

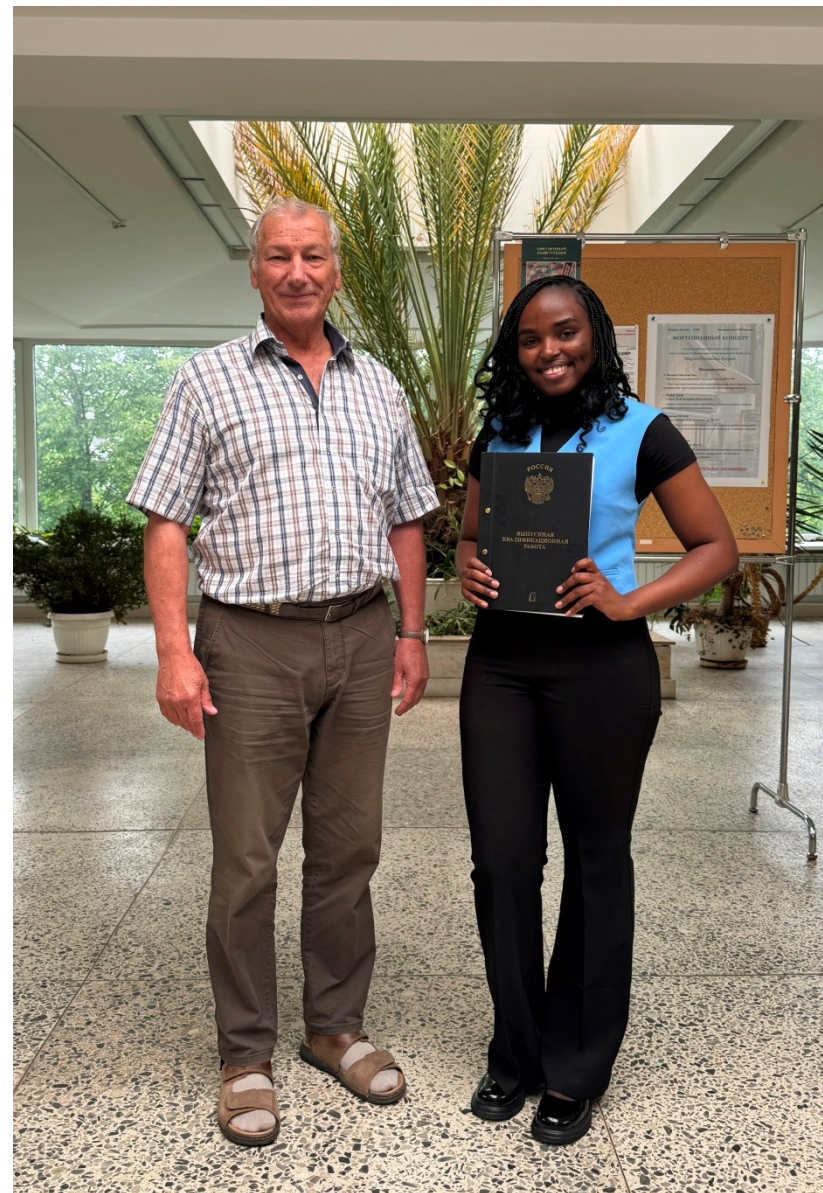
БАЗА ДАННЫХ И СИСТЕМАТИКА МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ЯДЕР

Л.П.Кабина, Э.М.Мбабази,
И.А.Митропольский

Об авторах



**Людмиле Петровне Кабиной
20 октября 2024 г.
исполнилось 80 лет.
Доброго здоровья!**



Методы измерения ядерных магнитных моментов

$$E = \cdot$$

- Атомно-лучевой магнитный резонанс (АВ)
- Атомно-лучевая лазерная спектроскопия (АВЛС)
- Двойной электронно-ядерный резонанс (ENDOR)
- Электронный парамагнитный резонанс (EPR)
- Рассеяние электронов (ES)
- Молекулярно-лучевой магнитный резонанс (МВ)
- Ядерный магнитный резонанс (NMR)

Экспериментальные значения

1. Авотина М.П., Золотавин А.В. Моменты основных и возбужденных состояний ядер. Атомиздат, М., 1979, ч.1 – 328 с.
2. Stone N.J.. Table of recommended nuclear magnetic dipole moments. IAEA, 2019, INDC(NDS)-0794 - 56 p.
3. ENSDF: Evaluated Nuclear Structure Data File.
<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.

База данных магнитных моментов MagDa

Magn_Mom_Interface v.09.07.2023

File Help

MagnMom Graphics

Database selection

- S - STONE
- E - ENSDF
- S
- E
- SUE
- S∩E
- S-S∩E
- E-S∩E

The conditions for selection of nuclides

Nuclides Data Eval. >

A: Any Odd Even

Z: Any Odd Even

N: Any Odd Even

A= Z= N=

A> Z> N>

A< Z< 20 N<

The conditions for selection of levels

T1/2(second)

E_excitation(keV)

Spin

E= 0

E>

E<

Query

Where Base Base = SUE
 Where Nuclides Z < 20 A_Odd Z_Odd
 Where Levels Eexc(keV) = 0
 FOUND 42 LEVELS FOR 41 NUCLIDES

Preview Text Query

Additional parameter of checked level

Found

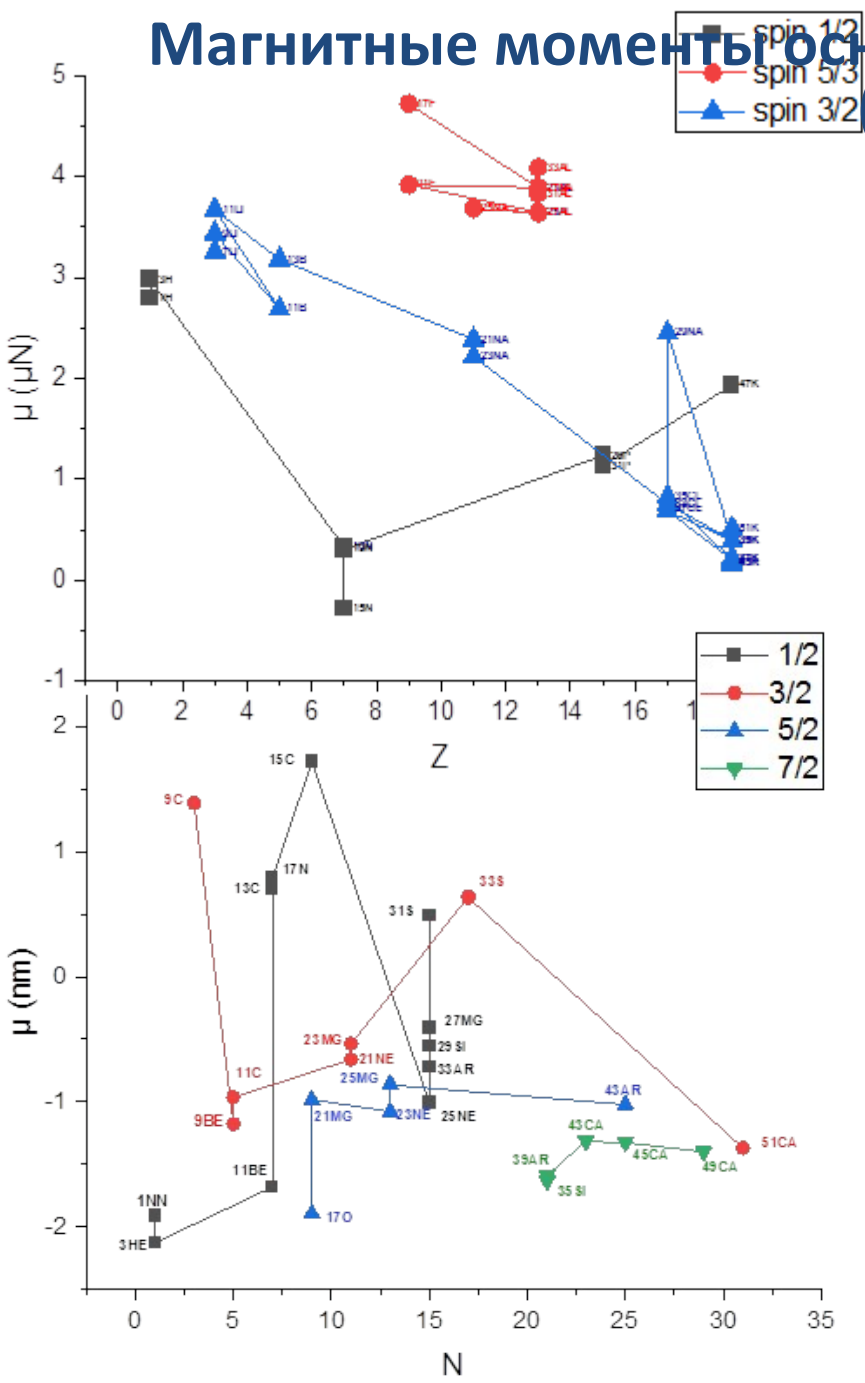
n	Z	A	Nucid	E,keV(S)	JPI(S)	T1/2(S)	Magn_mom(S)	E,keV(E)	JPI(E)	T1/2(E)	Magn_mom(E)	DataEval
<input type="checkbox"/> 2	1	1	1H	0	1/2+	stable	+2.792847351(9)	0	1/2+	STABLE	+2.792847351(28)	200601
<input type="checkbox"/> 4	1	3	3H	0	1/2+	12.33 y	+2.978962460(14)	0	1/2+	12.32 Y	+2.978962467(26)	201512
<input checked="" type="checkbox"/> 7	3	7	7Li	0	3/2-	stable	+3.256407(12)	0	3/2-	STABLE	+3.2564268(17)	200302
<input type="checkbox"/> 9	3	9	9Li	0	3/2-	178 ms	3.43666(6)	0	3/2-	178.3 MS	3.4391(6)	200602
<input type="checkbox"/> 10	3	11	11Li	0	3/2-	8.75 ms	+3.6711(2)	0	3/2-	8.75 MS	3.6673(25)	201203
<input type="checkbox"/> 16	5	11	11B	0	3/2-	stable	2.688378(1)	0	3/2-	STABLE	+2.6886489(10)	201203
<input type="checkbox"/> 18	5	13	13B	0	3/2-	17.3 ms	+3.1778(5)	0	3/2-	17.33 MS	+3.1778(5)	200006
<input type="checkbox"/> 20	5	15	15B	0	3/2-	9.9 ms	2.659(15)					
<input type="checkbox"/> 21	5	17	17B	0	(3/2-)	5.1 ms	2.55(2)					

