

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6-84-241

М.П.Авотина*, Т.И.Крацикова

КВАДРУПОЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ
(СИСТЕМАТИКА)

Направлено в Оргкомитет
V Всесоюзного семинара по точным измерениям
в ядерной спектроскопии /Новгород,
23-25 мая 1984 г./

*ЛИЯФ АН СССР

1984

В предлагаемой статье сделана попытка систематизировать и выявить закономерности в поведении спектроскопических квадрупольных электрических моментов Q^{exp} всех ядер. Экспериментальные значения Q^{exp} и их погрешности взяты из банка Центра данных ЛИЯФ АН СССР^{1/1}, составленного по результатам оригинальных работ. Рассматривается зависимость значений квадрупольных моментов от массового числа A , спинов J , энергии уровней E и от гиромагнитных отношений g^{exp} .

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МАССОВОГО ЧИСЛА И СПИНОВ

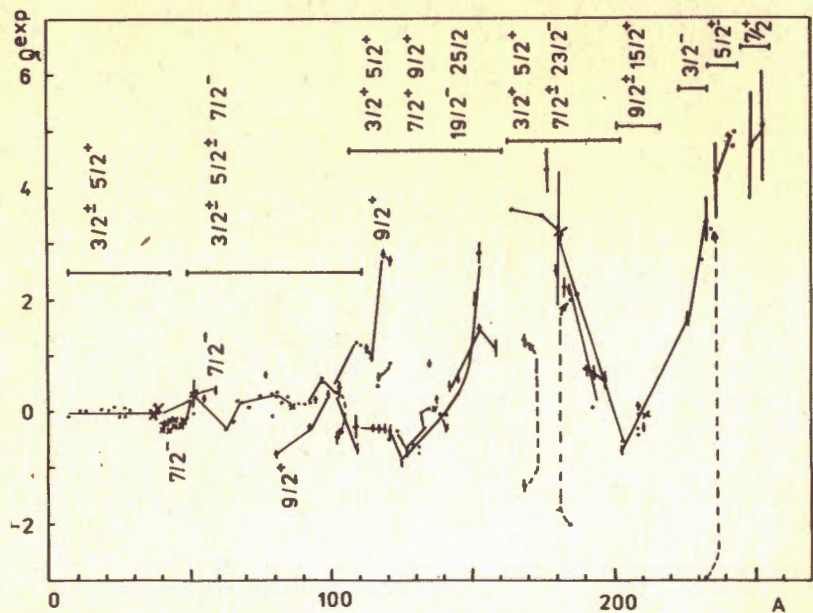
На рис. 1а-г показана зависимость Q^{exp} от A . Для точек, где "усов" нет, ошибки, как правило, меньше размеров точки. Пунктир со стрелкой в конце означает, что знак квадрупольного момента неизвестен или, по мнению авторов данной работы, сомнителен. Значения моментов уровней с одинаковыми спинами J и четностью π соединены одной кривой.

Из рисунков можно сделать следующие выводы:

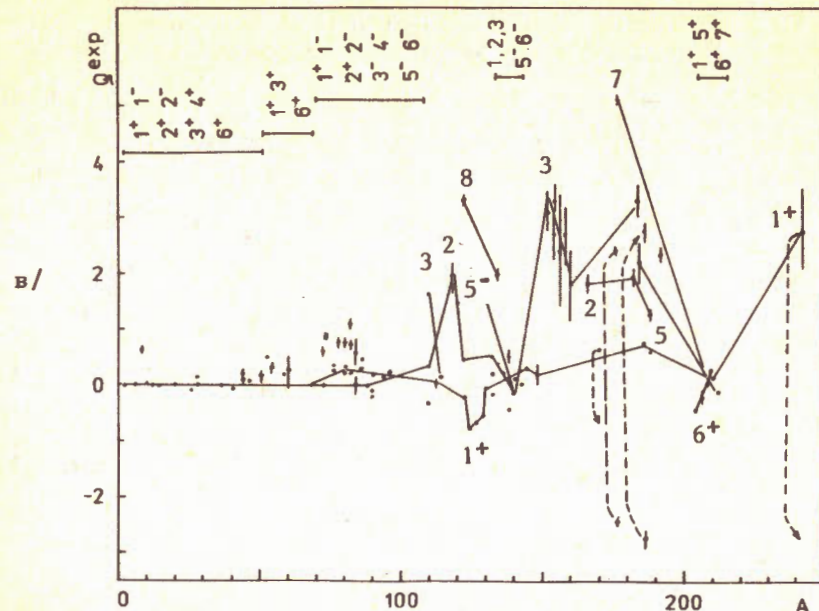
Нечетно-четные ядра /рис. 1а/. В области $A < 100$, $A \geq 121$ значения Q^{exp} для уровней разных спинов данного A совпадают. Совпадают они и для уровней разной четности. Резкая зависимость от спина и четности, возможно, наблюдается только в области сильно деформированных редкоземельных и близких к ним ядер, но для точного утверждения число точек на этом участке слишком мало.

