

7571

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7571

Экз. ЧИТ. ЗЕЛ

P7 - 7571

Г.Н.Флеров

ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ НАУКИ И ТЕХНИКИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P7 - 7571

Г.Н.Флеров

**ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ НАУКИ И ТЕХНИКИ**

Лекция, прочитанная на 7 Всесоюзной школе
по ядерной физике (Алушта, 21-30 сентября, 1973 г.)

Я хотел бы посвятить свой доклад обзору научно-прикладных и ряда фундаментальных задач, стоящих сейчас перед ядерной физикой, и наметить некоторые возможные пути их решения. Правда, я не успел изменить ранее объявленное название, но после выступления А.И.База я считаю себя просто не вправе делать доклад на столь узкую тему, как это ранее предполагалось. Проф. Базь повел нас всех, так сказать, за кулисы того, что делается в настоящее время в теоретической физике. Следуя его примеру, я попытаюсь пройти вместе с Вами за кулисы того, что делается сейчас в экспериментальной ядерной физике и далее рассмотреть ряд задач, над которыми работает Совет по применению ядерной физики в смежных областях науки и техники, созданный и вот уже 3 года действующий в Академии наук.

Давайте вместе попытаемся посмотреть, каким образом можно было бы наиболее эффективно использовать те замечательные научно-экспериментальные и теоретические достижения, которые имеются в нашей ядерной физике.

При этом нельзя не учитывать результатов недавно закончившегося международного конгресса по ядерной физике в Мюнхене и наших впечатлений от знакомства с физическими институтами ФРГ. В частности, я возьму на себя смелость попытаться ответить на вопрос, какова должна быть наша стратегия в ядерной физике при условиях, когда через 2 года вступит в строй линейный ускоритель тяжелых ионов в Дармштадте, значительно превосходящий по своим параметрам все другие ускорители тяжелых ионов, в том числе и наши.

Создание такого ускорителя представляется особенно важным, если вспомнить недавнее высказывание А.Бора, с которым согласны многие ученые, о том, что ядерная физика ближайших 10 лет – это прежде всего физика тяжелых ионов.

Именно это соображение, а также исключительно большая практическая важность исследований с тяжелыми ионами (о чем пойдет речь ниже) и явились причиной того, почему после долгих дискуссий и анализа различных возможностей тяжелые ионы были поставлены в ФРГ во главу угла исследований по ядерной физике.

Кроме линейного ускорителя тяжелых ионов в Дармштадте, который позволит с интенсивностью $\sim 10^{13}$ частиц/сек иметь пучки ионов практически всех элементов периодической таблицы Менделеева, вплоть до урана, физики ФРГ будут обладать в 1974–75 г.г. также двумя уникальными тандемами с энергией 28 МэВ/нуклон. К этому следует добавить также оснащение физических лабораторий исключительными по своим параметрам магнитными анализаторами, вычислительной техникой, первоклассной химией, установками для экспрессного анализа всех типов. Нетрудно видеть, что здесь подготавливаются условия для нового мощного прорыва в ядерной физике.

Нам представляется, и здесь мы не расходимся с немецкими коллегами, что основным и самым фундаментальным вопросом ядерной физики сегодня является наличие или отсутствие области сверхтяжелых ядер. Для этого необходим широкий круг экспериментов, которые позволят изучать свойства этих ядер, в зависимости от того, насколько они отходят от второй области стабильности. Если более широко посмотреть на развитие ядерной физики, то наибольшего успеха можно ожидать на пути изучения ядерной материи в различных необычных экстремальных состояниях, т.е. открытие и анализ свойств новых элементов и изотопов, новых видов радиоактивного распада и т.д. На рис. 1 представлена карта изотопов, на которой можно видеть 3 области: область стабильности, области нейтроноизбыточных

который приводит к наблюдаемой сейчас картине распространности элементов. Уже сейчас, изучая свойства сильно нейтронообогащенных изотопов легких ядер, получаемых с большими сечениями в реакциях с тяжелыми ионами, изучая протонный распад ядер, сильно обедненных нейтронами, ведя поиски запаздывающих нейтронов, запаздывающих α -частиц и запаздывающего деления, изучая механизмы этих процессов, мы делаем определенные и важные шаги в этом направлении.

