

на фоне  $2,4 \cdot 10^{11}$  других отрицательно заряженных частиц [15], а выход антинейтронов был на 5 порядков ниже выхода антипротонов. С ростом энергии пучка протонов отношение выходов  $\bar{d}/\bar{p}$  увеличивается, но довольно медленно. Так, при  $E_p = 300$  ГэВ это отношение составляет  $\sim 10^{-4}$  [16]. Антиядра лития до сих пор еще не были получены в лабораториях.

Энергетические ресурсы человечества растут и приближаются к неограниченным возможностям с освоением термоядерного синтеза легких ядер. Для некоторых специфических условий, например в космическом полете, могло бы оказаться решающее необходимым компактное аннигиляционное топливо. Затратить несколько мегаватт-лет наземных источников для получения киловатт-часа от такого топлива человечество, может быть, и нашло бы допустимым. Но неизвестно пока, как это делать. К сожалению, яснее видны трудности, чем реальные пути технического освоения аннигиляции как топливного процесса.

УДК 539.12:539.14:539.1.07:537.532.4

## Тридцать лет работы первой ядерной лаборатории Дубны

ДЖЕЛЕПОВ В. П., ЛАПИДУС Л. И.

История развития ядерной физики в Советском Союзе в послевоенный период богата многими замечательными событиями. Одно из таких событий — ввод в действие 14 декабря 1949 г. в небольшом подмосковном поселке Ново-Иваньково (ныне г. Дубна), расположенном на берегу Волги, первого в Советском Союзе мощного ускорителя частиц — пятиметрового синхроциклотрона. Это произошло в организованном здесь в 1948 г. филиале Института атомной энергии (ИАЭ). Комплексный запуск этого самого крупного в то время в мире ускорителя и получение на нем сначала дейтронов и  $\alpha$ -частиц с энергиями соответственно 280 и 560 МэВ, а вскоре протонов с энергией 480 МэВ ознаменовали собой рождение в нашей стране новой области ядерной физики — физики частиц высоких энергий. В 1953 г. была проведена реконструкция синхроциклотрона: увеличены диаметр полюсов магнита до 6 м и энергия протонов до 680 МэВ [1].

Инициатором сооружения этого уникального по тому времени ускорителя был Игорь Ва-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proc. Symp. on Nucleon-Antinucleon Annihilation. Chexbres 27—29 March, 1972, Soc. Rept. CERN, v. 10, I—VI, p. 1.
2. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М., «Наука», 1975.
3. Барашенков В. С. Сечения взаимодействия элементарных частиц. М., «Наука», 1966.
4. Desai V. «Phys. Rev.», 1960, v. 119, p. 1385.
5. Власов Н. А. Антивещество. М., Атомиздат, 1966.
6. Hawking S. «Nature», 1974, v. 248, p. 30; «Comment. Math. Phys.», 1975, v. 44, p. 199.
7. Фролов В. П. «Успехи физ. наук», 1976, т. 118, с. 473.
8. Будкер Г. И. «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 3, с. 163.
9. Ауслендер В. Л. и др. Там же, с. 173.
10. Таюрский В. А. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 1, с. 70.
11. Мурзин В. С., Сарычева Л. И. Множественные процессы при высоких энергиях. М., Атомиздат, 1974.
12. Bertran W. e.a. «Phys. Lett.», 1966, v. 21, p. 471.
13. Фомин П. И. «Докл. АН УССР. Сер. А», 1975, № 9, с. 831.
14. Будкер Г. И. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 1, с. 49.
15. Антипов Ю. М. и др. СЭФ 70-16, ИФВЭ, 1970.
16. Appel I. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1977, v. 32, p. 429.

сильевич Курчатов. Обладая исключительно широким научным кругозором выдающегося ученого и видного государственного деятеля, Игорь Васильевич наряду с решением важнейших для страны и грандиозных по масштабам задач создания атомного щита нашей Родины и практического применения атомной энергии проявлял огромную заботу о развитии ядерной физики и создании необходимой базы для перспективных фундаментальных исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц.

Роль И. В. Курчатова в решении принципиальных вопросов как на стадии сооружения ускорителя, так и в организации физических исследований неопределимо велика. Как известно, по его инициативе был организован в 1956 г. в Дубне крупный международный ядерный центр социалистических стран — Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). Образованная на основе Института ядерных проблем АН СССР Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП) с действующим 680-МэВ синхро-



циклотроном стала первой базой для исследований по современной физике интернациональным коллективом ученых стран — участниц ОИЯИ.

В результате усовершенствований, проведенных в основном после создания ОИЯИ, синхротриклотрон Лаборатории и до настоящего времени остается лучшим по интенсивности ускоренных частиц и надежности работы ускорителя этого типа в мире. Если в 1956 г. ток ускоренных протонов составлял 0,25 мкА, то теперь он достигает 3,5 мкА ( $2,2 \cdot 10^{13}$  прот./с). Высокая надежность синхротриклотрона обеспечивает проведение физических исследований в течение 155—160 ч в неделю. На ускорителе имеется большое число различных пучков протонов, нейтронов, пионов и  $\mu$ -мезонов.

В настоящее время подготавливается реконструкция синхротриклотрона Лаборатории в сильноточный фазотрон. В результате осуществления этой реконструкции и создания более эффективной системы вывода частиц интенсивность пучков возрастет в 50—100 раз.

Логическим продолжением исследований на синхротриклотроне для многих сотрудников Лаборатории стала постановка экспериментов на 10-ГэВ синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) ОИЯИ, на 76-ГэВ ускорителе Института физики высоких энергий (ИФВЭ), на 6-ГэВ ускорителе Ереванского физического института (ЕФИ). Исследования на пучках частиц от синхротриклотрона остаются при этом основными для коллектива Лаборатории.

В последние годы стало ясно, что протонные ускорители с энергией частиц  $\sim 1$  ГэВ при высокой интенсивности пучков могут быть использованы для выполнения разнообразных прикладных задач. Наибольшую известность приобрели работы в области протонной и пионной терапии рака, медико-биологические исследования, связанные с обеспечением радиационной безопасности полетов человека в космос, исследования по радиационной стойкости материалов и электронной аппаратуры, производство значительного количества радиоактивных изотопов, необходимых для медицины, а также для различных областей науки и техники.

Нам приятно в номере журнала, посвященном 75-летию со дня рождения Игоря Васильевича Курчатова, рассказать о важнейших результатах научных исследований, выполненных почти за 30 лет работы 680-МэВ синхротриклотрона учеными нашей страны и других социалистических стран — участниц Объединенного института ядерных исследований.

## Упругое рассеяние нуклонов нуклонами

Это направление исследований является традиционным для Лаборатории, сотрудниками которой сделан один из наиболее известных и получивших мировое признание научный вклад.

Полученные в Дубне первые данные об упругом рассеянии нейтронов высоких энергий протонами [2] оказались в свое время совершенно неожиданными и обратили на себя всеобщее внимание физиков. Рассеяние нейтронов протонами было изучено в интервале 200—590 МэВ. Наиболее полно на синхротриклотроне исследовалось рассеяние протонов протонами в области энергий частиц от 460 до 670 МэВ [3]. Цель всего комплекса экспериментов по нуклон-нуклонному рассеянию состояла в определении амплитуды рассеяния и ее отдельных компонент. Для этого были не только измерены с высокой точностью сечения упругого и неупругого взаимодействия неполяризованных частиц, но и детально изучены поляризационные характеристики рассеяния [4]. Результаты поляризационных экспериментов весьма информативны. В то же время сами опыты принадлежат к числу трудных, так как необходимо наблюдать акты двойного и тройного рассеяния частиц. Для преодоления этих трудностей в Лаборатории были разработаны специальные методы. Среди них особенно широкое распространение в мире нашел оригинальный метод получения сверхнизких температур, основанный на растворении жидкого  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  [5]. Это позволило создать высокоэффективные поляризованные протонные мишени и выполнить ранее недоступные по точности опыты. Важная роль в выработке программы исследований нуклон-нуклонных рассеяний принадлежит теоретикам [6]. Другой подход к изучению спиновой зависимости ядерных сил — исследование столкновений нуклонов с ядрами дейтрона, где нуклоны находятся как бы в поляризованной мишени [7].

В результате широкой программы опытов, выполненных в Лаборатории, удалось провести детальный феноменологический анализ нуклон-нуклонных взаимодействий, однозначно определить амплитуду протон-протонного рассеяния и восстановить важнейшие характеристики взаимодействия нейтронов с протонами в изученной области энергий.

Большое значение имеет экспериментальная проверка общих принципов симметрии, лежащих в основе сильного взаимодействия частиц.



При исследовании упругого рассеяния нуклонов нуклонами был экспериментально проверен один из таких принципов — зарядовая симметрия ядерных сил. Для этого в Лаборатории были проведены уникальные эксперименты по изучению рассеяния нейтронов высоких энергий нейтронами [8], в которых удалось показать также справедливость другого фундаментального свойства нуклон-нуклонных взаимодействий — их обратимость во времени. Это было доказано с наиболее высокой на настоящее время точностью [9]. Знание амплитуд и фаз нуклон-нуклонного [10] и пион-нуклонного [11] рассеяния позволило независимыми путями определить константу пион-нуклонного взаимодействия, характеризующую мезонный заряд нуклона.

### Мезообразование в соударениях нуклонов с нуклонами и пион-нуклонное взаимодействие

Изучение процессов, приводящих к образованию пионов при столкновении протонов, нейтронов и пионов с протонами и атомными ядрами, составляет второе крупное и также традиционное направление исследований в Лаборатории. Характеризуя кратко только главные и широко известные в научном мире результаты этой большой работы, следует отметить два: наиболее непосредственное и точное доказательство изотопической инвариантности сильных взаимодействий при высоких энергиях [12] и получение подробных и надежных опытных данных о рождении пионов в нуклон-нуклонных соударениях [13], позволившее позднее построить на их основе резонансную модель [14], объяснившую основные закономерности рождения мезонов в доимпидиардной области энергий.

