

регулируемый делитель мощности и фазовращатель интерференционного типа, что и позволяет производить глубокую регулировку энергии электронов. Система диафрагм вместе с парой короткофокусных линз обеспечивает ввод электронного пучка диаметром 3 мм и с током до 1,5 а в импульсе строго по оси ускоряющей системы.

В процессе ускорения электроны находятся в постоянном по длине магнитном поле соленоида. Он состоит из нескольких жестко посаженных на диафрагмированный волновод и плотно примыкающих друг к другу галет, намотанных широкой медной лентой толщиной 0,2 мм, что практически устраняет искаже-

ния магнитного поля, которые возникают при винтовой намотке шиной или трубкой. Исследования показали, что в такой системе при токах до 1,5 а, обеспечиваемых электронным источником, никаких признаков разрушения пучка не наблюдается.

С момента пуска и до настоящего времени ускоритель постоянно используется для проведения исследований с электронным пучком и отработки его элементов. Одновременно ведутся работы по облучению смол, резин и дозиметрии в процессе облучения.

В. М. ЛЕВИН, В. В. РУМЯНЦЕВ,
В. И. МУНТЯН

О советско-датском сотрудничестве в исследовании спонтанно делящихся изомеров

Сотрудничество советских и датских ученых имеет давние традиции. Основанный Нильсом Бором Институт теоретической физики быстро завоевал международное признание как один из центров ядерной физики. Нильс Бор охотно принимал к себе советских ученых, включая их в творческую научную жизнь группировавшегося вокруг него интернационального коллектива. В послевоенное время эти контакты были упрочены и расширены. Сотрудничество стало принимать более конкретную форму, были выполнены совместные работы в области ядерной физики.

Одной из таких совместных работ, проводимой в последние годы, является работа по исследованию свойств спонтанно делящихся изомеров. Изомерные состояния были открыты в 1961 г. С. М. Поликановым с сотрудниками в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Эти состояния характеризуются аномально малым временем жизни по отношению к спонтанному делению. Например, первый из открытых изомеров Am^{242} имеет время жизни 14 мсек, что по крайней мере в 10^{20} раз меньше, чем для основного состояния этого ядра. Такое резкое увеличение вероятности спонтанного деления в изомерном состоянии трудно объяснить на основе общепринятых представлений о свойствах атомных ядер. Согласно современным взглядам на механизм деления барьер деления растет при переходе от четно-четных ядер к нечетным, так как в седловой точке состояние с тем же спином, что и основное состояние нечетного ядра, поднято на 0,5—1 Мэв, а спин в процессе деления должен сохраняться. По этой же причине должен повышаться барьер деления и для изомерных состояний, что должно компенсировать уменьшение проникаемости барьера за счет энергии возбуждения изомерного уровня. Поэтому аномально малое время жизни по отношению к спонтанному делению, по-видимому, связано с необычной природой этих состояний, выяснение природы которых значительно затрудняется тем обстоятельством, что их α - или γ -переходы не обнаружены, а спонтанное деление не позволяет сделать каких-либо заключений об энергии, спине и четности изомерных уровней. Сведения об этих свойствах изомерных состояний можно получить лишь косвенным путем, при исследовании ядерных реакций, приводящих к таким состояниям.

В 1964 г. на Международной конференции по ядерной физике в Париже Г. Н. Флёрв рассказав об открытии и первом этапе исследований спонтанно деля-

щихся изомеров. Сообщение вызвало большой интерес среди физиков всего мира. При обсуждении этого явления с О. Бором была выдвинута гипотеза о том, что ядра в изомерном состоянии характеризуются деформацией, заметно большей, чем равновесная. Тогда же была достигнута договоренность о сотрудничестве Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и Института Нильса Бора в исследовании свойств спонтанно делящихся изомеров. Это сотрудничество значительно ускорило исследования, так как экспериментальные методики в ОИЯИ и Институте Нильса Бора взаимно дополняли друг друга. В Лаборатории ядерных реакций имеется крупнейший в мире циклотрон тяжелых многозарядных ионов, на котором ускоряются ионы вплоть до кальция с энергией до 10 Мэв на нуклон и с интенсивностью в десятки микроампер. В Институте Нильса Бора имеется тандем-генератор с высокой моноэнергетичностью пучка (~ 1 кэв) и достаточно хорошей интенсивностью. На этом генераторе можно ускорять протоны и дейтоны до энергии 14 Мэв.

