

СЗУ5п

Ф-71

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



2250/2-73

18/11-73

P14 - 7060

Г.Н.Флеров, В.С.Барашенков

ПЕРСПЕКТИВЫ  
ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P14 - 7060

Г.Н.Флеров, В.С.Барашенков

**ПЕРСПЕКТИВЫ  
ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в сборник "Будущее науки"

**Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА**

Физика тяжелых ионов, занимающаяся исследованием различных процессов, происходящих при столкновениях ускоренных ионов с атомами мишени, и изучением свойств новых ядер, образующихся, когда большие куски ядерного вещества "вгоняются" один в другой, представляет собой совершенно новую область ядерной физики, которая получила развитие уже в послевоенные годы. Первый ускоритель тяжелых ионов - ядер азота - был построен в США в начале пятидесятых годов; в 1960 году был запущен ускоритель тяжелых ионов в Дубне, позволивший получить интенсивные пучки ускоренных ионов вплоть до аргона  $Z = 18$  и до настоящего времени остающийся наиболее мощным ускорителем этого типа. Созданная год назад в Дубне, в Лаборатории ядерных реакций, тандемная система из двух ускорителей дает пучки еще более тяжелых ионов, вплоть до ксенона  $Z = 54$  с энергией около одного миллиарда электрон-вольт. В США заканчивается строительство ускорителя "СУПЕРХАЙЛАК", который также сможет ускорять высокоэнергетические ионы ксенона. Два еще более мощных ускорителя, которые позволят ускорять все ядра периодической таблицы Менделеева, в том числе и ядра урана, создаются сейчас в Западной Германии.

Чем же обусловлен столь большой интерес, проявляемый учеными различных стран к пучкам тяжелых ионов?

Прежде всего - это уникальная возможность проникнуть с помощью тяжелых ионов в совершенно еще неизведанные и, по-видимому, не достижимые другим путем области ядерной физики, связанные с исследова-

нием свойств сверхтяжелых трансурановых элементов и короткоживущих ядерных систем, состоящих из 300-500 нуклонов. Образовавшись в результате взаимодействия тяжелого налетающего иона с тяжелым ядром-мишенью, такие "сгустки нуклонов" могут обладать большим угловым моментом и принимать весьма непривычные для нас формы /например, форму гантели, в которой один шар как бы "скользит" по поверхности другого, или даже форму "пузыря" с внутренней полостью/. Изучая подобные сгустки ядерного вещества, мы до некоторой степени можем получить также представление о том, как ведет себя вещество в нейтронных звездах и других астрофизических объектах, поражающих наше воображение. Однако центральной проблемой здесь, несомненно, является сейчас достижение предсказываемой теоретиками области относительно долгоживущих ядер с зарядами  $Z = 114, 126$  и т.д./так называемых "островов стабильности"/. Реакции с тяжелыми ионами являются в настоящее время единственной возможностью практически подойти к исследованию таких ядер. Понятно, что открытие долгоживущих сверхтяжелых элементов будет иметь настолько далеко идущие научные, а, возможно, и практически последствия, что их значение сейчас трудно даже оценить.

Реакции с тяжелыми ионами позволяют получить большое число новых изотопов, далеких от линии  $\beta$ -стабильности, в частности - сильно перегруженные нейтронами легкие ядра. Изучение таких ядер представляет большой интерес, т.к. согласно теоретическим предсказаниям в области ядер с очень большим числом нейтронов также возможно существование относительно стабильных элементов /"нейтронных капель"/.

В настоящее время мы еще очень плохо знаем "географию" атомных ядер. При облучении урановой мишени высокоэнергетическими ионами урана или тория образуется свыше 6000 различных изотопов, что в несколько раз превосходит число всех стабильных и радиоактивных изотопов, вообще изученных до сих пор в ядерной физике. Как очень образно отметил недавно А.Бромли, один из ведущих американских специалистов по физике тяжелых ионов, экстраполяция накопленных

нами знаний для предсказаний свойств всех возможных атомных ядер напоминает попытку описания ландшафта целой страны на основе изучения дна и близлежащих склонов одного из принадлежащих ей ущелий.

