

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОТДЕЛЕНИЕ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

СОВЕТСКАЯ НАУКА И ТЕХНИКА
ЗА 50 ЛЕТ

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ В
СССР

*С. А. Баранов,
Б. М. Болотовский,
А. Н. Горбунов, А. С. Давыдов,
А. М. Демидов, А. П. Ключарев,
Е. М. Лейкин, И. Х. Лемберг,
А. А. Оглоблин, Н. А. Перфилов,
Г. Н. Смиринкин, Л. Н. Усачев,
И. М. Франк, Ф. Л. Шапиро*

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1967

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

1. ВВЕДЕНИЕ. ПЕРВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Значительный период в развитии ядерной физики связан с проблемой получения атомной энергии. Вплотную к решению этой проблемы наша наука подошла в последние годы Великой Отечественной войны. Война принесла стране неисчислимые людские и материальные потери, тяжелым был и ущерб, нанесенный науке. Значительная часть молодых ученых сражалась в рядах армии, большинство институтов работало в тылу, в условиях эвакуации или только что возвратилось из нее. Лаборатории лишились части научного оборудования, и в некоторых случаях все приходилось создавать сначала. И как раз в это время перед ядерной физикой возникли небывалые по объему и сложности задачи. Нет сомнения, что решение их было бы невозможно без наличия у нас в то время квалифицированных ученых — специалистов в области ядерной физики, без опыта экспериментальной работы и без глубокого понимания теоретических проблем. Кроме того, из армии стала возвращаться молодежь — студенты университетов и технических вузов, которых война оторвала от студенческой скамьи, молодые ученые и инженеры, которым война не дала возможности применить свои знания в науке и промышленности. Это замечательное поколение, прошедшее суровую школу войны, в кратчайший срок сделалось основной силой, обеспечившей под руководством ученых старшего поколения дальнейший прогресс нашей науки. Хотя размах работ и оснащение их экспериментальной техникой в ре-

зультате этого стали совсем иными, нельзя, разумеется, забывать об успехах нашей науки в предшествующие годы.

Обращаясь к истории ядерной физики на ее довоенном этапе, нельзя не видеть, что достижения того времени были непосредственным образом связаны с общим подъемом науки в нашей стране, который начался уже в первые годы после Октябрьской революции.

Особенность этого периода состояла в том, что наряду с высшими учебными заведениями и характерным для них постепенным развитием науки существенное значение приобрели вновь организованные новые институты. Таковы возникшие в Ленинграде Физико-технический институт, созданный А. Ф. Иоффе; Радиевый институт, который возглавил В. И. Вернадский; Государственный оптический институт Д. С. Рождественского. В Москве П. П. Лазарев организовал Институт физики и биофизики. Позже его место занял организованный С. И. Вавиловым Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, переехавший в 1934 г. из Ленинграда в Москву вместе с Академией наук СССР. К этому списку следует также добавить Украинский физико-технический институт в Харькове.

Все эти институты широко раскрыли двери талантливой молодежи, они были лишены кастовости и «академической рутин», смело встали на путь тесной связи науки с практикой. Создание инициативных научных коллективов, понимающих запросы практики, сыграло в дальнейшем решающую роль, когда физике пришлось стать во главе зарождающейся атомной промышленности.

Ко времени начала бурного развития физической науки в нашей стране мировая ядерная физика была еще очень молода. Первые опыты Резерфорда по расщеплению атомного ядра были выполнены в 1919 г. Неудивительно, что в первый период атомное ядро было предметом исследования (не только у нас, но и во всем мире) очень небольшого числа физиков. Исследования проводились в порядке, если можно так сказать, личной инициативы, на их развитие не обращалось специального внимания, а тем более их никто не планировал. Но уже тогда в нашей стране были выполнены работы, имевшие первостепенное значение. Д. В. Скобельцын, усовершенствовав камеру Вильсона применением магнитного поля, провел с ее помощью ряд исследований большого значения (1927—1929 гг.). Им впервые были обнаружены следы частиц космических лучей и показано, что по ионизации они не отличаются от быстрых электронов радиоактивных излучений, но обладают значительно большей энергией. Выяснена и другая важная особенность, а именно одновременное появление групп частиц, в дальнейшем получившая название ливней космических лучей. После работ Д. В. Скобельцына космические лучи, которые до того времени склонны были считать проблемой геофизики, прочно вошли в ядерную физику. По существу эти работы были первыми исследованиями, относящимися к той области науки, которую теперь называют физикой высоких энергий.

Другим направлением исследования Д. В. Скобельцына с помощью камеры Вильсона было изучение эффекта Комптона. Его работа подтвердила, что закон рассеяния γ -лучей согласуется с формулой, полу-

исследования возбужденных состояний ядер они применили математические методы, разработанные Н. Н. Боголюбовым при построении теории сверхтекучести и сверхпроводимости. С. Т. Беляев с помощью метода канонических преобразований и В. Г. Соловьев с помощью вариационного метода, предложенного Н. Н. Боголюбовым, исследовали влияние приводящих к парным корреляциям остаточных взаимодействий на свойства атомных ядер.

Начиная с 1962 г. А. Б. Мигдалом успешно развивается теория ядра, основанная на теории ферми-жидкости. А. Б. Мигдал обобщил развитую Л. Д. Ландау теорию ферми-жидкости, занимающей бесконечное пространство, на случай конечных систем.

3. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Одним из наиболее успешно развивавшихся в ядерной физике направлений было исследование легких ядер. Особенное развитие оно получило в послевоенные годы. В ряде институтов были подвергнуты детально изучению реакции $D + D$ и $D + T$, используемые в качестве источников моноэнергетических нейтронов в ряде работ, в том числе и прикладного значения. Исследования реакций легчайших ядер стимулировались и проблемой термоядерного синтеза.

