

актера. Этими работами была подтверждена возможность выделения полония в газовую среду при высокой температуре и образования в ней аэрозолей и газообразной фракции полония. Доля газообразной фракции полония, как показали эксперименты, может составлять 5—83% суммарной концентрации полония в газовой среде. Для очистки воздуха от выделяющегося из облученной эвтектики полония были рекомендованы комплексные фильтры с сорбционно-фильтрующим материалом, испытанные на производстве [10].

В заключение следует отметить, что в исследованиях аэрозолей полония, проводимых под руководством И.В. Петрянова, в разные годы принимали активное участие сотрудники НИФХИ им. Л.Я. Карпова Н.Б. Борисов, Г.Л. Натансон, П.И. Басманов, Г.И. Баберкина, Л.И. Борисова, И.А. Старостина, В.Н. Полевов, С.Л. Чуркин и его филиала во главе с В.Н. Кириченко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрянов И.В., Борисов Н.Б., Басманов П.И. и др. Аналитические аэрозольные фильтры АФА. Авт. свид. СССР № 138763. — Бюл. изобр., 1961, № 11.
2. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Фильтрующие материалы ФП. М., Знание, 1968. 77 с.
3. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87. М.: Энергоатомиздат, 1988. 90 с.
4. Борисов Н.Б., Ильин Л.А., Маргулис У.Я. и др. Радиационная безопасность при работе с полонием-210. Под ред. И.В. Петрянова и Л.А. Ильина. М.: Энергоатомиздат, 1980. 261 с.
5. Ершова З.В., Волгин А.Г. Полоний и его применение. М.: Атомиздат, 1974.
6. Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и др. Лепесток (легкие респираторы). Под ред. И.В. Петрянова. М.: Наука, 1984. 216 с.
7. Борисов Н.Б., Борисова Л.И., Чуркин С.Л., Петрянов-Соколов И.В. Специфические свойства аэрозолей полония. — Коллоид. ж., 1995, т. 57, № 1, с. 11—14.
8. Петрянов И.В., Борисов Н.Б., Чуркин С.Л. и др. Образование и выделение газообразной фракции полония из твердых препаратов. — Докл. АН СССР, 1992, т. 322, № 3, с. 557—559.
9. Борисов Н.Б. Сорбционно-фильтрующие материалы для комплексного улавливания аэрозолей и паров радиоактивных и химически вредных веществ. — В кн.: Избр. труды Межд. аэрозольного симпозиума, 1994, т. ДТ-1, с. 30—40.
10. Борисов Н.Б., Щипакин О.Л., Петрянов-Соколов И.В. и др. Исследование выхода ^{210}Po из свинцово-литиевой эвтектики применительно к условиям бланкета термоядерного реактора. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 4, с. 297—300.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА — ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Эйсмонт В.П. (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина)

На примере Радиевого института, находившегося в системе Академии наук около 40 лет и недавно отметившего свое 75-летие, автор настоящей статьи стремится показать, как ядерная физика, заложив физические основы ядерной энергетики, способствует ее развитию и переходу к внутренне безопасной и экологически чистой ядерной технологии.

Первые 15 лет после открытия деления ядер. Институту было 17, когда было открыто деление ядер — физическая основа ядерной энергетики. Это был еще молодой коллектив, но уже обладавший богатым арсеналом химических и физических средств изучения радиоактивности, источниками нейтронов на основе радона с бериллием и только что построенного первого в Европе циклотрона. И стоял институт именно на том пути, который привел мировую науку к открытию деления ядер, — пути поиска трансурановых элементов. Поэтому неудивительно, что экспериментальное изучение деления ядер в нашей стране началось в Радиевом институте. Уже через 2 месяца после обнаружения самого явления в портфеле редакции журнала «Доклады АН СССР» лежала первая отечественная работа в этой области, принадлежавшая перу Л.В. Мы-

совского и А.П. Жданова и названная ими «Наблюдение ядер отдачи при облучении урана нейтронами». В институте Н.А. Перфиловым впервые был измерен эффективный заряд осколков деления, и его значение послужило Н. Бору для проверки правильности своих теоретических оценок. Подтверждением теории Бора стало открытие К.А. Петряком и Г.Н. Флеровым спонтанного деления ядер. Открытие явилось результатом цепочки экспериментов, начатых в стенах института. В.Г. Хлопиным были обнаружены новые продукты деления. Названные работы имели принципиальное значение и явились фундаментом возникавшей большой науки. В первые же месяцы жизни новой науки была установлена принципиальная возможность осуществления цепной ядерной реакции. Те же физики и химики, та же техника были направлены на решение задач получения плутония при облучении урана нейтронами, а затем задачи определения КПД ядерного взрыва. В эти первые бурные годы и нельзя было разделить науку о делении и практику. Все, что ни делалось, было наукой, и любой научный результат мгновенно становился практикой. Этот период — период фундаментальных открытий и грандиозных практических свершений, занявший около 15 лет, закончился в первой половине 50-х годов. Наше поколение переворачивало уже самые последние его страницы.

