

# ИССЛЕДОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В. И. СЕРОВ

Создание термоядерного оружия потребовало проведения значительных теоретических и экспериментальных работ, формирования новых научных подразделений. В 1952 г. на основе НИСа (научно-исследовательского сектора) был создан нынешний ИЯРФ, основная задача которого на тот момент состояла в определении характеристик ядерных устройств и измерении ядерных констант для активных и конструкционных материалов. Непосредственно после успешного испытания РДС-6 под руководством И. В. Курчатова было проведено большое совещание, на котором утвердили программу развития работ по совершенствованию термоядерного оружия, предусматривавшую проведение дальнейших ядерно-физических исследований и создание необходимой для этого экспериментальной базы.

Одной из первых задач было исследование ядерных реакций с участием легчайших ядер: дейтерия, трития, изотопов лития, бериллия и др. и свойств этих ядер, в том числе и таких, существование которых только предполагалось. Так, в начале 1960-х гг. в журнале «Успехи физических наук» была опубликована большая статья известных физиков-теоретиков А. И. Базя, В. И. Гольданского и Я. Б. Зельдовича о свойствах легчайших ядер, которая очень нам помогла в формировании программы исследований.

Примерно к этому времени во ВНИИЭФ работали первые ускорители: ЭГ-4, ИВ-15, бетатрон, и возникли новые возможности для ядерно-физических исследований. По предложению Зельдовича и Базя на ускорителе ЭГ-4 были проведены эксперименты по определению ядерной стабильности легчайших ядер: динейтрона, сверхтяжелого изотопа водорода  ${}^4\text{H}$  и др. Работы были поддержаны и научным руководителем — Ю. Б. Харитоном.

Мы были молоды и работали с большим энтузиазмом. Шутка ли сказать, нашими работами интересовались такие корифеи, как Зельдович, Гольданский. Тогда ход работ обсуждался на проходивших в секторе семинарах, на которых присутствовали и наши видные теоретики. Часто, обсудив текущие вопросы, академик Я. Б. Зельдович говорил: «Виктор Иванович, а как дела с поиском динейтрона?». Я рассказывал о том, что



В. И. Серов

мы успели сделать. Зельдович обычно заканчивал обсуждение так: «Я все же думаю, что динейтрона в природе не существует».

Динейтрон — это система, состоящая из двух нейтронов. Ядро дейтерия (дейтрон) — это стабильная система, состоящая из протона и нейтрона. Спины у этих частиц должны быть при этом параллельными. Из экспериментальных данных по рассеянию нейтронов на водороде было известно, что у системы протон-нейтрон с антипараллельными спинами не существует ядерно-стабильного состояния. Ядерные силы между протоном и нейтроном в этом случае недостаточны, чтобы их связать. Однако недостатка совсем немного. Согласно идее о зарядовой независимости ядерных сил можно ожидать то же самое и для системы нейтрон-нейтрон. По рассуждениям Якова Борисовича следовало, что при ядерном потенциале примерно 35 МэВ недостает всего ~0,7 МэВ, чтобы система нейтрон-нейтрон стала ядерно-стабильной. Но наши знания о ядерных силах в то время не обладали такой точностью, поэтому и нельзя было судить о существовании динейтрона с достаточной определенностью.

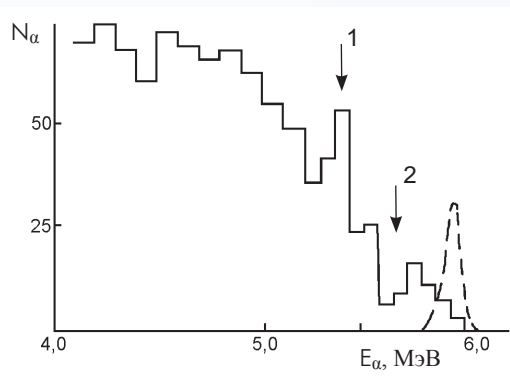
Мы тогда уже научились получать на ускорителе пучок тритонов (ядер изотопа водорода трития). Поэтому для экспериментов была выбрана реакция между ядрами лития и трития:  ${}^7\text{Li} + t \rightarrow {}^6\text{He}^* + {}^4\text{He}$  (звездочка обозначает, что частица находится в возбужденном состоянии). Ядро  ${}^6\text{He}^*$  с энергией возбуждения 1,797 МэВ