FOUND 42 LEVELS FOR 41 NUCLIDES

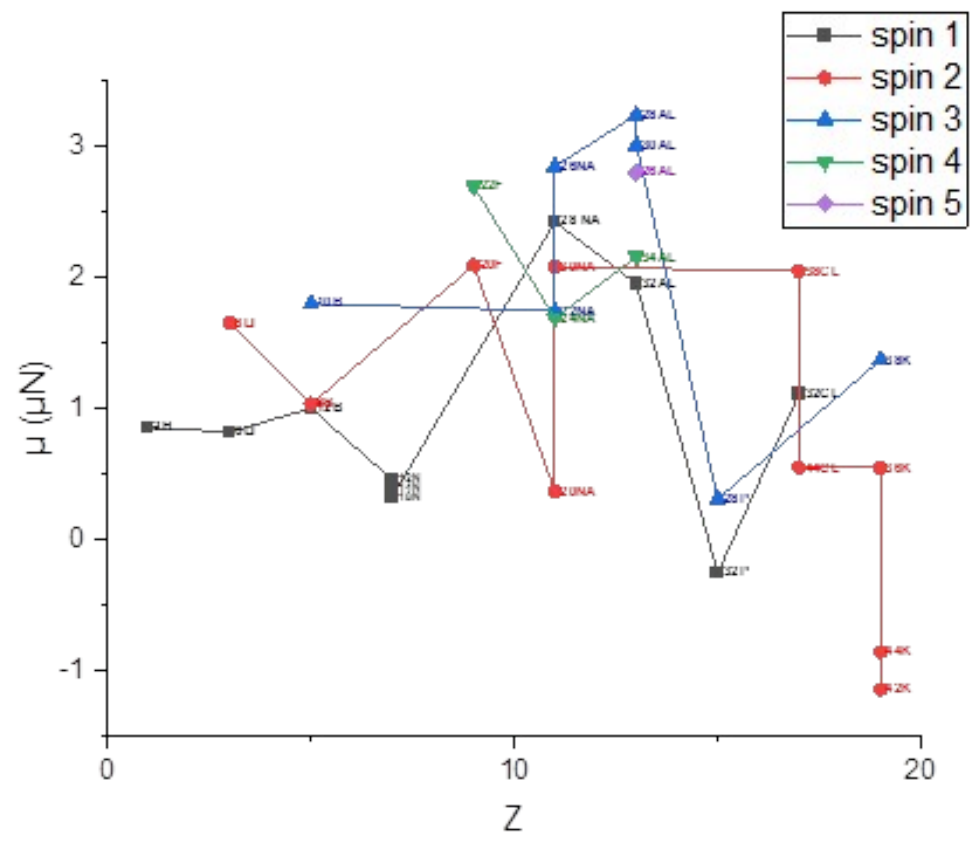
2558 магнитных моментов в 1246 нуклидах:

Z	Nuclid	A	N	T1/2	DT1/2	Spin/Parity	Method	μ_{N} STON	μ_{N} STON	μ_{N} STON	μ_{N} (ENSDF 2022 r)	μ_{N} (ENSDF 2022 r)	μ (База)	μ (База)	грамотное отношение(g)
			s	s				μ_{N}	μ_{N}	μ_{N}	μ_{N}	μ_{N}	μ_{N}	μ_{N}	$h/2\pi$
0	1n	1	1	613,9	0,6	1/2+	NMR, R	-1,9130427	5,00E-06	-1,9130427	5,00E-07	-1,9130427	5,00E-07	-3,8260854	
1	1H	1	0	stable		1/2+	M/N, R	2,792847351	9,00E-09	2,792847351	2,80E-05	2,792847351	2,80E-05	5,585694702	
1	2H	2	1	stable		1+	R	0,857438231	5,00E-09	0,85743823	2,40E-07	0,85743823	2,40E-07	0,85743823	
1	3H	3	2	3,89E+08	6,31E-05	1/2+	R	2,97896246	1,40E-08	2,978962467	2,60E-08	2,978962467	2,60E-08	5,957924934	
2	3He	3	1	stable		1/2+	R	-2,12762531	3,00E-08	-2,127625306	2,50E-07	-2,127625306	2,50E-07	-4,255250612	
3	6Li	6	3	stable		1+	NMR	0,822043	3,00E-06	0,82205667	2,60E-07	0,82205667	2,60E-07	0,82205667	
3	7Li	7	4	stable		3/2-	NMR	3,256407	1,20E-05	3,2564268	1,70E-06	3,2564268	1,70E-06	2,1709512	
3	8Li	8	5	0,8399	0,0009	2+	b-NMR	1,6535	2,00E-05	1,65356	1,80E-05	1,65356	1,80E-05	0,82678	
3	9Li	9	6	0,1783	0,0004	3/2-	b-NMR	3,43666	6,00E-05	3,4391	3,00E-04	3,4391	3,00E-04	2,292733333	
3	11Li	11	8	0,00875	0,00014	3/2-	b-NMR	3,6711	2,00E-04	3,6673	0,0025	3,6673	0,0025	2,444866667	
4	9Be	9	5	stable		3/2-	NMR	-1,17743	5,00E-06	-1,1778	9,00E-04	-1,1778	9,00E-04	-0,7852	
4	11Be	11	7	13,76	0,07	1/2+	b-NMR	-1,6816	8,00E-04	-1,6814	0,0009	-1,6814	0,0009	-3,3628	
5	8B	8	3	0,77	0,003	2+	b-NMR	1,0355	3,00E-04	1,0355	0,0003	1,0355	0,0003	0,51775	
5	10B	10	5	stable		3+	NMR	1,8004636	8,00E-07	1,80064478	6,00E-08	1,80064478	6,00E-08	0,600214927	
5	11B	11	6	stable		3/2-	NMR	2,688378	1,00E-06	2,6886489	1,00E-06	2,6886489	1,00E-06	1,7924326	
5	12B	12	7	0,0202	0,00002	1+	b-NMR	1,00306	1,50E-04	1,00306	0,00015	1,00306	0,00015	1,00306	
5	13B	13	8	0,0173	0,00017	3/2-	b-NMR	3,1778	5,00E-04	3,1778	5,00E-04	3,1778	5,00E-04	2,118533333	
5	14B	14	9	0,0125		2-	b-NMR	1,185	5,00E-03			1,185	5,00E-03	0,5925	
5	15B	15	10	0,0099		3/2-	b-NMR	2,659	1,50E-02			2,659	1,50E-02	1,772666667	
5	17B	16	11	0,0051		3/2-	b-NMR	2,55	2,00E-02			2,55	2,00E-02	1,7	
6	9C	9	3	0,1265	0,001	3/2-	b-NMR	-1,3914	5,00E-04	-1,3914	5,00E-04	-1,3914	5,00E-04	-0,9276	
6	11C	11	5	1222	0,84	3/2-	AB, R	-0,964	1,00E-03	-0,964	1,00E-03	-0,964	1,00E-03	-0,642666667	

Магнитные моменты основных состояний легких ядер ($Z \leq 20$)