Большое внимание уделялось изучению свойств малонуклонных ядер как простейших ядерных систем. Значительный вклад в этой области внесли теоретические исследования А. И. Базя, В. И. Гольданского, Я. Б. Зельдовича, А. Б. Мигдала и Я. И. Смородинского, в которых были предсказаны многие свойства малонуклонных систем.

Особое внимание привлекли исследования возможных возбужденных состояний He^4 . Первые указания на существование возбужденного состояния у ядра гелия при энергии 22 Мэв были получены в работах Н. А. Власова (1953 г.) при исследовании реакции $T(p, n)He^3$. Интенсивное изучение ядра гелия продолжается до сих пор, так как в этой проблеме и сейчас еще остается много неясного.

Неожиданным явилось открытие другого уровня He . Проблема этого уровня возникла в результате изучения Ф. Л. Шапиро, А. А. Бергманом и др. (n, p) -реакции на ядре He^3 , в которой обнаружилось отклонение от закона $1/v$. Анализ результатов привел Ф. Л. Шапиро к обобщению закона $1/v$ и предсказанию существования у гелия уровня 0^+ в районе 20 Мэв . С теоретической точки зрения, наличие у He^4 уровня со спином ноль и положительной четностью было совершенно неожиданным и поэтому его существование долго оспаривалось. Однако в очень тонких экспериментах Ю. Г. Балашко, И. Я. Барита и А. Б. Курепина, исследовавших рассеяние протонов на тритии при малых энергиях и проведенных фазовый анализ данных, было получено прямое доказательство существования этого уровня.

Развитие работ по исследованию малонуклонных систем привело к созданию на циклотроне Института атомной энергии первого спектрометра быстрых нейтронов по времени пролета (Н. А. Власов, В. А. Сидоров, А. А. Оглоблин). С помощью этого спектрометра был проведен

большой цикл работ по изучению взаимодействия частиц в конечном состоянии, образующихся при взаимодействии $D + p$, $He^3 + d$ и др. (Б. В. Рыбаков), а в 1956 г. В. А. Сидоровым с сотрудниками было открыто квазистабильное ядро Be^6 , распадающееся путем испускания двух протонов. В начале 60-х годов В. К. Войтовецкий выполнил прецизионное измерение константы $n - n$ -взаимодействия. По спектру протонов в реакции $D(n, p)2n$ показано, что в соответствии с принципом зарядовой инвариантности константа взаимодействия двух нейтронов составляет примерно 70 кэв, а связанный динейтрон не существует.

Послевоенные годы принесли много нового и в области исследования механизмов ядерных реакций. По мере накопления экспериментальных данных стало очевидно наличие широкого круга процессов, не укладывающихся в боровскую модель составного ядра. Вначале (1949 г.) для описания взаимодействия нуклонов высокой энергии, а затем (1954 г.) и для нуклонов малых энергий была предложена оптическая модель ядерных взаимодействий. Был обнаружен целый ряд реакций, механизм протекания которых не связан с образованием составного ядра. Такие реакции, получившие названия прямых, могли сопутствовать механизму образования составного ядра. Интенсивные исследования прямых ядерных реакций начались в 50-х годах. Первые работы в этом направлении, посвященные изучению (d, p) -реакций на легких ядрах, были сделаны в Радиовом институте под руководством П. И. Лукирского и Ю. А. Немилова. Впоследствии изучением прямых реакций занялись многие лаборатории. Реакции срыва наиболее подробно изучались в Институте физики в Киеве и в Радиовом институте и университете в Ленинграде. Киевская группа исследовала реакции (d, p) на очень большом числе ядер по всей периодической системе, широко используя мишени из разделенных изотопов. В реакциях (d, p) и неупругого рассеяния дейтронов ими была установлена связь между механизмом реакции и природой (одночастичный, коллективный) возбуждаемого уровня. В Ленинграде для анализа экспериментальных результатов впервые начал применяться метод искаженных волн (К. А. Тер-Мартirosян, 1952 г.). Серия работ по изучению реакций (d, n) была проведена в Институте теоретической и экспериментальной физики. Развитию теории прямых ядерных реакций с участием дейтронов посвящены работы А. И. Ахиезера, Л. Г. Ситенко и др.

В Институте атомной энергии детально изучался обратный срыву процесс — реакции подхвата. В 1956—1960 гг. А. А. Оглоблиным с сотрудниками было проведено систематическое исследование реакций (d, t) и впервые на большом материале была установлена основная особенность этого класса реакций — избирательное возбуждение дырочных состояний. Успех в наблюдении высоколежащих дырочных уровней определялся использованием методики, обеспечивающей абсолютное отделение тритонов от других частиц.

Работы начала 60-х годов по изучению прямых взаимодействий находились под сильным влиянием дисперсионной теории ядерных реакций, разработанной И. С. Шапиро. Эта теория стимулировала изучение более сложных реакций, в которых, в отличие от (d, p) или (d, t) , могли проявляться различные механизмы. Стало широко применяться сравнение

разных реакций между одними и теми же состояниями ядер. Наиболее подробные исследования были проведены в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова — реакции (He^3, α), (α, t) (p, t) (А. А. Оглоблин и др.), в Киеве — (α, t) (d, α) (О. Ф. Немец и др.), в МГУ — реакции (d, p), (α, d) (С. С. Васильев и др.).

