

группы сотрудников ОИЯИ под руководством профессора И.В.Пузынина метод превратился в мощный инструмент построения эффективных вычислительных схем для решения разнообразных нелинейных задач, возникающих в физике. Сейчас можно с уверенностью сказать, что разработан качественно новый, по сравнению с первоначальным вариантом НАМН, подход к созданию алгоритмов для численного анализа сложных многопараметрических нелинейных моделей физики.

Создание этого подхода явилось во многом продуктом опыта решения разнообразных практических задач. Это сингулярные спектральные задачи теории мезокатализа и теории ядра, это нелинейные полевые модели – потенциальные модели КХД, модели полярона, модели джозефсоновских переходов и другие. Поэтому в разрабатываемом подходе, наряду с идеями НАМН, нашли отражение наиболее привлекательные стороны известных методов решения задач физики. Это схемы теории возмущений, метод продолжения по параметру, метод эволюции по константе связи.

В разработанных итерационных схемах оптимизируется сходимость, в определенном смысле решается задача выбора начальных приближений и упрощается решение линейной задачи относительно итерационных поправок. Более того, возможно построение итерационного процесса без обращения линейного оператора в этой задаче. Развитые вычислительные схемы обладают свойствами таких известных методов, как метод расщепления, многосеточные методы, некоторые методы регуляризации.

В спектральных задачах обобщение НАМН может служить единой теоретической основой описания ряда известных методов.

- *Развитие методов, алгоритмов и пакетов программ компьютерной алгебры*

Работы в этой области ведутся в двух направлениях.

Во-первых, обеспечение сопровождения и развития таких пакетов компьютерной алгебры, как Maple, Mathematica, Reduce, Form; обеспечение пользователей информацией о символьных методах, алгоритмах и программном обеспечении.

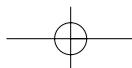
Во-вторых, разработки прикладных алгоритмов, связанных с символьным решением систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Здесь одним из главных являются методы построения инволютивных базисов для приведения систем к соответствующему каноническому виду.

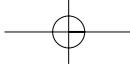
Эти работы возглавляет профессор В.П.Гердт.

## **7. Экспериментальные исследования: исследование структуры дейтрона в соударениях релятивистских ядер**

В новую лабораторию – ЛВТА – вместе с М.Г.Мещеряковым перешла его научно-исследовательская группа во главе с Леонидом Степановичем Ажгиреем, вместе с которой он более десяти лет проводил цикл работ по изучению структуры дейтрона на синхроциклотроне ЛЯП. Таким образом, лаборатория, ориентированная на поддержку физической программы ОИЯИ, непосредственно в ней участвовала. Ниже приводится обзор этих работ, составленный Л.С.Ажгиреем.

Дейтрон является простейшим ядром, состоящим из двух нуклонов: протона и нейтрона. Поэтому, с одной стороны, он представляет собой прекрасный инструмент





для исследования механизма ядерных реакций, с другой — превосходную «лабораторию» для изучения моделей, в которых ядерные взаимодействия объясняются на основе обмена мезонами.

Первое открытие, сделанное в ОИЯИ в 1957 году, также связано с дейтроном, — это было наблюдение прямого выбивания дейтронов из атомных ядер протонами, ускоренными на шестиметровом синхроциклотроне. Явление прямого выбивания дейтронов<sup>1</sup> было обнаружено сотрудниками группы М.Г.Мещерякова в ходе систематических исследований импульсных спектров вторичных частиц, испускаемых в результате бомбардировки атомных ядер протонами с энергией 675 МэВ.

В описываемом эксперименте коллимированный пучок протонов падал на поочередно устанавливаемые в него мишени из  $H_2O$ ,  $D_2O$ , Li, Be и C. Вторичные частицы, испущенные из мишени под углом  $7,6^\circ$ , выделялись системой коллиматоров и, пройдя анализирующее магнитное поле, регистрировались телескопом сцинтилляционных счетчиков. Вторичные протоны и дейтроны разделялись по пробегу в медном фильтре.

Спектр вторичных частиц, испущенных в соударениях протонов с ядрами лития, показан на рис. 5.

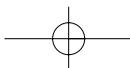
Здесь интенсивный пик отвечает протонам, дифракционно рассеянным на ядре, а примыкающий к нему слева выступ обусловлен протонами, испытавшими квазиупругое рассеяние на нуклонах внутри ядра. Правое «крыло» спектра показано со 100-кратным увеличением. На врезке приведен пик дейтронов, идентифицированных по пробегу в фильтре (пробег дейтронов с определенным импульсом меньше, чем пробег протонов с тем же импульсом). Анализ полученных данных привел к заключению, что зарегистрированные дейтроны образуются в результате почти упругих соударений налетающих протонов с квазидейтронными группами внутри ядер. Результаты этих опытов через 10 лет подтверждены в экспериментах на других ускорителях, и обнаруженное явление было прослежено вплоть до 4,3 ГэВ/с.