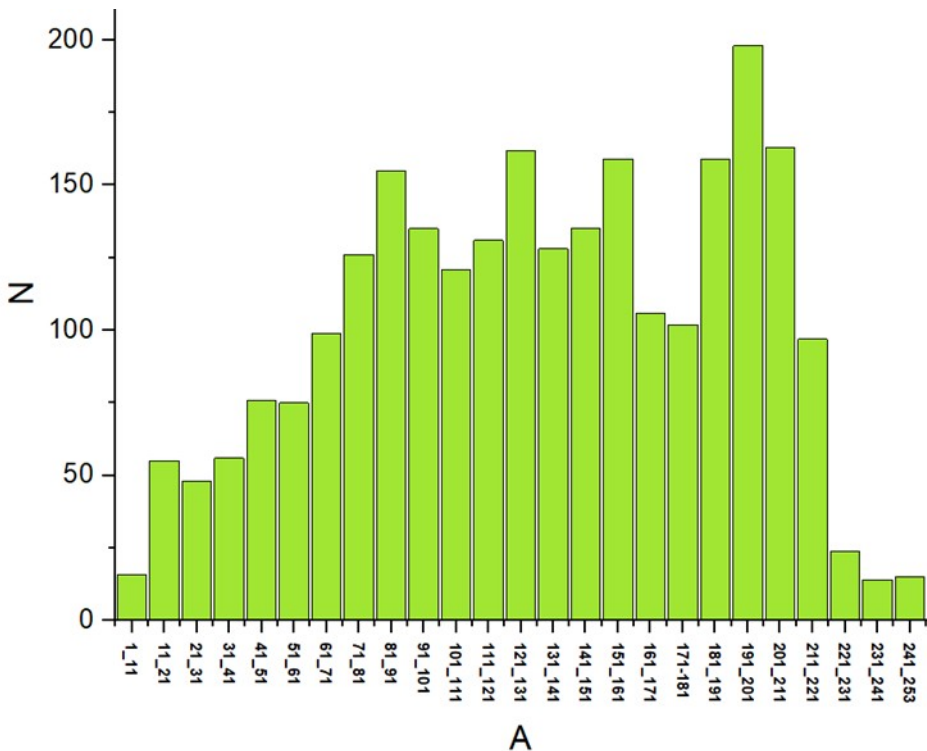


Нечетно-нечетные ядра ↓

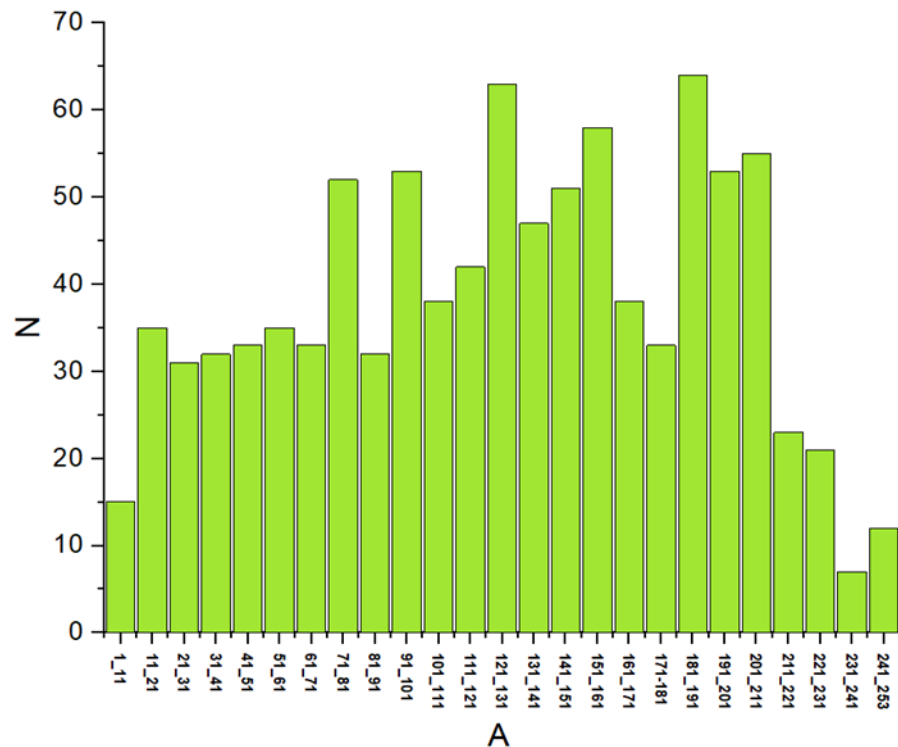


← A-нечетные ядра

Распределения магнитных моментов ядер по массовому числу

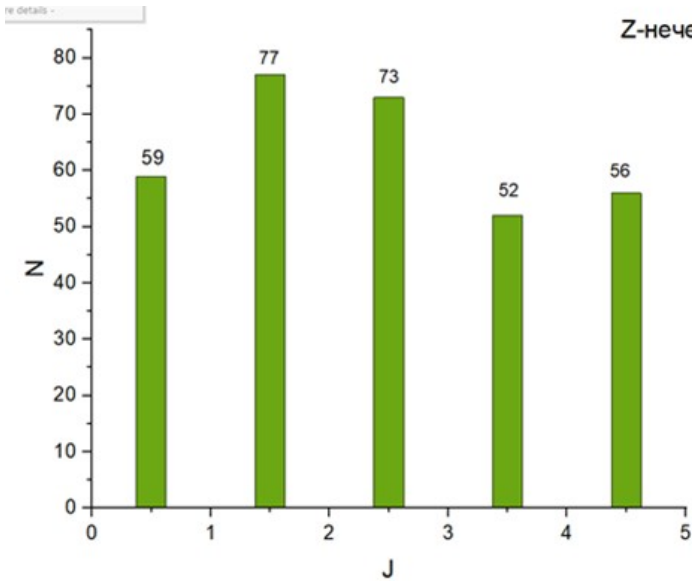


Все 2558 состояний
в 1246 нуклидах

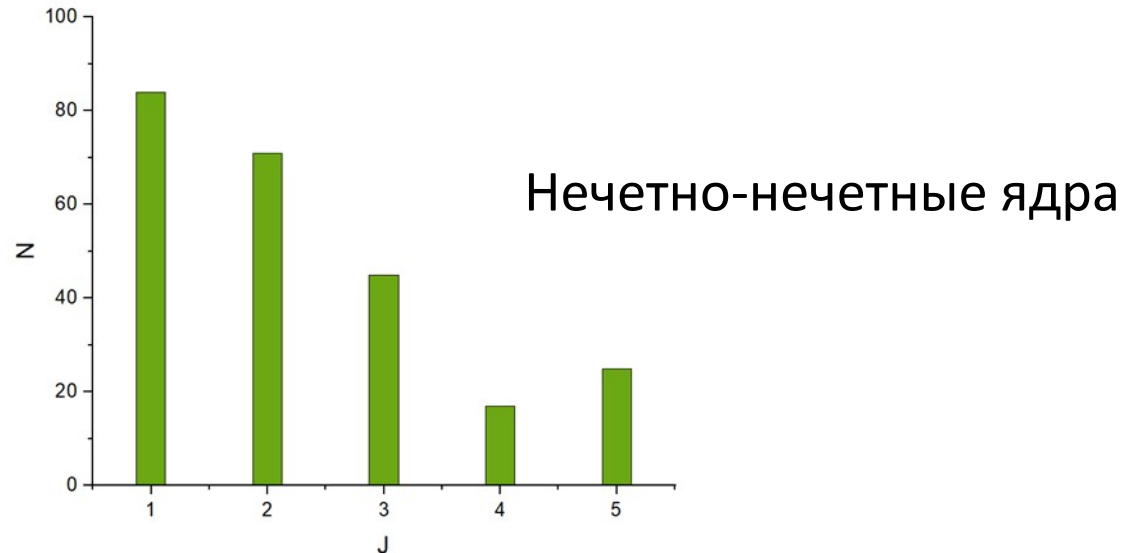
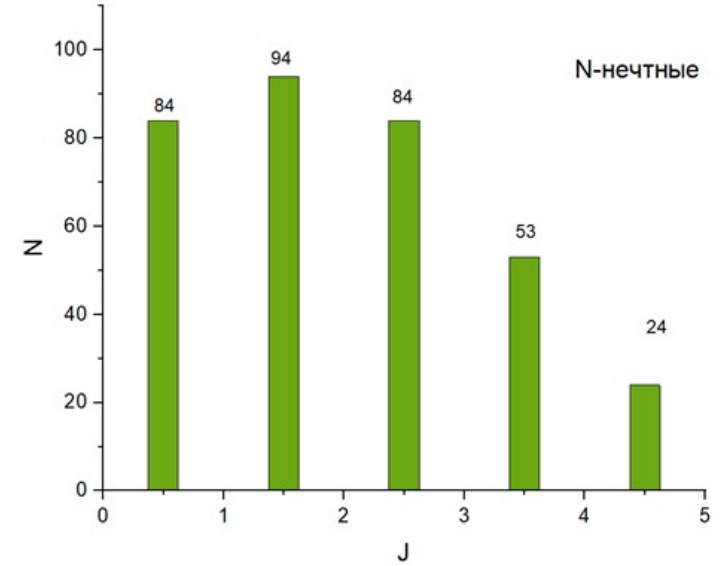