В самое последнее время на циклотроне ИАЭ начато изучение взаимодействий, вызываемых ускоренными ядрами лития. Реакции (Li^6, α), (Li^7, α), (Li^6, d), (Li^7, d) по своему механизму аналогичны реакциям срыва (d, p) и (d, n) с тем отличием, что вместо передачи ядру-мишени нуклона происходит передача дейтрона, тритона или α -частицы.

К исследованию прямых реакций тесно примыкали работы по изучению рассеяния частиц. Первые работы по изучению упругого рассеяния α -частиц с энергией 28 Мэв были проведены Ю. Л. Соколовым (1947 г.). В дальнейшем основные работы по изучению рассеяния и анализу экспериментальных данных на основе оптической модели стали проводиться на Украине — в Харьковском физико-техническом институте и Киевском институте физики. В 1954—1960 гг. А. П. Ключарев с сотрудниками провел систематическое исследование рассеяния протонов различной энергии на большом числе ядер среднего веса. При энергии 5—7 Мэв был обнаружен так называемый изотопный эффект — резкое различие дифференциальных сечений рассеяния при изменении на единицу числа нуклонов в ядре-мишени. Изотопный эффект оказался тесно связанным с возможными каналами распада образующихся составных ядер. В последующие годы большое внимание уделялось изучению рассеяния глубоко подбарьерных протонов. В Киеве под руководством О. Ф. Немца ставились эксперименты по проверке оптической модели. Наряду с рассеянием α -частиц особенно подробно исследовалось упругое и неупругое рассеяние дейтронов с энергией 13,7 Мэв. В этих работах была установлена зависимость сечения процесса развала дейтрона от диффузности поверхности ядра. Исследования упругого и неупругого рассеяния протонов, дейтронов и α -частиц, а также реакций срыва и подхвата широко развернулись после того, как в Харьковском физико-техническом институте был разработан ряд методов получения изотопных мишеней в виде тонких свободных фольг из милликоличеств изотопного сырья.

В ИАЭ были проведены систематические исследования упругого и неупругого рассеяния He^3 на большом числе ядер при различных энергиях (В. Н. Рудаков, В. З. Гольдберг).

Большую роль в понимании ядерных взаимодействий сыграли работы по оптической модели П. Э. Немировского, В. В. Владимирского, А. С. Давыдова, А. Г. Ситенко, Е. В. Инопина и др.

В середине 50-х годов начались исследования с поляризованными частицами. Первые работы были сделаны И. И. Левинтовым с сотрудниками, изучавшими поляризацию нейтронов в реакциях $D + D$ и $D + T$ и получившими важные данные о спин-орбитальном взаимодействии. В дальнейшем измерение поляризации нейтронов проводилось в Институте атомной энергии, поляризации протонов в реакциях срыва и дейтронов при рассеянии — в Институте физики (Киев). В Москве и Харькове велась работа по созданию источника поляризованных частиц.

Б. П. Адьясевицем и Е. К. Завойским была предложена идея создания источника поляризованных ионов (1957 г.), получившая широкое распространение. В 1964 г. Б. П. Адьясевиц с сотрудниками провел эксперименты по изучению реакции $D + D$ на поляризованных ионах дейтерия.

Обширные данные о структуре легких ядер были получены в Дубне при изучении реакций, идущих через составное ядро (И. В. Сизов, Г. М. Осетинский и др.). Крупный цикл работ по исследованию радиационного захвата протонов, а также реакций $(p, p'\gamma)$ был сделан А. К. Вальтером и С. П. Цытко в Харьковском физико-техническом институте. Начиная с 1965 г. эти работы ведутся с помощью первого в СССР электростатического генератора, управляемого вычислительной машиной. В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова В. М. Манько с сотрудниками, исследуя реакции (p, α) в зависимости от энергии протонов, получил сведения о α -ширинах уровней легких ядер.

Большие успехи были достигнуты и при исследовании фотоядерных реакций, происходящих при взаимодействии с ядрами электромагнитного излучения с энергией от нескольких мегаэлектрон-вольт до нескольких десятков мегаэлектрон-вольт. Эти исследования позволили получить важную информацию о свойствах ядерных сил, оболочечной структуре ядер, об особенностях электрических и магнитных переходов различной мультипольности при высоких энергиях возбуждения, об оптической анизотропии ядер и т. п.

Интенсивные экспериментальные исследования фотоядерных реакций в СССР начались в конце 40-х годов после того, как В. И. Векслером на основе предложенного им нового метода ускорения частиц в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР были построены электронные синхротроны с энергией 30 *Мэв* (1947 г.) и 280 *Мэв* (1949 г.). Фотоядерные исследования на электронных ускорителях, начатые в 1947 г. Л. Е. Лазаревой и другими (ФИАН), были развернуты также в Ленинградском физико-техническом институте на синхротроне с энергией 100 *Мэв*, в НИИЯФ МГУ, в Томском политехническом институте, Харьковском физико-техническом институте и в других научных центрах.

Экспериментальные исследования ядерного фотоэффекта в Советском Союзе проводились по нескольким направлениям. Одним из этих направлений было тесно связанное с проблемой ядерных сил исследование фоторасщепления простейших атомных ядер (D, He^3, He^4).

А. П. Горбунов с сотрудниками (ФИАН) провел систематическое исследование фоторасщепления трех- и четырехнуклонных ядер He^3 и He^4 , существенное для выяснения роли многочастичных ядерных сил.

Первые экспериментальные исследования фотоэффекта на более сложных ядрах показали, что интенсивное поглощение фотонов ядрами происходит в узкой области энергий. Это явление, получившее название «гигантского резонанса», впервые было интерпретировано А. Б. Мигдалом (1945 г.) как возбуждение дипольных колебаний ядер. А. Б. Мигдал впервые применил в теории фотоядерных реакций правила сумм, используемые в атомной физике. Впоследствии им был получен ряд важных результатов относительно положения гигантского резонанса, его ширины и т. п.

