

СЗг(04)  
С-306

**СЕМИНАР ПАМЯТИ  
И.М. ФРАНКА**



500400

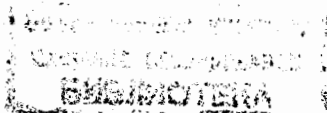
92-185

СЗГ (04)  
С-306

Семинар  
памяти  
академика И.М.Франка

Дубна, июль 1990 года

Дубна 1992



140460



"... в своих научных утверждениях я никого умышленно не вводил в заблуждение, т.е. не говорил чего-либо, в чем сомневался. Но ошибаться я, конечно, мог и, несомненно, иногда ошибался. В научных дискуссиях я также не всегда был прав. Думаю, очень плохо, если ученый уверовал в свою непогрешимость. Однако... мне всегда хотелось быть надежным, и я к этому стремился."

*И. С. Прань*

Лаборатория нейтронной физики готовилась отметить 30-летие с момента пуска первого в мире импульсного реактора на быстрых нейтронах, когда случилась беда - через несколько часов после начала сердечного приступа 22 июня 1990 г. около 12 часов дня скончался Илья Михайлович Франк.

Вскоре после похорон вместо готовившихся по поводу 30-летия скромных торжеств состоялся семинар, посвященный памяти Ильи Михайловича, на котором прозвучали выступления его коллег и учеников. Возможно, не все выступления оказались достаточно подготовлены, но они были искренни и отражали широту научной деятельности Ильи Михайловича и представления о нем как о человеке. Записанные на ленту и расшифрованные, они легли в основу этого сборника. Для нас, работавших и общавшихся с Ильей Михайловичем на протяжении многих лет, сказанное было важно как прощальное слово, как долг перед светлой памятью Ильи Михайловича. Надеемся, что людям, меньше знавшим Илью Михайловича, этот сборник даст представление о том, что сделал Илья Михайлович в науке сам, какие результаты получены в руководимой им в течение 32-х лет одной из крупнейших в мире лабораторий - Лаборатории нейтронной физики, уникальной по многоплановости своих исследований с помощью нейтронов в области элементарных частиц, атомного ядра, конденсированных сред и биологических объектов.

Лауреат Нобелевской премии, трехкратный лауреат Государственной премии, академик Илья Михайлович Франк, конечно, достоин большего внимания, и, безусловно, будут еще написаны другие статьи и книги об Илье Михайловиче и его месте в науке.

## СЛОВО ОБ ИЛЬЕ МИХАЙЛОВИЧЕ ФРАНКЕ

Ю.П.Попов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Илье Михайловичу Франку была уготована длинная и очень плодотворная жизнь. И, думаю, эта жизнь была для него очень интересной.

Наверное, все очень хорошо знают труды Ильи Михайловича, его годы работы в Объединенном институте, в ФИАНе. Я напомним лишь некоторые его биографические данные более раннего периода и просто расскажу о тех впечатлениях, которые у меня складывались за те сорок с лишним лет, которые я провел рядом с Ильей Михайловичем, наблюдая его, живя и работая вместе с ним, начиная со студенческих лет и кончая последними днями.

Илья Михайлович родился в семье профессора математики в Петербурге, детские годы провел в Крыму, о котором он, насколько я знаю, сохранил очень теплые впечатления и который любил до последних своих дней. Уже будучи школьником, он участвовал, как бы мы их теперь назвали, в математических олимпиадах. История нам сохранила в трудах Математического общества Симферопольского педагогического института сообщение о том, что Илья Михайлович (тогда он был просто Илья Франк) выступал с обобщением, кажется, теоремы Чайлса, и это было, по-видимому, одно из первых его выступлений, которое, быть может, предопределило многое в дальнейшем.

Дальше были годы учебы в Московском университете, уже здесь он стал работать под руководством Сергея Ивановича Вавилова, и одна из работ совместно с Сергеем Ивановичем была опубликована в "Zeitschrift für Physik", это работа еще студенческих времен. После окончания университета Илья Михайлович пошел работать в ГОИ, где до 1934 года занимался изучением фотохимических реакций оптическими методами, и там же, в ГОИ, он защитил докторскую диссертацию. В 1934 году, в Москве Сергей Иванович Вавилов организовывал Физический институт Академии наук. Он пригласил Илью Михайловича участвовать в этой работе - перейти в Физический институт на постоянную работу и заняться исследованиями по ядерной физике, которые тогда практически лишь начинались в Советском Союзе. И в дальнейшем Илья Михайлович, работая в Фи-

зическом институте Академии наук, по сути дела, вел исследования в двух направлениях: он продолжал исследования по оптике вместе с Сергеем Ивановичем Вавиловым, которые потом привели его к знаменитым работам по черенковскому излучению, а также начал работать с Леонидом Васильевичем Грошевым над исследованиями с помощью камеры Вильсона в области ядерной физики.

Мне кажется, что у него на всю жизнь сохранились два направления научной деятельности: одно - связанное с излучениями, скорее, может быть, "для души", а "для дела" - исследования по ядерной физике. Особую радость ему, видимо, доставляло, когда эти два направления он мог объединить, например, в оптике нейтронов. Любовь к этим двум направлениям прошла через всю его жизнь.

Я не буду подробно касаться непосредственно его научных работ, потому что они будут раскрыты в последующих докладах, которые мы прослушаем на этом семинаре. Я больше остановлюсь на некоторых личных впечатлениях. Начинались они у меня со студенческих лет, когда мы слушали Илью Михайловича и его лекции по ядерным реакциям. Это было в конце 40-х годов, причем лекции эти вначале нам не нравились своей монотонностью, но записывать их было довольно удобно. Но еще лучше оказалось готовиться по этим лекциям, когда мы начали сдавать экзамены. Лекции были очень логичны и просты. И вот эта простота изложения была характерной чертой (как я потом понял, когда пришел уже в лабораторию Франка в ФИАН) и для Ильи Михайловича, и для его талантливейшего ученика Федора Львовича Шапиро. Оба они часто пользовались классическими аналогиями различных квантовых эффектов. Я назвал талантливейшего ученика и вспомнил советы Ильи Михайловича. Мне не раз приходилось по его просьбе готовить к каким-то юбилеям ученых поздравления или в скорбных случаях некрологи, он меня всегда останавливал: "Не надо говорить талантливый или как-то выделять одного человека из других, так как это может быть чисто наше мнение, другие такого не придерживаются, и это будет как-то восстанавливать людей против этого человека, которого мы хотим похвалить, возвысить". Но я думаю, что в данном случае с Федором Львовичем можно не придерживаться заветов Ильи Михайловича.

В дальнейшем я столкнулся с Ильей Михайловичем после окончания университета, когда был распределен в Президиум Академии наук, и там Илья Михайлович был членом Ученого совета при президенте Академии наук. Этот Совет при президенте занимался координацией работ по ядерной физике в Академии наук, а также тогда только начинавшимися исследованиями с помощью ядерной физики типа "меченых атомов", активационного анализа - в химии, биологии, технике. Такие секции были при Ученом совете. Илья Михайлович участвовал в работе не только физической секции, но и

прикладных секций, как мы их тогда называли. И для меня было удивительно то, что мы всегда считали, что Илья Михайлович, человек болезненный, всегда все делает с трудом, но тем не менее на довольно длинных заседаниях Ученого совета при президенте, когда уже многие уставали и споры заходили в тупик, Илья Михайлович часто предлагал довольно четкие решения вопросов, с которыми многие соглашались. Я бы хотел еще отметить, что Илья Михайлович, несмотря на свою пассивность, что ли, и инертность (эти качества, по-моему, чисто внешние), на самом деле свои взгляды никогда не менял и довольно твердо их отстаивал, но отстаивал, может быть, не активными, а какими-то пассивными методами. И часто он медленно, но верно добивался тех решений, которые считал нужными.

В конце 30-х годов Илья Михайлович начинает свою педагогическую деятельность в Московском университете. С 1943 года он профессор Московского университета. Я хотел бы здесь отметить (может быть, не все знают), что он был одним из организаторов НИИЯФ МГУ. Это отделение ядерной физики на физическом факультете МГУ сыграло большую роль в подготовке ядерных кадров в Советском Союзе. Здесь роль Ильи Михайловича очень велика, он уже во время войны привлекал с фронта физиков, которые только перед войной окончили физический факультет МГУ. Так, по сути дела, и была создана кафедра ядерной физики, которой долгие годы Илья Михайлович руководил.

Илья Михайлович содействовал и моему переходу из чиновников в научные сотрудники. С его помощью я, проработав положенные три года по распределению в Президиуме Академии наук, перешел к нему в лабораторию, и он отдал меня на обучение Федору Львовичу. Практически с тех пор под руководством Ильи Михайловича я работал несколько лет в ФИАНе в его лаборатории, а затем перешел сюда, в Лабораторию нейтронной физики.

Когда я перешел в ФИАН, мне довольно трудно было на семинарах, особенно когда выступали теоретики. Потом я выяснил, что так было не только для меня одного. Но интересно, что когда после прослушивания доклада в зале наступала тишина, вставал Илья Михайлович или Леонид Васильевич Грошев, который был его заместителем, задавал несколько вопросов теоретикам. После этого те сложные теоретические построения, которые здесь прозвучали, становились понятными, выстраивалась определенная логика, и такое участие в семинарах руководителей лаборатории было очень полезным. Потом уже из разговора с другими я понял, что это не только мое личное впечатление, но и многих других сотрудников.

Илья Михайлович, по сути дела, не был ни теоретиком, ни экспериментатором, он был, я бы сказал, естествоиспытателем. То есть он постоянно пытался получить ответы на какие-то вопросы. Я не знаю, помнит ли Александр Ильич Франк такой случай, когда я работал в ФИАНе. Однажды летом, когда все руководящие кадры лаборатории были в отпуске, формаль-

но назначили меня исполняющим обязанности заведующего лабораторией. В это время из Академии пришла какая-то важная бумага, надо было на нее отвечать. Ильи Михайловича не было, его заместителя - Израиля Яковлевича - тоже. Тогда мы решили поехать к Илье Михайловичу на дачу. Там обсудили вопрос, потом он оставил нас пить чай, и в это время Илья Михайлович попросил Сашу проводить меня в лесок на участке и показать, какие там ведутся "эксперименты". Мы пошли в лес, и Саша показал мне подосиновик, рядом стояла щепочка, на которой отмечалось, как растет гриб по дням.

Я еще вспоминаю, как Илья Михайлович получил Нобелевскую премию, каким радостным он вернулся из Стокгольма и с каким интересом рассказывал всякие подробности нам в лаборатории и как с большим желанием делился своей радостью. Мне потом показалось, что для него Нобелевская премия была не только признанием его заслуг, но и какой-то обязанностью. Он ее воспринял как некую гражданскую обязанность, и этим определялось впоследствии его участие в Пагуошской конференции, в различных акциях нобелевских лауреатов. Он к этому всегда готовился с большой тщательностью. Я хотел бы еще отметить такую особенность Ильи Михайловича, как тщательная подготовка всех выступлений, даже ненаучных. Он очень тщательно и заранее готовился и поэтому, когда выезжал за границу, то пропускал через Главлит свои выступления даже на торжественных церемониях, то есть не только научные доклады. Многие посмеивались, но, как я сейчас понимаю, у него не было проблем, потому что он уже подготовился к этому выступлению. Он не был сторонником импровизаций и в своей жизни всегда старался учитывать реакцию на свои выступления и отдельных личностей, и группировок. Практически на протяжении 35 лет я работал с ним в разных оргкомитетах. Илья Михайлович еще с тридцатых годов участвовал в организации многих довоенных конференций в Москве, Харькове, Ленинграде. В послевоенное время все конференции по нейтронной физике, так называемые Киевские нейтронные школы, проходили при его непосредственном участии. Так что он, несмотря на свою, казалось бы, замкнутость и пассивность, на самом деле был очень активным человеком. Но это была не показная активность, а активность внутренняя, которая позволила Илье Михайловичу выжать все из жизненной силы, отпущенной ему природой.

Я уже говорил о том, что в студенческие годы, когда мы с ним познакомились, он казался нам больным, и даже среди студентов ходили такие слухи, что он переоблучился и теперь дни его сочтены. Даже такой вот факт: нам параллельно читал лекции по биофизике его брат Глеб Михайлович, и мы всегда считали, что Илья Михайлович - старший брат, а Глеб Михайлович намного моложе его. И только когда уже умер Глеб Михайлович, я узнал, что он был старше. Но вот, несмотря на такую болез-



ненность, Илья Михайлович прожил очень напряженную большую жизнь. Даже последние свои дни он активно работал, работал на пределе своих возможностей. Я знаю, как выглядели в эти последние дни его записки воспоминаний о Сергее Ивановиче Вавилове, его общие воспоминания. В последние недели его почерк менялся, буквы становились больше, строка от строки дальше в больших тетрадях, которые он вел, строчки "заваливались". И тем не менее он использовал все отпущенные ему возможности до последнего. Он ведь практически успел все, что, по-видимому, наметил: закончил свои воспоминания, закончил редактирование третьего издания воспоминаний о Сергее Ивановиче Вавилове. И мне кажется, что закончив, он несколько расслабился перед тем, как возвращаться из Москвы в Дубну, и в этот момент его как раз и настигла смерть.

Илья Михайлович прожил большую интересную жизнь естествоиспытателя и закончил ее, действительно, на последних своих силах.

## И.М.ФРАНК - СОЗДАТЕЛЬ ЛАБОРАТОРИИ АТОМНОГО ЯДРА ФИАН

И.Я.Барит

Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

Лаборатория атомного ядра была организована в 1946 году. Первые годы ее существования формировался научный коллектив и тематика ее работы. Когда я вспоминаю этот период/а я коснусь периода десяти лет: с 1946 по 1956 гг. /, мне кажется самым удивительным, как много за эти десять лет было сделано, несмотря на молодость коллектива и отсутствие у него какого-либо опыта работы в области ядерной физики (из старших товарищей в Лаборатории в то время работали только Евгений Львович Файнберг и Леонид Васильевич Грошев). Здесь, безусловно, сказалась способность Ильи Михайловича руководить работами, не навязывая своего мнения другим, стимулируя инициативу, и таким образом содействовать прогрессу работы. И хотя Илья Михайлович не является автором некоторых работ, выполненных в Лаборатории в этот период, что объясняется его исключительно щепетильным отношением к авторству, на всем, что было сделано, лежит отпечаток его творчества. Поэтому я не буду останавливаться в этом докладе на остальных сотрудниках, упоминать, кто что сделал: в данном случае это совершенно лишнее.