В Лаборатории проведен анализ энергетических спектров заряженных и нейтральных  $\pi$ -мезонов, образованных в нуклон-ядерных соударениях при 660 МэВ. Была обнаружена зависимость спектров  $\pi$ -мезонов от размеров облучаемых ядер, наблюдался эффект интенсивной перезарядки  $\pi$ -мезонов в ядре [15].

Изучение взаимодействия двух нестабильных частиц, которыми являются кванты сильного взаимодействия — пионы, представляет собой исключительно актуальную и сложную задачу. С этой целью в Лаборатории фотоэмюльсионным методом исследованы процессы образования пионов пионами вблизи энергетического порога их рождения. В результате были опре-

делены длины пион-пионного взаимодействия [16].

В Лаборатории систематически изучалось пион-протонное взаимодействие в области энергий частиц вплоть до 370 МэВ. Были определены полные и дифференциальные сечения различных процессов рассеяния и перезарядки пионов, а также поляризация в пион-протонном рассеянии [17].

В результате удалось экспериментально проверить справедливость дисперсионных соотношений, строго обоснованных Н. Н. Боголюбовым. Фундаментальное значение прямой проверки наиболее глубоких представлений физики микромира определяется тем, что дисперсионные соотношения базируются на таких основных принципах теории поля, как унитарность и микропричинность.

### Структура элементарных частиц

На различных ускорителях мира при исследовании рассеяния электронов высоких энергий были получены данные о распределении плотности заряда и магнетизма в атомных ядрах. Следующим важным шагом стало изучение структуры элементарных частиц.

В определенной области переданного импульса структура пионов, нуклонов и пион-нуклонного резонанса  $\Delta(1236)$  может быть исследована только в процессе, обратном электророждению пиона  $\pi^- + p \rightarrow e^+ + e^- + n$ , и недоступна при исследовании в других процессах. С помощью специально созданной сложной и очень эффективной электронной установки в Лаборатории получены отсутствовавшие ранее экспериментальные данные о форм-факторах нуклона и пиона в области малых значений времени подобной передачи импульса [18].

Несколько лет назад выяснилось, что электрический радиус протона определен недостаточно надежно, так как отсутствовали данные непосредственно в области малых значений переданного импульса в процессе упругого  $e - p$ -рассеяния. Оригинальное исследование, в котором полупроводниковые детекторы регистрировали частицы отдачи малых энергий, проведено совместно физиками Дубны, Еревана и Бухареста [19] на ускорителе ЕФИ. В результате удалось определить зарядовый радиус протона непосредственно по экспериментальным данным о  $e - p$ -рассеянии на предельно малые углы без предположений о зависимости форм-фактора протона в области больших значений переданного импульса. Аналогичные иссле-



дования рассеяния электронов высоких энергий дейтронами позволили непосредственно определить электрический радиус дейтрона.

### Слабые взаимодействия

Ряд выдающихся научных результатов получен в Лаборатории при изучении слабых взаимодействий. Прежде всего это открытие  $\beta$ -распада  $\pi$ -мезонов, сделанное с помощью исключительно тонкой методики [20]. Этими экспериментами был доказан фундаментальный закон теории слабого взаимодействия — закон сохранения векторного тока, предсказанный советскими теоретиками С. С. Герштейном и Я. Б. Зельдовичем [21].

Большим научным событием явилось обоснование Б. М. Понтекорво и М. А. Марковым возможности существования нового типа нейтрино — мюонного, а также предложение Б. М. Понтекорво эксперимента по его обнаружению на ускорителях высоких энергий [22]. Соответствующие опыты, выполненные в США, позволили открыть это мюонное нейтрино.

В опытах по захвату отрицательных мюонов в  ${}^3\text{He}$ , проведенных в Лаборатории [23], впервые наблюдалась отдача от мюонного нейтрино. Опыты позволили оценить верхний предел массы мюонного нейтрино. Результаты эксперимента доказали принципиально важный факт тождественности свойств мюона и электрона в слабом взаимодействии.

Большой интерес для физики слабого взаимодействия представляет точное количественное изучение процесса ядерного захвата отрицательных мюонов протонами ( $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ ). В Лаборатории с применением электронной методики и газовой водородной мишени был выполнен трудный эксперимент, в котором с хорошей точностью определена основная характеристика процесса — его вероятность. Результаты опыта доказывают справедливость теории универсального слабого взаимодействия Ферми и позволяют получить ценные сведения о константах этого взаимодействия [24]. Для проверки справедливости теории универсального слабого взаимодействия группой ученых ИАЭ и Лаборатории на синхротроне выполнены прецизионные эксперименты по определению коэффициента асимметрии в угловом распределении позитронов, испускаемых в  $\mu$ -распаде ( $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ). Найденное значение этого коэффициента ( $0,326 \pm 0,005$  [25]) является наиболее точным и одним из самых

сильных аргументов в пользу теории продольного нейтрино.

Существование или отсутствие некоторых процессов распада частиц представляет собой важный источник сведений о коренных законах симметрии слабых взаимодействий. Анализ причин отсутствия распадов  $\mu \rightarrow e + \gamma$  и  $\mu \rightarrow 3e$  привел к мысли о возможности существования двух типов нейтрино — электронного и мюонного. После того как стало ясно, что поиск распадов мюона на электрон и  $\gamma$ -квант и на три электрона представляет собой путь для непосредственной проверки закона сохранения лептонов, в Лаборатории были проведены их наиболее тщательные поиски. При этом для граничного значения вероятности процесса  $\mu \rightarrow 3e$  в Дубне [26] получено значение на уровне  $R < 2 \cdot 10^{-9}$ , которое в несколько десятков раз меньше, чем достигнутое ранее в других лабораториях.

В этом же цикле экспериментов впервые определена верхняя граница вероятности таких процессов, как  $\pi \rightarrow 3e\nu$ , которая позволила сильно ограничить возможность существования многофермионных слабых взаимодействий и получить оценки слабозлектромагнитных форм-факторов пиона [27]. Как лучшие эти результаты занесены в международные таблицы данных о свойствах элементарных частиц.

В последнее время во всем мире сильно возрос интерес к поиску распадов  $\mu \rightarrow e\gamma$ ,  $\mu \rightarrow 3e$ . Теоретически оказалось возможным ожидать существование этих распадов за счет взаимодействия с тяжелыми лептонами в промежуточном состоянии [28]. Весьма чувствительным методом для поиска нарушения мюонного заряда может явиться наблюдение так называемых осцилляций нейтрино ( $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ ;  $\bar{\nu}_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_\mu$ ), возможность существования которых предсказана теоретически [29].

Недавно в совокупность данных о свойствах  $\mu$ -мезона в результате оригинального эксперимента, выполненного в Лаборатории, были добавлены новые рекордные по точности данные о времени его жизни [30]. Наиболее точные данные о времени жизни мюона позволяют определить значение константы слабого взаимодействия и подойти к экспериментальному исследованию радиационных поправок в процессах слабого взаимодействия. Важность подобных исследований, как показала новейшая история современной физики (обнаружение лембовского сдвига уровней атома водорода и дейтерия, определение аномального магнитного момента электрона и  $\mu$ -мезона), трудно



переоценить. Особый интерес к процессу распада мюона издавна связан с тем, что в течение многих лет он был единственным доступным для экспериментального исследования процессом слабого взаимодействия, происходящим только между лептонами — частицами, которые непосредственно не участвуют в сильных взаимодействиях.

Первым нейтринным экспериментом, выполненным на ускорителях, был опыт [31] сотрудников нашей Лаборатории в 1961 г. на 10-ГэВ ускорителе ЛВЭ ОИЯИ. Эксперименты в Дубне проведены в связи с поднятым Л. Б. Окунем и И. Ю. Кобзаревым вопросом о возможности аномально большого при высоких энергиях взаимодействия нейтрино с веществом. В результате опытов при достижении уровня сечения взаимодействия  $10^{-32}$  см<sup>2</sup> эта интересная теоретическая возможность была исключена.

Очень богатой неожиданностями оказалась физика нейтральных  $K$ -мезонов. Исследования распадов  $K$ -мезонов проводились в ОИЯИ совместными усилиями ЛЯП, ЛВЭ и группы физиков Грузии. Широкий цикл исследований [32] охватил все основные проблемы физики нейтральных  $K$ -мезонов. В результате работ, проведенных с помощью камер Вильсона, были определены варианты слабого взаимодействия, приводящего к полулептонному  $K$ -распаду, и степень запрета слабых взаимодействий с участием нейтральных токов для переходов с изменением странности.

### Неупругие взаимодействия при энергии 5 ГэВ

В конце 50-х гг. в Лаборатории была сооружена крупная комплексная установка с метровой пропан-фреоновой пузырьковой камерой в магнитном поле 17 000 Гс [33]. На этой установке, обладающей высокой эффективностью регистрации  $\gamma$ -квантов и размещенной в пучке  $\pi^-$ -мезонов с энергией 5 ГэВ синхрофазотрона ОИЯИ, учеными Лаборатории совместно с физиками ядерных институтов Чехословакии, Армении, Белоруссии и Грузии был выполнен цикл исследований по проблеме рождения обычных и странных частиц. Получено большое число новых результатов, относящихся к малоисследованному и труднодоступному для изучения процессам множественного образования частиц, в особенности нейтральных ( $\gamma$ ,  $\pi^0$ ,  $K^0$ ,  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^0$ ) [34]. Исследовались также масштабно-инвариантные свойства пион-адронного взаимодействия. При этом выяснилось, что уже при энергии 5 ГэВ наблюдаются закономерности, подобные полу-

ченным в экспериментах при существенно более высоких энергиях (40—1500 ГэВ) [35]. Был обнаружен процесс дифракционной диссоциации пионов на ядрах углерода вблизи порога этого процесса и установлено, что он происходит преимущественно через образование  $A_1^-$ -мезона, распадающегося по цепочке  $A_1^- \rightarrow \pi^- \mp \rho^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$  [36].

