

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА — ПОЛЕ ДЛЯ ЗОЛОТЫХ ИДЕЙ Ф.Л.ШАПИРО

Ю.В.Таран

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В 1995 г. научная общественность отметила 80-летие со дня рождения известного ученого-физика доктора физико-математических наук, профессора, члена-корреспондента Академии наук СССР Федора Львовича Шапиро. Он начал свою научную деятельность в Лаборатории атомного ядра ФИАН в 1945 г. в области физики реакторов и нейтронной физики. С тех пор его жизнь была в основном связана с нейтронной физикой, в которой ему принадлежит ряд основополагающих исследований: создание спектрометра по времени замедления нейтронов в свинце, открытие нового возбужденного уровня в ядре ^4He , обобщение закона $1/\nu$, первые исследования p -резонансов, развитие теории нестационарного замедления нейтронов, разработка метода поляризации нейтронов с помощью протонного фильтра, исследования с поляризованными нейтронами и ядрами, обнаружение ультрахолодных нейтронов и др. Ф.Л.Шапиро впервые применил ряд методов нейтронной физики для исследований по физике конденсированных сред, в том числе метод дифракции по времени пролета, метод обратной геометрии для неупругого рассеяния. Большая часть этих исследований сделана на импульсном реакторе ИБР Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, заместителем директора которой он был до конца жизни. Большой вклад внес Ф.Л.Шапиро в совершенствование и развитие базовых установок ЛНФ — импульсных источников нейтронов. За эти работы ему была присуждена Государственная премия. Слишком рано, в расцвете творческих сил ушел от нас Федор Львович. Его имя навсегда осталось в истории физики.

In 1995, scientific community celebrated the 80th birthday of Fedor Lvovich Shapiro, the eminent physicist, doctor of physical and mathematical sciences, professor, and corresponding member of the Academy of Sciences. The scientific career of F.L.Shapiro began in 1945 in the Laboratory of Atomic Nucleus of the Physical Institute of the Academy of Sciences in the field of reactor physics and neutron physics. Since then and to the end of his life, F.L.Shapiro had been mainly connected with neutron physics, where he carried out a number of fundamental investigations and made several discoveries, including the creation of the spectrometer based on measuring of neutron moderation time in lead, discovery of the new excitation level of ^4He , generalization of the $1/\nu$ law, first investigations of p -resonances, development of the theory of non-stationary neutron moderation, development of a method for neutron polarization on the basis of a proton filter, investigations with polarized neutrons and nuclei, discovery of ultracold neutrons, etc.

F.L.Shapiro was the first to apply neutron physics methods to investigations in condensed matter physics, including the time-of-flight neutron diffraction method and the inverted geometry method for inelastic scattering. The major part of these investigations were carried out at the IBR pulsed reactor of the Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research where he was the deputy director of the Laboratory till the end of his life. F.L.Shapiro made the most important contribution to the development and modernization of the basic facilities of the Laboratory — the pulsed neutron sources. F.L.Shapiro had been awarded the State Prize for this work. F.L.Shapiro left us in the prime of his life. The name of F.L.Shapiro went down in the history of physics.

Известность Ф.Л.Шапи́ро как физика
непрерывно возрастала из года в год
и продолжает возрастать
после его кончины.

И.М.Франк

6 апреля 1995 г. известному ученому-физику Федору Львовичу Шапи́ро исполнилось бы 80 лет, но уже более двадцати лет его нет с нами.

Колоссальные изменения произошли в мире и в нашей стране за эти годы. Фактически мы живем в другой исторической эпохе. Иное дело наука. Обозревая научное наследие Ф.Л.Шапи́ро, сразу замечаешь, что ряд научных направлений, основанных им, до сих пор актуальны. Его одаренность компенсировала относительно короткую продолжительность научной карьеры, начатой им в 30 лет, что довольно поздно по любым меркам. Его путь в науку был непрост.

После окончания средней школы Федор Львович из-за трудного материального положения семьи вынужден был поступить на работу. Одновременно он учился в Московском энергетическом техникуме, через год после окончания которого в 1936 г. поступил на физический факультет Московского университета. Он учился и продолжал работать сначала техником, а впоследствии инженером. Накануне Великой Отечественной войны закончил университет. Участвовал в сражении за Москву в должности командира разведывательной роты, награжден медалью «За отвагу», в декабре 1941 г. тяжело ранен. Затем многомесячное лечение в госпиталях, демобилизация из армии, работа в авиационном конструкторском бюро.