Наиболее ценная информация получается, на мой взгляд, тогда, когда мы изучаем ядра, либо очень удаленные от области стабильности, либо – при больших угловых моментах и высоких энергиях возбуждения, когда могут проявляться новые эффекты, такие, например, как исчезновение спаривания, изменение деформации и т.д. Наш подход к этому направлению основывается на том, что, если мы получили ядро, существенно отличное от известных ядер, то пойдем свойства известного ядра; если будем изучать ядра при очень больших спинах (иростовые состояния), то легче будет понять природу низколежащих состояний.

Всеми этими вопросами заниматься, безусловно, нужно. Однако в настоящее время определяющими для нас являются синтез и поиски сверхтяжелых ядер.

Если все работы, которые ведутся у нас, а в дальнейшем – в Дармштадте и в других центрах, не приведут к получению сверхтяжелых ядер, то это будет означать, что острова стабильности нет, а этот факт уже сам несет ценную информацию для понимания того, что происходит с ядрами по мере увеличения Z и A . Придется пересмотреть ряд фундаментальных предположений, которые до сих пор однозначно приводили к существованию сверхтяжелых ядер, какими бы моделями и методами мы ни пользовались в расчетах. В настоящее же время теория настойчиво указывает на то, что сверхтяжелые стабильные ядра должны существовать.

Однако из рис. 2 можно понять, что на пути к островам стабильности физиков поджидают еще серьезные трудности и испытания.

Безусловно, необходимо расширять использование тяжелых ионов. Вместе с тем существуют определенные свойства этих частиц, которые ядерной физике мешают, а именно: сильные удельные ионизации приводят к тому, что сами эксперименты очень сложны. Например, понятие тонкой мишени для урана состоит в том, что это должны быть доли микрограмма, чтобы можно было делать прецизионный опыт. В результате даже при потоке 10^{14} частиц в секунду общий выход изотопов значительно меньше, чем в случае протонов, и, значит, нужно получать с помощью тяжелых ядер только те новые изотопы, которые не получаются с помощью протонов, потому что в случае использования протонов пробеги достигают десятков сантиметров, что позволяет делать массивные мишени.

Однако именно то, что затрудняет проведение опытов с тяжелыми ионами при фундаментальных исследованиях, оказывается исключительно важным для научно-прикладных задач.

Правда, понятие фундаментальных и нефундаментальных исследований весьма относительно. Когда-то в Академии наук было желание разбить науки на фундаментальные и нефундаментальные. Тогда в зависимости от того, насколько фундаментальной является та или иная задача, можно было бы легко распределять вкладываемые в науку средства. Однако опыт прошлого и анализ того, что предстоит сделать, показал, что к понятию фундаментальности следует подходить с большой осторожностью, иначе это может привести к большим ошибкам. Науки нельзя делить на фундаментальные и нефундаментальные, исходя только из общих соображений, связанных с новизной изучаемых явлений. В каждой науке могут возникнуть условия, когда она дает исключительно важную информацию или позволяет совершить революционный скачок в наиболее важных отраслях техники (а, может быть, сельского хозяйства или биологии). Каждый из нас может привести соответствующие примеры.

Иногда моменты времени, когда определенная ветвь науки дает исключительно ценные результаты, разделены промежутками, в течение которых в данной области нет никаких существенных результатов. Развитие идет как бы по синусоиде, циклами. Например, в оптике можно отметить несколько таких циклов, то же самое можно видеть в астрофизике и ряде других областей физики. Подобное циклическое развитие науки обусловлено объективными законами, и очень важно проанализировать и четко отдавать себе отчет, в какой стадии находится данная отрасль науки, для того чтобы правильно распределить усилия людей и материальные средства, которые вкладываются в развитие науки.

