

*МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
имени Д.В.СКОБЕЛЬЦИНА*

**УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЧАСТИЦА – ГАММА-КВАНТ  
И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСТРОЕННЫХ ЯДЕР**

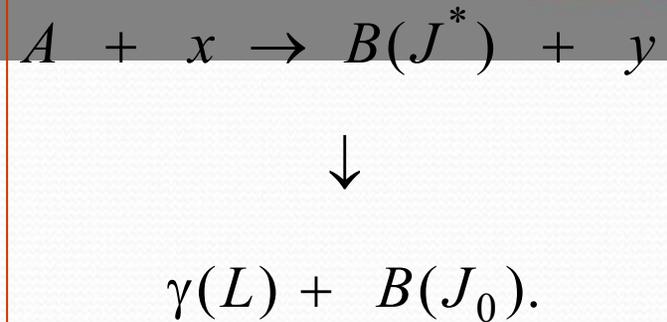
**Лебедев Виктор Михайлович**

*(01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц)  
Диссертация на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук*

Современный этап развития экспериментальной ядерной физики характеризуется стремлением проводить измерения в наиболее полных кинематических условиях. Диссертация посвящена проведению таких корреляционных экспериментов и теоретическому анализу ядерных реакций с образованием выстроенных ядер.

- Основной характеристикой выстроенных ядер являются спин-тензоры матрицы плотности, которые имеют ненулевые значения только для четного ранга.
- Знание полного набора спин-тензоров позволяет получить такие характеристики выстроенных ядер, которые в принципе не могут быть измерены в прямых экспериментах.

- В диссертации изучены ядерные реакции следующего типа:



Заряженная частица  $y$  и  $\gamma$ -квант регистрируются на совпадения при разных углах вылета частицы  $y$  и  $\gamma$ -кванта, т.е. измеряется функция угловой  $y\gamma$  – корреляции (ФУК).

Матрица плотности ядра  $B^*$  определяется через матричный элемент перехода системы из начального состояния в конечное, поэтому она содержит всю информацию как о структуре ядра, так и о механизме исследованной реакции. Сумма ее диагональных элементов (шпур) дает дифференциальное сечение реакции. Спин-тензоры матрицы плотности определены стандартным образом, при этом спин-тензор нулевого ранга совпадает с дифференциальным сечением.

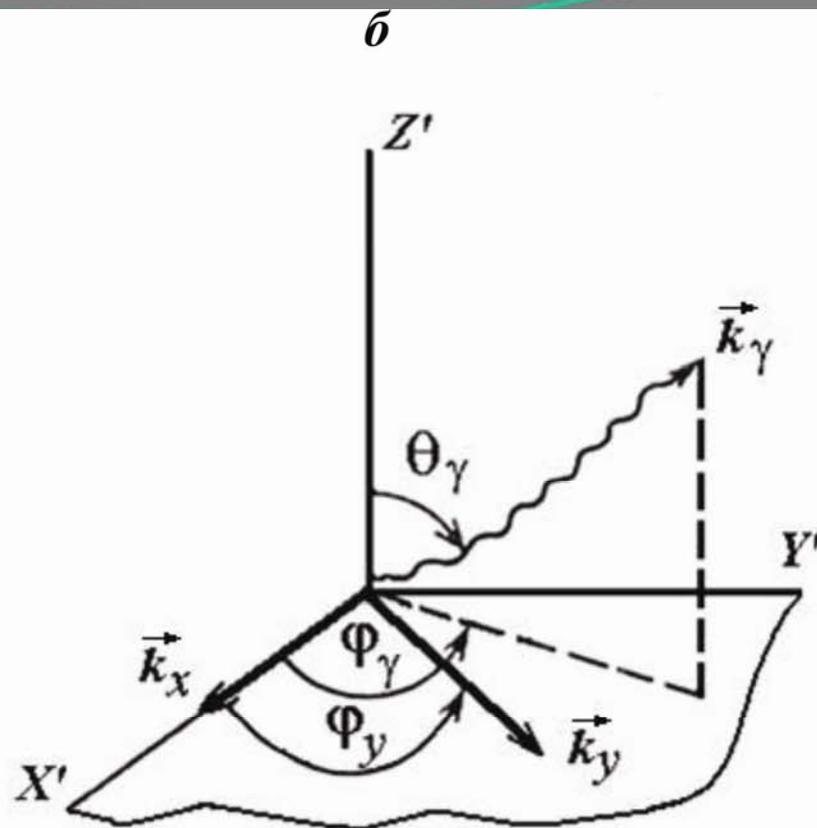
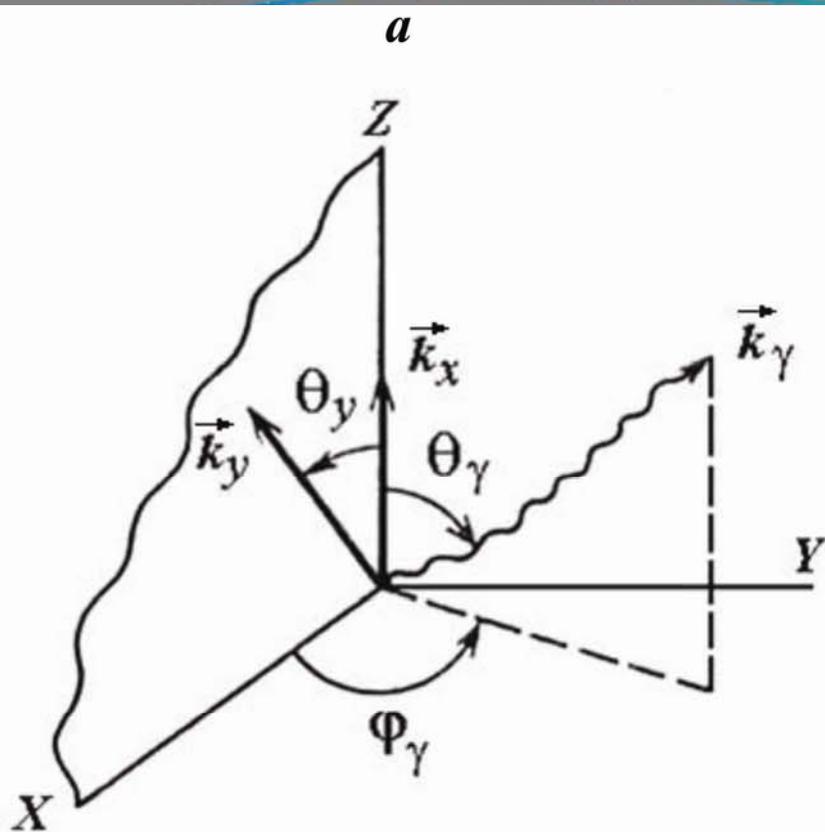
# Функция угловой корреляции (ФУК) частица– $\gamma$ -квант

Измерение ФУК является одним из способов восстановления экспериментальных спин-тензоров матрицы плотности ядра  $B^*$ .

$$W(\Omega_y, \Omega_\gamma) = \sum_{kk} \frac{1}{\sqrt{4\pi(2k+1)}} \cdot A_{kk}(\theta_y) \cdot Y_{kk}^*(\Omega_\gamma),$$

$$A_{kk}(\Omega_y) = R_k(l, l', \delta) \cdot \rho_{kk}(J_B; \Omega_y),$$

где  $Y_{kk}^*$  – сопряженные сферические функции (тензоры эффективности регистрации гамма-кванта), зависящие от углов  $\theta_\gamma$  и  $\varphi_\gamma$  вылета  $\gamma$ -кванта, а коэффициенты  $R_k(l, l', \delta)$  простыми алгебраическими коэффициентами связаны с коэффициентами смешивания электромагнитных переходов. ФУК частица– $\gamma$ -квант в ядерных реакциях выражается через спин-тензоры матрицы плотности и тензоры эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов. Если поляризация конечных частиц, в т.ч. и  $\gamma$ -квантов не регистрируется, тензоры эффективности регистрации представляют собой произведение алгебраических множителей и сферических функций, зависящих от угла вылета  $\gamma$ -кванта.



Координатные системы с осью  $Z$ , направленной:

(a) – вдоль пучка падающих частиц,

(б) – перпендикулярно плоскости реакции

С помощью найденных значений  $\rho_{kk}(\theta_\alpha)$  можно получить следующие характеристики, имеющие физический смысл:

1. Заселенности подсостояний изучаемого уровня конечного ядра (ориентации спина данного уровня) в системе координат, ось Z которой перпендикулярна плоскости реакции и совпадает с направлением спина ядра. Матрица поворота  $D^J(\pi/2, \pi/2, \pi/2)$ .

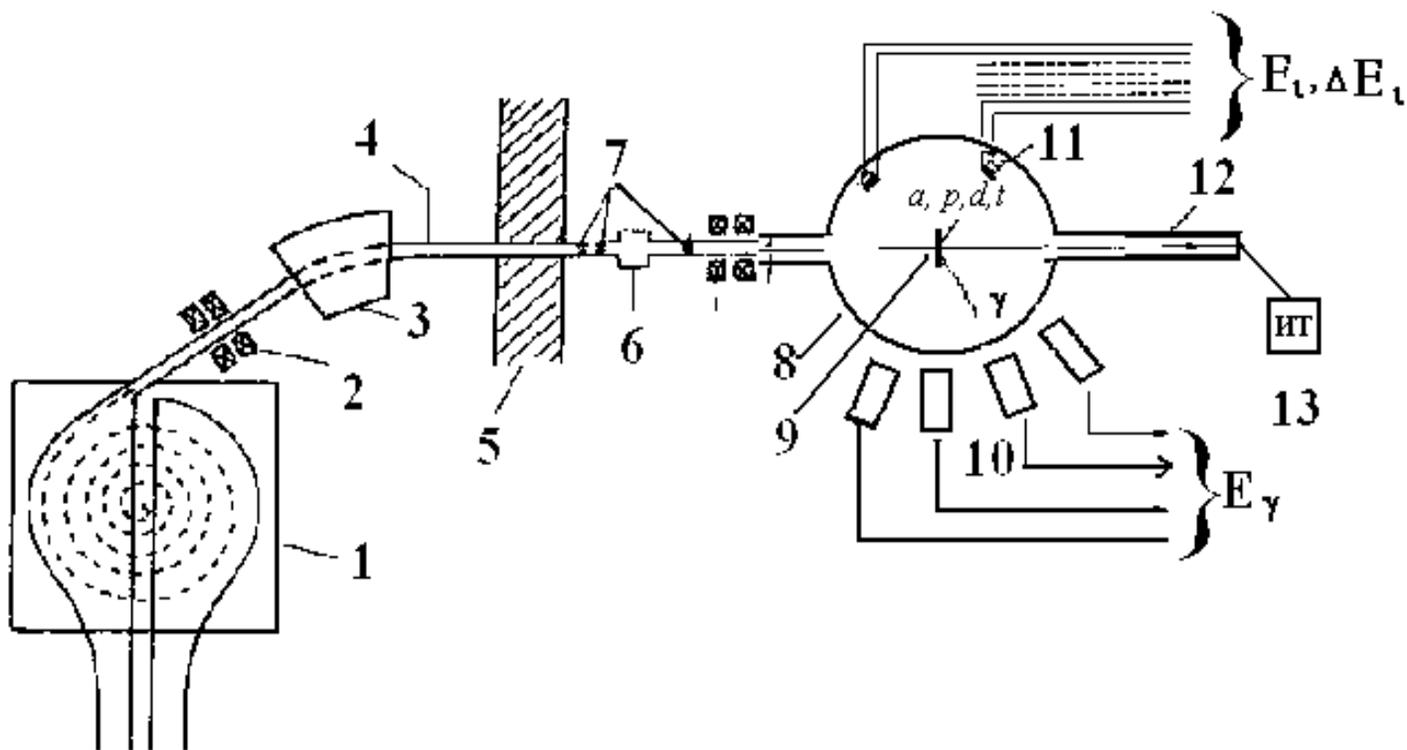
$$P_M(J_f, \theta_y) = \frac{\rho'_{Jf}(M, M)}{Sp \rho'_{Jf}(M, M)}.$$

2. Ориентацию мультипольных моментов относительно оси симметрии ядра (в системе координат с осью Z по импульсу ядра отдачи). Матрица поворота  $D^J(\pi/2, \pi/2, \theta_y)$ .

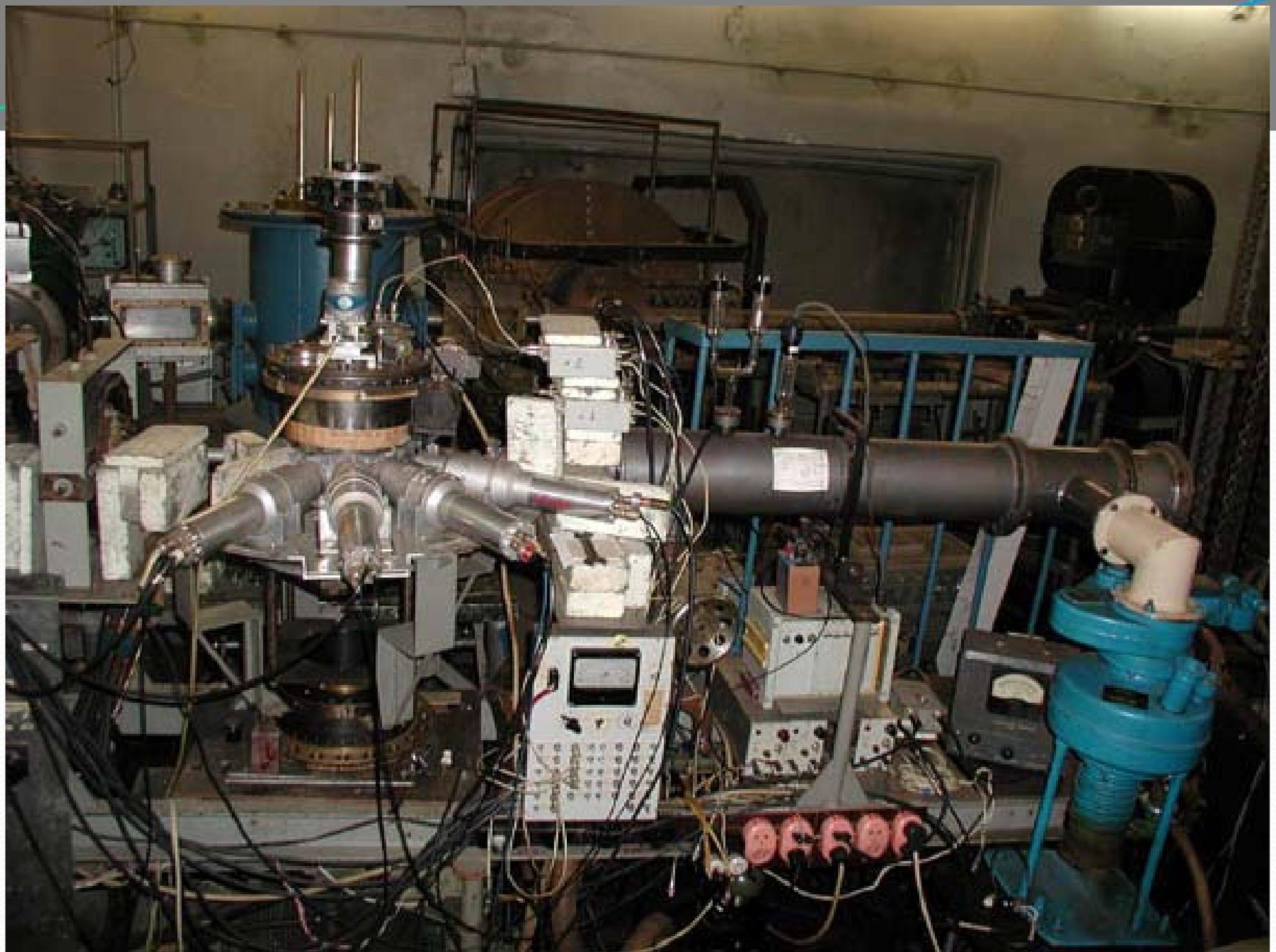
$$t_{kk}(J_f, \theta_y) = \frac{\rho'_{kk}(\theta_y)}{\sqrt{(2k+1)(2J_f+1)} \rho_{00}(\theta_y)}.$$

Именно эти характеристики, наряду с  $A_{kk}(\theta_y)$ , восстановленные из экспериментальных ФУК, затем сравнивались с расчетными, полученными в разных теоретических моделях.

## Общая схема экспериментальной установки



1- циклотрон, 2 – магнитные квадрупольные линзы, 3 – поворотный магнит, 4 – ионопровод, 5 – защитная стена, 6 – вакуумный клапан, 7 – коллимирующие щели, 8 – камера рассеяния, 9 – мишень, 10 – сцинтилляционные детекторы, 11 – телескопы кремниевых детекторов заряженных частиц, 12 – цилиндр Фарадея, 13 – интегратор тока.

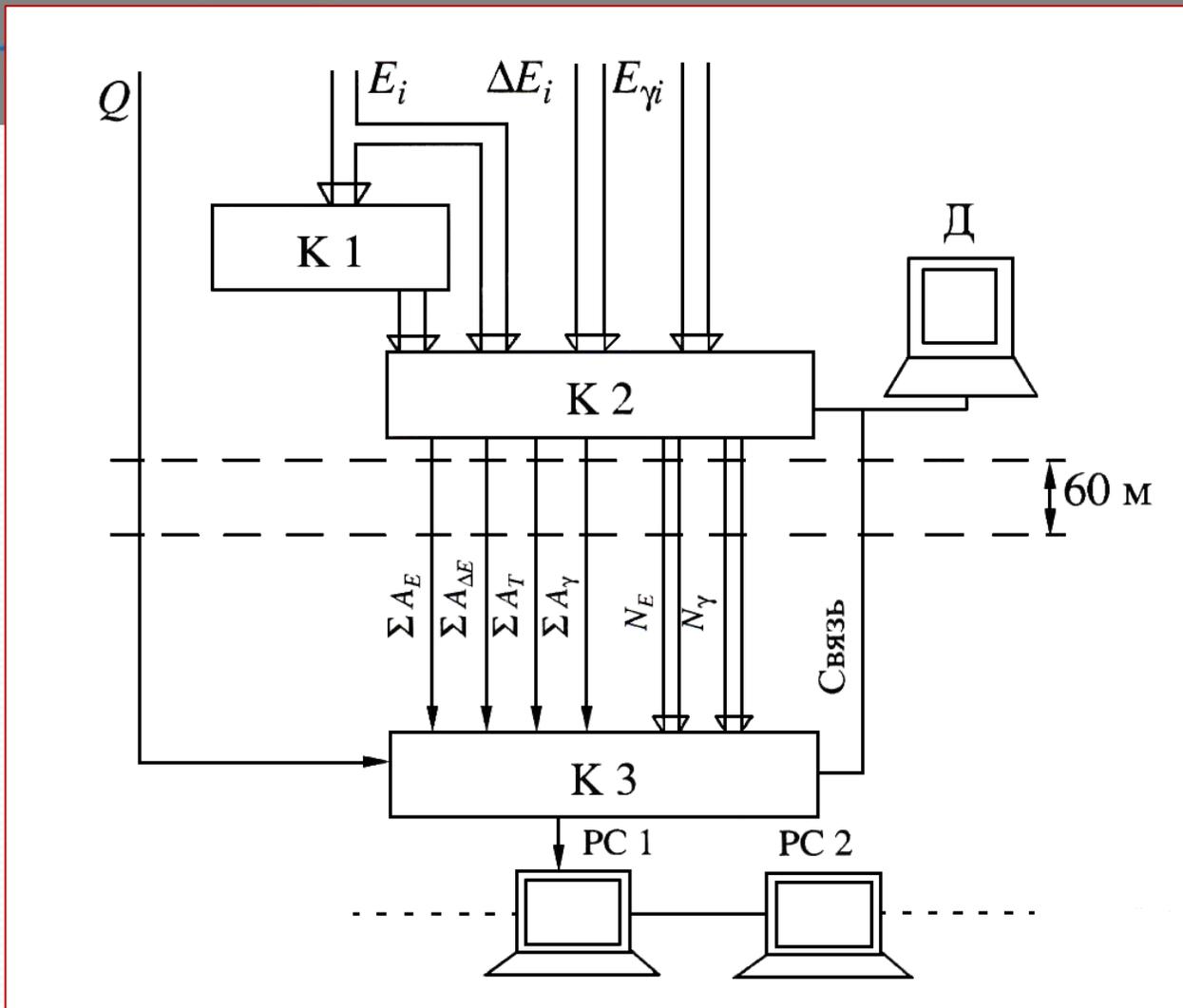




ИВК включает несколько уровней обработки:  
аналоговую и быструю цифровую обработку полученных сигналов;  
формирование массивов, последующую их обработку и фильтрацию  
данных;  
визуализацию, управление экспериментом и подготовку отчетов.