должно распадаться на три частицы:  ${}^4\text{He} + 2n$  с энергией реакции  $Q=0,82$  МэВ. Реакция ядер  ${}^7\text{Li}$  с тритонами одновременно идет и по второму каналу с образованием стабильного  ${}^6\text{He}$  и  $\alpha$ -частицы:  ${}^7\text{Li} + t \rightarrow {}^6\text{He} + {}^4\text{He}$ . Поэтому для поиска динейтрона измерялся одновременный вылет двух  $\alpha$ -частиц. В случае трехчастичного распада  ${}^6\text{He}^*$  спектр вылетающих  ${}^4\text{He}$  ( $\alpha$ -частиц) должен быть сплошным, а если образуется ядерно-стабильный динейтрон, то вблизи верхней границы  $\alpha$ -спектра должен наблюдаться отдельный пик ( $\alpha$ -спектр — это зависимость числа  $\alpha$ -частиц от их энергии).

Это был сложный эксперимент. Нужно было использовать очень тонкие мишени и тонкие подложки ( $\sim 1$  мкм) для мишеней, чтобы и падающие тритоны, и вылетающие  $\alpha$ -частицы имели малый разброс по энергии, а поэтому не должны были терять много энергии в подложках и мишенях. Для регистрации  $\alpha$ -частиц распада  ${}^6\text{He}^*$  использовали первые появившиеся в Советском Союзе полупроводниковые детекторы, а  $\alpha$ -частицы, указывающие на образование  ${}^6\text{He}^*$ , регистрировались другим детектором после магнитного анализатора. Это были длительные круглосуточные измерения, так как анализатор имел малую светосилу.

На рисунке приведен спектр  $\alpha$ -частиц, полученный в эксперименте. Если бы существовал стабильный динейтрон, был бы зарегистрирован отдельный  $\alpha$ -пик в спектре справа от стрелки 2 (показано пунктиром). Наблюдающийся небольшой пик справа вблизи стрелки 2 обязан фоновой регистрации ядер  ${}^6\text{He}$  из второго канала реакции.

Интересен небольшой пик, помеченный стрелкой 1, полушириной 150 кэВ (с учетом толщины мишени, подложки и энергетического разрешения двух детекторов). Он свидетельствует о том, что в противоположном направлении относительно  $\alpha$ -частиц распада  ${}^6\text{He}^*$  одновременно



Спектр  $\alpha$ -частиц распада  ${}^6\text{He}^*$  из  $\alpha$ - $\alpha$  совпадений



В. И. Серов проводит измерения

вылетают два нейтрона в узком конусе с близкими кинетическими энергиями (с малой энергией относительно движения), и можно считать, что на очень короткое время они образуют систему, — виртуальный динейтрон. Таким образом, его существование свидетельствует о двухнейтронном распаде  ${}^6\text{He}^*$ . Теория трехчастичного распада утверждает, что помимо сплошного спектра  $\alpha$ -частиц может быть еще резонансный пик даже при отсутствии связанной системы двух нейтронов. Мы подтвердили это экспериментально. Тогда мы не поняли значения своих данных и были разочарованы отсутствием ядерно-стабильного динейтрона. Но оказывается, что хотя и очень кратковременно, динейтрон существует!

Идеологически и методически оказалась похожей выполненная нами в 1967 г. работа по поиску возможного ядерно-стабильного сверхтяжелого изотопа водорода  ${}^4\text{H}$ . Использовалась реакция взаимодействия тритонов с изотопом бериллия:  ${}^9\text{Be} + t \rightarrow {}^8\text{Be} + n + t$ . И в этом случае при энергии тритона 4,2 МэВ помимо сплошного спектра наблюдается пик тритонов, обусловленный резонансным взаимодействием нейтрона с ядром  ${}^8\text{Be}$  при энергии системы ( ${}^8\text{Be}, n$ ) примерно 20 кэВ, т. е. существует виртуальная ядерная система ( ${}^8\text{Be}, n$ ) с временем жизни  $\sim 10^{-20}$  секунды!

В 1970-е гг. значительные усилия были приложены, чтобы измерить сечение реакции  $T + t \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$  в области малых энергий тритонов. До этого эксперименты были выполнены для тритонов с энергией выше  $\sim 60$  кэВ. Использовались газовые мишени с «толстым» входным окном. Но при экстраполяции этих данных к малым энергиям получались слишком большие значения поперечных сечений для этой реакции. Нам удалось спуститься по энергии до  $\sim 30$  кэВ.





Ускоритель ЭГП-10

Это первые экспериментальные данные для этой реакции при столь малых энергиях. Они были получены с достаточной точностью и согласовывались с теоретическим описанием с использованием формулы Гамова.

