

14. Ишмаев С. Н., Садиков И. П., Чернышов А. А. В кн.: Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1972, с. 337.
15. Ишмаев С. Н., Садиков И. П., Чернышов А. А. Термализация нейтронов в  $H_2O$  при  $318^\circ K$  и  $77^\circ K$ . Препринт ИАЭ-1954, М., 1970.
16. Ишмаев С. Н., Садиков И. П., Чернышов А. А. Выбор и оптимизация замедлителя для импульсного источника медленных нейтронов. Препринт ИАЭ-2019, М., 1970.
17. Ишмаев С. Н. и др. В кн.: Спектры медленных нейтронов. М., Атомиздат, 1971, с. 210.
18. Майоров Л. В. «Журн. вычисл. мат. и мат. физ.», 1962, т. 2, с. 635.
19. Казарновский М. В., Майоров Л. В., Юдкевич М. С. [8], в. II, р. 331.
20. Казарновский М. В., Майоров Л. В., Юдкевич М. С. [14], с. 46.
21. Лалетин Н. И. В кн.: Методы расчета полей тепловых нейтронов в решетках резисторов. М., Атомиздат, 1974, с. 87.
22. Ишмаев С. Н., Садиков И. П., Чернышов А. А. Анизотропия спектра нейтронов в воде вблизи поглотителя. Препринт ИАЭ-1216, М., 1966.
23. Ишмаев С. Н. и др. [8], в. II, р. 193.
24. Майоров Л. В. и др. [11], в. I, р. 657.
25. Абдуллаев Х. Ш. и др. [8], в. II, р. 233.
26. Абдуллаев Х. Ш., Никитин В. Д., Труханов Г. Я. Длины релаксации в воде. Препринт ИАЭ-1612, М., 1968.
27. Абдуллаев Х. Ш., Никитин В. Д., Труханов Г. Я. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 6, с. 538.
28. Мостовой В. И. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 5, с. 459.
29. Майоров Л. В., Труханов Г. Я. [8], в. I, р. 145.
30. Мостовой В. И., Дикарев В. С., Салтыков Ю. С. Изучение спектров нейтронов в системах с водородсодержащим замедлителем. Докл. на коллоквиуме по ядерной физике. Балатон-Эсед, 1960.
31. Дикарев В. С. и др. Методика измерений спектров нейтронов в замедляющих и размножающих системах. Докл. на конференции в Дрездене, 1960.
32. Мостовой В. И. и др. «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 6, с. 547.
33. Дикарев В. С., Мостовой В. И. [7], с. 236.
34. Додь А. И. и др. «Изв. АН БССР», 1975, № 2, с. 14.
35. Майоров Л. В. «Журн. вычисл. мат. и мат. физ.», 1965, т. 5, с. 363.
36. Тихонов А. Н. и др. «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 6, с. 588.
37. Марчук Г. И. и др. III Женевск. конф., 1964. Докл. СССР № 365.
38. Марчук Г. И. и др. «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 6, с. 534.
39. Майоров Л. В. «Журн. вычисл. мат. и мат. физ.», 1962, т. 2, с. 349.
40. Майоров Л. В., Брызгадов В. И. В кн.: Метод Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике. Минск, 1970, с. 4.
41. Марчук Г. И. Методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
42. Марчук Г. И., Лебедев В. И. Численные методы в теории переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1971.
43. Методы расчета полей тепловых нейтронов в решетках реакторов. Под ред. Я. В. Шевелева. М., Атомиздат, 1974.
44. Турчин В. Ф. Медленные нейтроны. М., Атомиздат, 1963.
45. Reactor Physics Constants. ANL-5800, 1963.
46. Гуревич И. И., Тарасов Л. В. Физика нейтронов низких энергий. М., «Наука», 1965.
47. Experimental Neutron Thermalization. Pergamon Press, 1969.
48. Импульсные и статистические методы исследования реакторов. Т. 1, 2. Обнинск, изд. ФЭИ, 1969.
49. Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. Под ред. В. В. Орлова и Э. А. Стумбура. М., Атомиздат, 1971.
50. Спектры медленных нейтронов. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1971.

УДК 539.171.015

## Оболочечные и изотопные эффекты при взаимодействии нейтронов с ядрами

ПАСЕЧНИК М. В.

