

C 341  
Г-222

В.В. Пашкевич

2172

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ  
В НЕСФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
академик АН УССР

А.С. Давыдов

Дубна 1965

**В.В. Пашкевич**

**2172**

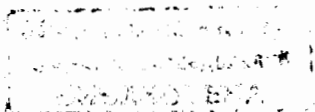
**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ  
В НЕСФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Научный руководитель -  
академик АН УССР**

**А.С. Давыдов**

**Дубна 1965**



Кулоновское возбуждение является важным средством изучения निकележащих состояний атомных ядер. Эксперименты по кулоновскому возбуждению обычно проводятся в таких условиях, когда энергия относительного движения сталкивающихся частиц не превосходит кулоновского барьера. Тогда вероятность проникновения налетающей частицы через кулоновский барьер мала и вкладом ядерных сил в возбуждение ядра-мишени можно пренебречь.

В этом случае возбуждение происходит с помощью хорошо изученного электрического взаимодействия. Если в качестве налетающих частиц используются легкие ядра (протоны,  $\alpha$ -частицы), то взаимодействие мало и его можно учесть в теории возмущения (см. работу Тер-Мартirosяна<sup>/1/</sup> и обзор Альдера и др.<sup>/2/</sup>). При этом вероятность возбуждения можно представить в виде двух сомножителей. Один из них зависит только от условий возбуждения, и для него можно написать точное выражение<sup>/1-2/</sup>. Другой определяется структурой ядра-мишени и выражается через приведенную вероятность электрического перехода, обычно вводимую при изучении радиационного перехода с возбужденного состояния в основное. Так как абсолютные значения приведенной вероятности перехода обычно не бывают известны, то кулоновское возбуждение является одним из лучших экспериментальных методов для ее определения.

С развитием экспериментальной техники появилась возможность ускорять тяжелые ионы, использование которых в качестве налетающих частиц позволяет возбудить значительно большее количество уровней, чем число уровней, доступных для изучения с помощью легких ядер. При этом электрическое поле налетающей тяжелой частицы производит большое воздействие на ядро-мишень, которое не поддается анализу в рамках теории возмущения.

Для расчета сечения возбуждения необходимо знание матричных элементов оператора перехода между всеми состояниями, которые с заметной вероятностью возбуждаются в процессе столкновения. Кроме того, в выражении для сечения многократного возбуждения нельзя разделить зависимость от структуры ядра и от условий возбуждения. Сечение начинает зависеть от многих параметров, и не только расчет, но и представление результатов в удобной форме становится затруднительным.

В связи с этим в расчетах по многократному кулоновскому возбуждению для описания структуры возбужденных состояний обычно используется некоторая модель, на основе которой вычисляются необходимые матричные элементы и далее сечение возбуждения. Из сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными можно сделать вывод о применимости модели для описания возбуждаемых уровней в ядре.

Основываясь на простой вращательной модели, Альдер и Уинтер<sup>/3/</sup> рассчитали вероятность многократного кулоновского возбуждения ротационного спектра сильно деформированного аксиально-симметричного ядра. При расчете использовалось так называемое приближение удара, т.е. пренебрегалось движением ядра во время столкновения. В той же работе даны результаты расчета вибрационного спектра сферически-симметричного ядра. Подробные расчеты по формулам, полученным Альдером и Уинтером, проведены Граetzером, Хуверманом и Берштейном<sup>/4/</sup>.

Возбуждение вращательных полос, построенных на некотором внутреннем состоянии, рассматривалось в работе Люткена и Уинтера<sup>/5/</sup>. Возбуждение всей полосы рассматривалось и в теории возмущения с учетом разности энергии между основным состоянием и внутренним возбужденным состоянием. Эффект кратности возбуждения учитывался при перераспределении вероятности возбуждения между различными уровнями вращательной полосы, разность энергий которых не учитывалась.

Указанные модели дают качественное объяснение некоторых общих свойства низкоэнергетических возбуждений ряда ядер, однако для описания каждого конкретного ядра в них необходимо вводить поправки.

