

34. В. Н. Дмитриев и др. В сб. «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, стр. 151.
35. Л. В. Драпчинский и др. «Атомная энергия», 16, 144 (1964).
36. В. М. Адамов и др. «Ядерная физика», 5, 923 (1967).
37. В. М. Адамов и др. Там же, 9, 732 (1969).
38. В. М. Адамов и др. Там же, 11, 1001 (1970).
39. А. В. Довгиленко и др. Там же, 5, 538 (1967).
40. Ю. А. Бабенко и др. Там же, 7, 269 (1968).
41. М. П. Аникина и др. Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy (Geneva, 1958). U.N. Vol. 15, 1959, p. 446.
42. К. А. Петржак и др. В сб. «Нейтронная физика». М., Госатомиздат, 1961, стр. 217.
43. А. Н. Протопопов и др. «Атомная энергия», 5, 130 (1958).
44. А. В. Сорокина и др. Там же, 31, 99 (1971).
45. К. А. Петржак и др. «Радиохимия», 1, 227 (1959).
46. К. А. Петржак, Ю. Г. Петров, Э. А. Шлямин. ЖЭТФ, 38, 6 (1960).
47. П. М. Арон и др. «Атомная энергия», 16, 368 (1964).
48. В. И. Шпаков и др. «Радиохимия», 7, 96 (1965).
49. В. А. Рубченя. «Ядерная физика», 11, 1028 (1970); 9, 1192 (1969).

Исследования в области ядерных реакций при низких и средних энергиях

Ю. А. НЕМИЛОВ

УДК 539.17

Одним из направлений работ физического отдела Радиевого института является изучение свойств атомного ядра при помощи ядерных реакций с частицами низких и средних энергий.

Первые исследования в этой области были начаты в 1933—1934 гг., т. е. в то время, когда был открыт нейтрон и наблюдался повышенный интерес к этой новой, удивительной для того периода частице. В те годы в Радиевом институте по инициативе Л. В. Мысовского была построена камера Вильсона, на которой изучались свойства продуктов радиоактивного распада и их взаимодействие с различными ядрами. После создания источников нейтронов с использованием радона и полония стали проводить опыты с искусственной радиоактивностью, образуемой нейтронами. В результате изучения радиоактивности, наведенной в броме, было открыто явление изомерий ядер. Сотрудник Радиевого института Л. В. Мысовский совместно с И. В. Курчатовым и Л. И. Русиновым, работавшими в те годы в Ленинградском физико-техническом институте, обнаружили, что при облучении естественного брома, имеющего два стабильных изотопа, появляются активности с тремя различными периодами полураспада.

Дальнейшее развитие работ в области ядерных реакций было связано с необходимостью создания искусственного источника ускоренных ионов. В 1932 г. было принято решение о строительстве в Радиевом институте циклотрона, а в 1937 г. начал работать первый в Европе циклотрон. Позднее он неоднократно усовершенствовался и функционирует до настоящего времени. В создание этого ускорителя много

труда и энергии вложили Л. В. Мысовский, Д. Г. Алхазов, В. Н. Рукавишников, а при дальнейшем усовершенствовании ускорителя — К. А. Бриземейстер, Ю. А. Селицкий и Н. Н. Трофимов. Во время Великой Отечественной войны работы на циклотроне были на много лет приостановлены (блокада Ленинграда, эвакуация Института). Только в 1946 г. он был восстановлен и сразу же на нем начались исследования. В том же году П. И. Лукирским, М. Г. Мещеряковым и Т. И. Хрениной был впервые зарегистрирован в фотоэмульсиях процесс, в котором в результате взаимодействия ядра He^3 с ядром материала фотоэмульсии образуется α -частица.

В этот же период на циклотроне Радиевого института была осуществлена очень важная для практических целей работа — получение плутония. После окончания Отечественной войны, когда еще не были созданы реакторы и более мощные ускорители, циклотрон Радиевого института позволял получать самые сильные в Советском Союзе потоки нейтронов, что достигалось путем бомбардировки бериллия ускоренными дейтонами. Этот источник нейтронов и был использован для получения в индикаторных количествах первого в Советском Союзе плутония, позволившего химикам нашего Института приступить к разработке технологии его выделения.