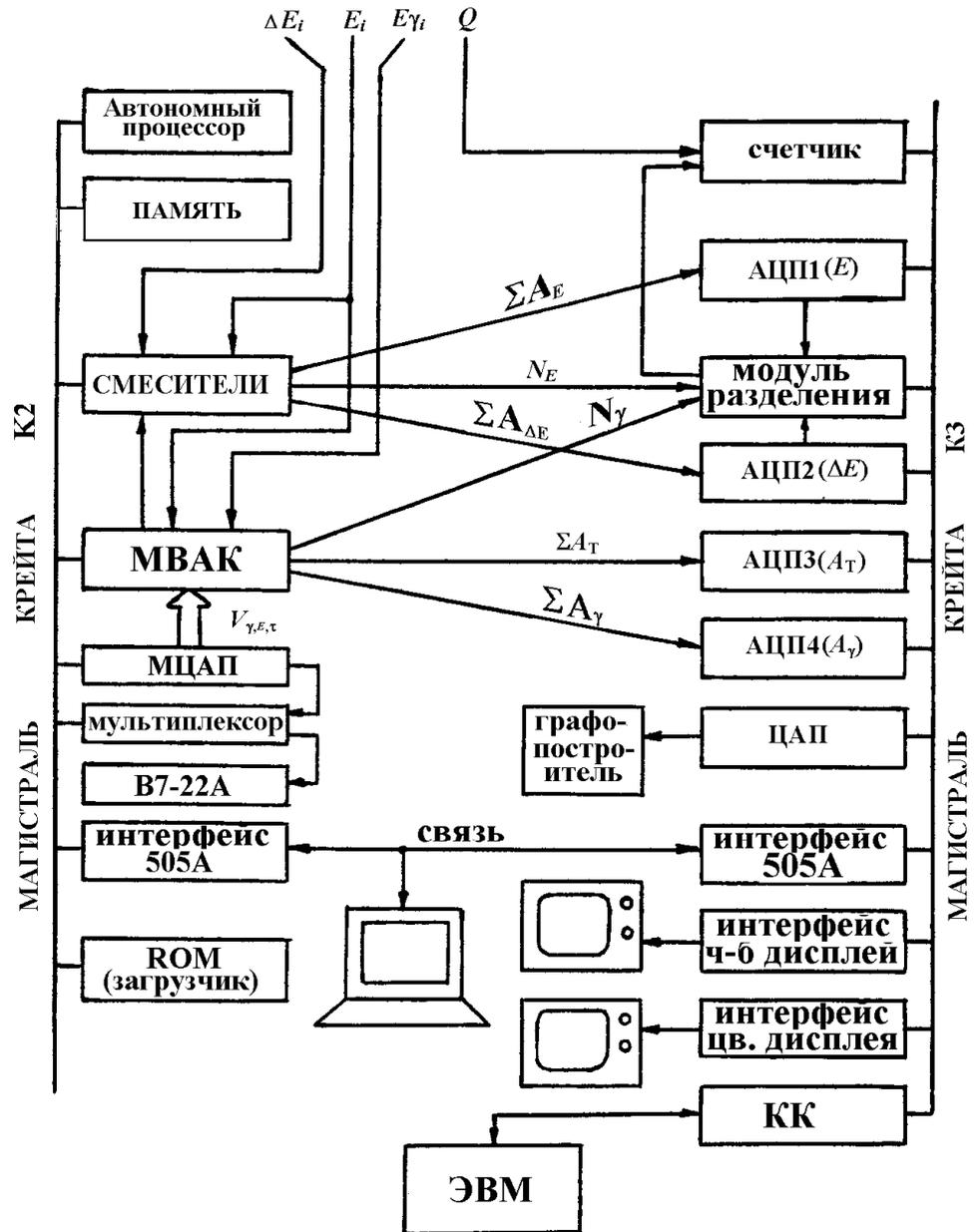
ИВК позволяет осуществлять регистрацию заряженных частиц по шести и гамма-квантов по четырем каналам. В памяти ИВК копятся энергетические и временные спектры всех комбинаций детекторов, результаты отображаются как в графическом, так и табличном виде в режиме реального времени или по команде. Управление основными параметрами эксперимента осуществляется дистанционно с компьютера. Одновременно можно следить за десятками параметров эксперимента.

Непрерывно ведется также регистрация интенсивности пучка, загрузок, просчетов и ряда других служебных параметров. Это позволяет свести к минимуму систематические ошибки эксперимента.

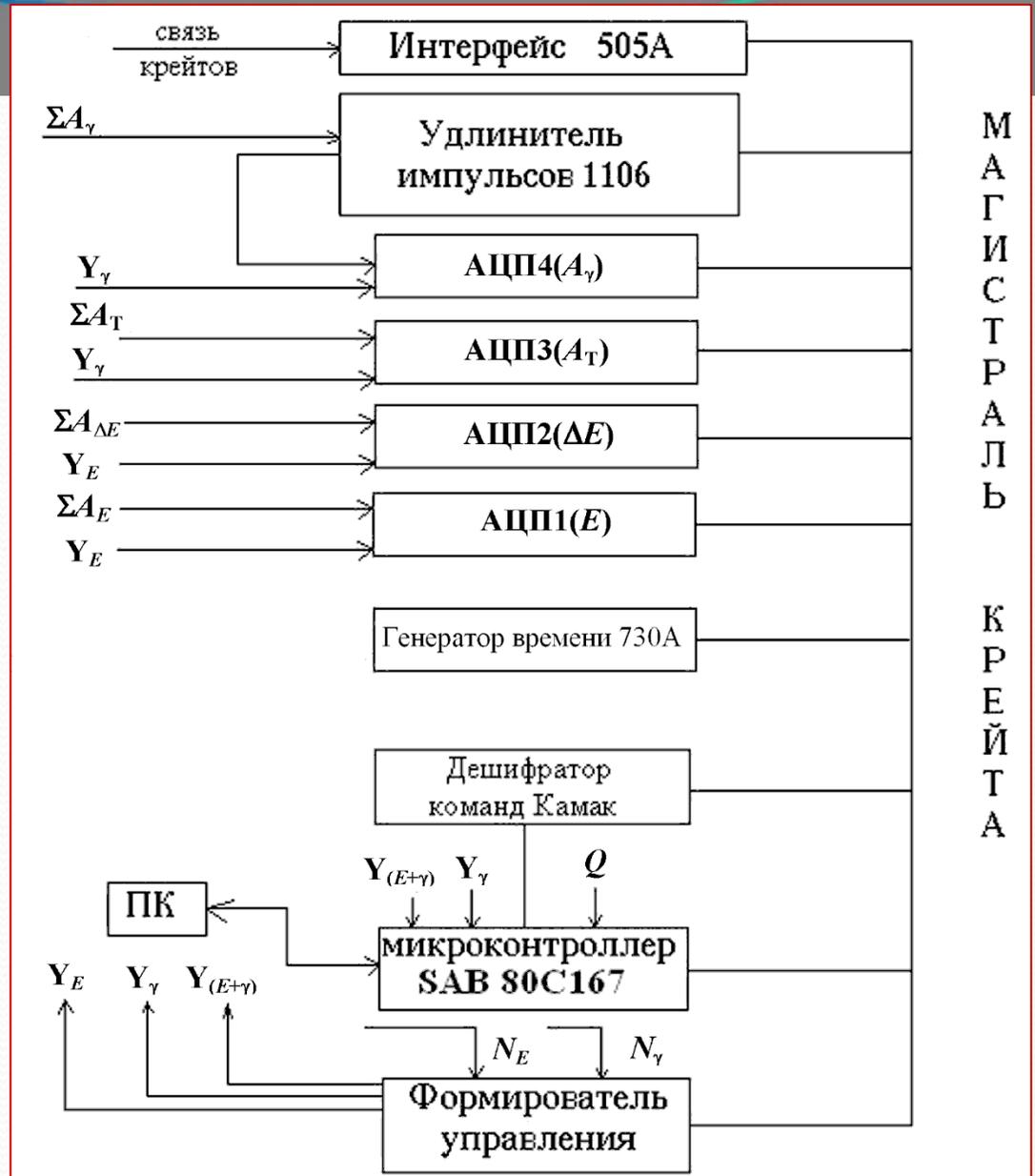


Блок-схема электроники ИБК. К1–К3 – крейты КАМАК, Д – монитор установки и контроля параметров эксперимента, PC1–PC2 – компьютеры. Указаны виды сигналов, поступающих на крейты.

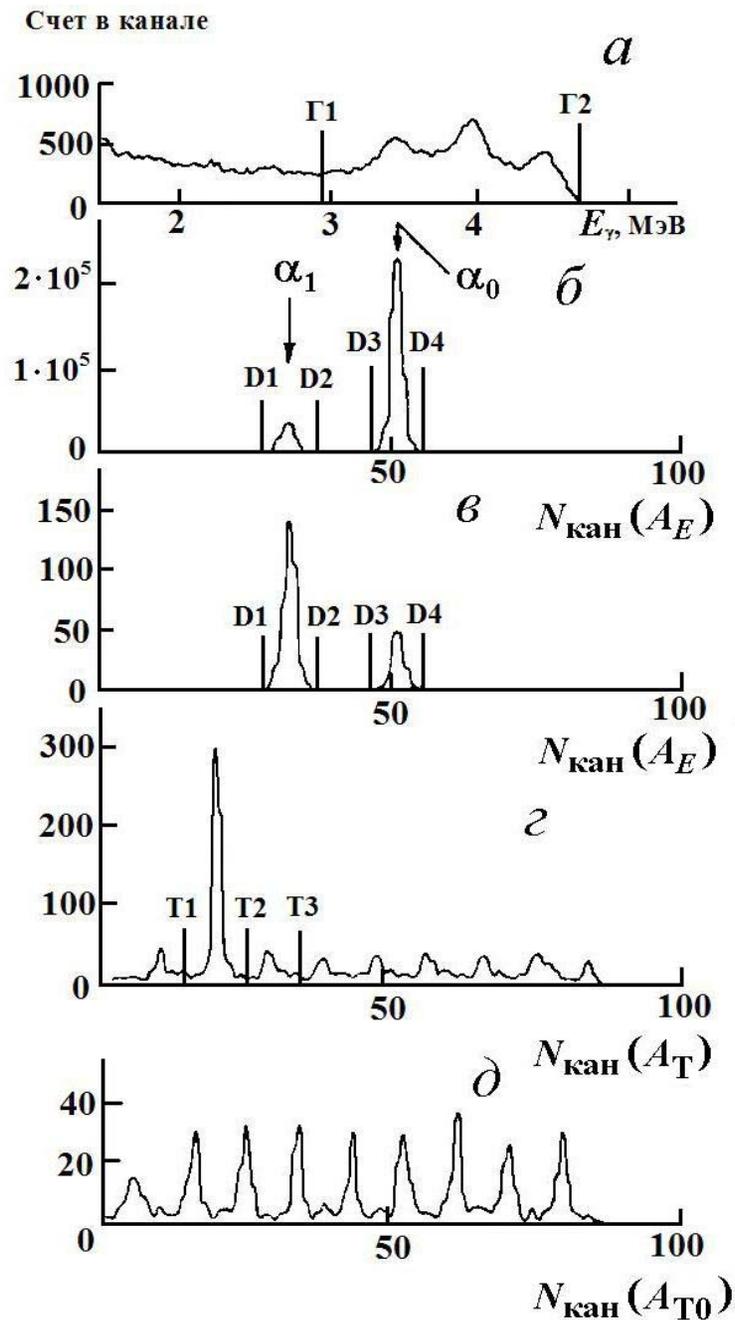
Состав и связь модулей  
крейтов К2 и К3. Указаны  
виды сигналов,  
поступающих на крейты.



Структура крейта К3 после модификации.  
 Указаны виды сигналов, поступающих на крейт и сигналы связи модулей.

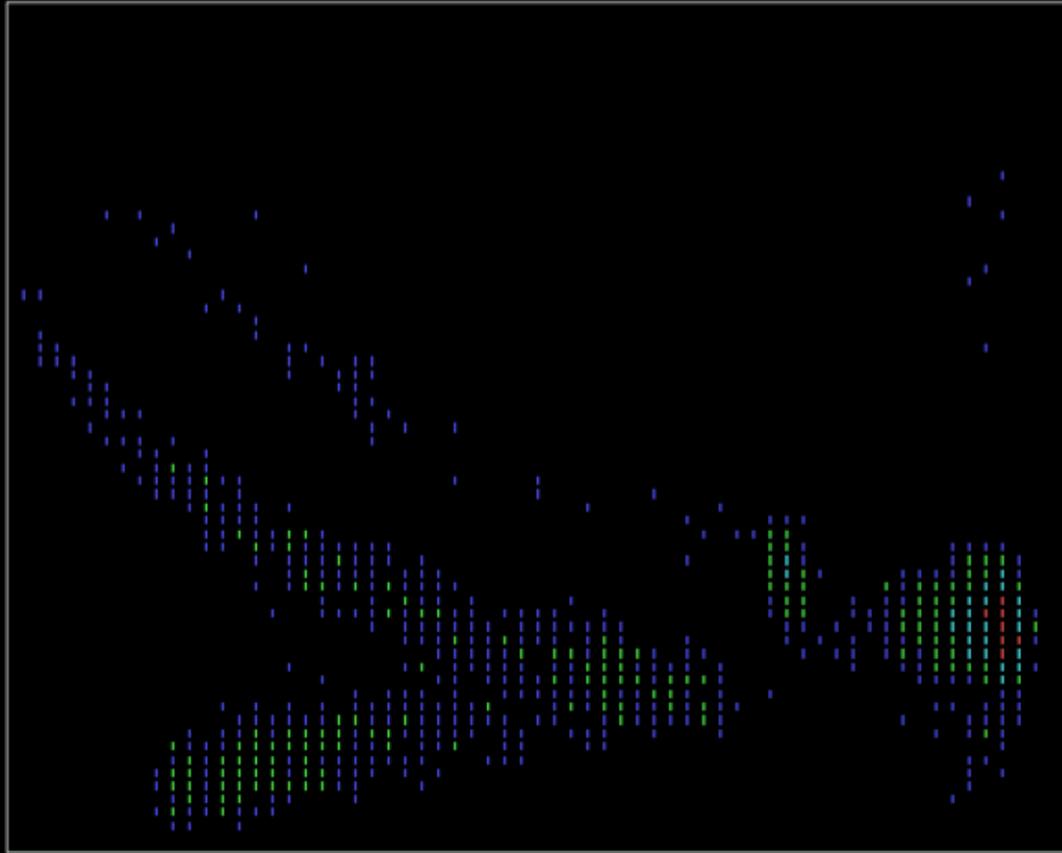


Типичные спектры реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$  при  $E_\alpha = 25$  МэВ,  $\theta_\alpha = 25^\circ$ ,  $\theta_\gamma = 20^\circ$ ,  $\phi_\gamma = 180^\circ$ : *a* – часть  $\gamma$ -спектра в районе  $E_\gamma = 4$  МэВ, *б* – прямой спектр рассеянных  $\alpha$ -частиц, *в* – спектр  $\alpha$ -частиц после совпадений с  $\gamma$ -квантами, *г* – временной спектр  $A_T$  совпадений  $\gamma$ -квантов с группой  $\alpha_1$ , *д* – спектр  $A_{T0}$  случайных совпадений. Указаны группы частиц и цифровые окна в спектрах.