Модель неаксиального ядра, предложенная в работах Давыдова и Филиппова<sup>/6/</sup> и Давыдова и Ростовского<sup>/7/</sup>, дает последовательное описание структуры низколежащих уровней ядра, причем используется малое число параметров. В работах<sup>/6-7/</sup> показано, что учет неаксиальной симметрии ядра значительно обогащает спектр возбужденных состояний. Кроме основной вращательной полосы, которая присутствует и в аксиально-симметричном ядре, появляются аномально-вращательные полосы.

Дальнейшее развитие модель получила в работах Давыдова и Чабана<sup>/8-9/</sup>, в которых учитывались продольные, т.е.  $\beta$ -колебания ядер. Квадрупольные возбуждения не-сферических ядер с учетом связи вращательного движения с продольными и поперечными колебаниями поверхности ядра рассматривались в работах Давыдова<sup>/10/</sup>, Давыдова, Ростовского и Чабана<sup>/11/</sup> и Давыдова и Ростовского<sup>/12/</sup>. В этих работах, а также в работе Давыдова<sup>/13/</sup> показано, что поперечные колебания в аксиально-симметричном ядре приводят к эффективной неаксиальности. Результаты работ<sup>/8-9/</sup> можно частично использовать для приближенного описания поперечных колебаний в аксиально-симметричном ядре, если отождествить рассматриваемую там неаксиальность с указанной эффективной неаксиальностью.

Так как параметр, описывающий неаксиальность формы ядерной поверхности, определяется при сравнении теоретических данных с экспериментальными, то тем самым косвенно учитывается связь вращения с поперечными колебаниями<sup>/13/</sup>.

Результаты теории неаксиальных ядер позволяют дать количественное описание положения ряда низколежащих уровней и приведенных вероятностей электромагнитных переходов между ними в ядрах, лежащих как в области сильной деформации, так и в переходной области. В связи с этим сравнение результатов исследования многократного кулоновского возбуждения ядер, описываемых с помощью этой модели, с экспериментальными данными может дать интересную информацию о низколежащих уровнях четно-четного ядра.

Особый интерес представляет теоретическое и экспериментальное изучение возбуждения уровней с большим спином, не доступных при однократном возбуждении, а также уровней, приближенно описываемых здесь как аномально-вращательные уровни жесткого неаксиального ротатора. Эти уровни сильно связаны с уровнями основной вращательной полосы, и поэтому описание их возбуждения необходимо проводить в рамках теории многократного кулоновского возбуждения.

Исследование многократного кулоновского возбуждения неаксиальных четно-четных ядер проведено в работах автора<sup>/14-15/</sup>. Результаты этих работ изложены в первой главе диссертации. В работе<sup>/14/</sup> дан метод расчета и приведены результаты вычислений вероятности возбуждения уровней основной и аномальной вращательных полос при рассеянии назад налетающей частицы. Этот частный случай рассеяния представляет особый интерес в связи с тем, что при рассеянии назад максимален эффект кратности возбуждения и для экспериментального изучения доступно наибольшее количество уровней. Кроме того, эти результаты можно использовать для приближенного вычисления вероятности возбуждения ядра при рассеянии частицы на углы, близкие к  $\pi$ . При рассеянии на малые углы вероятность возбуждения мала и ее можно оценивать по теории возмущения. Эти два метода имеют перекрывающиеся области применимости, что позволяет вычислять сечение рассеяния частицы на любые углы. На основе подробных таблиц, составленных в работе<sup>/14/</sup> (см. таблицы II-VI в диссертации), проведено приближенное вычисление дифференциального и полного сечений возбуждения неаксиального ядра<sup>/15/</sup>.

В работах<sup>/14-15/</sup> показано, что возбуждение основной вращательной полосы слабо зависит от параметра  $\gamma_0$ , описывающего неаксиальность формы ядерной поверхности.