В феврале 1945 г. Федора Львовича приняли в аспирантуру Физического института им. П.Н.Лебедева. Его научным руководителем стал заведующий лабораторией атомного ядра ФИАН Илья Михайлович Франк.

В это время в стране осуществлялась широкая программа развития ядерной физики и создания атомной промышленности, в которую лаборатория атомного ядра внесла заметный вклад своими исследованиями по физике реакторов. В этих коллективных работах, в которых, кроме

И.М.Франка и Ф.Л.Шапиро, принимали участие Л.В.Грошев, Л.Е.Лазарева, К.Д.Толстов, Е.Л.Фейнберг, И.В.Штраних и др., роль каждого из авторов, конечно, не может быть выделена. Одно несомненно, что для Федора Львовича это был хороший старт в нейтронной физике, в которой ему суждено было стать выдающимся специалистом. В 1949 г. он блестяще защитил кандидатскую диссертацию на тему «Изучение мультиплицирующих систем уран — графит».

Автор настоящей статьи опускает изложение исследований Ф.Л.Шапиро по физике реакторов (хотя трудно удержаться, чтобы не отметить, что Федор Львович независимо предложил и применил метод кадмиевого отношения). Достаточно полно они описаны в биографическом очерке в первом томе собрания его трудов [1]. А вот работы Ф.Л.Шапиро по нейтронной спектрометрии, которой он занимался практически до конца жизни, будут рассмотрены в максимально возможном для данной статьи объеме.

Ранние работы Ф.Л.Шапиро по нейтронной спектрометрии связаны с лабораторией атомного ядра ФИАН, где еще в начале 40-х годов началась разработка каскадных ускорителей ионов (типа Кокрофта и Уолтона) на энергии от нескольких до миллиона электронвольт. Пучок ионов дейтерия, полученный в таком ускорителе, при бомбардировке дейтериевой мишени давал нейтроны (так называемые *DD*-нейтроны) с энергией $\sim 2,5$ МэВ.

Вскоре стало известно о еще одной возможности, позволяющей при энергии ионов в сотни кэВ получить нейтроны примерно на два порядка большей интенсивности, чем *DD*-нейтроны. Это была реакция дейтерия с тритием, имеющая большое эффективное сечение, достигающее в максимуме 5 б (он приходится на энергию около 100 кэВ). Первые цирконий-тритиевые мишени для ускорителей, использующих эту реакцию (и называемых теперь нейтронными генераторами), были изготовлены в лаборатории атомного ядра. Разумеется, не случайно изучение реакций, вызываемых в ядрах *DD*- и *DT*-нейтронами, также стало предметом исследований Ф.Л.Шапиро, в частности, в 1953 г. он сделал прецизионные измерения сечения (n, α)-реакции на ${}^6\text{Li}$ при энергии нейтронов 2,5 МэВ [2].

Естественно, что эти работы по нейтронной физике привели к мысли о развитии работ по нейтронной спектроскопии. Нейтронный генератор давал уже довольно значительный поток нейтронов ($5 \cdot 10^8 - 10^9 \text{ с}^{-1}$), и поэтому напрашивалась мысль о переводе установки в импульсный режим и использовании ее для спектроскопии нейтронов методом времени пролета. Эта возможность в самом деле обсуждалась. Однако даже если бы мгновенный поток в импульсе был значительно больше стационарного (в работах Ф.Л.Шапиро он равнялся $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, т.е. его в самом деле удалось повысить на три порядка), то все же возможности нейтронного генератора для спектрометрии медленных и резонансных нейтронов оказывались весь-

ма ограниченными (не надо забывать, что методов наносекундной электроники тогда еще не существовало).

Талант и научное предвидение Ф.Л.Шапира проявились в том, что вместо, казалось бы, естественной попытки использования метода времени пролета он предложил пойти по новому, еще никем не испытанному пути. В 1950 г. он выступает на семинаре ФИАН с докладом о возможности спектрометрии нейтронов с помощью метода, идея которого, основанная на теоретическом результате Е.Л.Фейнберга, была развита и дополнена Ф.Л.Шапиро и Л.Е.Лазаревой (работа Л.Е.Лазаревой, Е.Л.Фейнберга и Ф.Л.Шапира была опубликована [3] только в 1955 г., уже после осуществления метода).