Только основные
состояния 906 нуклидов

Распределения магнитных моментов основных состояний по спину



А-нечетные
ядра



Магнитные моменты

Свободные нуклоны:

$$\mu_p = 2,792847356(23) \mu_N$$

$$\mu_n = -1,9130427(5) \mu_N$$

- ядерный магнетон Бора

Ядро как система движущихся нуклонов:

$$H_{int} = -\frac{1}{c} \int d^3 \mathbf{j}_\mu \cdot \mathbf{A}^\mu = i \int d^3 \left[\rho(\mathbf{r}, t) \Phi(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c} (\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)) \right] i$$

$$\Delta \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -4\pi \rho$$

$$\Delta \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

Магнитные моменты

$$H_{\text{int}} = \sum_{\lambda\mu} (a_{\lambda\mu} \mathbf{Q}_{\lambda\mu} + b_{\lambda\mu} \mathbf{M}_{\lambda\mu})$$

$$\mathbf{Q}_{\lambda\mu} = \int \rho(\vec{r}) r^\lambda Y_{\lambda\mu}(\vartheta, \varphi) d^3 r = e \sum_{i=1}^A \left(\frac{1}{2} - t_3^{(i)} \right) r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\vartheta_i, \varphi_i)$$

$$\mathbf{M}_{\lambda\mu} = \int \vec{\mu}(\vec{r}) \cdot \nabla (r^\lambda Y_{\lambda\mu}(\vartheta, \varphi)) d^3 r = \mu_N \sum_{i=1}^A \left\{ g_s^{(i)} \vec{s}_i + \frac{2}{\lambda+1} g_l^{(i)} \vec{l}_i \right\} \cdot \nabla (r_i^\lambda Y_{\lambda\mu}(\vartheta_i, \varphi_i))$$

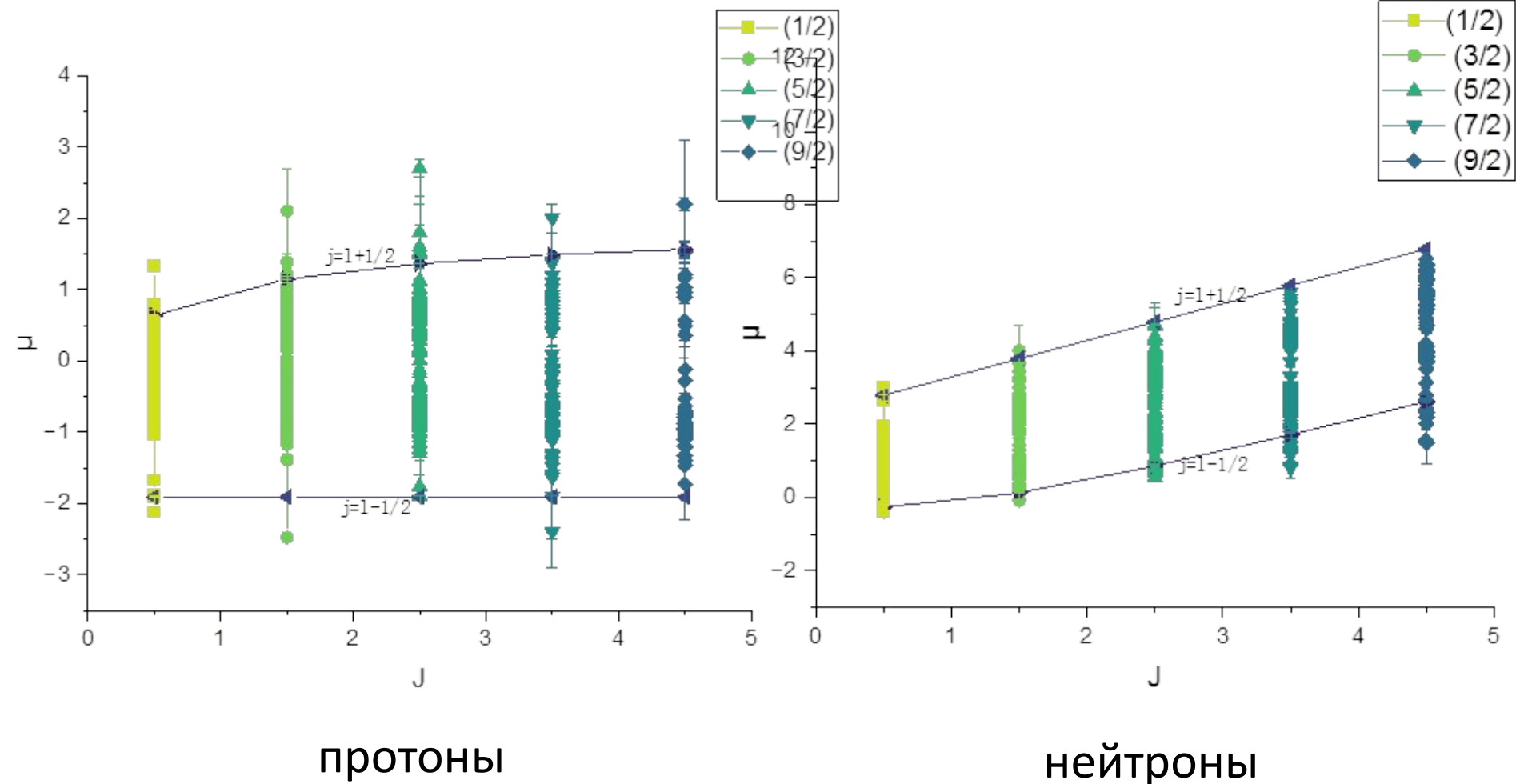
$$\mu = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \langle j, m=j | \quad 10 | j, m=j \rangle$$

Модель независимых частиц со сферической симметрией

$$\mu = \mu_N \begin{cases} \left(j - \frac{1}{2} \right) g_l + \frac{1}{2} g_s, & j = l + \frac{1}{2} \\ \frac{j}{j+1} \left[\left(j + \frac{3}{2} \right) g_l - \frac{1}{2} g_s \right] & j = l - \frac{1}{2} \end{cases}$$

орбиталь l, j	четность $(-1)^l$	протоны $g_l=1, g_s=5.586$	нейтроны $g_l=0, g_s=-3.826$
s 1/2	+	2.793	-1.913
p 3/2	-	3.793	-1.913
p 1/2	-	-0.264	0.638
d 5/2	+	4.793	-1.913
d 3/2	+	0.124	1.148
f 7/2	-	5.793	-1.913
f 5/2	-	0.862	1.366

Систематика магнитных моментов основных состояний A-нечетных ядер

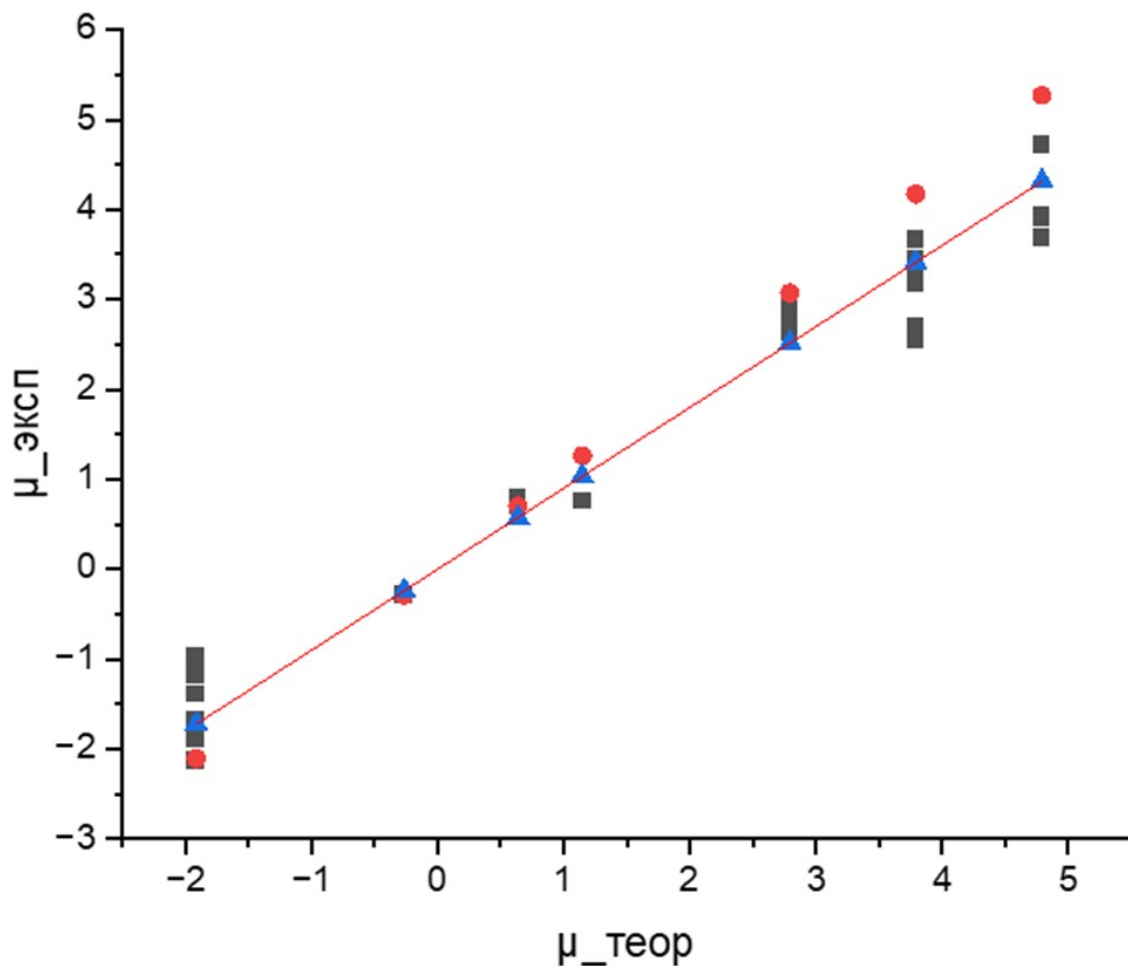


Линии Шмидта

Магнитные моменты легчайших A-нечетных ядер в основном состоянии

Ядро	Z	N	конфигураци я	спин		
	1	2			2.793	2.978
	2	1			-1.913	-2.127
	3	4			3.793	3.256
	3	6			3.793	3.439
	3	8			3.793	3.667
	6	7			0.638	0.702
	4	7	!		-1.913	-1.681
	5	6			3.793	2.688
	5	8			3.793	3.178