разных реакций между одними и теми же состояниями ядер. Наиболее подробные исследования были проведены в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова — реакции (He^3, α) , (α, t) (p, t) (А. А. Оглоблин и др.), в Киеве — (α, t) (d, α) (О. Ф. Немец и др.), в МГУ — реакции (d, p) , (α, d) (С. С. Васильев и др.).

В самое последнее время на циклотроне ИАЭ начато изучение взаимодействий, вызываемых ускоренными ядрами лития. Реакции (Li^6, α) , (Li^7, α) , (Li^6, d) , (Li^7, d) по своему механизму аналогичны реакциям срыва (d, p) и (d, n) с тем отличием, что вместо передачи ядру-мишени нуклона происходит передача дейтрона, тритона или α -частицы.

К исследованию прямых реакций тесно примыкали работы по изучению рассеяния частиц. Первые работы по изучению упругого рассеяния α -частиц с энергией 28 Мэв были проведены Ю. Л. Соколовым (1947 г.). В дальнейшем основные работы по изучению рассеяния и анализу экспериментальных данных на основе оптической модели стали проводиться на Украине — в Харьковском физико-техническом институте и Киевском институте физики. В 1954—1960 гг. А. П. Ключарев с сотрудниками провел систематическое исследование рассеяния протонов различной энергии на большом числе ядер среднего веса. При энергии 5—7 Мэв был обнаружен так называемый изотопный эффект — резкое различие дифференциальных сечений рассеяния при изменении на единицу числа нуклонов в ядре-мишени. Изотопный эффект оказался тесно связанным с возможными каналами распада образующихся составных ядер. В последующие годы большое внимание уделялось изучению рассеяния глубоко подбарьерных протонов. В Киеве под руководством О. Ф. Немца ставились эксперименты по проверке оптической модели. Наряду с рассеянием α -частиц особенно подробно исследовалось упругое и неупругое рассеяние дейтронов с энергией 13,7 Мэв. В этих работах была установлена зависимость сечения процесса развала дейтрона от диффузности поверхности ядра. Исследования упругого и неупругого рассеяния протонов, дейтронов и α -частиц, а также реакций срыва и подхвата широко развернулись после того, как в Харьковском физико-техническом институте был разработан ряд методов получения изотопных мишеней в виде тонких свободных фольг из милликоличеств изотопного сырья.

В ИАЭ были проведены систематические исследования упругого и неупругого рассеяния He^3 на большом числе ядер при различных энергиях (В. Н. Рудаков, В. З. Гольдберг).

Большую роль в понимании ядерных взаимодействий сыграли работы по оптической модели П. Э. Немировского, В. В. Владимирского, А. С. Давыдова, А. Г. Ситенко, Е. В. Инопина и др.

В середине 50-х годов начались исследования с поляризованными частицами. Первые работы были сделаны И. И. Левинтовым с сотрудниками, изучавшими поляризацию нейтронов в реакциях $D + D$ и $D + T$ и получившими важные данные о спин-орбитальном взаимодействии. В дальнейшем измерение поляризации нейтронов проводилось в Институте атомной энергии, поляризации протонов в реакциях срыва и дейтронов при рассеянии — в Институте физики (Киев). В Москве и Харькове велась работа по созданию источника поляризованных частиц.

Б. П. Адыяевичем и Е. К. Завойским была предложена идея создания источника поляризованных ионов (1957 г.), получившая широкое распространение. В 1964 г. Б. П. Адыяевич с сотрудниками провел эксперименты по изучению реакции $D + D$ на поляризованных ионах дейтерия.

Обширные данные о структуре легких ядер были получены в Дубне при изучении реакций, идущих через составное ядро (И. В. Сизов, Г. М. Осетинский и др.). Крупный цикл работ по исследованию радиационного захвата протонов, а также реакций $(p, p'\gamma)$ был сделан А. К. Вальтером и С. П. Цытко в Харьковском физико-техническом институте. Начиная с 1965 г. эти работы ведутся с помощью первого в СССР электростатического генератора, управляемого вычислительной машиной. В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова В. М. Манько с сотрудниками, исследуя реакции (p, α) в зависимости от энергии протонов, получил сведения о α -ширинах уровней легких ядер.

Большие успехи были достигнуты и при исследовании фотоядерных реакций, происходящих при взаимодействии с ядрами электромагнитного излучения с энергией от нескольких мегаэлектрон-вольт до нескольких десятков мегаэлектрон-вольт. Эти исследования позволили получить важную информацию о свойствах ядерных сил, оболочечной структуре ядер, об особенностях электрических и магнитных переходов различной мультипольности при высоких энергиях возбуждения, об оптической анизотропии ядер и т. п.

Интенсивные экспериментальные исследования фотоядерных реакций в СССР начались в конце 40-х годов после того, как В. И. Векслером на основе предложенного им нового метода ускорения частиц в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР были построены электронные синхротроны с энергией 30 *Мэв* (1947 г.) и 280 *Мэв* (1949 г.). Фотоядерные исследования на электронных ускорителях, начатые в 1947 г. Л. Е. Лазаревой и другими (ФИАН), были развернуты также в Ленинградском физико-техническом институте на синхротроне с энергией 100 *Мэв*, в НИИЯФ МГУ, в Томском политехническом институте, Харьковском физико-техническом институте и в других научных центрах.

Экспериментальные исследования ядерного фотоэффекта в Советском Союзе проводились по нескольким направлениям. Одним из этих направлений было тесно связанное с проблемой ядерных сил исследование фоторасщепления простейших атомных ядер (D, He^3, He^4).

