

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАЛОНУКЛОННЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ О НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ *NN*-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Каспаров Александр Александрович
(ИЯИ РАН)

*Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц*

Москва, 2017

СТРУКТУРА РАБОТЫ:

Введение

Глава 1. Низкоэнергетические параметры NN -взаимодействия и зарядовая независимость ядерных сил

Глава 2. Программы кинематического моделирования ядерных реакций

Глава 3. Кинематическое моделирование ядерных реакций

Глава 4. Комплекс сервисных программ для проведения экспериментов

Глава 5. Моделирование эксперимента $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Глава 6. Экспериментальное исследование реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Заключение

Список литературы – 62 источника

Общий объем работы – 105 стр.

НАРУШЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ СИММЕТРИИ В *nn*-ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Вскоре после открытия нейтрона, В.Гейзенберг сформулировал принцип зарядовой независимости ядерных сил, согласно которому взаимодействие между любой парой нуклонов аналогично.

$$F_{pp} = F_{np} = F_{nn}$$

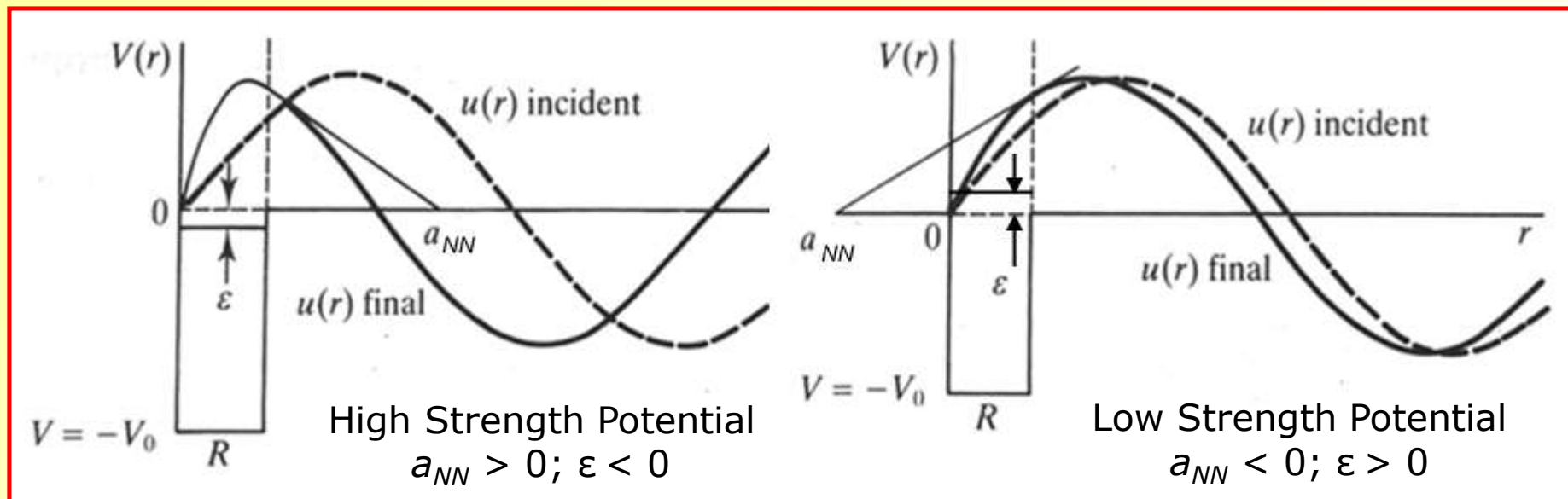
Более слабое утверждение – принцип зарядовой симметрии – равенство *pp*- и *nn*-сил в синглетном состоянии.

$$F_{pp}^S = F_{nn}^S \text{ в } {}^1S_0 \text{ состоянии } (T=1, S=0)$$

Благодаря существованию виртуального уровня с энергией близкой к нулю в синглетном 1S_0 состоянии двух нуклонов длины рассеяния (a_{nn} и a_{pp}) весьма чувствительны к небольшим различиям *nn*- и *pp*-потенциалов.