Уже после наших экспериментов в Лос-Аламосе были проведены прецизионные измерения сечений реакций  $D(d,p)^3\text{H}$  (краткая запись реакции  $D+d \rightarrow ^3\text{H}+p$ );  $D(d,n)^3\text{He}$ ;  $D(t,n)^4\text{He}$ ;  $T(t,2n)^4\text{He}$  на что было затрачено около 10 лет, и которые

подтвердили наши данные по реакции  $T(t,2n)^4\text{He}$ .

Своими работами мы также объяснили, что существенное различие поперечных сечений в реакциях  $^3\text{He}(^3\text{He},2p)^4\text{He}$  и  $T(t,2n)^4\text{He}$  обусловлено образованием нестабильных промежуточных систем. В первом случае такая нестабильная система состоит из нестабильной системы ( $^6\text{Li}, p$ ) и нестабильной системы ( $2p, ^4\text{He}$ ), во втором случае — из нестабильных систем ( $^5\text{He}, n$ ) и ( $2n, ^4\text{He}$ ).

Ядерно-физические исследования в РФЯЦ-ВНИИЭФ были нацелены главным образом на изучение ядерных реакций с легкими ядрами и свойств делящихся ядер в соответствии с потребностями наших теоретиков. После публикации в 1959 г. американской работы об исследовании реакций ( $d, pf$ ) и решения руководства ВНИИЭФ о строительстве нового ускорителя ЭГП-10 изучение таких реакций стало новым направлением работы в ядерно-физическом отделе ИЯРФ. Мы поняли, что в реакции ( $t, pf$ ) можно изучать ядерные свойства короткоживущих ядер, образующихся после захвата двух нейтронов ( $f$  означает *fission* — деление). Это наглядно демонстрирует следующая схема.  $^{238}\text{U} + t \rightarrow ^{240}\text{U}^* + p$ , далее  $^{240}\text{U}^*$  переходит в основное состояние, испустив  $\gamma$ -кванты, либо делится, испуская при этом дополнительные нейтроны. Таким образом, в реакции ( $t, p$ ) получаются ядра, которые могут образоваться в результате последовательного захвата двух нейтронов. И в реакции ( $t, pf$ ) можно получить данные, например, о делении  $^{239}\text{U}^*$  (ко-

торый живет 23,4 минуты) нейтронами, а прямые эксперименты с этим изотопом практически невозможны.

Для проведения таких экспериментов нужен был ускоритель на энергию ускоренных частиц  $> 10$  МэВ. Таким ускорителем стал ЭГП-10, который был разработан и изготовлен под руководством А. В. Алмазова в содружестве с ленинградским институтом. Большим достоинством таких ускорителей является высокая монохроматичность пучка ( $\sim 0,01\%$ ). После целого ряда усовершенствований на ЭГП-10 был получен пучок ионов изотопов водорода с энергией до 13 МэВ. Для исследования реакций потребовалось создание новых детекторов и сложного комплекса электроники с использованием ЭВМ. Наши методики позволили получить для таких реакций данные в широкой области энергий возбуждения от самых малых (допороговых) до максимальных, определяемых энергией бомбардирующих частиц. В дальнейшем эти методы были усложнены использованием дополнительных детекторов осколков деления и нейтронов.

И здесь были получены неожиданные результаты. Оказалось, что выход нейтронов на акт деления испытывает заметные нерегулярности при энергиях возбуждения, меньших энергии связи нейтронов в делящемся ядре, при сохранении полной средней кинетической энергии осколков деления. Например, в 1984 г. мы измеряли выход нейтронов в реакции  $^{239}\text{Pu}(d, pfn)$  при энергии дейтронов  $E_d = 12,4$  МэВ и наблюдали такие увеличения (пики) на графике выхода нейтронов в зависимости от энергии возбуждения. Данные немецких ученых по выходу спонтанно-делящегося изомера  $^{240}\text{Pu}^{mf}$  с временем жизни 4 нс в этой же реакции косвенно подтверждают наши выводы и указывают, что увеличенный выход нейтронов связан со сложным характером барьера деления: имеется второй минимум в потенциальной энергии, основным состоянием в котором является изомер  $^{240}\text{Pu}^{mf}$  (изомер — это относительно долгоживущее возбужденное состояние, наносекунды считаются очень долгим сроком жизни). Наши данные указывают также, что существующие представления о делении тяжелых ядер в реакции ( $d, pf$ ) неточны, дополнительные нейтроны не могут испускаться при энергиях возбуждения меньших, чем энергия связи нейтрона в делящемся ядре.

