

Л. А. СЛИВ и Л. К. ПЕКЕР

## КОЛЛЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ И СВОЙСТВА НИЗКИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ УРОВНЕЙ ЯДРА

(Представлено академиком П. И. Лукирским 14 XII 1953)

В наших предыдущих работах (<sup>1-3</sup>) было показано, как при помощи ядерной модели независимо движущихся частиц, или, кратко, модели оболочек, можно объяснить процесс возникновения низлежащих возбужденных уровней в нечетных ядрах и определить их спины и четность. Было установлено существование двух систем ядерных возбужденных уровней — последовательной и дырочной, отличающихся друг от друга тем, что в первом случае в возбужденном состоянии находится нечетный нуклон, а во втором один из нуклонов нижележащего заполненного слоя. Обычно все низкие уровни ядра относятся к одной из указанных систем. Но у некоторых ядер встречаются вместе как последовательные, так и дырочные уровни, причем  $\gamma$ -переходов между уровнями разных систем не наблюдается.

Все перечисленные факты были объяснены, исходя из модели оболочек, и таким образом удалось привести в систему большой экспериментальный материал по спектроскопии атомных ядер. Однако некоторые факты оставались непонятными в модели оболочек, например появление уровней типа  $5/2^+$ ,  $7/2^+$  \* или свойства первого возбужденного уровня четно-четных ядер \*\*.

Неясно было также, почему модель оболочек годится для анализа низких возбужденных уровней в одних случаях до энергий возбуждения  $\sim 3$  Мэв ( $\text{Ca}^{41}$ ,  $\text{Rb}^{207}$ ), а в других до 50—100 кэв или совсем не годится (например,  $\text{Hf}^{177}$ ,  $\text{Er}^{171}$ ,  $\text{Tl}^{167}$ ).

Даже в случае основных состояний ядра, где модель оболочек в целом дает правильное описание всех его свойств, встретились непреодолимые трудности при объяснении большого квадрупольного момента некоторых ядер, отклонений в магнитных моментах и др.

В последнее время начали разрабатывать модель ядра, в которой наряду с движением отдельных частиц в некотором эффективном поле рассматривается коллективное движение частиц ядерного остова в форме вращения и колебания деформации (отклонения от сферичности) на поверхности ядра. Деформация вызывается действием нуклонов, находящихся вне заполненного слоя, и зависит от числа и характера движения этих наружных нуклонов (<sup>4</sup>). Такая модель, названная «коллективной», является промежуточной между одночастичной и капельной моделями ядра. Коллективная модель способна объяснить большой квадрупольный момент ядер и его зависимость от

\* Число указывает спин уровня, а знак  $\pm$  его четность. Относительно появления таких уровней см. (<sup>2</sup>).

\*\* В дальнейшем кратко четных ядер.

оболочечной структуры, дает правильное описание свойств первых возбужденных уровней четных ядер и ряда других тонких эффектов, которые оставались необъясненными в рамках прежних ядерных моделей (5).

В настоящей заметке мы хотим обсудить те следствия из коллективной модели, которые важны для анализа уровней нечетных ядер.