Для них учет неаксиальности не дает заметных отклонений от предсказаний теории, развитой для аксиальных ядер. Сечение возбуждения аномальных уровней, в част-

ности второго уровня спина 2, чувствительно к изменению  $\gamma_0$ . Измеряя это сечение экспериментально, можно с помощью полученных результатов определить неаксиальность ядра, если эксперимент проводился в таких условиях, когда с достаточной точностью можно говорить о применимости приближения удара. Далее, с возрастанием угла рассеяния  $\theta$  при фиксированной энергии налетающей частицы или с ростом энергии при фиксированном  $\theta$  меняется характер зависимости сечения от  $\gamma_0$ , что выражается в пересечении кривых, соответствующих разным  $\gamma_0$ . В некоторых пределах изменения энергии и угла рассеяния сечение становится монотонной функцией  $\gamma_0$  и, следовательно, по известному сечению можно однозначно определить  $\gamma_0$ , лежащее в пределах от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ . Здесь не имеется в виду неоднозначность, которая связана со знаком квадрупольного момента. Вероятность многократного возбуждения уровней неаксиального ядра, вычисленная в приближении удара, как и спектр ядра, не изменяются при замене  $\gamma_0$  на  $60^\circ - \gamma_0$ . Кроме того, в работе /15/ показано, что границы применимости теории возмущения для описания возбуждения основной и аномальной вращательных полос приблизительно совпадают, что является свидетельством сильной связи возбуждения уровней аномально-вращательной полосы с уровнями основной вращательной полосы.

Исследование электромагнитных переходов в нечетных ядрах, которому посвящена вторая глава диссертации, значительно осложняется тем, что условие адиабатического приближения в нечетных ядрах, как правило, не выполняется.

Точнее, в нечетных ядрах следует различать два вида одночастичных возбуждений. Трехквaziчастичные возбуждения, связанные с разрывом пары, лежат высоко (по энергии), и их вполне можно рассматривать в адиабатическом приближении, как и двухквaziчастичные возбуждения в четно-четных ядрах. На возбуждение последнего неспаренного нуклона обычно требуется малая энергия, часто сравнимая с энергией вращательного движения. Поэтому нижайшие возбуждения состояния представляют собой сложную суперпозицию вращательно-одночастичных состояний.

Низколежащие состояния нечетных ядер исследовались в работах Давыдова и Сардаряна /16-17/ без разделения возбуждений на одночастичные и коллективные. Ядро представлялось системой, состоящей из остова и движущегося в его поле нуклона. Для описания остова использовались модельные представления, развитые при изучении четно-четного ядра. Движение внешнего нуклона рассматривалось приближенно, в предположении сохранения полного момента внешнего нуклона  $J$ .

В работах /16-17/, в которых форма остова предполагалась близкой к аксиально-симметричной, полученная последовательность спинов и энергии уровней в ряде ядер оказывается в согласии с результатами наблюдений.

Вероятность магнитных дипольных и электрических квадрупольных переходов в

ядрах с малой неаксиальностью изучалась в работах Давыдова и Сардаряна /16/ и Сардаряна /18/. В работах /16-18/ подтверждается важность отказа от адиабатического приближения в нечетных ядрах.

Обобщению модели нечетного ядра, развитой в работах /16-18/ на случай неаксиальной формы остова посвящена работа Сардаряна и автора /18/, в которой приведены результаты вычислений схемы энергетических уровней нечетного ядра.

Вероятность электромагнитных переходов в нечетном ядре с неаксиальным остовом вычислялась в работе автора /20/. Результаты работ /19-20/, изложенные во второй главе диссертации, сводятся к следующему. Последовательность спинов и значения энергии некоторых ядер с нечетным  $A$  могут быть удовлетворительно объяснены в рамках теории неаксиального ядра в предположении, что  $J$  является хорошим квантовым числом. Так, например, сравнение теоретических результатов по энергетическому спектру и приведенные вероятности электромагнитных переходов с экспериментальными данными, полученными методом кулоновского возбуждения в работах Даймонда, Элбека и Стивенса /21/ для ядра  $\text{Ho}^{165}$  и Гангского и Лемберга /22/ для ядра  $\text{Er}^{167}$ , позволяет трактовать вращательную полосу возбужденных состояний, построенную на уровне спина  $3/2$ , как аномально-вращательную полосу, обязанную своим происхождением эффективной неаксиальности остова.

