нобелевских лауреатов Вайнберга, Салама и Глэшоу.

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

Отступать некуда!	77
А все-таки она возвращается!	80
Премия, которой не было	81

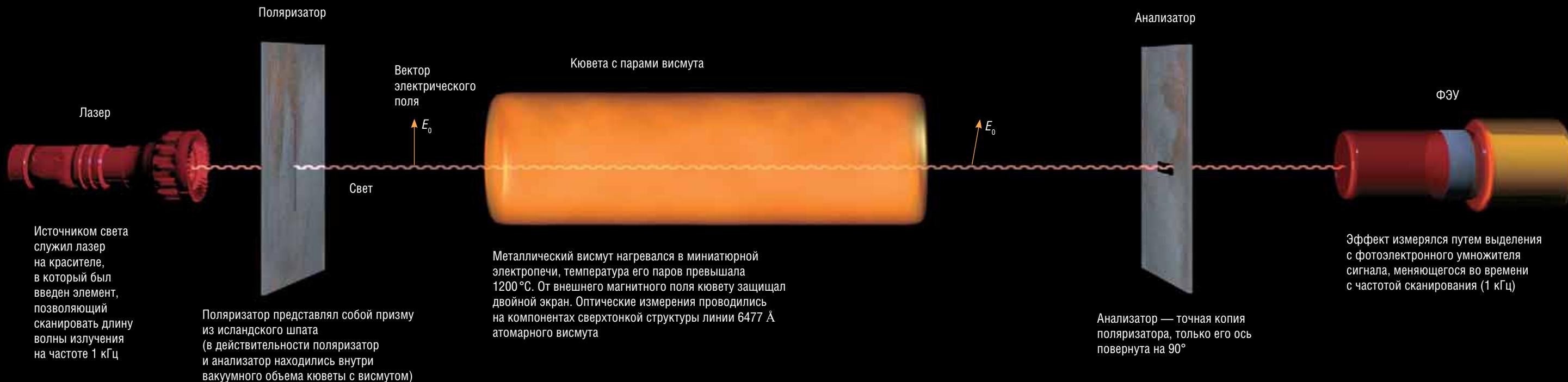
ОТСТУПАТЬ НЕКУДА!

Л. М. Барков: Драматизм положения заключался в том, что когда мы стали реально измерять, оказалось, что для работы со сверхтонкой структурой атомных уровней этот дорогостоящий лазер Spectra Physics не годится совсем. Он имел большую ширину линии. Его параметры мы, естественно, знали заранее, но думали, что поставим интерферометр Фабри—Перо и выделим из широкого спектра ту линию, которая нам нужна. Когда это сделали, то поняли, что в интерферометре возникает стоячая волна и свет отражается назад, внутрь лазера. Наши иллюзии разбились в прах. Но возможности отступить не было, денег на еще более дорогой прибор никто бы уже не дал. Поэтому мы были вынуждены изобрести некое устройство (и даже получили свидетельство об изобретении!), которое вставили в лазер, и оно позволило работать в режиме одночастотной генерации и менять очень маленькими шажками длину волны излучения. Когда технические проблемы были преодолены и экспериментальная аппаратура заработала в комплексе, выяснилось, что научная часть задачи по сложности ни в какое сравнение не идет с тем, что мы ожидали. Благодаря продуманной методике легко было даже померить эти малые углы. Но в парах висмута жизнь оказалась совершенно не похожа на ту, когда вы берете какой-нибудь неподвижный предмет типа кристалла. Там флуктуации плотности — как в воздухе. При высоких температурах парциальные давления паров атомарного и молекулярного висмута соизмеримы, и колебательно-вращательный спектр молекул накладывался на сверхтонкую

атомную структуру. Поскольку мы были не профессионалы в спектроскопии, то слабо представляли, что должны увидеть. А увидели полный хаос, частотол, дремучий лес в огромном диапазоне — сотни, может быть, тысячи спектральных линий! И какие из них наши, абсолютно непонятно.