Рассмотрим теперь с этой точки зрения те научно-прикладные задачи, которые таят в себе возможность скачка в важнейших областях современной техники и возвращение ядерной физике того авторитета, который был у нее в конце сороковых годов.

Прежде всего я хотел бы отметить, что сама по себе идея использования ядерной физики в смежных областях науки и техники всегда вызывает большой энтузиазм, но это не всегда бывает полезным, поскольку оказывается, что конкретные научно-прикладные задачи имеют очень сложную специфику, и попытки непосредственного использования для их решения установок и методов, созданных в применении к чисто научным задачам, приводят иногда к плохим результатам. Поэтому в Дубне мы начали с того, что постарались путем анализа известных нам данных, с помощью бесед и обсуждения со специалистами выделить те практические задачи, решение которых методами ядерной физики даст наибольший экономический эффект.

Безусловно, что основой развития техники является энергетика. Хотя вопрос энергетических ресурсов в настоящее время решается, в целом, более или менее успешно, тем не менее, недалеко время, когда проблема источников энергии станет чрезвычайно острой. Для решения этой проблемы сейчас намечаются два главных направления: это реакторы на быстрых нейтронах, так

называемые бридеры, где происходит расширенное воспроизводство, и управляемые термоядерные процессы. Если последние находятся еще в стадии теоретического изучения, то создание реакторов на быстрых нейтронах стало уже чисто практическим вопросом. При этом возникают сложные проблемы радиационной устойчивости тепловыделяющих элементов и конструктивных материалов в потоках быстрых нейтронов, которые в сотни тысяч раз превосходят потоки, характерные для обычных "тепловых реакторов". Именно радиационная устойчивость материалов определяет сейчас продолжительность работы реакторов на быстрых нейтронах. Если рассчитывать на дальнейшее развитие таких реакторов (а тем более термоядерных реакторов), необходимо создать технику, которая смогла бы устойчиво работать в интенсивных потоках быстрых нейтронов в течение достаточно долгого времени. В частности, имеются большие трудности со сваркой металлов. Как сообщалось на последней Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, даже те швы, которые получают самыми лучшими современными методами сварки, не выдерживают потоков быстрых нейтронов, значительно меньших по интенсивности, чем в реакторах.

Для создания радиационно стойких материалов требуются испытания в нейтронных потоках достаточно большой интенсивности. Выход здесь можно было бы найти в создании очень мощного источника нейтронов, как это сделано в Лос-Аламосе. Используя реакцию дейтрон плюс тритий, можно получать потоки 10^{14} - 10^{15} сек⁻¹. Однако это - очень сложная задача, а кроме того, она заведомо приведет к очень большой активации, что существенно затруднит эксперименты.

Второй путь связан с использованием пучков тяжелых ионов. Тяжелые ионы в отношении радиационных повреждений, грубо говоря, в сто тысяч или даже миллион раз более эффективны, чем нейтроны, поэтому радиационный эффект, который в атомных реакторах достигается в течение нескольких лет, с помощью пучка тяжелых ионов с интенсивностью 1 мкА может быть воспроизведен всего

лишь за несколько часов. При этом исследуемые образцы практически неактивны, что значительно упрощает работу с ними. Используя ионы различных типов, можно моделировать эффекты, обусловленные возникновением химических неоднородностей в материалах, а с другой стороны - изучать радиационные дефекты, не вводя в материал каких-либо инородных атомов. Таким путем в настоящее время уже исследуется разрушительное действие радиации в графите, нержавеющей стали, циркониевых и алюминиевых сплавах, которые в очень больших количествах применяются в реакторостроении. Однако при этом пока ограничиваются лишь рассмотрением с помощью электронного микроскопа очень тонких образцов материалов. Применение пучков высокоэнергетических ионов с большими пробегами в веществе мишеней позволит привлечь для анализа толстых образцов значительно более широкий арсенал средств современного материаловедения, что совершенно необходимо для понимания сложного комплекса физико-химических явлений, протекающих в облученном веществе.