Для выяснения природы спонтанно делящихся изомеров исследования проводились в двух направлениях: 1) поиски новых изомеров с тем, чтобы установить область распространения этих состояний; 2) изучение свойств известных изомерных состояний (Am^{240} , Am^{242}): определение энергии и спина уровней, а также путей заселения этих состояний в различных ядерных реакциях.

В соответствии с планом сотрудничества в опытах, проводимых на циклотроне Лаборатории ядерных реакций, участвовали датские ученые: С. Бьернхольм (в 1965 и 1966 гг.) и И. Борггрен (в 1967 г.). В то же время в Институте Нильса Бора в работах принимали участие сотрудники ОИЯИ В. А. Карнаухов (1966 г.), Ю. П. Гангрский (1967 г.) и В. А. Друин (1968 г.).

Работа по поиску новых изомеров проводилась преимущественно на циклотроне Лаборатории ядерных реакций, так как тяжелые ионы вызывают различные по своему характеру реакции, продукты которых имеют самые разнообразные свойства. Высокая интенсивность пучка ионов позволяет получать ядра, образующиеся даже с очень низкими сечениями (до 10^{-34} см²). Особое внимание было уделено поискам изомеров в наносекундной области. Была использована методика измерения времени пролета: ядра отдачи, выбиваемые из мишени бомбардирующими ионами, пролетали между двумя стеклянными детекторами. Если время жизни ядра мало, то распад происходил во время

Этого движения ядер и осколки деления оставляли треки на стеклянных детекторах. Из распределения треков по длине детекторов и известной скорости ядра отдачи можно определить время жизни изомерного состояния. При помощи этой методики был обнаружен новый спонтанно делящийся изомер Cf^{246} с периодом полураспада $5 \cdot 10^{-8}$ сек.

Были также найдены изомеры со сравнительно длинными периодами полураспада: Np^{228} (1,0 мин), Am^{232} (1,5 мин), Am^{234} (2,5 мин). Однако в этих случаях не исключена возможность, что деление происходит не из изомерного состояния, а после β -распада основных состояний указанных ядер (энергия β -распада таких ядер близка к барьеру деления дочерних ядер).

Другой работой, выполненной в этот период в Лаборатории ядерных реакций, было определение спина спонтанно делящегося изомера Am^{242} . Измерялись изомерные отношения (отношение сечений образования ядер Am^{242} в изомерном и основном состояниях) в реакциях с различными частицами (от протонов до ионов B^{11}). Реакции различались тем, что в ядро мишени вносился различный угловой момент (от $2\hbar$ в случае протонов до $15\hbar$ в случае ионов B^{11}). Оказалось, что изомерные отношения практически одинаковы в таком диапазоне вносимых моментов. Отсюда можно сделать вывод, что спин спонтанно делящегося изомера мал (не более $4-5\hbar$). В случае большого спина, как было показано на примере изомеров с известным спином (Au^{196} , $I = 12$ и Ir^{190} , $I = 11$), изомерное отношение быстро растет с увеличением вносимого момента.