Методом, как говорится, экспериментального тыка мы намеренно подали в систему магнитное поле — то самое, от которого до сей поры так тщательно избавлялись. И обнаружили, что вызываемое магнитным полем фарадеевское вращение плоскости поляризации (Хриплович хорошо умел его рассчитывать) позволяет однозначно идентифицировать все атомарные линии. Впоследствии, при измерениях углов, мы и нормировались по эффекту Фарадея.

Дальше все просто: год непрерывной работы. Крупная организационная ошибка, что мы работали на установке вдвоем с Золоторевым. Другие исследовательские группы имели по 5—6 человек, и это правильно. Лазер должен выдавать стабильную генерацию, печка с висмутом, магнитные поля тоже очень капризная вещь. А нас было только двое. Это минимум даже по правилам техники безопасности, ведь там и высокое напряжение, и лазерное излучение. Мы с Мариком (Макс Золоторев. — Прим. ред.) фактически не вылезали из лаборатории. Даже спали в этой комнате. Иногда я падал на диван и говорил Марик: «Не могу больше, у меня сейчас развалится голова». Как мы выдержали эти жуткие перегрузки, не понимаю. Служба была. Надо!



▼ Основная тяжесть этого относительно малобюджетного, но чрезвычайно трудоемкого эксперимента легла на плечи двоих — Л. М. Баркова (справа) и М. С. Золоторева (слева). И. Б. Хриплович (в центре) отвечал за теорию и численные расчеты. 1970-е гг.

Принципиальная схема эксперимента Баркова—Золоторева (1978). Несохранение четности в слабых процессах с нейтральными токами было открыто посредством наблюдения вращения плоскости поляризации света в парах висмута



КАК ИЗМЕРЯЛИСЬ СВЕРХМАЛЫЕ УГЛЫ

Пусть свет, прошедший через поляризатор, поляризован вдоль вертикальной оси. Тогда, если анализатор ориентирован так, что пропускает лишь свет, поляризованный вдоль горизонтальной оси, то в отсутствие оптически активного вещества на фотоприемник сигнал не поступает. Предположим теперь, что после внесения кюветы с веществом плоскость поляризации света поворачивается на угол φ . Тогда, если амплитуда электрического поля волны после поляризатора равна E_0 , то амплитуда волны, прошедшей через анализатор, при малых φ составляет $E_0 \varphi$. Интенсивность же света на приемнике (в оптическом диапазоне непосредственно измеряется не амплитуда волны E , а именно ее интенсивность I , которая пропорциональна E^2) будет равна $I = I_0 \varphi^2$. Таким образом, для нахождения угла поворота достаточно, на первый взгляд, измерить интенсивность света, прошедшего через анализатор.

Однако для измерения углов порядка 10^{-7} радиан этот метод непригоден. Дело в том, что призмы, используемые в качестве поляризаторов и анализаторов, отнюдь не идеальны. В 1970-е гг. даже для лучших образцов максимальное ослабление интенсивности света при скрещенных призмах составляло 10^{-6} — 10^{-7} . Отсюда ясно, что рассчитывать на измерение таким способом

углов, меньших 10^{-3} — 10^{-4} радиан, не приходится. Поэтому поступают несколько иначе: одну из призм дополнительно поворачивают на малый угол φ_0 , который выбирается так, чтобы $\varphi \ll \varphi_0 \ll 1$. В этом случае интенсивность света на приемнике, очевидно, равна $I = I_0 (\varphi_0 + \varphi)^2 \approx I_0 (\varphi_0^2 + 2\varphi_0 \varphi)$.

Из этой формулы сразу видно первое преимущество: непосредственно измеряемая величина, интенсивность I , зависит от φ линейно, а не квадратично. Кроме того, здесь возможна модуляция сигнала, а переменный сигнал с известной зависимостью от времени измерить гораздо легче, чем постоянный.