В области $A = 109-121$ наблюдается существенно отличный от общей закономерности выброс двух точек для уровней с $J^\pi = 9/2^+$ изомеров $^{119,121}\text{Cs}$. Пока трудно сказать, насколько случаен выброс этих точек. Сферические, магические по N ядра имеют такой же Q^{exp} , как и соседние с ними немагические ядра.

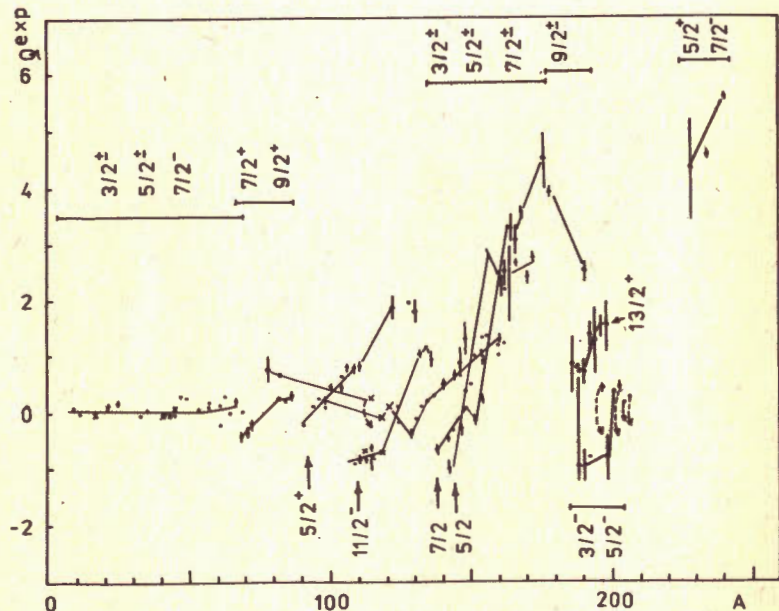
Четно-четные ядра /рис. 1б/. В области $A < 100$, $A \geq 129$, так же как и в нечетно-четных ядрах, величина Q^{exp} не зависит ни от спина, ни от четности. В области же $101 \leq A \leq 127$ наблюдается гораздо более заметное расхождение значений при разных спинах. Здесь проявляется влияние заполнения оболочки: при $Z = 50$, $A = 113-121$, для уровней $3/2^+$, $5/2^+$, $11/2^-$ существует излом в Q^{exp} . Моменты изомерных состояний $11/2^-$ и $13/2^+$ вообще не укладываются в общий ход кривых. Интересно отметить, что при $\bar{Z} \approx 50$ Q^{exp} уровней $11/2^-$ не падает, а растет. Надо иметь в виду, что в ядрах, для которых квадрупольные моменты исследованы только методом измерения рентгеновских лучей мезоатомов, вели-