Этот метод получил название спектрометрии по времени замедления в свинце. Сущность его состоит в том, что после достаточно большого числа упругих соударений все нейтроны «монохроматизируются» — в каждый заданный момент времени они оказываются сгруппированными по своей скорости вокруг некоторой средней величины, которая убывает обратно пропорционально времени замедления. Таким образом, связь между временем и средней скоростью такая же, как в методе времени пролета. Для свинца она соответствует длине пролета около 7 м (чем тяжелее ядра замедлителя, тем больше эта величина). Что касается разброса энергий нейтронов вокруг среднего значения, то ниже области неупругого рассеяния он в широких пределах мало зависит от средней энергии и в свинце составляет около 30%. Таким образом, хотя спектрометр и не обладает высокой разрешающей способностью, зато для него доступны довольно высокие энергии нейтронов — десятки кэВ.

Основная часть спектрометра по времени замедления — это свинцовый куб весом более 100 т. В канал этого куба вводится мишенное устройство импульсного нейтронного генератора, в другие каналы — исследуемые вещества с детекторами, соединенными с временным анализатором. Так как замедление нейтронов происходит внутри большого свинцового куба и их отток из него невелик, то установка обладает исключительно большой светосилой. Именно на это обстоятельство специально указывал Ф.Л.Шапиро, предлагая развивать этот метод. Другая особенность состояла в том, что при измерениях в свинце γ -фон был очень низок. Спектрометр по времени замедления оказался поэтому очень удобным для измерений сечений радиационного захвата нейтронов. Это было шагом вперед, так как нейтронная спектрометрия в то время, кроме сечений деления, занималась в основном измерением полных нейтронных сечений методом пропускания. Наконец, метод позволил проводить измерения в широкой области энергий, нормируя их по известным сечениям в тепловой области.

Все эти преимущества спектрометра были действительно реализованы. Создание спектрометра и развитие работ на нем потребовало большого экс-

периментального искусства. Этим вместе с Ф.Л.Шапиро под его руководством уже была занята группа молодых физиков — экспериментаторов и теоретиков.

Первое сообщение о применении метода нейтронной спектроскопии по времени замедления было сделано на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в 1955 г. [4]. Более подробно круг работ, выполненных в первый период исследований, освещен в докторской диссертации Ф.Л.Шапиро в 1962 г. и в кандидатских диссертациях его учеников (Ю.П.Попова, А.А.Бергмана и А.И.Исакова). Исследования на этом спектрометре не прекращались и позже, Ф.Л.Шапиро руководил ими до своей кончины. Даже теперь, несмотря на огромный прогресс, достигнутый в последние десятилетия нейтронной спектроскопией, свинцовый куб не потерял своего значения, примером чего может служить создаваемый на Московской мезонной фабрике светосильный спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце ПИТОН [5].

Можно отметить три области исследований, которые выполнены с помощью спектрометра по времени замедления. Прежде всего, это обширный круг работ по измерению радиационных сечений захвата нейтронов примерно для 20 изотопов. О том, какие зачастую неожиданные результаты получались на этом спектрометре, свидетельствует такой пример: при исследовании естественной смеси изотопов железа отчетливо проявился резонанс при энергии нейтронов 1180 эВ. Железо — материал, широко используемый в качестве конструкционного в реакторостроении, был, конечно, ранее исследован. Однако узкий резонанс при энергии 1180 эВ практически не проявляется в полном сечении, и поэтому не был замечен. Его обнаружение в радиационном захвате было своего рода сенсацией. Следует отметить, что большое число конструкционных материалов было исследовано с помощью свинцового куба. Для получения констант, необходимых в реакторостроении, он остается полезной установкой и до сих пор.

Измерения нейтронных сечений, выполненных в широких пределах энергий — от тепловых до десятков кэВ — позволили Ф.Л.Шапиро с сотрудниками перейти к изучению нейтрон-ядерных реакций с орбитальным моментом, равным единице, так называемых p -резонансов. Данные о силовых функциях для p -резонансов в то время были весьма скудными, и эти измерения явились первыми систематическими исследованиями в этой области. Они не потеряли своего значения и до сих пор.

Все же среди работ, выполненных с помощью спектрометра по времени замедления, наибольшую известность приобрели исследования реакций на легких ядрах с вылетом заряженных частиц — протонов и α -частиц. Эти работы публиковались начиная с 1957 г. Изучая энергетическую зависимость отношения эффективного сечения реакции ${}^3\text{He}(n, p)$ к сечениям

реакций ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ и ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$, Ф.Л.Шапиро и его сотрудники обнаружили сильное (до 15% при энергии нейтронов 27 кэВ) отклонение сечения первой реакции от закона $1/v$.