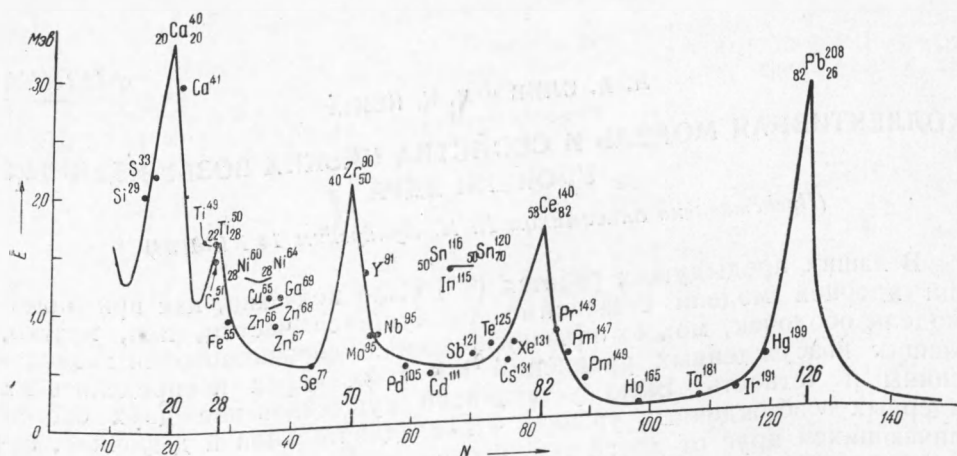


Рис. 1. Зависимость энергии первого возбужденного коллективного уровня от числа нейтронов в ядре. Сплошная линия проведена по усредненным данным для четных ядер (см. (6)). Черными кружочками нанесены энергии первых коллективных уровней нечетных ядер

Коллективные вращательные уровни, аналогичные первым уровням четных ядер, должны существовать и в нечетных ядрах, поскольку механизм их возникновения не зависит от того, четное ли число нуклонов в ядре или нечетное. Конечно, характер взаимодействия поверхностных нуклонов в ядре или нечетное. Конечно, характер взаимодействия поверхностности с одним наружным нуклоном и парой нуклонов может несколько отличаться (хотя бы из-за наличия спин-орбитального взаимодействия), и потому вращательный уровень в нечетном ядре по энергии не должен точно лежать между аналогичными уровнями соседних четных ядер. Все же следует ожидать, что возможные отклонения уровней нечетных ядер не исказят общей картины положения вращательных уровней. Выскажем предположение, что уровни  $7/2^+$ ,  $5/2^+$ , ..., не укладывавшиеся в рамки простой модели оболочек, являются вращательными уровнями коллективной модели. Для проверки предположения сравним по энергии эти уровни нечетных ядер ( $7/2^+$ ,  $5/2^+$ ) с аналогичными уровнями четных ядер. Результаты сравнения приведены в табл. 1 и, как видно, подтверждают высказанное выше предположение.

Еще более наглядным становится характер рассматриваемых уровней при сравнении зависимости энергии возбуждения первого коллективного уровня от числа нуклонов вне заполненной оболочки для четных и нечетных ядер. На рис. 1 сплошной кривой изображена энергия первого коллективного уровня как функция числа нейтронов  $N$  для четных ядер, а черными кружочками отмечены энергии первых коллективных уровней нечетных ядер. Из рис. 1 следует, что закономерности, наблюдаемые на коллективных уровнях четных ядер, полностью повторяются на коллективных уровнях нечетных ядер.

Наконец, возможен эксперимент, способный также подтвердить коллективный вращательный характер рассматриваемых уровней. Дело в том, что время жизни вращательных уровней четных ядер по изме-

рениям приблизительно в 100 раз меньше, чем для одночастичных уровней (5). То же самое следует ожидать для коллективных уровней нечетных ядер, и было бы интересно проверить это на опыте. Спин коллективного уровня  $J^* = J + I$ , где  $J$  — спин основного состояния ядра, а  $I$  — вращательный момент количества движения ядра, численно равный 2, 4, 6, ...

В свете новых данных многое становится понятным. Так, очевидно, все уровни, лежащие ниже первого коллективного уровня, будут одночастичными и должны описываться простой моделью оболочек. Первый коллективный уровень лежит высоко у ядер с заполненными оболочками или близких к этому (см. рис. 1) и низко у ядер с незастроенными протонными и нейтронными оболочками.