Игорь Васильевич Курчатов, решая вопросы большой государственной важности, много внимания уделял развитию науки в республиканских академиях наук, в частности, ядерной физики на Украине.

Создание и запуск первоклассного экспериментального реактора ВВР-М в Киеве произведены по известной «Программе И. В. Курчатова». Игорь Васильевич нашел время, чтобы лично проверить пусковые работы на реакторе и посетить наши лаборатории (январь 1960 г.). Прецизионный нейтронный спектрометр наносекундного диапазона в ИЯИ АН УССР построен

на базе электростатического генератора ЭГ-5, который Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова передал в дар нашему институту. И. В. Курчатов поддержал предложение о создании в Киеве ядерного центра.

В настоящей статье излагаются результаты исследований, приведшие к открытию ядерной оболочки в деформированных ядрах с числом нейтронов  $\sim 100$ , а также новых изотопных эффектов при взаимодействии нейтронов с ядрами. Статья посвящается светлой памяти И. В. Курчатова.



**Оболочечные эффекты при высоких возбуждениях ядер.** В последнюю четверть века представления об оболочечном строении ядер настолько расширились, что стали входить в обиход ядерной физики. Эти представления возникли в результате анализа свойств ядер в основном состоянии. Было установлено, что основные ядерные свойства изменяются не монотонно с ростом массового числа и атомного номера, а проявляют специфические периодичности, т. е. атомные ядра имеют оболочечное строение, напоминающее структуру электронных оболочек атомов. При этом ядерные оболочки имеют свои характерные особенности: их заполнение происходит при числах нуклонов, не совпадающих с числами электронов в замкнутых оболочках благородных газов. Это связано с существованием в ядре сильного спин-орбитального взаимодействия между нуклонами. Ядра с замкнутыми оболочками получили название «магические» [1].

Следующим шагом на пути к оболочечной структуре ядер было обнаружение оболочечных эффектов при промежуточных возбуждениях ядер, возникающих при неупругом рассеянии быстрых нейтронов [2]. Было показано, что поперечные сечения неупругого рассеяния быстрых нейтронов ( $E = 1-4$  МэВ) на ядрах с числом нейтронов 50, 82, 126 значительно меньше, чем для промежуточных ядер. Аномалии в поперечном сечении тем сильнее, чем больше массовое число. Такая зависимость согласуется с данными об энергии связи 51-го, 83-го и 127-го нейтронов в ядрах и с другими характеристиками ядер. Обнаружение этих эффектов сыграло определенную роль в выработке критериев подбора конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах.

Введение в строй экспериментального реактора ВВР-М дало нам возможность изучения энергетических уровней компаунд-ядер при энергии возбуждения, сравнимой с энергией связи нейтронов, при этом с высокой разрешающей способностью, недоступной для других методов.

Узкие коллимированные пучки на выходе горизонтальных каналов реактора имеют потоки  $10^9$  нейтр./см<sup>2</sup>, они позволяют измерять образцы в виде разделенных изотопов в миллиграммных количествах. Были определены параметры уровней, средние расстояния между уровнями, нейтронные силовые функции, радиационные ширины, амплитуда потенциального рассеяния для 32-х изотопов в области  $A = 130 \div 200$ , среди них значительное число

малораспространенных изотопов элементов Ва, Се, Еи, Yb, Os, Pt [3, 4, 5].

Большой интерес представляет сравнение плотности уровней возбужденных состояний ядер изотопов одной группы, например четно-четных изотопов. Для этого необходимо привести их к одной энергии возбуждения, а также учесть различие в энергиях спаривания, при этом были использованы различные варианты полуэмпирических формул для плотности уровней.

Сравнение приведенных плотностей уровней или расстояний между ними указывает на существование зависимости от числа нейтронов  $N$  и массового числа  $A$ .

В измерениях на разделенных изотопах получены распределения расстояний между уровнями, из которых следует:

плотность уровней вблизи границы Ферми не является монотонной функцией массового числа. В ядрах с замкнутыми оболочками при  $N = 82$  и  $126$  расстояния между уровнями максимальны, обнаружен дополнительный максимум в расстоянии между уровнями  $D(N)$  в области ядер с числом нейтронов  $\sim 100$ .