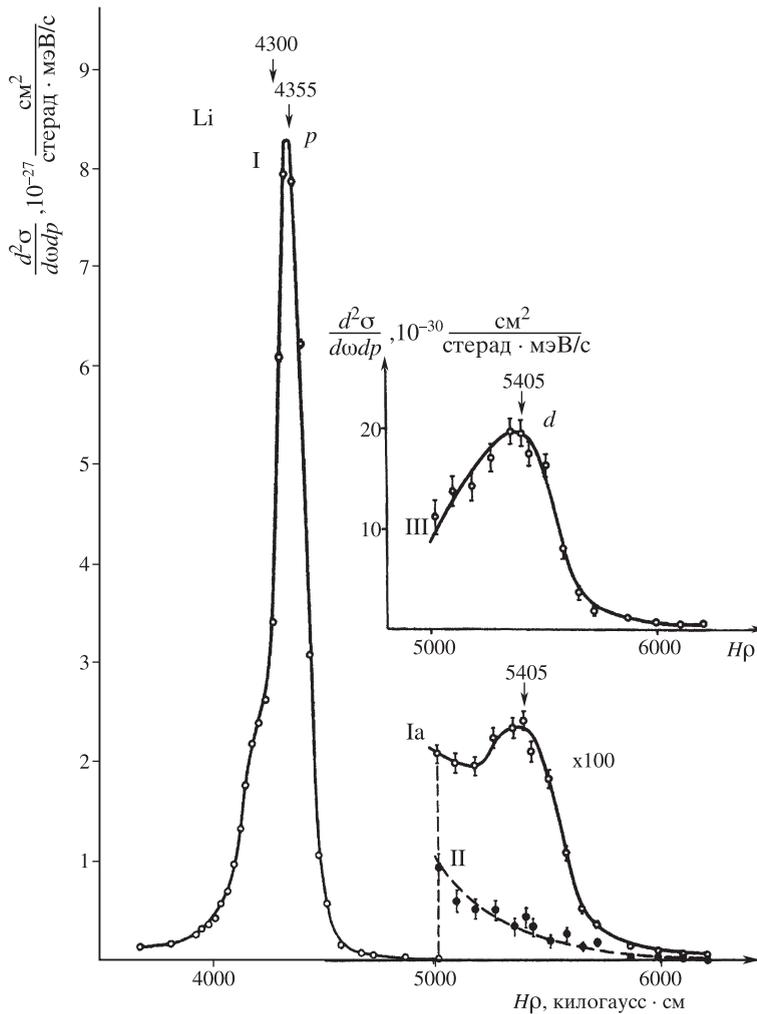
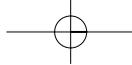
Обнаруженное явление представлялось крайне удивительным, поскольку дейтрон представляет собой довольно «рыхлую» систему, а передаваемая паре нуклонов энергия в сотни раз превышала энергию связи нуклонов в дейтроне. Для интерпретации результатов описанных экспериментов Д.И.Блохинцев сформулировал так называемую модель флуктонов<sup>2</sup>, в которой предполагалось, что вследствие флуктуаций плотности ядерного вещества внутри ядер возможно возникновение кратковременных тесных скоплений нуклонов, которые могут выбрасываться из ядра в виде отдельной частицы при соударении с нуклоном. Гипотеза о флуктонах была высказана Д.И.Блохинцевым задолго до открытия кварковой структуры адронов. В настоящее время флуктоны принято рассматривать как многокварковые образования, своеобразные «кварковые мешки».

Далее в опытах по исследованию процесса образования заряженных  $\pi$ -мезонов на ядрах углерода протонами с энергией 670 МэВ, выполненных под руководством М.Г.Мещерякова, было показано, что «соударения налетающих протонов внутри

<sup>1</sup> Ажгирей Л.С., Взоров И.К., Зрелов В.П., Мещеряков М.Г., Неганов Б.С., Шабудин А.Ф. // ЖЭТФ. 1957. № 33. С. 1185.

<sup>2</sup> Блохинцев Д.И. // ЖЭТФ 1957. № 33. С. 1295.