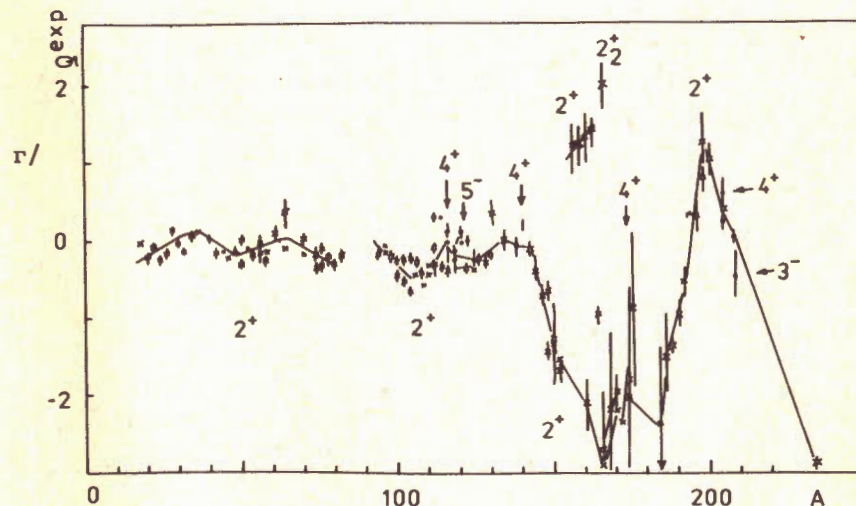
a/



b/



c/



d/

Рис.1 а/ Зависимость Q^{exp} от массового числа для нечетно-четных ядер. \bullet - ядра с $N \neq N_{\text{mag}}$, \times - ядра с $N = N_{\text{mag}}$; Точки на рис.1а-г, соответствующие одинаковым спинам уровней, соединены между собой. Пунктир со стрелкой в конце на рис.1а/ и в/ обозначает, что знак момента неизвестен или сомнителен. б/ Зависимость Q^{exp}

от массового числа для четно-нечетных ядер. \bullet - ядра с $Z \neq Z_{\text{mag}}$, \times - ядра с $Z = Z_{\text{mag}}$. в/ Зависимость Q^{exp} от массового числа для нечетно-нечетных ядер. г/ Зависимость Q^{exp} от массового числа для четно-четных ядер. \times - ядра с $Z \neq Z_{\text{mag}}$, $N \neq N_{\text{mag}}$, \bullet - ядра с $Z = Z_{\text{mag}}$ или/и/ $N = N_{\text{mag}}$.

чины Q^{exp} могут быть несколько занижены относительно результатов других методов. Пример этому дан в табл.1, взятой из работы [2].

Таблица 1

Результаты измерения квадрупольных моментов разными методами

Ядра	J	методы измерения			мезо- опт.	мезо- Мессб.
		мезоэвт.	оптич.	Мессб.		
^{175}Lu	7/2	3,74(5)	5,6(6)		0,67(7)	
^{191}Ir	3/2	0,86(4)		1,5(1)		0,57(5)
^{193}Ir	3/2	0,78(3)	1,5(1)		0,52(4)	

Нечетно-нечетные ядра /рис.1в/. Для дважды нечетных ядер обращает на себя внимание значительное преобладание ядер с $Q^{exp} > 0$.

В областях $A = 72-84$ и $A = 118-134$ пики на графике образуются за счет моментов изомерных или основных состояний ядер. Единственный в этой области провал связан с уровнями 1^+ в ядрах цезия. В области малых A ($A = 2 \div 120$) моменты уровней с $J = 1^+$ очень близки к нулю. В $A = 150 \div 192$ входят сильно деформированные ядра и ядра второй переходной области.

Примерно одинаковые величины квадрупольных моментов группы изотопов цезия с $A \sim 123$ /пик на рис.1в/ по сравнению с группой $A = 150 \div 192$ позволяют предположить, что в первом случае изменение моментов и деформация создаются только одним видом нуклонов, во втором - обоими. Рассмотрим зависимость квадрупольных моментов изотопов цезия от величины N . Как видно из рис.2, на котором объединены значения моментов уровней с одинаковой четностью, в области $N < 82$ произошло разделение уровней разной четности. При заполнении оболочки $N = 82$ это разделение исчезает. Большие моменты $Q^{exp} > +1,5$ принадлежат ядрам цезия, у которых нейтронная оболочка заполнена наполовину. Этот рисунок показывает, что на изотопах цезия можно наблюдать изменение деформации, возникающей только за счет нейтронов.

Значения Q^{exp} для $N = 82 + 1, +3, +5, +7$ /см. рис.2/ равны по модулю, но противоположны по знаку значениям Q^{exp} для $N = 82 - 1, -3, -5, -7$.