Годы, последующие и настоящие: физика. Нам достались следующие 40 лет, т.е. срок, почти в 3 раза более длинный и вместе с тем внешне не столь яркий. Однако и эти годы не прошли зря и дали кое-что существенное для физики атомного ядра, а эта наука нашла и продолжает находить все новое практическое воплощение теперь уже на мирных путях — путях ядерной энергетики. При этом не преследуется цель описать все научные достижения и их техническое приложение. В значительной степени эта задача решена сборником «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания». Моя задача — на некоторых почти не персонализируемых примерах подчеркнуть неразрывную связь фундаментальных и прикладных исследований (обусловленность вторых первыми), продемонстрированную не только в ранние годы, но и сегодня составляющую важнейшую черту физики.

В институте были широко развернуты исследования по механизму деления ядер. Проведены первые опыты по измерению корреляций масс и кинетической энергии осколков деления при энергии возбуждения около 20 МэВ, установлены закономерности корреляций и на этой основе выдвинута идея о влиянии ядерных оболочек на деформацию осколков в момент деления. Экспериментально обнаружено холодное деформированное деление. Выдвинута идея о возможности эмиссии мгновенных нейтронов до полного ускорения осколков, имеющая прямое отношение к методу так называемых нейтронных часов, используемому в современных исследованиях одной из самых фундаментальных характеристик ядерного вещества — его вязкости, вязкости, определяемой природой и силами ядерного трения. Эта величина определяет силу связи одночастичных и коллективных степеней свободы ядра и тем самым динамику деления как явления, уникального для физики микромира, связанного с самыми большими амплитудами коллективного движения ядерной материи. Исследованием динамики деления как одной из самых актуальных задач современной ядерной физики заняты сейчас несколько групп наших ученых, работающих на ускорителях Швеции и Финляндии и измеряющих функции возбуждения деления и изучающих свойства эмиссии нейтронов и заряженных частиц в реакциях с нуклонами и тяжелыми ионами промежуточной энергии.

Понимание свойств деления при промежуточной энергии тесно связано с пониманием самого механизма взаимодействия частиц промежуточной энергии с атомными ядрами. Имея давние традиции и в этой области, начинающиеся с исследований реакций срыва на дейтронах и обнаружения деления ядер π -мезонами, наши физики продолжают изучать важные особенности ядерных реакций при этой энергии, характеризующихся сложным сочетанием прямых, предравновесных и равновесных процессов. Проводятся оригинальные эксперименты и разработки теоретических моделей.

Важнейшие сведения о структуре ядер при небольших возбуждениях дает ядерная спектроскопия. Это также предмет высокой науки и вместе с тем гордости нашего института, так как именно в наших стенах создавалась школа отечественной ядерной спектроскопии. Она была основана и более 50 лет возглавлялась членом-корреспондентом РАН Б.С. Желеповым. Этой школой были созданы лучшие для своего времени магнитные спектрометры конверсионных электронов, γ -квантов и α -частиц, выпущены первые сборники схем распада ядер. Из этой школы выросла прикладная ядерная спектроскопия. Это триединство физических направлений — деление ядер, ядерные реакции вообще и ядерная спектроскопия — оказалось базисом развиваемой в институте чистой физики, которая, в свою очередь, создает прочную базу для многих практических применений, например, в ядерной медицине, которая заслуживает отдельного рассмотрения, и особенно в ядерной энергетике.