В последующие годы на циклотроне Радиевого института была проведена серия работ по изучению уровней возбуждения ядер и угловых распределений продуктов реакций методом клиновидного фильтра, предложенным автором это-

го доклада. Этот метод обладал хорошей точностью для своего времени и отличался быстротой получения результатов. С его помощью было показано, что реакция типа (d, p) на всех ядрах характеризуется резкой направленностью вторичных частиц — протонов — вперед при энергиях дейтронов, равных или больших высот потенциального барьера. При энергиях дейтронов значительно ниже высоты потенциального барьера оказалось, что протоны в реакциях на всех ядрах вылетали назад в направлении, противоположном движению первичных частиц дейтронов. Это позволило впервые высказать предположение о том, что реакции с дейтронами протекают преимущественно без образования составного ядра — прямым механизмом. Позднее была проведена количественная оценка соотношения между вероятностями протекания реакции через составное ядро и прямым механизмом.

В дальнейшем развитию работ по ядерным реакциям в значительной мере способствовало создание в 1965 г. в Институте электростатического ускорителя ЭСЦ-5, позволяющего получать пучки ускоренных ионов с однородностью энергий выше 0,05% при плавно изменяемых энергиях частиц до 3,5 Мэв.

В 50-х годах для изучения характеристик ядерных реакций все шире начал применяться магнитный анализ. Методы торможения частиц, применяемые ранее, не обеспечивали возросшие требования к точности определения энергий частиц, так как всегда были связаны со статистическим разбросом потерь энергии частицами. В Радиевом институте первоначально проводились опыты по изучению энергетических спектров частиц внутри камеры циклотрона с использованием магнитного поля самого циклотрона. Это позволило получить для некоторых реакций энергетические распределения частиц, но только для одного угла их вылета (около 90°) и с сравнительно невысоким разрешением.

В последующие годы усилия были направлены на создание многоуглового магнитного анализатора, который позволял получать одновременно энергетические спектры частиц, вылетающих из мишени под разными углами относительно направления первичных частиц. Для выяснения механизма ядерной реакции и характеристик уровней возбуждения ядер, их спинов и четностей необходимо иметь возможность не только точно определять энергии отдельных групп частиц, но и знать их угловое распределение. Во всех ранних устройствах этого типа магнитный анализатор строился

подвижным; его можно было располагать под различными углами относительно первичного пучка, попадающего на мишень.

В Радиевом институте был сконструирован многоугловой магнитный анализатор, в котором продукты реакций регистрировались одновременно под девятью углами, поэтому нет необходимости передвигать сам анализатор. Такой прибор имеет ряд преимуществ перед обычными анализаторами. Прежде всего экспозиция сокращается во столько раз, сколько каналов у анализатора (в данном случае в девять раз). Не менее важным преимуществом многоугловой системы является и то, что изменение состояния мишеней под пучком, ее выгорание и неточности измерения полного потока частиц, попадающих на мишень, для всех углов измерения оказываются одинаковыми и не влияют на результаты опытов.

С помощью многоуглового магнитного анализатора, который был создан в Радиевом институте раньше, чем в других лабораториях (как в СССР, так и за границей), удалось провести исследование реакций типа (d, p) для 29 изотопов со средними массовыми числами от хрома до палладия. В результате этих исследований была получена обширная информация о возбужденных состояниях ядер.

Было обнаружено свыше 220 ранее неизвестных возбужденных состояний ядер, более чем для 220 уровней были определены моменты количества движения, переносимые нейтроном в конечное ядро. Полученные результаты сравнивались с расчетами, проведенными методом искаженных волн, что позволило примерно для 100 уровней найти спектроскопические множители.

В результате обработки этого материала появилась возможность выяснить степень отклонений последовательности заполнения нейтронных оболочек от схемы Майера и убедиться в улучшении согласия при учете парных корреляций. Были обнаружены уровни, которые по своей природе следует отнести к O^+ -аналогам, т. е. такие, которые по характеристикам совпадают с нижними одночастичными состояниями возбуждения, но отстоят от них на величину энергии возбуждения O^+ -уровня остова ядра. Опыты с подбарьерными энергиями первичных (дейтронов) и вторичных частиц (протонов) показали, что спектроскопические множители в этих случаях имеют ту же величину, что и при надбарьерных энергиях частиц во входном и выходном каналах. Это указывает на определенную универсальность спектроско-

пических множителей и на то, что они действительно отражают физическую природу уровней и не зависят от того, в каких условиях протекает реакция. Одновременно было обнаружено, что для некоторых уровней при подбарьерных энергиях частиц спектроскопические множители оказываются больше, чем при надбарьерных энергиях, что, по-видимому, свидетельствует о существовании иного механизма возбуждения этих состояний.