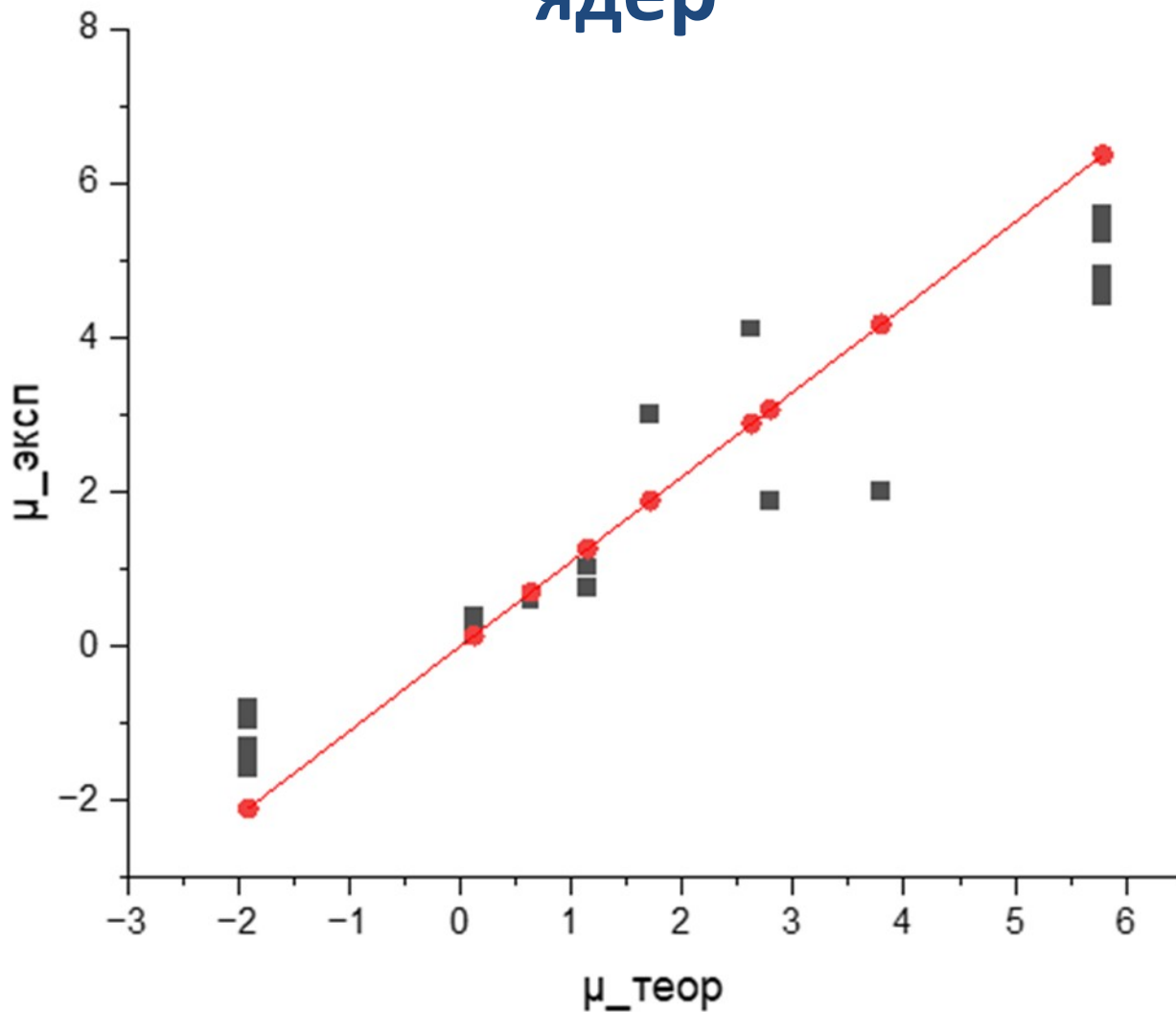
Сравнение магнитных моментов основных состояний легких ($Z \leq 11$) A-нечетных ядер



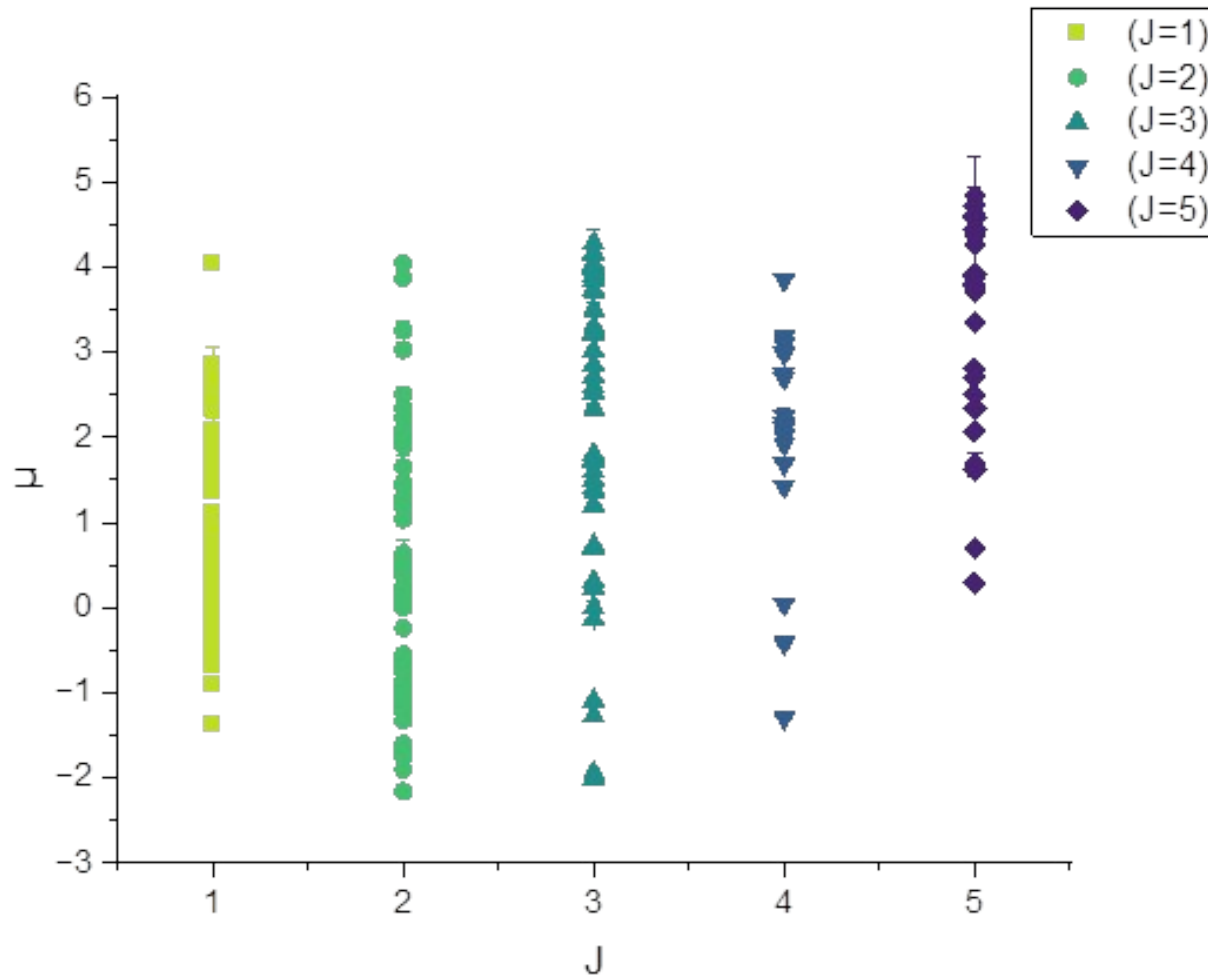
Магнитные моменты основных состояний A-нечетных околомагических ядер

Ядро	Z	N	Конфигурация	спин		
	7	8			2.793	2.978
	8	7			0.638	0.719
	8	9			-1.913	-1.893
	9	8			4.793	4.722
	19	20			0.124	0.391
	20	19			1.148	1.021
	20	21			-1.913	-1.594
	21	20			5.793	5.430
	81	126			2.793	1.876
	82	125			0.638	0.593
	83	126			2.624	4.11