Годы, последующие и настоящие: техника. Еще Галилео Галилей сказал, что «изучать — значит измерять». Законы открываются, как правило, в процессе новых, бывших недоступными ранее измерений, с помощью наиболее точных приборов, создаваемых для фундаментальных исследований. Но результаты этих исследований оказываются необходимыми и для техники. К ним, в частности, относятся и проводимые нами прецизионные измерения спектров мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf как международного стандарта, а также других трансурановых элементов, прецизионные и, замечу, самые трудные, абсолютные измерения сечений деления тяжелых ядер нейтронами энергией 14 МэВ методом сопутствующих α -частиц, впервые в нашей стране использованным в нашем институте, и наконец, прецизионные измерения сечений активации, важных для термоядерного приложения. Важность точных ядерных данных при низкой энергии была осознана, можно сказать, с первых дней ядерной энергетике. По мере развития реакторов, например, достижения все более глубокого выгорания топлива требования к константам непрерывно повышаются как по точности, так и по широте набора ядер, охватывая сейчас многие трансурановые элементы и продукты деления. Естественно, что перспективы развития термоядерной энергетике также связаны с необходимостью новых измерений.

Однако область средней или, как раньше говорили, высокой, а теперь промежуточной энергии казалась уделом высокой теории, чистых помыслов. Конечно, по мере появления новых ускорителей и их приложения в медицине, по мере развития космонавтики интерес появлялся, но бум потребностей в ядерных данных промежуточной энергии возник в последнее десятилетие в связи с экстравагантной, как кажется многим до сих пор, идеей трансмутации долгоживущих компонентов радиоактивных отходов с помощью ускорителей. Концептуально возможности этого метода широко обсуждаются на общих и специальных конференциях, и ядерные данные занимают в их программе большое место. И здесь прежние чисто физические исследования механизма ядерных реакций оказались как нельзя кстати. Они дали и первые результаты, и, что тоже важно, понимание проблемы, возможной роли и реакции деления сильно возбужденных ядер, и процессов фрагментации, и даже мультифрагментации. Мы давно жили в этой физике, и это позволило нам занять хорошие позиции как в рамках отечественных, так и международных программ. Среди выполненных работ можно отметить измерения сечений деления тяжелых ядер на протонном синхротроне института, измерения сечений деления ядер на квазимонохроматических нейтронах энергией до 180 МэВ на циклотроне Уппсальского университета в Швеции, измерения выходов радионуклидов и нейтронов в реакциях протонов с конструкционными материалами и материалами нейтронообразующих мишеней на ускорителях Дубны и Петербургского института ядерной физики.

«Выйдя» из ядерной физики, реакторы сыграли революционную роль в ее развитии. Рожденные ими проблемы, а затем и экспериментальные возможности определили успехи нейтронной физики и физики деления. Последняя имеет принципиальное зна-

чение в исследовании коллективных форм движения ядерной материи самых высоких амплитуд. Изучение деления привело к познанию важного гносеологического факта — причины ограничения окружающего нас мира со стороны тяжелых ядер. Развились и многие другие области ядерной физики, связанные с низкой энергией, — от ультра-холодных нейтронов до нейтронов энергией около 10 МэВ.

Управляемые ускорителем системы трансмутации радиоактивных отходов и (или) производства электроэнергии как база будущей внутренне безопасной и экологически чистой ядерной энергетики должны сыграть столь же выдающуюся роль в развитии физики промежуточной энергии — от 10 до 10 тыс. МэВ (расширяя границы в 1000 раз). В настоящее время экспериментальная ситуация с качеством наших знаний в этой области сравнима с ситуацией 1940 г. в области физики реакторов: большинство ключевых параметров (основные сечения взаимодействия нейтронов и протонов с ядрами, число нейтронов, создаваемых в нейтронообразующей мишени одним протоном, энергетические спектры нейтронов из мишени и некоторые другие) известны с точностью, примерно в 10 раз ниже требуемой. Например, экспериментальные результаты отдельных авторов нередко отличаются в 1,5—2 раза, в отдельных случаях и больше. Предсказательная сила теоретических моделей и основанных на них вычислительных кодов оценивается $\pm 50\%$ в среднем, иногда вычисленные и измеренные данные не совпадают и по порядку величины. Соответственно практически отсутствуют файлы оцененных данных. До энергии 1 ГэВ насчитывается всего несколько таких файлов, причем некоторые из них уже требуют переработки.