В работе /20/ на основе анализа приведенных вероятностей электромагнитных переходов и вероятности многократного кулоновского возбуждения показано, что в нечетных ядрах возможно резкое изменение структуры уровней, проявляющееся в приведенных вероятностях электромагнитных переходов и вероятности кулоновского возбуждения и не сказывающееся заметным образом на энергетическом спектре ядра. С приближением  $\gamma_0$  к  $30^\circ$  нижайшие одночастичные уровни могут приобретать характерные особенности коллективных уровней. Отношение приведенных вероятностей E2-перехода в основное состояние к приведенной вероятности M1-перехода обычно возрастает на два-три порядка, и зависимость энергии от параметра неаксиальности становится подобной зависимости энергии аномально-вращательных уровней от  $\gamma_0$  в четно-четном ядре.

Экспериментальное обнаружение указанных закономерностей представляет интерес для развития теоретических представлений о движении нуклонов в нечетных ядрах.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работе Сардаряна и автора /19/ и в работах автора /14-15 и 20/ и были доложены на XIII, XIV и XV ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии.

## Л и т е р а т у р а

1. К.А. Гер-Мартirosян. ЖЭТФ, 22, 284 (1952).
2. K.Alder, A.Bohr, T.Nitta, M.Mottelson, A.Winther, Rev. Mod. Phys., 28, 432 (1956);  
См. перевод в сб. "Деформация атомных ядер", ИЛ, Москва, 1958.
3. K.Alder, A.Winther. Mat.Fys.Medd. Dan.Vid.Selsk., 32, no 8 (1960).
4. R.Graetzer, R.Noovaman, E.M.Bernstein. Nucl.Phys., 39, 124 (1962).
5. H.Laifsen, A.Winther. Mat.Fys.Skr.Dan.Vid.Selsk., 2, no 6 (1964).
6. А.С.Давыдов, Г.Ф.Филиппов. ЖЭТФ, 35, 440 (1958); Nucl.Phys., 8, 237 (1959).
7. А.С.Давыдов, В.С.Ростовский. ЖЭТФ, 36, 1788 (1959);  
Nucl.Phys., 12, 59 (1959).
8. А.С.Давыдов, А.А.Чабан. Nucl.Phys., 20, 499 (1960).
9. А.А.Чабан. ЖЭТФ, 38, 1630 (1960).
10. А.С.Давыдов. Вестник Моск. ун-та, сер. физ. и астрономии, № 1, 56 (1961).  
Nucl. Phys., 24, 682 (1961).
11. А.С.Давыдов, В.С.Ростовский, А.А.Чабан. Вестник Моск. ун-та, сер. физ. и астрономии, № 3, 66 (1961); Nucl.Phys., 27, 134 (1961).
12. А.С.Давыдов, В.С.Ростовский. Вестник Моск. ун-та, сер. физ. и астрономии, № 1, 64 (1965).
13. А.С.Давыдов. Изв. АН СССР, сер. физ., 28, 1578 (1964);
14. В.В.Пашкевич. Вестник Моск. ун-та, сер. физ. и астрономии, № 6, 65 (1963).
15. В.В.Пашкевич. Изв. АН СССР, сер. физ., 29, 249 (1965).
16. А.С.Давыдов, Р.А.Сардарян. ЖЭТФ, 40, 1429 (1961).
17. А.С.Давыдов, Р.А.Сардарян. Вестник Моск. ун-та, сер. физ. и астрономии, № 4, 72 (1962);  
Nucl.Phys. 37, 106 (1962).
18. Р.А.Сардарян. Вестник Моск. ун-та сер. физики и астрономии, № 4, 18 (1963).
19. В.В.Пашкевич, Р.А.Сардарян. Изв. АН СССР, сер. физ., 28, 1188 (1964).
20. В.В.Пашкевич. Преприят ОИЯИ, Р-2003, Дубна, 1965.
21. R.M.Diamond, R.E.Elvek, F.S.Stephens. Nucl.Phys., 43, 56 (1963).
22. Ю.П.Гангрский, И.Х.Лемберг. Изв. АН СССР, сер. физ., 26, 1027 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 мая 1965 г.