А. П. Горбунов с сотрудниками (ФИАН) провел систематическое исследование фоторасщепления трех- и четырехнуклонных ядер He^3 и He^4 , существенное для выяснения роли многочастичных ядерных сил.

Первые экспериментальные исследования фотоэффекта на более сложных ядрах показали, что интенсивное поглощение фотонов ядрами происходит в узкой области энергий. Это явление, получившее название «гигантского резонанса», впервые было интерпретировано А. Б. Мигдалом (1945 г.) как возбуждение дипольных колебаний ядер. А. Б. Мигдал впервые применил в теории фотоядерных реакций правила сумм, используемые в атомной физике. Впоследствии им был получен ряд важных результатов относительно положения гигантского резонанса, его ширины и т. п.

С 1956 г. в теории гигантского резонанса начиналось широкое применение идей оболочечной структуры ядра. В развитии этих идей особенно существенную роль сыграли экспериментальные исследования фоторасщепления легких ядер. Л. Е. Лазарева с сотрудниками (ФИАН) провела измерения полного сечения поглощения фотонов на ряде ядер. А. П. Комар и др. (ЛФТИ) и В. Г. Шевченко и др. (МГУ), А. Н. Горбунов и др. (ФИАН) исследовали эффективные сечения различных фотоядерных реакций на ряде легких ядер.

В этих исследованиях был надежно установлен факт существования тонкой структуры гигантского резонанса и исследованы ее специфические особенности для различных ядер. Впервые интерпретация характеристик продуктов фотоядерных реакций на основе модели оболочек была дана в работах Е. М. Лейкина, Р. М. Осокиной, Б. С. Ратнера (1953 г.). Большой вклад в экспериментальные исследования фотоядерных реакций на средних и тяжелых ядрах внесли В. Г. Шевченко с сотрудниками, а в исследование фотоядерных реакций при высоких энергиях — А. П. Комар с сотрудниками. Детальному исследованию процесса фотоделения были посвящены работы И. В. Чувило, П. А. Черенкова, А. П. Комара, Л. Е. Лазаревой и др.

Благоприятные возможности в области исследования фотоядерных реакций открылись в последние годы в связи с созданием С. П. Капицей и др. (ИФП) сильноточных высокоэффективных микротронов. В частности, на микротроне ИФП были получены новые экспериментальные данные о фотоделении вблизи порога (Г. Н. Смиренкин, Н. П. Работнов), в которых убедительно проявилось деление квадрупольными квантами.

Советские физики-теоретики также способствовали развитию исследований фотоядерных реакций. Ю. К. Хохлов рассмотрел правила сумм для эффективных сечений фотоядерных реакций в разных моделях ядра. А. М. Балдин развил теорию полного поглощения и рассеяния фотонов ядрами, создал теорию электрической поляризуемости атомных ядер и предсказал существование тензорной поляризуемости ядер.

Развитию теории фотоядерных реакций посвящены интересные работы В. В. Балашова, В. Г. Неудачина, В. Г. Шевченко и Ю. П. Юдина. Ими, в частности, исследовано влияние остаточного взаимодействия между нуклонами на фотоядерные реакции в области гигантского резонанса, влияние колебательных возбуждений ядра на характеристики гигантского резонанса фотопоглощения в ядрах.

Особенности реакций с учетом взаимодействия частиц в конечном состоянии были рассмотрены А. Б. Мигдалом. На возможность существования внутри легких ядер нуклонных ассоциаций, по-видимому, впервые указал В. И. Мамасакхлисов. Теорию фрагментации нуклонов в процессах квазиупругого рассеяния быстрых частиц на легких ядрах развивали В. В. Балашов, В. Г. Неудачин и Ю. Ф. Смирнов с сотрудниками. Вывод о наличии ассоциаций нуклонов на поверхности легких ядер следует также из работ А. И. Базя.

Для экспериментальной ядерной физики большое значение имела работа К. А. Тер-Мартirosяна (1949 г.), впервые развившего теорию возбуждения атомных ядер электрическим полем налетающей тяжелой

заряженной частицы. Этот метод оказался очень плодотворным для изучения возбужденных состояний ядер. Дальнейшее развитие он получил благодаря использованию для возбуждения ядер быстрых многозарядных частиц, ускоренных на циклотроне ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Д. Г. Алхазов, Д. С. Андреев, А. П. Гринберг, И. Х. Лемберг).

В экспериментальных исследованиях кулоновского возбуждения, выполненных И. Х. Лембергом с сотрудниками, в качестве бомбардирующих частиц впервые применялись ускоренные в циклотроне тяжелые ионы атомов C^{12} , N^{14} , O^{16} , Ne^{20} , Ne^{21} и Ne^{22} . Выведенные пучки этих ионов с энергией от 10 до 65 *Мэв* были получены в лаборатории Д. Г. Алхазова в ФТИ им. А. Ф. Иоффе на циклотроне, первоначально предназначенном для ускорения более легких частиц.

Использование тяжелых ионов позволило распространить исследования на сложные случаи высокоэнергичных уровней сферических четно-четных ядер, замкнутых по одной оболочке, определить времена жизни первых уровней более чем пятидесяти четно-четных ядер. Исследование природы переходов между низшими уровнями ряда легких ядер показало, что в области $A = 25$ ядра обладают статической деформацией.