В ФИАНе существовал ядерный отдел, который возглавлял Скобельцын, и в 1946 году он был разделен на три лаборатории. Они, из-за секретности или по другим причинам, назывались по фамилиям заведующих. Лаборатория атомного ядра называлась лабораторией Франка, были лаборатория Векслера и лаборатория космических лучей. Основная задача, которая стояла перед лабораторией Франка, была связана с атомной проблемой, а точнее - с разработкой реакторов в Советском Союзе. Илья Михайлович не ограничивался этой задачей, хотя она и была основной, и параллельно в Лаборатории велись работы по ядерной физике как таковой. Это оказалось очень полезным, потому что в дальнейшем имевшийся задел был использован для работы по термоядерной проблеме, для измерений необходимых для решения этой проблемы физических параметров. Происходило взаимное обогащение этих направлений, в частности, с самых первых дней существования Лаборатории велись работы по созданию ускорителя прямого действия (каскадного генератора). Появление в Лаборатории в конце сороковых

годов  $d-t$  -нейтронов сделало возможным создание спектрометра по времени замедления в свинце. Таким образом, происходило взаимное обогащение разных направлений.

Начну с работ, которые касались реакторной проблемы. Большой цикл работ был выполнен по измерению экспоненциальным методом (методом призмы) котельных параметров. Это в 1946-1949 годах было, пожалуй, основным направлением работы Лаборатории. Они были тогда секретными, основные результаты были опубликованы в 1955 году на сессии Академии наук по мирному использованию атомной энергии, которая предшествовала первой Женевской конференции. Речь в этих работах шла об определении реакторных параметров из экспоненциальных опытов, т.е. методом призмы. В то время существовали два альтернативных метода: метод призмы и метод критических сборок. Я должен оговориться, что не являлся участником работ в этой области, и единственное, что меня извиняет, что я о них рассказываю, это то, что по всему циклу работ, которые выполнялись в Лаборатории, трудно найти человека, который бы участвовал во всех работах. Речь шла прежде всего об определении коэффициента размножения ( $K$ ), который есть произведение  $\nu\varphi\theta$ , и влияния на коэффициент размножения всевозможных параметров. Коэффициент размножения - это отношение числа нейтронов двух последующих поколений при развитии цепного процесса,  $\nu$  - это среднее число быстрых нейтронов, испускаемых на один тепловой нейтрон, захваченный ураном,  $\varphi$  - вероятность замедлиться до тепловой скорости, избежав захвата,  $\theta$  - это доля тепловых нейтронов, поглощенных в уране. Призма представляла собой сборку из графита и урана довольно больших размеров. Ее размеры были: стороны квадратного основания по 1,8 м и высота 4,2 м. Шаг ячейки был 20 см, и урановые блоки были диаметром 35 мм. Из теории призмы следовало, что на достаточно большом удалении от источника нейтронов плотность нейтронов убывает экспоненциально. Показатель экспоненты  $\alpha = \ln J / (z_2 - z_1)$  непосредственно связан с геометрическим фактором  $\alpha^2 = \pi^2 / 2a^2 - \alpha^2$ . По этой величине можно определить критический размер сборки, для которой коэффициент размножения будет равен единице. Помимо определения по величине  $\alpha$  геометрического параметра, в экспериментах с призмой можно было определить также все параметры, которые входят в выражение для коэффициента размножения, и сам коэффициент. Параметр  $\theta$  определялся двумя методами: измерением кадмиевого отношения, т.е. регистрацией нейтронов в детекторе, окруженном кадмием, и без кадмия, а также путем сравнения величин  $\alpha^2$  для призм, с прослойкой кадмиевыми полосками и без прослойки кадмием. Величины  $K$ ,  $\nu$  и  $\varphi$  определялись из измерений с призмами с разной концентрацией урана. Также измерялись влияния воздушного зазора, отражения от воды и температурные эффекты. Наряду с экспериментами развивалась также и теория. Развитие теории привело к тому, что было по-

нято, что температура среды должна влиять на диффузионные параметры и, таким образом, на точность определения измеряемых величин. В связи с этим в этот же период были предприняты экспериментальные исследования равновесных спектров и диффузионных параметров тепловых нейтронов в этих размножающих средах в зависимости от температуры и была выполнена попытка определения средней скорости и отклонения распределения нейтронов по скоростям от максвелловского распределения. Эти эксперименты проводились таким образом, что определялись средняя скорость и средняя обратная скорость. Для определения средней скорости измерялись плотность нейтронов с помощью борного детектора и поток нейтронов с помощью кадмиевого фильтра, а средняя обратная скорость определялась путем измерения среднего коэффициента поглощения в веществах с поглощением по закону  $1/\nu(\Sigma_i)$ . Результаты этих измерений позволяли судить о температуре нейтронов в среде и о том, есть ли отклонения от максвелловского распределения. В результате было показано, с одной стороны, что температура среды может отличаться от температуры вытекающих нейтронов, а в гетерогенных средах с ураном температура нейтронов больше, чем температура среды, а спектр отличается от максвелловского, и, во-вторых, что транспортная длина и коэффициент диффузии зависят от нагрева подобных систем. В результате исследования этих явлений Ильей Михайловичем был придуман и предложен импульсный метод измерений диффузии и термализации в различных средах, который и был в этот период реализован. Этот метод состоял в том, что в блоки разных размеров впрыскивался импульсный поток быстрых нейтронов, а дальше изучались на границе блока с помощью борного детектора изменения плотности нейтронов по времени. При достаточно большом удалении по времени от момента вспышки нейтронная плотность спадала по закону  $e^{-\alpha t}$ , где величина  $\alpha$ , как было показано в теории, зависит от геометрического параметра  $\Omega$ . Эта зависимость имеет следующий вид:  $\alpha = \frac{1}{\tau} + \Omega(D_0 - c\Omega)$ . Для малых значений  $\Omega$  (для больших размеров системы) зависимость является линейной.

В этой работе было открыто новое явление, которое было названо диффузионным охлаждением и проявляется в отклонении от линейной зависимости, которое описывается членом  $c\Omega^2$ . Отклонение от линейной зависимости связано с неодинаковой скоростью вытекания нейтронов разных скоростей из среды. Преимущественно вытекают из среды те нейтроны, которые имеют наибольший коэффициент диффузии. С этим связано то, что в результате в самой среде температура может не быть равновесной, а среда может либо обогащаться более быстрыми нейтронами, либо, наоборот, ими обедняться. Поэтому это явление было названо диффузионным охлаждением нейтронов в результате того, что быстрые нейтроны вытекают из среды быстрее, чем медленные. А в принципе, в зависимости от того, как коэффициент диффузии зависит от скорости нейтронов в той

или иной среде, может быть и диффузионное охлаждение, и нагрев. Этот оригинальный метод нашел широкое применение для измерения диффузии и термализации нейтронов и до сих пор используется для изучения различных сред и для изучения взаимодействия нейтронов с молекулами. Метод обладает преимуществом по сравнению со стационарным и позволяет достигать более высокой точности измерений. В этом же направлении лежит разработка идеи, которая возникла в Лаборатории и была в ней реализована, по использованию особенностей замедления нейтронов в тяжелых средах для целей спектрометрии нейтронов (разработка так называемого спектрометра по времени замедления в свинце). Было показано, что нейтроны, замедляясь в тяжелых средах, группируются в зависимости от времени, группируются в довольно узкой области энергий. Таким образом, каждому времени замедления соответствует своя энергия. Это связано, как известно, с зависимостью свободного пробега для рассеяния от скорости, поэтому нейтроны, потерявшие большую энергию и имеющие меньшую скорость, в дальнейшем начинают медленнее замедляться, а те, которые потеряли меньше энергии, замедляются быстрее. Это приводит к фокусировке их по энергии и к наличию зависимости между энергией нейтронов в каждый данный момент в свинцовом кубе от времени, протекшего с момента вспышки. Таким образом, удается использовать этот эффект для спектрометрии, что и было реализовано в Лаборатории. Такой спектрометр по времени замедления в свинце используется до сих пор в Лаборатории, и даже есть планы развития его и постановки, в частности, на мезонную фабрику, а в ближайшем будущем на линейный ускоритель электронов в Институте ядерных исследований, т.е. на источнике, который имеет большую интенсивность нейтронов. Преимуществами этого спектрометра являлись, как известно, большая светосила, малый фон, что делало его уникальным прибором для измерения сечений захвата и, наконец, возможность в широком интервале энергий, от тепловых до десятков киловольт, в едином приборе получать нейтронные сечения. Недостатком, как известно, является относительно плохое разрешение - порядка 30%. Но для определенных задач, где не требуется измерение отдельных резонансов, а лишь получение усредненных сечений, он до сих пор является незаменимым прибором. Кроме того, в случае повышения интенсивности нейтронной вспышки он может быть использован для изучения редких процессов.

Из сказанного видно, как на протяжении этих лет логически развивалось это направление: переход от стационарных к нестационарным методам, вопрос термализации нейтронов в стационарном случае и в нестационарном случае и, наконец, использование этого метода для спектрометрии нейтронов. Все это было логически связано и отражало ту особенность Ильи Михайловича, что он не столько стремился к внешним эффектам

в работе, сколько к глубокому проникновению в физику явлений, а отсюда и проистекала такая вот логическая связанность всего направления, которое в конечном счете и привело к созданию импульсного реактора в Дубне. Интерес к спектрометрии нейтронов был связан не просто с теми возможностями, которые были заложены в разработанном методе, а был связан с тем, что в ходе измерения макроскопических характеристик появился интерес к измерению микроскопических параметров для того, чтобы связать макроскопику с микроскопикой теоретически. Я хотел бы сказать о том, что, занимаясь этой проблемой, Илья Михайлович глубоко понимал физику нейтронов, особенности взаимодействия нейтронов с веществом и внес значительный вклад в развитие этих разделов физики. Наряду с этим он стремился к развитию других разделов ядерной физики в Лаборатории. В это время подоспела потребность, связанная с термоядерной проблемой. В связи с этим в Лаборатории был выполнен большой цикл работ по измерению взаимодействия быстрых нейтронов с ураном, литием, тритием и по измерению термоядерных реакций  $d-t$ - и  $d-d$ -реакций. С самого начала работ в Лаборатории Илья Михайлович стремился развивать всевозможные методы детектирования ядерных излучений. Он положил начало развитию метода ядерных фотоэмульсий в Советском Союзе. Он возглавлял соответствующую комиссию, и в Лаборатории была создана группа, которая занималась ядерными фотоэмульсиями. В частности, эта группа помимо исследований космических лучей проводила в тот период изучение деления ядер урана под действием  $\pi$ -мезонов, протонов, нейтронов и гамма-лучей высоких энергий до 400 МэВ. Было показано, что энергия возбуждения делящегося ядра не зависит от энергий частиц, вызывающих деление, потому что происходит предварительное снятие возбуждения за счет эмиссии частиц. Методом ядерных фотоэмульсий измерялось также рассеяние  $\pi$ -мезонов на протонах и дейтронах в ЛЯПе. Конечно, эти результаты не были прецизионными, но они предшествовали результатам, полученным с электроникой, и показывали, что Илья Михайлович стремился к широкому фронту работ в области ядерной физики. Хотелось бы отметить еще, что работы в то время выполнялись в четко определенные сжатые сроки, и мы выдерживали эти сроки. Я расскажу два эпизода, характеризующие стиль работы того времени. Один эпизод такой. Мы измеряли сечение деления урана для 14 - МэВ нейтронов. Известно, для чего это было нужно. Срок этой работы был определен сжатый. Известно, что в  $d-t$ -реакции испускаются альфа-частицы, и поэтому мониторировать поток нейтронов можно счетом альфа-частиц, что мы и делали. Но Илья Михайлович считал очень важным получение надежных результатов и поэтому потребовал, чтобы помимо мониторирования с помощью альфа-частиц провели мониторирование потока нейтронов с помощью графитовой призмы. Измерения потока нейтронов с помощью графитовой призмы были выполнены. Подошел срок, и надо было выдавать

результат, а измерения с графитовой призмой еще не были полностью закончены. И вот Илья Михайлович собрал совещание всех участников у себя в кабинете, и перед ними было поставлено два вопроса: выдавать или не выдавать результат, а если выдавать, то какую цифру, что выдавать? На первый вопрос все присутствующие ответили положительно. На второй вопрос ответ был такой:  $1,10 \text{ б}^{\text{х}}$ . Второй пример. Нужно было измерить сечение реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ . Измерения выполнялись в ионизационной камере со слоем литий-фтор, но тем не менее в данном случае Илья Михайлович считал желательным параллельно провести измерения другим методом, и эти измерения были проведены также методом ядерной фотоэмульсии, в которую загружалось соединение лития. Оба метода дали согласующиеся друг с другом результаты. Все, что я рассказывал, было выполнено небольшим коллективом менее чем за десять лет. Если при этом учесть, что уровень измерительной техники и вообще методик в то время был в зачаточном состоянии, то, мне кажется, это иллюстрирует, к чему может привести руководство людьми, когда они вдохновлены задачей и когда не связана их инициатива.

---

<sup>х)</sup> В настоящее время принятое значение  $1,04 \text{ б}$ .

## ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ И РАЗМНОЖАЮЩИХ СРЕД

В.И.Мостовой

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва

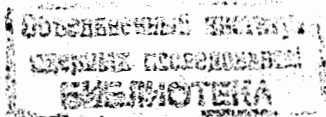
Я хотел бы несколько дополнить рассказ Израиля Яковлевича, касающийся импульсного метода исследований замедляющих и размножающих сред. Дело не только в том, что Илья Михайлович предложил импульсный метод, а в том, что этот метод оказался очень мощным средством изучения замедляющих и размножающих сред как на первом этапе создания атомного реактора, так и на этапе практического использования цепной ядерной реакции для создания атомных электростанций вплоть до последнего времени: чернобыльских и послечернобыльских событий. Этот метод позволил глубже понять и процессы взаимодействия нейтронов с конденсированным состоянием вещества, потому что вот эта константа "С" - константа диффузионного охлаждения - зависит не только от транспортной длины, но также от скорости обмена между нейтроном и средой, которая отражает динамику и структуру конденсированного вещества. Импульсный метод, предложенный Ильей Михайловичем, позволил глубже понять процессы транспорта нейтронов. Со временем здесь возникли вопросы собственных значений, таких, как длина диффузии, время термализации и т.д. Я думаю, что закономерно, что этот метод, названный как явление охлаждения и нагревания тепловых нейтронов при диффузии, зарегистрирован несколько лет назад как открытие. Здесь Израиль Яковлевич сказал, какова была роль этого метода на первом этапе создания первого атомного реактора. В середине пятидесятых годов, когда началось развитие прикладных исследований, связанных с использованием деления ядер для получения энергии, когда начали разрабатываться реакторы для атомных электростанций, оказалось, что эффект термализации нейтронов определяет существенные параметры реактора; от вида спектрометра зависел коэффициент конверсии урана-235 в плутоний, тоже горючее вещество, а также температурный коэффициент реактивности, что важно было для проблемы безопасности. Тогда те, кто занимался проблемой термализации нейтронов, обратились именно к методу, предложенному Ильей Михайловичем, - импульсному методу для изучения термализации. Метод получил новое развитие: интенсивность нейтронов измерялась не только в зависимости от времени, но и в зависимости от энергии, что дало дополнительно очень богатую информацию и позволило глубже проникнуть в процессы взаимодействия нейтрона с веществом. Природа ко-



эфициента охлаждения была более глубоко понята, и, как я уже упоминал, понята проблема собственных значений в транспортной проблеме переноса.