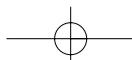


**Рис. 5.** Импульсный спектр вторичных частиц от  $p$ -Li соударений под углом  $7,6^\circ$  при 675 МэВ.

I и Ia – суммарный спектр вторичных частиц; II – спектр протонов (ординаты для Ia и II увеличены в 100 раз); III – спектр дейтронов

ядер с группами нуклонов, обладающих большими относительными импульсами, иногда сопровождаются образованием  $\pi$ -мезонов». По существу, это явилось первым экспериментальным наблюдением «кумулятивного процесса». Впоследствии интенсивные исследования кумулятивных процессов проводились А.М.Балдиным с сотрудниками на синхрофазотроне ОИЯИ и Г.А.Лексиним с коллегами в ИТЭФ.

Одним из методов получения информации о структуре составных объектов (и простейшего из них – дейтрона) является исследование импульсных спектров продуктов фрагментации этих объектов. На ранних этапах исследования структуры

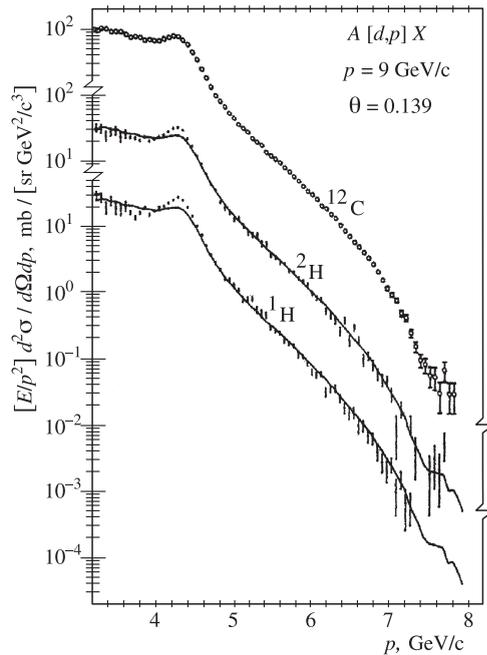


дейтрона этим методом, когда импульсы вторичных частиц измерялись в относительно узкой области, представлялось, что такого рода данные о реакции  $(d, p)$  можно описать на основе модели многократного нуклон-нуклонного рассеяния с использованием известных волновых функций дейтрона и лоренцовского преобразования импульсов нуклонов внутри дейтрона при переходе из системы покоя движущегося дейтрона в лабораторную систему. Более детальное исследование спектров протонов от развала релятивистских дейтронов, охватывающее практически весь кинематически доступный интервал импульсов вторичных частиц, стало возможно после сооружения на канале медленного вывода пучка дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ прецизионного магнитного спектрометра с проволочными камерами на линии с ЭВМ. С помощью новой экспериментальной установки были проведены систематические измерения импульсных спектров протонов, вылетающих во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами водорода, дейтерия и углерода под углами 103, 139 и 157 миллирадиан. Условия этих экспериментов выбраны таким образом, чтобы регистрируемые протоны обладали наибольшими достижимыми поперечными импульсами (в антилабораторной системе координат, т. е. в системе покоя дейтрона регистрируемые протоны испускались под углами вблизи  $90^\circ$ ).

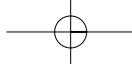
Импульсные спектры протонов, испускаемых под углом 139 миллирадиан во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами водорода, дейтерия и углерода, в качестве примера накопленных данных показаны на рис. 6.

Отметим, что на протяжении исследованного импульсного интервала выходы вторичных протонов падают более чем на четыре порядка по отношению к их выходам в максимумах спектров; спектры вторичных протонов измерены вплоть до кинематической границы их вылета. Сплошные кривые на рис.6 представляют собой результат сплайн-аппроксимации импульсного спектра для углеродной мишени, наложенный на спектры для водорода и дейтерия. Видно, что формы спектров для разных мишеней, за исключением узкого участка вблизи максимумов, совпадают. Это означает, что форма высокоимпульсных частей спектров зависит только от свойств фрагментирующего ядра — дейтрона.

Извлечение информации о структуре дейтрона из результатов опытов, в которых дейтрон быстро движется, требует релятивистского рассмотрения *ab ovo*, как это де-



**Рис. 6.** Импульсные спектры вторичных протонов, зарегистрированных под углом 139 мрад во взаимодействиях дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  и  $^{12}\text{C}$



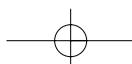
лается и в релятивистских моделях жестких соударений составных адронов. Ключевым элементом в этом подходе является понятие системы бесконечного импульса, тесно связанное с динамикой светового фронта, впервые рассмотренной Дираком еще в 1949 году. Качественно идея состоит в том, что если составная система рассматривается из быстро движущейся системы, взаимодействия между конститuentами замедляются из-за уширения времени, так что внутренняя динамика, по существу, сводится к динамике почти свободных конститuentов. Одно из преимуществ динамики светового фронта по сравнению с обычной — динамикой мгновенной формы — состоит в том, что в ней из вакуума не рождаются пары частица-античастица (т.е. в этом случае вакуум является «пустым» для массивных частиц).