Данные о реакциях ( $d, pf$ ) можно объяснить, если предположить, что перед делением часть дейтронов резонансно перейдет в другое состояние — становится «синглетным» дейтроном, в

котором спины протона и нейтрона антипараллельны. Как и динейтрон — это виртуальная частица и образуется вдали от ядра в результате резонансного расщепления обычного дейтрона в кулоновском поле тяжелого ядра на расстоянии ~50 ферми (1 ферми = 10–13 см) с кинетической энергией на 2,3 МэВ меньше, чем у первичного дейтрона.

Таким образом, на ядро будут падать две частицы: обычный дейтрон и синглетный дейтрон. Синглетный дейтрон имеет существенно большие размеры, и его взаимодействие с начальным тяжелым ядром будет более вероятным. До подлета к ядру синглетный дейтрон «не развалится». Действительно, энергия, приходящаяся на нуклон, у синглетного дейтрона составляет ~35 кэВ, и при первичной энергии ~10 МэВ, нуклоны на расстоянии 50 ферми разойдутся на  $\Delta R \sim 4$  ферми, что не превышает размер тяжелого ядра (~8 ферми). Поэтому с тяжелым ядром синглетный дейтрон будет взаимодействовать как единая частица, но к ядру протон и нейтрон подойдут в разное время.

В первый момент после образования синглетного дейтрона (расщепления обычного дейтрона) на каждый нуклон приходится по ~5 МэВ, протон с такой энергией «остановится» (из-за кулоновского барьера), а вся энергия первичного дейтрона будет передаваться нейтрону. Поэтому на этом этапе протон не участвует в перераспределении энергии, а нейтрон от синглетного дейтрона объединится с нечетным нейтроном начального тяжелого ядра, и образуется трехчастичная система с малой энергией относительного движения (образование трехчастичной системы (резонанса) нами наблюдалось в реакции  $^{232}\text{Th}(t, f)$ ).

После образования трехчастичной системы произойдет изменение потенциальной энергии вблизи ядра, и возникнут дополнительные потенциальные минимумы вследствие большой деформации ядра, когда деформированное ядро будет в несколько раз превышать размер начального, и будет прямое заселение динейтронных состояний в этих потенциальных минимумах. При распаде этих состояний может быть дополнительная эмиссия нейтронов за счет энергии, которая не была передана протону, так как он находится за барьером.

С обычными дейтронами также будет происходить реакция  $(d, pf)$ , но она будет иметь меньшую вероятность, а протоны от этой реакции будут располагаться по энергии возбуждения в другом месте при самых малых энергиях ~2,5 МэВ. И действительно, в американских эксперимен-

тальных данных нам удалось обнаружить небольшие пики, которые могут быть обязаны реакции  $(d, pf)$  с обычными дейтронами, но их интенсивность, как и следовало ожидать, в ~50 раз меньше, чем в реакциях с синглетными дейтронами.

Таким образом, наши экспериментальные результаты можно объяснить существованием предварительно образовавшегося синглетного дейтрона перед делением и сложный характер реакции вне пределов ядра. Ядро делится нейтроном, а затем делящемуся ядру с некоторой задержкой передается энергия, которая была передана протоном кулоновскому полю ядра. В зависимости от деформации делящегося ядра эта энергия уходит либо на эмиссию дополнительных нейтронов, либо на увеличение кинетической энергии осколков деления, что было зарегистрировано французскими учеными. Такие эксперименты были единственными в СССР, поскольку только во ВНИИЭФ был создан соответствующий ускоритель.

Обнаружение реального образования синглетного дейтрона при бомбардировке тяжелых ядер дейтронами трудно переоценить, так как оно открывает новый путь изучения возбужденных состояний (динейтронных состояний) за пределами ядер и расширяет границы ядерного взаимодействия для самых разных атомных ядер.

Да, наши результаты были на уровне открытий, но на это ушла вся наша жизнь. Конечно, такие работы были возможны благодаря поддержке научного руководства РФЯЦ-ВНИИЭФ, прежде всего академика Ю. Б. Харитона, финансовой поддержке Л. Д. Рябева и академика В. Н. Михайлова. В экспериментах участвовали мои коллеги М. Ф. Андреев, С. И. Абрамович, В. А. Завгородний, а также создатели ускорителей, обеспечивавшие их работу: А. В. Алмазов, Ю. М. Хирный, Ю. М. Большаков, Ф. Ф. Мынцов, В. В. Опасин.



*У хорошего экспериментатора легко раскалываются не только атомные ядра*

**СЕРОВ Виктор Иванович** —  
начальник лаборатории ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
кандидат физ.-мат. наук