После Чернобыля возникла очень серьезная проблема, волнующая и специалистов, и широкие круги общественности: что будет дальше с реактором четвертого блока? Не наступит ли такой момент, когда может снова произойти самопроизвольный цепной процесс деления? Для этого необходимо было измерить подкритичность той массы урана и плутония, которая была непонятно в какой форме, потому что активная зона, как известно, расплавилась. В тех условиях можно было определить эту подкритичность только импульсным методом. Результаты исследований, проведенных сотрудниками Института атомной энергии, успокаивают обе стороны: и специалистов, и общественность. Оказалось, что подкритичность довольно глубокая.

Илья Михайлович и в физику реакторов, как и в другие области физики, внес свое "я", неповторимое "я".



## К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ИБРА. ПАМЯТИ ИЛЬИ МИХАЙЛОВИЧА ФРАНКА

Ю.Я.Стависский

Институт ядерных исследований АН СССР, Троицк

Впервые я встретился с Ильей Михайловичем Франком в середине 1956 года, с началом работ по созданию ИБРа, и с тех пор соприкасался с ним постоянно более 30 лет. Эти соприкосновения всегда оставляли глубокое впечатление. Мы, особенно в молодости, часто суедемся и делаем много лишнего. Считается, что мудрость приходит с возрастом. Сколько я помню Илью Михайловича, а это уже почти 35 лет, главная его черта, которая на меня всегда производила впечатление, - это мудрость человека и ученого.

Я хочу коснуться некоторых аспектов истории создания импульсного быстрого реактора периодического действия, на основе которого в свое время была создана и развилась Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ. Мы, обнинцы, к которым мы относим и первого директора ОИЯИ - Дмитрия Ивановича Блохинцева, принадлежим, по существу, к Ленинградской школе А.Ф.Иоффе через А.И.Лейпунского - его близкого ученика, нашего учителя. Илья Михайлович - это школа ФИАНа. По-моему, кто-то сказал, что Илья Михайлович без большого энтузиазма относился к проблеме ядерных реакторов, в которой он активно участвовал с первых послевоенных лет. Мне сейчас об этом трудно судить, но кажется, что все дело в личных пристрастиях и интересах времени.

В 1946 г. в ФИАНе была организована лаборатория атомного ядра под руководством И.М.Франка для участия в решении вполне практической задачи - создания атомной энергетики. Об атомной энергетике, как об атомных электростанциях, тогда, конечно, никто серьезно не думал. Это была проблема создания оружия, которая стояла в те годы перед страной как вопрос номер один ее жизни. И определенная ветвь работ проводилась в Академии наук, в лаборатории Ильи Михайловича Франка. Для ядерных реакторов, которые лежали в основе проблемы производства плутония, вопросы диффузии и замедления являлись ключевыми. Этим и определялось направление работ, о котором так интересно рассказал И.Я.Барит. Второй вопрос - это ядерные реакции, определяющие процессы термоядерного син-

теза, которые также детально изучались в лаборатории атомного ядра. Именно эти аспекты практического применения ядерных исследований и вызвали неприятие в его душе. Главным для его души оставался эффект Тамма-Франка-Черенкова. И надо сказать, что среди многих работ, удостоенных Нобелевских премий, эта работа выделяется отсутствием других претендентов, она всегда имела вполне однозначный приоритет. В то же время вся жизнь Ильи Михайловича, его научная жизнь, с 1946 г. была связана с развитием современной нейтронной ядерной физики. Творчески работая в этой области, Илья Михайлович внес в нее очень много своего, много интересных идей, новых решений. Создание /при участии Федора Львовича Шапиро/ Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, ее коллектива и научной атмосферы, фиановской атмосферы, как ее называют, с очень критическим отношением к собственным результатам, когда все работы доводятся до своего логического завершения, - это его важнейший вклад в советскую науку. Я думаю, аналогов такой лаборатории в мире сейчас просто нет.

Историю ИБРа также надо начинать довольно издавна. Началась она в Обнинске. Обнинск, между прочим, связан с Дубной довольно тесно. Примерно в 1949 г. в Обнинске были прекращены работы по разработке протонного синхротрона, которые велись там около трех лет. Те самые работы, которые привели впоследствии к созданию векслеровского 10 ГэВ-синхротрона ЛВЭ. В Обнинске эти работы велись под руководством А.И.Лейпунского - одного из учеников А.Ф.Иоффе, выдающегося физика, которому принадлежит, в частности, первый эксперимент по обнаружению нейтрино, проведенный в лаборатории Резерфорда примерно в 1935 г. По каким-то соображениям, вроде бы по соображениям энергетики (Иваньковская ГЭС!), и было принято решение о сооружении протонного синхротрона в Дубне, соответствующие работы были переданы в ФИАН группе Векслера, а группа Петухова, которая работала в те времена в Обнинске, в 1949 г. перешла в Дубну. В Обнинске же под руководством А.И.Лейпунского началась разработка проблемы быстрых реакторов-бридеров для атомной энергетики. Быстрые реакторы, если их определить по возможности кратко, - это ядерные реакторы, в которых не принимаются специальных мер по замедлению нейтронов. Отсюда вытекают две их особенности: первая - возможность иметь расширенное воспроизводство ядерного горючего, т.е. получать его больше (в виде плутония), чем вы сжигаете в реакторе, - за счет деления природного урана и малости радиационного захвата, что полностью снимает проблему сырьевых ресурсов атомной энергетики. Вторая особенность быстрых реакторов - из-за того, что замедления нет, время жизни нейтронов в них мало, в зависимости от композиции сборки -  $10^{-8}$ - $10^{-6}$  с. Это открывает возможность получения коротких импульсов мощности в раз-

множающихся системах на быстрых нейтронах, начиная от  $10^{-6}$  с (взрывные устройства, которые создавались, естественно, не для физики, но иногда для физики использовались. Мы знаем работы Дивена по использованию импульсов нейтронов подземных ядерных взрывов для нейтронной спектроскопии). С малым временем жизни нейтронов в быстрых реакторах связано и создание импульсного реактора периодического действия.

В начале 50-х годов в группе А.И.Лейпунского работы велись в основном молодежью, только что выпорхнувшей из МГУ и Московского механического института (сейчас МИФИ). Каждый имел как сугубо практическую задачу по физике и технике реакторов, так и задачу по изучению какого-либо ядерного процесса, участвующего в размножении нейтронов в реакторе. И.И.Бондаренко - талантливый ученик А.И.Лейпунского, трагически погибший в 1964 г., выдающийся ученый, оставивший след в очень широкой области ядерной и технической физики. Он занимался активными зонами реакторов, вопросами их расчета, композиции и теплофизики. В то же время чрезвычайно большой вклад внес он в понимание физики процесса деления.

Мне довелось заниматься кинетикой быстрых реакторов и системами их контроля, управления и защиты (СУЗ) совместно с авиационными конструкторами (группа И.Я.Емельянова). История здесь также довольно любопытна. Первые отечественные ядерные реакторы имели системы управления, которые были сняты, по существу, с больших самолетов: автопилот, рулевая машина и тросовый привод, который вместо элеронов таскал поглощающие стержни. Система использовалась практически один к одному. Связь с авиационными конструкторами сохранилась на долгие годы. В то же время я занимался радиационным захватом быстрых нейтронов. Как-то на семинаре, который вел Александр Ильич Лейпунский (надо сказать, что сам Александр Ильич в создании импульсного реактора прямого участия не принимал, не участвовал даже в обсуждениях, он был человек чрезвычайно занятой, но через его учеников участие, конечно, проявлялось), обсуждался по докладу И.И.Бондаренко недавно опубликованный американский эксперимент. Импульсный источник тепловых нейтронов от реактора, полученный путем прерывания пучка, облучал синхронно вращающийся диск, на ободе которого была закреплена урановая фольга. По распределению активности осколков можно было судить о ходе сечения деления урана для тепловых и надтепловых нейтронов. Трудно сказать, по какой ассоциации Дмитрий Иванович Блохинцев сказал: "А нельзя ли создать импульсный реактор, в котором часть активной зоны закреплена на ободе вращающегося диска?". Это была осень 1955 г. К февралю 1956 г. был написан отчет (отчет ФЭИ ИН 1630), в котором были представлены основы концепции ИБРа вплоть до использования режима с подсветкой от ускорителя. Этот отчет,

по-моему, до сих пор не рассекречен и хранится в соответствующих архивах. По выжимкам из этого отчета в 1959 г. появилась наша публикация в "Атомной энергии". Дело тогда шло быстро. В феврале 1956 г. отчет уже рассматривался на Ученом совете Института, в мае же Ученый совет Министерства среднего машиностроения, который вел Ефим Павлович Славский, принял решение по докладу Д.И.Блохинцева и И.М.Франка о создании в Дубне импульсного быстрого реактора ИБР-1 и на его основе - Лаборатории нейтронной физики. Очень велика здесь роль Ильи Михайловича, он сумел со свойственными ему мудростью, культурой общения с самыми разными людьми - от простого человека до министра - обеспечить создание уникальной лаборатории с установкой, не имеющей аналогов в мировой практике. К сожалению, время неумолимо, многих уже нет с нами: нет Ильи Михайловича, нет Федора Львовича Шапиро, нет Дмитрия Ивановича Блохинцева, нет Владимира Александровича Малыха, Игоря Бондаренко, Виктора Вьюнникова, Федора Ильича Украинцева. В коллективный труд по созданию ИБРа все они внесли неоценимый вклад. Многосторонний коллектив позволил быстро решить широкий круг проблем.

Вращающийся диск. Была привлечена из Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ) группа Блохина. По трудовому соглашению за месяц-два они разработали конструкцию, а еще через месяц испытали в защитном боксе ЦИАМа рабочий диск-носитель вкладыша из U-235.

Неподвижная активная зона. Было много дискуссий о ее концепции. Дело в том, что если вспомнить первую публикацию по ИБРу в "Атомной энергии", там приведена оценка длительности импульса 10 мкс. Любопытная цифра, до которой чем дольше, тем дальше. После долгих обсуждений с Дмитрием Ивановичем, Ильей Михайловичем, Федором Львовичем и с нашими товарищами мы вынуждены были принять (из соображений достижения более высокой мощности) вместо концепции компактной активной зоны, позволяющей получить короткий импульс, вариант сборки из плутониевых стержней, разработанных группой Игоря Стефановича Головнина еще для первых быстрых реакторов в Обнинске - БР-1 и БР-2.

Подвижная активная зона. Тоже было много проблем с ее изготовлением и разработкой покрытия. Здесь определяющий вклад был внесен группой технологов из Обнинска под руководством Владимира Александровича Малыха. В то время, в середине шестидесятых годов (я называю этот период эпохой первой конверсии), к задачам атомной энергетики был привлечен ЦНИИ-58 - Научно-исследовательский институт Министерства обороны, который занимался до этого артиллерийскими системами малого калибра, под руководством главного конструктора Грабина. Это был исключительно квалифицированный и опытный коллектив. В свое время он обеспечил, совместно с Горь-

ковским заводом, артиллерией малых калибров потребности практически всей Отечественной войны. Работали по высшим стандартам, "выше мировых". Новые системы за месяц (!) внедрялись в массовое производство. Сегодня трудно поверить в такие темпы. Этот коллектив разработал и изготовил механические и электромеханические системы ИБРа. Радиоэлектронщики из Обнинска под руководством Ю.А.Блюмкиной разработали и изготовили оригинальную систему контроля и управления импульсным реактором. В работах участвовали многие коллективы, я упомянул здесь только основные. Большая работа по созданию самого реактора, экспериментальной базы опытного производства была проведена в Дубне с активным участием Сергея Константиновича Николаева. Перед рождением ИБРа (23 июня 1960 г.), тридцатилетие которого совпало с точностью до дня с кончиной Ильи Михайловича, силами уже складывавшегося тогда коллектива Лаборатории нейтронной физики было создано два физических стенда. С их помощью были получены основные параметры импульсного реактора. Надо сказать, что от ЛНФ в работах участвовала в основном молодежь. Когда в 1960 г. обнинцы ушли, они передали развитие всего направления уже выросшей здесь группе молодежи, среди которых я хотел бы назвать в первую очередь Шабалина, Ананьева, Назарова. Все дальнейшее развитие импульсных реакторов - ИБР-30, ИБР-2 - шло уже целиком силами Лаборатории нейтронной физики под общим руководством Ильи Михайловича Франка, мы же участвовали только как эпизодические консультанты и эксперты.

## НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НА ИБРах

А.Б.Попов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Я хочу познакомить вас с докладом И.М.Франка на Ученом совете в ноябре 1960 г., который посвящен итогам пуска ИБР-1 /1/. Мне кажется, его интересно сейчас подержать в руках как образец того, как тщательно готовился Илья Михайлович к таким научным форумам. Хочу обратить ваше внимание на то, что Ученый совет ОИЯИ в то время действительно был ученым, что особенно подчеркивал Илья Михайлович последние годы, сетуя на за- силье чиновничьего духа в руководящих органах института.

Сегодня мы услышали воспоминания о блестящем начальном пути Ильи Михайловича как ученого, когда он проявил себя очень чутким интерпретатором того явления, с которым столкнулись в ФИАНе при изучении свечения жидкостей под действием гамма-лучей. Потом И.Я.Барит рассказал о деятельности Ильи Михайловича на посту руководителя коллектива в ФИАНе, участвовавшего в реализации реакторной программы. ЛНФ является еще более крупным интегрирующим шагом Ильи Михайловича в его жизненном пути. Мы выросли до очень крупной лаборатории с очень многими направлениями исследований, с числом сотрудников 600 человек. Если из нашего сегодняшнего далека оглядываешься на прожитое время, то сейчас совсем по-другому многое видишь и оцениваешь именно в связи с той ролью, которую играл Илья Михайлович в жизни лаборатории, директором которой он был более 30 лет.

У фиановской группы в 50-х годах была скорее прагматическая цель: стояла атомная проблема в стране, и ее нужно было решать. От И.Я.Барита мы услышали, что хотя в деятельности этой группы и была наука, но наука, ориентированная на конкретную практическую задачу. Тем не менее именно в недрах той деятельности родилось понимание того, как нужно двигаться дальше в развитии нейтронной физики. Понимание того, что нужно сделать для развития импульсных источников нейтронов, что нужно исследовать в первую очередь с помощью этих источников, преломилось здесь, в Дубне, в конкретные дела.