Другой важной проблемой, стоящей перед современной наукой, сравнимой по своему значению разве лишь с проблемой создания термоядерных реакторов, является разработка высокотемпературных сверхпроводников, сохраняющих свойство сверхпроводимости при больших токах, больших магнитных полях и достаточно высоких температурах, желательно - при комнатных, ну, а в качестве скромного первого шага - хотя бы выше точки кипения жидкого водорода. Создание таких сверхпроводящих материалов дало бы возможность использовать существенно более простую и дешевую криогенную технику (а, может быть, и вообще обойтись без нее) и позволило бы перейти к широкому промышленному применению сверхпроводников. Исследование различных сплавов показало, что уже сейчас можно создать материалы, теряющие сверхпроводимость при температурах, всего лишь на несколько долей градуса меньших температуры кипения жидкого водорода. Использование пучков тяжелых ионов позволит практически неограниченно

расширить диапазон и направленно изменять состав бинарных и, что особенно важно, многокомпонентных сверхпроводящих сплавов для поиска высокотемпературных сверхпроводников.

Следует ожидать, что свойства сверхпроводимости, определяемые специфическими взаимодействиями электронных пар и колебаний кристаллической решетки, должны быть чувствительны даже к небольшому числу вводимых в решетку инородных атомов, а также к создаваемым в ней радиационным дефектам. Определенным подбором компонент и радиационных повреждений можно воспрепятствовать возвращению сверхпроводника в нормальное состояние при изменении внешних условий.

Пожалуй, наиболее простым по своей идее и в то же время весьма перспективным и впечатляющим по своим результатам является применение пучков тяжелых ионов в качестве "микроигл" для производства ультрамелких по размерам и уникальных по эксплуатационным качествам фильтров. Проходя через пленку облучаемого вещества - слюду, стекло или слой какого-либо пластического материала - тяжелый ион образует канал сильного радиационного повреждения. Подобно тому, как это имеет место для фотопластинки, облученной светом, поврежденные места оказываются наиболее чувствительны к химической обработке и, будучи подвергнуты травлению, дают сквозные отверстия, диаметр которых зависит от типа и энергии ионов, от облучаемого материала и от способа последующего травления. Это хорошо видно из рис. 3. На следующем рис. 4 для сравнения показаны современный высококачественный целлюлозный фильтр и "ядерный фильтр", полученные травлением облученной ядерными частицами поликарбонатовой пленки. Хотя средний размер пор в обоих случаях почти одинаков, в целлюлозном фильтре имеется большое число крупных и неправильных по своей форме отверстий, поэтому через такой фильтр проходят частицы самых различных размеров, и достаточно надежное отфильтрование частиц с заданными размерами затруднительно: "спектр" пропущенных фильтром частиц оказывается весьма дисперсным. На-

оборот, ядерные фильтры (или "нуклеопоры", как их иногда называют) характеризуются очень точной геометрической формой пор, число и размеры которых легко контролировать. Таким путем в настоящее время можно получать "молекулярно-вирусные нуклеопоры" с размером приблизительно от 40 \AA до нескольких мкм.

Область возможных применений таких фильтров чрезвычайно широка: поскольку размеры бактерий $> 0,2 \text{ мкм}$, то ядерные молекулярно-вирусные фильтры позволяют производить холодную стабилизацию пива, вина и других жидких пищевых продуктов, что позволяет длительно сохранять их при комнатных температурах; нуклеопоры могут использоваться для стерилизации биологических сред в микробиологии, для разделения различных типов клеток (в частности, для выделения раковых клеток в крови) и измерения их деформации при цитологических исследованиях и в целях клинической диагностики, для фильтрации аэрозолей, для получения очищенной от бактерий питьевой воды в полевых условиях, и во многих других областях тонкой технологии, связанной с очисткой и разделением микрообъектов.