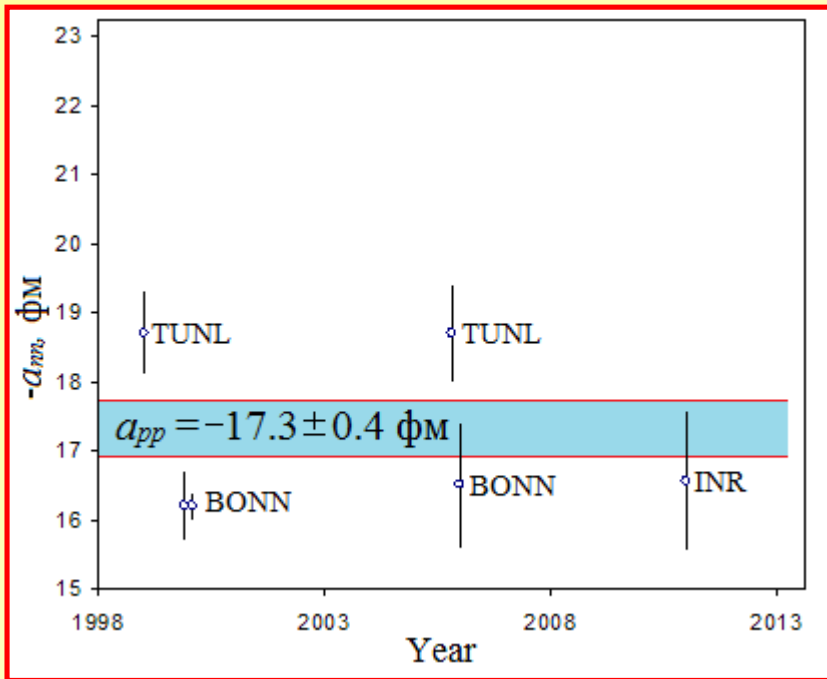
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ NN-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Низкоэнергетические параметры NN-взаимодействия –
NN-длины рассеяния и энергии виртуальных NN-состояний



$$\frac{1}{a_{NN}} = -\left(\frac{m_N \epsilon}{\hbar^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} r_{NN} \frac{m_N}{\hbar^2} + \dots$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИН РАССЕЯНИЯ a_{nn} и a_{pp}



$$a_{pp} \sim -17.3 \text{ фм}$$

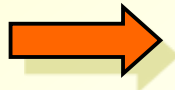
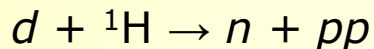
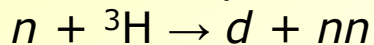
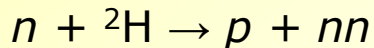
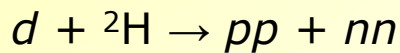
Реакция $nd \rightarrow nnp$:

$$a_{nn} \sim -16.5 \text{ фм}$$

$$a_{nn} \sim -18.7 \text{ фм}$$

НЗС: $a_{nn} - a_{pp} ?$

Планируемые и текущие эксперименты:



Измеренные низкоэнергетические параметры NN -взаимодействия могут оказаться не теми, которые присущи свободным NN -системам

ПРОГРАММЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Необходимы программы кинематического моделирования ядерных реакций с числом конечных частиц ≥ 3

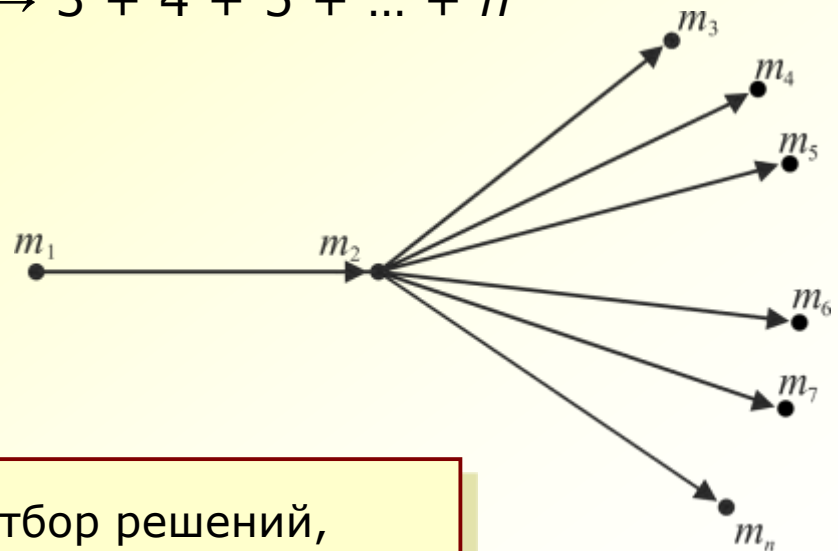
Программа DBKin (Democratic Breakup Kinematics)

Пример: реакция $1 + 2 \rightarrow 3 + 4 + 5 + \dots + n$

Задаются произвольные
кинематические параметры
(энергии и углы вылета)
вторичных частиц



Отбор решений,
удовлетворяющих
законам сохранения
энергии и импульса



ПРОГРАММА DBKIn (DEMOCRATIC BREAKUP KINEMATICS)