С Ильей Михайловичем мы познакомились в 1955 г., будучи студентами, потом некоторые из нас прошли дипломную работу в лаборатории Ильи Михайловича в ФИАНе. Я не отношу себя к радивым ученикам Ильи Михайловича, но в Дубну мы пришли не просто по распределению. Нас пригласили - это пример того, как тесно складывались тогда взаимоотношения между студентами и людьми, уже активно работающими в науке, когда можно было совершать осознанный шаг выбора студентов в науку. В 1958 г., когда в ЛНФ пришло молодое пополнение физиков, строительство реактора ИБР-1 шло полным ходом. В тот год обозначились контуры реакторного здания, ходили мы на субботники помогать строителям, а летом 1960 г. уже был осуществлен пуск реактора. Программа первых лет исследований была определена еще до пуска реактора. Сейчас трудно судить, как можно разделить влияние между И.М.Франком и Ф.Л.Шапиро, поскольку в обсуждении научной программы, в выборе методик Федор Львович играл активную роль, оставаясь первые годы сотрудником ФИАНа. Существенно отметить то, что еще разработчики ИБР-1 указали один из путей его использования - это спектрометрия нейтронов, использование его для исследований резонансов, проявляющихся в сечениях взаимодействия нейтронов с ядрами. Осознанию важности этого направления, по-видимому, способствовал и визит в 1957 г. Д.Юза, выступившего в ФИАНе с лекцией об исследованиях свойств нейтронных резонансов в США. В то время в мире была такая ситуация: были механические селекторы на тепловых реакторах в Брукхейвене и Аргоне (на одном из которых работал Д.Юз), начаты исследования с нейтронами на Колумбийском синхротроне, линейном ускорителе в Харуэле. И был классический обзор по нейтронным данным - атлас Юза. Объем данных по нейтронным резонансам этот атлас содержал такой: несколько страниц с таблицами резонансных параметров и десятка четыре кривых полных сечений. Поэтому было ясно, что надо пополнить наши знания о параметрах резонансов, что особенно интересно исследовать разделенные изотопы, данные для которых практически отсутствовали. Сразу была определена такая цель, чтобы исследования нейтронных резонансов проводились в многоканальном подходе. Мы понимали, что при захвате нейтрона образуется компаунд-состояние ядра, которое имеет несколько мод возможного распада: с испусканием нейтрона, с испусканием гамма-кванта, с испусканием заряженной частицы или деления. Все эти направления исследований были сразу заложены. Готовились измерения полных сечений, захвата, рассеяния, деления. С приходом Ю.П.Попова, работавшего сначала в ФИАНе, и И.Квитека началась подготовка к исследованиям  $(n, \alpha)$ -реакции в нейтронных резонансах. Это было перенесение того опыта, который имелся в ФИАНе, где проводились работы с этой реакцией на свинцовом кубе.

1958 год был знаменателен яркими событиями. Состоялась Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии. Илья Михайлович



стал лауреатом Нобелевской премии, и в этом же году ему исполнилось 50 лет. Вспоминается 3-й корпус ЛЯП, где лаборатория занимала 10 комнат. К концу 1958 г. в лаборатории было около 70 человек, но очень многие работали в разъездах, особенно в Обнинске, причем не только те, кто был связан с подготовкой пуска реактора, но и радисты наши разрабатывали у Маталина многоканальный анализатор. Поэтому лаборатория была в постоянном движении. Поздравить Илью Михайловича с юбилеем собралось человек двадцать в коридоре (другой возможности не было). Чествование прошло просто и скромно.

ИБР-1 начал работать на эксперимент в 1961 г. Вот динамика его "нагрузки" в часах: 1961 г. - 516 часов; 1962 - 3390; 1963 г. - 2600; 1964 г. - 3127; 1965 г. - 3358; 1966 г. - 4252; 1967 г. - 4541; 1968 г. - 3240. В 1965 г. для сокращения длительности нейтронного импульса был реализован бустерный режим с использованием микротрона. После примерно годичной реконструкции в 1970 г. были запущены ныне действующие ИБР-30 и ЛУЭ-40.

В 1962 г. лаборатория провела первый научный форум, на котором мы впервые доложили результаты своих исследований. Первым ядром, которое многогранно исследовалось, было ядро родия. Илья Михайлович, представляя эту работу, с иронией отметил, что на 17 исследованных нейтронных резонансов приходится 15 авторов. Таково было начало, старт нейтронно-спектрометрических исследований. По мере совершенствования нейтронного источника и развития экспериментальных методик (в том числе вычислительной техники и систем сбора информации) мы пришли к такой ситуации, когда нейтронные резонансы уже исследовались сотнями на одно ядро. Я не хотел бы сейчас вдаваться в научную значимость этих исследований. Упомяну только, что в 60-х годах было еще мало данных по силовым функциям S-волновых нейтронных резонансов, по гамма-ширинам, по плотностям уровней для разделенных изотопов. В этом направлении развивались в первые годы экспериментальные исследования. Затем была разработана методика для изучения спиновых эффектов во взаимодействии нейтронов с ядрами. Если посмотреть последние издания мирового банка нейтронных данных, то там можно найти около 90 ссылок на публикации ЛНФ, на самом деле исследованных ядер больше. Это тот багаж, который лаборатория вложила в общую копилку знаний о свойствах резонансов. Если соотносить это с ролью Ильи Михайловича в направлении классической нейтронной спектроскопии, то следует отметить, что у Ильи Михайловича часто прорывалась неудовлетворенность по поводу парадоксальной ситуации. Мы исследуем индивидуальные резонансы и вроде бы все о них узнаем: положение, ширины, спины; а цель на самом деле более грубая - чтобы по параметрам этих резонансов получить некоторые усредненные характеристики: плотность уровней, силовую

функцию, среднюю радиационную ширину, для которых имелась возможность сопоставления с ядерными моделями. Это несоответствие содержания эксперимента конечному результату, когда опыт дает знания об индивидуальных резонансах, а мы потом все усредняем, "сваливаем в кучу", Илью Михайловича как-то не удовлетворяло. Когда появлялись экспериментальные данные, что некоторые резонансы "выпадают" и не укладываются в статистические представления, то это всегда Илью Михайловича очень возбуждало и радовало и потом становилось объектом его внимания.

Заканчивая, хотел бы еще поделиться содержанием нашего разговора с В.Д.Ананьевым, который состоялся при возвращении с похорон Ильи Михайловича. Это опять взгляд в прошлое. Много в нашей жизни было сложностей, много было всяких переживаний и баталий в стенах лаборатории, но сейчас мы хорошо осознали, что лаборатории крупно повезло. Нам повезло с самого начала, как только мы пришли в лабораторию, в том, что в ЛНФ была такая необычная по сравнению с другими коллективами обстановка. Это не обстановка какой-то сверхдемократии, но обстановка терпимости и придания самостоятельности каждой личности. Никто никогда на нас не давил, не заставлял делать то, что не укладывалось в личное представление, в наше желание. И это очень серьезный и важный момент творческой работы. Именно это шло от Ильи Михайловича.

1. И.М.Франк, ОИЯИ, Р-674, Дубна, 1961.





Приезд Р.Мессбауэра в Дубну. Р.Мессбауэр и И.М.Франк

После семинара в ФИАНе, июль 1963 г. Г.Палевски, И.М.Франк; Ф.Л.Шапиро





В дни вручения Нобелевской премии, Швеция, 1958 г. И.Е.Тамм, П.А.Черенков, И.М.Франк



На пятидесятилетии Намсрайна  
Соднома, 1974 г. И.М.Франк,  
А.М.Говоров, Н.Содном



Готовится пуск ИБР-2, конец 70-х гг. А.А. Васильев, И.М. Франк, А.М. Петросьянц, Ю.А. Щербаков, Э.Н. Каржавина

Начата сборка ИБР-2, 70-е гг. В.Д. Ананьев, Э. Витальев, И.М. Франк



В перерыве между пусковыми работами  
на ЦБР-2, 70-е гг.



На стенде подвижного отражателя  
ИБР-2. И.М.Франк, Е.Д.Воробьев,  
Ю.С.Язвический, В.Д.Ананьев, В.К.Тит-  
ков, конец 70-х гг.





Семидесятилетие И.М.Франка, конференц-зал ЛНФ, октябрь 1978 г.



Встреча И.М.Франка с гостями из КНДР, 80-е гг.





Приятные мгновения, на банкете, октябрь 1969 г.

И.М.Франк, М.А.Ульянов в Доме ученых ОИЯИ





Что там пишут? Ю. П. Попов и И. М. Франк, 80-е годы

## ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ НЕЙТРОНЫ И ЯДРА: СИЛЬНЫЕ И СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В.П.Алфименков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ изначально создавалась как ядерно-физический центр для исследований с резонансными нейтронами. Было совершенно естественным, и это хорошо понимало руководство ЛНФ, включить в круг экспериментальных возможностей Лаборатории возможность проведения исследований с поляризованными резонансными нейтронами и поляризованными ядрами. Такие исследования позволяют получать новую, часто уникальную информацию о свойствах нейтронов и ядер и о взаимодействии между ними. Работы по подготовке к этим исследованиям были начаты практически со времени создания Лаборатории, в конце 50-х годов. Успеху работ очень благоприятствовало то, что в начале 60-х годов был достигнут значительный прогресс в динамической поляризации протонов, а также был разработан метод получения сверхнизких температур растворением гелия-3 в гелии-4. Поляризованная протонная мишень при фильтрации через нее нейтронного пучка позволяет получать поляризованные нейтроны, поскольку сечение рассеяния нейтронов на протонах сильно зависит от спинов. Такой метод, очень удобный для поляризации резонансных нейтронов, был предложен и впервые реализован в ЛНФ ОИЯИ. Использование же растворения гелия-3 в гелии-4 позволяет в стационарном режиме получать температуру в несколько сотых градуса Кельвина, что в магнитных полях обычных электромагнитов с железным сердечником дает возможность хорошо поляризовать ядра редкоземельных элементов, интересные для исследований с резонансными нейтронами.

К середине 60-х годов первый этап создания в ЛНФ ОИЯИ установки для исследований с поляризованными нейтронами и ядрами был завершен, и были начаты ядерно-физические исследования. Эта установка размещалась на одном из нейтронных пучков нейтронного источника ЛНФ (ИБР + микротрон) и включала в себя следующие основные узлы:

1. Поляризатор нейтронов - динамически поляризованную протонную мишень с размерами поперек пучка  $3 \times 4$  см, позволяющую получать пучок с поляризацией 0,5-0,6 при потере интенсивности примерно в 10 раз. Поляризатор располагался на расстоянии 11 метров от активной зоны реактора ИБР. Поляризация пучка - поперечная.

2. Систему реверса нейтронной поляризации, обеспечивавшую реверс поляризации нейтронов с энергиями до нескольких сотен эВ.

3. Систему для поляризации исследуемых ядер - электромагнит СП-47 с магнитным полем 15-20 кЭ, расположенный за протонной мишенью на расстоянии 2,5 м от нее. В этом электромагните можно было размещать либо криостат с откачкой гелия-3 (для статической поляризации ядер при температуре  $T \approx 0,3$  К); либо криостат с откачкой гелия-4 (для динамической поляризации ядер при температуре  $T \approx 1,5$  К).

4. Нейтронные детекторы для измерения полных нейтронных сечений в исследованиях пропускания. В качестве нейтронных детекторов использовались нейтронные счетчики с обогащенным бором (газовые пропорциональные и жидкостные сцинтилляционные). Детекторы могли размещаться на расстоянии 60 и 120 м от активной зоны реактора ИБР.

Эта установка проработала до остановки реактора ИБР на реконструкцию в 1968 г. На ней проведены исследования пропускания поляризованных нейтронов через поляризованные гольмиевую и дейтонную мишени. Ядра гольмия поляризовались статически (методом Гортера-Роуза), а ядра дейтерия - динамически (аналогично протонам в нейтронном поляризаторе). Результатом исследований явилось определение спинов двух десятков низколежащих резонансов ядра гольмия-165, а также экспериментальный выбор реализующегося в  $(n-d)$ -взаимодействии набора длин рассеяния.

На реконструированном источнике нейтронов ЛНФ ОИЯИ (реактор ИБР-30 + линейный ускоритель ЛУЭ-40), вступившем в строй в 1970 г., последовательно была создана новая установка для исследований с поляризованными нейтронами и ядрами. Эта установка включала в себя те же основные узлы, что и установка, запущенная в середине 60-х годов, однако все узлы установки были существенно модернизированы для расширения ее экспериментальных возможностей и улучшения эксплуатационных характеристик. Исследования на установке проводятся до настоящего времени. Следует отметить, что дальнейшая модернизация установки проводилась в процессе работы на ней. Приведем параметры основных узлов установки на сегодняшний день и укажем характер модернизации этих узлов:

1. Поляризатор пучка. Используется поляризованная протонная мишень того же типа, что и ранее. Размеры мишени поперек пучка увеличены до 5x6 см, повышена стабильность поляризации за счет стабилизации частоты СВЧ-системы и улучшения стабилизации величины магнитного поля, улучшены эксплуатационные характеристики криостата, охлаждающего рабочее вещество мишени до температуры  $\sim 1$  К.

2. Система проводки и реверса нейтронной поляризации. Дополнительно к старой системе реверса поляризации в магнитных полях специальной конфигурации создана система реверса поляризации нейтронов в широкой

области их энергий путем поворота на  $180^\circ$  всей протонной мишени вокруг оси, перпендикулярной пучку. Эта система реверсирует поляризацию нейтронов всех энергий, поляризуемых пропусканием через поляризованную протонную мишень. Создана система для адиабатического поворота нейтронной поляризации из поперечной в продольную ориентацию. Эта система позволяет получать нейтроны с определенным значением спиральности вплоть до энергий  $\sim 100$  эВ.

3. Система для поляризации исследуемых ядер. Используется тот же электромагнит СП-47. Криостат с откачкой гелия-3 заменен криостатом с растворением гелия-3 в гелии-4 с косвенным охлаждением рабочего вещества мишени гелием-4 через специальный теплообменник (прямое охлаждение мишени в растворе гелия-3 в гелии-4 не позволяет работать с медленными нейтронами из-за их большого захвата в гелии-3). Этот криостат обеспечивает температуру 20 мК, что позволяет получать высокую поляризацию не только для ядер гольмия, но и для широкого круга других редкоземельных ядер.

4. Детекторы нейтронов. В качестве нейтронных детекторов имеется возможность использовать жидкостный  $\gamma$ -детектор с (n- $\gamma$ )-конвертором, стандартные гелиевые счетчики, а также специально разработанный многосекционный гелиевый счетчик больших размеров (диаметр 250 мм, длина 500 мм) с высоким давлением гелия-3 (до 10 атмосфер).

5. Система управления установкой и накопления информации. Управление установкой, накопление информации и ее предварительная обработка производятся специальным электронным модулем, созданным на базе малой ЭВМ.

Коротко рассмотрим выполненные на этой установке экспериментальные работы и их результаты.