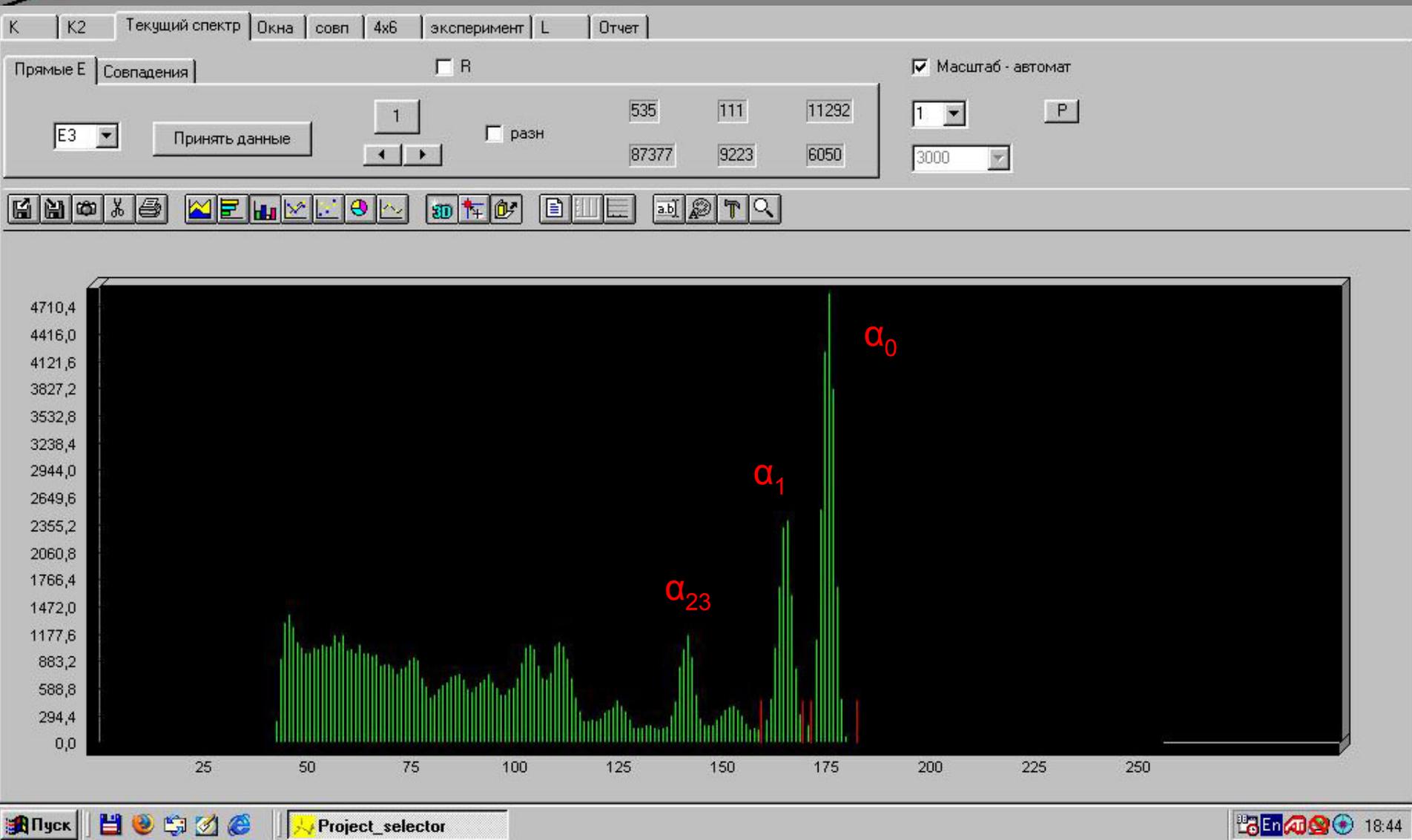
уровень среза (15) N= 3

выход при N=0

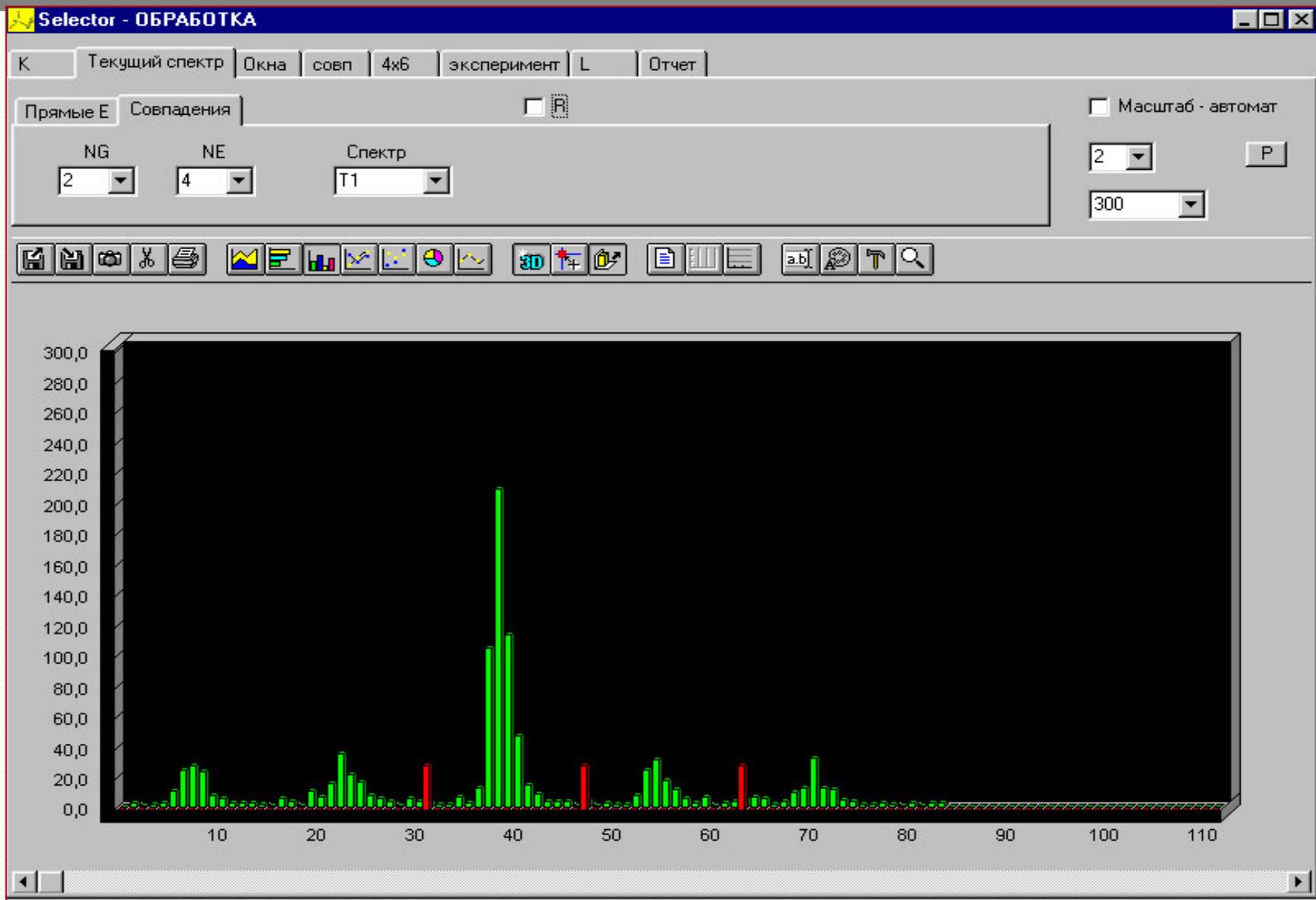


Двумерный  $\Delta E$ - $E$  спектр протонов (нижняя гипербола) и дейтронов (верхняя гипербола) из реакций, измеренный телескопом, у которого толщина рабочей области  $E$ -детектора барьерного типа подобрана такой, чтобы пробег наиболее энергичных групп дейтронов ( $d_0$  и  $d_1$ ) полностью укладывался в  $E$ - детекторе (входной канал  $^{12}\text{C} + d$ ,  $E_d = 15.3$  МэВ,  $\theta_y = 30^\circ$ ).

Спектр  $\alpha$ -частиц из реакции  $^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha)^{24}\text{Mg}$  при  $\theta_\alpha = 46^\circ$  и  $E_\alpha = 30.3$  МэВ  
(скриншот окна программы SELECTOR)

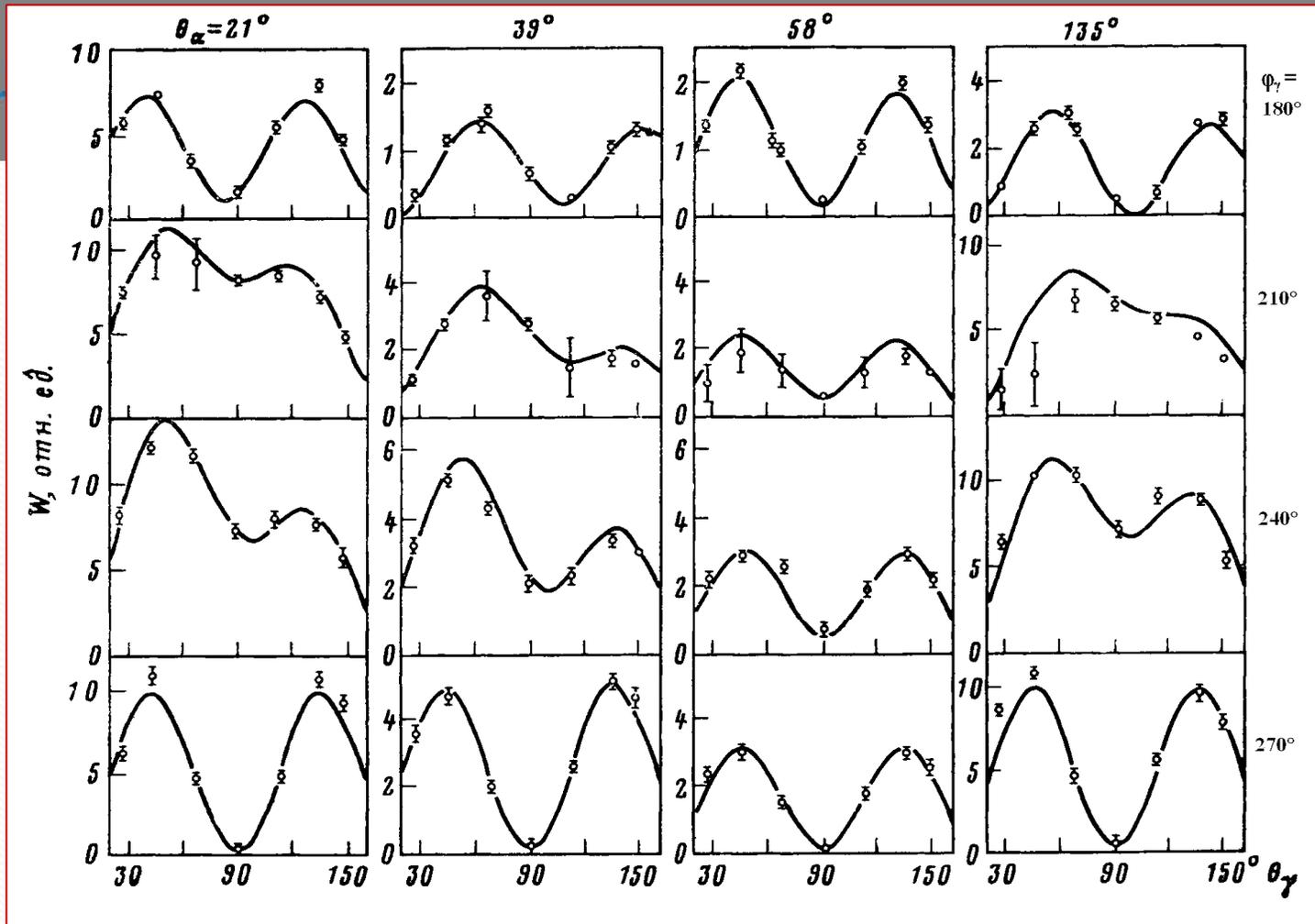


Спектр время-амплитудного конвертора из реакции  $^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha_1\gamma)^{24}\text{Mg}$   
при  $\theta_\alpha = 27.5^\circ$ ,  $\varphi_\gamma = 240^\circ$ ,  $\theta_\gamma = 68^\circ$  и  $E_\alpha = 30.3$  МэВ ( $t = 13$  часов)  
(скриншот из программы SELECTOR)



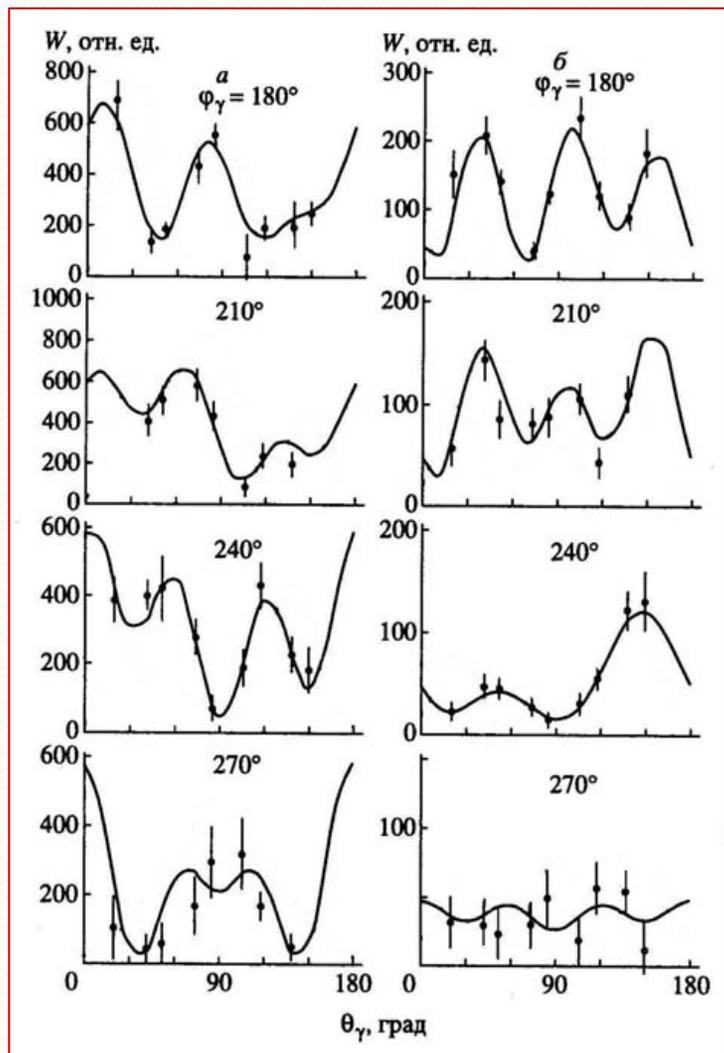
## Реакции, исследованные на 120-см циклотроне НИИЯФ МГУ

№	Реакция	$J_B^\pi$ , $E^*$ , МэВ	$J_0^\pi$	$EL (ML)$ - переход	$E_x$ (лаб.), МэВ
1	${}^9\text{Be}(d, p\gamma){}^{10}\text{Be}$	$2^+$ , 3.77	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	12.5; 15.3
2	${}^{10}\text{B}(d, p\gamma){}^{11}\text{B}$	$5/2^-$ , 4.44	$3/2^-$	$M1 (5/2^- \rightarrow 3/2^-)$	15.3
3	${}^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma){}^{11}\text{B}$	$5/2^-$ , 4.44	$3/2^-$	$M1+E2$ $(5/2^- \rightarrow 3/2^-)$	15.3
4	${}^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	21÷25; 30
5	${}^{11}\text{B}(\alpha, t\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	25; 30
6	${}^{12}\text{C}(p, p\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	7.5
7	${}^{12}\text{C}(d, d\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	15.3
8	${}^{12}\text{C}({}^3\text{He}, {}^3\text{He} \gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	22.4
9	${}^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	15÷25; 30
10	${}^{13}\text{C}(\tau, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	22.5
11	${}^{14}\text{N}(d, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	15.4
12	${}^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$	$2^+$ , 4.443	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	7.5
13	${}^{12}\text{C}(d, p\gamma){}^{13}\text{C}$	$1/2^+$ , 3.09	$1/2^-$	$E1 (1/2^+ \rightarrow 1/2^-)$	12.5
14	${}^{11}\text{B}(\alpha, p\gamma){}^{14}\text{C}$	$3^-$ , 6.73	$0^+$	$E3 (3^- \rightarrow 0^+)$	30.3
15	${}^{12}\text{C}(\alpha, p\gamma){}^{15}\text{N}$	$3/2^-$ , 6.32	$1/2^-$	$E2 (3/2^- \rightarrow 1/2^-)$	30.3
16	${}^{14}\text{N}(\alpha, d\gamma){}^{16}\text{O}$	$3^-$ , 6.13	$0^+$	$E3 (3^- \rightarrow 0^+)$	30.3
17	${}^{15}\text{N}(\alpha, t\gamma){}^{16}\text{O}$	$3^-$ , 6.13	$0^+$	$E3 (3^- \rightarrow 0^+)$	30.3
18	${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}$	$3^-$ , 6.13	$0^+$	$E3 (3^- \rightarrow 0^+)$	25; 30
19	${}^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}$	$3^-$ , 6.13	$0^+$	$E3 (3^- \rightarrow 0^+)$	7.5
20	${}^{19}\text{F}(\alpha, t\gamma){}^{20}\text{Ne}$	$2^+$ , 1.63	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	30.3
21	${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha\gamma){}^{24}\text{Mg}$	$2^+$ , 1.37	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	30.3
22	${}^{27}\text{Al}(\alpha, t\gamma){}^{28}\text{Si}$	$2^+$ , 1.78 $4^+$ , 4.62	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$ $E2 (4^+ \rightarrow 2^+) \rightarrow$ $E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	30.3
23	${}^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha\gamma){}^{28}\text{Si}$	$2^+$ , 1.78 $4^+$ , 4.62	$0^+$	$E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$ $E2 (4^+ \rightarrow 2^+) \rightarrow$ $E2 (2^+ \rightarrow 0^+)$	25, 30.3

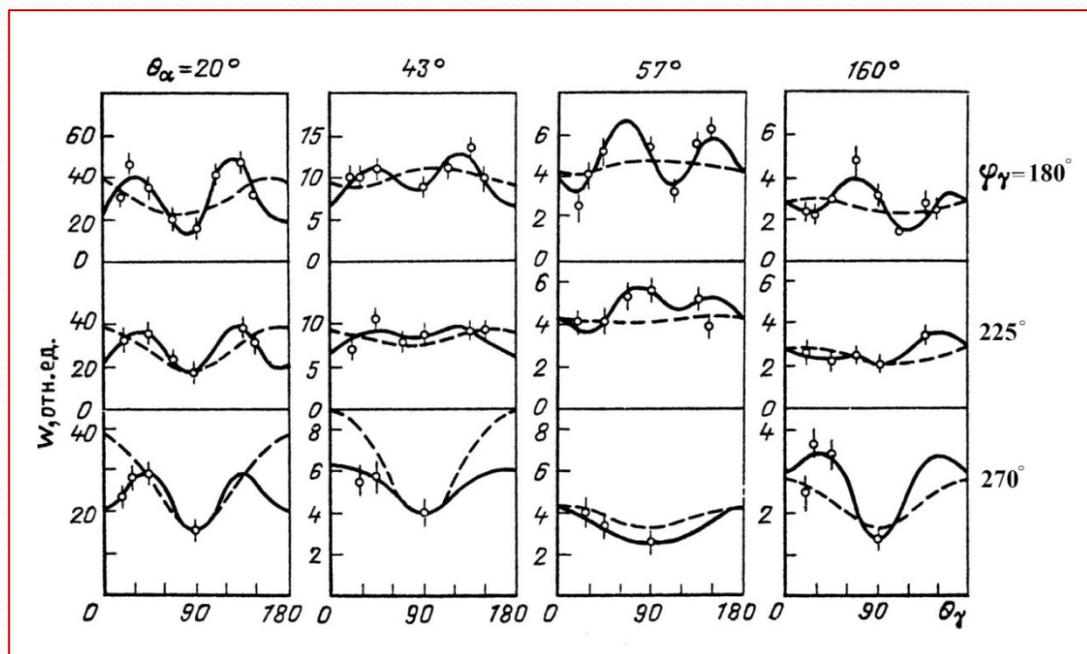


Функции угловой корреляции в реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$  (точки) при  $E_\alpha = 24.8$  МэВ для углов (лаб.) вылета  $\alpha$ -частиц 21, 39, 58 и 135°, измеренные в различных плоскостях  $\phi_\gamma$  относительно плоскости реакции. Сплошные кривые – девятипараметрическая подгонка.