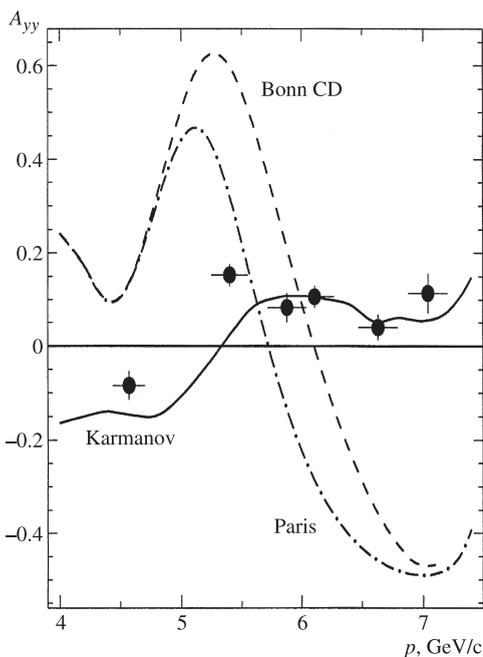
Все накопленные данные об инвариантных дифференциальных сечениях реакции  $(d, p)$  при энергиях дейтронов в области от 3,5 до 9 ГэВ с испусканием протонов с различными поперечными импульсами, от 0 до 1,1 ГэВ/с, удается удовлетворительно описать в рамках релятивистской модели жесткого рассеяния, основанной на динамике светового фронта, с волновыми функциями дейтрона, полученными из стандартных нерелятивистских волновых функций путем кинематического преобразования от переменных мгновенной формы динамики к переменным световой формы. В этой модели основные вклады в выход протонов дают прямая фрагментация дейтрона и процессы рассеяния нуклона дейтрона на нуклоне мишени.

Очередной этап исследования структуры дейтрона на малых расстояниях между нуклонами стал возможен после создания на синхрофазотроне ОИЯИ уникального пучка поляризованных дейтронов. Новые методические возможности позволили проводить измерения спиновых характеристик реакций с участием поляризованных дейтронов. На рис. 7, как один из примеров результатов таких измерений, приведены данные о тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции  $^{12}\text{C}(d, p)\text{X}$  при начальном импульсе дейтронов 9 ГэВ/с и угле испускания протонов 85 миллирадиан<sup>1</sup>. Кривыми показаны результаты вычислений этого параметра в рамках модели жестких соударений с использованием различных волновых функций дейтрона. Обратим внимание на то, что кривые, вычисленные с волновыми функциями для парижского (штрихпунктирная кривая) и боннского (штриховая кривая) потенциалов, не согласуются с экспериментальными данными. Это же характерно и для других данных, например, для данных о тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в упругом  $(dp)$ -рассеянии назад и в реакции  $(d, p)$  с вылетом протонов под  $0^\circ$ .

Таким образом, результаты выполненных в Сакле и Дубне экспериментов заставили усомниться в правильности описания структуры дейтрона на малых расстояниях с помощью волновых функций, полученных путем кинематического преобразования переменных. В частности, анализ данных о тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции фрагментации дейтронов с испусканием протонов с боль-

<sup>1</sup> Afanasief S.V., Azhgirey L.S., Arkhipov V.V., Bondarev V.K., Chernykh E.V., Ehara M., Ershov V.P., Filipov G., Fimushkin V.V., Fukui S., Hasegava S., Hasegava T., Horikava N., Isupov A.Yu., Iwata T., Kageya T., Kashirin V.A., Kawano M., Khrenov A.N., Kirillov A.D., Kolesnikov V.I., Ladygin V.P., Litvinenko A.G., Malakhov A.I., Matsuda T., Migulina I.I., Nakayama H., Nikiforov A.S., Nomofilov A.A., Osada E., Penev V.N., Pilipenko Yu.K., Reznikov S.G., Rukoyatkin P.A., Semenov A.Yu., Semenova I.A., Sharov V.I., Stoletov G.D., Strunov L.N., Takabyashi N., Wakai A., Yudin N.P., Zaporozhets S.A., Zhmyrov V.N., Zolin L.S. // Phys. Lett. B 434. 1998. P. 21–27.