Наблюдаются также корреляции в поведении  $D(N)$  с другими ядерно-физическими свойствами. Все это привело к выводу, что деформированные ядра с числом нейтронов порядка 100 имеют также замкнутые оболочки, что послужило основой для пересмотра всей концепции ядерных оболочек. Согласно традиционным представлениям магичность обусловлена сферической структурой ядер и должна разрушаться вследствие исчезновения вырождения, связанного со сферической формой. Именно поэтому считали, что оболочечная структура, приводящая к магическим свойствам, не должна проявляться в деформированных ядрах, форма которых отличается от сферической уже в основном состоянии.

Было установлено, что свойство магичности связано не только со сферичностью формы ядра, но оно может наблюдаться также и в сильно деформированных ядрах, что и было показано на примере редкоземельных элементов.

Все отмеченные закономерности согласуются с теоретическими расчетами, которые показали, что с возрастанием деформации ядер они могут попадать в область повышенной устойчивости, аналогичной устойчивости сферических магических ядер.

Развитие новой концепции оболочечной структуры ядер и применение ее к процессам деления в работе [6] привели к новым представлениям



о процессе деления и предсказанию островков стабильных ядер в далекой заурановой области таблицы элементов.

**Изотоп-спиновая зависимость ядерного потенциала.** При средних возбуждениях ядер, возникающих в процессе неупругого рассеяния быстрых нейтронов, оболочечные эффекты связаны не только с плотностью уровней, но и с положением первых возбужденных состояний, которые в сильной степени зависят от числа нуклонов в ядре.

Процессы взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами описываются с помощью оптической модели ядра, применение которой к расчетам упругого и неупругого рассеяния дает результаты, совпадающие только в общих чертах с экспериментальными данными. Более детальная проверка этой модели и ее возможностей для расчета недоступных измерениям нейтронных сечений стала возможной только после проведения измерений упругого и неупругого рассеяния на разделенных изотопах нейтронно-спектрометрическими методами.

Как известно, для исследований спектров быстрых нейтронов требуются спектрометры по времени пролета наносекундного диапазона. Для создания такого спектрометра был использован импульсный режим электростатического генератора ЭГ-5. Длительность импульсов на мишени составляла 1 нс, частота импульсов 4 МГц, средний ток 3—5 мкА, собственное временное разрешение электронного тракта спектрометра 2 нс. При помощи такого спектрометра снимали спектры нейтронов с начальной энергией 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4; 4,5 МэВ, рассеянных на ядрах изотопов под разными углами. После внесения поправок на ослабление потока в образце, многократное рассеяние и угловое разрешение с учетом геометрических условий эксперимента из набора спектральных кривых находили дифференциальные сечения упругого рассеяния, парциальные и дифференциальные сечения неупругого рассеяния с возбуждением нескольких уровней ядра. Таким методом были изучены  $^{48}\text{T}$ ,  $^{50}, ^{52}, ^{54}\text{Cr}$ ,  $^{54}, ^{56}\text{Fe}$ ,  $^{58}, ^{60}, ^{62}, ^{64}\text{Ni}$ ,  $^{64}, ^{66}, ^{68}\text{Zn}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ . Полученные результаты сравниваются с данными для естественных смесей изотопов, данными других авторов и теоретическими расчетами в рамках оптической модели и статистической теории ядерных реакций.

Как известно, в оптической модели ядерный потенциал часто берется в форме

$$V(r) = -V_c f(r) - iW_c g(r) + (V_{so} + iW_{so}) h(r) \sigma_l,$$

где

$$f(r) = \left[ 1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right) \right]^{-1},$$

$$g(r) = \exp\left[-\left(\frac{r-R}{b}\right)^2\right] h(r) = \left(\frac{\hbar}{\mu_{\pi} c}\right)^2 \frac{1}{r} \frac{df}{dr},$$

$V_c, W_c$  — действительная и мнимая части центрального потенциала;  $V_{so}, W_{so}$  — действительная и мнимая части потенциала спин-орбитальной связи;  $R = r_0 A^{1/3}$  — радиус ядра;  $a, b$  — параметры диффузности.