$^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  при  $E_\alpha = 30.3$  МэВ  
 $\theta_\alpha(\text{лаб.}) = 20^\circ$  (а) и  $39^\circ$  (б)



$^{13}\text{C}({}^3\text{He}, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$  при  $E_\tau = 22.5$  МэВ



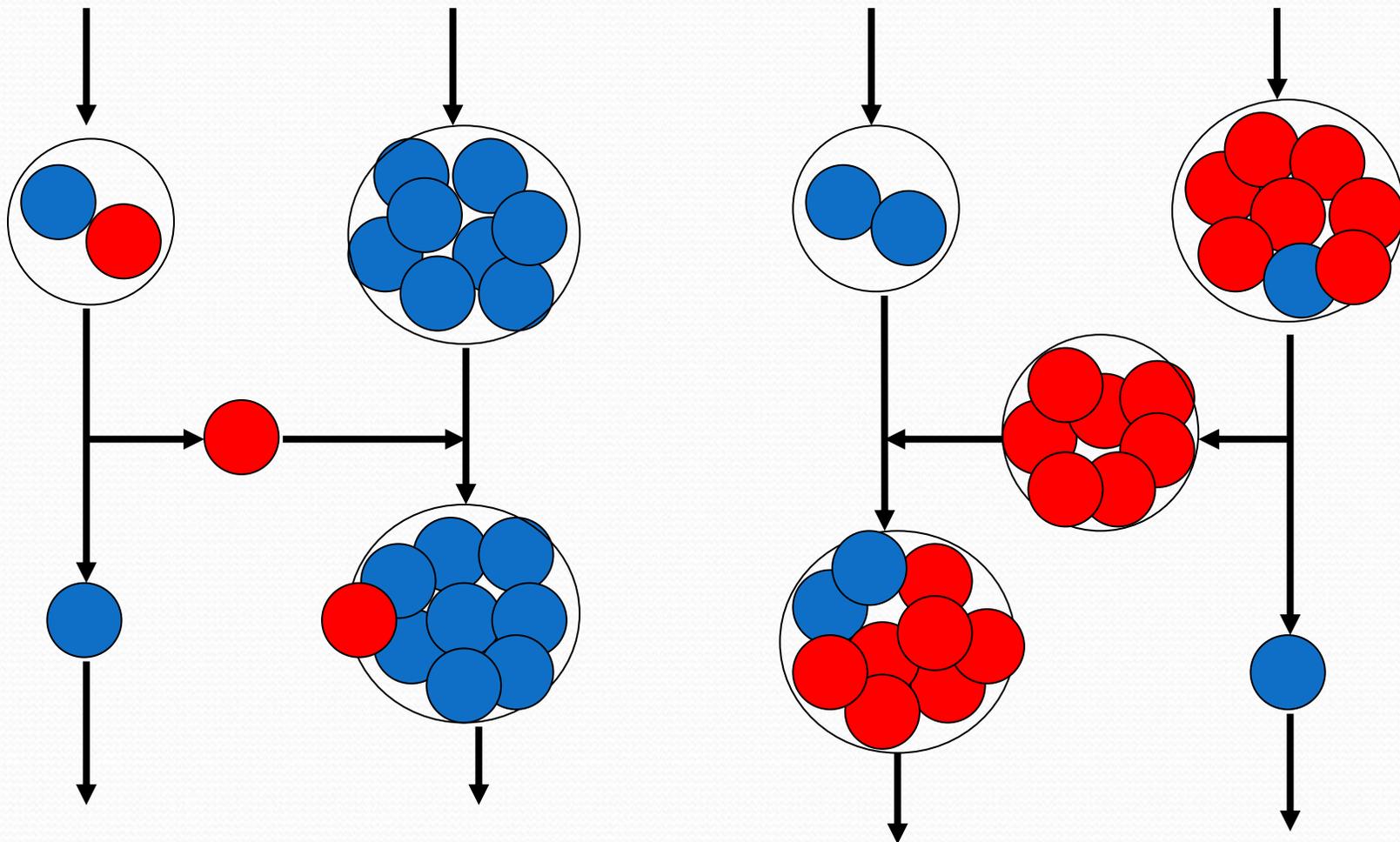


## Теоретические модели, используемые в диссертации

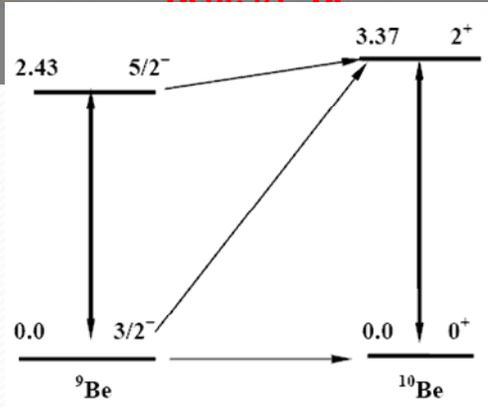
- Метод связанных каналов (МСК), используемый в приближении ротационной модели.
- Метод искаженных волн (МИВОКОР) с учетом конечного радиуса взаимодействия частиц.
- Модель составного ядра
- Многочастичная модель оболочек.
- Для проведения конкретных расчетов использовались широко известный программный комплекс CHUCK, а также оригинальные, разработанные в НИИЯФ МГУ – OLYMP, CNDENSI.

# Реакция срыва

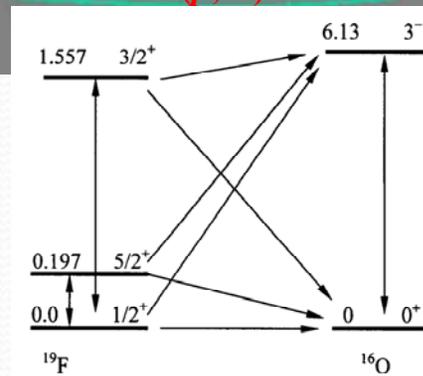
# Реакция «тяжелого» срыва



${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{Be}$



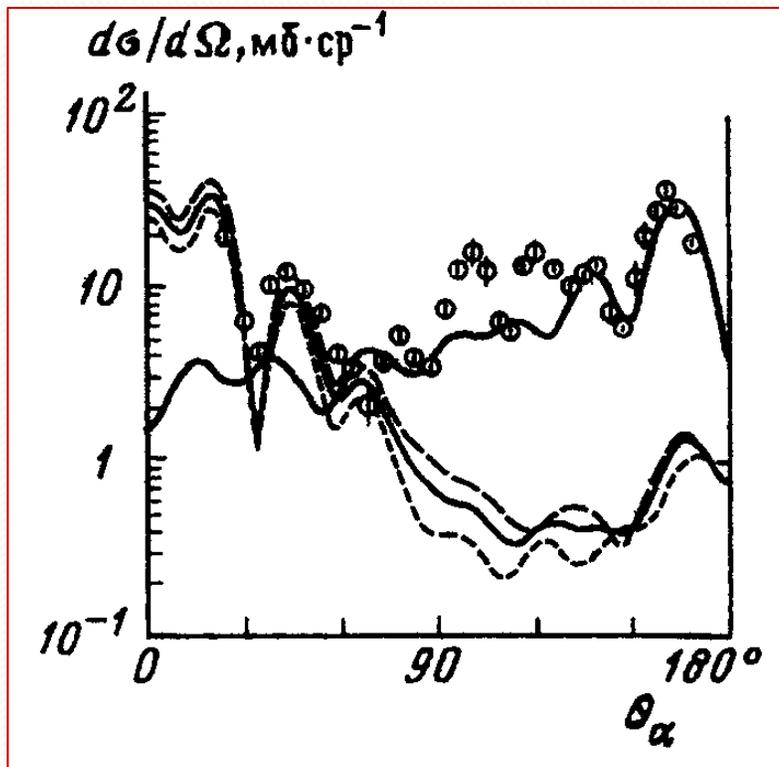
${}^{19}\text{F}(p, \alpha){}^{16}\text{O}$



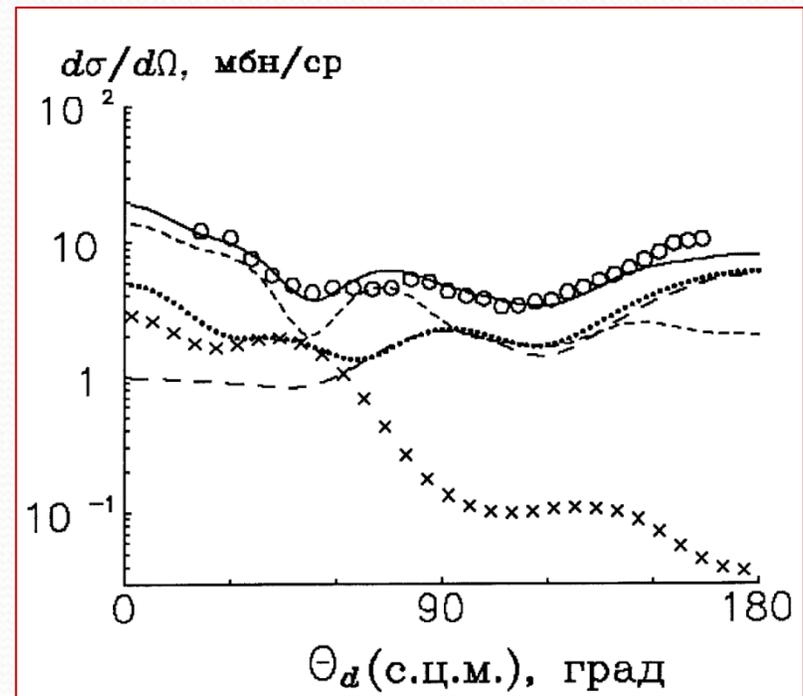
Спектроскопические амплитуды  $\Theta_{lj}$  для реакции  ${}^{19}\text{F}(p, \alpha){}^{16}\text{O}$

Реакция	$J_A \rightarrow J_B$	$l$	$j$	$\Theta_{lj}$
${}^{19}\text{F}(p, \alpha){}^{16}\text{O}$	$1/2^+(\text{осн.}) \rightarrow 0^+(\text{осн.})$	0	1/2	-0.101
	$1/2^+(\text{осн.}) \rightarrow 3^-(6.13 \text{ МэВ})$	3	5/2	0.26
			7/2	-0.30
	$5/2^+(1.197 \text{ МэВ}) \rightarrow 0^+(\text{осн.})$	2	5/2	-0.152
		$5/2^+(1.197 \text{ МэВ}) \rightarrow 3^-(6.13 \text{ МэВ})$	1	1/2
			3/2	-0.016
	3		5/2	0.089
			7/2	0.142
	$3/2^+(1.557 \text{ МэВ}) \rightarrow 0^+(\text{осн.})$	2	3/2	-0.152
		$3/2^+(1.557 \text{ МэВ}) \rightarrow 3^-(6.13 \text{ МэВ})$	1	3/2
3	5/2		-0.185	
	7/2		-0.015	

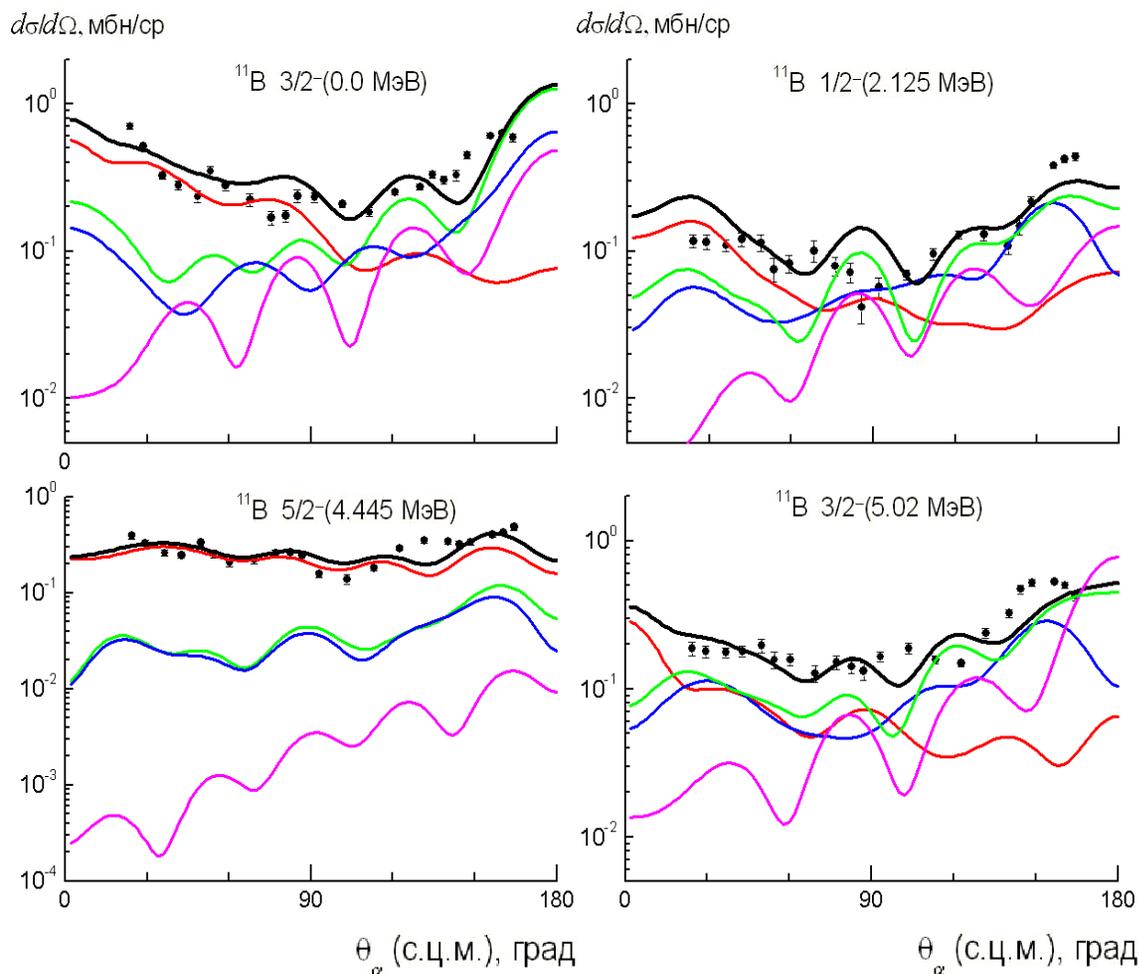
Угловые распределения неупруго ( $2^+$ ) рассеянных  $\alpha$ -частиц на ядре  $^{12}\text{C}$  при  $E_\alpha = 30$  МэВ. Кружки – экспериментальные данные. Кривые – сечение, вычисленное в МСК: короткие штрихи –  $\beta_2 = -0.5$ , сплошная линия –  $\beta_2 = -0.55$  и длинные штрихи –  $\beta_2 = -0.6$ . Жирная кривая – расчет для механизма срыва тяжелой частицы.



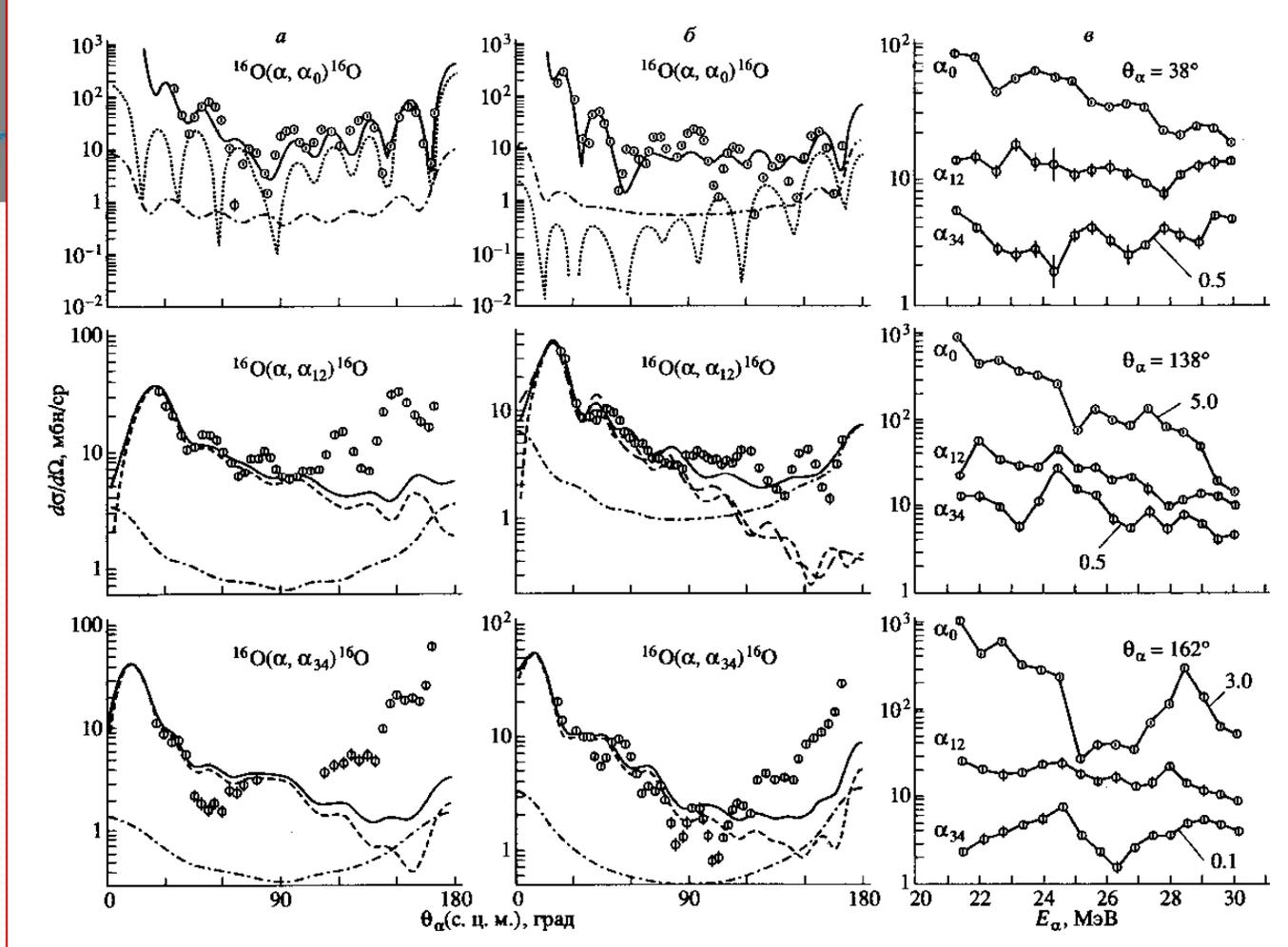
Угловые зависимости дифференциального сечения неупругого рассеяния дейтронов на  $^{12}\text{C}$  при  $E_d = 15.3$  МэВ. Кружки – экспериментальные результаты. Кривые – расчеты в предположении различных механизмов реакции: короткий штрих – результаты расчета в МСК, длинный штрих – срыв тяжелой частицы, крестики – механизм последовательной передачи нуклонов из дейтрона, точечная – сумма этих механизмов, сплошная – сумма трех механизмов