Чрезвычайно большой интерес представляет возможность проверки законов квантовой электродинамики и изучение процессов, протекающих в электромагнитных полях сталкивающихся ядер, которые являются наиболее сильными среди всех электромагнитных полей, известных нам сейчас во Вселенной. Очень интересны также исследования ядер с предельно большими зарядами  $Z$ .

Оценивая перспективы развития ядерной физики, известный теоретик Оге Бор высказал мнение, что ядерная физика ближайшего десятилетия - это, в основном, физика тяжелых ионов. С этим мнением трудно не согласиться.

Тем не менее большая научная значимость в исследовании новых и фундаментальных явлений - это только один аспект физики тяжелых ионов. Другой, не менее важный ее аспект связан с возможностью широкого практического применения пучков тяжелых ионов в самых различных областях науки и техники. Можно без преувеличения сказать, что в отношении перспектив их практического применения пучки тяжелых ионов сейчас находятся примерно в таком же положении, в каком 10-15 лет тому назад была техника световых пучков - лазеров. Если лазерный пучок воздействует на вещество в основном посредством сильного локального нагрева, то пучок тяжелых ионов может оказывать не только значительное термическое действие, но также механически посредством столкновений ионов и ядер отдачи с ядрами воздействует на кристаллическую решетку облучаемого вещества и, что особенно важно, может изменять его химический состав по заранее заданной программе. Использование этих замечательных свойств пучков тяжелых ионов еще только начинается, по многим важным направлениям производится лишь первая разведка, а другие - быть может, наиболее интересные направления - предстоит еще открыть. Однако уже того, что нам известно сейчас, достаточно, чтобы утверждать, что применение

интенсивных пучков тяжелых ионов, подобно тому, как это уже произошло с лазерами, вызовет революцию в технологии и в методах, используемых самыми различными отраслями современной науки и техники.

Вбивание, или, как сейчас говорят, имплантация, ускоренных ионов того или иного химического элемента в состав облучаемой мишени уже сейчас позволяет воздействовать практически на любые свойства материала, которые зависят от структуры и химического состава его поверхности или слоев, расположенных вблизи поверхности. По сравнению с другими методами легирования имплантация ионов представляет собой весьма универсальный метод: она позволяет вводить атомы любого элемента в любой заданный материал и дает положительные результаты даже в тех случаях, когда другие способы легирования оказываются невозможными. При этом процесс может производиться при сравнительно невысоких температурах, а побочные радиационные повреждения структуры облучаемого образца устраняются последующим нагревом также до относительно небольших температур; все это позволяет сохранить практически неизменными электрофизические параметры исходного материала. С точки зрения промышленного освоения метода очень важно, что процесс имплантации ионов допускает практически полную автоматизацию и близкую к 100%-ной воспроизводимость свойств создаваемых новых материалов.

Таким путем, с помощью облучения ионами бора, фосфора, тантала и более тяжелых элементов, удастся, в частности, существенно улучшить качества полупроводниковых кремниевых и германиевых детекторов /см. рис. 1/, широко используемых сейчас в ядерной физике, для активационного анализа в горнорудной промышленности и геологоразведке, для экспрессного анализа загрязненности окружающей среды и т.д.

При ионном легировании имеется возможность очень точно управлять профилем вводимой примеси, благодаря чему внутри облучаемого кристалла можно создать весьма сложные по своей архитектуре структуры с комплексными электрофизическими свойствами. Это открывает