В эксперименте Баркова—Золоторева свет был частотно-модулированным, т. е. частота лазерного излучения ω имела вид:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t.$$

Здесь ω_0 — резонансная частота (центр линии поглощения), $\Delta\omega$ — амплитуда сканирования, Ω — частота сканирования. Из теории известно, что φ есть линейная функция расстройки $\omega - \omega_0$, тогда в случае частотной модуляции полезный эффект может быть измерен путем выделения сигнала, меняющегося во времени с частотой сканирования.

Когда наши ученые объявили, что четность в атомных переходах не сохраняется, это была маленькая сенсация. А в апреле сиэтлская группа сделала очередное сообщение, в котором настаивала на обратном.

Это было трудное время для сибирских физиков, получивших результат, диаметрально противоположный выводам других авторитетных ученых. Подтверждение правильности эксперимента Баркова—Золоторева пришло с неожиданной стороны. Летом 1978 г. коллектив исследователей, работающих на линейном ускорителе в Стэнфорде (США), обнаружил несохранение четности при рассеянии электронов большой энергии на дейтерии — тяжелом водороде. Измерялась фактически та же физическая константа, что и в оптических исследованиях в новосибирском Академгородке. Таким образом, было окончательно установлено существование слабого взаимодействия между электронами и нуклонами ядра. Эти экспериментальные достижения в конечном счете способствовали научному признанию теории Вайнберга—Салама—Глэшоу. Что касается групп из Оксфорда и Сиэтла, то они впоследствии отказались от своих «нулевых» результатов.

Тонкий опыт, блестяще проведенный Барковым и Золоторевым, который некоторые считали «несерьезным», эксперимент «непрофессионалов» принес самую актуальную информацию о фундаментальных свойствах материи. Теперь неэквивалентность правого и левого в процессах с нейтральными токами — общее место, модель же Вайнберга—Салама стала фундаментом современной физики микромира. ...Незабываемый для участников событий 1978-й уходит в даль времен. Почти не сохранилось фотографий тех лет, давно разобрана установка, составившая славу ее создателей. Физиков сегодняшнего дня занимают новые проблемы, новые задачи. Но эксперимент Баркова—Золоторева, вне всякого сомнения, останется в истории науки.