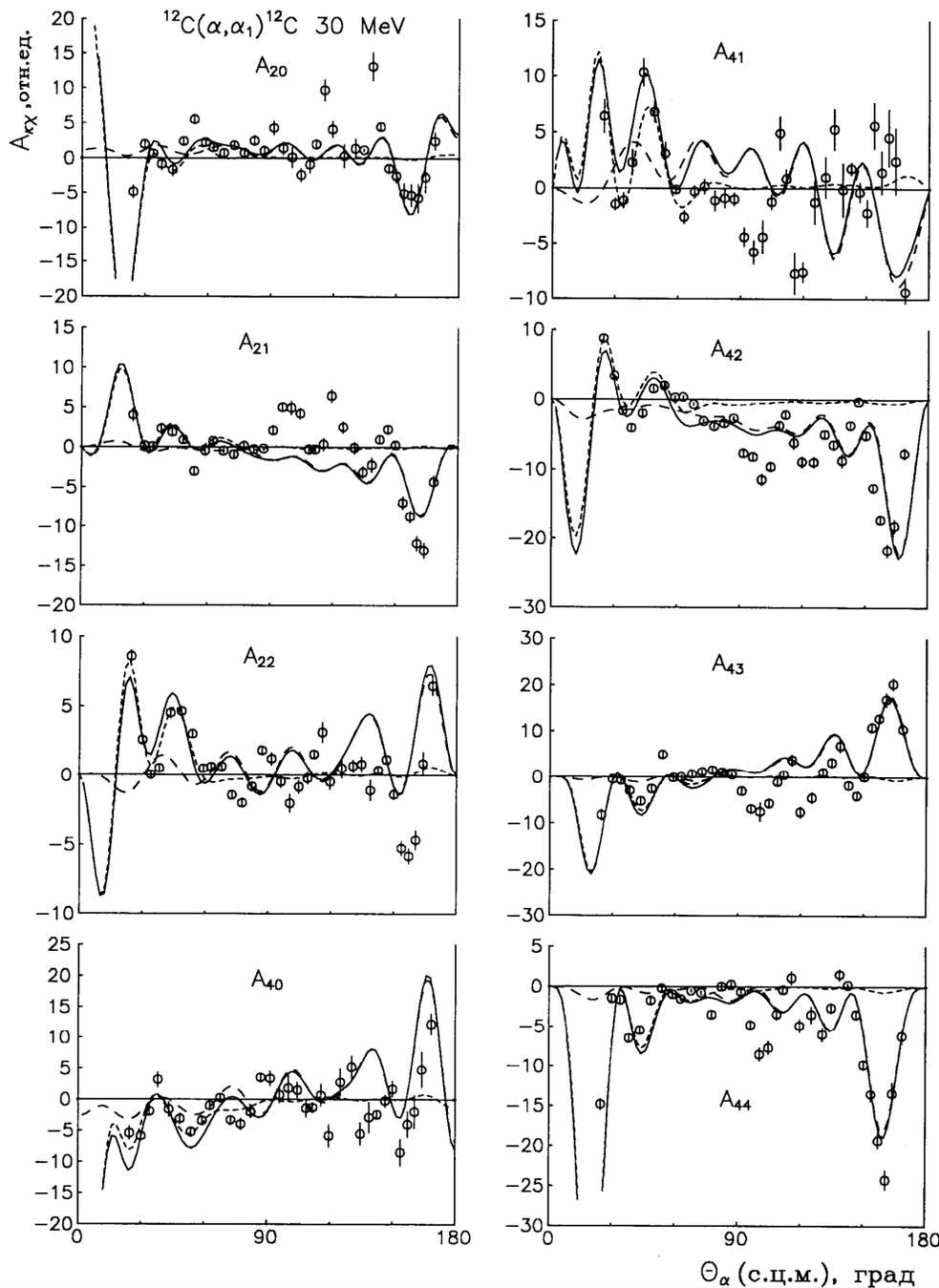
# Угловые зависимости дифференциального сечения реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ



- Кружки – экспериментальные результаты. Кривые – расчеты в предположении различных механизмов: красная – подхват дейтронного кластера в МСК, синяя – срыв тяжелой частицы, фиолетовая – последовательная передача кластеров для срыва тяжелой частицы, зеленая – когерентная сумма этих механизмов, черная – суммарная кривая.



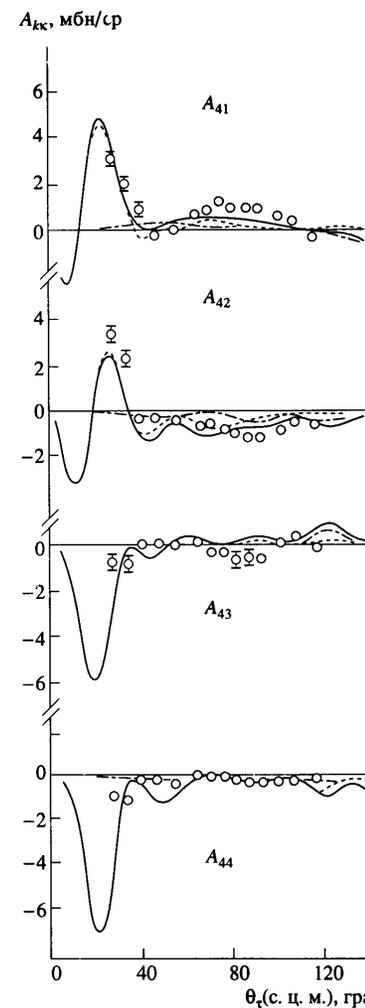
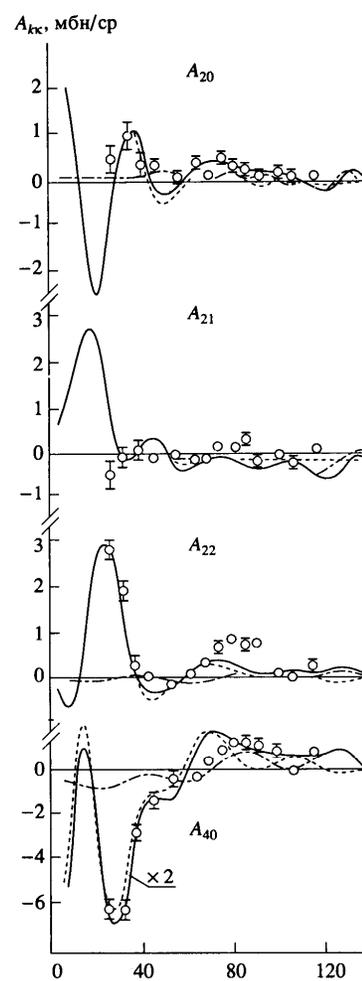
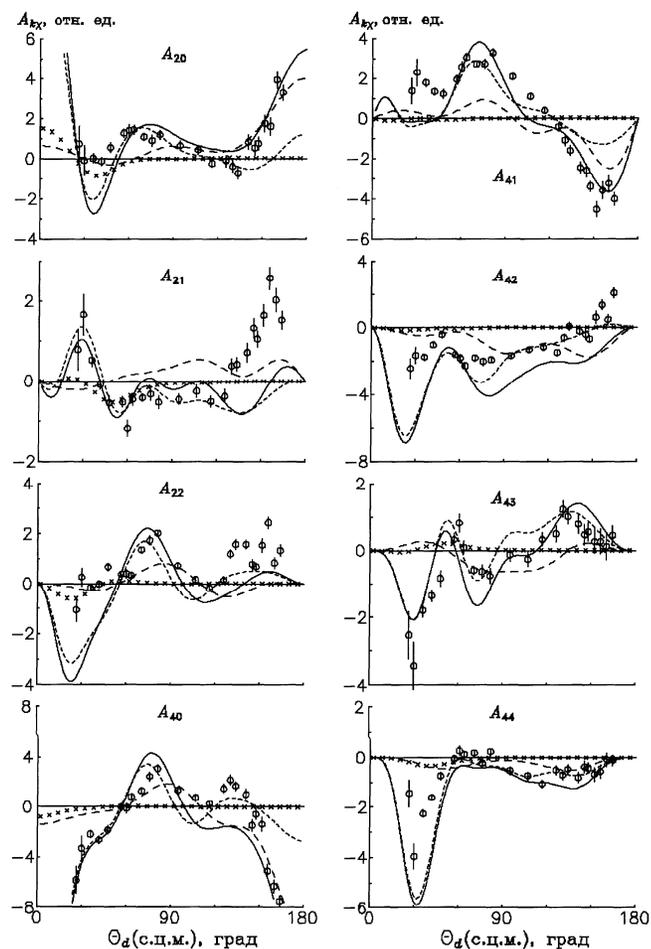
Угловые распределения дифференциального сечения упругого и неупругого рассеяния  $\alpha$ -частиц ядрами  $^{16}\text{O}$  при  $E_\alpha = 25.2$  МэВ (*a*) и  $30.3$  МэВ (*б*). Кривые -результаты расчета для механизма образования СЯ (штрих-пунктир), механизма коллективного возбуждения МСК с  $V=150.4$  МэВ (пунктир) и с  $V=160$  МэВ (длинный пунктир), а также механизма срыва тяжелой частицы (точечная кривая). Сплошные кривые для групп  $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{34}$  - сумма первых двух механизмов, для группы  $\alpha_0$  -сумма механизмов СЯ, срыва тяжелой частицы и оптического рассеяния. *в* – Энергетические зависимости дифференциального сечения рассеяния

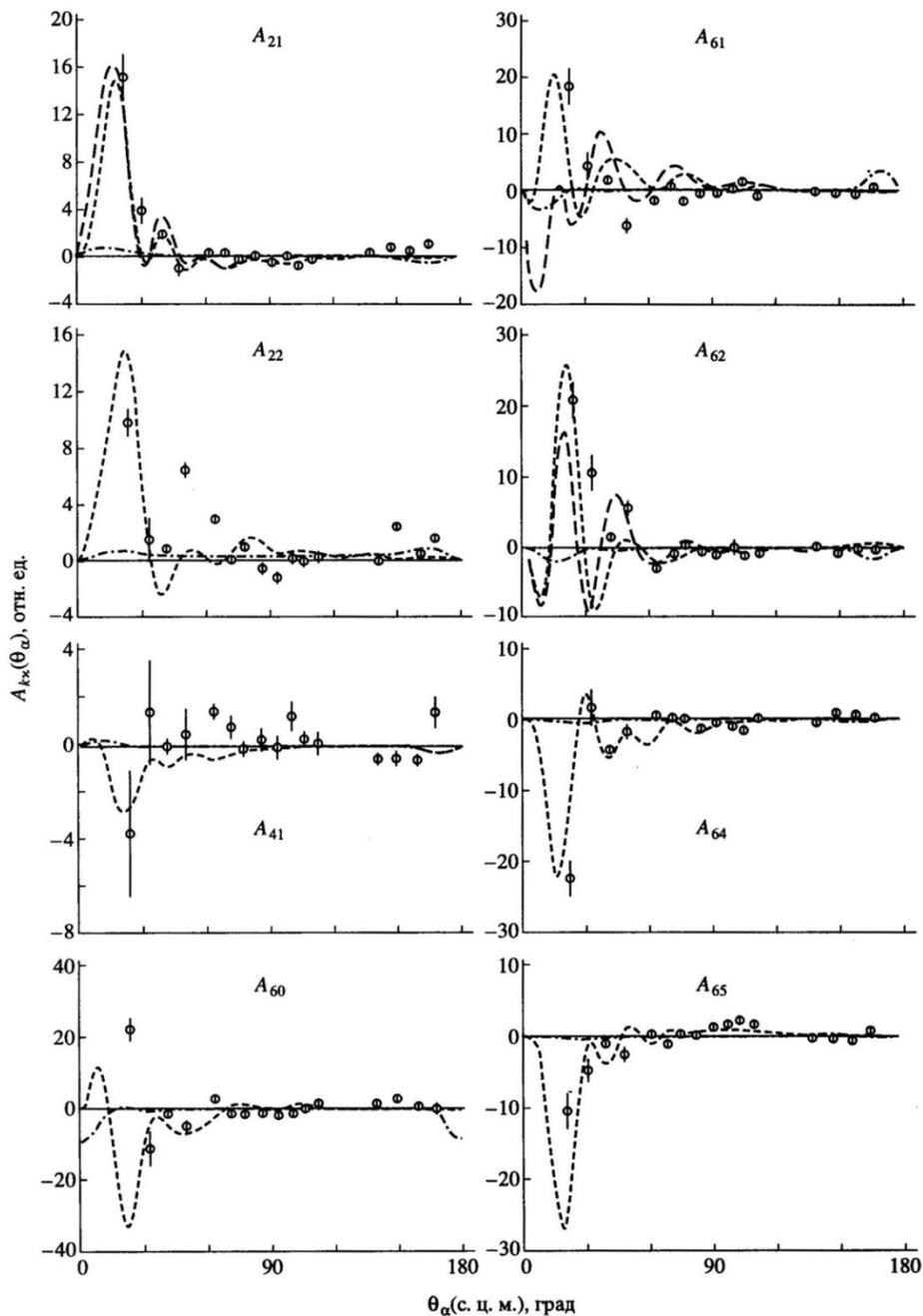


Угловые зависимости спин-тензоров  $A_{kk}$  матрицы плотности ядра  $^{12}\text{C}$  ( $2^+, 4.44$  МэВ), образованного в реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$  при  $E_\alpha = 30$  МэВ. Кривые – расчет по МСК (пунктир,  $\beta_2 = -0.55$ ), расчет для механизма срыва тяжелого кластера  $^8\text{Be}$  (длинный штрих). Сплошная кривая соответствует сумме этих механизмов.

Угловые зависимости спин-тензоров матрицы плотности ядра  $^{12}\text{C}$  в состоянии  $2^+(4.44 \text{ МэВ})$ , образованного в неупругом рассеянии дейтронов при  $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$ . Кривые : штрих – результаты расчета в МСК, длинный штрих – срыв тяжелой частицы, крестики – механизм последовательной передачи нуклонов, точечная – сумма этих механизмов,, сплошная – сумма трех механизмов

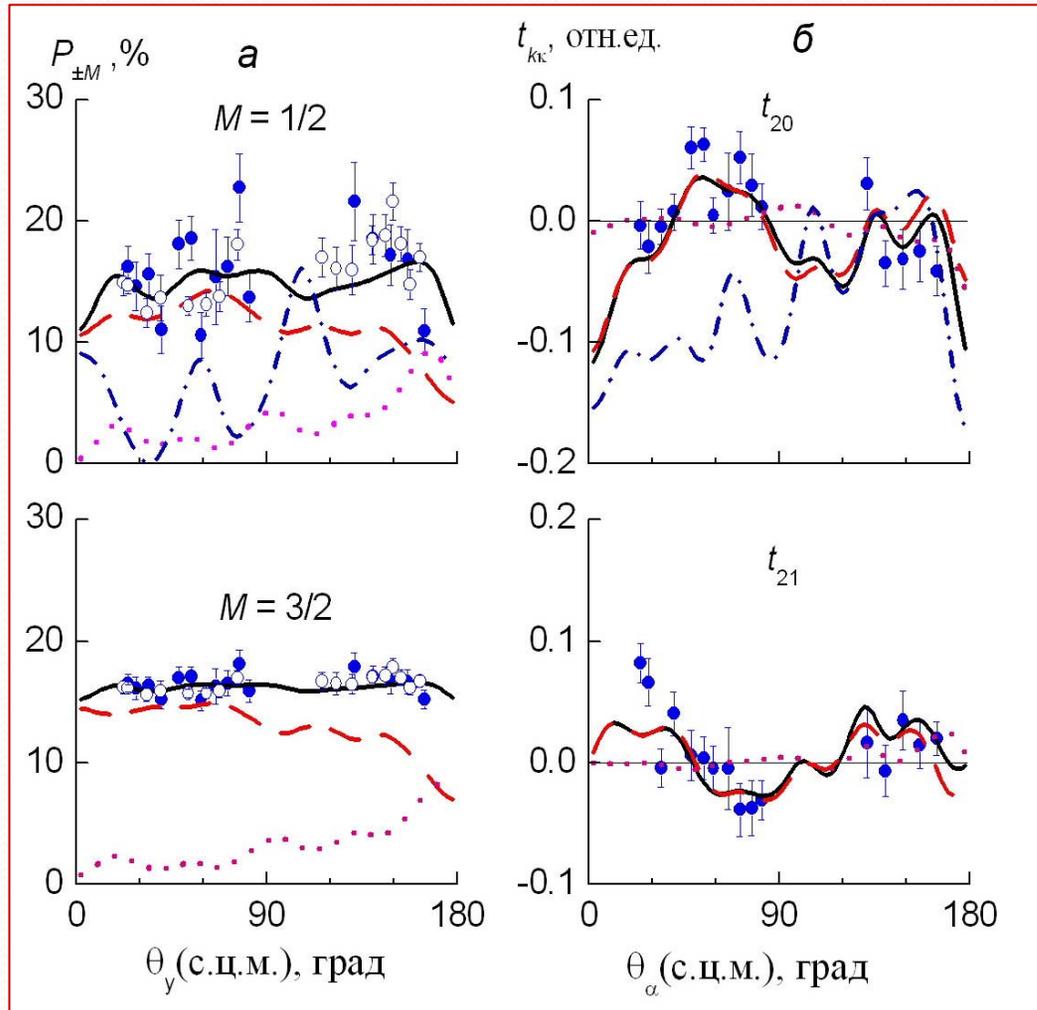
Угловые зависимости спин-тензоров матрицы плотности ядра  $^{12}\text{C}$  в состоянии  $2^+ (4.44 \text{ МэВ})$ , образованного в неупругом рассеянии ядер  $^3\text{He}$  при  $E_\tau = 22.4 \text{ МэВ}$ . Кривые: результаты расчета по МСК (штриховые), для механизма срыва тяжелой частицы (штрихпунктирные) и суммы двух этих механизмов (сплошные).