Параметры этого потенциала определяли сравнением экспериментальных данных по рассеянию и поляризации нейтронов и протонов на ядрах с расчетами по оптической модели ядра. Подгонку расчетных кривых под экспериментальные проводили с помощью ЭВМ путем вариации параметров. В отличие от физиков оксфордской и флоридской школ теоретической физики, которые пошли по пути увеличения числа параметров подгонки форм-фактора модели, мы исследовали физическую природу отдельных компонент ядерного потенциала. Этому послужило установление простой зависимости оптического потенциала от параметра симметрии ядра  $\alpha = N - Z/A$  при изучении взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами многих элементов. Тщательный анализ опубликованных экспериментальных данных показывает, что параметр диффузности  $a$  также является функцией параметра симметрии  $\alpha$ . В широком диапазоне массовых чисел ядер и энергии нейтронов  $E$  параметры потенциала аппроксимируются простыми формулами  $V_c = (48,7 - 16,9\alpha - 0,3 E)$  и  $a = (0,56 \div 0,813\alpha)$ .

Оптическая модель ядра теперь имеет не только эвристическое значение, но может быть использована для расчета нейтронных сечений для ядер тех изотопов, для которых невозможно выполнить измерения, например ядер многих осколков деления.

Большая экспериментальная информация о нейтронных сечениях систематически представлялась заинтересованным организациям для использования в расчетах реакторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гепперт-Майер М., Иенсен И. Г. Элементарная теория ядерных оболочек. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
2. Пасечник М. В. В кн.: Труды I Женевск. конф. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 319.
3. Pasechnik M. e. a. «J. Phys. Soc. Japan», 1968, v. 24, p. 101.



4. Вертебный В. П., Кальченко А. И., Пасечник М. В. В сб.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 1. Киев, «Наукова Думка», 1972, с. 176. «Ядерная физика», 1972, т. 16, с. 38.

5. Пасечник М. В. «Укр. физ. журн.», 1969, т. 14, с. 1958.

6. Струтинский В. М. С сб.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 1. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1974, с. 52.

7. Корж И. А. и др. «Укр. физ. журн.», 1977, т. 22, с. 111.

УДК 621.039.62.12

## Исследования тороидального удержания плазмы в Харьковском физико-техническом институте АН УССР

ТОЛОК В. Т.

**Воспоминания.** Мне довелось встречаться и работать с академиком Игорем Васильевичем Курчатовым в последний месяц его замечательной жизни. До этого я много слышал о нем в основном из области «научного фольклора», где трудно было отделить быль от легенды, читал его выступления на съездах КПСС, сессиях Верховного Совета СССР, перед избирателями. Рассказывал об Игоре Васильевиче директор нашего института, ныне покойный Кирилл Дмитриевич Синельников. Были они друзьями юности и состояли в родстве.

После известного выступления И. В. Курчатова в Англии, в Харуэлльской лаборатории, положившего начало международному сотрудничеству в области управляемого термоядерного синтеза, стала очевидной необходимость расширения фронта исследований.

В то время наш Харьковский физико-технический институт по инициативе И. В. Курчатова также присоединился к решению этой проблемы. Возглавил эти работы академик АН УССР К. Д. Синельников. Его эрудиция позволила в короткий срок развернуть работу по нескольким направлениям физики плазмы. Вместе с теоретиками из отдела академика АН УССР А. И. Ахизера он начал исследования по магнитной гидродинамике, физике плазменных потоков, ВЧ-свойствам плазмы и коллективным процессам, происходящим при взаимодействии с плазмой потоков заряженных частиц. Однако особенно широкий размах они получили после приезда Игоря Васильевича Курчатова в Харьков в январе 1960 г.

Тогда я, как и многие мои коллеги, увидел его впервые. Мы заметили, что Игорь Васильевич ходил с трудом, опирался на трость, однако он удивил нас своей жизнерадостностью и энергией. Он часто бывал в лабораториях института, живо интересовался нашей работой. Разговаривать с ним было легко и просто. Его благо-

желательность и простота в обращении с людьми располагали к откровенности. Осматривая лаборатории, он держал под руку собеседника, дававшего пояснения. Со стороны это было похоже на спокойный дружеский разговор старых знакомых.



Игорь Васильевич Курчатов и Кирилл Дмитриевич Синельников