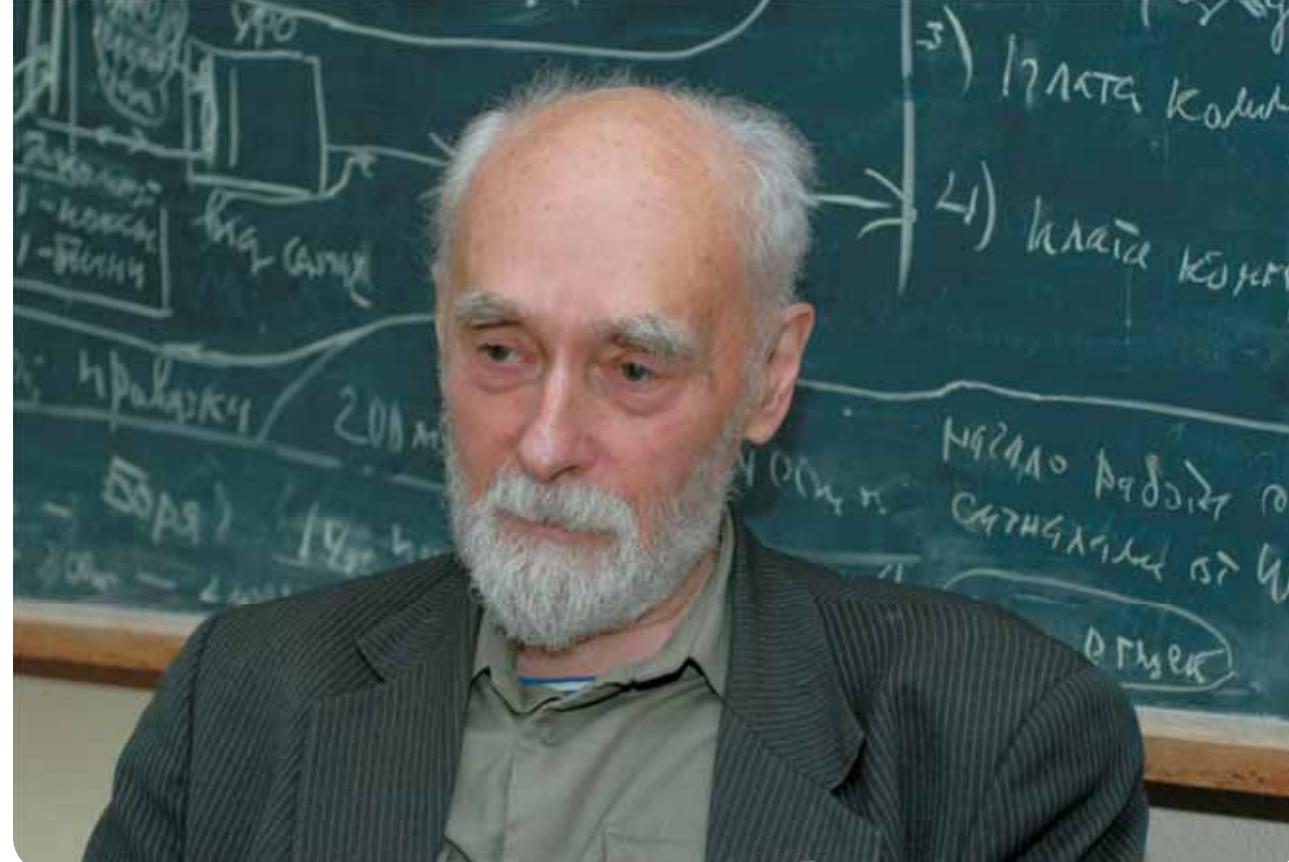
Литература

Вайнберг С. // УФН. — 1976. — Т. 118. — С. 505.
 Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. — 1959. — Т. 36. — С. 964.
 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. — М.: Наука, 1974.
 Хриплович И.Б. Несохранение четности в атомных явлениях. — М.: Наука, 1988.
 Barkov L. M., Zolotarev M. S. // Phys. Lett. — 1979. — V. 85B. — P. 308.
 Bouchiat M., Bouchiat C. // Phys. Lett. — 1974. — V. 48B. — P. 111.

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

А ВСЕ-ТАКИ ОНА ВРАЩАЕТСЯ!

Л. М. Барков: Мы опаздывали. Когда новосибирский эксперимент был в разгаре и ияфовская группа преодолевала бесчисленные подводные камни, Сандарс и Фортсон из Оксфорда и Сиэтла сделали на международной конференции доклад, где объявили, что эффект в висмуте отсутствует, т. е. четность в атомных переходах сохраняется. Многим тогда казалось, что наше дело проиграно, деньги пропали, годы работы пропали. Однако я видел, что у конкурентов грубый, в сущности, результат. Их ответы не сходились по знаку между собой. Тогда они усреднили их, получив ноль. Я понял, что американцы и англичане испытывают те же трудности, что и мы, но, желая оказаться впереди, объединились в совместную публикацию. Теперь, когда конкуренты уже имели на руках конкретные цифры, у нас немного изменились цели. Мы должны были довести эксперимент до конца именно с нашей оригинальной методикой и получить абсолютно независимый ответ. К началу 1978 г. мы уверенно наблюдали и измеряли вращение плоскости поляризации. Причем, чтобы не было соблазна подгонять под цифру, близкую к предсказаниям модели Вайнберга—Салама, до последнего момента держали все с точностью до неизвестного коэффициента. Хриплович как раз уехал в командировку. В его отсутствие Золоторев и я сделали наконец последнюю математическую операцию и впервые получили число. Но оказалось, что знак эффекта обратный! Несколько дней ползали вокруг установки, проверяли, в ту ли сторону происходит вращение. Десятки проверок — тот же результат! Этот неожиданный вывод я и доложил в МИФИ на сессии отделения ядерной физики: дескать, четность в атомах не сохраняется, но численные результаты эксперимента противоречат модели Вайнберга—Салама. Сообщение вызвало резонанс и в Союзе, и в мире. Появилась информация, что теория одного индийского товарища предсказывает именно обратный знак эффекта, по сравнению с моделью Вайнберга—Салама. Разъяснилось все после приезда Хрипловича. За несколько месяцев до описываемых событий экспериментаторы попросили теоретиков изобразить, как будет выглядеть некий график. Сушков и Фламбаум, молодые ребята, которые вместе с Хрипловичем выполняли все расчеты, нарисовали требуемую зависимость. Специальной договоренности, что откладывать по оси X — частоту или длину волны, не было. А от этого как раз зависит знак эффекта (у производных будет разный знак). Нарисовали они зависимость от частоты, а воспринято было как длина волны. Вот так и случилось: за численное значение мы ручались головой, а со знаком вышло полное недоразумение.