Результаты исследования верхних возбужденных состояний четно-четных сферических ядер представляют большой интерес для установления применимости различных ядерных моделей. В исследованиях кулоновского возбуждения уровней ядер с нечетным A обнаружено большое число новых энергетических уровней. В результате проведенных исследований уточнены схемы уровней ряда ядер, а в некоторых случаях коренным образом изменены схемы, предложенные ранее. Работы по исследованию кулоновского возбуждения в Советском Союзе продолжают интенсивно развиваться. В частности, представляет большой интерес развитый в последние годы метод исследования совпадений γ -квантов, испускаемых при кулоновском возбуждении и рассеянных под малыми углами бомбардирующих ионов (О. Ф. Афонин, А. П. Гринберг, И. Х. Лемберг).

Использование этого метода позволило в самое последнее время получить большое количество новых данных о высокоэнергичных уровнях легких и средних ядер.

Тяжелые ионы широко применяются также в исследованиях ядерных превращений. Ядерные реакции с участием тяжелых ионов отличаются большим разнообразием. Наряду с реакциями, проходящими стадиями составного ядра, с большой интенсивностью идут прямые реакции — результат «касательного» взаимодействия сталкивающихся частиц.

При непосредственном контакте налетающего тяжелого иона с ядром мишени образуется составное ядро в сильно возбужденном состоянии. Распад возбужденной системы по каналу, когда излучаются нейтроны, с последующим γ -каскадом интересен тем, что образующееся в основном состоянии ядро будет иметь заряд, равный сумме зарядов иона и ядра мишени. Это дает реальную возможность получения трансурановых элементов, используя которую Г. Н. Флерову с сотрудниками удалось синтезировать в 1958 г. элемент 102 в реакции плутония с кислородом, а в 1964 г. элемент 104 в реакции плутония с неоном-22 (Лабора-

тория ядерных реакций ОИЯИ, Дубна¹). Этот элемент авторы открытия предложили назвать курчатовием. С помощью очень тонких радиохимических экспериментов И. Звара и Г. Н. Флеров с сотрудниками показали, что в соответствии с теоретическими ожиданиями этот элемент уже не принадлежит к ряду актинидов, оканчивающемуся на 103 элементе.

В той же лаборатории (Дубна) в 1964 г. были предприняты эксперименты, приведшие к обнаружению запаздывающих протонов (В. А. Карнаухов). Тяжелым ионам обязано открытие (1963 г.) спонтанного деления атомных ядер с очень коротким периодом распада, происходящего, по-видимому, из изомерного состояния. Это явление представляет значительный интерес для более совершенного понимания процесса деления атомных ядер (С. М. Поликанов, Дубна). За исследования трансурановых элементов, выполненные в ОИЯИ, Г. Н. Флерову, С. М. Поликанову, В. Я. Друину и И. Зваре в 1967 г. присуждена Ленинская премия.

При касательных столкновениях тяжелых ионов с атомными ядрами возникают реакции передачи (класс реакций более обширный, чем реакции скалывания и подхвата, возникающие при бомбардировке ядер легкими частицами или нуклонами), в которых с большой вероятностью возможна передача от частицы к частице не только одного нуклона, но и группы нуклонов, а также, по-видимому, и обмен нуклонами. Широкие исследования реакций передачи проводятся в Дубне и Харькове.

В заключение этого раздела следует вкратце остановиться на проблеме, стоящей несколько в стороне от рассмотренных здесь вопросов, а именно на работах, возникших в результате открытия излучения Вавилова — Черенкова. Это явление нашло широкое применение в физике высоких энергий. Счетчики Черенкова являются эффективным методом определения скорости частиц, а в некоторых случаях и их заряда. Кроме того, распространение получили черенковские γ -спектрометры, теория которых развита в ФИАНе (Е. М. Лейкин). Излучение Вавилова — Черенкова оказало большое влияние на развитие ряда смежных проблем, имеющих как теоретическое, так и прикладное значение. Не имея возможности упомянуть здесь все важнейшие работы в указанной области, отметим, что классическая теория прохождения заряженной частицы через преломляющую среду легла в основу целого направления в науке. В частности, теория ионизационных потерь Э. Ферми была получена на основе метода, развитого И. Е. Таммом и И. М. Франком. Ряд весьма интересных результатов в таких областях исследования, как прохождение заряженных частиц через анизотропные и гиротропные среды, получен советскими учеными (В. Л. Гинзбург, И. М. Франк, Б. М. Болотовский, В. Е. Пафомов, А. А. Коломенский, А. Г. Ситенко, М. И. Каганов и др.). Излучение Вавилова — Черенкова в кристалле экспериментально было исследовано В. П. Зреловым (Дубна). Были рассмотрены особенности эффекта Доплера в преломляющей среде. По сравнению с эффектом Доплера в пустоте обнаружен ряд интересных свойств

¹ Объединенный институт ядерных исследований в Дубне является международным институтом. Поэтому результаты, полученные в нем, о которых неоднократно упоминается в статье, являются итогом совместных исследований ученых социалистических стран, работающих в этом институте.

(И. М. Франк, 1942 г.). Эффект Доплера рассматривался также для случая анизотропных и гиротропных сред (В. Л. Гинзбург, И. М. Франк, А. А. Коломенский, К. А. Барсуков).

В 1946 г. В. Л. Гинзбург и И. М. Франк указали на возможность своеобразного эффекта — переходного излучения и дали теорию этого явления. Экспериментально существование переходного излучения было доказано лишь через 12 лет (1958 г.), причем свойства излучения оказались в согласии с предсказаниями теории. Число экспериментальных, а также теоретических работ по переходному излучению очень быстро возрастает. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, изучение переходного излучения связано с возможностью определения оптических свойств сред, в которых оно происходит. Поэтому переходное излучение может стать орудием исследования в оптике металлов. Во-вторых, как было показано Г. М. Гарибяном, энергия переходного излучения пропорциональна полной энергии, излучающей частицы, если энергия частицы достаточно велика. Это позволяет надеяться на создание счетчика частиц, в котором регистрация проводится по переходному излучению. В связи с этим значительный интерес представляет рассмотрение излучения быстрых частиц в сложных или периодически неоднородных средах, выполненное в ряде работ (Я. Б. Файнберг, М. Л. Тер-Микаелян, К. А. Барсуков, В. Я. Эйрман, Б. М. Болотовский, И. М. Франк).