**Рис. 7.** Тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  реакции фрагментации дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с с испусканием протонов под углом 85 миллирадиан в зависимости от импульса регистрируемых протонов. Экспериментальные данные показаны на графике точками. Расчеты в рамках динамики светового фронта выполнены<sup>1</sup> с волновыми функциями дейтрона для парижского (штрихпунктирная кривая) и боннского (штриховая кривая) потенциалов, а также с волновой функцией Карманова (сплошная кривая)

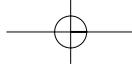
шими поперечными импульсами, наряду с некоторыми другими фактами, навел на мысль о необходимости введения дополнительной переменной для описания структуры релятивистского дейтрона.

Учитывая сложившуюся ситуацию, было выдвинуто предположение, что основную проблему в описании экспериментальных данных, полученных с пучками поляризованных дейтронов, можно решить, правильно учтя релятивистские свойства дейтрона и не усложняя механизм реакции<sup>2</sup>. Релятивистское описание дейтрона в рамках динамики светового фронта было развито Кармановым и др. В этом подходе релятивистский дейтрон описывается волновой функцией более общего вида: теперь она зависит от двух импульсов – продольного и поперечного. Вследствие этого релятивистский дейтрон описывается шестью инвариантными функциями вместо двух в нерелятивистском случае. В нерелятивистском пределе две компоненты внутреннего импульса сворачиваются в его модуль, поэтому нерелятивистская функция зависит только от одной переменной. Новое соотношение между продольной и поперечной компонентами импульса внутриядерного движения отличается от того, которое диктуется суперпозицией  $S$ - и  $D$ -волн в нерелятивистских волновых функциях дейтрона.

Результаты расчетов параметра  $A_{yy}$  с релятивистской волновой функцией Карманова показаны на рис. 7 сплошной кривой. Видно, что импульсная зависимость, вычисленная с релятивистской волновой функцией, очень близка к эксперименталь-

<sup>1</sup> *Azhgirey L.S., Yudin N.P.* Preprint arXiv:nucl-th/0212033 (2002); Preprint arXiv:nucl-th/0311052 (2003).

<sup>2</sup> Там же.



ным точкам, тогда как кривые, вычисленные со стандартными нерелятивистскими волновыми функциями, находятся в резком противоречии с данными.

Анализ накопленных экспериментальных данных об инвариантном дифференциальном сечении и тензорной анализирующей способности процесса фрагментации релятивистских дейтронов на ядрах свидетельствует о том, что в подходе динамики светового фронта нуклоны в дейтроне остаются эффективными степенями свободы и, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до импульсов внутреннего движения 1 ГэВ/с.

Полученные результаты могут иметь далеко идущие последствия как для понимания структуры дейтрона на малых расстояниях, так и для интерпретации механизмов реакции фрагментации релятивистских дейтронов. Действительно, довольно неожиданным оказывается, что вплоть до малых расстояний между нуклонами, соответствующих внутренним импульсам 0,5–0,8 ГэВ/с, в световой форме квантовой механики дейтрон можно рассматривать как двухнуклонную систему. Такое же заключение было сделано ранее и в работе, посвященной исследованию фрагментации дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с в протоны с поперечными импульсами 0,5–1 ГэВ/с, где указывалось, что нуклоны в дейтроне, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до относительных импульсов 1 ГэВ/с.

Второй важный вывод, вытекающий из этих исследований, состоит в том, что в реакции фрагментации релятивистских дейтронов очень быстро становятся существенными релятивистские эффекты, которые наиболее просто можно учесть при рассмотрении механизма процесса в квантовой механике светового фронта, не вводя каких-либо дополнительных степеней свободы.

## **8. Электроядерный способ производства энергии – «электрояд»**

Другая физическая тематика, которой активно занимались физики и математики ЛВТА, – это проблема, известная под названием «Электроядерный способ производства энергии» (электрояд). Работы в этом направлении ведутся в нескольких лабораториях ОИЯИ. Работы ЛВТА, в основном, связаны с математическим моделированием соответствующих физических процессов. В данном пункте В.С.Барашенковым излагается современный взгляд на это научно-техническое направление.

### ***Плюсы и минусы***

Урановые и ториевые руды – важнейшие ресурсы нашей планеты. В 2003 году свыше 17% мирового производства электроэнергии приходилось на атомные электростанции, использующие урановое горючее. В некоторых странах доля атомного электричества значительно больше. Например, наша северная соседка Швеция производит на атомных станциях половину всей своей электроэнергии, Франция – более трех четвертей. В Китае недавно принята программа увеличения в 5–6 раз вклада атомных электростанций (АЭС). Атомная энергетика развивается в Индии, где ее долгосрочные перспективы связываются с торием, которым очень богата эта страна. Заметную, хотя пока и неопределяющую роль, атомные электростанции играют в США и России.