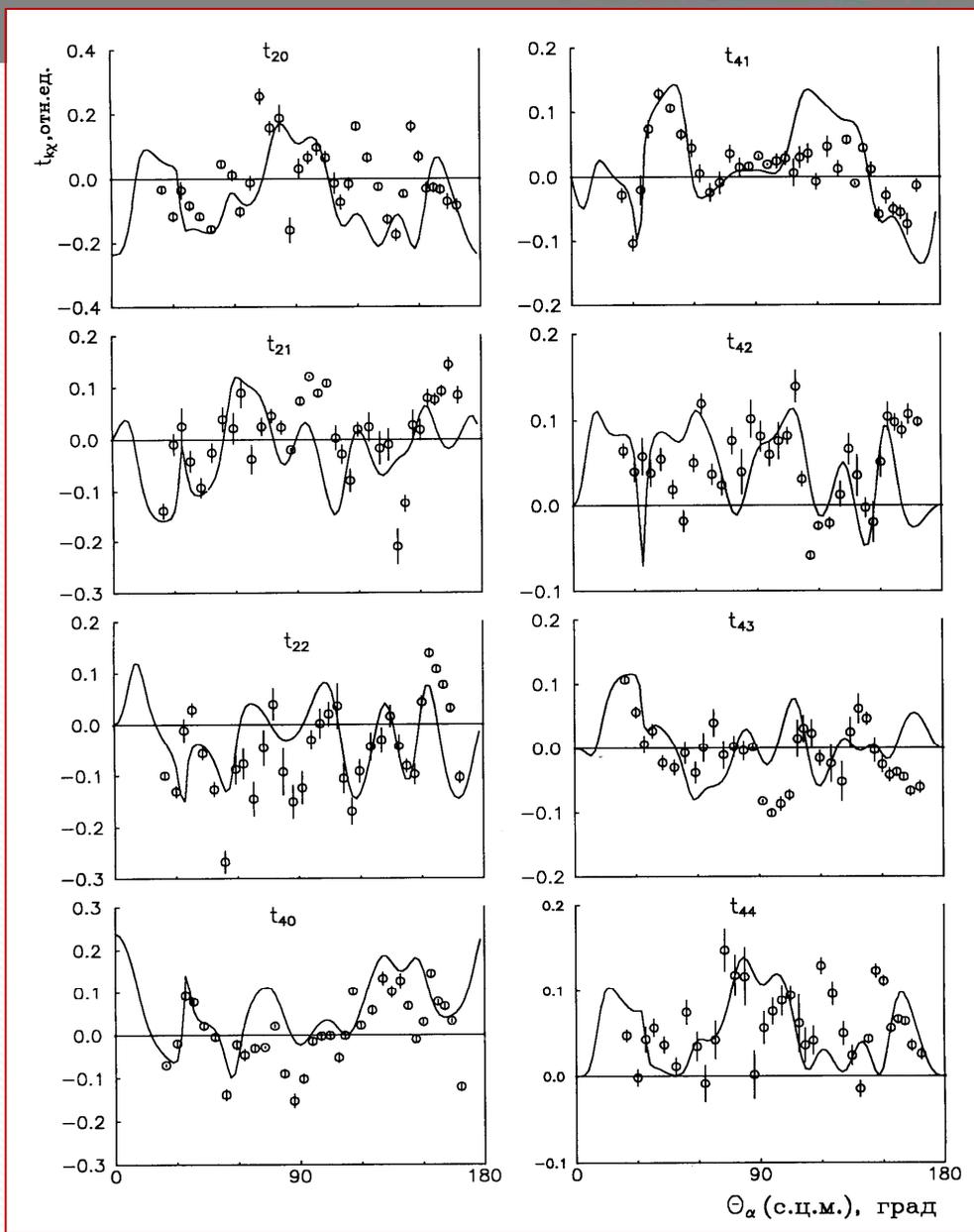


Угловые зависимости некоторых компонентов спин-тензоров  $A_{kk}(\theta_\alpha)$  матрицы плотности состояния  $3^-(6.131 \text{ МэВ})$  ядра  $^{16}\text{O}$ , образованного в реакции  $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  для  $E_\alpha = 30.3 \text{ МэВ}$ . Точки – эксперимент. Кривые – результаты расчета в МСК с  $V=150.4 \text{ МэВ}$  (пунктир) и с  $V=160 \text{ МэВ}$  (длинный пунктир), механизма образования составного ядра (штрих-пунктир).

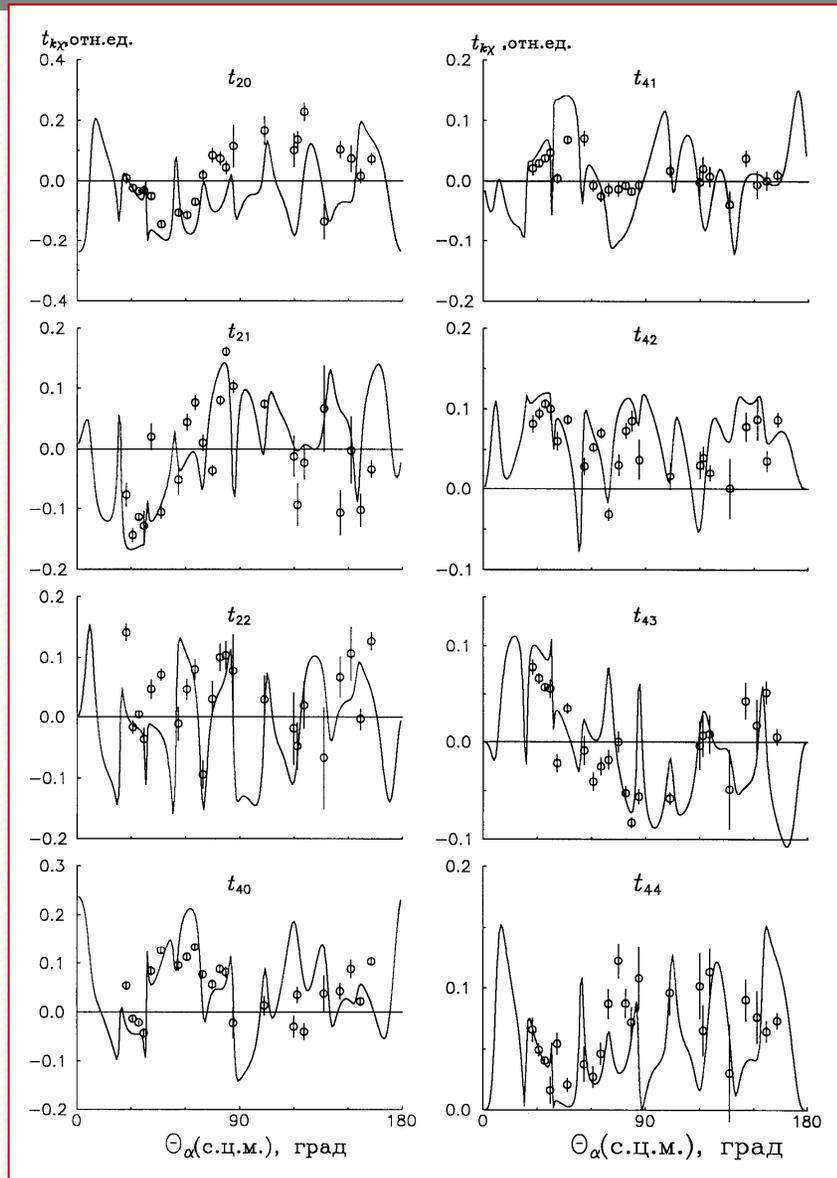
Угловые зависимости: *а*- заселенностей магнитных подуровней состояния  $5/2^-(4.445 \text{ МэВ})$  ядра  $^{11}\text{В}$ , образованного в реакциях  $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{В}$  при  $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$  (синие кружки) и  $^{10}\text{В}(d, p\gamma)^{11}\text{В}$  при  $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$  (пустые кружки); *б*- компонентов квадрупольного тензора ориентации  $t_{2\kappa}(\theta_\alpha)$  ядра  $^{11}\text{В}$  в состоянии  $5/2^-(4.445 \text{ МэВ})$ , образованном в реакции  $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{В}$ . Кривые – расчеты в предположении различных механизмов реакции: красная - механизм подхвата дейтронного кластера в МСК при  $\beta_2(^{11}\text{В}) = 0.4$ , фиолетовая – когерентная сумма срыва тяжелого кластера и двухступенчатого механизма, черная – суммарные корреляционные характеристики. Штрих-пунктир – то же для  $^{11}\text{В}(5/2^-)$  при  $\beta_2(^{11}\text{В}) = -0.4$ .

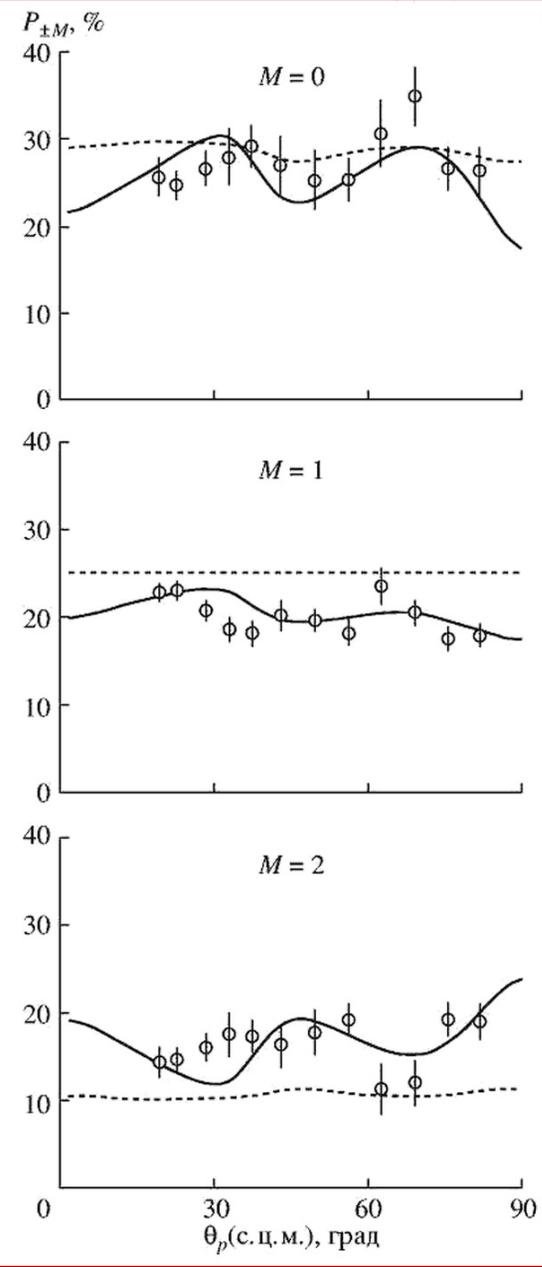
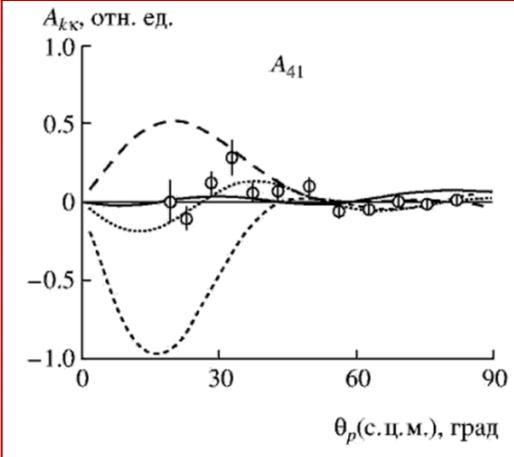
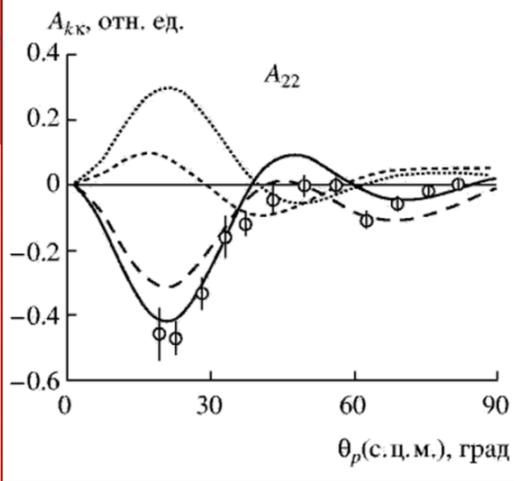
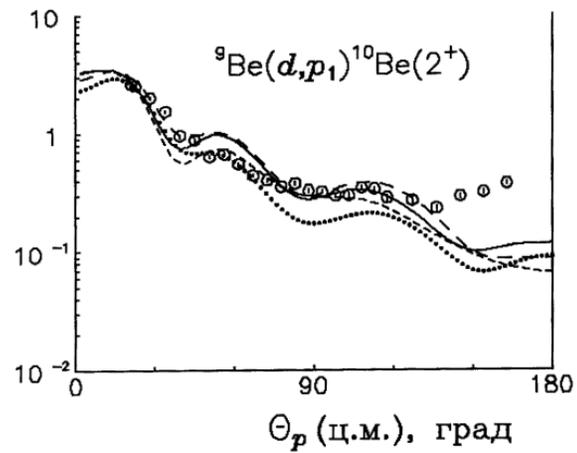
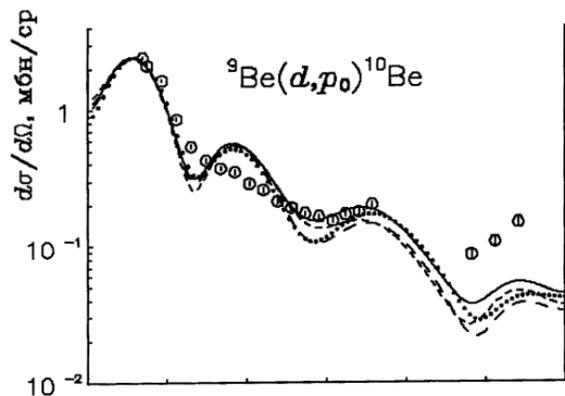


Угловые зависимости компонентов тензоров ориентации состояния  $2+(4.44$  МэВ) ядра  $^{12}\text{C}$ , образованного в реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}(2^+)$  при  $E_\alpha = 30$  МэВ



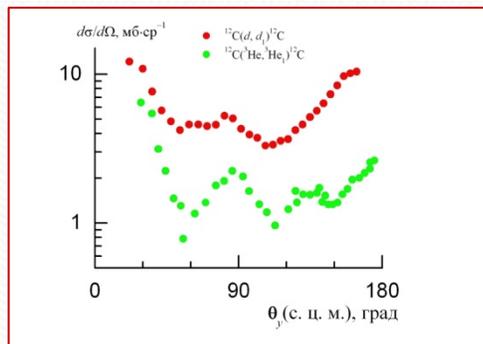
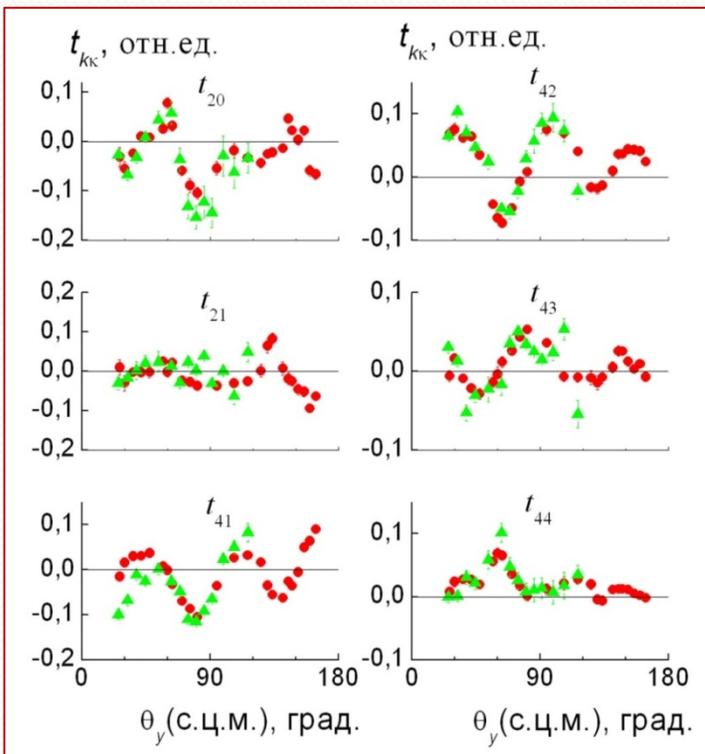
Угловые зависимости компонентов тензоров ориентации состояния  $2^+(1.78 \text{ МэВ})$  ядра  $^{28}\text{Si}$ , образованного в реакции  $^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha\gamma)^{28}\text{Si}(2^+)$  при  $E_\alpha = 30.3 \text{ МэВ}$



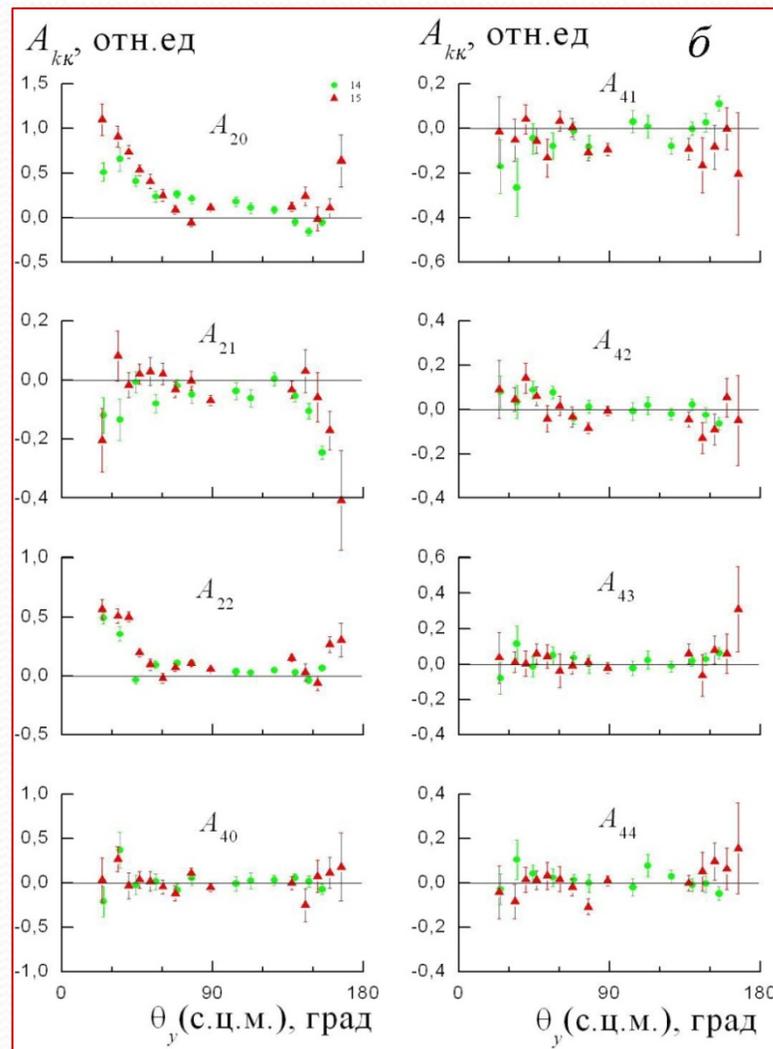
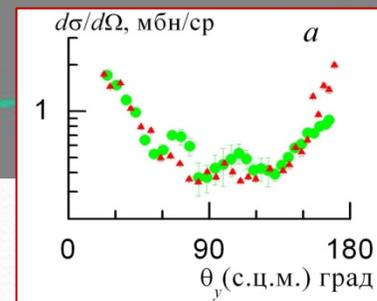