Накладка эта в какой-то степени сыграла в нашу пользу. Нам ведь как непрофессионалам никто не верил, но коли мы не побоялись публично дать противоположный ответ, то тем самым сняли с себя возможные обвинения, что подстраиваемся под Вайнберга—Салама. Коллеги потом допытывались: «Ну создайте, нарочно устроили этот цирк?» А вообще, три группы настаивали, что эффект отсутствует: к англичанам и американцам позже присоединились фиановцы (группа Собельмана) и нагнали большую точность, в несколько раз якобы выше, чем в наших измерениях. Мы стояли одни. Честно говоря, страшно было. И когда на Стэнфордском ускорителе было обнаружено несохранение четности при рассеянии электронов на дейтерии, что тоже подтверждало модель Вайнберга—Салама, с души свалился камень.

ПРЕМИЯ, КОТОРОЙ НЕ БЫЛО

Л. М. Барков: Итак, мы первыми в мире наблюдали несохранение четности в слабых процессах с нейтральными токами. Вполне серьезное открытие, но

никаких, по выражению Хрипловича, «коврижек» за него не получили. Вы спросите — почему? Не ради славы — ради объективности. Руководство ИЯФа выдвигало работу на Ленинскую премию. Были статьи в газетах. Но мы ничего не получили, потому что наши влиятельные коллеги намеряли в это время ноль. На одном заседании Президиума Академии наук, когда фиановцы докладывали свой «ноль» и уже всем, кроме них самих, было ясно, что модель электрослабого объединения правильная и что эффект несохранения четности есть, я сидел рядом с Гинзбургом. Говорю ему: «Видите здание? Вероятность того, что оно сейчас упадет, такая же, как правильность их ответа». Он на меня вздыбился. Считалось, что мы нарушили правила приличий. Один институт, три человека, никакой коллаборации. Нам говорили: «Так не делается. Работали же солидные люди и в другом институте, надо было объединяться с ними».

...Что касается не политических, а научных последствий нашего эксперимента, то он открыл дорогу модели Вайнберга—Салама. Рассказывали, как Сандарс всем показывал фотографию своей установки, имевшей вид компактного ящика: «Вы думаете, что это такое? Это гроб модели Вайнберга—Салама». Но с таким выводом он поспешил. Впоследствии модель завоевала позицию основной теории физики элементарных частиц. В 1979 г. Вайнберг, Салама и Глэшоу за объединенную теорию слабых и электромагнитных взаимодействий получили Нобелевскую премию. Теперь она является составной частью так называемой Стандартной модели, которая включает в себя еще и сильные взаимодействия, подтверждена в сотнях экспериментов. Другое дело, что любая физическая теория имеет ограниченную область применимости. Поиск отклонений от Стандартной модели — одно из активных направлений исследований в последние годы. Вот сейчас большие надежды связывают с адронным коллайдером, который построен в ЦЕРНе. Ожидается, что эксперименты на нем могут зарегистрировать отступления от Стандартной модели. Если это произойдет, значит, будет сделан новый шаг вперед. Это естественно, ведь процесс познания бесконечен.