Сравнение магнитных моментов основных состояний околомагических A-нечетных ядер



Магнитные моменты основных состояний нечетно-нечетных ядер



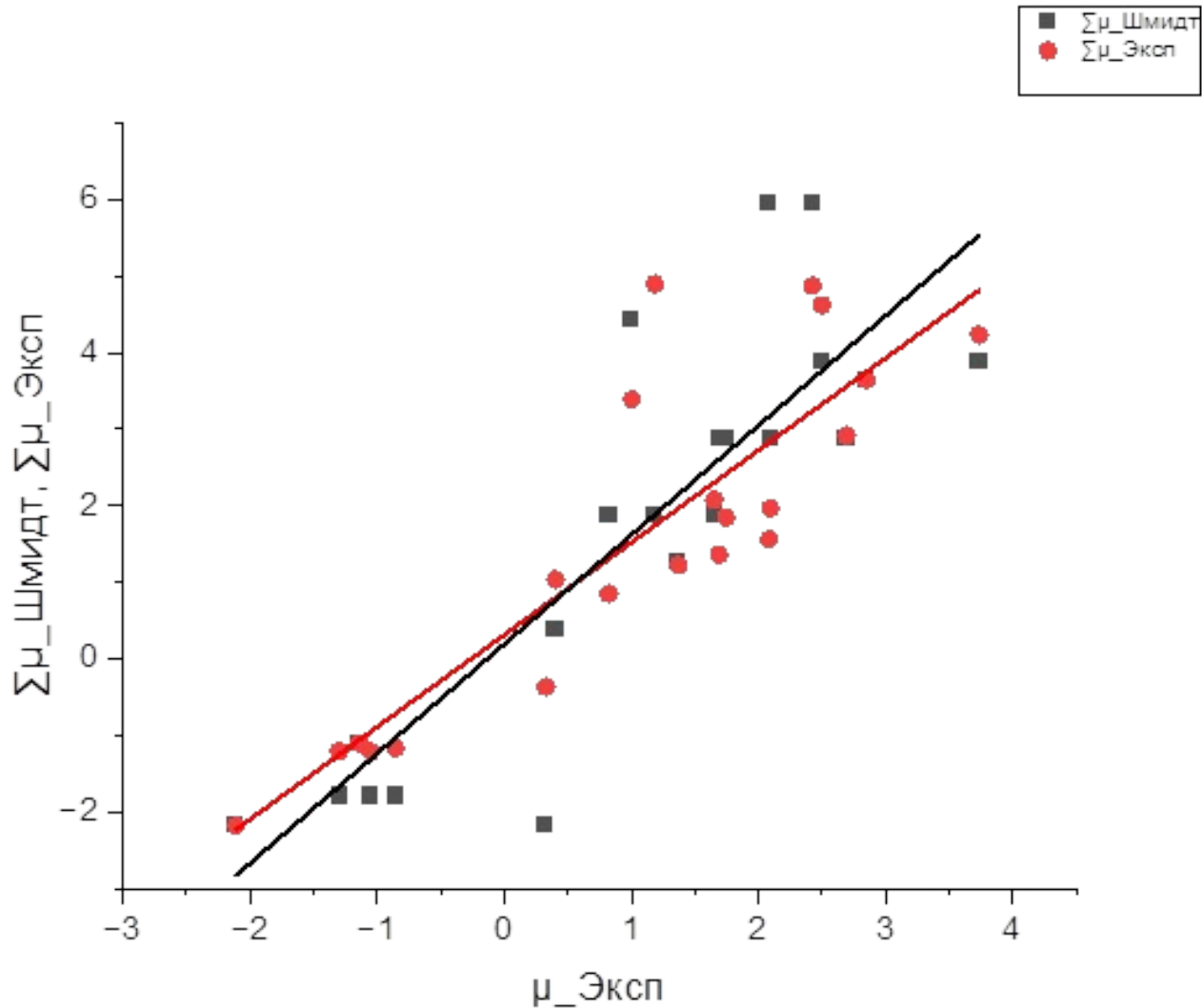
Магнитные моменты легких нечетно-нечетных ядер

Нуклиды		Магнитные моменты, Спины состояний		
		«расчет»	«эксперимент»	эксперимент
2H	1H x n	2.793-1.913=0.880 (1/2+)+(1/2+)=1+	2.793-1.913=0.880 (1/2+)+(1/2+)=1+	0.857 1+
6Li	3H x 3He	3.793-1.913=1.880 (3/2-)+(3/2-)=3+	2.973-2.128=0.851 (1/2+)+(1/2+)=1+	0.822 1+
8Li	7Li x 9Be	3.793-1.913=1.880 (3/2-)+(3/2-)=3+	3.256-1.177=2.079 (3/2-)+(3/2-)=3+	1.654 2+
8B	7B x 9C	3.793-1.913=1.880 (3/2-)+(3/2-)=3+	нет данных	1.036 2+
10B	9B x 11C	3.793-1.913=1.880 (3/2-)+(3/2-)=3+	нет данных	1.800 3+
14N	13N x 15O	-0.264+0.638=0.374 (1/2-)+(1/2-)=1+	0.322+0.719=1.041 (1/2-)+(1/2-)=1+	0.404 1+
16N	15N x 17O	-0.264-1.913=-2.177 (1/2-)+(5/2+)=3-	-0.283-1.894=-2.177 (1/2-)+(5/2+)=3-	-2.11 1-
20F	19F x 21Ne	4.793-1.913=2.880 (5/2+)+(5/2+)=5+	2.628-0.662=1.967 (1/2+)+(3/2+)=2+	2.093 2+

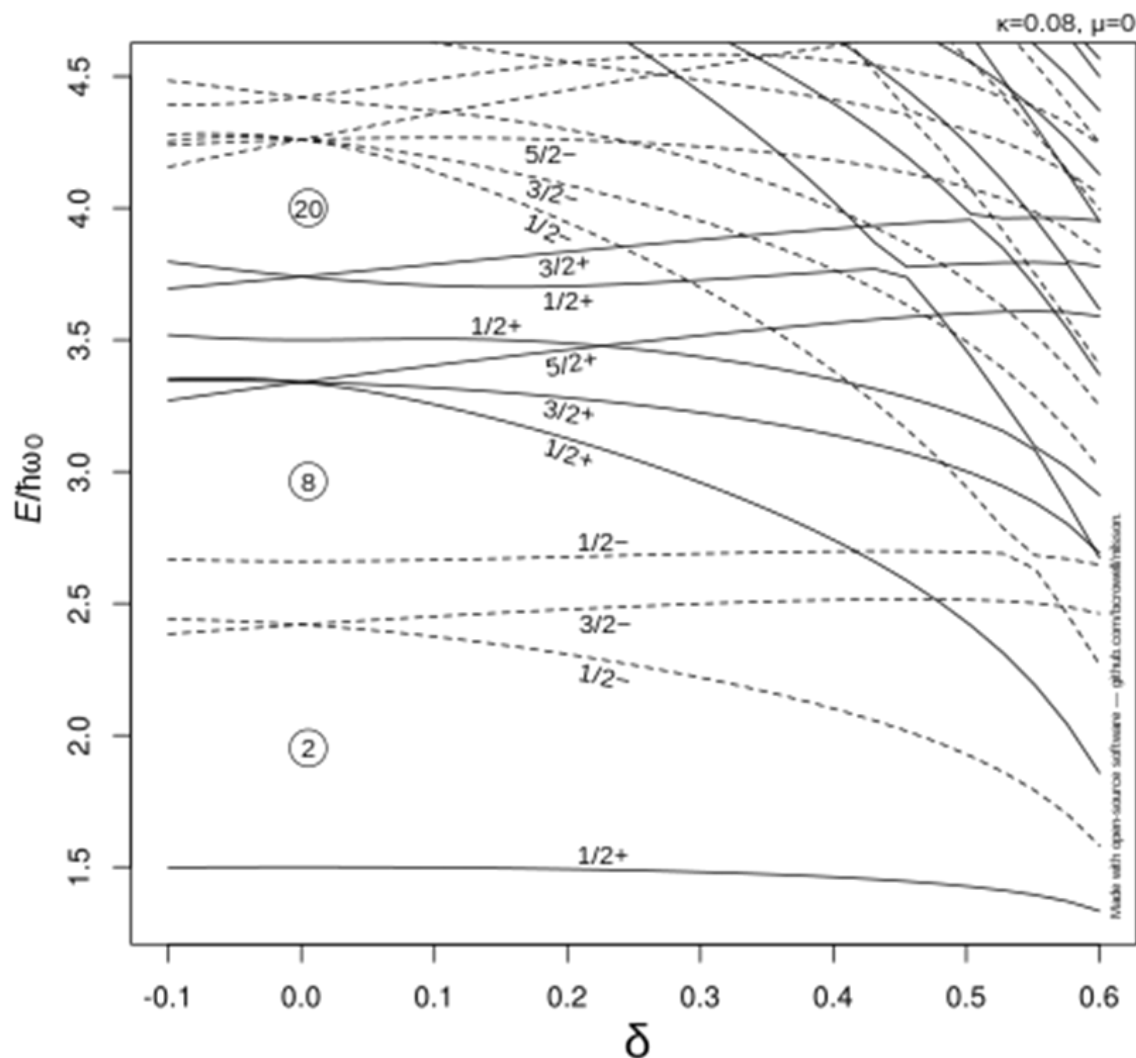
Магнитные моменты околомагических нечетно-нечетных ядер