#### 1. Исследования спиновой зависимости нейтронных сечений

Проводились исследования полных нейтронных сечений при изучении пропускания поляризованных нейтронов через поляризованные ядерные мишени. Были исследованы редкоземельные ядра  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{167}\text{Er}$  и  $^{169}\text{Tm}$ . Исследования проводились при энергиях нейтронов от нескольких электронвольт до  $\approx 100$  кэВ (нейтроны более высоких энергий уже плохо поляризуются пропусканием через поляризованную протонную мишень).

В области разрешенных резонансов для исследованных 5 редкоземельных ядер были определены значения спинов более 200 нейтронных резонансов.

В области усредненных сечений для тех же ядер были получены энергетические зависимости разностей полных нейтронных сечений в двух возможных для S-волновых нейтронов спиновых каналах (с суммарным спином

$I^{\pm 1/2}$ ). Оказалось, что они малы ( не превосходят нескольких десятых долей барна), однако в их энергетических зависимостях наблюдаются заметные нерегулярности. Эти нерегулярности трудно связать с потенциальным рассеянием, поскольку интервал энергий, на котором они проявляются, слишком мал. Скорее всего, здесь проявляется зависящая от спина структура типа входных состояний. Для уточнения этого вопроса нужны дополнительные исследования.

Полученные значения разностей усредненных сечений в двух спиновых каналах позволяют сделать оценки спиновой зависимости соответствующих нейтронных силовых функций и величины мнимой части спин-спинового члена в оптическом потенциале. Соответствующие оценки показывают, что нейтронные силовые функции в разных спиновых каналах отличаются не более, чем на 10%, мнимая часть спин-спинового потенциала не превосходит 100 кэВ.

## 2. Исследования магнитных моментов компаунд-состояний редкоземельных ядер

Долгое время магнитные моменты компаунд-состояний сложных ядер, соответствующих их нейтронным резонансам, не поддавались экспериментальному измерению из-за крайней малости времен жизни этих состояний ( $10^{-15}$  с). В середине 70-х годов в ЛНФ ОИЯИ такие измерения удалось сделать для некоторых низковольтных резонансов ряда редкоземельных ядер. По предложению Ф.Л.Шапиро было использовано то обстоятельство, что при наложении на ядро с ненулевым магнитным моментом внешнего магнитного поля ядерные уровни испытывают зеемановское расщепление, а если при этом ядра и поляризованы, то возникает сдвиг нейтронного резонанса относительно его положения при отсутствии ядерной поляризации. Этот сдвиг имеет порядок величины разности энергий взаимодействия с магнитным полем магнитного момента ядра до и после захвата нейтрона. В достижимых магнитных полях сдвиг оказывается очень малым из-за малости ядерных магнитных моментов. Так, при различии магнитных моментов в один ядерный магнетон, в магнитном поле  $10^7$  Э (такие внутриатомные поля есть на ядрах некоторых редкоземельных элементов) соответствующий сдвиг нейтронного резонанса имеет величину  $3 \cdot 10^{-5}$  эВ. Измерения таких сдвигов крайне сложны, поскольку ширины нейтронных резонансов сложных ядер имеют порядок  $10^{-1}$  эВ. Тем не менее в ЛНФ ОИЯИ их удалось провести. В результате были измерены магнитные моменты 11 нейтронных резонансов для ядер **Tb**, **Dy**, **Er** и **Ho**. Оказалось, что эти магнитные моменты имеют величины порядка ядерного магнетона, причем их среднее значение и флуктуации относительно среднего значения удовлетворительно согласуются с теоретическими оценками, выполненными с использованием статистической модели ядра.

### 3. Исследования нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах

В середине 60-х годов удалось подтвердить гипотезу универсальности слабого взаимодействия. В экспериментах по исследованию  $\gamma$ -излучения при радиационном захвате поляризованных тепловых нейтронов атомными ядрами были обнаружены эффекты нарушения пространственной четности. Эти эффекты имели величину порядка  $10^{-4}$ , что значительно превосходило относительную силу слабого взаимодействия в сравнении с основным в ядрах сильным взаимодействием. Столь большая величина наблюдаемых эффектов объяснялась их усилением в ядерных процессах за счет смешивания слабым междуклонным взаимодействием близлежащих ядерных состояний противоположной четности ( $S$ - и  $P$ -волновых нейтронных резонансов). Однако до начала 80-х годов такое объяснение экспериментально подтверждено не было и носило гипотетический характер. В это время в теоретических работах О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума было показано, что смешивание по четности нейтронных резонансов слабым взаимодействием должно приводить к резонансным  $P$ -нечетным эффектам в полных нейтронных сечениях. Речь шла о зависимости полного сечения в  $P$ -волновых резонансах для неполяризованных ядер от спиральности нейтронов (т.е. от того, поляризованы нейтроны в направлении их импульса или навстречу ему). Энергетическая зависимость разности полных сечений для нейтронов разных спиральностей в таких резонансах должна повторять энергетическую зависимость самого резонансного сечения. Эффекты могут иметь место только в резонансах со спином  $I^{\pm}1/2$ , поскольку лишь такие резонансы могут смешиваться с  $S$ -волновыми резонансами. Величины эффектов зависят от параметров смешивающихся резонансов и от интенсивности их смешивания, характеризующейся соответствующим матричным элементом слабого взаимодействия. Сами матричные элементы - случайные величины с нулевым средним значением и определенной дисперсией, которая может быть оценена из статистической теории ядра. В благоприятных случаях эффекты нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах могут быть очень большими и достигать величины порядка 10%.

Экспериментальные исследования эффектов нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах впервые были начаты в ЛНФ ОИЯИ в 1982 году и продолжают до настоящего времени. Исследована зависимость полных нейтронных сечений от спиральности нейтронов более чем для 15 резонансов ядер  $Br$ ,  $Cd$ ,  $Sn$ ,  $I$ ,  $Zr$ ,  $Nb$ ,  $Th$ ,  $U$ . Для 5 из исследованных резонансов были наблюдаемы  $P$ -нечетные эффекты. Особенно впечатляющим оказался эффект нарушения пространственной четности в резонансе с энергией 0,75 эВ ядра  $^{139}La$ . В этом случае резонансное сечение при изменении спиральности нейтронов меняется примерно на 15%.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с предсказаниями модели смешивания слабым взаимодействием  $S$ - и  $p$ -волновых нейтронных резонансов. Что касается возможностей извлечения из наблюдаемых в сложных ядрах эффектов нарушения пространственной четности количественной информации о слабом межнуклонном взаимодействии, то они, по-видимому, довольно ограничены из-за большой сложности процессов в ядрах. Современная теория ядра в состоянии дать лишь статистическое описание этого явления. Для получения значимых количественных результатов в такой ситуации необходимо существенно увеличить число нейтронных резонансов с наблюдаемым эффектом нарушения пространственной четности, что является очень непростой экспериментальной задачей.

#### 4. Исследования $P$ -четных корреляций в радиационном захвате нейтронов ядрами

Для извлечения из наблюдаемых в нейтронных резонансах эффектов нарушения пространственной четности численных значений матричных элементов смешивания слабым взаимодействием  $S$ - и  $p$ -волновых нейтронных резонансов необходима информация о параметрах смешивающихся резонансов. Одним из таких параметров является амплитуда парциальной нейтронной ширины  $p$ -резонанса в спиновом канале с полным моментом нейтрона, равным  $1/2$ . Эта величина может быть получена в исследованиях угловых распределений  $\gamma$ -излучения радиационного захвата нейтронов, возникающего при переходе ядра из состояния, соответствующего данному  $p$ -резонансу, в другое состояние с известными характеристиками.

В ЛНФ ОИЯИ были исследованы угловые распределения  $\gamma$ -квантов прямых переходов в основные состояния при захвате нейтронов в резонансы 1,3 эВ ядра  $^{117}\text{Sn}$  и 7 эВ ядра  $^{113}\text{Cd}$ . Изучались асимметрия выхода  $\gamma$ -квантов "вперед-назад" при захвате неполяризованных нейтронов и "право-левая" асимметрия (по отношению к направлению спина нейтронов), возникающая при захвате поперечно поляризованных нейтронов. Такие асимметрии, не связанные с нарушением пространственной четности, часто называют (может быть, не очень удачно)  $P$ -четными корреляциями. Характер связи между рассматриваемыми асимметриями и интересующей нас амплитудой нейтронной ширины таков, что каждая из асимметрий дает два возможных значения амплитуды ширины. Сопоставление же результатов, полученных из двух асимметрий, должно позволить выбрать единственное значение амплитуды ширины.

Экспериментальные результаты оказались противоречивыми. Среди полученных из двух асимметрий 4 значений амплитуд парциальных нейтронных ширин не оказалось совпадающих значений. Причем это имеет место и в случае с резонансом  $^{117}\text{Sn}$ , и в случае с резонансом  $^{113}\text{Cd}$ . Объяснить



такое противоречие возможными экспериментальными неточностями не удается. Теоретические соотношения, связывающие асимметрии с амплитудой нейтронной ширины, получены на основе весьма общих представлений, в справедливости которых до сих пор ни у кого сомнений не возникало. Поэтому необходимы дальнейшие исследования этого вопроса.

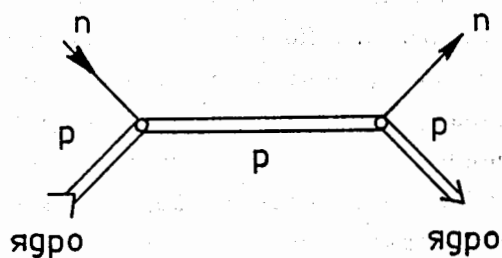
## К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛЕНИЯ Р-НЕЧЕТНЫХ ЭФФЕКТОВ

Ю.Г.Абов

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Ваша лаборатория имеет прямое отношение к открытию резонансного механизма усиления Р-нечетных эффектов, а это действительно замечательное открытие, потому что впервые были обнаружены Р-нечетные эффекты огромной величины: на уровне 10%. Лаборатория имеет отношение к теоретической стороне проблемы, а точнее - к истории вопроса. После того, как мы обнаружили Р-нечетный эффект в  $(n, \gamma)$ -реакциях на  $S$ -резонансах, возникла проблема: а нельзя ли использовать не только  $S$ -резонансы и не только нейтроны в качестве первичной радиации? Важно возбудить ядро, а это можно сделать и протонами, и мезонами, и не обязательно в  $S$ -волне. Такая задача возникла перед И.С.Шапиро, она была инициирована И.И.Левинтовым, который хотел понять, какие Р-нечетные эффекты и какой величины можно наблюдать, используя пучки нашего протонного синхротрона, хватит ли интенсивности для их исследования. Иосиф Соломонович поручил решение этой задачи своим ученикам Г.А.Лобову и В.А.Карманову. Задача была решена в достаточно общем виде, но авторы имели в виду радиационные процессы. Короче говоря, в задаче было снято ограничение на вхождение в мишень только  $S$ -волны. Была получена правильная формула, которая содержала в себе новый механизм усиления, ныне получивший название резонансного. Работа была опубликована в 1969 г., затем Г.А.Лобов опубликовал аналогичную работу в 1970 г. К сожалению, на эти работы мы не обратили внимания, а сами авторы вспомнили о них лишь спустя десять или более лет. Из полученной формулы следует, что если на мишень падают р-нейтроны (или протоны), т.е. "основной" является р-волна, а не  $S$ -волна, то возникает дополнительное усиление, и я сейчас покажу, что в рассмотренном случае сам процесс, вернее, вторичное излучение, принципиального значения не имеет, так как интерференция обуславливается входным, а не выходным каналом. Но прежде всего вспомним историю вопроса. Авторы решили посоветоваться с Ф.Л.Шапиро. Как вы увидите, для оценки величины эффекта на нейтронном пучке нужно было знать, чему равняется отношение нейтронных  $S$ - и р-ширин. В те годы таких экспериментальных данных было мало, но было ясно тем не менее, что усиление есть, но какое? По совету Ф.Л.Шапиро, авторы не настаивали на большой величине усиления и сделали "скромный" вывод

о том, что эффект будет того же порядка величины, что и в нашем эксперименте. Но это заключение исключало постановку экспериментов не только на ускорителе, но и на реакторе ввиду того, что интенсивность р-нейтронов мала. Огромная заслуга О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума заключается в том, что, рассматривая Р-нечетные нейтронно-оптические явления, они сделали совершенно правильные количественные оценки. Они были первыми, кто это правильно сделал. На возможное существование таких эффектов впервые указал Мишель в 1964 г., но ни о каком резонансном механизме усиления речи не шло. Форте был первым, кто обратил внимание на роль р-резонансов, однако он имел в виду только одночастичные состояния, и до сих пор пытается объяснить им самим впервые наблюдаемые огромные Р-нечетные нейтронно-оптические явления (оптическое вращение вектора поляризации и дихроизм), используя одночастичный (валентный), а не "компаунд-ядерный" механизм усиления Р-нечетных эффектов. Роль О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума, рассмотревших конкретные явления и сделавших правильные оценки, нельзя недооценивать. Кстати говоря, они предсказали Р-нечетные нейтронно-оптические эффекты практически одновременно с появлением экспериментальных результатов Форте. В конце концов, экспериментатору важно знать, каким должен быть эффект, а не кто первый высказал идею. Однако, когда речь идет об официальном оформлении открытия, то ситуация меняется. Теперь я поясню сущность явления "на пальцах", не вникая в детальные расчеты. Пусть энергия нейтронов близка к энергии р-резонанса. Для конкретности я рассматриваю упругий процесс. Изобразим его графически:

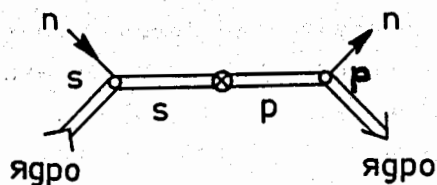


Опуская фазовые множители, запишем амплитуду процесса (р-волна на входе и на выходе):

$$f_{pp} \sim \sqrt{\Gamma_n^p} \frac{1}{E - E_p + i\Gamma_p/2} \sqrt{\Gamma_n^p},$$

$\Gamma_n^p$ ,  $\Gamma_p$  - нейтронная и полная ширины р-резонанса,  $E$  - энергия нейтрона,  $E_p$  - резонансная энергия. Теперь допустим, что рядом находится S-резонанс, и нейтроны с заметной вероятностью могут поглощаться

ядром в S-волне. Однако слабое взаимодействие переводит S-волну в p-волну. Иными словами, я рассматриваю P-нечетную примесь ближайшего p-резонанса к этому S-состоянию:



$$f_{sp} \sim \sqrt{\Gamma_n^s} \frac{\langle H_W \rangle}{(E - E_s + i\Gamma_s/2)(E - E_p + i\Gamma_p/2)} \sqrt{\Gamma_n^p}$$

Здесь  $\langle H_W \rangle$  - слабый матричный элемент. Полная амплитуда  $f = f_{pp} + f_{sp}$ . Дифференциальное сечение определяется квадратом полной амплитуды, которая содержит интерференционный член  $\sim f_{pp} f_{sp}$ . Его относительная величина, т.е. отношение амплитуд  $f_{sp}/f_{pp}$  определяет величину любого P-нечетного эффекта (в данном случае вращение спина или дихроизм)

$$\frac{f_{sp}}{f_{pp}} \sim \sqrt{\frac{\Gamma_n^s}{\Gamma_n^p}} \frac{\langle H_W \rangle}{E - E_s + i\Gamma_s/2} \sim \sqrt{\frac{\Gamma_n^s}{\Gamma_n^p}} \frac{\langle H_W \rangle}{D}$$

Поскольку  $E \approx E_p$ , в знаменателе стоит разность энергий S- и p-уровней, которую можно, для оценки, заменить усредненным значением  $D$ . Второй множитель определяет так называемое (И.С.Шапиро) динамическое усиление. А первый множитель и представляет собою резонансное усиление. Известно, что  $\Gamma_n^s \gg \Gamma_n^p$  и, как показали Сушков и Фламбаум, величина эффекта может достигнуть нескольких процентов. Поскольку конечные состояния обоих графиков идентичны, т.е. в отношении  $f_{sp}/f_{pp}$  не входят, можно с равным правом рассматривать и радиационный захват. А теперь хочу обратить внимание на одну тривиальную деталь. Почему обе амплитуды, в данном случае  $f_{pp}$  и  $f_{sp}$ , складываются, почему имеет место интерференция? Нейтрон входит в ядро, не зная, в какой он волне, S- или p-. Оба процесса имеют место одновременно, как в известном мысленном эксперименте дифракции электронов на двух щелях. Поэтому обе возможности неотделимы друг от друга. Если каким-то образом проследить за нейтроном и точно выяснить, по какому "пути" он прошел, то интерференция исчезнет. Вспомните: если каким-то образом, например, лазерным лучом, установить, что данный электрон прошел через данную щель, то интерференционная картина исчезнет, на экране получим простое наложение двух однощелевых изображений.

## УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

Ю.Н.Покотилловский

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ультрахолодные нейтроны, эксперименты с которыми были начаты в 1968 году, сейчас уже общепризнанный рабочий инструмент физиков, который уже дал немало положительных результатов и по-прежнему привлекает к себе людей, работающих в этой области, как красивый физический объект. Моя цель: напомнить о первом эксперименте в этой области в 1968 г., связанном непосредственно с работой реактора ИБР, и дать очень краткий обзор, что в мире сделано, и в каком состоянии это дело находится сейчас.

В 1932 г. был открыт нейтрон. Формула для коэффициента преломления нейтрона

$$n^2 = 1 - \frac{E_{2p}}{E}, \quad E_{2p} = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi \sum_i N_i b_i, \quad (1)$$

где  $E$  - энергия нейтрона,  $b_i$  - когерентная длина рассеяния ядер вещества,  $N_i$  - число атомов в единице объема,  $m$  - масса нейтрона, видимо, была выведена вскоре. Она выводится очень просто из уравнения Шредингера. Серьезная работа, исследующая когерентные эффекты при распространении нейтрона в веществе, - это работа Лэкса 1951 г.<sup>11/</sup>. Б.М.Понтекорво неоднократно говорил, что первые слова о нейтронной бутылке Ферми произносил еще до войны. Из этого элементарного выражения для коэффициента преломления видно, что как только энергия нейтрона становится меньше граничной, коэффициент преломления становится чисто мнимым. Коэффициент отражения нейтронов

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2)$$

(здесь написан в упрощенной форме для нормального падения нейтрона на стенку) становится в идеальном случае равным 1. На самом деле длина рассеяния содержит мнимую часть, в связи с этим коэффициент отражения не строго равен 1. Для реальной ситуации при использовании хороших веществ оказывается, что коэффициент отражения от единицы может отличаться

для ультрахолодных нейтронов на  $10^{-5}-10^{-6}$ . Нужно, чтобы сечение захвата было маленькое, а тепловые колебания стенок ловушки, которые могут приводить к нагреву нейтронов и выбыванию из объема хранения, можно задавить глубоким охлаждением. Проблема эта обсуждалась во многих местах, но первая публикация Зельдовича появилась в 1959 г.<sup>/2/</sup>. Это очень короткая заметка, в которой указано, что можно удерживать нейтроны в замкнутых полостях, и сделаны оценки по порядку величины, какие можно ожидать времена удержания, связанные с коэффициентом потерь при захвате и нагреве нейтронов. В следующем году появилась обстоятельная работа В.В.Владимирского<sup>/3/</sup>, которая посвящена холодным и ультрахолодным нейтронам в аспекте их взаимодействия с магнитными полями разных конфигураций, в том числе обсуждались магнитные нейтроноводы и магнитные бутылки. Впоследствии эта работа сыграла свою роль в реализации подобных устройств. В 1968 г. Ф.Л.Шапиро перенес эти разговоры в плоскость реального воплощения. Ситуация тогда осложнилась тем, что реактор ИБР в 1968 г. прекращал свое существование, его предполагалось остановить и заняться реконструкцией. В связи с этим использован экзотический режим редких вспышек: 1 импульс за 5 секунд, и этот режим было решено использовать для поиска ультрахолодных нейтронов. Почему не занялись ультрахолодными нейтронами существенно раньше? Дело в том, что очень низкая энергия - это диапазон  $10^{-7}$  эВ - приводит к тому, что из максвелловского спектра

$$\frac{\Phi_{УХН}}{\Phi_0} \approx \frac{1}{8} \left( \frac{E_{2p}}{E} \right)^2 \sim 10^{-11} \quad (3)$$

можно ожидать, что отношение потока ультрахолодных нейтронов к полному тепловому потоку на уровне  $10^{-11}$  или меньше, и об этом можно было говорить только как об экзотическом явлении. Во-вторых, были трудности выделения потока УХН на фоне основного конкурирующего теплового потока.

В 1968 г. Федор Львович написал очень хороший обзор в УФН "Электрический дипольный момент элементарных частиц"<sup>/4/</sup>. Эта проблема актуальна и по сей день. Там он нарисовал известную схему, как можно было бы поставить эксперимент по поиску электрического дипольного момента с использованием ультрахолодных нейтронов. Таким образом, был практический импульс + сочетание обстоятельств: явная потребность в постановке очень актуального эксперимента, окончание работы реактора ИБР и наличие желающих принять участие в этом эксперименте. Это привело к тому, что нам удалось в очень простом опыте выделить поток ультрахолодных нейтронов и оценить экспериментально их время жизни в нейтроноводе<sup>/5/</sup>. Я коротко расскажу об этом эксперименте. Он был очень прост и крайне быстро сделан малыми силами. Была использована в качестве нейтроновода промыш-

ленная медная труба, протравленная внутри, изогнутая ручным способом. Внутри нее около активной зоны находился диск - полиэтиленовый конвертор, потому что ультрахолодные нейтроны не могли бы пройти из замедлителя через медную стенку. По загнутому нейтроноводу УХН, отражаясь от стенок, диффундировали в очень просто устроенный детектор, перед детектором стояла тонкая медная шторка толщиной 1 микрон, она поворачивалась и закрывала то один, то второй детектор. Эта шторка совершенно не влияла на фон и на возможное наличие здесь нейтронов более высоких энергий, и таким образом она могла являться фильтром, пропускающим или не пропускающим ультрахолодные нейтроны на очень тонкий сцинтилляционный детектор. Была чрезвычайно низкая скорость счета -  $7 \cdot 10^{-3}$  н/с, но работали мы в условиях низкого фона в течение 5 секунд между импульсами реактора. Использование импульсного реактора для практических работ с ультрахолодными нейтронами вряд ли в настоящее время имеет смысл в силу малой средней мощности. Но для эксперимента по обнаружению, несмотря на то, что мощность крайне низкая, импульсный характер работы оказался кстати, позволив существенно понизить фон и четко отфильтровать УХН от фоновых нейтронов.

Кроме того, в этой работе проводились измерения с наполнением трубы гелием, писались простые уравнения распространения нейтронов в нейтроноводе в диффузионном приближении, и это позволило нам оценить (не очень точно, правда) среднее время жизни нейтронов в такой трубе. Оно оказалось порядка 200 секунд, а интенсивность, полученная на детекторе, неплохо согласовалась с расчетной. Вот в этом состоял простой эксперимент. Он показал, что ультрахолодные нейтроны можно увидеть даже на слабом реакторе, наблюдать, измерить их поток; и расчетная интенсивность, и время удержания достаточно неплохо согласуются с теорией. После этого работы на этом реакторе были прекращены, и мы перенесли свою деятельность в институт им. Курчатова. Там реактор в 1000 раз более мощный, и интенсивность получили соответственно в 1000 раз более мощную. Начались многочисленные эксперименты по хранению нейтронов в бутылках разных конфигураций. Сразу же мы наткнулись весной 1969 г. на серьезные расхождения в коэффициенте потерь между теорией и экспериментом и долго пытались выяснить, в чем же тут причина.

Основным экспериментом, ради которого вначале и занялись ультрахолодными нейтронами, был эксперимент по поиску электрического дипольного момента. Используется так называемый метод отдельных осциллирующих полей. Почему ультрахолодные нейтроны здесь дают существенный рывок в чувствительности? Ширина резонансной кривой определяется временем пребывания нейтронов в области прецессии. Если есть электрический дипольный момент, тогда имеется вклад в потенциальную энергию за счет

взаимодействия с внешним электрическим полем, и оно должно сказываться в изменении частоты прецессии, что приводит к сдвигу резонансной кривой. Это и измеряется в резонансном эксперименте. Если в пучковых экспериментах до того работали с тепловыми нейтронами, и время пребывания нейтрона в области прецессии составляло миллисекунды, то сейчас в экспериментах по поиску электрического дипольного момента это время составляет несколько десятков секунд. Постепенно выявились две основные лидирующие группы в области поиска дипольного момента - группа Лобашова-Сереброва в ЛИЯФе и интернациональная группа, работающая на реакторе Института Лауз-Ланжевена в Гренобле. Последний опубликованный результат из Гренобля -  $|d_n| < 1,2 \cdot 10^{-25} \text{ е.см (95\%)}^{/6/}$ . Это улучшение по сравнению с пучковым экспериментом примерно на два порядка. Результат группы из ЛИЯФ -  $d_n = (0 \pm 4) \cdot 10^{-26} \text{ е.см}^{/7/}$ . Задача поиска ЭДМ нейтрона - одна из наиболее фундаментальных в современной физике, и применение УХН здесь дало наиболее осязаемый вклад.

Вернусь снова к проблеме хранения. Долго не находили соответствия в экспериментальных и теоретических данных по хранению. Постепенно в результате различных опытов выяснилось следующее: видимо, основной причиной расхождений (составляющих чуть ли не два порядка для наиболее перспективных с точки зрения хранения УХН веществ - углерода, бериллия, стекла) является наличие водорода в приповерхностных слоях вещества. Это было довольно неожиданным даже для специалистов: мы обсуждали это с физико-химиками в академических институтах, и когда мы говорили:

"А можете себе представить, что на поверхности хорошо отожженного металла или стекла находится столь необычно большое количество водорода, водородная пленка толщиной несколько десятков ангстрем?", люди были крайне удивлены. В дальнейшем в специальных экспериментах на генераторах Ван-де-Граафа

с использованием чувствительных ядерных реакций было обнаружено, что в действительности на поверхности металла и стекла есть практически не снимаемый или очень трудно снимаемый водородный слой в неизвестном виде химического соединения в количестве  $/1-3/ \cdot 10^{16} \text{ ат/см}^2$ . Эксперименты по исследованию температурной зависимости времени хранения нейтронов тоже качественно подтверждают гипотезу о водороде. Тем не менее вопрос нельзя считать вполне ясным. В наиболее тщательно выполненных экспериментах по хранению УХН в условиях глубокого охлаждения отражающей поверхности, когда процессы неупругого рассеяния, сопровождающиеся нагревом нейтронов, должны исчезнуть<sup>/8,9/</sup>, расхождение с теорией остается очень большим  $/1-3 \text{ порядка/}$ . Надо отметить, однако, что в этих экспериментах очень трудно контролировать качество покрытия поверхности отражающим материалом и тем более его химический состав.



Однако, несмотря на эти расхождения, достигнут прогресс в уточнении периода распада нейтрона методом хранения УХН. Использован прием, заключающийся в экстраполяции экспериментальных данных к бесконечному объему /10,11/ или к нулевой скорости нейтрона /9/ с учетом изменяющейся при этом из-за гравитации геометрии хранения. Полученные результаты по среднему времени жизни нейтрона  $\tau_n = 887,6 \pm 3$  с /11/ и  $888,4 \pm 2,9$  с /9/ заметно превосходят по точности полученные ранее методом регистрации продуктов распада нейтрона.

Параллельно с хранением УХН в "ядерных" ловушках развивались работы по магнитному удержанию. Группа Ю.Г.Абова в ИТЭФ исследовала хранение УХН в односвязной магнитной ловушке /12/. Группа из Бонна установила в Институте Лауэ-Ланжевена на пучке холодных нейтронов сверхпроводящее магнитное накопительное кольцо для нейтронов микровольтового диапазона энергий. Им удалось измерить таким образом среднее время жизни нейтронов  $\tau_n = 877 \pm 10$  с /13/.

УХН эффективно использованы также в эксперименте по уточнению заряда нейтрона, проведенном совместно группой из Болгарии и ЛИЯФ.

Кроме сказанного выше, УХН можно использовать и в ряде других направлений. Интересна "спектроскопия нагретых нейтронов". Здесь намечается довольно интересная и уникальная возможность: спектр нейтронов, получающихся после рассеяния УХН на стенке ловушки (атомы водорода во многих случаях должны составлять основной вклад в рассеяние), дает информацию о характере колебаний атомов в поверхностном слое. Метод очень чувствителен - можно исследовать доли монослоя адсорбированного или внедренного в поверхность водорода. Здесь получены довольно противоречивые и трудно объяснимые результаты, касающиеся вопроса: ужесточается или, наоборот, смягчается спектр нагретых нейтронов по мере того, как вы нагревом удаляете водород с поверхности /14,15/. Последние результаты, наиболее достоверные и надежные, показывают совершенно уникальное поведение: по мере того, как вы удаляете водород, спектр нагретых на оставшемся водороде нейтронов смягчается. Проведено с УХН немало и демонстрационных экспериментов, с использованием большой длины волны: дифракция на решетке /16/, прохождение через интерференционные фильтры /17/, радиография на УХН /18/, получение увеличенных изображений - продвижение к созданию нейтронного микроскопа /19/. Экспериментально проверен эффект металлического отражения нейтронов /20/. Измерена активационным методом глубина проникновения УХН-волны в вещество в условиях полного отражения /21/.