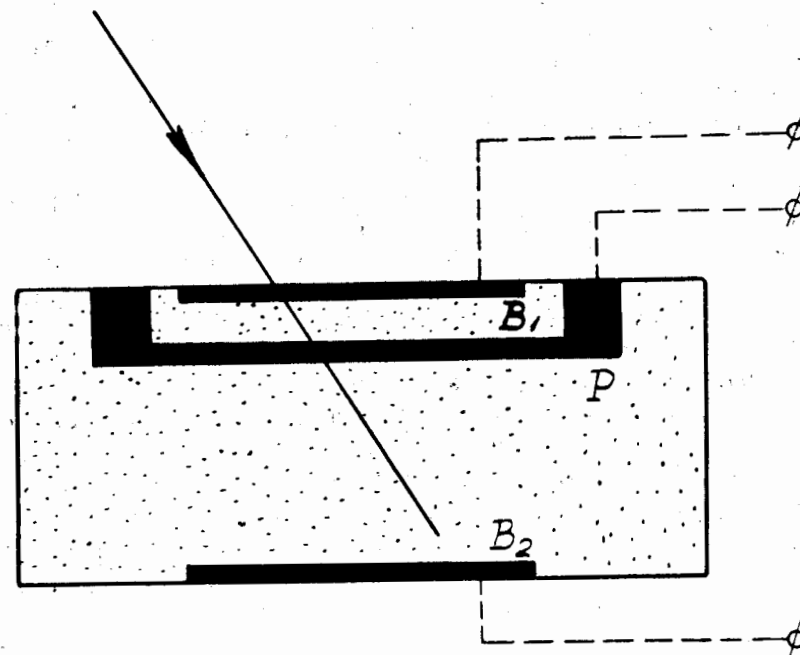


Рис. 1. Имплантацией ионов в кристалл кремния вносятся слои бора  $B_1$  и  $B_2$  и фосфора  $P$ . Эти слои имеют строго заданную форму с четкими границами, что позволяет по изменению напряжения между слоями  $B_1$  и  $P$  точно измерять ионизационные потери  $\Delta E/\Delta x$  и тем самым определить тип попавшей в детектор частицы, а по изменению напряжения между слоями  $P$  и  $B_2$  - установить энергию этой частицы  $E$ .

пути к созданию сложных и в то же время в высшей степени компактных и удобных в обращении электронных устройств.

Глубина проникновения ионов в вещество мишени зависит от их энергии, повышая энергию, можно воздействовать на свойства не только поверхностных, но и глубоких внутренних слоев облучаемых образцов. Это открывает дальнейшие интересные возможности.

Облучение пучками тяжелых ионов тонких оптически-проводящих пленок позволяет в соответствии с заранее составленной программой так изменить их коэффициент преломления, что образуются светопроводы желаемой формы, которые могут использоваться в быстродействующих вычислительных машинах для передачи очень больших потоков информации. Введение в такие пленки специальных добавок с магнитными свойствами позволит создать элементы с большим объемом памяти. Нельзя не согласиться с мнением американских ученых о том, что это направление окажет глубокое влияние на развитие счетно-решающей техники и в самом ближайшем будущем обещает вырасти в крупную индустрию.

Замечательные возможности имплантации ионов открывает для изготовления новых сплавов, которые трудно или вообще практически невозможно получить другими известными сейчас способами, например, из-за химической несовместимости компонент, препятствующей их взаимному проникновению. Обработка слоев компонент пучками тяжелых ионов позволяет "подавить" их несовместимость и получить сплавы с совершенно необычными свойствами прочности, термостойкости, антикоррозийности и т.д. При этом во многих случаях для получения требуемых свойств достаточны лишь очень небольшие добавки соответствующим образом подобранных примесей.

Одной из важнейших проблем современной энергетики, 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, желательна - 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, определяемой специфическими взаимодействиями электронных пар и колебаний кристаллической решетки, должны быть чувствительными 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. Как показали недавние работы ленинградского физика С.И.Цыпкина и его соавторов /"Физика тв. тела", 13, 3088, 1971 / и совсем недавние измерения западно-германских физиков (*Zs, für Phys.*, 256, 176, 1972), после облучения тяжелыми ионами характеристики сверхпроводников в ряде случаев, действительно, значительно улучшаются. Хотя это направление еще только начинает развиваться, дальнейшие его перспективы представляются чрезвычайно интересными и многообещающими.