Нуклиды		Магнитные моменты, Спины состояний		
		«расчет»	«эксперимент»	эксперимент
38K	37K x 39Ca	0.124+1.148=1.272 (3/2+)+(3/2+)=3+	0.203+1.022=1.225 (3/2+)+(3/2+)=3+	1.371 3+
40K	39K x 41Ca	0.124-1.913=-1.789 (3/2+)+(7/2-)=5-	0.391-1.595=-1.204 (3/2+)+(7/2-)=5-	-1.298 4-
42K	41K x 43Ca	0.124-1.913=-1.789 (3/2+)+(7/2-)=5-	0.215-1.317=-1.102 (3/2+)+(7/2-)=5-	-1.139 2-
44K	43K x 45Ca	0.124-1.913=-1.789 (3/2+)+(7/2-)=5-	0.163-1.327=-1.164 (3/2+)+(7/2-)=5-	-0.856 2-
46K	45K x 47Ca	0.124-1.913=-1.789 (3/2+)+(7/2-)=5-	0.173-1.380=-1.207 (3/2+)+(7/2-)=5-	-1.051 2-
46Sc	45Sc x 47Ti	5.793-1.913=3.880 (7/2-)+(7/2-)=7+	4.756-0.788=3.968 (7/2-)+(7/2-)=7+	3.03 4+
48Sc	47Sc x 49Ti	5.793-1.913=3.880 (7/2-)+(7/2-)=7+	5.34-1.104=4.236 (7/2-)+(7/2-)=7+	3.737 6+
50V	49V x 51Cr	5.793-1.913=3.880 (7/2-)+(7/2-)=7+	4.47-0.934=3.536 (7/2-)+(7/2-)=7+	3.346 6+

Сравнение методов вычисления магнитных моментов нечетно-нечетных ядер



Роль деформации в ядерном магнетизме

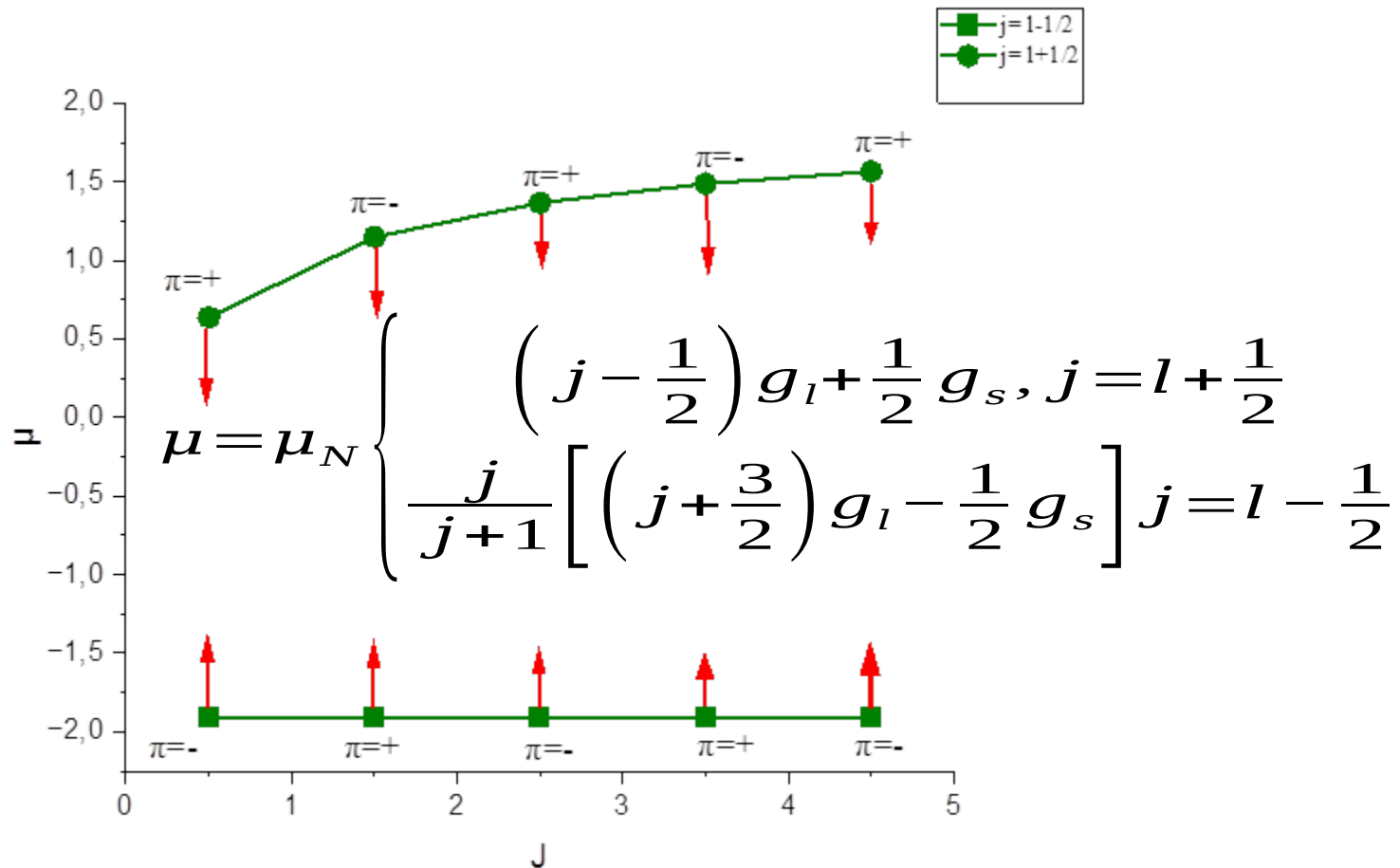


Деформация снимает вырождение по проекции углового момента

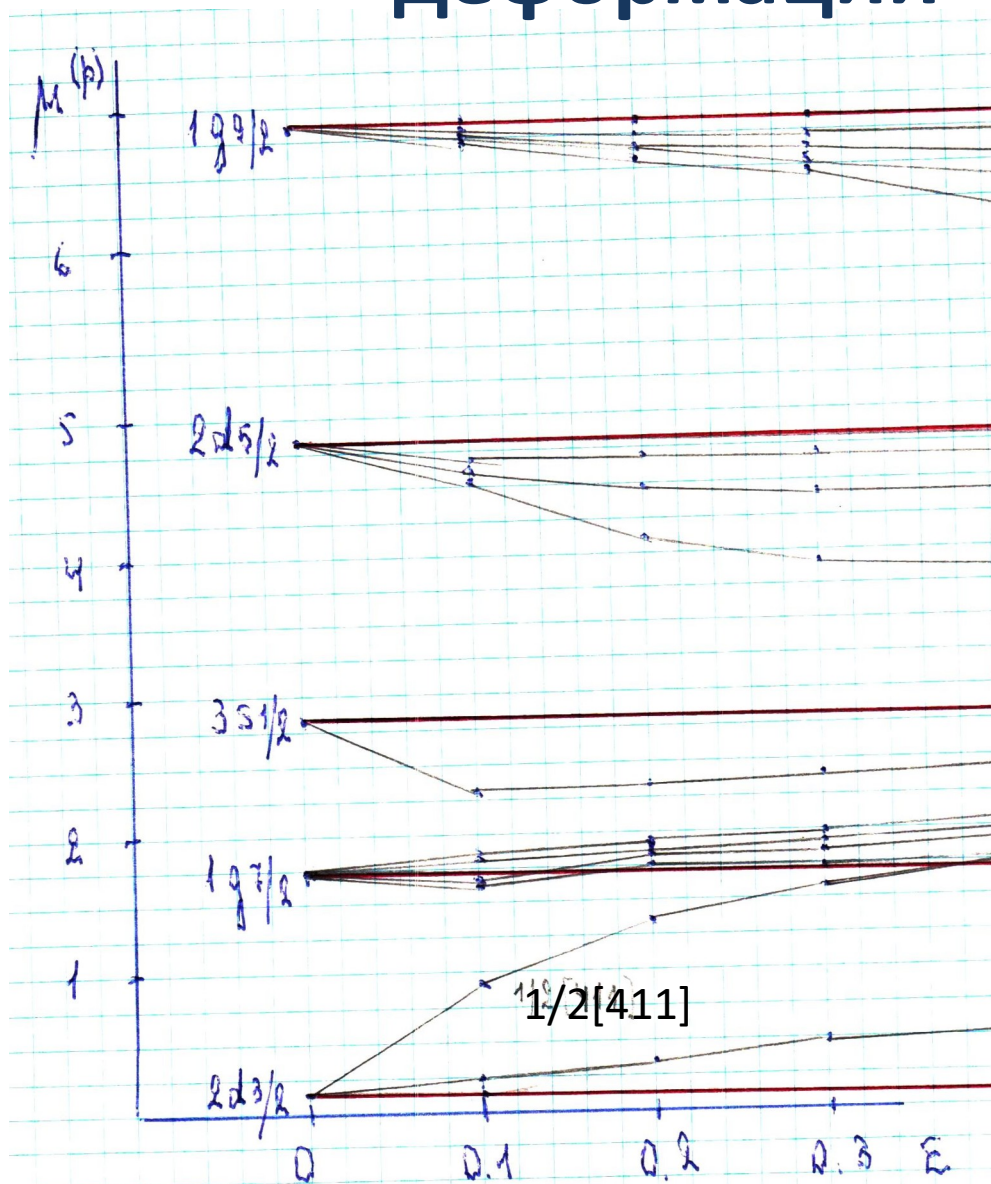
Влияние квадрупольной деформации на магнитные моменты ядерных состояний

$$\psi(\delta) = \sqrt{1 - a^2(\delta)} \varphi_l + a(\delta) \varphi_{l \pm 2}$$

$$\mu(\delta) = (1 - a^2) \mu_l + a^2 \mu_{l \pm 2} = \mu_l - a^2 (\mu_l - \mu_{l \pm 2})$$