При обработке этого материала удалось уточнить величину изобар-спинового члена оптического потенциала ядра, а также получить ряд новых данных об относительной плотности нейтронов и протонов вблизи поверхности различных ядер. В проведении этого цикла работ деятельное участие принимали В. Ф. Литвин и К. И. Жеребцова.

Для продолжения этого направления исследований в настоящее время запущен большой магнитный анализатор с высокими светосилой и разрешением, приспособленный для работы на пучке электростатического ускорителя. Прибор этот установлен стационарно, а для изучения угловых характеристик реакций предусмотрена специальная система поворота пучка первичных частиц.

В Институте в течение многих лет проводятся также работы и в других направлениях. Одним из них является изучение механизма реакции (d, α) при энергиях дейтронов около 6 Мэв. Угловые распределения и интенсивности групп α -частиц измеряются с помощью полупроводниковых детекторов. В результате проведенных исследований показано, что на α -частичных ядрах реакция протекает преимущественно прямым механизмом и ее сечения имеют сравнительно высокие значения, в то время как на других ядрах преобладает механизм составного ядра. Изучались также нарушения запрета по изотопическому спину для образования некоторых конечных состояний в реакциях (d, α); получены указания на то, что наиболее вероятной причиной их образования является переход начатающего дейтрона в возбужденное состояние под воздействием кулоновских сил (Е. Д. Тетерин, В. С. Садковский).

В течение ряда лет проводились систематические исследования взаимодействия нейтронов с протонами водородсодержащих веществ. Были изучены пространственные распределения медленных нейтронов в воде, создаваемые различными источниками быстрых нейтронов, помещенными в центре бака. Показано, что величина параметра, характеризующего экспонен-

циальный спад распределения нейтронов в воде, определяется средней энергией нейтронов источника. На основе этих исследований был разработан новый, более точный метод определения абсолютного числа нейтронов, испускаемых образцовыми источниками (М. А. Бак, К. А. Петржак); этот метод применяется до настоящего времени.

В институте проводились также работы по исследованию поляризации частиц в ядерных реакциях и при упругом рассеянии. В этом цикле работ была изучена поляризация протонов с энергией 3 Мэв при упругом рассеянии, а также впервые были получены основные характеристики векторной поляризации дейтронов при упругом рассеянии. Изучалась поляризация ряда групп нейтронов из реакций типа (d, n) для нескольких ядер. Была обнаружена общность поляризационных характеристик для процессов, при которых захватываемый ядром-мишенью протон передает конечному ядру одинаковые моменты количества движения (Л. А. Победоносцев, Н. П. Бабенко).

Кроме перечисленных направлений исследований в физическом отделе Радиевого института были выполнены работы, направленные на выяснение отдельных вопросов. Так, оригинальным методом путем наблюдения расщепления дейтерия γ -квантами в фотографических эмульсиях изучались спектры γ -квантов захвата нейтронов (П. И. Лукирский, М. Л. Александрова); изучались γ -спектры при неупругом рассеянии нейтронов (К. А. Петржак, А. В. Сорокина, Л. Я. Граудынь); измерялись корреляции направлений вылета двух нейтронов в реакции $Be^9(n, 2n)Be^8$ (Н. А. Ансера, Ю. А. Немилов). Выяснению механизма ядерных реакций были посвящены две работы в разных лабораториях. В одной из них изучались характеристики реакций нейтрон — протон на изотопах селена (К. А. Петржак, А. В. Сорокина, В. В. Иваненко), в другой сопоставлялись выходы ядра в основном и изомерном состояниях, образующихся в результате разных ядерных реакций (К. И. Жеребцова, Т. П. Макарова, Ю. А. Немилов). Интересная работа была выполнена по аннигиляции позитронов, в которой впервые на основании измерения углового распределения аннигиляционных γ -квантов, было показано, что основная масса позитронов сначала тормозится до энергии ниже 1 эв, а затем уже происходит аннигиляция. В этой работе была впервые измерена поляризация аннигиляционных γ -квантов (Н. А. Власов). В другой работе по изучению реакции ($n, 2n$)

на золоте было подтверждено существование изомера у изотопа Au^{196} и измерен его период.