### Физика мезоатомов изотопов водорода

Известно, что непосредственно ядерному захвату мюона предшествует стадия, когда мюон вместе с одним из атомов окружающей его среды образует новую систему —  $\mu$ -мезоатом. Время жизни такой системы для атома водорода достаточно велико, и в этот период с его участием и в нем самом могут происходить различные физические процессы. Наиболее детально в Лаборатории изучались  $\mu$ -мезоатомы изотопов водорода. Это связано с тем, что для получения надежных данных о ядерном захвате мюона протоном весьма важно иметь количественную информацию о процессах, протекающих на мезоатомной стадии. Необходимо выяснить, из каких состояний мезоатома или мезомолекул водорода происходит ядерный захват мюона, определить скорости образования мезомолекул для различных изотопов водорода, измерить сечения упругого рассеяния мезоатомов водорода и дейтерия протонами и дейтронами, исследовать скорости перехвата мюонов от протонов дейтронами и сложными ядрами, определить скорости реакций синтеза, катализируемых мюонами и т. д. Весь этот большой комплекс явлений был детально изучен в обширной серии экспериментов, выполненных с использованием камерной и электронной методик [37]. Основой для постановки опытов явились теоретические работы С. С. Герштейна и Я. Б. Зельдовича [38]. Многие экспериментальные результаты представляют большой самостоятельный интерес: например, обнаружение резонансного по энергии  $\mu$ -атома дейтерия механизма образования мезомолекул дейтерия или определение скоростей ядерных реакций синтеза в  $\mu$ -мезомолекулах  $p\mu d$  и  $d\mu d$  и др. Новые опытные данные стимулировали дальнейшее теоретическое изучение проблемы [39].

### Структура ядер. Механизм ядерных реакций

Изучение в экспериментах на синхроциклотроне взаимодействия пионов с ядрами привело к обнаружению ранее неизвестного процесса



двойной перезарядки пионов на ядрах [40]. Этот результат признан как открытие Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. Выполнено всестороннее исследование найденного явления. С ним в настоящее время связываются планы поисков необычных ядер. Экспериментальные и теоретические исследования процессов двойной перезарядки пионов проводятся теперь во многих ядерных центрах мира.

Ярким результатом исследований ядерного захвата пионов и мюонов явилось обнаружение наиболее тяжелого из всех известных изотопов гелия — ядра  $^8\text{He}$  и определение его характеристик [41], что также зарегистрировано как открытие.

В деятельности Лаборатории важное место занимает изучение проблемы внутриядерных ассоциаций нуклонов — так называемой кластерной структуры ядер. В ранних работах впервые наблюдалось квазиупругое рассеяние протонов с энергией  $\sim 660$  МэВ двухнуклонными ассоциациями в легких ядрах: выбивание из ядер дейтронов с энергиями в несколько сот МэВ [42]. Интерпретация этого явления была дана Д. И. Блохинцевым на основе объемных флюктуаций ядерного вещества [42]. В других экспериментах при магнитном анализе спектров вторичных протонов были получены количественные данные об импульсных распределениях нуклонов внутри ядер бериллия и углерода [43]. Детальное изучение упругого рассеяния на малые углы протонов на ядрах углерода позволило определить зависящую от спина амплитуду рассеяния и привело к заключению, что с ростом энергии протонов относительная интенсивность ядерного спин-орбитального взаимодействия убывает [44].

Впоследствии были обнаружены и изучены значительно более редкие процессы квазиупругого рассеяния протонов трех- и четырехчастичными ассоциациями в ядрах (выбивание ядер  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  с импульсами 1800—1900 МэВ/с), значительно повышена точность данных, расширена область импульсов вылетающих частиц. В результате тщательных исследований экспериментально определены вероятности ассоциирования нуклонов в легких ядрах и энергетическая зависимость сечения квазиупругого рассеяния протонов на двухнуклонных ассоциациях. Впервые выявлены процессы мезонообразования на двухнуклонных ассоциациях в легких ядрах [45]. Кластерная структура ядер проявилась и в опытах Лаборатории, где исследовалось испускание ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{H}$  сравни-

тельно больших энергий при захвате различными ядрами отрицательных пионов и мюонов. Новые исследования проводятся в этом направлении физиками Венгрии и ГДР.

Ценным вкладом в исследование механизма ядерных реакций при высоких энергиях являются новые эксперименты с поляризованным пучком протонов, результаты которых наиболее чувствительны к механизму взаимодействия [46].

В работе совместной группы физиков Лаборатории и Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) был экспериментально обнаружен новый тип возбуждения ядерных уровней — так называемые безрадиационные переходы в мезоатомах тяжелых элементов [47]. Суть этого явления, зарегистрированного в качестве открытия, состоит в том, что при переходах между уровнями в  $\mu$ -мезоатомах этих элементов вместо испускания фотона происходит возбуждение ядра, которое затем снимается либо путем испускания нейтронов, либо в результате деления. Существование этого эффекта создало уникальную возможность для изучения изомеров формы возбужденных ядер, возникающих в результате электромагнитного взаимодействия мюона на орбите с ядром [48].

При изучении захвата пионов ядрами в 1975 г. было обнаружено новое явление — возбуждение с большой вероятностью ядерных уровней с высокими значениями спинов [49]. При этом  $\pi^-$ -мезон захватывается  $n-p$ -парой, выделяется энергия, близкая к энергии покоя пиона, и оставшееся ядро получает момент вращения.

Сотрудники Лаборатории обнаружили явление резонансного возбуждения ядер в реакции поглощения  $\mu$ -мезонов (зарегистрировано как открытие), проявляющееся в том, что энергетический спектр испускаемых при этом нейтронов имеет линейчатую структуру [50]. Это открывает новые возможности для исследования квазистационарных состояний и механизма ядерных реакций при высоких энергиях.

С помощью оригинальной установки со стримерной камерой высокого давления группой физиков Лаборатории с участием физиков Румынии и Италии проведена широкая программа исследований взаимодействия пионов с ядрами  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  в области резонанса  $\Delta$  (1236). Результаты экспериментов с ядрами  $^3\text{He}$  уникальны и представляют особый интерес в связи с развитием теоретических представлений о взаимодействии малонуклонных систем [51]. Исследования взаимодействия пионов



обоих знаков с ядрами  ${}^4\text{He}$  позволили определить электромагнитный радиус  $\pi$ -мезона.

### Ядерная спектроскопия и радиохимия

В первые годы после запуска синхротрона ЛЯП коллективами ряда советских институтов были начаты исследования реакций на сложных ядрах под действием частиц с энергией в несколько сот МэВ. В 1955 г. было показано [52], что в реакциях глубокого расщепления могут образовываться сильно удаленные от полосы  $\beta$ -стабильности нейтронодефицитные изотопы, получение которых другими методами либо сильно затруднено, либо вообще невозможно. Число образующихся ядер таких изотопов достаточно для исследований их изучения с помощью прецизионных спектрометрических приборов.

Интенсивное развитие ядерно-спектрометрических исследований изотопов, получаемых при облучении мишеней на синхротроне Лаборатории, началось в 1956 г. Успеху этих работ в большой мере способствовали повышение почти на порядок в 1957—1962 гг. интенсивности пучка протонов синхротрона и разработка методов быстрого радиохимического выделения радиоактивных веществ в количестве  $10^{-10}$  г без носителя и без существенных потерь из мишеней в несколько граммов, а также создание способов получения высоких полных и удельных активностей изготовленных источников [53]. Решение задачи сильно осложнялось тем, что исходные мишени обычно имели высокую активность (5—10 г экв. Ra).

Для исследований спектров ядерных излучений в Лаборатории создана современная аппаратура [52, 54] — магнитные спектрометры  $\beta$ - и  $\alpha$ -излучения: бета-спектрометр с двойной двукратной фокусировкой пучка, бета-спектрограф с постоянным магнитным полем, большой магнитный альфа-спектрограф с двойной фокусировкой. Разработаны отвечающие лучшим мировым стандартам полупроводниковые детекторы  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений. Действует высокоэффективный бета-спектрометр типа «Апельсин». Разработана совершенная электронная аппаратура и развиты методы для анализа слабых спектров с использованием ЭМ. На построенных в Лаборатории электромагнитных масс-сепараторах впервые в СССР начато систематическое разделение радиоактивных изотопов [54]. Создан и успешно работает оригинальный и высокоэффективный источник ионов для масс-спектрометров [56]. В 1966—1970 гг. создан

комплекс аппаратуры для исследований короткоживущих ( $T_{1/2} \approx 1$  мин), удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности изотопов — установка ЯСНАПП [54, 57].

Среди наиболее важных физических результатов, полученных в области ядерно-спектрометрических исследований, следует отметить:

обнаружение свыше ста новых радиоактивных изотопов и исследование их свойств [52, 54];

измерение параметров деформации ядер ряда редкоземельных элементов ( $150 < A < 190$ ). При исследовании распада деформированных ядер с нечетным массовым числом идентифицированы уровни одночастичной, многочастичной и коллективной природы. Полученные данные хорошо подтвердили выводы обобщенной модели Бора — Моттельсона и сверхтекучей модели В. Г. Соловьева и явились основой для их дальнейшего развития [57];

обнаружение и подробное исследование тонкой структуры  $\alpha$ -спектров в области редкоземельных элементов [52].

### Мезохимические исследования

Получение на ускорителях интенсивных пучков пионов и мюонов предопределило возникновение ряда новых областей исследования, основанных на использовании свойств таких экзотических объектов, как мезоатомы и мезомолекулы и мюоний. Эксперименты с мезоатомами и мезомолекулами позволили развить новые направления исследований электронной структуры вещества, кинетики и механизма химических реакций и атомных процессов. Началом этого направления, названного позже мезохимическим, явились выполненные в Лаборатории работы с  $\pi^-$ - и  $\mu^-$ -мезонами. В них впервые было надежно установлено, что процесс перехода стрипательно заряженных мезонов в связанное состояние чувствителен к электронной структуре вещества, в котором происходит остановка мезона. В опытах с  $\mu^-$ -мезонами обнаружены периодическая зависимость атомного захвата в счислениях и изменение структуры мезорентгеновских серий элементов от их химического окружения. Структура мезорентгеновских спектров оказалась также чувствительной к процессу мезоатомной перезарядки  $\mu^-$ -мезона, являющемуся аналогом атомной перезарядки [58, 59]. В результате этих работ было оформлено авторское свидетельство на новый способ определения свойств вещества. Сравнительно высокая энергия мезорентгенов-



ского излучения элементов и, следовательно, их большая проникающая способность дают возможность изучать физико-химические свойства толстых образцов, любых участков больших объектов без их разрушения, в том числе исследовать состав отдельных органов живого организма. Последнее нашло свое практическое осуществление в опытах, выполненных в Лаборатории совместно со специалистами Института медико-биологических проблем АМН СССР.