Анализируя эти экспериментальные данные для реакции ${}^3\text{He}(n, p)$, Ф.Л.Шапиро с сотрудниками показал, что, во-первых, реакция идет почти полностью через канал со спином и четностью 0^+ , а во-вторых, энергетическая зависимость сечения реакции может быть хорошо описана формулой Брейта — Вигнера для изолированного широкого резонансного уровня со спином и четностью 0^+ , расположенного вблизи энергии связи нейтрона в ${}^4\text{He}$. Отсюда был сделан смелый вывод о существовании у ${}^4\text{He}$ возбужденного состояния с энергией около 20—21 МэВ и спином и четностью 0^+ . Это существенное для теории легких ядер предсказание в течение нескольких лет оспаривалось. Вопрос о возбужденных состояниях гелия живо интересует физиков. Было множество указаний на наличие различных энергетических уровней гелия. Однако среди них не было уровня, найденного в работах Ф.Л.Шапиро. Теоретически существование такого состояния также представлялось сомнительным. Поэтому на Всесоюзной конференции по ядерным реакциям при малых и средних энергиях в 1958 г. этот результат был встречен более чем скептически. Лишь несколько лет спустя на Парижском конгрессе по ядерной физике в 1964 г. он получил общее признание, так как был подтвержден, как у нас, так и за рубежом, другими методами. Более того, уровень 0^+ , найденный в работах Ф.Л.Шапиро, в течение нескольких лет после того считался единственным достоверно установленным.

Как уже отмечалось, сравнение энергетических зависимостей нейтронных сечений, полученных в экспериментах с ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{14}\text{N}$, показало заметное отклонение от закона $1/v$ для ${}^3\text{He}$, в то время как для ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{14}\text{N}$ оно не было значительным. После классических работ Ферми считалось общепринятым, что закон $1/v$ — одна из наиболее общих закономерностей, в то время как отклонение от него является индивидуальным для каждого ядра проявлением его резонансов. Зависимость эффективного сечения от скорости в общем виде может быть записана в виде разложения в ряд $\sigma = (\alpha/v) - \beta + \gamma v = \dots$. Существенный результат, полученный Ф.Л.Шапиро, состоит в том, что в этом разложении второй и притом отрицательный член β столь же универсален, как и первый. Величина β пропорциональна α^2 и зависит от спина канала, через который идет реакция, и она однозначно определяется ими. Наличие отрицательной добавки к закону Ферми в большинстве случаев маскируется следующими членами разложения γv и т.д. Таким образом, работы Шапиро привели к обобщению закона $1/v$, который имеет большое принципиальное значение и теперь вошел в учебники по квантовой механике.

Обоснование метода спектрометрии по времени замедления потребовало развития теории нестационарного замедления нейтронов (Ф.Л.Шапиро, М.В.Казарновский, А.В.Степанов, И.М.Франк), а также ряда экспериментальных исследований.

К этому близко примыкают исследования по диффузии тепловых нейтронов импульсным методом (идея этого метода нестационарной диффузии была предложена И.М.Франком), в теоретическое и особенно экспериментальное обоснование которого был внесен большой вклад Ф.Л.Шапиро. Первое сообщение об этом методе содержалось в докладе Ф.Л.Шапиро на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в 1955 г.

В 1958 г. Ф.Л.Шапиро параллельно с ФИАН начинает работать в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, где в недавно организованной Лаборатории нейтронной физики строился первый импульсный реактор периодического действия ИБР. В 1959 г. Федор Львович становится заместителем по науке директора Лаборатории И.М.Франка. В этой Лаборатории он постепенно сосредоточил всю свою научную деятельность. Сфера его творчества сильно расширилась.