Четно-четные ядра /рис.1г/. Для четно-четных ядер характерно гораздо меньшее число уровней с $Q^{exp} > 0$ по сравнению с числом уровней с $Q^{exp} < 0$. В области $A < 140$ наблюдается слабая периодическая пульсация значений квадрупольных моментов. Интересно

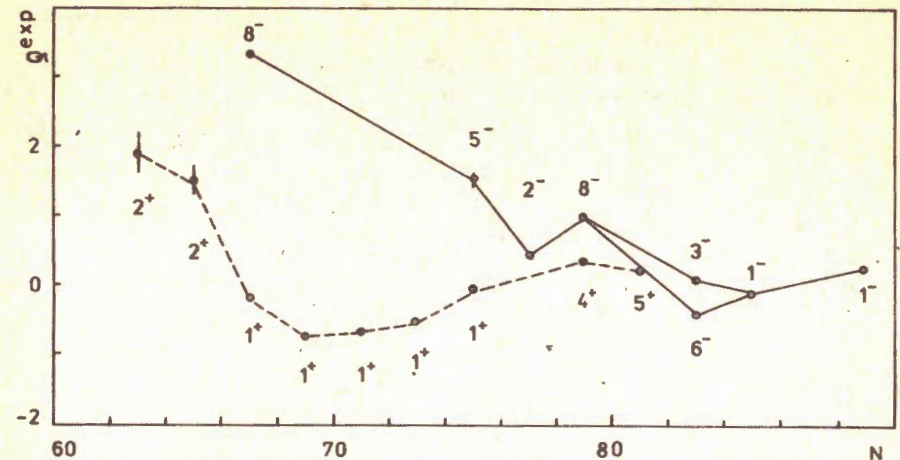


Рис.2. Зависимость экспериментальных квадрупольных моментов изотопов цезия от числа нейтронов. Значения моментов уровней одинаковой четности соединены между собой.

отметить, что такой же ход кривой проявляется в зависимости экспериментальных g -факторов (g^{exp}) от A /см. [3]/. Как и в ранее рассмотренных группах, последний пик, соответствующий около-сферическим ядрам с близкими к заполнению оболочками $Z = 82$ или $N = 126$, очевидно, обязан своим происхождением только одному виду нуклонов. Это ядра платины / $Z = 82-4$ / и ртути / $Z = 82-2$ /. Точки провала в области $A = 140 \div 190$ соответствуют моментам сильно деформированных ядер.

Анализируя рис.1а-г, можно сказать, что:

1/ в нечетных по A и в нечетно-нечетных ядрах наблюдаются пики в районе $A = 120, A = 160 \div 180, A > 230$. В четно-четных ядрах в области $A = 160 \div 180$ вместо пика наблюдается глубокая впадина, а в области $A = 200$ вместо большого провала виден довольно заметный пик;

2/ значения моментов при данном A , в основном, не зависят от спинов и четностей уровней.

МОМЕНТЫ УРОВНЕЙ ОДНОГО ЯДРА

Из всех известных в настоящее время ядер можно выбрать такие, у которых знак квадрупольного экспериментально определенного момента различен для уровней разной четности /см. табл.2/.

Из 18 представленных в табл.2 уровней по крайней мере 15 являются изомерными или основными состояниями. Десять уровней, для которых спин последнего протона j_p^{last} /двух протонов для четных по Z ядер/ равен $l + 1/2$ / l - орбитальный момент/, принадлежат

Таблица 2

Моменты уровней одного ядра

Ядро	E, МэВ	T _{1/2}	g^{π}	Q ^{exp}	Знак ^{a)}	Комментарий
I09 48Cd	0	453 дн.	5/2 ⁺	+0,78(10)	+	Z = 50 - 2
	0,469	10 мкс	11/2 ⁻	-0,92		
III 48Cd	0,247	85 нс	5/2 ⁺	+0,83(13)	+	Z = 50 - 2
	0,396	4,86 мин	11/2 ⁻	-0,85(9)		
I89 80Hg		7,7 мин	3/2 ⁻	-0,89(33)	+	Z = 82 - 2
		8,7 мин	13/2 ⁺	+0,78(24)		
I91 80Hg	0	50 мин	3/2 ⁻	-0,94(23)	+	Z = 82 - 2
	-0,14	50,8 мин	13/2 ⁺	+0,76(24)		
81 37Rb	0	4,58 ч	3/2 ⁻	+0,398(23)	-	N = 50 - 6
	0,085	32 мин	9/2 ⁺	-0,743(57)		
II0 49In	0	69 мин	2 ⁺	+0,36(2)	+	Z = 50 - 1
	0,121	(4,9 ч)	7 ⁺	-0,300(11)		
I32 53I	0,050	0,93 нс	3 ⁺	0,23(7)	-	Z = 50 + 3
	0,278	1,42 нс	1 ⁺	-0,170(6)		
I30 55Cs	0	29,9 мин	1 ⁺	-0,059(6)	-	Z = 50 + 5
		3,7 мин	5 ⁻	+1,45(5)		
I38 55Cs	0	32,2 мин	(3 ⁻)	+0,125(18)	-	Z = 50 + 5
	0,080	2,9 мин	6 ⁻	-0,40(3)		

^a Знак в выражении $j_p^{last} = \ell \pm 1/2$.