Еще ббльшие по масштабу эффекты влияния химического состояния элементов проявляются при захвате медленных отрицательных пионов связанным водородом, обнаруженном на синхротроне ЛЯП [60]. Интерпретация этого явления потребовала введения в научный обиход совершенно новых объектов — больших мезомолекул, образующихся на начальной стадии перехода мезона в связанное состояние [61]. Дальнейшие работы в этом направлении дали первые в мезохимии количественные соотношения между величинами, характеризующими захват пионов связанным водородом, и физико-химическими характеристиками вещества. В газовых смесях водорода с другими газами в Лаборатории был исследован эффект перехвата  $\pi^-$ -мезонов [62].

Значительные успехи достигнуты в области изучения кинетики химических реакций. Метод исследования основан на использовании процессов деполяризации мезонов в мюонии и  $\mu$ -мезоатомах. Дело в том, что мюоний —  $\mu^+e^-$  система — является аналогом атомарного водорода. Изучая поведение мюония, можно получить уникальную информацию о химических процессах с участием атомарного водорода [63].

В результате химических реакций мезоатомов [64] появились широкие возможности изучения химических процессов с участием элементов в атомарном состоянии.

Тщательный анализ спектров электронного рентгеновского излучения привел к обнаружению [65] смещения энергетических уровней электронов при захвате  $\mu$ -мезонов.

В исследованиях с  $\mu^+$ -мезонами физиками ИАЭ и Дубны было открыто и объяснено явление двухчастотной прецессии мюония и обнаружена подбарьерная диффузия мюона в кристаллической решетке.

### Высокие энергии

С вводом ускорителя ИФВЭ ученые социалистических стран получили новые возможности для исследований с частицами ранее недоступных энергий.

Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ выбрала в качестве основного направления своих исследований ряд принципиально важных научных задач, в решении которых именно экспериментирование с частицами высших энергий является решающим.

**Монополю Дирака.** В течение ряда лет крупными теоретиками мира (П. Дирак, Ю. Швингер) обсуждается вопрос о возможности существования всеобразных источников магнитного поля — магнитных монополей. На различных ускорителях мира в разное время было поставлено много экспериментов по поиску монополей. В отличие от ранних экспериментов физики ЛЯП использовали новый оригинальный метод. Он основан на указанном И. М. Франксом отличии поляризации черенковского излучения монополей от поляризации черенковского излучения других частиц. Этот метод существенно меньше, чем другие, зависит от детальных предположений о поведении монополей в веществе. Опыты показали, что монополи не образуются 70-ГэВ протонами с сечениями блее  $10^{-40}$  см<sup>2</sup> [66].

**Антиядра,** предсказываемые современной теорией, до недавнего времени были представлены только антивейтроном. На 76-ГэВ ускорителе физиками ИФВЭ было открыто ядро <sup>3</sup>He. Трудным шагом в этом принципиально важном направлении явилось открытие ядра антитрития в прецизионном и сложном эксперименте по поиску антиядер и новых тяжелых частиц, проведенном совместно группой ученых ЛЯП ОИЯИ и ИФВЭ [67].

**Поляризационные явления** при взаимодействии частиц высоких энергий дают непосредственную экспериментальную информацию о спиновой зависимости взаимодействия и поэтому представляют особый интерес при количественном исследовании сильных взаимодействий. Физики Лаборатории совместно с физиками ИФВЭ, Сакле (Франция) и ИТЭФ исследовали поляризационные эффекты в упругом рассеянии пионов, K-мезонов, протонов и антипротонов протонами при максимальной энергии 40—45 ГэВ. Было доказано, что спиновые эффекты не исчезают и при столь высоких энергиях [68].

Большие перспективы для исследований неупругих взаимодействий при энергиях в десятки ГэВ открылись перед Лабораторией и сотрудничающими институтами стран — участниц ОИЯИ благодаря созданию и вводу в действие в 1974 г. пятиметрового магнитного искрового спектрометра с объемом магнитного поля 11 м<sup>3</sup>. Программа первых исследований, про-



водящихся совместно с физиками ЦЕРНа, предполагает изучение дифракционной диссоциации частиц на ряде атомных ядер и процессов множественного рождения частиц при энергиях пионов и  $K$ -мезонов до 40 ГэВ. В настоящее время в Лаборатории создаются четыре новые экспериментальные установки для актуальных исследований на ускорителе ИФВЭ.

### Теоретические работы

Особенностью теоретических работ является тесная связь их тематики с экспериментальными исследованиями на мощных ускорителях частиц. Было введено и теоретически развито понятие «полного опыта», необходимого для однозначного восстановления амплитуд взаимодействия между сильновзаимодействующими частицами [6, 69]. Указаны возможности в эксперименте с поляризованными частицами проверки справедливости  $P$ -,  $T$ - и  $C$ -инвариантности сильных взаимодействий при высоких энергиях [70]. Предложена и осуществлена в Лаборатории наиболее тщательная проверка изотопической инвариантности сильных взаимодействий [71].

В связи с обширной программой экспериментов по исследованию взаимодействия частиц высоких энергий с атомными ядрами был развит метод [72], обобщающий известные результаты Глаубера. Изучены сечения взаимодействия и поляризационные явления в ряде процессов при высоких энергиях [73]. Предсказан процесс двойной перезарядки  $K$ -мезонов [74]. Развита основанная на дисперсионных соотношениях теория рассеяния  $\gamma$ -квантов нуклонами в широкой области энергий. Установлена зависимость знака амплитуды распада нейтрального пиона на два  $\gamma$ -кванта от модели взаимодействия. Получены правила сумм для магнитного и электрического дипольного момента нуклона. Впервые дана теоретическая оценка магнитной поляризуемости протона [75].

Проанализированы данные об упругом и неупругом  $e - p$ - и  $\mu - p$ -взаимодействиях. Получены точные данные о форм-факторах нуклонов. Указано на необходимость проведения новых опытов, которые должны привести к значительному уточнению сведений о мюон-электронной универсальности на малых расстояниях, о справедливости скейлинга для структурных функций протона [76]. Обращено внимание на существование интересных эффектов при интерференции сильных и электромаг-

нитных взаимодействий в поляризационных эффектах для малых передач импульсов. Эта интерференция приводит к значительным эффектам в упругом рассеянии мезонов и нуклонов протонами и атомными ядрами, а также в процессах дифракционной диссоциации частиц. Показано, что экспериментальное исследование поляризационных эффектов в области малых передач импульса позволит непосредственно изучить спиновую зависимость амплитуд сильных взаимодействий при высоких энергиях; они существенны для анализа прецизионных поляризационных экспериментов в области энергий частиц до 1 ГэВ [77].

В последние годы разработана [78] теоретическая схема сильных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, приводящая к растущим с энергией полным сечениям взаимодействия.

### Электронная аппаратура для физических исследований

Большинство современных физических экспериментов на ускорителях ядерных частиц выполняется с помощью электроники. Созданию наиболее совершенной электронной аппаратуры в Лаборатории постоянно уделяется большое внимание, поскольку характеристики этой аппаратуры во многом определяют научный уровень эксперимента.

Для регистрации импульсов от сцинтилляционных детекторов и выделения исследуемых событий широко применяется разработанная в Лаборатории система логических блоков наносекундного диапазона. В состав системы входят блоки 50 наименований [79]. Быстродействие блоков достигает 100 МГц, а разрешение схем совпадений — 1 нс. С помощью этих блоков можно создавать логические регистрирующие устройства практически любой сложности, а также временные спектрометрические тракты, работающие от сцинтилляционных детекторов.

Значительные успехи достигнуты в разработках прецизионной спектрометрической аппаратуры для работы с полупроводниковыми детекторами [80]. Зарядочувствительные предусилители позволяют одновременно проводить как амплитудные, так и временные спектрометрические измерения. Некоторые разработки имеют рекордные характеристики. В Лаборатории используются многопроволочные искровые и пропорциональные камеры разных типов. Для них разработаны системы считывания информации и ее передачи в ЭВМ. Широкое



применение в Лаборатории находит международный стандарт КАМАК, в котором изготавливается регистрирующая и управляющая электронная аппаратура, а также аппаратура для связи с ЭВМ и вывода информации. В стандарте КАМАК разработаны блоки более 50 наименований [81]. Системы в стандарте КАМАК успешно используются во многих экспериментах.

В ЛЯП совместно с Лабораторией вычислительной техники и автоматизации была создана и успешно работала при обработке снимков с метровой пропановой камеры ПК-200 полуавтоматическая система обработки данных, которая имела двухстороннюю связь с ЭВМ и обеспечивала одновременную работу нескольких полуавтоматов [82].

Современный физический эксперимент немалым без широкого применения вычислительной техники непосредственно в процессе эксперимента и для обработки результатов. Поэтому неотъемлемой частью общелабораторного оборудования стал центр накопления и обработки информации [83]. В его основу положены малые ЭВМ и промышленные многомерные анализаторы, связанные в единую автоматизированную систему, к которой подключается электронная аппаратура, используемая в различных физических экспериментах. Базовой ЭВМ центра, с которой связаны малые ЭВМ, служит ЕС1040. Разработанная в Лаборатории электронная аппаратура вызывает большой интерес и находит применение во многих институтах СССР и других стран — участниц ОИЯИ.

### Прикладные исследования

Помимо фундаментальных чисто ядерно-физических исследований в Лаборатории успешно проводятся работы, имеющие важное прикладное значение и дающие выход в другие отрасли науки, не связанные, как казалось совсем недавно, с физикой частиц высоких энергий. Работы с мюонами и отрицательными пионами (мезохимия) — только один пример «выхода» физики элементарных частиц в современную химию и физику твердого тела.