Таблица 1

| Четно-четные ядра | Энергия первого возбужденного уровня в кэВ | Нечетные ядра     | Энергия первого коллективного уровня в кэВ | Спины и четности | Четно-четные ядра | Энергия первого возбужденного уровня в кэВ | Нечетные ядра     | Энергия первого коллективного уровня в кэВ | Спины и четности |
|-------------------|--------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------|
| Si <sup>28</sup>  | 1800                                       | Si <sup>29</sup>  | 2027                                       |                  | Xe <sup>130</sup> | 537                                        | Xe <sup>131</sup> | 638                                        | 7/2+             |
| Si <sup>30</sup>  | 2300                                       |                   |                                            |                  | Xe <sup>132</sup> | 680                                        |                   |                                            |                  |
| S <sup>32</sup>   | 2250                                       | S <sup>33</sup>   | 2170                                       |                  | Hg <sup>198</sup> | 411                                        | Hg <sup>199</sup> | 457                                        | 5/2+             |
| S <sup>34</sup>   | 2130                                       |                   |                                            |                  | Ni <sup>64</sup>  | 1350                                       | Cu <sup>65</sup>  | 1120                                       | 5/2-             |
| Ca <sup>40</sup>  | 3350                                       | Ca <sup>41</sup>  | 2900                                       |                  | Zn <sup>66</sup>  | 1050                                       |                   |                                            |                  |
| Ca <sup>42</sup>  | 1510                                       |                   |                                            |                  | Zn <sup>68</sup>  | 1100                                       | Ga <sup>69</sup>  | 1120                                       | 5/2-             |
| Ti <sup>48</sup>  | 1330                                       | Ti <sup>49</sup>  | 1620                                       |                  | Mo <sup>96</sup>  | 770                                        | Nb <sup>95</sup>  | 758                                        | 7/2(5/2)-        |
| Ti <sup>50</sup>  | 1580                                       |                   |                                            |                  | Sn <sup>116</sup> | 1274                                       | In <sup>115</sup> | 1280                                       | 7/2+             |
| Cr <sup>52</sup>  | 1460                                       | Cr <sup>51</sup>  | 1420                                       |                  | Sn <sup>120</sup> | 1300                                       |                   |                                            |                  |
| Fe <sup>56</sup>  | 845                                        | Fe <sup>55</sup>  | 935                                        | 5/2-             | Te <sup>122</sup> | 568                                        | Sb <sup>121</sup> | 575                                        | 3/2+             |
| Zn <sup>66</sup>  | 1050                                       | Zn <sup>67</sup>  | 880                                        | 5/2(3/2)-        | Xe <sup>130</sup> | 537                                        | Cs <sup>131</sup> | 497                                        | 3/2+             |
| Zn <sup>68</sup>  | 1100                                       |                   |                                            |                  | Nd <sup>144</sup> | 696                                        | Pr <sup>143</sup> | 720                                        | 1/2+             |
| Se <sup>76</sup>  | 567                                        | Se <sup>77</sup>  | 520                                        | 3/2-             | Nd <sup>146</sup> | 490                                        | Pm <sup>147</sup> | 532                                        | 5/2+             |
| Mo <sup>94</sup>  | 870                                        | Mo <sup>95</sup>  | 762                                        | 7/2+             | Sm <sup>148</sup> | 540                                        |                   |                                            |                  |
| Mo <sup>96</sup>  | 770                                        |                   |                                            |                  | Sm <sup>150</sup> | 336                                        | Pm <sup>149</sup> | 312                                        | 5/2+             |
| Pd <sup>104</sup> | 560                                        | Pd <sup>105</sup> | 503                                        | 1/2+             | Er <sup>166</sup> | 80                                         | Ho <sup>165</sup> | 95                                         |                  |
| Pd <sup>106</sup> | 513                                        |                   |                                            |                  | Hf <sup>180</sup> | 93                                         | Ta <sup>181</sup> | 138                                        | 5/2+             |
| Cd <sup>110</sup> | 656                                        | Cd <sup>111</sup> | 420                                        | 7/2+             | Os <sup>190</sup> | 170                                        | Ir <sup>191</sup> | 170                                        | 9/2+             |
| Cd <sup>112</sup> | 620                                        |                   |                                            |                  |                   |                                            |                   |                                            |                  |
| Te <sup>124</sup> | 603                                        | Te <sup>125</sup> | 637                                        | 5/2+             |                   |                                            |                   |                                            |                  |
| Te <sup>126</sup> | 640                                        |                   |                                            |                  |                   |                                            |                   |                                            |                  |

Следовательно, энергетическая область одночастичных уровней, а значит, и область применимости простой модели оболочек, будет различной для разных ядер и ограничена энергетической поверхностью  $f(Z, N)$ , на которой лежат все первые коллективные уровни.