ядрам, у которых число протонов меньше магического на единицу /на два для четных по Z ядер/. Для уровней с $j_p^{last} = \ell - 1/2$ /кроме уровней ядра ⁸¹Rb / число протонов превышает магическое.

По-видимому, относительно этих ядер можно говорить об экспериментальном подтверждении изменения их формы от вытянутой к сплюснутой при переходе из одного состояния в другое.

У второй группы ядер /см. табл.3/, в которой число протонов в оболочке максимально удалено от ближайших магических чисел, наблюдается резкое различие величин Q^{exp} без изменения их знака. И здесь большинство ядер находятся в изомерных или основных состояниях. Не исключено, что табл.3 характеризует экспериментальное проявление неустойчивости величины деформации ядра и легкости ее изменения даже при небольших энергиях возбуждения.

Таблица 3

Квадрупольные моменты уровней, протонные оболочки которых заполнены наполовину

Ядро	E, МэВ	T _{1/2}	J ^π	Q ^{exp}
80 35Br	0	17,4 мин	1 ⁺	0,198(8)
	0,084	4,42 ч	5 ⁻	+0,75(5)
81 37Rb ^{a)}	0	4,58 ч	3/2 ⁻	+0,398(23)
	0,085	32 мин	9/2 ⁺	-0,743(57)
82 37Rb	0	1,25 мин	1 ⁺	+0,190(72)
	0,280	6,2 ч	5 ⁻	+1,01(12)
84 37Rb	0	32,4 дн.	2 ⁻	{ -0,015(35) +0,005(15)
	0,465	20,4 мин	6 ⁻	+0,57(27)
86 37Rb	0	18,8 дн.	2 ⁻	+0,19(3)
	0,5560	1,018 мин	6 ⁻	+0,37(10)
I55 64Gd	0	стабильно	3/2 ⁻	+1,30(2)
	0,0865	6,4 нс	5/2 ⁺	0,20(10)
I57 64Gd	0,146		7/2 ⁻	+1,28(2)
	0	стабильно	3/2 ⁻	+1,36(2)
I57 64Gd	0,064	0,46 мкс	5/2 ⁺	+2,9
	0	стабильно	5/2 ⁺	+2,468(29)
I61 66Dy	0,0746	3,2 нс	3/2 ⁻	+1,30(11)
	0,102		9/2 ⁺	+2,5

^a Ядро ⁸¹Rb можно отнести одновременно к табл.2 и 3.

Несколько обособленно стоят ядра ¹⁸⁶₈₈Er и ¹⁷⁸₇₁Lu /см. табл.4/. В первом из них максимально удалено от магического и число протонов, и число нейтронов, во втором - только число нейтронов. Видно, что моменты уровней этих ядер имеют разные знаки, как и изотопы первой из рассмотренных групп ядер /табл.2/.

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ

Если рассмотреть уровни ядер, для которых известны экспериментальные значения как электрических, так и магнитных моментов /g-факторов/, то оказывается, что они коррелируют друг с другом. На рис.3 показана зависимость Q^{exp} от g^{exp} тех же уровней. Из него видно, что значения Q^{exp} располагаются одина-

Таблица 4

Квадрупольные моменты уровней ^{166}Er и ^{176}Lu

Ядро	E, МэВ	$T_{1/2}$	J^π	Q^{exp}
$^{166}_{68}\text{Er}_{98}$	0,0806	1,87 нс	2^+	-2,9(10)
	0,265	0,12 нс	4^+	-2,7
	0,786	3,2 пс	2^+	+2,00(32)
$^{176}_{71}\text{Lu}_{105}$	0	стаб.	7^-	+5,069(60)
	0,290		1^-	-2,39(4)

ковым способом относительно оси $g^{\text{exp}} = 0$ для нечетных по N ядер и относительно $g^{\text{exp}} = 1$ - для нечетных по Z ядер. Эти оси разделяют, в основном, значения Q^{exp} уровней с $J = l + 1/2$ от $J = l - 1/2$.

Для нечетных по A ядер значения Q^{exp} ложатся, в основном, между линиями Шмидта /см. рис.4 и 5/.