Для существенного повышения эффективности лучевого лечения онкологических больных большое значение имеют работы по использованию тяжелых заряженных частиц от синхротрона для медицинских и биологических целей. Протонное облучение отличается от всех применявшихся ранее видов лучевой терапии тем, что позволяет резко сконцентрировать поглощенную энергию излучения в опухоли

и значительно снизить лучевую нагрузку на окружающие опухоль здоровые ткани. С 1967 г. в Лаборатории совместно с Институтом экспериментальной и клинической онкологии АМН СССР пучки протонов высоких энергий применяются в исследованиях и при лечении раковых больных. Для этой цели на синхротроне в 1966 г. создан протонный пучок мощностью дозы  $\sim 200$  рад/мин, а в 1972 — 1974 гг. построена оригинальная широкоугольная фокусирующая мезонная линза и создан интенсивный пучок  $\pi$ -мезонов мощностью дозы  $\sim 5$  рад/мин [84].

Изучалось размножение нейтронов в блоках урана, облучаемых протонами в несколько сот МэВ, что важно для решения вопроса о возможности наработки на сильноточных ускорителях ядерного топлива для реакторов АЭС, судовых установок и т. п. [85].

### Разработка и развитие методов детектирования частиц

Не только уровнем развития ускорителя, но и в большой степени развитием методов детектирования частиц микромира определяются возможности экспериментальных исследований.

Специфическое излучение релятивистских частиц (излучение Вавилова — Черенкова) широко применяется во всех исследовательских центрах мира для детектирования частиц и измерения их энергий. Одно из первых предложений о таком использовании свойств свечения Вавилова — Черенкова сделано в Лаборатории в 1950 г. Были созданы наиболее современные черенковские системы и измерена энергия протонов в пучках синхротрона. Разработана специальная аппаратура и выполнены широкие исследования различных свойств излучения Вавилова — Черенкова [86]. Впервые экспериментально изучены особенности этого излучения при прохождении протонов высоких энергий через кристаллы. Открыто так называемое игольчатое излучение [87], получено экспериментальное подтверждение теории, развитой В. Л. Гинзбургом и Ч. Муикаржем (ЧССР).

В Лаборатории были проведены интересные исследования по созданию жидководородной ультразвуковой пузырьковой камеры [88]. Результаты свидетельствуют о возможности создания нового трекового детектора частиц.

С первых лет развития исследований на современных ускорителях элементарных частиц возникла настоятельная потребность в новом



типе трекового детектора частиц, отличающегося от ранее известных существенно большим временным разрешением. Идея создания управляемого быстродействующего трекового детектора частиц появилась в 1955 г. независимо в Советском Союзе и в Италии. Принцип управляемого импульсного питания газоразрядных детекторов [89], предложенный в Лаборатории для нитяных счетчиков и в Италии для неоновых трубок, положил начало новому направлению в методике детектирования следов частиц.

Высокая точность измерения координат была достигнута исследователями, реализовавшими принцип управляемого импульсного питания для плоских искровых счетчиков. Составленные из таких счетчиков искровые камеры получили самое широкое распространение во всех лабораториях по физике высоких энергий. Большое внимание было уделено изучению и дальнейшему усовершенствованию искровых камер с разрядом вдоль трека, наклонного к направлению электрического поля, и разрядных камер в проекционном режиме регистрации. Достаточно быстрое нарастание электрического поля в камере с металлическими электродами и средним размером зазора 20 мм обеспечивает послужение разряда вдоль трека частиц до больших углов наклона. Созданная в Лаборатории девятиэлектродная камера была первой камерой такого типа, примененной в физическом эксперименте [90]. В 1961 г. было показано, что увеличение зазора между электродами значительно облегчает получение наклонного разряда вдоль трека частиц вплоть до предельных углов  $50^\circ$ . Этот вывод оказал большое влияние на дальнейшее развитие методики искровых камер, положив начало исследованиям широкозазорных трековых камер.

Новый способ создания полностью изотропной разрядной камеры предложен и осуществлен в ЛЯП в 1964 г. [91]. Необходимая локализация разряда была достигнута при этом за счет использования незавершенного разряда при повышенном напряжении, подаваемом на камеру. Потеря в светимости разряда компенсировалась применением электронно-оптического усилителя света. Была также существенно усовершенствована стримерная камера: впервые создана стримерная камера высокого давления [92], показана возможность стримерного режима работы в гелиевой камере. Такое усовершенствование позволило использовать камеру в качестве прибора, соединяющего в себе свойства трекового детектора и газовой мишени.

Эти исследования показали возможность создания водородной стримерной камеры.

В 1964 г. в Лаборатории был предложен метод исследования упругих и неупругих процессов взаимодействия частиц высоких энергий при малых передачах импульса [93]. Отличительной чертой метода является то, что частицы отдачи с очень малыми энергиями детектируются полупроводниковыми детекторами. Этот метод, позволяющий экспериментально исследовать область интерференции сильного и кулоновского взаимодействия адронов, использовался с успехом сотрудниками ЛЯП и ЛВЭ для изучения  $p-p$  рассеяния при 4 ГэВ на ускорителе ЛВЭ ОИЯИ. Позже полупроводниковые детекторы нашли применение в исследованиях физиков ОИЯИ на 70-ГэВ ускорителе ИФВЭ и на 400-ГэВ ускорителе США в Батевии.

Газоразрядные пропорциональные счетчики использовались в первых опытах на ускорителях как быстродействующие детекторы частиц, однако сложные и громоздкие усилители препятствовали значительному увеличению числа каналов в таких установках. Начало возрождения методики систем на нитяных пропорциональных счетчиках связано с предположениями, сделанными независимо в Лаборатории [94] и в ЦЕРНе в 1968 г. Появление проволочных пропорциональных камер многие специалисты рассматривают как революцию в технике детектирования частиц. Преимущества этой методики, сочетающей высокое быстродействие с большой точностью измерения координат треков частиц, настолько значительны, что эти системы используются и создаются во всех лабораториях физики высоких энергий.

#### Научно-исследовательские работы в области новых ускорителей

Важным и успешно развивающимся направлением научной деятельности Лаборатории являются перспективные исследования новых типов сильноточных циклических ускорителей частиц высоких энергий со стационарным магнитным полем [95]. Эти исследования базируются на возможностях, которые открывает использование периодических структур магнитных полей с пространственной вариацией для ускорительной техники. Коллективом отдела новых ускорителей выполнен цикл теоретических работ и созданы исследовательские ускорительные установки для моделирования основных физических процессов в новых ускорителях.



Из действующих исследовательских ускорительных установок следует отметить две наиболее важные. В 1959 г. в Лаборатории запущен первый в мире изохронный циклотрон со спиральной структурой магнитного поля [96]. На нем были проверены основные теоретические результаты линейной и нелинейной теории движения частиц в магнитных полях с крутоспиральной структурой, а также показана возможность ускорения частиц в изохронном режиме в течение нескольких тысяч оборотов. В 1968 г. введен в действие электронный кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой [97], на котором была экспериментально подтверждена обнаруженная в Лаборатории возможность совмещения изохронизма орбит различных энергий и жесткой фокусировки. Теоретические расчеты и экспериментальные исследования на этом электронном циклотроне эффектов пространственного заряда пучка позволили сделать фундаментальный вывод о возможности ускорения в кольцевых циклотронах с жесткой фокусировкой протонов с энергиями до 1 ГэВ при токах вплоть до сотен мА [97].

В отделе новых ускорителей был выполнен большой комплекс теоретических исследований по динамике частиц; разработаны совершенные методы расчета формирования сложных структур магнитного поля в широком диапазоне индукций; разработана и изготовлена серия приборов и устройств с рекордными характеристиками чувствительности и точности для измерения и стабилизации этих полей; созданы новые высокочастотные системы для ускорительных установок; разработаны современные системы управления ускорителями.

В результате теоретических исследований динамики частиц созданы линейная и нелинейная теории движения заряженных частиц в магнитных полях с пространственной вариацией. Показана возможность использования спиральных структур магнитного поля в синхроциклотронах в целях увеличения в десятки раз (примерно до 5 мкА) интенсивности внутреннего пучка. Совместно с проектными организациями разработан и осуществляется проект реконструкции действующего синхроциклотрона Лаборатории в сильноточный фазотрон на энергию 700 МэВ [98]. Применение новых методов дает возможность увеличить интенсивность выведенных пучков протонов и мезонов после реконструкции на 1,5—2 порядка.

Были рассмотрены динамические процессы в изохронном циклотроне с широким диапазоном регулирования энергии для различных

ионов ( $p, d, {}^4\text{He}, {}^3\text{He}$ ) и высоким качеством выведенного пучка. Такой ускоритель создан Лабораторией на базе электромагнита стандартного циклотрона У-120 и передан в Институт ядерной физики Чехословацкой академии наук [99].

В 1971—1972 гг. в Лаборатории теоретически был обнаружен новый эффект, связанный с замкнутыми орбитами в периодических структурах магнитных полей [100]. Оказалось, что коэффициент уплотнения замкнутых орбит в таких полях зависит от изменений вариации магнитного поля вдоль радиуса и может существенно изменяться в узкой зоне радиусов. Это открывает широкие возможности для 100%-ного вывода частиц из ускорителя.

Экспериментальное наблюдение на электронном кольцевом циклотроне эффекта расширения орбит в зоне быстрого изменения вариации магнитного поля показало правильность теоретических выводов [100]. По-видимому, можно считать, что кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой — наиболее адекватный тип ускорителя с мощностью пучка порядка нескольких сот МВт, так как в нем используется стандартное магнитное поле и его КПД приближается к 70—80%. Огромная интенсивность пучков частиц от такого ускорителя («суперциклотрона») не только обеспечит новые возможности решения ранее недоступных проблем фундаментальной физики, но и откроет пути к широкому использованию новейших достижений ядерной физики в выполнении важных задач прикладного характера [101].