Большое количество данных, которые требуются для мишеней (как материалов нейтронопроизводящих мишени, так и конструкционных и защитных), большого набора продуктов реакций и широкого диапазона энергии, не может быть измерено экспериментально ни по временным, ни по экономическим соображениям. Поэтому делается ставка на вычисление требуемых величин. Последнее представляется принципиально возможным для энергии адронов выше 200 МэВ. Однако в области меньшей энергии, где физические процессы сложны и не поддаются пока хорошему описанию, по-видимому, придется создавать файлы оцененных экспериментальных данных. Точные экспериментальные данные нужны и при большой энергии для нормировки теоретических расчетов. Поэтому необходимо выработать программу разумных (по времени и средствам) и вместе с тем достаточных для решения задачи измерений группы опорных констант. Однако выработка потребностей для ускорительной технологии еще только начинается. Тем более отсутствуют (мне не известны) какие-либо наработки по коэффициентам чувствительности тех или иных характеристик установки к неопределенностям экспериментальных данных. По-видимому, эта работа будет становиться все более актуальной, и требования к качеству экспериментальных (как и расчетных) данных все более жесткими по мере перехода от концептуальной стадии к стадии реального конструирования, строительства и промышленного использования обсуждаемой технологии.

Можно не сомневаться, что создание мощных нейтронных источников на основе ускорителей, лежащих в основе электроядерной технологии, не только кардинально улучшит количественное состояние экспериментальной базы по ядерным данным, но и приведет к принципиально важным результатам по механизму ядерных реакций при промежуточной энергии и свойствам возбужденной ядерной материи.

В этой связи можно упомянуть уже наметившиеся эффекты неожиданных (не связанных с кулоновским взаимодействием) отличий протонных и нейтронных сечений неупругих взаимодействий с тяжелыми ядрами, в особенности сечений деления. Изучение влияния изоспина падающей частицы требует систематических измерений на интенсивных пучках нейтронов в широкой области энергии, подобно проведенным ранее на протонных пучках. Такое влияние может быть связано как с динамическими свойствами нуклон-ядерных столкновений, в частности, с зависимостью нуклон-нуклонных сечений в среде от плотности ядерного вещества, так и со статическими свой-

ствами ядерных систем, например, различиями пространственных распределений протонов и нейтронов в ядрах или деформацией ядер. В любом случае экспериментальные результаты будут служить новыми тестами ядерных моделей, таких, как модель внутриядерного каскада или квазимолекулярная модель, наилучшим образом учитывающая и одночастичные взаимодействия и изменения среднего ядерного поля. Ставшая уже классической модель внутриядерного каскада под влиянием проблем ускорительной технологии в настоящее время переживает ренессанс, связанный с надеждой сделать ее (вместе с транспортными моделями) количественным инструментом расчета ядерных характеристик сложных нейтронообразующих мишеней, защиты ускорителей и других практически важных систем. Встают задачи тщательного учета эффектов рождения и поглощения π -мезонов и других частиц в ядерном веществе, количественного описания высокоэнергетического деления и фрагментации на частицах энергией около 1 ГэВ. При немного большей энергии начинает происходить мультифрагментация ядер, при энергии выше 10 ГэВ развиваются кварк-глюонные струи. Даже если границы непосредственных интересов электроядерной технологии лежат немного ниже последней энергии (вероятно, до 2 ГэВ), следует заметить, что для самих изучаемых процессов поиск различных подпороговых эффектов, которые могут проявиться при меньшей энергии, часто играет значительно большую роль, чем их исследование в области максимальной интенсивности протекания.

Конечно, это лишь отдельные примеры того нового качества физики промежуточной энергии, которые видны с позиции сегодняшнего дня. Действительность, несомненно, окажется еще более интересной. Изучение проявления элементарной структуры нуклонов в ядерной среде, как и многих других рассмотренных (и не рассмотренных) здесь процессов, безусловно приведет к завоеванию новой ступени в познании природы ядерных сил.

Из фундаментальной физики вышли и наши работы по неразрушающему контролю ядерного топлива. Когда жизнь потребовала, а это случилось в начале 70-х, в институте была создана первая отечественная лаборатория неразрушающих методов анализа твэлов и ТВС. Этой лабораторией был впервые выдвинут и осуществлен на практике метод определения выгорания топлива по его нейтронному излучению, разработан проект установки для входного контроля отработавших ТВС ВВЭР-1000 на заводе РТ-2.

Признанием авторитета наших работ в области ядерных данных служит заключение около 10 соглашений на эти работы с Международным научно-техническим центром, часть проектов находится в стадии рассмотрения этим центром. Мы были участниками самого крупного такого проекта (проекта № 17), касавшегося конверсии оружейного плутония и трансмутации радиоактивных отходов.