Ядра с $Q^{\text{exp}} = Q^{\text{exp}}_{\text{min}}$. При работе с набором данных по Q^{exp} выяснилось, что в нечетных по N ядрах довольно интересную группу образуют ядра с минимальным значением $Q^{\text{exp}} = Q^{\text{exp}}_{\text{min}}$ /см. рис.6/.

Величина $Q^{\text{exp}}_{\text{min}}$, подсчитанная с помощью метода наименьших квадратов, оказалась равной -0,88 /см. табл.5/, что одинаково по величине, но противоположно по знаку с $\bar{g} = (g^{\text{free}}_p + g^{\text{free}}_n)/2 = +0,87969$. Здесь g^{free}_p и g^{free}_n - g-факторы свободных протона и нейтрона.

Из табл.5, в которой приведены характеристики уровней ядер с $Q^{\text{exp}}_{\text{min}}$ и уровней четно-четных остовов, следует, что минимальное значение спектроскопического квадрупольного момента имеют 10 четно-нечетных ядер, у пяти из которых $Z = 82-2$, у трех - $Z = 50-2$ и у одного $N = 82-1$. Во всех случаях это изомерные или основные состояния.

Для нечетных по Z ядер Q^{exp} , равное $Q^{\text{exp}}_{\text{min}}$, имеют только 6 ядер, причем 5 из них имеют $Z = 50+3$ и для трех такие моменты относятся к изомерному или основному состояниям. Ядро $^{185}_{77}\text{Ir} / E = 0, J^\pi = 5/2^- /$ не принималось во внимание, так как у него значение Q^{exp} резко противоречит всем остальным, по-видимому, либо из-за не очень точного определения внутреннего поля при измерении методом ядерной ориентации, либо из-за ошибки в знаке /см. рис.1а/. Для нечетно-четных ядер среднее значение $Q^{\text{exp}}_{\text{min}} = -0,74 \pm 0,06$ /надо заметить, что метод наименьших квадратов здесь не использовался, так как из-за несогласованности экспериментальных результатов между собой в качестве среднего следует

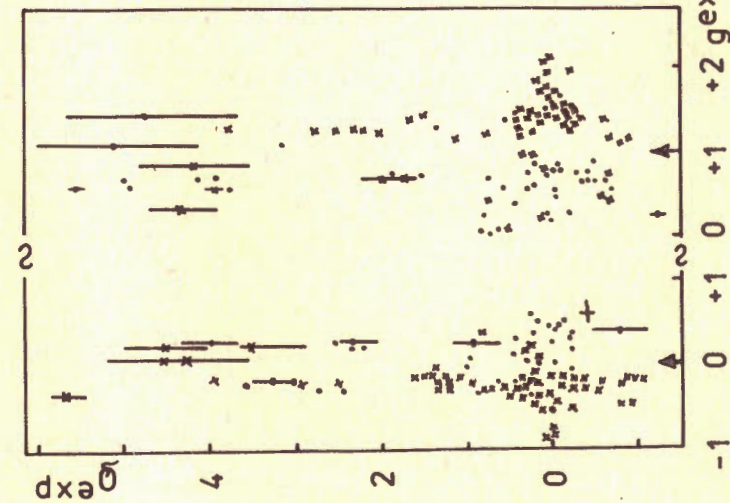


Рис.3. Зависимость Q^{exp} от экспериментальных g-факторов. Левая часть рисунка - четно-нечетные ядра, правая - нечетно-четные ядра, x - моменты уровней с $J = l + 1/2$, ● - моменты уровней с $J = l - 1/2$. Стрелками обозначены оси /см. текст/.

Рис.4. Зависимость Q^{exp} от спинов уровней нечетно-четных ядер. Сплошные кривые и обозначения около них на рис.4 и 5 относятся к линиям Шмидта. Пунктир со стрелкой на конце обозначает, что знак момента неизвестен или сомнителен.