Теперь я хочу рассказать еще об одной задаче, которая может решаться с помощью ускоренных ионов. В настоящее время перед металлургией стоит проблема освоения сплавов титана с легкими элементами (бериллием, бором и т.д.), обладающих большой прочностью и легкостью. Для этих сплавов очень важно знать распределение компонент. К сожалению, индикация элементов легче железа путем возбуждения рентгеновского излучения пучком электронов оказалась очень малочувствительной из-за невозможности достичь достаточно хорошего разрешения для низкоэнергетических X-лучей. На помощь здесь может прийти ядерная физика: ускоренные альфа-частицы, взаимодействуя с ионами бериллия, дают нейтроны. Пучок альфа-частиц с сечением $\sim 10 \text{ мкм}$ и нужной энергии можно сравнительно легко получать с помощью электростатического генератора. Используя далее детектор нейтронов, можно получить четкую картину структуры сплавов, видеть распределе-

ние лития и бора по поверхности; а если менять энергию альфа-частиц, то и по глубине. Решение этой научно-технической задачи требует лишь небольшого изменения существующих физических методик.

Можно назвать еще ряд направлений, для которых ядерная физика может дать очень многое. Большое применение, в частности, в геологии, при поисках и добыче таких важнейших для страны полезных ископаемых, как нефть, уран и золото, могут получить методы элементного анализа материалов, разработанные в ядерной физике.

Для решения перечисленных выше физических и научно-технических задач необходим мощный ускоритель, обладающий возможностью ускорять не только сравнительно легкие, но и очень тяжелые ионы до высоких энергий. Рассмотрим существующие возможности. Здесь могут быть разные подходы. В настоящее время в социалистических странах работают три тандема ускорителей, но они не дают возможности получать высокие энергии: максимальная энергия, которая может быть на них получена, составляет 12-14 МэВ/нуклон.

В Польше создается ускоритель тяжелых ионов циклотронного типа с диаметром 200 см. На этом ускорителе будет возможна работа над всеми перечисленными проблемами, за исключением, может быть, синтеза сверхтяжелых элементов.

В Дубне эксперименты с тяжелыми ионами проводятся на циклотроне У-300, где ускоряются ионы элементов от ^{12}C до ^{66}Zn включительно до энергий 8,5 МэВ/нуклон и на тандем-циклотронах ЛЯР У-300 + У-200, на которых получены пучки ускоренных ионов Ge , Kr ,

Xe с интенсивностью $10^{10} - 10^{11}$ частиц/сек и энергией ~ 7 МэВ/нуклон. До настоящего времени такие параметры пучков не получены ни в одном другом центре в мире, лишь в Орсе (Франция) на тандемной установке ALICE получены ионы с энергией ~ 500 МэВ и интенсивностью ~ 10^8 частиц/сек, что в 100 раз меньше интенсивности ионов Kr , полученной на тандем-циклотронах ЛЯР.