В Институте проводятся также работы по реакциям, характеристики которых представляют интерес при построении реакторов на быстрых нейтронах. К таким процессам относятся реакции, вызываемые быстрыми нейтронами, а также характеристики упругого и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах материалов, употребляемых в реакторостроении. В настоящее время уже получены уточненные функции возбуждения в реакциях (n, p) и (n, α) для ряда ядер. Для изучения спектров неупруго рассеянных нейтронов применяется специально созданный спектрометр по времени пролета и ускоритель ЭСГ-5, перестроенный для работы в импульсном режиме. Аналогичная система предусмотрена также на новом нейтронном генераторе НГ-400 (Лаборатория Ю. А. Немилова и Протопопова).

Другим направлением, имеющим практическое значение и получившим развитие в СССР в последние годы, является изучение вторичного излучения, возникающего в различных материалах под воздействием протонов и других тяжелых частиц. Эти исследования необходимы для создания наиболее эффективных защит космических кораблей. По плану этих работ были изучены абсолютные выходы и энергетические спектры γ -квантов, образующихся при облучении мишеней из углерода, алюминия и никеля протонами различных энергий. Полученные данные позволили произвести расчет доз вторичного излучения от протонов солнечных вспышек различных типов и внутреннего радиационного пояса Земли при различных толщинах радиационной защиты из алюминия. Эти работы проводятся Б. А. Бибичевым и Н. С. Шиманской в лаборатории Г. В. Горшкова.

Геохимические исследования

Л. В. КОМЛЕВ

УДК 550.4

Возникший в начале 1922 г. по инициативе крупнейшего минералога и геохимика академика В. И. Вернадского Радиевый институт на протяжении своей полувековой деятельности играл роль активного научного центра, в котором было положено начало важнейшим направлениям геохимических исследований.

По замыслу В. И. Вернадского в Радиевом институте наряду с изучением физики и химии радиоактивных элементов должны были быть широко поставлены геохимические исследования, связанные с изучением радиоактивных свойств Земли, как геологического и космического тела. Наука о радиоактивных свойствах нашей планеты и составляющих ее комплексов горных пород получила название радиогеологии.

С необыкновенной прозорливостью ученого В. И. Вернадский сформулировал основные проблемы в изучении радиоактивности Земли задолго до основания Института.

Факт широкой распространенности радиоактивных элементов в веществе Земли, впервые установленный в 1902—1903 гг., и почти одновременно открытие значительного энергетического эффекта радиоактивного распада дали основание Э. Резерфорду уже в 1903 г. высказать предположение о возможном значении радиогенного тепла как одного из важнейших источников внутренней энергии Земли.

Реальность и первостепенная важность этой проблемы была подтверждена первой серией замечательных экспериментальных работ Р. Стретта (1906 г.), Дж. Джоли (1908 г.) и их сотрудников по изучению радиоактивности горных пород. Именно на основании этих работ были сделаны первые количественные расчеты радиогенного тепла и установлена преимущественная связь урана и тория с кислыми породами земной коры.

В нашей стране задача проведения широких систематических исследований распределения радиоактивных элементов в горных породах земной коры для количественного обоснования роли радиогенной энергии в геологическом развитии Земли впервые была поставлена (1910—1914 гг.) В. И. Вернадским. В рамках международного сотрудничества предполагалось создать радиоактивную карту поверхности нашей планеты, аналогичную геологическим и геофизическим картам. В ходе создания такой карты должны были быть получены ценнейшие геохимические материалы — основа для научных поисков месторождений радиоактивных элементов.

Второй важнейший аспект изучения радиоактивности Земли (по В. И. Вернадскому — одна из важнейших радиогеологических проблем) — это возможность использования радиоактивного атомного распада для счета геологического