В это же время были выполнены работы и в Институте Нильса Бора. В 1966 г. измерен порог реакции $\text{Pu}^{241}(p, 2n)$, приводящей к спонтанно делящемуся изомеру Am^{240} . Этот порог оказался на 3 Мэв выше порога той же реакции, но приводящей к основному состоянию Am^{240} . Разницу порогов естественно связать с энергией изомерного состояния, которая в этом случае близка к 3 Мэв . Такая высокая энергия и малый спин изомерного состояния могут объяснить наблюдаемое на опыте увеличение вероятности спонтанного деления, однако при этом оказывается совершенно непонятным большой запрет (не менее 10^{10}) для γ -излучения с изомерного состояния. В нечетно-нечетных тяжелых ядрах вблизи основного состояния имеется много уровней с различными спинами, поэтому γ -переходы с изомерного уровня будут иметь низкую мультипольность и запрет, связанный с изменением спина или его проекции на ось симметрии ядра, отсутствует.

В 1967 г. были исследованы реакции (d, p) и (d, t) , приводящие к спонтанно делящимся изомерам Am^{240} , Am^{242} и Am^{244} . Малая величина изомерного отношения

$[10^{-5}$ в реакциях (d, p) и $< 3 \cdot 10^{-7}$ в реакциях (d, t)] позволяет предположить, что изомерный уровень заселяется только через высоколежащие состояния, расположенные выше энергии связи нейтрона. Это может означать, что уровни, связанные с изомерным состоянием, отделены от основной массы уровней ядра потенциальным барьером. Такая особенность заселения изомерного состояния была детально исследована в результате совместной работы ученых ОИЯИ и Института атомной физики (Румыния). Измерение функции возбуждения реакции $\text{Am}^{241}(n, \gamma)\text{Am}^{242}$ показало, что для образования изомерного состояния нужна энергия нейтрона не менее $0,5 \text{ Мэв}$ или энергия возбуждения не менее 6 Мэв , что близко к порогу деления ядра Am^{242} , а состояния с меньшей энергией не приводят к изомерному уровню.

В Институте теоретической физики также проводились работы по поискам новых спонтанно делящихся изомеров. В 1967 г. в реакции $\text{Pu}^{239}(p, 2n)$ был получен новый изомер Am^{238} с периодом полураспада 60 мксек . В 1968 г. при использовании указанной выше методики измерения времени пролета были обнаружены новые изомеры в наносекундной области (Am^{239} , Am^{241} , изомеры плутония и нептуния). В этих опытах мишени из изотопов урана и плутония облучали ускоренными на тандем-генераторе протонами и дейтронами.

Таким образом, в результате совместных исследований советских и датских ученых был накоплен обширный экспериментальный материал о свойствах спонтанно делящихся изомеров: 1) изомерные состояния обнаружены в ядрах от нептуния до калифорния; 2) энергия изомерного состояния близка к 3 Мэв ; 3) спин изомерных состояний не превышает $4-5 \hbar$; 4) запрет по отношению к γ -переходам с изомерного уровня не менее 10^{10} ; 5) система уровней, связанная с изомерным состоянием, отделена от основной массы уровней барьером высотой около 6 Мэв .

Указанные свойства позволяют сделать заключение о природе спонтанно делящихся изомеров. В настоящее время еще нет общепринятой теории, интерпретирующей эти состояния, имеются лишь гипотезы. Наиболее удовлетворительной из них является гипотеза об изомерах формы. Согласно расчетам В. М. Струтинского, зависимость потенциальной энергии от деформации имеет не один минимум, как считалось ранее, а два. Один из них (более низкий и при меньшей деформации) соответствует основному состоянию ядра, а другой, при большей деформации, — изомерному.

Ю. П. ГАНГРСКИЙ

Худож. ред. А. С. Александров. Техн. ред. Е. И. Мазель. Корректор

Сдано в набор 5.XI. 1968 г. Подписано к печати 6.I 1969 г. Т — 01705. Тираж 3025 экз. Зак. изд. 68294. Формат $84 \times 108/16$. Усл. печ. л. 10,08 + 2 вклейки. Уч. изд. л. 12,34 Цена 1 р. Зак. тип. 553

Московская типография № 16 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Москва, Трехпрудный пер., 9.