Возможно построение нейтронных интерферометров в диапазоне длин волн УХН /22/.

В 70-х годах больше 10 лабораторий занимались исследованиями в области ультрахолодных нейтронов: от Канады до Японии, затем энтузи-

азм несколько спал, потому что все определяется интенсивностью. Сейчас вырвались вперед две лаборатории: Института Лауэ-Ланжевена и ЛИЯФ. Плотность потока УХН превысила сейчас  $10^4$  н/см<sup>2</sup>с, это на восемь порядков больше, чем в первом опыте /5/. Можно надеяться, что эффективное применение УХН будет в дальнейшем расширяться.

#### Литература

1. M. Lax. Rev. Mod. Phys., 1951, 23, 287; Phys. Rev., 1952, 85, 621.
2. Я.Б.Зельдович. ЖЭТФ, 1959, 36, 1952.
3. В.В.Владимирский. ЖЭТФ, 1960, 39, 1062.
4. Ф.Л.Шапиро. УФН, 1968, 95, 145.
5. В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро. Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 40.
6. K.F. Smith et al. Phys. Lett., 1990, B234 (1/2), 191.
7. А.П.Серебров. Материалы школы по слабым взаимодействиям, Дубна, 1990.
8. P. Ageron et al. Z. Phys., 1985, B59, (3), 261.
9. В.П.Алфименков и др. Препринт ЛИЯФ-1629, 1990.
10. Ю.Ю.Косвинцев и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 444.
11. W. Mampe et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 63, 593.
12. Ю.Г.Абов и др. ЯФ, 1983, 38, 122.
13. W. Paul et al. Z. Phys., 1989, C45, 25.
14. Ю.Ю.Косвинцев и др. АЭ, 1983, 55, 288.
15. С.Д.Калчев, А.В.Стрелков, Г.И.Терехов. Сообщение ОИЯИ, P3-90-120.
16. H. Schekenhofer, A. Steyerl. Phys. Rev. Lett., 1977, 39, 1310.
17. K.-A. Steinhauser et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1306.  
М.И.Новопольцев, Ю.Н.Покотиловский. Сообщение ОИЯИ, P3-81-828.
18. J. Bates. Phys. Lett., 1981, A83, 29.
19. P. Herrmann et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 1969.  
А.И.Франк. ОИЯИ, ДЗ4, 17-86-747, 192.
20. М.И.Новопольцев, Ю.Н.Покотиловский. Сообщение ОИЯИ P3-87-408.  
Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 301.
21. М.И.Новопольцев, Ю.Н.Покотиловский. Сообщение ОИЯИ P3-85-843.  
Z. Phys., 1988, 70, 199.
22. A. Sleyerl et al. Z. Phys., 1979, B36, 109.

## ОПТИКА УХН И НЕЙТРОННЫЙ МИКРОСКОП

А.И.Франк

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва

Работы, которые я веду с моими коллегами из Курчатовского института, очень тесно связаны с несколькими работами Ильи Михайловича. Я должен сказать, что сам я с Ильей Михайловичем никогда не работал, хотя жизнь моя сложилась так, что последние 10 лет я довольно тесно соприкасаюсь с его деятельностью. С работами Ильи Михайловича по оптике УХН я познакомился на II нейтронной Школе в 1974 году, где был участником и слушал ряд докладов. Они на меня произвели тогда большое впечатление. И прошло еще довольно много лет, прежде чем это превратилось в область профессиональной деятельности.

После того, как здесь, в этой лаборатории, были открыты ультрахолодные нейтроны, совершенно естественно, что Илья Михайлович этим очень увлекся. Выступавшие до меня обсуждали, что он больше любил: ядерную физику или оптику? Я не уверен, что об этом можно сколько-нибудь определенно судить, но вот Юрий Павлович Попов сказал, что Илья Михайлович, конечно, очень радовался, когда эти две области можно было соединить, и это, несомненно, верно. И это был счастливый момент, потому что здесь можно было оптическое мышление, волновое мышление и прекрасную оптическую эрудицию приложить к нейтронной физике, и здесь возникли, по-моему, совершенно замечательные вещи. В 1972-1974 гг. было опубликовано несколько статей, но фактически это развитие одной и той же работы: короткая статья в "Природе", два препринта лаборатории и лекция на Школе. К сожалению, эти работы не получили журнальной публикации, о чем я всегда очень сожалел, они остались как-то очень мало известными. Известно, что если подходить к нейтронной оптике, то можно поступать двояким образом: можно исходить из оптического потенциала и работать с уравнением Шредингера, и все получится так, как надо, а можно начинать с показателя преломления, который есть отношение волновых чисел в среде и в вакууме. Естественно, что Илья Михайлович пошел по этому пути и сразу же написал это в виде, чрезвычайно привычном в оптике и в оптике металлов, сопоставив квадрат показателя преломления с диэлектрической проницаемостью, а если подставить правильно все величины, то получается вот такая зависимость:

$$\begin{aligned} \varepsilon = n^2 &= \left[ 1 - \frac{v_{lim}^2}{v^2} \right] + i \frac{\alpha^2}{v^2}, \\ \varepsilon = n^2 &= 1 - \lambda^2 \frac{N}{\pi} (v' - i v''), \\ v_{lim} &= \frac{h}{m} \sqrt{\frac{Nv}{\pi}} \quad \alpha^2 = \frac{h}{2\pi m} N(\sigma v). \end{aligned} \quad (1)$$

Легко видеть, что при такой записи полное отражение получается очень просто. При достаточно большой длине волны действительная часть  $\varepsilon$  становится отрицательной, как это бывает у металлов. Отличие от оптики металлов состоит в том, что в нейтронах отношение мнимой и действительной части  $v$  очень мало, а такое может быть только в совершенно идеальных металлах, а они всегда не идеальны, там есть диссипация энергии, вещество для нейтрона - металл-более идеальное, чем хороший металл для света. Эти формулы вошли в жизнь, они используются и живут, о них большинство знает. Однако гораздо меньше была замечена вторая вещь, которую Илья Михайлович в этих же работах сделал. Тогда всех очень волновал таинственный в то время вопрос: куда исчезают ультрахолодные нейтроны из ловушек? Проблема хранения в 70-х годах была чрезвычайно актуальной. Илья Михайлович тоже пытался к ней подойти по-своему и, в частности, через оптику. Он обратился к старым работам Лэкса 50-х годов, где вместо простой формулы, которую я писал, фигурирует еще поправочный коэффициент, который называют коэффициентом Лэкса:

$$n^2 = 1 - \lambda^2 \frac{N}{\pi} c v, \quad c = c' - i c'', \quad v = v' - i v''. \quad (2)$$

Смысл его очень простой. В разреженной среде его не должно быть, так же как для света на свободных электронах или для рентгена в веществе. Так же как для света, при переходе к среде возникает дисперсионная зависимость более сложная, и для нейтронов, в принципе, есть некоторая поправка, и этот коэффициент ее учитывает. Идея состояла в допущении такого устройства этого поправочного коэффициента, что для ультрахолодных нейтронов он сказывается как-то сильнее, чем для обычных. Тогда можно было согласовать разницу в сечениях поглощения или ухода, или исчезновения ультрахолодных нейтронов, полученных из опытов с УХН и из опытов с тепловыми нейтронами. Со временем эта проблема рассосалась, с хранением стало все хорошо, а физика многократного рассеяния, нейтронная оптика, ее теория продолжала развиваться, и оказалось, что Илья Михайлович многое угадал или понял, сейчас я уже этого не могу сказать.

Позже появились две хорошие работы 1982 и 1985 гг., т.е. через 10 лет после работы Ильи Михайловича. Это, в частности, работа Сирса.

У него есть большой обзор "Фундаментальные основы нейтронной оптики", и там все это сделано в общем виде до конца. Это написано в некоторых приближениях, и оказалось, что, действительно, коэффициент Лэкса есть, и, действительно, он содержит действительную и мнимую часть, действительно, в поправки входит волновое число в знаменателе. Хорошо видно, что для тепловых нейтронов, когда волновое число большое, обе эти поправки идут в ноль, а при малых волновых числах они существуют. К проблеме хранения это не имеет отношения, но отсюда следует весьма интересный теоретический вывод, который был проверен экспериментально и представляет собой, по-видимому, вполне достойную задачу. Если перейти от этой формулировки к привычной для многих формулировке с оптическим потенциалом, это означает, что оптический потенциал зависит от энергии, причем эта зависимость проявляется только в области холодных и очень холодных нейтронов, и ее практически нет для тепловых нейтронов. В экспериментах с нейтронными интерферометрами, как раз в тепловой области, пытались искать, но там ее не должно быть. Смысл этой поправки состоит в том, что даже для длинноволновых нейтронов есть корреляция в расположении атомов, есть взаимная интерференция рассеянных волн, хотя среда фактически аморфна, но тем не менее атомы нельзя сблизить на некоторое расстояние, есть ближний порядок. Третий пункт, который в этих работах содержался и на который я дальше буду опираться, приведен только в одной из этих трех публикаций, а именно в журнале "Природа" 1972 г.

Илья Михайлович нарисовал картинку, похожую на эту (см. рис. 1), где

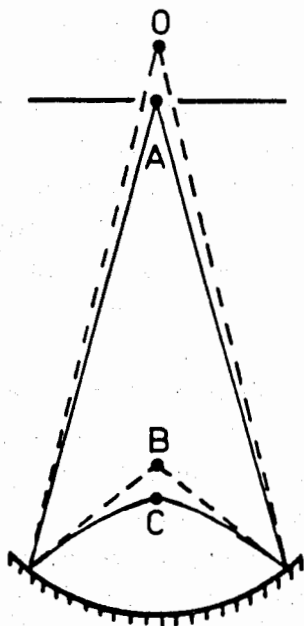


Рис. 1

изображено зеркало, от которого нейтроны испытывают полное отражение при нормальном угле, имеется источник, имеется изображение, и очень коротко говорилось о том, что можно в будущем думать, что зеркальная оптика полного отражения и ультрахолодные нейтроны могут привести к появлению нейтронного микроскопа. Это 1972 год. Очень трудно сейчас понять, насколько он предполагал это реальным. Сам он на этот вопрос не отвечал. Этот рисунок и это предположение также тогда не были понятны, по-видимому, большинством. Поскольку ультрахолодные нейт-

роны считали на штуки, и мы все это хорошо знали, то картинка эта воспринималась как совершенно корпускулярная: ну, падает шарик, отражается, попадает сюда - что здесь, казалось бы, интересного. Но по прошествии нескольких лет после того, как это было напечатано, я завел с Ильей Михайловичем разговор на эту тему: хорошо, здесь с шариком все понятно, но все-таки изображение есть результат интерференции волн, а с волнами как-то здесь не очень все хорошо. Летят нейтроны по кривым линиям, да еще, по-видимому, время разное затрачивают. Как с формированием изображения, если перейти к волновому языку? Разговор вроде бы кончился ничем, он немного задумался, а потом сказал мне, что, в общем-то, что же здесь такого: действительно, волновое число меняется, значит, мы можем ввести показатель преломления, вот мы его написали, а раз есть показатель преломления - это неоднородная среда. Есть принцип Ферма стационарности фазы для разных лучей, и все хорошо. Он был очень щедр, и за двумя подписями, по существу, эти соображения были опубликованы сначала в материалах Школы, а потом даже в "Письмах в ЖЭТФ". Думая на эту тему, я понял, что здесь действительно все очень просто. Это просто аналогия между оптикой и механикой, известная очень давно со времен Гамильтона - оптико-механическая аналогия Гамильтона, и она вложена в уравнение Шредингера как исходная. Но вот введение показателя преломления для вакуума, описания действия силы на языке показателя преломления, сведение всей задачи к оптике неоднородных сред, как потом выяснилось, когда пришлось заниматься с оптическими вещами более прикладными, оказалось чрезвычайно удобным. Более того, оказалось, что и вопрос с принципом Ферма значительно сложнее, чем тогда нам представлялся. Просто для того, чтобы показать, что такое показатель преломления и как его дальше приходится использовать, я эту же задачу вам покажу. Она очень идеализирована, и здесь нет никаких зеркал. На рис. 2 показаны две среды, показатель преломления единица и гравитационный показатель. И начальное условие - идеальный сферический фронт. Тогда в этой среде волны как-то распространяются, будем говорить сначала на языке геометрической оптики. Тогда в районе фокуса возникает некоторая каустическая поверхность, ее по всем законам геометрической оптики можно посчитать, она описывается уравнением. А если думать о волновых явлениях, то вопрос очень простой: волны, пришедшие из разных мест первоначально идеального фронта в точку наблюдения, каким является фокус, приходят с разными фазами. Я взял сначала монохроматическую волну, где в формировании изображения участвуют только волны из некоторой области, обеспечивающей конструктивную интерференцию. Это и есть оценка того, какую можно апертуру взять, чтобы получить волновое разрешение. Если вы будете брать апертуру большую, то начнет работать гравитацион-

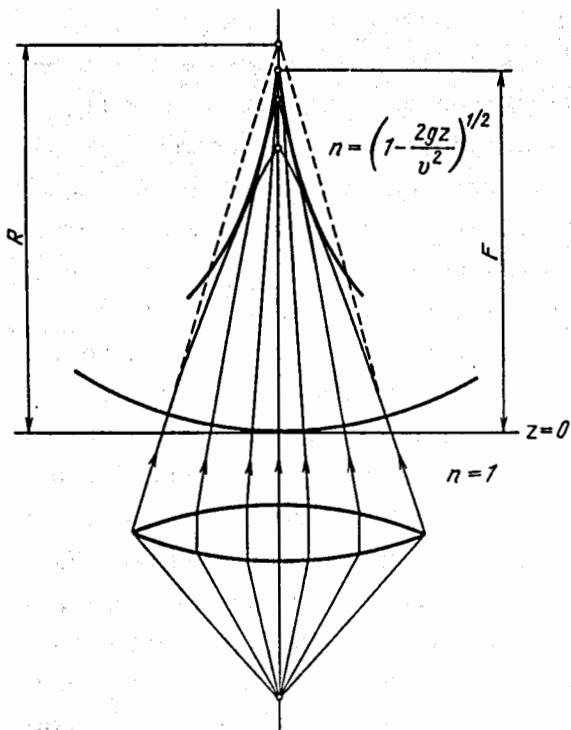


Рис. 2

ное искажение. Надо сказать, что это вполне разумные величины, если работать с ультрахолодными нейтронами на расстояниях порядка 10 см, то разумная апертура в несколько мм, а дальше ее увеличение не может улучшить волновое разрешение. А можно ли сделать лучше? Это становится совершенно очевидным, если рассуждать в терминах оптики неоднородных сред. Во всех классических учебниках доказывается такая теорема, что в оптической системе для того, чтобы получить резкое изображение точечного источника, достаточно одной асферической поверхности, а если вы хотите получить изображение некоторого протяженного участка, а не точки, то достаточно двух асферических поверхностей. Если внимательно посмотреть, как это выводится, оказывается, что для вывода этой теоремы не требуется предположение об оптической неоднородности среды, она справедлива вообще. Если говорить о том, что сила тяжести просто приводит к тому, что появляется оптически неоднородная среда, значит, достаточно двух асферических поверхностей. Потом это было расчетами подтверждено разными авторами.