Все сказанное далеко не исчерпывает полученных в ряде работ результатов, содержащих рассмотрение различных проблем излучения быстрых частиц в средах. Следует отметить, что этот круг идей нашел плодотворное применение в разных областях, таких как физика плазмы, проблемы получения быстрых частиц в ускорителях и, разумеется, различные проблемы генерации излучения.

К рассмотренному здесь кругу проблем близко примыкает и проблема излучения света частицами в циклических ускорителях.

В рассмотрении проблемы «светящегося электрона» большой вклад внесли И. Я. Померанчук, Л. А. Арцимович, Д. Д. Иваненко и А. А. Соколов с сотрудниками. В Советском Союзе впервые наблюдался обратный комптон-эффект, который состоит в увеличении частоты фотона при столкновении с быстрым электроном. Ф. Р. Арутюнов и В. А. Туманян предложили использовать обратный комптон-эффект для получения мощного энергетического γ -излучения. Опыты проводились совместно физиками ФИАН и МГУ на синхротроне с энергией 680 Мэв, в котором происходили «соударения» ускоренных электронов с потоком фотонов от рубинового лазера. Физиками Ереванского физического института было экспериментально исследовано излучение электронов в слоистых средах.

4. ФИЗИКА ДЕЛЕНИЯ И ФИЗИКА НЕЙТРОНОВ

Первый атомный реактор в СССР вступил в действие в декабре 1946 г. Осуществление широкой программы проектирования и строительства реакторов различных типов потребовало детального изучения процессов, вызываемых нейтронами. В ряде лабораторий были выполнены многочисленные теоретические и экспериментальные работы по вопросам

Ядерная физика — наука, все время открывающая путь различным практическим применениям, в своей совокупности не менее важным, чем проблема атомной энергии. Сейчас уже нельзя, вероятно, назвать такой отрасли науки и техники, где бы достижения ядерной физики или методы, ею развитые, не получили бы применений. Эти методы вышли теперь даже за пределы Земли и с успехом применяются для изучения структуры поверхности Луны.

Необходимо отметить, что новые возможности приложений ядерной физики возникают зачастую совсем неожиданно из изучения, казалось бы, самых тонких свойств ядерных процессов. Так, техника получения и анализа пучков медленных нейтронов открыла необозримые возможности исследования строения конденсированных сред. Тончайшее явление — эффект Мессбауэра — нашло неисчислимо количество приложений в науке и технике, и в их развитие значительный вклад внесен советскими учеными. Исследования эффекта Мессбауэра и применение других ядерных методов для изучения конденсированного состояния вещества имеют первостепенное значение. Число таких возможностей все возрастает. Объем статьи не позволяет нам остановиться подробнее на этом круге исследований, в равной мере интересном и для ядерной физики и физики конденсированных сред. В качестве примера хотелось бы указать на недавние работы А. Ф. Тулинова (МГУ), обнаружившего в 1964 г. так называемый «эффект теней». На основе этого физического явления сейчас разрабатываются весьма перспективные методы исследования структуры кристаллов с помощью быстрых заряженных частиц. Мы вправе ожидать, что продвижение в решении принципиальных проблем ядерной физики и в дальнейшем будет открывать новые и неожиданные приложения для практики.

С удовлетворением оглядываясь на путь, пройденный советской ядерной физикой, мы смело можем предвидеть, что он приведет к дальнейшим еще более замечательным достижениям, которые в условиях общества, строящего коммунизм, будут использованы на благо человечества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanenko D. D.* The neutron hypothesis.— *Nature*, 1932, v. 129; N 3265, p. 798.
2. *Альтшулер С. А., Тамм И. Е.* Магнитный момент нейтрона.— Докл. АН СССР, 1934, т. 1, № 8, стр. 455.
3. Первая Всесоюзная конференция по атомному ядру. Л., 1934. Атомное ядро. Сборник докладов. Л.— М., Гостехиздат, 1934.
4. *Tamm I.* Exchange forces between neutrons and protons, and Fermi's theory.— *Nature*, 1934, v. 133, N 3374, p. 981; Interaction of neutrons and protons.— *Nature*, 1934, v. 134, N 3400, p. 1010.
5. *Черенков П. А.* Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации.— Докл. АН СССР, 1934, т. 2, № 2, стр. 451.
6. *Ландау Л. Д.* К статистической теории ядра.— ЖЭТФ, 1937, т. 7, вып. 7, стр. 849.
7. Материалы Второй Всесоюзной конференции по атомному ядру. М., 20--26 сентября 1937 г.— Изв. АН СССР, серия физ., 1938, № 1-2.