Интенсивные пучки тяжелых ионов могут с высокой эффективностью быть использованы для обработки поверхности материалов с целью повышения ее твердости, пассивации и, наоборот, для того, чтобы сделать поверхность более активной, если это необходимо, к взаимодействиям с определенными веществами. С помощью ионных пучков можно производить полировку и сверхтонкую доводку поверхностей оптических линз и т.д. - здесь имеется бескрайнее поле деятельности для изобретательного ума.

Еще одной чрезвычайно важной областью применения пучков тяжелых ионов является использование их для моделирования радиационных повреждений, вызываемых нейтронами в тепловыделяющих элементах и конструктивных материалах атомных реакторов. Сталкиваясь

с атомными ядрами, быстрые нейтроны выбивают ядра из занимаемых ими положений и сообщают им значительное количество энергии, благодаря чему эти ядра, в свою очередь, могут вызывать дальнейшие радиационные повреждения, изменяя структуру облучаемого вещества. Еще большие радиационные разрушения производят обладающие большой энергией осколки деления, которые, кроме того, изменяют и химический состав окружающего вещества. Изменение химического состава вещества происходит также под действием других ядерных реакций, вызываемых нейтронами, особенно реакций  $(n, \alpha)$ , в которых в результате поглощения нейтронов ядрами образуются атомы гелия, существенно влияющие на зарождение и рост вакансионных пор. В бримерных системах на быстрых нейтронах, которые, по-видимому, получают широкое распространение в ближайшие 5-10 лет, потоки нейтронов будут в сто-тысячу раз превосходить те, с которыми мы имеем дело в современных реакторах. Проблемы радиационной стойкости материалов при этом приобретут решающее значение. Непосредственное исследование этих важных вопросов в атомных реакторах весьма затруднено тем, что для этого требуются очень большие времена облучения. В то же время тяжелые ионы в отношении радиационных повреждений, грубо говоря, в сто тысяч или даже миллион раз более эффективны, чем нейтроны /см. рис. 2/, 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 не имеют такой высокой степени активации, как это имеет место после облучения их в атомном реакторе, 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 реакторо-

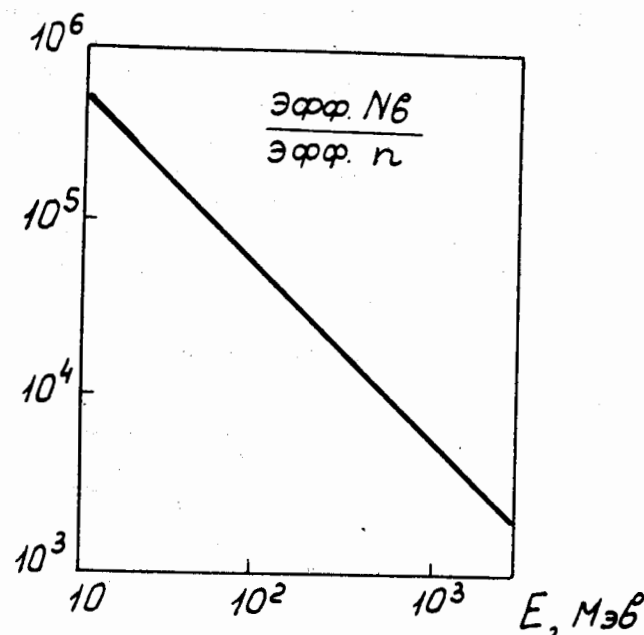


Рис. 2. Отношение эффективностей создания радиационных дефектов ионами ниобия с энергией  $E$  и 14 - мэвными нейтронами. Облучаемый материал - пластинка из ниобия.

строении. 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.