Годы будущие. Накапливая крупницы знаний в процессе физических исследований, бросая их в почву проектов, мы участвуем в закладке фундаментальных основ будущей внутренне безопасной и экологически чистой ядерной энергетики. Идеальная цепочка такой идеальной ядерно-энергетической технологии видится сейчас состоящей из следующих четырех звеньев. Первое: внешний по отношению к подкритическому реактору источник нейтронов в виде ускорителя с нейтронообразующей мишенью. Дополнительный к нейтронам деления реактора внешний источник дает возможность дожигать собственные отходы, например, долгоживущие продукты деления и делает такую гибридную систему (систему: ускоритель+реактор в подкритическом режиме) принципиально безопасной, так как нежелательное развитие событий может быть мгновенно пресечено выключением ускорителя. Второе: торий-урановый цикл, который имеет два основных преимущества перед традиционным уран-плутониевым, во-первых, в этом цикле возникает небольшое количество актиноидов тяжелее урана, во-вторых, он более безопасен с точки зрения нераспространения ядерного оружия, так как приводит к образованию ^{232}U , являющегося источником высокоэнергетичес-

кого γ -излучения. Третье звено — реакторы на расплавленных солях. Они имеют существенные преимущества перед традиционными по безопасности, так как работают при низком давлении, по чистоте, так как продукты деления устраниаются непрерывно, по совершенству топливного цикла, так как нет необходимости изготовления твэлов и их переработки, по эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую из-за высокой рабочей температуры расплава, по разделению отходов, так как имеется возможность физической сепарации. Четвертое: газотриодный метод переработки ядерного топлива. Он не дает жидких радиоактивных отходов и имеет более высокую радиационную стойкость применяемых реагентов.

Конечно, каждое из этих звеньев и тем более вся цепочка перспективных видов ядерной технологии, вся эта картина может быть воплощена в жизнь лишь на основе дальнейших фундаментальных исследований, в том числе ядерно-физических. Как показывает жизнь (приведенные здесь примеры), такие исследования должны продолжаться широким фронтом, охватывая, как и до сих пор, физику деления, физику других ядерных реакций и ядерную спектроскопию. Нет кризиса жанров нашей физики, есть кризис финансов.

Но нет ничего прибыльнее, чем хорошая наука. И чистая ядерная энергетика — это чистая прибыль чистой науки.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА В РАДИЕВОМ ИНСТИТУТЕ

Ложкин О.В. (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина)

В начале 20-х годов Радиевый институт был одним из немногих научных учреждений, где были организованы исследования атомного ядра и начато изучение природы ионизирующего излучения в атмосфере. Это были годы, когда физика атомного ядра только зарождалась, а существование космического излучения внеземного происхождения еще подвергалось сомнению. В физике только начинали формироваться представления о строении ядер атомов, открытых Э. Резерфордом в 1919 г., и оставалось еще 10 лет до открытия нейтрона (Дж. Чедвик, 1932) и протонно-нейтронной модели ядра (Д.Д. Иваненко, 1932).

Часть работ этого начального периода в истории института привела к становлению и развитию в институте исследований, относящихся в настоящее время к ядерной физике высоких энергий и ядерной астрофизике (включая космическое излучение, космохимию и космохронологию). В начале 20-х годов под руководством Л.В. Мысовского начинает выполняться программа экспериментальных исследований ионизирующего излучения в атмосфере. Изучается широтная зависимость интенсивности излучения, измеряются коэффициенты ослабления излучения в воде (опыты на Онежском озере на глубине до 10 м), во льду и свинце, исследуется направленность излучения (эксперимент с водонапорной башней ленинградского Политехнического института, как фильтром), впервые обнаруживается барометрический эффект (Л.В. Мысовский, Л.Р. Тувим, 1926). Полученные данные укрепили утверждения о внеземном космическом излучении и сильном отличии его поглощения в веществе от поглощения γ -излучения. В 1928 г. Мысовский публикует первую в СССР монографию «Космические лучи», в которой подводит итоги исследований. Большое значение имели измерения на большой высоте, проведенные сотрудниками института. С.Н. Вернов разрабатывает новую методику и проводит наблюдения космического излучения в верхних слоях атмосферы с помощью радиозондов на разных широтах, включая тропики (1934). А.Б. Вериге совершает свой знаменитый полет на стратостате «СССР 1-бис» для наблюдений космического излучения (1935), проводит измерения широтного эффекта в высоких широтах во время экспедиции на ледоколе к Земле Франца-Иосифа.