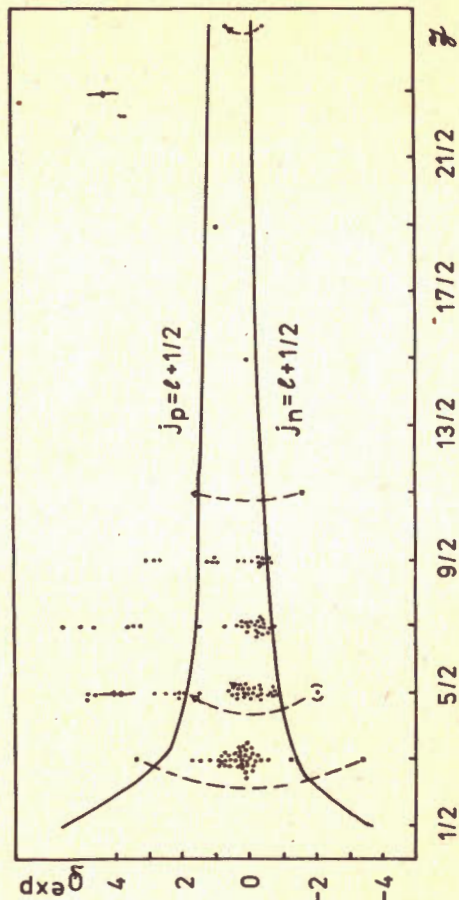


Таблица 5

Характеристики уровней нечетных по А ядер с минимальным значением квадрупольного момента и уровней четно-четных остовов

Ядро	E, МэВ	J ^π	Q ^{exp} /I/ е·б	g ^{exp} /I/ яд. магн.	Знак а)
I08 Cd	0,633	2 ⁺	-0,45(13)	+0,36(12) б)	
I09 Cd	0,469	II/2 ⁻	-0,92(15)	-0,19836	+
I10 Cd	0,658	2 ⁺	-0,40(4)	+0,36(12)	
I11 Cd	0,396	II/2 ⁻	-0,91(9)	-0,201(3)	+
I12 Cd	0,617	2 ⁺	-0,39(8)	+0,36(11)	
I13 Cd	0,264	II/2 ⁻	-0,79(8)	-0,19800	+
I14 Cd	0,558	2 ⁺	-0,38(4)	+0,36(12)	
I36 Ba	0,818	2 ⁺	-0,20(17)	-0,3(2) б)	
I37 Ba	0,662	II/2 ⁻	-0,98(13)	+0,62382	+
I38 Ba	1,426	2 ⁺	-0,09(15)	-0,3(2); +1,2(2) б)	
I43 Ba	0	5/2 ⁻	-0,99(15)		-
I87 Hg	0	3/2 ⁻	-0,88(23)	-0,389(3)	+
I89 Hg	7,7 мин	3/2 ⁻	-0,89(33)	-0,399(1)	+
I91 Hg	0	3/2	-0,94(23)		+
I93 Hg	0	3/2 ⁻	-0,77(18)	-0,417	+
I98 Hg	0,41177	2 ⁺	+0,74(12)	0,43(11)	
I99 Hg	0,1584	5/2 ⁻	-0,3(4)	+0,413(32)	-
200 Hg	0,368	2 ⁺	+1,04(11)	0,49(9)	
81 Rb	0,085	9/2 ⁺	-0,743(57)		+
I09 Ag	0,309	3/2 ⁻	-0,74(13)	0,45(15)	+
I25 I	0	5/2 ⁺	-0,39(5)	1,130(2)	+
I27 I	0	5/2 ⁺	-0,79(5)	+1,125(1)	+
	0,0576	7/2 ⁺	-0,70(5)	+0,59(7)	
I29 I	0,0268	5/2 ⁺	-0,68(10) в)	+1,14(2)	+

а) Знак в выражении $J_{n(p)}^{last} = \ell \pm 1/2$.

б) Взято из систематики по четно-четным ядрам /графическая оценка/.

в) Авторы оригинальной работы величину погрешности не приводят, здесь она оценена из систематики.

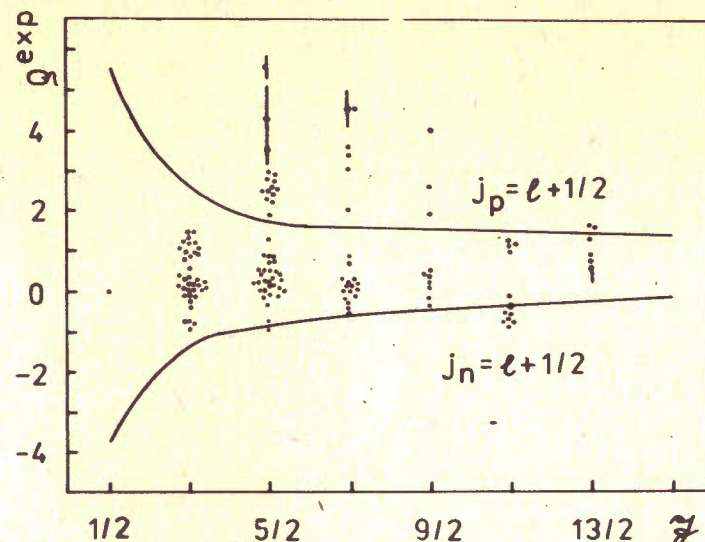


Рис. 5. Зависимость Q^{exp} от спинов уровней четно-нечетных ядер.