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 ве-

щества - слюду, стекло или слой какого-либо пластического материала, - тяжелый ион образует канал сильного радиационного повреждения. Подобно тому, как это имеет место для фотопластики, облученной светом, поврежденные места оказываются наиболее чувствительными к химической обработке и, будучи подвергнутыми 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 рисунке для сравнения

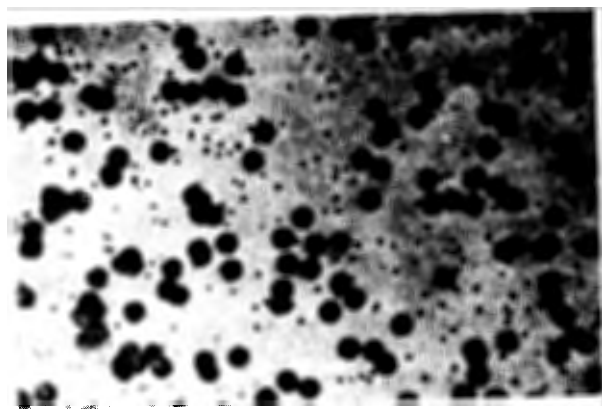


Рис. 3. Следы ионов цинка и серы /более мелкие/ в силикатном стекле /по данным Г.Н.Флерова и В.П.Перельгина, АЭ, 33, 981, 1972/.

показан современный высококачественный целлюлозный фильтр и "ядерный фильтр", полученный 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 отфильтровывание частиц с заданными размерами затруднительно: "спектр" пропущенных фильтром частиц оказывается весьма дисперсным. Наоборот, ядерные фильтры /или

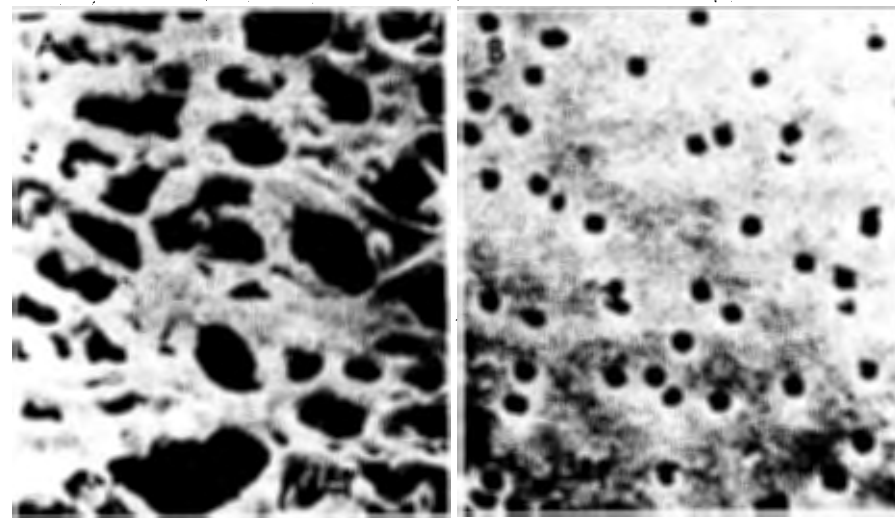


Рис. 4. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография А/ обычного целлюлозного фильтра со средним эффективным размером пор 0,45 мк, В/ ядерного фильтра с размерами пор 0,4 мк (R.L.Fluscher et. al., Science, 178, 257, 1972).

"нуклеопоры", как их иногда называют/ характеризуются очень точной геометрической формой пор, число и размеры которых легко контролировать. В настоящее время можно получать "молекулярно-вирусные нуклеопоры" с размерами приблизительно от 40 Å и до нескольких микрон.

Область возможных применений таких фильтров чрезвычайно широка: поскольку размеры бактерий > 0,2 микрона, 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 диаг-



ностики, 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. Очень остроумным является метод измерения с помощью нуклеопор размеров отдельных микрочастиц, например, вирусов. Для этого пленка с единственным сквозным отверстием помещается в электролит /рис. 5/, а сигнал с электродов, расположенных по обе стороны этой пленки, подается на осциллограф. Когда частица проходит сквозь отверстие, сопротивление в электрической цепи возрастает пропорционально объему частицы, и это отчетливо видно на осциллограмме.

Число возможных применений ядерных фильтров можно умножить.