8. Френкель Я. И. Электрокапиллярная теория расщепления тяжелых ядер.— ЖЭТФ, 1939, т. 9, вып. 6, стр. 644.
9. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. Деление и цепной распад урана.— УФН, 1940, т. 23, вып. 4, стр. 329.
10. Курчатов И. В. О работе циклотрона РИАНа СССР.— Изв. АН СССР, серия физ., 1940, т. 4, № 2, стр. 372.
11. Материалы совещания по физике атомного ядра. Харьков, 15—20 ноября 1939 г.— Изв. АН СССР, серия физ., 1940, т. 4, № 2, стр. 233.
12. Петржак К. А., Флеров Г. Н. Спонтанное деление урана.— Докл. АН СССР, 1940, т. 28, № 6, стр. 500; ЖЭТФ, 1940, т. 10, вып. 9-10, стр. 1013.
13. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. Механизм деления ядер.— УФН, 1941, т. 25, вып. 4, стр. 381.
14. Курчатов И. В. Деление тяжелых ядер.— УФН, 1941, т. 25, вып. 2, стр. 159.
15. Материалы совещания по физике атомного ядра. М., 20—26 ноября 1940 г.— Изв. АН СССР, серия физ., 1941, т. 5, № 4-5, стр. 555.
16. Векслер В. И. Новый метод ускорения релятивистских частиц.— Докл. АН СССР, 1944, т. 43, № 8, стр. 346.
17. Мигдал А. Б. Квадрупольное и дипольное γ -излучение ядер.— ЖЭТФ, 1945, т. 15, вып. 1, стр. 81.
18. Френкель Я. И. Принципы теории атомных ядер. М., Изд-во АН СССР, 1945.
19. Франк И. М. Излучение электронов, движущихся в веществе со сверхсветовой скоростью.— УФН, 1946, т. 30, вып. 3-4, стр. 149.
20. Ахлезер А. И., Померанчук И. Я. Некоторые вопросы теории ядра. Изд. 2-е. М., Гостехтеоретиздат, 1950.
21. Гер-Мартиросян К. А. Возбуждение ядер кулоновским полем заряженных частиц.— ЖЭТФ, 1952, т. 22, вып. 3, стр. 284.
22. Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. Доклады советских ученых. М., Атомиздат, 1955.
23. Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии, 1—5 июля 1955 г. Заседания Отделения физико-математических наук. М., Изд-во АН СССР, 1955.
24. Банд И. М., Слив Л. А. Таблицы коэффициентов внутренней конверсии на К-оболочке. М., Изд-во АН СССР, 1956.
25. Ядерные реакции на легких ядрах. М., Атомиздат, 1957.
26. Скобельцын Д. В., Франк И. М. Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР.— УФН, 1957, т. 63, вып. 3, стр. 503.
27. Банд И. М., Слив Л. А. Таблицы коэффициентов внутренней конверсии на L-оболочке. М., Изд-во АН СССР, 1958.
28. Грушев Л. В., Демидов А. М., Луценко В. Н., Пелехов В. И. Атлас спектров γ -лучей радиационного захвата тепловых нейтронов. М., Атомиздат, 1958.
29. Давыдов А. С. Теория атомного ядра. М., Физматгиз, 1958.
30. Рыбаков Б. В., Сидоров В. А. Спектрометрия быстрых нейтронов. М., Атомиздат, 1958.
31. Ситенко А. Г. Взаимодействие дейтронов с ядрами.— УФН, 1959, т. 67, вып. 3, стр. 377.
32. Немировский П. Э. Современные модели атомного ядра. М., Атомиздат, 1960.
33. Черенков П. А., Гамм И. Е., Франк И. М. Нобелевские лекции. М., Физматгиз, 1960.
34. Власов Н. А., Калинин С. П. Физические исследования циклотронной лаборатории ИАЭ.— Атомная энергия, 1961, т. 11, № 4, стр. 345.
35. Нейтронная физика. Сборник статей. М., Атомиздат, 1961.
36. Шапиро И. С. Оптическая модель в свете современных данных.— УФН, 1961, т. 75, вып. 1, стр. 61.
37. Ядерные реакции при малых и средних энергиях. М., Изд-во АН СССР, 1962.
38. Пасечник М. В. Вопросы нейтронной физики средних энергий. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.
39. Прокофьев Ю. А., Спивак П. Е. Исследование распада нейтрона.— Атомная энергия, 1962, т. 12, № 4, стр. 278.
40. Физика деления атомных ядер. Сборник статей. М., Атомиздат, 1962.
41. Соловьев В. Г. Влияние парных корреляций сверхпроводящего типа на свойства атомных ядер. М., Атомиздат, 1963.

42. *Гуревич И. И., Тарасов Л. В.* Физика нейтронов низких энергий. М., «Наука», 1965.
43. *Давыдов А. С.* Форма ядра, ее деформируемость и возбужденные состояния атомных ядер.— УФН, 1965, т. 87, вып. 3, стр. 599.
44. *Мигдал А. Б.* Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. М., «Наука», 1965.
45. *Давыдов А. С.* Возбужденные состояния атомных ядер. М., Атомиздат, 1967.
46. Ядерные реакции при малых и средних энергиях. М., Изд-во АН СССР, 1958.
47. *Ландау Л. Д., Смородинский Я. А.* Лекции по теории атомного ядра. М., ГИТТЛ, 1955.
48. *Джелепов Б. С., Пежер Л. К., Сергеев В. О.* Схемы распада радиоактивных ядер. М., Изд-во АН СССР, 1963.
49. Физика деления атомных ядер. Сборник статей. М., Атомиздат, 1957.
50. *Керсунский М. И.* Изомерия атомных ядер. М., ГИТТЛ, 1955.
51. *Ариимович Л. А.* Физика атомного ядра в СССР, к двадцатой годовщине Октября.— ЖЭТФ, 1937, т. 7, вып. 11, стр. 1194.
52. *Джелепов Б. С., Зырянова Л. Н.* Влияние электрического поля атома на бета-распад. М., Изд-во АН СССР, 1956.
53. Труды Международной конференции по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях (февраль, 1967 г., Дубна). М., 1967.