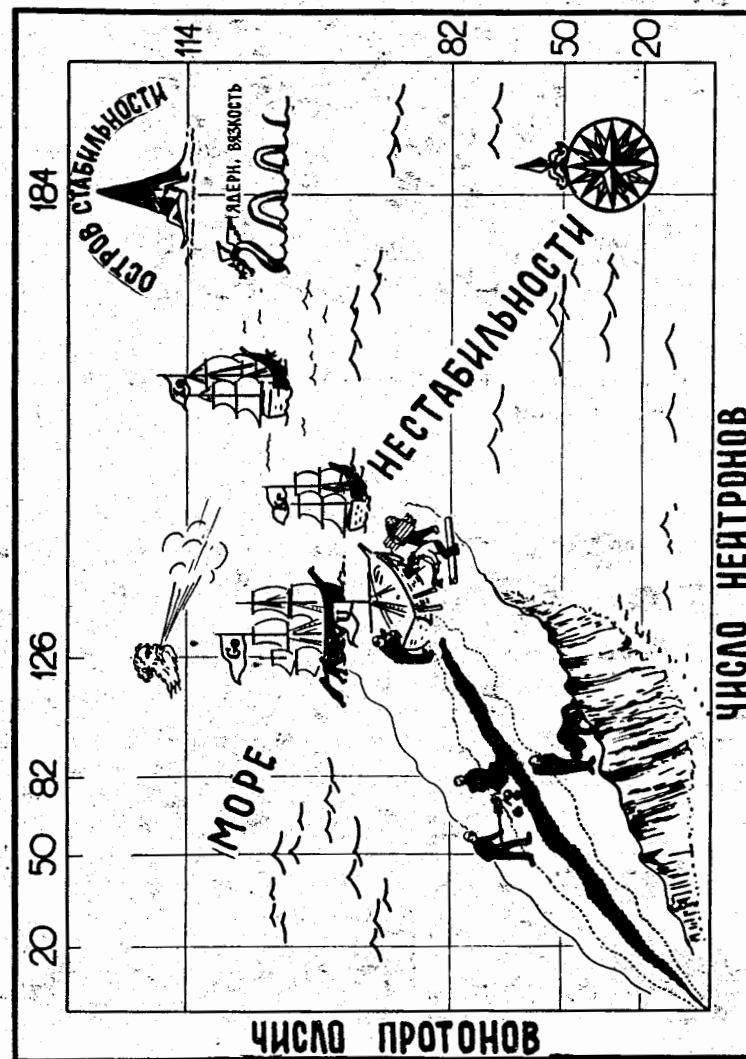


Рис. 2

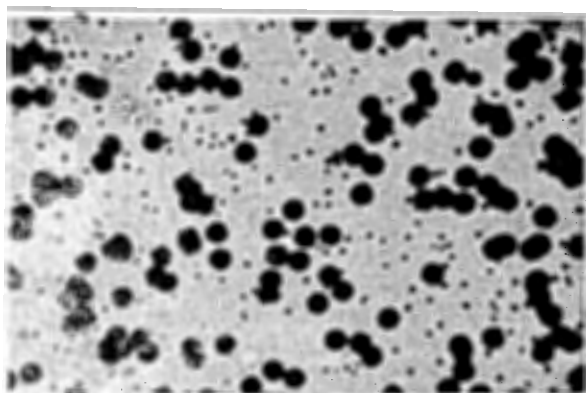


Рис. 3. Следы ионов цинка и серы (более мелкие) в силикатном стекле.

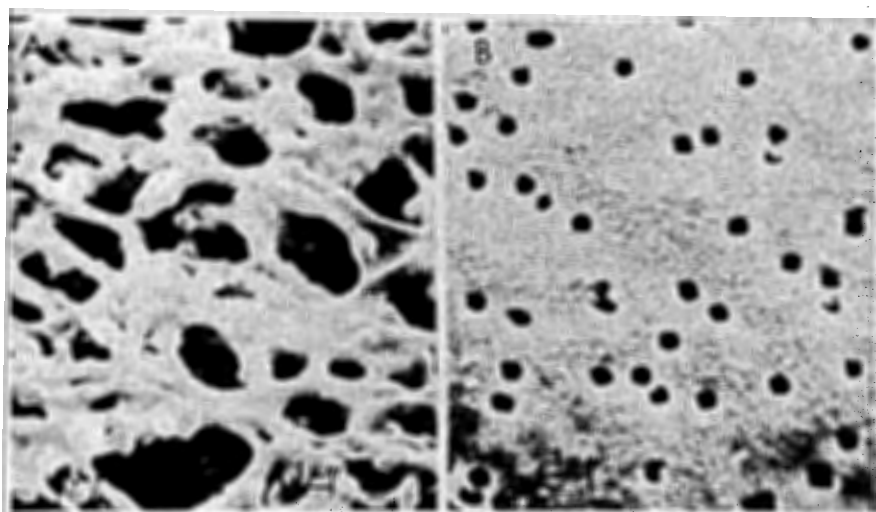


Рис. 4. Высококачественный целлюлозный фильтр (А) со средним эффективным размером пор 0,45 мкм и "ядерный фильтр" (Б) с размерами пор 0,4 мкм.