Зависимость магнитных моментов от деформации



$9/2[404]$

$1/2[440]$

$5/2[402]$

$3/2[411]$

$1/2[420]$

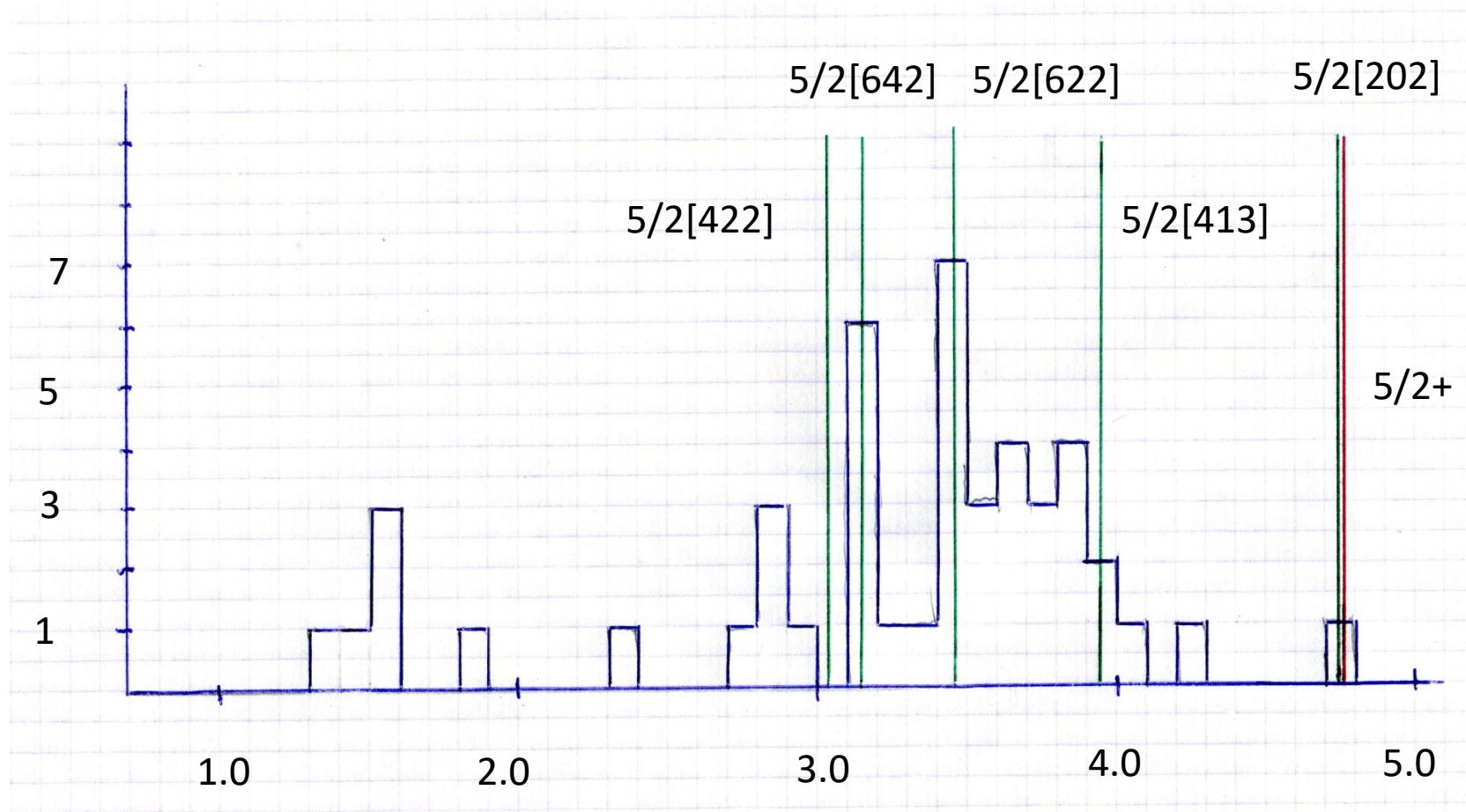
$1/2[400]$

$3/2[422]$

$3/2[402]$

$1/2[411]$

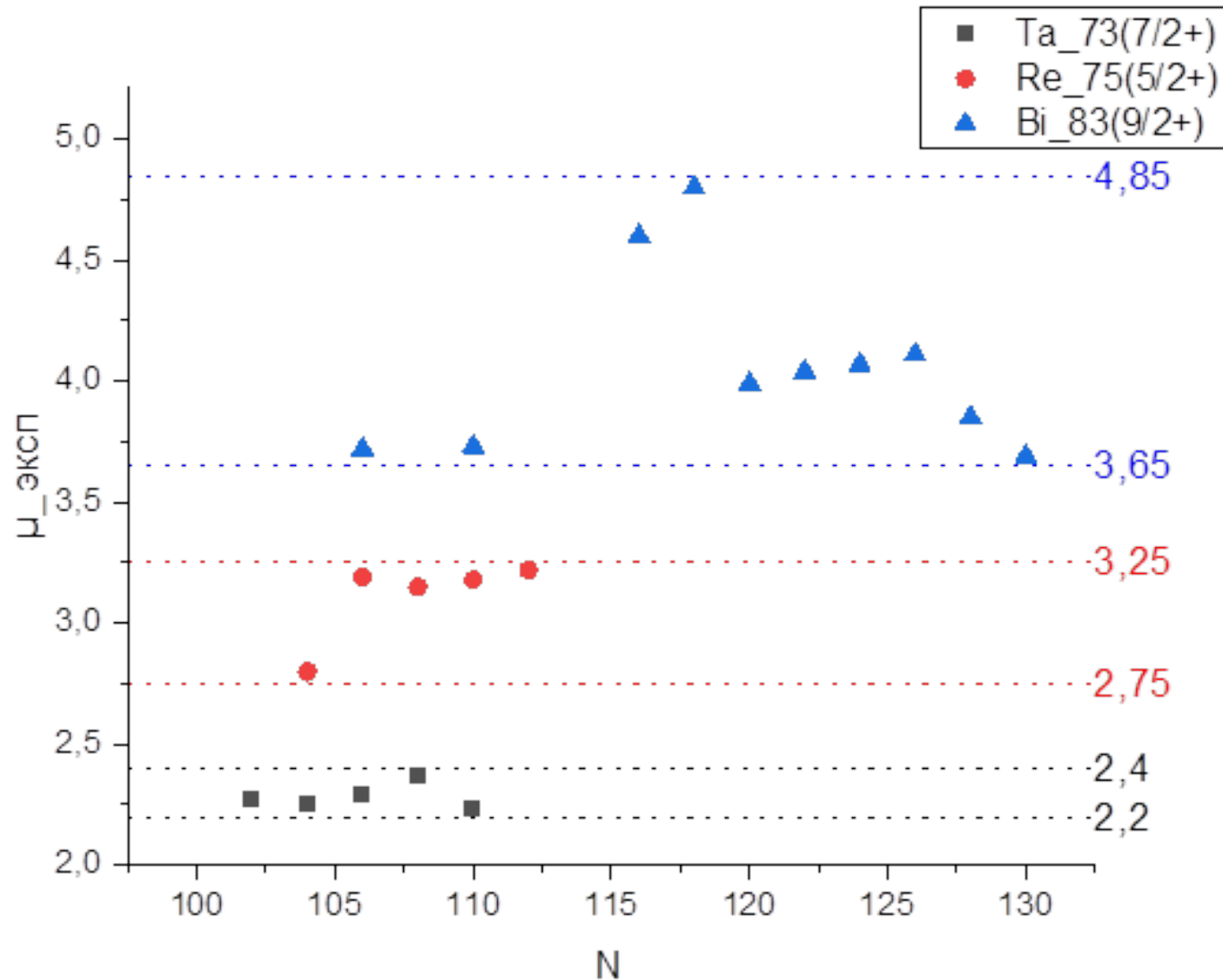
Магнитные моменты деформированных ядер



49 состояний со спином $5/2+$

Расчет в потенциале Нильссона с деформацией $\epsilon=0.3$

Магнитные моменты в цепочках ИЗОТОПОВ



Результаты

- На основе файла ENSDF и компиляции Стоуна построена новая база данных ядерных магнитных моментов.
- Магнитные моменты ядер в основном состоянии систематизированы по массовому числу A , заряду Z и спину I состояния.
- Магнитные моменты легких и околомagicеских ядер рассчитаны на основе одночастичной модели сферического ядра.
- Магнитные моменты нечетно-нечетных ядер оценены как сумма магнитных моментов соседних A -нечетных ядер. Несколько лучший результат получается при использовании экспериментальных значений магнитных моментов, что частично учитывает поляризационные эффекты.
- Квадрупольная деформация ограничивает область ядерных магнитных моментов шмидтовскими значениями.

Спасибо за внимание!

Mitropolsky_IA@pnpi.nrcki.ru