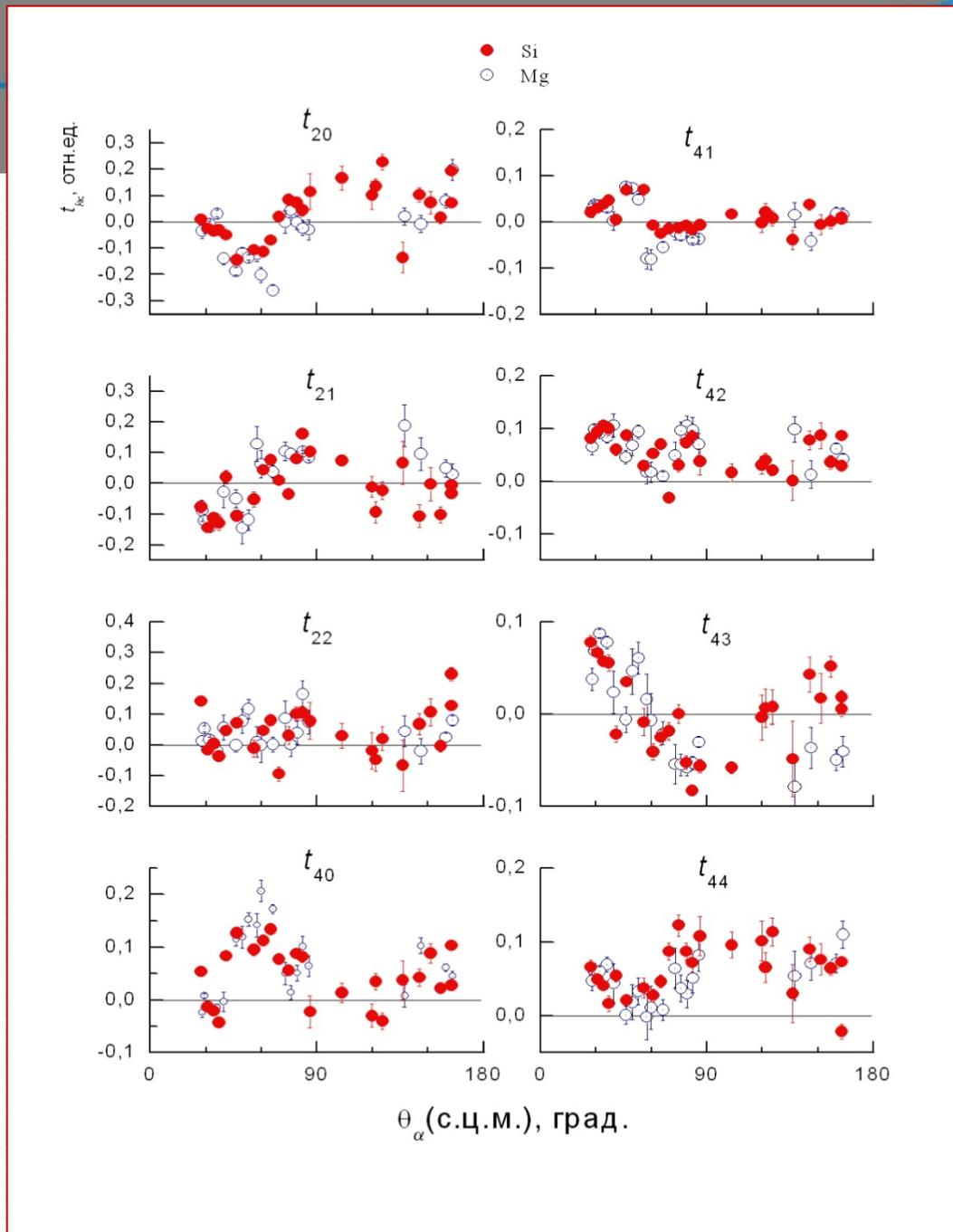
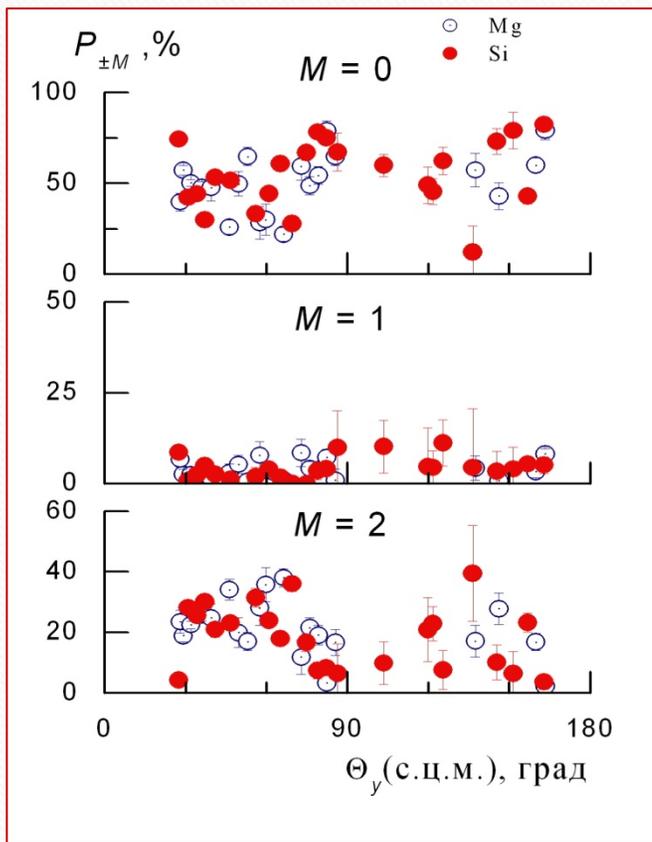
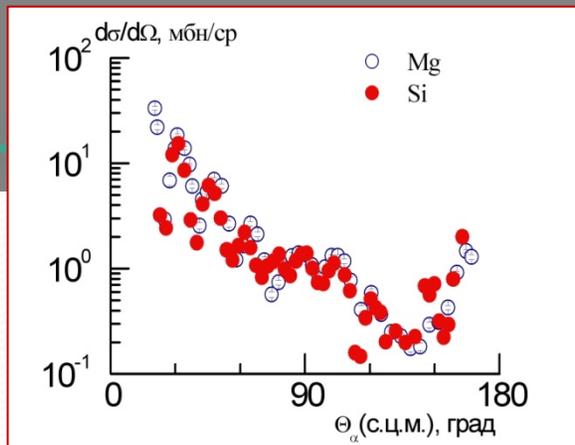
Обозначения кривых	$\beta_2(^9\text{Be})$	$\beta_2(^{10}\text{Be})$
сплошная	+	+
пунктир	-	+
длинный пунктир	+	-
точечная	-	-

Сопоставление экспериментальных тензоров ориентации мультипольных момента ядра  $^{12}\text{C}(2^+)$ , образованного в реакциях  $^{12}\text{C}(d, d)^{12}\text{C}$  (красные кружки) и  $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He})^{12}\text{C}$  (зеленые треугольники) при  $E = 7.5$  МэВ/нуклон.



Сравнение нормированных угловых распределений  $d$  и  $\alpha$ -частиц из реакций  $^{14}\text{N}(\alpha, d)^{16}\text{O}$  (зеленые кружки) и  $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}$  (красные треугольники) для смешанного состояния  $^{16}\text{O}(0^+ + 3^-)$  (а) и спин-тензоров выстроенного ядра  $^{16}\text{O}(3^-)$  (б) при  $E_\alpha = 30.3$  МэВ.





Тензоры ориентации  $t_{20}(0^\circ)$  и параметры  $\beta_L$ , определенные для выстроенных ядер – продуктов различных реакций

Реакция	$E_x$ , МэВ	$t_{20}(0^\circ)$	$\beta_2(B(E2)\uparrow)$	$\beta_2(Q_{\text{mom}})$	$\beta_2$	$\beta_3$
${}^9\text{Be}(d, p\gamma){}^{10}\text{Be}(2^+)$	12.5	-0.147	1.13±0.06		1.0	
${}^{10}\text{B}(d, p\gamma){}^{11}\text{B}(5/2^-)$	15.3			0.498±0.29	0.4	
${}^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma){}^{11}\text{B}(5/2^-)$	15.3			0.498±0.29	0.4	
${}^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	25.0		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{11}\text{B}(\alpha, t\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	25.0	-0.072	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5±0.2	
${}^{12}\text{C}(p, p){}^{12}\text{C}(2^+)$	7.5	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.55	
${}^{12}\text{C}(d, d\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	15.3	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{12}\text{C}(\tau, \tau\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	22.4	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.35	
${}^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	30.3	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.55±0.05	
${}^{13}\text{C}(\tau, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	22.5	-0.167	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5±0.1	
${}^{14}\text{N}(d, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	15.4		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	7.5		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{11}\text{B}(\alpha, p\gamma){}^{14}\text{C}(3^-)$	30.3		0.361± 0.024			0.35
${}^{12}\text{C}(\alpha, p\gamma){}^{15}\text{N}(3/2^-)$	30.3				0.35	
${}^{14}\text{N}(\alpha, d\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	30.3		0.362±0.018			0.4
${}^{15}\text{N}(\alpha, t\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	30.3	-0.046	0.362±0.018		0.35	0.35
${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	25.2; 30.3	-0.195	0.362±0.018		0.3	0.4
${}^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	7.5		0.362±0.018			0.35
${}^{19}\text{F}(\alpha, t\gamma){}^{20}\text{Ne}(2^+)$	30.3		0.728±0.032	0.741±0.134	0.35	
${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha\gamma){}^{24}\text{Mg}(2^+)$	30.3	-0.239	0.606±0.008	0.172 ± 0.082 0.438 ± 0.054 0.443 ± 0.071 0.713 ± 0.109	0.4	
${}^{27}\text{Al}(\alpha, t\gamma){}^{28}\text{Si}(2^+)$	25.0		0.407± 0.007	-0.352 ± 0.076 -0.313 ± 0.074	-0.35	
${}^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha\gamma){}^{28}\text{Si}(2^+)$	30.3	-0.239	0.407± 0.007	-0.352 ± 0.076 -0.313 ± 0.074	-0.35	

# Статическая деформация

Деформированное ядро можно представить в виде сфероида, поверхность которого определяется параметрами деформации  $\beta_{\mu\nu}$ :

$$R(\theta, \varphi) = R_0 \left[ 1 + \sum_{\mu\nu} \beta_{\mu\nu} \cdot Y_{\mu\nu}(\theta, \varphi) \right]$$

Если  $\nu = 0$ , деформированное ядро является сфероидом вращения, если  $\mu = 2$  – эллипсоидом вращения. Параметр  $\beta_2$  обычно называют параметром квадрупольной деформации,  $\beta_3$  – октупольной,  $\beta_4$  – гексадекапольной.

## Динамическая деформация

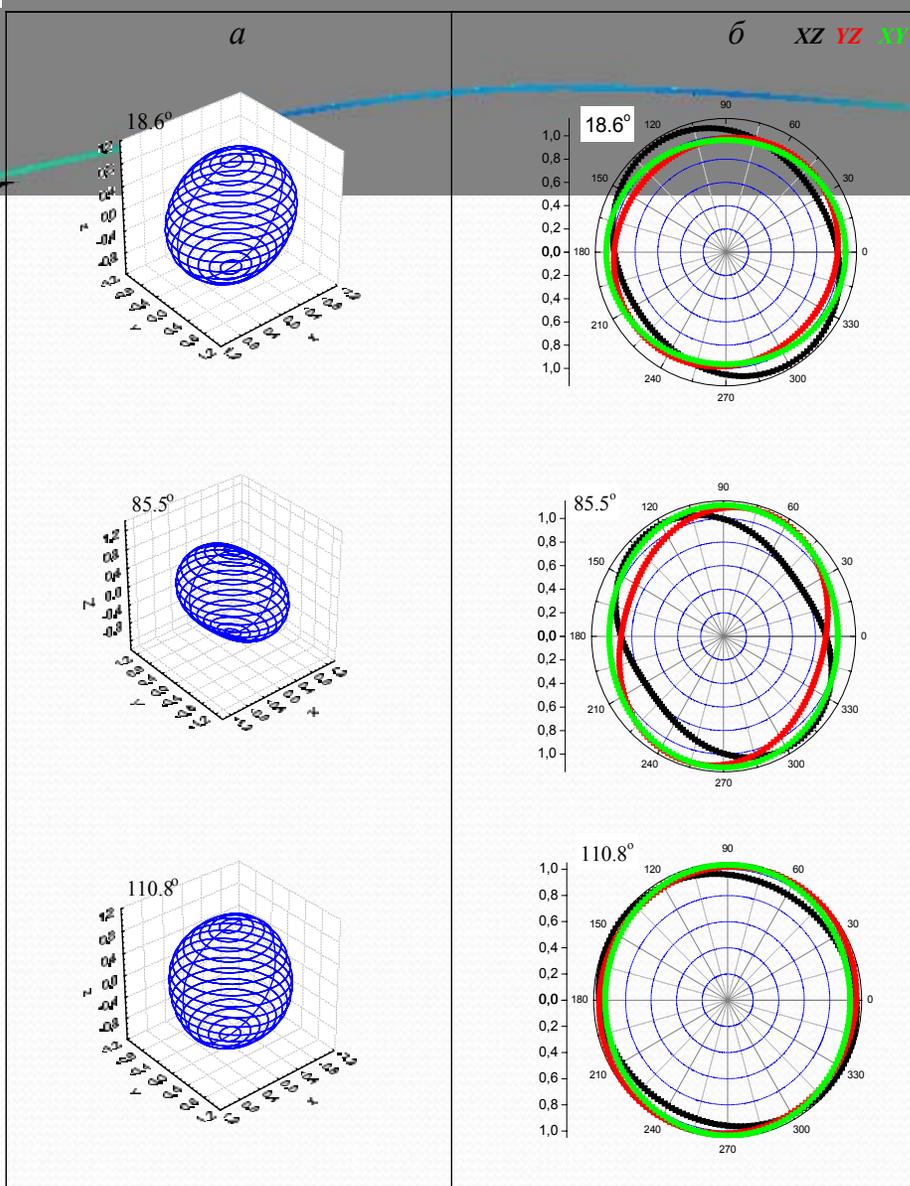
Динамическая деформация ядра определяется поверхностью сфероида, который строится из тензоров ориентации  $t_{kk}(\theta_y)$  мультипольных моментов выстроенного ядра:

$$R(\theta, \varphi; \tilde{\theta}_y) = R_0 \left\{ 1 + \sum_{kk} N_k t_{kk}(\tilde{\theta}_y) Y_{kk}(\theta, \varphi) \right\},$$

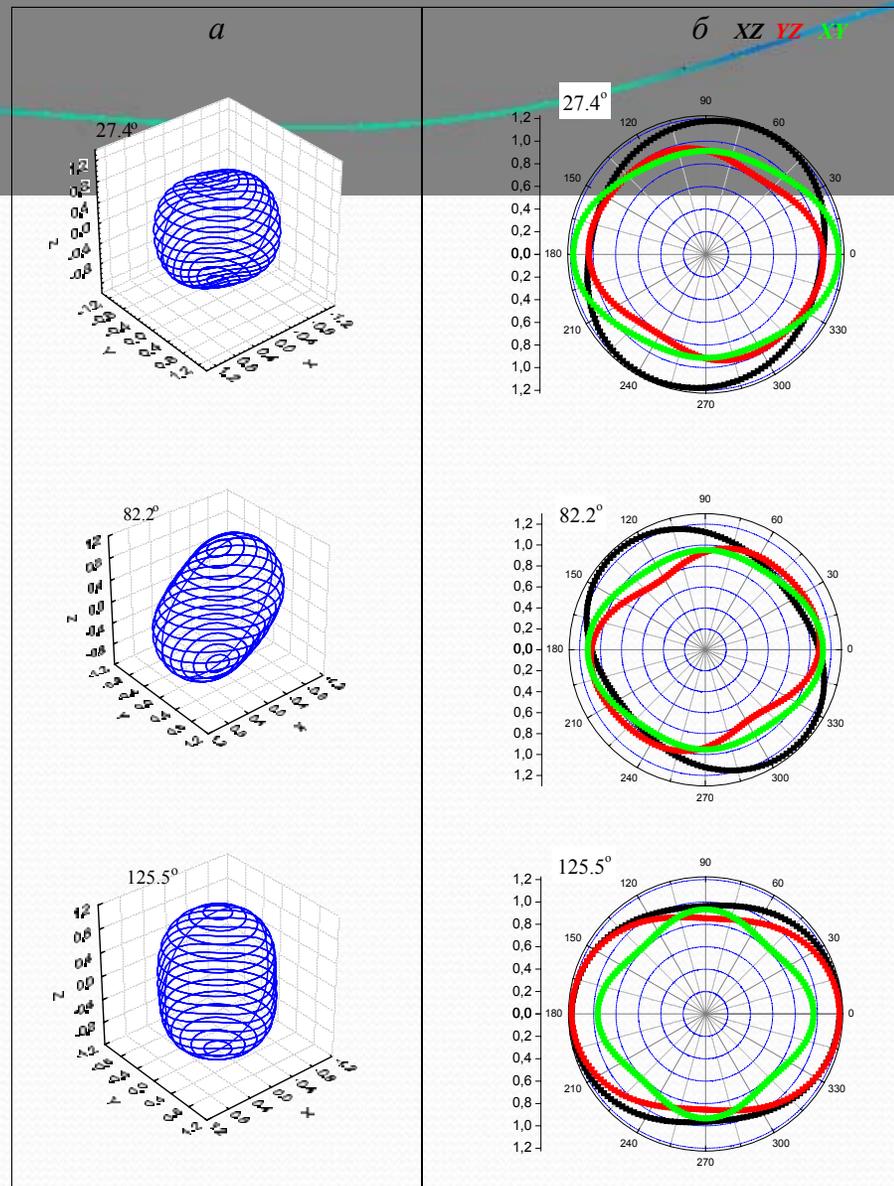
где углы  $\theta$ ,  $\varphi$ , задаются в системе координат, ось  $Z$  которой направлена по оси симметрии ядра. На малых углах ( $\theta_y \cong 0^\circ$ ) при минимальном переданном импульсе этот сфероид должен быть подобен форме статической деформации ядра. Нормировочная константа  $N_k$  для  $k = 0$  определяется соотношением:

$$N_k = \beta_k / t_{k0}(0),$$

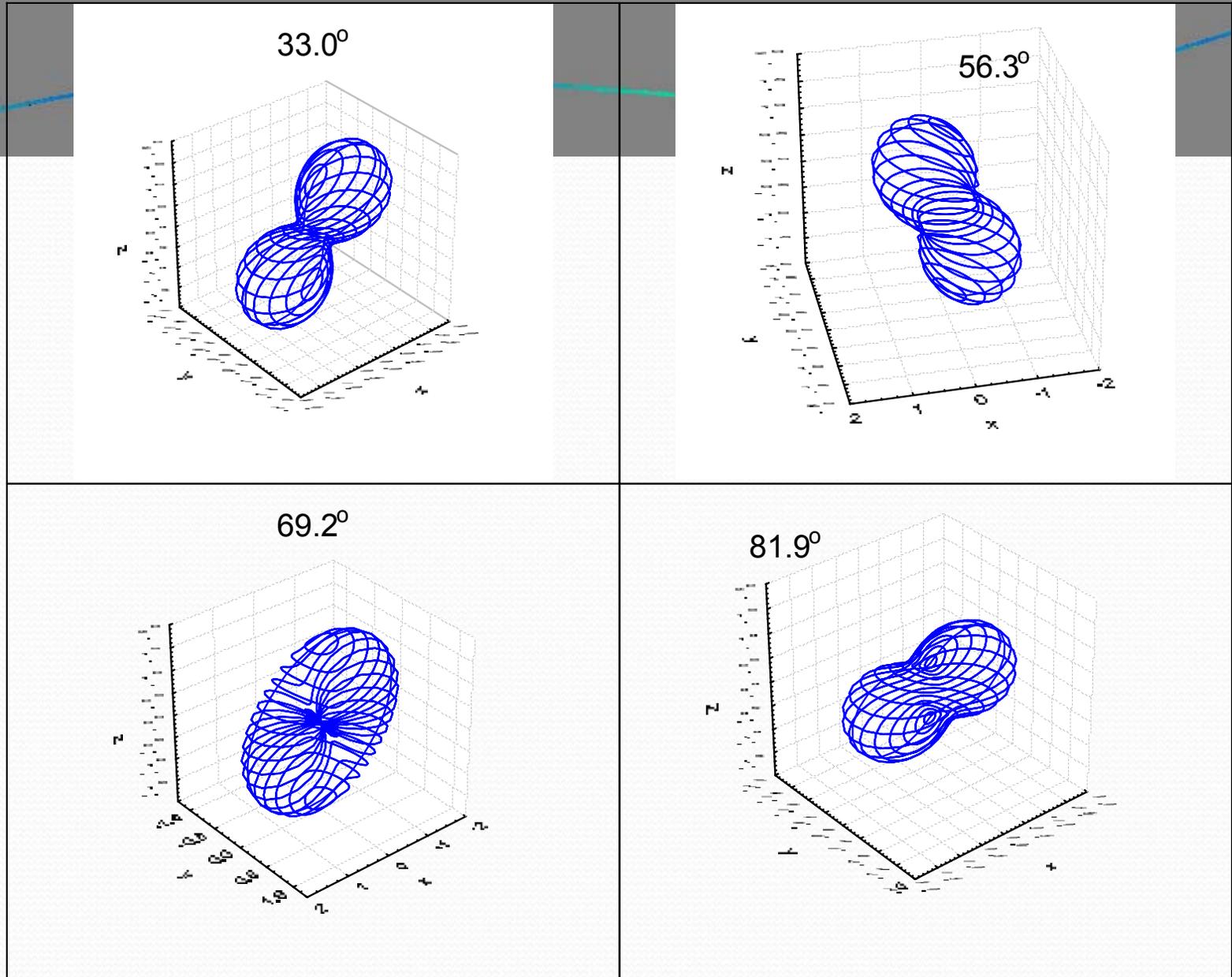
где  $\beta_k$  – параметр статической деформации ядра четного ранга.