### Заключение

За 30 лет работы Лаборатория ядерных проблем выросла в крупный научный институт, в интернациональном коллективе которого трудятся около 900 высококвалифицированных ученых, инженеров и техников, рабочих различных специальностей одиннадцати стран — участниц ОИЯИ.

Научные исследования, выполненные в Лаборатории, внесли большой общепризнанный вклад в один из важнейших разделов современной мировой науки — физику элементарных частиц и атомного ядра и в физику и технику ускорителей.

Ученые и инженерно-технические работники Лаборатории пользуются высоким научным авторитетом и признанием среди специалистов. Многие крупные физики-экспериментаторы и специалисты проведения методических исследова-



дований, воспитанные Лабораторией, возглавляют в настоящее время большие научные коллективы и успешно проводят работу в крупнейших ядерных центрах Советского Союза и других стран — участниц ОИЯИ.

Созданная в 1948 г. как национальный ядерный центр Советского Союза Лаборатория ядерных проблем явилась базой для плодотворных научных исследований ученых многих центральных институтов (ИАЭ, ИТЭФ, ИХФ АН СССР, ГЕОХИ АН СССР, Радиевый институт им. В. Г. Хлопина) и университетов (ЛГУ, МГУ и др.), а также институтов ряда союзных республик (Грузия, Узбекистан, Казахстан и др.).

Успехи коллектива Лаборатории в ядерно-физических исследованиях, создании совершенных современных ускорителей, разработке оригинальной аппаратуры и методики физического эксперимента, а также ее роль в воспитании научно-технических кадров получили широкое признание.

На протяжении всех тридцати лет работы коллектив Лаборатории встречал и встречает понимание и поддержку со стороны ГКИАЭ СССР, Комитета Полномочных представителей стран — участниц ОИЯИ, дирекции Объединенного института ядерных исследований.

Лаборатория гордится тем, что среди работ наших ученых, удостоенных Ленинской и Государственных премий, есть работа, отмеченная золотой медалью и премией имени И. В. Курчатова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефремов Д. В. и др. «Атомная энергия», 1956, т. 1, вып. 4, с. 5; Джелепов В. П., Понтекорво Б. М. «Атомная энергия», 1957, т. 3, вып. 11, с. 413.
- Джелепов В. П., Казаринов Ю. М. «Докл. АН СССР», 1954, т. 99, с. 939; Джелепов В. П. и др. «Иzv. АН СССР. Сер. физ.», 1955, т. 19, с. 573; Казаринов Ю. М., Симонов Ю. Н. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 169; Джелепов В. П. и др. ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 735; Kazari-  
nov Yu., Simonov Yu. In: Proc. Intern. Conf. on High Energy Phys. Rochester, 1960, p. 66.
- Богачев Н. П., Взоров И. К. «Докл. АН СССР», 1954, т. 99, с. 931; Мещеряков М. Г. и др. Там же, с. 955; с. 959; Селектор Я. М. и др. Там же, с. 967; Джелепов В. П. и др. «Докл. АН СССР», 1955, т. 104, с. 380; Мещеряков М. Г. и др. «Иzv. АН СССР. Сер. физ.», 1955, т. 19, с. 548; Богачев Н. П. «Докл. АН СССР», 1956, т. 108, с. 806; Сороко Л. М. и др. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 276; Неганов Б. С., Савченко О. В. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 1265; Дунайцев А. Ф., Прокошкин Ю. Д. ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 1656.
- Мещеряков М. Г. и др. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 361; 1957, т. 33, с. 37; Кумекин Ю. П. и др. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 1398; 1960, т. 38, с. 1451; 1962, т. 43, с. 1665; 1964, т. 46, с. 50. Dzheleпов V. e.a. In: Proc. Ann. Inter. Conf. on High Energy Physics at CERN, 1958, p. 303; Василевский И. М. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 889; 1963, т. 45, с. 484; Dzheleпов V. In: Proc. Inter. Conf. on High Energy Phys. Rochester, 1960, p. 115; Никаноров В. И. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 1209; Головин Б. М. и др. ЖЭТФ, 1963, т. 44, с. 142; Казаринов Ю. М. и др. ЖЭТФ, 1964, т. 47, с. 848; Головин Б. М. и др. «Ядерная физика», 1967, т. 5, с. 146; Ажгирей Л. С. и др. «Ядерная физика», 1965, т. 2, с. 892; Борисов Н. С. и др. ЖЭТФ, 1977, т. 72, с. 405.
- Неганов Б. С. и др. ЖЭТФ, 1966, т. 56, с. 1445; Павлов В. Н. и др. Препринт ОИЯИ P8-10660. Дубна, 1977.
- Пузиков Л. Д., Рындин Р. М., Смородинский Я. А. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 592.
- Померанчук И. Я. «Докл. АН СССР», 1951, т. 78, с. 249; ЖЭТФ, 1951, т. 21, с. 4119; Джелепов В. П. и др. «Докл. АН СССР», 1955, т. 100, с. 655; Лапи-  
дус Л. И. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 1435.
- Джелепов В. П. и др. «Докл. АН СССР», 1954, т. 99, с. 943; Головин Б. М., Джелепов В. П. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 194.
- Зулькарнеев Р. Я. и др. В кн.: Нуклоны и пионы. Дубна, 1968, с. 88; «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 973. Zulkarnef R. e.a. «Phys. Lett.», 1976, v. 61B, p. 164.
- Амаглобели Н. С. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 660; 1960, т. 39, с. 948; Казаринов Ю. М. и др. ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 197.
- Зивов В. Г. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 1708.
- Флягин В. Б. и др. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 854; Акимов Ю. К. и др. ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 708.
- Мещеряков М. Г. и др. «Докл. АН СССР», 1955, т. 100, с. 673; Мещеряков М. Г., Неганов Б. С. Там же, с. 677; Понтекорво Б. М., Селиванов Г. И. Там же, 1955, т. 102, с. 253; с. 495; Тяпкин А. А. и др. Там же, 1955, т. 100, с. 689; «Иzv. АН СССР. Сер. физ.», 1955, т. 19, с. 589; Джелепов В. П. и др. ЖЭТФ, 1955, т. 29, с. 886; Мещеряков М. Г. и др. «Докл. АН СССР», 1956, т. 109, с. 499; ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 45; Тяпкин А. А. ЖЭТФ, 1956, т. 30, с. 1150; Сидоров В. И. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 178; Прокошкин Ю. Д., Тяпкин А. А. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 750; Лапидус Л. И. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 204; Неганов Б. С., Парфенов Л. Б. ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 767; Акимов Ю. К. и др. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 87; Казаринов Ю. М., Симонов Ю. Н. Там же, с. 78; Акимов Ю. К. и др. ЖЭТФ, 1959, т. 37, с. 46; Дунайцев А. Ф., Прокошкин Ю. Д. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 734; 1959, т. 36, с. 1656; Джелепов В. П. и др. ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 1491.
- Mandelstam S. «Proc. Roy. Soc.», 1958, v. A244, p. 491; Сороко Л. М. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 1136; 1958, т. 35, с. 276.
- Прокошкин Ю. Д., Тяпкин А. А. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 313; Ажгирей Л. С. и др. ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 1357; Петров Н. И. и др. ЖЭТФ, 1957, т. 37, с. 957; Козодаев М. С. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 404; 1960, т. 39, с. 929; Прокошкин Ю. Д. ЖЭТФ, 1960, с. 38, с. 455; Вовченко В. Г. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 1557. Dunaitzev A., Prokoshkin Yu. «Nucl. Phys.», 1964, v. 56, p. 300.
- Батусов Ю. А. и др. ЖЭТФ, 1961, т. 40, с. 1528; 1960, т. 39, с. 506, с. 1850; 1961, т. 40, с. 460; 1962, т. 43, с. 2015; «Ядерная физика», 1965, т. 1, с. 526, с. 687; Батусов Ю. А. и др. ЖЭТФ, 1963, т. 25, с. 913.