Я хочу чуть-чуть вернуться к принципу Ферма. Ясно, что уравнение Шредингера - это уравнение волновое, вся оптика в нем содержится, и оно сводится к уравнению эйконала. А вот что касается принципа Ферма, то я тут немного хотел бы поговорить, потому что это есть тот самый вопрос, с которого все началось. Эта дискуссия фактически была продолжена в 1982 г. Штайерлом. Он обратил внимание на то, что в обычной оптике принцип Ферма, который первоначально формулируют как принцип стационарности фазы, одновременно приводит к результату, что стационарно и время распространения света, если есть изображение, а если говорить о траектории, то время минимально. Исходя просто из классического решения уравнения Шредингера, можно сделать все то же самое для тяжелых частиц. Что касается стационарности фазы, то здесь все в порядке, но

ное искажение. Надо сказать, что это вполне разумные величины, если работать с ультрахолодными нейтронами на расстояниях порядка 10 см, то разумная апертура в несколько мм, а дальше ее увеличение не может улучшить волновое разрешение. А можно ли сделать лучше? Это становится совершенно очевидным, если рассуждать в терминах оптики неоднородных сред. Во всех классических учебниках доказывается такая теорема, что в оптической системе для того, чтобы получить резкое изображение точечного источника, достаточно одной асферической поверхности, а если вы хотите получить изображение некоторого протяженного участка, а не

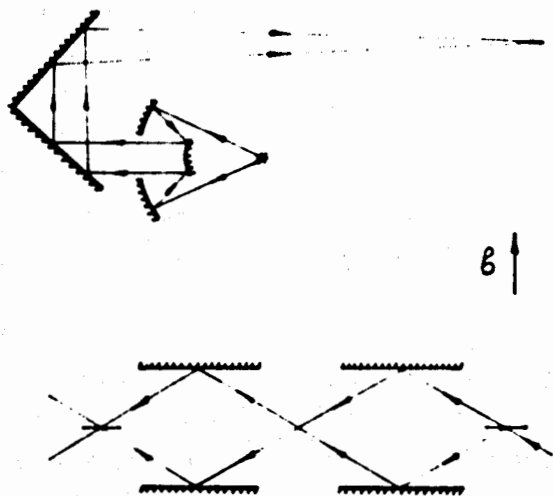
вот время, которое классическая частица затратила бы, идя по классической траектории от источника до волнового фронта по разным путям, — это время разное. Спрашивается: можно ли вообще говорить о времени, если мы задались плоской волной, которая бесконечна, и вообще корректна ли эта постановка вопроса? Ответ на этот вопрос не так легок. Речь идет о времени, которое тратит классическая частица, двигаясь по этой траектории. От источника распространяются волны, есть волновой фронт, здесь равенство фаз по определению, а классическая частица, идя до этих лучей, потратила бы разное время. Этот вопрос в какой-то мере тоже исследовался в связи с нейтронными интерферометрами. Сдвиг фазы в интерферометре, который находится в поле тяжести Земли, был обнаружен замечательными опытами Коллелы, Вернера и Оверхаузера, и вопрос об интерференции волн в присутствии силы тяжести возник немного раньше, чем это я сказал со ссылкой на Штайерла. Была сформулирована теорема (Чу и Стодольским), которая гласила следующее: если волны интерферируют так, что классические частицы встречаются в одной точке пространства и времени, то вариация от разности фаз по параметру задачи в первом порядке равна 0. Интерференционная картина стационарна в первом порядке. Это очень важная вещь. Разность фаз в интерферометре такая, какая она есть. Но она стационарна, когда в точку наблюдения классические частицы идут в одно и то же время. Для нас это важный момент, потому что среди прочих разных параметров эксперимента есть такой для нас важный, как длина волны. Если говорить об оптике, то это означает, что в этом случае вы должны получить хроматически устойчивую картину. Понятно, что нейтроны распространяются в поле тяжести Земли, очень сильно меняя свои траектории в зависимости от скорости, поэтому гравитационные искажения важны. Эта теорема утверждает только, что в этой ситуации в первом порядке все хорошо. Она не утверждает обратного, т.е. что если нет изохронности, то плохо. Это можно проверить для тех или иных конкретных случаев, и это было сделано для простого интерферометра. Критерий значимости силы тяжести Земли, когда вы говорите об интерференции, есть вовсе не отношение разности гравитационной энергии к энергии, как можно было подумать, а умноженное на довольно большой множитель, который сам есть произведение волнового числа и какого-то характерного расстояния. Если взять ультрахолодные нейтроны, то отношение энергии порядка  $10^{-2}$ , а этот множитель, который есть набег фазы, порядка  $10^8$ . Отсюда понятно, что если система симметрична, то здесь вы наблюдаете интерференцию колоссального порядка. Можно сделать систему несимметричной, уравнивать время. Видно, что фаза и время уравниваются не одновременно. Действительно, оказывается, что теорема Чу и Стодольского работает. В первом порядке по длине волны картина становится стационарной, но сама разность фаз настолько велика, что и второй порядок тоже ника-



кой радости не доставляет. Отсюда довольно важный для нас вывод, что если мы хотим сделать хорошую оптическую систему, то надо сделать так, чтобы она обеспечивала не только одинаковую фазу для разных лучей, но чтобы еще возникала изохронность разных траекторий, тогда будет то, что Чу и Стодольский называют идеальной конфигурацией. Если начать считать оптические системы, то вывод подтверждается. Оказывается, что во все формулы геометрической оптики неоднородных сред вместо линейных размеров, которые есть просто расстояния между координатами, входит интеграл вот такого вида

$$T = \int_i^j \frac{dz}{n(z)} \quad (3)$$

Я обращаю ваше внимание: это не оптическая длина, это величина типа времени, она устроена так, как время. И если написать конкретные формулы, вы получаете, что хорошо можно сделать оптическую систему, когда одновременно выполняются условия изофазности и изохронности распространения нейтронов в поле сил. Для интерферометра такое решение было придумано. Оно очень простое. Нужно добавить вторую петлю, и тогда оказывается, что такая конфигурация дает и интерференцию в нулевом порядке, разность фаз, которая набралась здесь из-за того, что волновое число для верхней траектории меньше, при дальнейшем распространении компенсируется, потому что траектория, которая была ниже, здесь становится более высокой. Потом такого рода схемы в интерферометрии стали возникать, к тому времени было уже известно спиновое эхо, по аналогии стали называть это фазовым эхо. А позже мы этот же принцип применили в микроскопии. Мы построили микроскоп на УХН с горизонтальным расположением, так что в нем верхний луч меняется местами с нижним. Для этого использовали оборачивающую систему из двух зеркал в виде уголкового отражателя. На рис. 3 видно, что эта схема действительно очень близка



к схеме двухпетлевого интерферометра.

Этот микроскоп был испытан; собственно, работа и сейчас продолжается. Но мы уже знаем, что получается разрешение около 17 микрон. Илья Михайлович, конечно, знал об этом результате, он вообще очень "болел" за нашу работу. И этот результат он очень высоко оценил.

## РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ДУБНЕ

В.Т.Руденко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Юрий Яковлевич Стависский рассказал о создании и пуске 30 лет назад, в 1960 г., импульсного реактора периодического действия - ИБР. Я продолжу рассказ о развитии этой установки.

Лаборатории нейтронной физики повезло: в период становления она получила в свое распоряжение импульсный нейтронный источник нового типа - реактор ИБР, директором лаборатории стал ученый с мировым именем - Илья Михайлович Франк, научным руководителем - Федор Львович Шапиро. Тандем ученых оказался удачным. Они смогли организовать вокруг себя группу молодых экспериментаторов и на многие годы вперед определили научное развитие лаборатории с учетом особенностей нового нейтронного источника. Их заинтересованность в улучшении параметров установки, их помощь и пресс, умноженные на стремление импульсных реакторщиков освоить физику и технику новой чрезвычайно интересной установки и реализовать возможности, заложенные в ней, позволили сначала повысить параметры реактора ИБР до предельного уровня, а потом создать более совершенные действующие в настоящее время установки - ИБР-30, ИБР-30 с инжектором, ИБР-2 и продолжить поиски решений их улучшения. О физике и технике импульсных реакторов и бустеров можно говорить часами. Это очень интересные установки. Но за короткое время моего сообщения я могу только назвать узловые этапы развития и несколько слов сказать о каждом из них.

Старт - 1960 год. В нашей лаборатории начал работать импульсный источник нейтронов - ИБР. Его средняя мощность всего лишь 1 кВт, но она почти полностью сосредоточена в импульсах, длительность которых равна 36 мкс. В широком диапазоне можно менять и частоту их повторения. Прежде всего обращает на себя внимание довольно большая длительность нейтронного импульса. Исследования показали, что в ИБРе она не может быть меньше нескольких десятков микросекунд, поэтому импульсные реакторы периодического действия наиболее эффективны как источники тепловых нейтронов для исследования конденсированных сред. Обладает ИБР и важным для времяпролетной методики свойством: частоту импульсов мощности можно снижать без существенного изменения длительности импульса и с сохранением высокой средней интенсивности. Но как источник резонансных и быстрых нейтронов

он не может конкурировать с другими видами источников, имеющих малую длительность импульса.

Недостаток ИБРа - низкая интенсивность нейтронов. Мощность 1 кВт соответствует примерно  $5 \cdot 10^{13}$  нейтронов, вытекающих в секунду из активной зоны. После ряда модернизаций в 1964-65 гг. мощность реактора удалось повысить до 6 кВт, но эту мощность удержать не удалось по ряду причин и, прежде всего, вследствие быстрого роста деформации оболочки подвижной зоны. Поэтому сначала снизили частоту вращения диска с подвижной частью зоны с 5000 до 3000 оборотов в минуту, при этом длительность импульса увеличилась до 50 мкс, а затем пришлось снизить и мощность до 3 кВт. В этом режиме реактор работал вплоть до его остановки в 1968 г.

Непосредственно перед остановкой реактора был разработан и осуществлен режим с частотой импульсов мощности  $0,2 \text{ с}^{-1}$ . При этом пиковая мощность в импульсе достигла миллиона киловатт. В этом режиме удалось выполнить ряд интересных измерений, в частности, группой экспериментаторов под руководством Ф.Л.Шапиро были зарегистрированы ультрахолодные нейтроны, скорость которых составляет всего лишь несколько метров в секунду, и они обладают уникальными свойствами. Были проведены также исследования влияния теплового удара на топливные элементы реактора, которые невозможно было выполнить на других установках.

12 августа 1968 г. закрылись пучки реактора ИБР, а через год, 17 августа 1969 г., пучки на пролетные базы были снова открыты, но уже работал новый реактор ИБР-30. Основная цель создания реактора ИБР-30 - повысить среднюю мощность при незначительном увеличении длительности импульса. Она составила 70 мкс при скорости диска подвижной зоны 3000 оборотов в минуту. ИБР-30 может работать и при скорости вращения диска 5000 оборотов в минуту, но резко увеличивается износ машины, а длительность импульса сокращается лишь до 50 мкс. Параметры: средний тепловой поток с поверхности замедлителя примерно  $10^{11}$ , пиковый поток  $10^{14}$ , а внутри замедлителя  $10^{15}$  нейтронов в секунду на квадратный сантиметр. ИБР-30 двухцелевой: он работает и как реактор, и как бустер. О бустере я расскажу ниже. Третье его назначение - исследование перспективных режимов импульсного реактора и бустера. Недостаток ИБР-30 как источника тепловых нейтронов - низкая средняя мощность.

Следующий этап развития тепловых импульсных нейтронных источников - создание ИБР-2, который был введен в эксплуатацию в 1984 г. на среднюю мощность 2 МВт. Его параметры: средний поток тепловых нейтронов с поверхности замедлителя примерно  $10^{13}$ , а пиковый поток  $10^{16}$  нейтронов в секунду на квадратный сантиметр. Недостаток системы - большая длительность импульса, которая составляет 215 мкс.

Второе направление развития - разработка и создание импульсного бустера периодического действия. Идея его создания принадлежит Илье

Михайловичу и Федору Львовичу. По их предложению и был создан в Лаборатории нейтронной физики в 1964 г. первый импульсный бустер. Установка представляет собой систему из импульсной подкритической размножающей сборки (бустер) с помещенной в ее центральную часть нейтронопроизводящей мишенью электронного ускорителя (инжектор). Такой "гибридный" нейтронный источник унаследовал от реактора высокую среднюю интенсивность, а от ускорителя короткую длительность импульса. Сокращение длительности нейтронного импульса очень важно для ядерно-физических исследований методом времени пролета, поскольку поток нейтронов на пролетной базе при заданном разрешении по энергии возрастает квадратично при снижении длительности импульса. Варьируя длительность и частоту импульсов инжектора и уровень размножения бустера, можно получить оптимальные параметры нейтронного источника для ядерно-физических исследований. Импульсный бустер обладает и еще одним интересным свойством: частоту импульсов можно снизить при сохранении высокой средней интенсивности. В таком режиме он является высокоэффективным импульсным источником тепловых нейтронов с длительностью импульса, на порядок меньшей по сравнению с импульсным реактором, что важно для повышения разрешения при исследовании конденсированных сред.

Первым инжектором был электронный ускоритель-микротрон. Его исследования показали, что мощность электронного пучка, от которой зависит интенсивность нейтронов бустера, ограничена сотнями ватт, неудовлетворительна была и стабильность работы. По этим причинам в качестве инжектора ИБР-30 выбран двухсекционный линейный ускоритель электронов ЛУЭ-40, разработанный в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Бустер ИБР-30 работает с начала 1970 г. при нейтронной интенсивности  $5 \cdot 10^{14}$  в секунду и длительности импульса в несколько микросекунд. Его недостаток - большая длительность нейтронного импульса, которая ограничивает разрешение по энергии. С целью сокращения длительности импульса в настоящее время планируется заменить инжектор на более мощный - пятисекционный линейный ускоритель, который позволит снизить длительность нейтронного импульса на порядок. Она составит примерно 0,4 мкс при сохранении высокой средней интенсивности нейтронов.

В своем выступлении я рассказал об одной стороне деятельности Ильи Михайловича - его вкладе в создание и развитие базовых установок для научных исследований по нейтронной физике. Установки получили мировое признание. Желанием Ильи Михайловича было дальнейшее их развитие и совершенствование. Мне думается, лаборатория может, должна и сумеет продолжить дело своего Первого Директора.