Теперь можно уточнить название «низкие возбужденные уровни» как такие, которые лежат ниже первого коллективного вращательного уровня.

Отклонение ядра от сферического характерно также для основного состояния, причем величина отклонения зависит от числа нуклонов в незаполненной оболочке и их квантовых состояний. Поэтому возбуждение низких одночастичных уровней происходит в уже деформированном ядре и величина деформации влияет на положение этих уровней. С ростом деформации ядра одночастичные уровни понижаются и достигают наибольшего понижения, когда наружная оболочка наполовину заполнена. Сама величина понижения неодинакова для уровней с различными значениями орбитального момента  $l$ , и этим

объясняется хорошо известное явление пересечения одночастичных уровней  $p_{3/2}$  и  $f_{3/2}$ ,  $p_{1/2}$  и  $g_{7/2}$  и т. д. Действие поверхности на положение одночастичных уровней наглядно видно из рассмотрения спин-орбитального расщепления возбужденных уровней ядра.

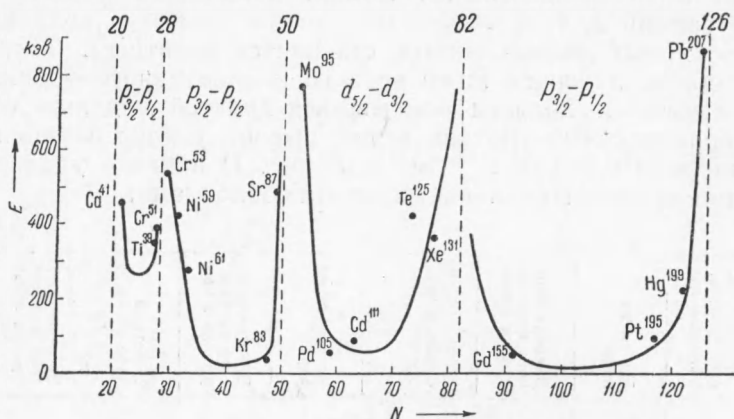


Рис. 2. Зависимость спин-орбитального расщепления уровней от состояния заполнения нейтронной оболочки

На рис. 2 представлена зависимость энергии спин-орбитального расщепления от состояния заполнения оболочки для двух значений орбитального момента  $l = 1, 2$  ( $p, d$ ). Расщепление уровней достигает максимального значения при заполненной оболочке и по величине довольно близко к значению, которое получают из реакции захвата нейтрона ядрами с заполненными оболочками. Тем самым устраняется расхождение в экспериментальных данных, полученных для спин-орбитального расщепления основного состояния и возбужденных состояний ядра <sup>(1)</sup>. При незаполненной оболочке деформация ядра уменьшает величину спин-орбитального расщепления.

В заключение следует отметить, что уровень типа  $7/2^+$  встречается среди изомеров, а для  ${}_{45}\text{Rh}^{103}$  является основным состоянием. Однако в данном случае уровень  $7/2^+$  не является коллективным вращательным уровнем, а получается в результате взаимодействия наружных нуклонов, находящихся в состоянии  $g_{7/2}$ , между собой, если учесть при этом несферичность ядра.

Ленинградский  
физико-технический институт  
Академии наук СССР

Поступило  
16 X 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Л. К. Пекер, Л. А. Слив, А. В. Золотавин, ДАН, **88**, 781 (1953).
- <sup>2</sup> Л. К. Пекер, Л. А. Слив, Изв. АН СССР, сер. физ., **17**, № 4, 411 (1953).
- <sup>3</sup> Л. А. Слив, Л. К. Пекер, ДАН, **92**, 277 (1953). <sup>4</sup> А. Bohr, Kgl. Danske Videnskab, Selskab Mat. fys. Medd., **26**, 14 (1952); D. L. Hill, J. A. Wheeler, Phys. Rev., **89**, 1102 (1953). <sup>5</sup> А. Bohr, R. Mottelson, *ibid.*, **89**, 316 (1953).
- <sup>6</sup> G. Scharf-Goldhaber, *ibid.*, **90**, 587 (1953).