17. Игнатенко А. Е. и др. «Докл. АН СССР», 1955, т. 103, с. 45, с. 209; ЖЭТФ, 1956, т. 30, с. 7; Мухин А. И. и др. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 371; Мухин А. И., Понтекорво Б. М. Там же, с. 550; Григорьев Е. Л., Митин Н. А. Там же, с. 37; 1957, т. 32, с. 440; 1959, т. 37, с. 413, с. 1583; Зинов В. Г., Коренченко С. М. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 335, с. 1307, с. 1308; 1959, т. 36, с. 618; 1960, т. 38, с. 1099, с. 1399. Мухин А. И. и др. «Докл. АН СССР», 1957, т. 112, с. 236; Будагов Ю. А. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 734; Василевский И. М., Вишняков В. В. Там же, с. 441, с. 1644; Vasilevski I. e.a. «Phys. Lett.», 1966, v. 23, p. 174.
18. Акимов Ю. К. и др. «Ядерная физика», 1971, т. 13, с. 748; Бережнев С. Ф. и др. «Ядерная физика», 1972, т. 16, с. 185; Бережнев С. Ф. и др. «Ядерная физика», 1973, т. 17, с. 85; т. 18, с. 102; Блохинцева Т. Д. и др. «Ядерная физика», 1975, т. 21, с. 850; Бережнев С. Ф. и др. «Ядерная физика», 1976, т. 24, с. 1127, т. 25, с. 1240.
19. Акимов Ю. К. и др. ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 1231.
20. Дунайцев А. Ф. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 632, с. 1421; 1964, т. 47, с. 84; «Phys. Lett.», 1962, v. 1, p. 138; «Nuovo cimento», 1962, v. 24, p. 405.
21. Зельдович Я. Б. «Докл. АН СССР», 1954, т. 97, с. 421; Герштейн С. С., Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1955, т. 29, с. 698.
22. Понтекорво Б. М. ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 247; 1959, т. 37, с. 1751; 1960, т. 39, с. 1166; «Fortschr. Phys.», 1963, Bd11, S. 503; «Успехи физ. наук», 1963, т. 79, с. 3; ЖЭТФ, 1967, т. 53, с. 1717; «Phys. Lett.», 1968, v. 26B, p. 630; «Иzv. АН СССР. Сер. физ.», 1969, т. 33, с. 1787; «Успехи физ. наук», 1971, т. 104, с. 3. Там же, 1967, т. 120, с. 705; Понтекорво Б. М., Рындин Р. М. «Физика нейтрино высоких энергий», Дубна, 1960, ОИЯИ Д-577, с. 35; Gribov V., Pontecorvo B. «Phys. Lett.», 1969, v. 28B, p. 493; Нгуен Ван Хьеу, Понтекорво Б. М. Письма в ЖЭТФ, 1968, т. 7, с. 137; Pontecorvo B. In: Old and New Problems in Elementary Particles. N.Y.—L., Acad. Press, 1968, p. 252.
23. Займидорога О. А. и др. ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 1804; 1962, т. 43, с. 355; 1963, т. 44, с. 389; 1964, т. 46, с. 1240.
24. Быстрицкий В. М. и др. ЖЭТФ, 1974, т. 66, с. 43.
25. Гуревич И. И. и др. «Ядерная физика», 1967, т. 6, с. 616.
26. Коренченко С. М. и др. «Ядерная физика», 1971, т. 13, с. 341; ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 3; 1976, т. 71, с. 69.
27. Окунь Л. Б. и др. «Ядерная физика», 1966, т. 4, с. 1202; Ванжа А. П. и др. Там же, 1970, т. 12, с. 595; Бардин Д. Ю. и др. Там же, 1971, т. 14, с. 427.
28. Vilenki S. e.a. «Phys. Lett.», 1977, v. 67B, p. 309.
29. Биленький С. М., Понтекорво Б. М. «Ядерная физика», 1976, т. 24, с. 603; Понтекорво Б. М. ЖЭТФ, 1967, т. 53, с. 1717.
30. Баладин М. П. и др. ЖЭТФ, 1974, т. 67, с. 1631.
31. Vasilevski I. e.a. «Phys. Lett.», 1962, v. 1, p. 345.
32. Аникина М. Х. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 130; 1963, т. 45, с. 469; 1964, т. 46, с. 59; Котляревский Д. М. и др. «Ядерная физика», 1965, т. 1, с. 1035; Нягу Д. и др. «Ядерная физика», 1966, т. 3, с. 903; Кулюкина Л. А. и др. ЖЭТФ, 1967, т. 52, с. 90; 1967, т. 53, с. 29.
33. Budagov Yu. e.a. In: Proc. Intern. Conf. on High Energy Phys. Instrument. Berkeley, 1960, p. 135.
34. Budagov Yu. e.a. «CZEGH J. Phys.», 1976, v. B26, p. 1271. «Ядерная физика», 1970, т. 12, с. 1222; 1972, т. 15, с. 1165; 1977, т. 25, с. 1195.
35. Amaglobeli N. e.a. Preprint JINR E1-10776. Dubna, 1977; Preprint JINR-10505. Dubna, 1977.
36. Будагов Ю. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1971, т. 14, с. 558.
37. Джелепов В. П. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 439; Джелепов В. П. и др. ЖЭТФ, 1964, т. 47, с. 1243; 1965, т. 49, с. 393; 1966, т. 50, с. 1235; Будашов Ю. Г. и др. Препринт ОИЯИ P15-3964. Дубна, 1968; Быстрицкий В. М. и др. ЖЭТФ, 1974, т. 66, с. 61; 1976, т. 70, с. 1167; 1976, т. 71, с. 1680.
38. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. «Успехи физ. наук», 1960, т. 71, с. 581; Герштейн С. С. ЖЭТФ, 1960, т. 40, с. 698.
39. Весман Э. А. «Иzv. АН Эст. ССР. Физ.-матем.», 1968, т. 17, с. 65; Матвеевко А. В. и др. ЖЭТФ, 1975, т. 68, с. 437; Pomomarev L. In: Proc. High Energy Physics and Nuclear Structure N. Y., 1975, p. 563.
40. Батусов Ю. А. и др. ЖЭТФ, 1964, т. 46, с. 817; «Ядерная физика», 1965, т. 1, с. 383; 1966, т. 3, с. 309; 1967, т. 5, с. 354; т. 6, с. 998; 1969, т. 9, с. 150.
41. Батусов Ю. А. и др. «Phys. Lett.», 1966, v. 22, p. 487; «Ядерная физика», 1968, т. 7, с. 28.
42. Ажгирей Л. С. и др. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 1185; Блохинцев Д. И. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 1295.
43. Ажгирей Л. С. и др. ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 1631.
44. Ажгирей Л. С. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 43, с. 2194.
45. Комаров В. И. и др. «Ядерная физика», 1970, т. 11, с. 711; «Nucl. Phys.», 1976, v. A256, p. 362; Ажгирей Л. С. и др. Препринт ОИЯИ P4-6308. Дубна, 1972.
46. Надеждин В. С. и др. «Ядерная физика», 1977, т. 26, с. 230.
47. Балац М. Я. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 1168.
48. Поликанов С. М. «Успехи физ. наук», 1972, т. 7, с. 686.
49. Бутцев В. С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 400.
50. Balashov V. e.a. «Phys. Lett.», 1964, v. 9, p. 168; Войткова И. и др. «Ядерная физика», 1971, т. 14, с. 624; Евсеев В. С. и др. «Ядерная физика», 1972, т. 16, с. 1154; Evseev V. e.a. In: Proc. 3rd Intern. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure. N.Y.—L., 1970, p. 157.
51. Garfanyini G. e.a. «Lett. Nuovo Cimento», 1972, v. 5, p. 1121, Kulyukin M. e.a. Ibid., p. 1125; v. 9, p. 461; Думбрайс О. В. и др. «Ядерная физика», 1973, т. 18, с. 327; Nikitii F., Shcherbakov Yu. «Phys. Nucl.», 1973, v. B61, p. 429; Falomkin I. e.a. «Nuovo Cimento», 1974, v. 22A, p. 333; Mikhul A. e.a. Ibid., v. 24A, p. 93; Makh R. e.a. «Phys. Lett.», 1974, v. 53B, p. 133; Shcherbakov Yu. e.a. «Nuovo Cimento», 1976, v. 31A, p. 249; 1976, v. 31A, p. 262.
52. Громов К. Я., Джелепов Б. С. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 4, с. 362.
53. Мольнар Ф. и др. ЭЧАЯ, 1973, т. 4, с. 1077.
54. Арль Р. и др. ЭЧАЯ, 1974, т. 5, с. 843.
55. Афанасьев В. П. и др. Препринт ОИЯИ 13-4763, Дубна, 1969; Пивотровский А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1972, т. 2, с. 23.
56. Beyer G. e.a. «Nucl. Instrum. and Methods», 1971, v. 96, p. 437.
57. Громов К. Я. и др. ЭЧАЯ, 1975, т. 6, с. 971.
58. Зинов В. Г. и др. «Ядерная физика», 1965, т. 2, с. 859; Бобров В. и др. Там же, 1966, т. 4, с. 75; Будашов Ю. Г. и др. Там же, т. 5, с. 599. Зинов В. Г.