Наряду с работами на пучках реактора ИБР, о которых мы еще будем говорить, Ф.Л.Шапиро в начале 60-х годов вносит заметный вклад в развитие нового направления в ядерной спектроскопии — резонансного рассеяния γ -квантов (эффект Мессбауэра). Вскоре после открытия этого эффекта Ф.Л.Шапиро совместно с И.Я.Баритом и М.И.Подгорецким показали возможность его применения для проверки одного из следствий общей теории относительности — красного смещения, ранее представлявшегося недоступным для лабораторного эксперимента. Такой опыт был затем осуществлен американским физиком Р.Паундом, независимо пришедшим к той же мысли (как выяснилось позже, красное смещение можно объяснить и в рамках специальной теории относительности). Ф.Л.Шапиро развил полуклассическую теорию эффекта Мессбауэра, дающую физически ясную интерпретацию этого явления. Им и его сотрудниками были выполнены тонкие эксперименты по исследованию эффекта Мессбауэра на некоторых ядрах, в том числе на ^{67}Zn , имеющего рекордно узкую ширину линии. Его талантливому ученику Ю.М.Останевичу при защите кандидатской диссертации по результатам этих исследований была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук.

В 1960 г. был запущен импульсный реактор ИБР. Научная программа исследований на этом реакторе в большей части основана на идеях Ф.Л.Шапиро. Из его многочисленных работ в дубненский период жизни наиболее существенными являются следующие.

В нейтронной физике, как и в ядерной физике вообще, большое значение имеют эксперименты с поляризованными частицами. Существует несколько методов поляризации медленных и быстрых нейтронов. Но для обширной области энергий нейтронов от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч электронвольт адекватного метода не было. В 1960 г. Ф.Л.Шапиро предложил и разработал (совместно с Ю.В.Тараном) новый метод поляризации нейтронов фильтрацией их через поляризованную протонную мишень [6]. Метод протонного фильтра полностью перекрыл «белую» область энергий нейтронов. В это время в ряде стран интенсивно разрабатывался метод динамической поляризации ядер, приведший к созданию поляризованной протонной мишени для ядерных экспериментов в 1962 г. во Франции (Сакле) и в 1963 г. в США (Беркли). В ОИЯИ под руководством Ф.Л.Шапиро группа сотрудников ЛНФ (В.И.Лушиков и др.) с участием сотрудников из Лаборатории ядерных проблем (Б.Н.Неганов, Л.Б.Парфенов) сравнительно быстро освоили методику динамической поляризации протонов в мишени, и уже в 1964 г. с помощью такой мишени на реакторе ИБР впервые был получен пучок поляризованных резонансных нейтронов с энергией до 10 кэВ. Дальнейшее развитие этого метода позволило ЛНФ в 1966 г. иметь мишень с поляризацией протонов 70%, с рекордным объемом 35 см^2 и, соответственно, высокоинтенсивный пучок резонансных нейтронов с поляризацией 70%.

В течение 1965—1968 гг. на созданном времяпролетном спектрометре поляризованных нейтронов, который многократно совершенствовался, был выполнен ряд экспериментов по изучению взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами. В такого сорта экспериментах могут быть реализованы две возможности: определение спинов нейтронных резонансов и спиновых компонент длин рассеяния нейтронов на ядрах. Оба направления были развиты в ЛНФ ОИЯИ.

Первое из них не было оригинальным, так как несколькими годами раньше в США две группы физиков начали проводить такие измерения, используя кристалл-дифракционный метод поляризации резонансных нейтронов. Ограниченность этого метода по энергии (не выше 15—20 эВ), трудоемкость измерений из-за низкой интенсивности (отражательная способность кристалла обратно пропорциональна энергии нейтронов, что с учетом фермиевской формы спектра резонансных нейтронов приводит к квадратичному падению интенсивности отраженного пучка с увеличением энергии) и необходимость сканировать брэгговский угол для энергетического анализа predeterminedили скудость полученной информации, что привело в дальнейшем к свертыванию этих работ.

Преимущества новой поляризационной методики были продемонстрированы в экспериментах с поляризованной гольмиевой мишенью, созданной

группой В.П.Алфименкова. Были определены спины нескольких десятков нейтронных резонансов. В этих экспериментах произошел эпизод, чем-то напоминающий случай с обнаружением нейтронного резонанса в железе при 1180 эВ, о котором было рассказано выше. После обработки первой серии измерений в энергетической зависимости эффекта пропускания, представляющего собой относительную разницу двух времяпролетных спектров с параллельной и антипараллельной ориентацией поляризаций нейтронов и ядер гольмия соответственно, был обнаружен пик при энергии около 8 эВ. Просмотр литературы показал, что при близкой энергии еще в 1955 г. американскими физиками наблюдался резонанс, но он был ими приписан малой примеси ^{152}Sm , имеющего очень сильный резонанс при 8,01 эВ. Поскольку никакого эффекта на ^{152}Sm , являющегося четно-четным изотопом с нулевым спином, не должно было бы наблюдаться, было предположено, что этот резонанс в действительности принадлежит гольмию. Измерения спектров пропускания образцов из окисей гольмия и самария, оперативно проведенные А.Б.Поповым на времяпролетном спектрометре высокого разрешения, показали, что энергии резонансов гольмия и самария различны. Таким образом, с помощью поляризационной методики был переоткрыт резонанс в гольмии при энергии 8,1 эВ.