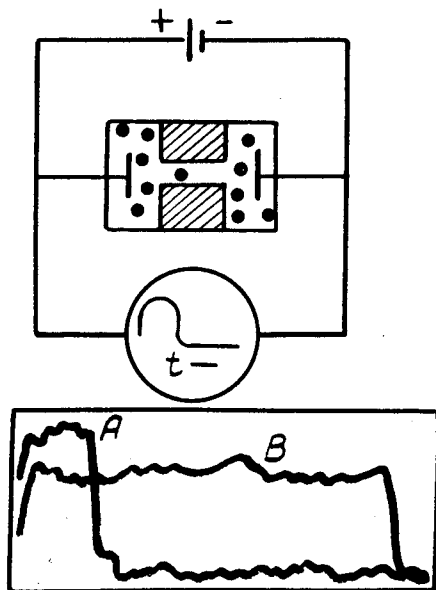


Рис. 5. Схема прибора, измеряющего число и размер частиц. Внизу показана осциллограмма А/ вируса Т2 с размером 1010Å и В/ полистириновой частицы с размером 910Å (R.W. Deblois, C.P. Bean, Rev.Sci.Instrum., 41, 909, 1970).

Описывая перспективы практических применений пучков тяжелых ионов, нельзя не сказать о возможностях их использования в медицине. В отличие от ядерных излучений других типов, используемых в настоящее время в биологии и медицине, высокоэнергетические тяжелые ионы обладают свойством передавать основную часть своей энергии очень небольшому участку среды в конце своего пути. Это позволяет использовать пучки тяжелых ионов для радиотерапии весьма ограниченных участков человеческого тела с минимальным повреждением окружающих тканей. Этому способствует также и то обстоятельство, что обладающие большим электрическим зарядом ионы могут быть сфокусированы в чрезвычайно тонкий и в то же время концентрированный пучок. Варьирование энергии и типа ионов позволяет локализовать радиационный эффект на различных глубинах. Все это создает исключительные возможности для клинического использования пучков тяжелых ионов.

Исследование биологического действия тяжелых ионов очень важно также для защиты организма космонавтов от космических лучей, в состав которых входят тяжелые ионы. Как показывают оценки на основе полетов к Луне, если не принимать специальных и очень трудно осуществимых в настоящее время мер, в течение двухлетнего космического путешествия к Марсу проникающей космической радиацией будет разрушено около 0,1% клеток мозга космонавта, а для некоторых гигантских клеток эта доля составляет даже более 1,5% (G.M. Comstock et al., Science, 172, 154, 1971). При этом основной вклад в радиационный эффект дают именно тяжелые ионы.

Есть еще очень важный аспект медицинского применения пучков тяжелых ионов - это создание искусственных изотопов. В настоящее время такие изотопы изготавливаются преимущественно в атомных реакторах, поэтому они получают нейтронизбыточными и, как правило, распадаются путем испускания электронов. Под действием тяжелых ионов могут быть созданы другие типы изотопов, обладающие избытком протонов и распадающиеся с испусканием позитрона. Поскольку аннигиляция этого позитрона порождает два  $\gamma$ -кванта, которые вылетают почти точно в противоположных друг другу

направлениях, это позволяет весьма точно определить область, где испускаются позитроны и где, следовательно, сконцентрировался протонизбыточный изотоп. На этой основе разработана диагностика и методы лечения заболеваний мозга и других трудно доступных областей человеческого тела. Широкий диапазон различных изотопов, которые можно получать в пучках тяжелых ионов, позволит в каждом конкретном клиническом случае выбрать наиболее подходящий изотоп, радиационный эффект и время жизни которого давали бы желаемый результат с минимальными побочными явлениями.

Мы перечислили лишь некоторые наиболее интересные и важные, по нашему мнению, возможности практического применения пучков тяжелых ионов, однако уже отсюда видна исключительная перспективность этого направления "тонкой ядерной технологии", позволяющего уже сегодня эффективно решать многие насущно необходимые для человечества задачи и поставить ряд новых чрезвычайно важных и актуальных проблем. Часть этих проблем может быть решена с помощью уже существующих ускорителей тяжелых ионов, для решения других требуются новые ускорители, которые позволили бы иметь более интенсивные пучки более высокоэнергетических ионов всех элементов вплоть до самых тяжелых.

*Рукопись поступила в издательский отдел  
5 апреля 1973 года.*