- и др. Там же, 1967, т. 5, с. 591; Будяшов Ю. Г. и др. Там же, 1967, т. 5, с. 830; Konin A. e. a. «Phys. Lett.», 1974, v. 50A, p. 57.
59. Евсеев В. С. и др. Ядерная физика, 1968, т. 8, с. 741; Джураев А. А. и др. ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 1424; Гольдманский В. И. и др. «Докл. АН СССР», 1973, т. 211, с. 316.
60. Дунайцев А. Ф. и др. ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 1451; Petrukhin V., Prokoshkin Yu. «Nuovo Cimento», 1963, v. 28, p. 99; «Nucl. Phys.», 1964, v. 54, p. 414; Dupaitzev A. e. a. «Nuovo Cimento», 1964, v. 34, p. 521; Пономарев Л. И. «Ядерная физика», 1965, т. 2, с. 223; Петрухин В. И. и др. Препринт ОИЯИ Р-2558, Дубна, 1966; Крумштейн З. В. и др. ЖЭТФ, 1968, т. 54, с. 1690; 1968, т. 55, с. 1640; Петрухин В. И. и др. ЖЭТФ, 1968, т. 55, с. 2173; 1969, т. 56, с. 501; Вильгельмова Л. и др. ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 24; Гольдманский В. И. и др. «Докл. АН СССР», 1974, т. 214, с. 1105, 1337.
61. Герштейн С. С. и др. «Успехи физ. наук», 1969, т. 97, с. 3; Ponomarev L. «Ann. Rev. Nucl. Sci.», 1973, v. 23, p. 1395.
62. Петрухин В. И., Суворов В. М. ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 1145.
63. Бабаев И. А. и др. ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 877; Мясничева Г. Г. и др. ЖЭТФ, 1967, т. 53, с. 451; Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 5, с. 227; Минайчев Е. В. и др. ЖЭТФ, 1974, т. 66, с. 1926; Кудинов В. И. и др. ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 2041; Письма в ЖЭТФ, 1977, т. 25, с. 331.
64. Бабаев А. И. и др. «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 964; Джураев А. А. и др. «Ядерная физика», 1972, т. 16, с. 114; ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 2210, с. 1424.
65. Fromm W. e. a. «Phys. Lett.», 1975, v. 55B, p. 377.
66. Зрелов В. П. и др. «Czech. J. Phys.», 1976, v. B26, p. 1306; Препринт ОИЯИ Р1-7996, Дубна, 1974.
67. Балдин Б. Ю. и др. «Ядерная физика», 1974, т. 20, с. 694.
68. Gaidot A. e. a. «Phys. Lett.» 1975, v. 57B, p. 389; 393; 1976, v. 61B, p. 103; 107; «Nucl. Phys.», 1977, v. B124, p. 391.
69. Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 204; In: Proc. Intern. Conf. on High Energy Phys. at CERN, 1962, p. 115; «Ядерная физика», 1968, т. 7, с. 178; 1968, т. 8, с. 81; Биленький С. М. и др. ЖЭТФ, 1965, т. 49, с. 1653; 1966, т. 51, с. 891; «Успехи физ. наук», 1968, т. 95, с. 489; Биленький С. М., Рындин Р. М. «Ядерная физика», 1966, т. 4, с. 646; Биленький С. М. и др. Там же, с. 1063.
70. Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 1580; «Rev. Mod. Phys.», 1967, v. 39, p. 689; «Успехи физ. наук», 1968, т. 95, с. 657; Биленький С. М. и др. «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 243; Биленький С. М. Письма в ЖЭТФ, 1966, т. 3, с. 118; Тарасов А. В. «Ядерная физика», 1967, т. 5, с. 626.
71. Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 865.
72. Тарасов А. В. ЭЧАЯ, 1976, т. 7, с. 771.
73. Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 1148; Цэрэн Ч. «Ядерная физика», 1968, т. 8, с. 1227; 1970, т. 11, с. 382; Lapidus L. In: Proc. High Energy Physics and Nuclear Structure. N. Y., 1975, p. 129. Коларж П. и др. «Ядерная физика», 1976, т. 24, с. 651; Замолодчиков А. Б. и др. Там же, 1977, т. 26, с. 399.
74. Лapidус Л. И. и др. Препринты ОИЯИ Р2-5028, Р2-5231, Дубна, 1970; Цэрэн Ч. Препринт ОИЯИ Р2-10442, Дубна, 1977.
75. Лapidус Л. И. и др. ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 201; 1960, т. 39, с. 1056, с. 1286; 1961, т. 41, с. 491, с. 1546; с. 294; Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1962, т. 43, с. 1358; Лapidус Л. И., Мусаханов М. М. «Ядерная физика», 1971, т. 14, с. 774.
76. Биленькая С. И. и др. ЖЭТФ, 1971, т. 60, с. 460; 1971, т. 61, с. 2225; 1973, т. 65, с. 1745; Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 19, с. 613; с. 80; «Ядерная физика», 1976, т. 23, с. 401.
77. Лapidус Л. И. В кн.: Материалы 7-й зимней Школы ЛИЯФ. Ч. II, Л., 1972, с. 328; «Ядерная физика», 1973, т. 17, с. 592; Ванжа А. П. и др. Там же, т. 16, с. 1023; 1974, т. 20, с. 416; Копелиович Б. З., Лapidус Л. И. В кн.: Материалы Международ. школы-семинара молодых ученых ОИЯИ (РМ-2-8529). Дубна, 1075, с. 295.
78. Копелиович Б. З., Лapidус Л. И. ЖЭТФ, 1976, т. 71, с. 61; Dubovikov M. e. a. «Nucl. Phys.», 1977, v. B123, p. 147.
79. Борейко В. Ф. и др. Препринт ОИЯИ 13-6396, Дубна, 1972.
80. Akimov Yu. e. a. «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1972, v. NS-19, N 3, p. 404; Андерт К. и др. Препринт ОИЯИ 13-7125, Дубна, 1973; В кн.: Труды VIII Междунар. симп. по ядерной электронике. Дубна, 1975, с. 51.
81. Журавлев Н. И. и др. Препринт ОИЯИ 10-7332, Дубна, 1973; ОИЯИ 10-8114, 1974; ОИЯИ 10-8754, 1975; ОИЯИ 10-9479; 1976; Антюхов В. А. и др. Препринт ОИЯИ 10-10576, Дубна, 1977.
82. Будагов Ю. А. и др. В кн.: Труды Междунар. симп. по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер. ОИЯИ Д10-6142, 1971, с. 366.
83. Medved S., Sinaev A. In: Proc. Intern. Conf. on Instrumentation for High Energy Phys. Frascati, Italy, May 1973, p. 516.
84. ДЖЕЛЕПОВ В. П. и др. Препринт ОИЯИ 16-3491, Дубна, 1967; Абазов В. М. и др. В кн.: Труды III Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. М., «Наука», 1973, с. 85; Гольдин Л. Л. и др. «Успехи физ. наук», 1973, т. 110, с. 77; ДЖЕЛЕПОВ В. П. и др. «Мед. радиология», 1975, т. 7, с. 3; Абазов В. М. и др. Препринт ОИЯИ Д-8383, Дубна, 1975; ДЖЕЛЕПОВ В. П. и др. Препринт ОИЯИ-9035, Дубна, 1975; «Cesc. Cas. Fyz.», 1976, v. A26, p. 625.
85. Васильков Р. Г. и др. «Ядерная физика», 1968, т. 7, с. 88; «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 6, с. 479; 1970, т. 29, вып. 3, с. 151.
86. Зрелов В. П. «Приборы и техника эксперимента», 1963, т. 2, с. 29; Излучение Вавилова — Черенкова и его применение в физике высоких энергий. Ч. 1, 2. М., Атомиздат, 1968; Zrelov V. e. a. «Nucl. Instrum. and Methods», 1976, v. 136, p. 285; 1973; v. 107, p. 279.
87. Зрелов В. П. и др. ЖЭТФ, 1973, т. 64, с. 245.
88. Агуличев В. А. и др. ЭЧАЯ, 1977, т. 8, с. 580.
89. Тяпкин А. А. «Приборы и техника эксперимента», 1956, т. 3, с. 51; «Атомная энергия», 1957, т. 3, с. 298.
90. Тяпкин А. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1961, т. 5, с. 84; Говоров А. М. и др. Там же, 1961, т. 6, с. 49; Петер Г. и др. Там же, 1963, т. 20, с. 201.
91. Бугслов М. М. и др. ЖЭТФ, 1964, т. 46, с. 2245; «Приборы и техника эксперимента», 1965, т. 3, с. 75; Komarov V., Savchenko O. «Nucl. Instrum. and Methods», 1965, с. 34, p. 239.



92. Falomkin I. e. a. «Lett. Nuovo Cimento», 1972, v. 5, p. 757; «Nucl. Instrum. and Methods», 1974, v. 119, p. 347; Busso L. e. a. «Lett. Nuovo Cimento», 1975, v. 13, p. 427; Буссо Л. и др. ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 785; Falomkin I. e. a. «Nucl. Instrum. and Methods», 1976, v. 137, p. 589.
93. Акимов Ю. К. и др. ЖЭТФ, 1965, т. 48, с. 767; Акимов Ю. К. и др. «Ядерная физика», 1966, т. 4, с. 88.
94. Джелепов В. П. и др. «Успехи физ. наук», 1965, т. 85, с. 651.
95. Dzheleпов V., Dmitrievski V., Kolga V. In: Proc. 9th Intern. Conf. on High Energy Accelerators. Stanford, 1975, p. 638.
96. Василевская Д. П. и др. «Атомная энергия», 1959, т. 6, вып. 6, с. 657; 1960, т. 8, вып. 3, с. 189.
97. Аносов В. Н. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 25., вып. 6, с. 539; Глазов А. А. и др. Препринт ОИЯИ 9-5206. Дубна, 1970; В кн.: Труды II Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Т. 2. М., «Наука», 1972, с. 49.
98. Глазов А. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 1, с. 16.
99. Дмитриевский В. П. и др. Препринт ОИЯИ Р9-7339. Дубна, 1973, с. 22. Аленцкий Ю. Г. и др. Препринт ОИЯИ Р9-10382. Дубна, 1977.
100. Дмитриевский В. П. и др. Препринт ОИЯИ Р9-6733. Дубна, 1972. Василенко А. Т. и др. Препринт Е9-8443. Дубна, 1974; В кн.: Труды IV Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. М., «Наука», 1975, с. 205.
101. Джелепов В. П. и др. Препринт ОИЯИ Р9-9066. Дубна, 1975; Джелепов В. П., Дмитриевский В. П. Препринт ОИЯИ 9-10534. Дубна, 1977.

УДК 621.039.512.4

## Исследования по термализации нейтронов

Мостовой В. И.

После успешного решения проблемы атомного оружия И. В. Курчатов и А. П. Александров сосредоточили свою деятельность на вопросах мирного использования ядерной и термоядерной энергии и развитии соответствующих областей науки. Они предлагают, в частности, программу создания атомных электростанций и атомных ледоколов на основе уран-водных реакторов как наиболее перспективных для этих целей. Для обоснования этого направления в атомной энергетике и решения возникающих проблем привлекается широкий круг ученых Института атомной энергии.

В то время было уже известно, что сечения делящихся изотопов не следуют закону  $1/v$ . Поэтому для вычисления коэффициента размножения нейтронов, накопления и выгорания изотопов первостепенное значение приобретает знание спектра нейтронов в реакторе, особенно его вид в области первого резонанса плутония (0,3 эВ). Важность знания спектров нейтронов для выяснения особенностей физики уран-водных реакторов была подчеркнута Игорем Васильевичем Курчатовым в его программном докладе в 1956 г. в Харуэлле [1]. В физике тепловых и надтепловых реакторов возникает новая важная проблема — проблема термализации нейтронов, состоящая в изучении той заключительной стадии формирования спектра нейтронов, когда обмен энергией между нейтроном и атомами замедлителя имеет коллективный характер.

В принципе, зная сечения поглощения и дважды дифференциальные сечения рассеяния, можно вычислить пространственно-энергетическое распределение нейтронов в любой системе, решая кинетическое уравнение. Но в то время отсутствовали данные по дважды дифференциальным сечениям, методика расчета и необходимая вычислительная техника. Поэтому было решено изучить спектры нейтронов в нескольких конкретных уран-водных решетках, чтобы представить качественную картину пространственно-энергетического распределения нейтронов в них. Первые эксперименты были начаты в 1956 г. на реакторе ВВР-2 В. И. Мостовым и Ю. С. Салтыковым [2]. Вскоре в этих работах приняли участие М. Б. Егизаров и В. С. Дикарев. Уже первые эксперименты дали интересную и неожиданную информацию о тепловой области спектра и области замедления и об их пространственной зависимости. Было показано, что спектр нейтронов в блоке урана существенно отличается от максвелловского распределения и распределения Ферми.

Эксперименты позволяли также качественно оценить влияние поглощения и химической связи атомов замедлителя на характер спектров.

После первого этапа началось детальное изучение вопросов термализации, а именно:

1) закона рассеяния медленных нейтронов в основных замедлителях;