Динамическая деформация (а) ядра  $^{12}\text{C}$  в нижнем состоянии  $2^+$ , образованном в реакции  $^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$  при  $E_\alpha = 25$  МэВ. Указаны углы  $\theta_d$  (с.д.м.). На панели б показаны сечения сфероидальной динамической деформации плоскостями  $XZ$  (черные),  $YZ$  (красные) и  $XY$  (зеленые).



Динамическая деформация (а) ядра  $^{28}\text{Si}$  в состоянии  $2^+(1.78$  МэВ), образованном в неупругом рассеянии  $\alpha$ -частиц при  $E_\alpha = 30.3$  МэВ. Указаны углы регистрации  $\alpha$ -частиц в с.д.м. Ось  $Z$  направлена по импульсу ядра отдачи. На панели б показаны разрезы сфероидальной динамической деформации плоскостями  $XZ$  (черные),  $YZ$  (красные) и  $XY$  (зеленые).

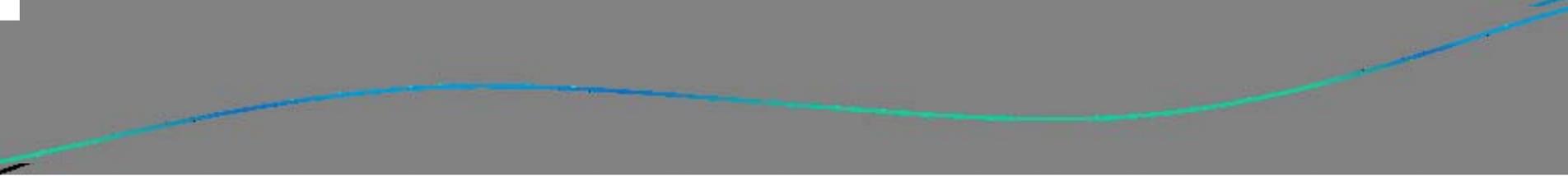


Динамическая деформация ядра  $^{10}\text{Be}$  в состоянии  $2^+(3.37 \text{ МэВ})$ , образованном в реакции  $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$  при энергии  $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$ . Указаны углы вылета протонов в с.ц.м.

# Основные результаты диссертации

- С использованием уникального многоканального измерительно-вычислительного комплекса накопления и обработки экспериментальной информации в режиме *on-line* в диссертации реализованы корреляционные эксперименты, которые позволяют, не проводя измерений в  $4\pi$ -геометрии, получать результаты, соответствующие такой геометрии. Получены экспериментальные функции угловой корреляции частица- $\gamma$ -квант в 23 реакциях на легких ядрах от  $^9\text{Be}$  до  $^{28}\text{Si}$  с образованием выстроенных конечных ядер в различных возбужденных состояниях. Созданы вычислительные программы для обработки измеренных функций угловой корреляции и восстановления различных характеристик этих ядер. Без проведения дополнительных экспериментов восстановлены спин-тензоры четного ранга матрицы плотности исследованных ядер. Из спин-тензоров получены заселенности магнитных подуровней и компоненты тензоров ориентации различных мультипольных моментов.
- Теоретический анализ характеристик корреляционных экспериментов выполнен в рамках современных моделей. Установлено, что основными механизмами образования выстроенных ядер при неупругом рассеянии являются коллективные возбуждения (для реакций – механизм срыва/подхвата с учетом коллективных возбуждений) в передней полусфере углов вылета конечных частиц, а на больших углах – обменный механизм срыва тяжелого кластера. Если частица-снаряд или ядро-мишень имеют небольшую энергию связи по кластерным каналам распада, существенную роль играют двухступенчатые механизмы, связанные с последовательной передачей частиц. При увеличении атомного номера выстроенного ядра вклад механизма срыва (подхвата) тяжелого кластера уменьшается.

- Универсальность механизма коллективного возбуждения деформированных выстроенных ядер подтверждает установленное в диссертации подобие корреляционных характеристик для одного и того же конечного выстроенного ядра, образующегося в различных реакциях. Такой эффект продемонстрирован на примере ядер  $^{12}\text{C}(2^+)$ ,  $^{11}\text{B}(5/2^-)$  и  $^{16}\text{O}(3^-)$ . Аналогичное подобие обнаружено и для одного типа реакции (неупругого рассеяния  $\alpha$ -частиц) на разных ядрах ( $^{24}\text{Mg}$  и  $^{28}\text{Si}$ ) с образованием нижних  $2^+$  состояний.
- В диссертации впервые установлена заметная чувствительность заселенностей магнитных подуровней возбужденных состояний ядер и тензоров ориентации мультипольных моментов к параметру  $\beta_L$  статической квадрупольной или октупольной деформации выстроенных ядер, причем не только к его абсолютной величине, но и к знаку, что позволило определить величину и знак  $\beta_L$  для 9 конечных ядер и 4 ядер-мишеней.
- При анализе экспериментальных данных для выстроенного ядра  $^{10}\text{Be}(2^+)$ , образованного в реакции  $^9\text{Be}(d, p\gamma)^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ МэВ})$  впервые обнаружено, что в выстроенном ядре  $^{10}\text{Be}$  должна присутствовать кластерная конфигурация, соответствующая динейтронной компоненте волновой функции ядра  $^{10}\text{Be}$ , т.е. установлено существование гало-ядра  $^{10}\text{Be}(2^+)$ .
- Получена динамическая деформация выстроенных ядер, определяемая найденными тензорами ориентации мультипольных моментов. Динамическая деформация выстроенного ядра имеет сложную форму, не сводящуюся к статической, и существенно зависит как от способа его образования, так и от угла вылета конечной частицы.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**Научная новизна** представленной работы обусловлена тем, что все экспериментальные частица–гамма-квант функции угловой корреляции получены диссертантом впервые. Впервые без дополнительных измерений восстановлены спин-тензоры матрицы плотности и другие корреляционные характеристики выстроенных ядер. Впервые установлено, что основным механизмом образования выстроенных ядер является механизм коллективного возбуждения. Для ряда ядер уточнены параметры квадрупольной и октупольной статической деформации.

**Практическая значимость.** Диссертантом разработан уникальный измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий в режиме *on-line* проводить длительные многоканальные корреляционные эксперименты и их первичную обработку. Несомненную практическую ценность представляет уточнение параметров ядро-ядерного взаимодействия, статических мультипольных параметров деформации. Многие результаты диссертации размещены в базе ЦДФЭ (CENTRE FOR PHOTONUCLEAR EXPERIMENTS DATA).

Полученные в диссертации результаты могут найти свое применение в экспериментальных исследованиях ядерных реакций, которые проводятся в ряде российских научных центров (НИИЯФ МГУ, РНЦ «Курчатовский институт», НИФИ СПбГУ, ФЭИ (г. Обнинск), ПИАФ (г. Гатчина)) и др.

**Личный вклад автора диссертации.** В работах по теме диссертации, выполненных с соавторами, автору диссертации принадлежат постановка тех задач, которые вошли в основные положения диссертации, разработка основных идей измерительно-вычислительного комплекса, разработка и создание основных экспериментальных методик, их программная реализация. Автор диссертации принимал непосредственное участие в экспериментальном исследовании всех 23 реакций, представленных в работе. При определяющем вкладе автора проведены численные расчеты и теоретический анализ полученных экспериментальных характеристик выстроенных ядер.

**Достоверность** результатов полученных в диссертации, обеспечена надежностью и тщательностью использованных экспериментальных методик, проведением ряда контрольных и повторных экспериментов, высоким качеством обработки экспериментальных данных. Достоверность результатов опирается также на использование хорошо апробированных теоретических моделей и реализующих их вычислительных программ.

Отклонение поверхности ядра от сферической формы радиуса  $R_0$  описывается с помощью коллективных переменных  $\beta_{kk}$  разложением по сферическим гармоникам в системе координат, ось  $Z$  которой совпадает с осью симметрии ядра

$$\frac{R(\theta, \varphi)}{R_0} = 1 + \sum_{kk} \beta_{kk} Y_{kk}(\theta, \varphi). \quad (1)$$

Параметры  $\beta_{kk}$  - средние значения оператора мультипольного момента  $Q_{kk}$  в заданном состоянии  $|JM\rangle$

$$\beta_{kk} \cong \langle JM | \hat{Q}_{kk} | JM \rangle.$$

Для ориентированных ядер среднее значение  $Q_{kk}$  может быть представлено с помощью спиновой матрицы плотности

$$\langle JM | \hat{Q}_{kk} | JM \rangle = \frac{1}{k\hat{J}} \frac{\rho_{kk}}{\rho_{00}} \langle J || \hat{Q}_k || J \rangle,$$

где  $\rho_{kk}$  - неприводимые спин-тензоры матрицы плотности.

Введем величину  $t_{kk} = \beta_{kk} / \langle ||Q_k|| \rangle$  - тензор ориентации мультипольного момента, тогда

$$t_{kk} = \frac{1}{k\hat{J}} \frac{\rho_{kk}}{\rho_{00}}.$$

По аналогии с (1) определим поверхность, которую описывает полный спин  $J$  ориентированного ядра в состоянии  $|JM\rangle$ , образованного в реакции  $A(x, y)B^*$

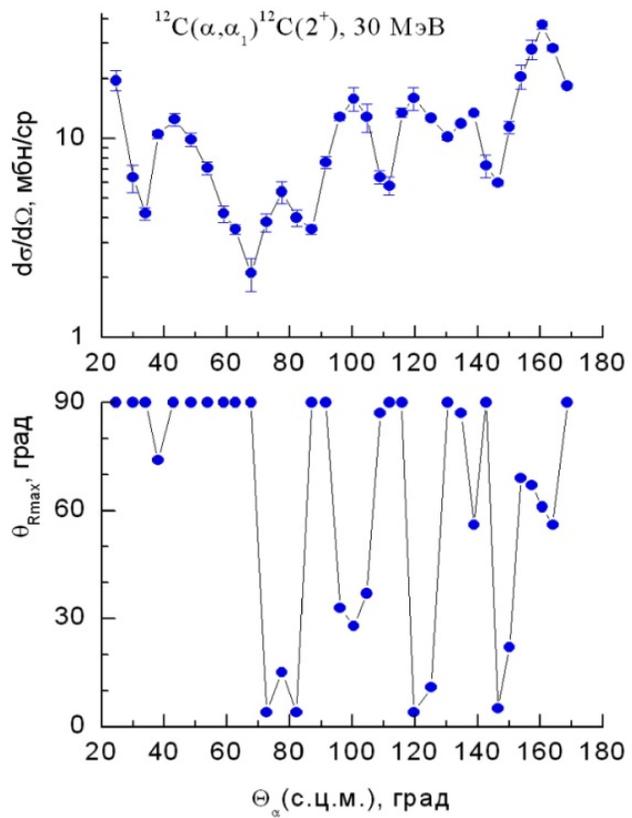
$$R(\theta, \varphi; \theta_y) = R_0 \left( 1 + \sum_{kk} \beta_{kk}(\theta_y) Y_{kk}(\theta, \varphi) \right),$$

$$\beta_{kk}(\theta_y) = N_k t_{kk}(\theta_y);$$

Таким образом, форму  $R(\theta, \varphi; \theta_y)$  можно рассматривать как форму динамической деформации ядра в состоянии  $|JM\rangle$ .

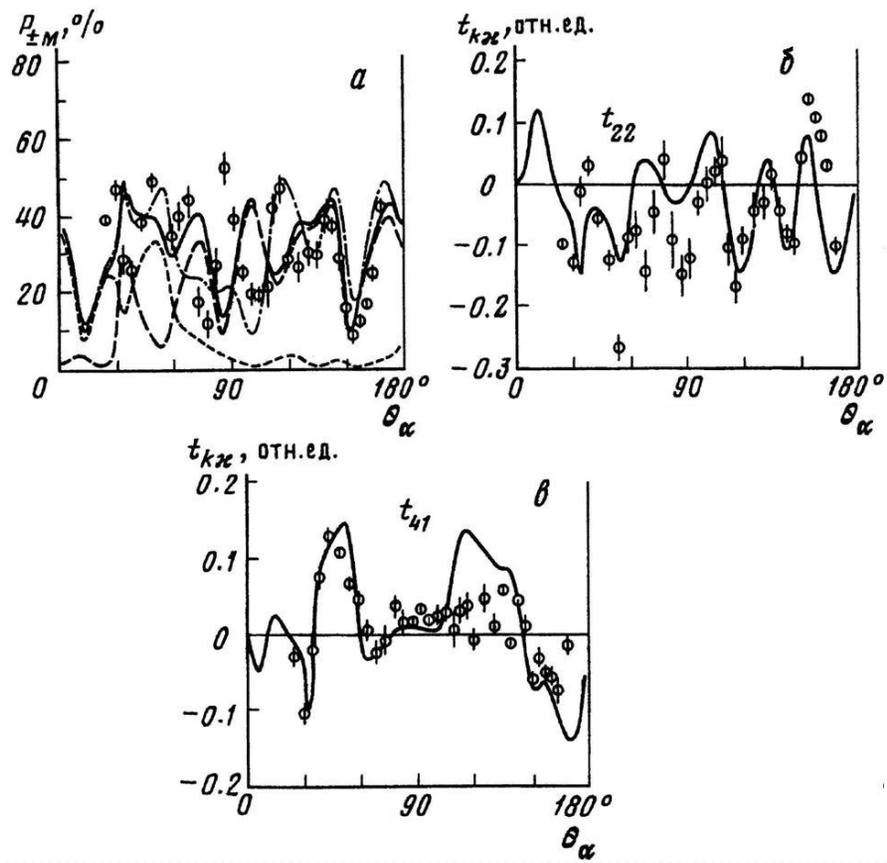
Нормировочная константа  $N_k$  задается приведенным матричным элементом мультипольного момента и непосредственно определяется статической деформацией ядра.

$$\beta_{kk}(\theta_y = 0) \equiv \delta_{k0} \beta_{k0}^{stat}$$



В начале 80-х годов в работах Н.С. Зеленской и И.Б. Теплова был разработан, теоретически обоснован принципиально новый метод изучения свойств ядер в возбужденных состояниях с помощью измерения частица – гамма-квант корреляций **в различных плоскостях относительно плоскости реакции** [1-3], который был впервые экспериментально реализован в НИИЯФ МГУ [10]. Именно этот метод явился основой целой серии экспериментальных и теоретических работ, позволивших развить качественно новые представления о свойствах ядер в возбужденных состояниях.

1. Н.С. Зеленская, И.Б. Теплов // Параметризация функции угловой корреляции конечных частиц и  $\gamma$ - квантов в случае регистрации  $\gamma$ - квантов вне плоскости реакции. Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1980. Т.44. С. 960-967.
2. N.S. Zelenskaya, I.B. Teplov // Determination of the final nucleus density matrix by measuring the angular correlations of charged particles and  $\gamma$ -quanta in various plane. Nucl. Phys. A. 1983. V.406. P. 306-324.
3. И. Б. Теплов, Г.С. Гуревич, В.М. Лебедев, Н.В. Орлова, А. В. Спасский, Л.Н. Фатеева, Г.В. Шахворостова // Экспериментальное определение угловой зависимости безмодельных характеристик неупругого рассеяния  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}_{4.43}$  с помощью угловых  $\alpha$ - $\gamma$  -корреляций. Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39 С. 31-33.
4. Н.С. Зеленская, И.Б. Теплов. Характеристики возбужденных состояний ядер и угловые корреляции в ядерных реакциях. М.: Энергоатомиздат, 1995. 224 с.



Угловые зависимости (в с.ц.м.) различных динамических характеристик выстроенного ядра  $^{12}\text{C}(2+)$ , полученных в реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}(2+)$  при  $E_\alpha = 30$  МэВ: *a* – заселенность магнитных подуровней состояния с проекцией  $M = 2$ . Штрихпунктирная кривая – расчет по МСК в предположении отсутствия других механизмов. Приведены также кривые, соответствующие парциальным вкладам для МСК (короткий штрих), механизма срыва тяжелого кластера  $^8\text{Be}$  (длинный штрих) и для их суммы (сплошная кривая); *b*, *c* – некоторые компоненты тензора ориентации. Кривые – расчет по МСК с потенциалом  $A2$  и  $\beta_2 = -0.55$ , кружки – эксперимент.

# Статическая деформация

Статическая деформация ядра является сфероидом, поверхность которого определяется параметрами деформации ядра:

$$R(\theta, \varphi) = R_0 \left[ 1 + \sum_{\mu \nu} \beta_{\mu \nu} \cdot Y_{\mu \nu}(\theta, \varphi) \right]$$

Если  $\nu = 0$ , статическая деформация является сфероидом вращения, если  $\mu=2$  – эллипсоидом вращения. Параметр  $\beta_2$  обычно называют параметром квадрупольной деформации,  $\beta_3$  – октупольной,  $\beta_4$  – гексадекапольной.

# Характеристики выстроенных ядер, определенные без дополнительных экспериментов

- Заселенность магнитных подуровней – распределение относительных дифференциальных сечений по проекциям спина ядра.
- Тензоры ориентации мультипольных моментов, совпадающие при малых углах вылета частиц для аксиально-симметричных ядер с параметрами статической деформации.
- Динамическая деформация выстроенного ядра – поверхность сфероида, описываемая полным спином ядра.