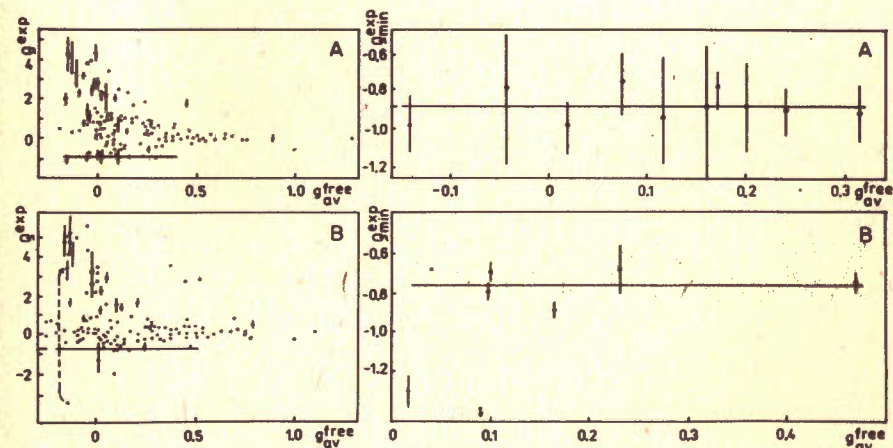


Рис. 6. Зависимость Q^{exp} от величины $g_{av}^{free} = g_p^{free} \frac{Z}{A} + g_n^{free} \frac{N}{A}$

для четно-нечетных /А/ и для нечетно-четных /В/ ядер. Отдельно /справа/ показаны только минимальные значения Q^{exp} .

брать не прямую линию, а ломаную, т.е. разные прямые для разных участков. Здесь приведено среднее арифметическое значение, а за величину погрешности принято среднее отклонение от него. Таким образом, и для нечетно-четных ядер среднее значение минимальных квадрупольных моментов близко по величине к \bar{g} , но противоположно ему по знаку.

Интересно, что максимальные значения квадрупольных моментов в нечетных по A ядрах численно совпадают /или очень близки/ со значением g -фактора свободного протона $g_p^{\text{free}} = 5,58569$ /см. рис.1,3,6/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авотина М.П., Золотавин А.В. Моменты основных и возбужденных состояний ядер. Атомиздат, М., 1979; Авотина М.П., Кондуров И.А., Сбитнева О.Н. Таблицы ядерных моментов и параметров деформации атомных ядер. Изд-во ЛИЯФ, Л., 1982.
2. Авотина М.П. Тезисы докладов XXXI Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Самарканд, 1981. "Наука", Л., 1981, с.294.
3. Avotina M.P. Czech.J.Phys., 1983, 33, p.257.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 мая 1984 года.

Авотина М.П., Крацикова Т.И. 6-84-241
Квадрупольные электрические моменты /систематика/

Проведена систематика экспериментальных значений электрических квадрупольных моментов для всех ядерных состояний. Рассмотрена зависимость этих моментов от массового числа, спина и четности уровней и от величины гиромагнитного отношения. Значения электрических квадрупольных моментов для данного ядра, в основном, не зависят от спинов и четностей уровней. Исключение составляют ядра, которые, по-видимому, изменяют форму при переходе из одного состояния в другое. Наблюдается корреляция между электрическим квадрупольным и магнитным дипольным моментами ядер.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Avotina M.P., Kracíková T.I. 6-84-241
Quadrupole Electric Moments (Systematics)

A systematic study of the experimental electric quadrupole moments has been made for all nuclear levels. The dependence of these moments on the mass number, level spin-parity, and on the value of the gyromagnetic ratio is considered. Electric quadrupole moments of a given nucleus are in general independent of the spins and parities of the levels except for nuclei which seem to change their shape from one level to another. A correlation between the electric quadrupole and magnetic dipole moments was observed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984