Другое направление — определение спиновых компонент a_{\pm} в известном операторе \hat{a} длины рассеяния нейтрона на ядре со спином I :

$$\hat{a} = (I + 1)(2I + 1)^{-1}a_{+} + I(2I + 1)^{-1}a_{-} + 2(a_{+} - a_{-})(2I + 1)^{-1}\hat{\mathbf{I}}\hat{\mathbf{S}},$$

было начато в ЛНФ под руководством Ф.Л.Шапиро на примере системы нейтрон + дейтрон. Дублетная ($a_{-} \equiv a_2$) и кватетная ($a_{+} \equiv a_4$) длины рассеяния нейтрона и дейтрона относятся к тем основным константам взаимодействия трех нуклонов, которые в первую очередь используются для проверки адекватности любого решения ядерной задачи трех тел.

Еще в 1951 г. из экспериментов с неполяризованными нейтронами и ядрами дейтерия были определены два возможных набора длин рассеяния, в первом из которых $a_2 < a_4$, а во втором $a_2 > a_4$. За эти годы было выполнено множество теоретических работ, итогом которых явился выбор первого набора. Тем не менее явно ощущалась необходимость в экспериментальном выборе истинного набора, поскольку все теоретические построения основаны на приближительных моделях ядерных сил и на приближенных математических методах решения. Более того, в появившейся в 1965 г. работе А.М.Балдина содержался ряд серьезных аргументов в пользу второго набора. Примерно в это время в ЛНФ были начаты исследования по динамической поляризации дейтронов в знаменитом лантан-магниево-нитрате, в котором кристаллизационная обычная вода заменялась на тяжелую [7]. Эти

исследования завершились созданием первой в мире поляризованной дейтронной мишени, которая вскоре была использована в нейтронном эксперименте. Вопрос решился в пользу первого набора. С методической точки зрения эксперимент носил уникальный характер: одновременно на нейтронном пучке работали две динамически поляризованные мишени — протонная и дейтронная.

Завершая обзор поляризационных исследований с медленными нейтронами, выполненных в ЛНФ под руководством Ф.Л.Шапира, хотелось бы привести одну из компетентных оценок места этих работ в мировой науке. Выступая на 2-й Международной конференции по поляризованным мишеням (1971 г.), известный американский физик Дж.Даббс отметил три достижения за последние годы, приведшие к радикальному изменению тупиковой ситуации, сложившейся в исследованиях взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами: 1) предложение об использовании поляризованной протонной мишени в качестве поляризатора нейтронов; 2) развитие техники сверхпроводящих магнитов с высокой напряженностью поля и сверхнизкотемпературных рефрижераторов с растворением гелия-3 в гелии-4 для получения высокой ядерной поляризации; 3) создание импульсных источников нейтронов на базе сильноточных линейных ускорителей электронов.

Дальнейшее использование метода протонного фильтра принесло ряд выдающихся результатов. Например, в ЛНФ было открыто резонансное усиление *P*-нечетных эффектов во взаимодействии нейтронов с ядрами (В.П.Алфименков, Л.Б.Пикельнер и др.).

Хотя реактор ИБР вначале был задуман в основном для работ по нейтронной спектроскопии в ядерной физике, он оказался чрезвычайно эффективным инструментом и для исследований по физике конденсированного состояния вещества. Здесь Ф.Л.Шапиро и его сотрудникам принадлежит ряд пионерских исследований.

Вместе с польскими физиками он экспериментально обосновал метод дифракции нейтронов для структурных исследований, основанных не на измерении угла дифракции, а на измерении энергии нейтронов методом времени пролета при заданном угле дифракции. Этот метод оказался чрезвычайно плодотворным. Показателем этого может служить парк из времяпролетных дифрактометров, действующих на импульсном быстром реакторе ИБР-2.

С именем Федора Львовича Шапира связано развитие исследований динамики вещества с помощью неупругого рассеяния нейтронов на реакторе ИБР. Группой физиков (В.В.Голиковым, Е.Яником и др.) с его участием была создана установка для исследования рассеяния холодных нейтронов в прямой геометрии и выполнен большой цикл работ по динамике молекул в различных жидкостях.

Ф.Л.Шапиро, независимо от зарубежных физиков, в 1961 г. предложил и затем применил в ряде работ оригинальный метод обратной геометрии для изучения неупругих взаимодействий медленных нейтронов с веществом. Эти работы принесли Ф.Л.Шапиро — специалисту в области ядерной физики — широкую известность и среди специалистов по физике твердого тела.

Создание импульсных источников нейтронов на базе линейных ускорителей электронов в ряде ядерных центров сделало актуальной задачу повышения разрешающей способности нейтронных спектрометров на реакторе ИБР. Начиная с 1963 г. под непосредственным руководством Ф.Л.Шапиро разрабатываются и создаются уникальные тандемные системы реактора ИБР с электронным инжектором. В них источник электронов вместе с подходящей мишенью служит импульсным инжектором фотонейтронов, а реактор ИБР — импульсным подкритическим размножителем. В качестве электронного инжектора вначале использовался микротрон (1964—1968 гг.), а затем линейный ускоритель ЛУЭ-40. За эти разработки Ф.Л.Шапиро вместе с другими участниками была присуждена в 1971 г. Государственная премия. Ф.Л.Шапиро внес большой вклад в разработку нового мощного реактора ИБР-2, начатую в ЛНФ в 1965 г.

Целый каскад оригинальных идей был высказан Ф.Л.Шапиро и в других областях ядерной физики: измерение асимметрии β -распада ядер, образованных захватом медленных нейтронов, и извлечение из нее информации о ядре и веществе; метод увеличения интенсивности в измерениях по времени пролета путем развертки пучка заряженных частиц по винтовой мишени, служащей источником нейтронов (так называемый метод Шапиро); способ измерения фаз структурных амплитуд и другие. Некоторые из этих идей были реализованы самим Ф.Л.Шапиро и его сотрудниками, другие — в советских институтах и за рубежом.

Одна из таких оригинальных идей, осуществленная Ф.Л.Шапиро вместе с сотрудниками, — измерение магнитных моментов нейтронных резонансов ядер, возбуждаемых нейтронами, по сдвигу их энергии в магнитном поле. Первые результаты этих экспериментов были опубликованы незадолго до кончины Ф.Л.Шапиро.

Последний период жизни Ф.Л.Шапиро посвятил совсем новой области — физике ультрахолодных нейтронов (УХН). Дело в том, что после обнаружения несохранения CP -четности в распаде нейтрального K -мезона весьма актуальным оказался вопрос о возможном наличии у нейтрона электрического дипольного момента (ЭДМ). Измерение его величины позволило бы существенно продвинуться в понимании этой проблемы. Однако ЭДМ нейтрона, если он и отличен от нуля, то настолько мал, что пока не может быть обнаружен и измерен.

В 1968 г. на проходившем в Москве Международном семинаре по проблеме нарушения CP -инвариантности Ф.Л.Шапиро в обзорном докладе вы-

сказал оригинальную идею о возможности использования для этой цели УХН. Согласно основанной на теоретических представлениях идее, высказанной Я.Б.Зельдовичем в 1959 г., нейтроны с достаточно малыми скоростями (несколько метров в секунду) должны обладать способностью практически полностью отражаться от поверхности многих веществ. Поэтому можно ожидать, что такие нейтроны будут длительно храниться в замкнутых объемах со стенками из этих веществ. Это обстоятельство, как указал Ф.Л.Шапиро, позволяет надеяться, использовав их, существенно повысить точность измерения ЭДМ за счет перехода от пучкового эксперимента (время нахождения нейтронов в установке около 10^{-2} с) к накопительному варианту, в котором нейтроны удерживаются сотни секунд. Однако получение ультрахолодных нейтронов считалось настолько сложной задачей, что до этого времени попыток их обнаружить не делалось. Дело в том, что в потоке тепловых нейтронов их доля не превышает $\sim 10^{-11}$.

В 1968 г. Ф.Л.Шапиро вместе с группой дубненских физиков (В.И.Лущиков, А.В.Стрелков, Ю.Н.Покотиловский) осуществили попытку экспериментального извлечения УХН из реактора ИБР. Несмотря на крайне малую среднюю мощность реактора (10 кВт), удалось надежно зафиксировать УХН. В этом эксперименте существенную роль сыграло использование импульсности реактора, так как УХН регистрировались между импульсами реактора в условиях очень малого фона.

После открытия УХН встал вопрос о количественном исследовании их свойств. С этой целью группами Ф.Л.Шапиро и Л.В.Грошева был создан канал УХН на реакторе ИРТ-М в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова, на котором был выполнен цикл красивых и наглядных экспериментов, получивших мировой резонанс. Среди них, безусловно, надо отметить первую реализацию очень старой мечты Э.Ферми о создании «нейтронной бутылки», в которой нейтроны жили десятки секунд. Спустя двадцать лет на этом пути были получены рекордные по точности экспериментальные оценки ЭДМ и другой фундаментальной характеристики нейтрона — времени жизни относительно β -распада.

В 1972 г. Ф.Л.Шапиро подготовил большой обзорный доклад по УХН для Будапештской конференции по исследованию структуры ядра нейтронами [8]. В нем, в частности, были описаны исследования по получению и удержанию УХН, выполненные под его руководством в 1968—1972 гг. В докладе была намечена обширная программа применения УХН в физике элементарных частиц (нейтрон), ядерной и реакторной физике, физике твердого тела, физической химии, а также ряд других, как он выразился, «более экзотических» применений УХН (нейтронная мишень, нейтронный микроскоп и т.д.). Многие из этой программы сделано, часть задач может быть реализована на современном уровне техники нейтронного эксперимента, осуществление других идей, по-видимому, дело неблизкого будущего

(например, получение сверхнизких температур за счет неупругого рассеяния — нагрева УХН).

К сожалению, Федору Львовичу не удалось самому сделать доклад на этой конференции (его представил В.И.Лушиков). Он был уже серьезно болен. Не дожив двух месяцев до 58 лет, Ф.Л.Шапино скончался 30 января 1973 г. Он ушел в расцвете творческих сил. Сколько прекрасных работ сделал бы еще Федор Львович, если бы судьба подарила ему хотя бы 10—15 лет.

Завершая обзор научного наследия* Ф.Л.Шапино, нельзя не отметить его талант педагога. Еще молодым научным сотрудником ФИАН он начал свою педагогическую деятельность в Московском государственном университете. Семинары для студентов, активное участие в создании практикума по ядерной физике, чтение лекционных курсов, написание учебников, руководство дипломниками и аспирантами — вот лестница, по которой он быстро поднялся, благодаря удивительной способности ясно, точно и экономно излагать материал. Этим же отличались его доклады на семинарах и конференциях, выступления в прениях.

Научные и педагогические заслуги Ф.Л.Шапино были отмечены государственными наградами и премиями, в 1967 г. ему было присвоено звание профессора, а в 1968 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук. Имя Федора Львовича Шапино прочно вошло в физику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таран Ю.В., Франк И.М. — В кн.: Шапино Ф.Л. Физика нейтронов. Собрание трудов, т.1, М.: Наука, 1976, с.5.
2. Еллидинский А.В., Шапино Ф.Л., Штрахис И.В. — В сб.: Ядерные реакции на легких ядрах. М.: Атомиздат, 1957, с.75.
3. Лазарева Е.Л., Фейнберг Е.Л., Шапино Ф.Л. — ЖЭТФ, 1955, т.29, с.381.
4. Бергман А.А., Исаков А.И., Мурин И.Д., Шапино Ф.Л. и др. — Труды Женевской конференции, М.: Академиздат, 1957, т.4, с.166.
5. Alekseev A.A. et al. — Proc. II Int. Seminar on Interact. of Neutron with Nuclei, April 26—28, 1994, Dubna.
6. Таран Ю.В., Шапино Ф.Л. — ЖЭТФ, 1963, т.44, с.2185.
7. Лушиков В.И., Таран Ю.В., Франк А.И. — Письма в ЖЭТФ, 1965, т.1, с.21.
8. Shapiro F.L. — Nuclear Structure Study with Neutron, London, Plenum Press, 1974, p.259.
9. Шапино Ф.Л. — Физика нейтронов. Собрание трудов, т.1, М.: Наука, 1976.
10. Шапино Ф.Л. — Нейтронные исследования. Собрание трудов, т.2, М.: Наука, 1976.

*По решению Президиума Академии наук в 1976 г. было издано двухтомное собрание трудов Ф.Л.Шапино [9,10].