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
1			931502					E_max	E3	E4	E5	E6	P3	P4	P5	P6	cheat3	cheat4	cheat5	SIN(cheat3)	cheat3	ПРОБ-КОС	E3	E4	E5	E6	cheat3	cheat4	cheat5	cheat6	E.0	p.0
2			m1	16	6He	8406,60684		38,9659	25,9	5,3	4,8	2	440	109	93,1	81	-1,9	-25,9	26,66	0,134897	18,93	-10,0796179									39,9	670,4
3			m2	2	p	938,790624		38,9378	26	3,4	2	7,5	440	80,4	61,8	119	0,469	3,226	9,076	-0,150142	-8,835	-39,5276234									39,9	670,1
4			m3	11	4He	3728,4313		38,9406	26	11	0,8	0,8	441	146	18,9	38	0,778	26,81	1,804	-1,902045											39,9	670,2
5			m4	1	n	939,873021		38,9541	26,1	5	7,4	0,5	442	97,1	118	30	-1,38	-16,7	-23,18	2,8294632											39,9	670,3
6			m5	1	n	939,873021		39,0216	25,9	0,5	10	2,2	441	51,7	140	64	0,192	-17,1	-4,919	0,116454	18,16	-0,29286576	25,9	6,54	10	2,18	0,19	-17,1	-	18,16	40	670,5
7			m6	2	p	938,790624		38,9873	26	1,8	4,4	8,8	443	58,5	90,6	115	-1,48	17,22	2,87	-0,092328	-5,298	-39,4620987									40	670,6
8								39,0118	26	3	7,6	5,4	441	61,2	119	90	0,976	21,3	3,712	0,03943	1,817	-26,7540314									40	670,8
9			E1			40		39,0012	26	7,1	3,2	5,7	441	116	77,7	75	-1,34	-4,283	-16,05	0,170966	18,49	-27,724509									40	670,7
10			P1			670,916182		38,9602	26	12	0,8	6,1	441	151	38,2	13	0,343	-7,8	-17,79	2,5612678											39,9	670,3
11			Q_max			-0,970802		39,1228	26	6,3	3,5	3,4	441	109	80,9	80	1,835	-4,347	24,44	-0,702467	-44,63	-7,94434872									40,1	671,7
12			Q3			0		38,9479	25,8	2,4	6,1	4,8	440	67,4	107	95	0,146	18,91	-22,42	0,1933237	11,16	-35,3919368									39,9	670,2
13			Q3			2		38,9813	26	13	0	0	441	156	8,22	2,8	0,027	4,538	-14,8	-0,702306											40	670,5
14			Q4			0		39,0818	25,9	6,6	1,5	1,1	440	111	53	88	-1,9	12,73	-27,48	0,1477281	8,496	-21,2845909									40,1	671,4
15			Q4			30		38,9855	26	11	0,4	1,2	441	147	26	47	-1,18	24,86	-1,615	-1,11061											40	670,5
16			Q5			0		39,0557	26,1	5,9	5,7	1,3	442	105	104	50	-1,27	-12,4	-5,32	0,8471144	17,9	-3,65832947									40	671,1
17			Q5			30		39,0643	26,1	9,4	1,2	2,3	442	133	47,1	66	1,344	-7,2	8,317	-0,006946	-0,398	-15,9866539									40	671,2
18								38,9471	25,8	11	0,7	1,3	439	146	35,7	49	0,318	7,299	10,27	-0,556322	-13,8	-10,7788484									39,9	670,2
19								38,9963	26	7,7	2,6	2,7	441	121	70,4	73	0,238	0,918	-8,547	0,1113724	8,393	-30,7460484									40	670,6
20			ПРОВЕРКА	0,5	n (или>0) количество проверки закона сохранения			39,0314	26,1	5,5	1,3	8,1	442	102	48,6	109	0,329	10,61	29,1	-0,419058	-24,77	-11,3049132									40	670,9
21			Число ПРОВЕР	805				39,0738	25,8	9,6	2,8	0,8	440	135	72,7	39	0,181	-16,9	-11,11	0,1212093											40	671,3
22								39,0679	25,9	5	7,8	0,4	441	96,6	121	27	1,895	25,33	5,884	-1,389482											40	671,2
23			ПЕРВ-точк(0-1)	1	m0 (первич. расчет - E3-подой). 1 (точк. разг)			39,1208	25,9	5	4,7	1,5	440	96,6	94,1	82	0,21	14,17	5,689	-0,424186	-21,1	-30,0068268									40,1	671,7
24			E3	28,9547				38,9825	25,9	8,7	0,1	4,2	441	129	15,9	89	-1,78	28,37	23,81	-0,407478	-37,41	32,2812954									40	670,5
25			ΔE3	0,2				38,9857	25,8	0,2	9	3,9	440	21,5	131	85	0,29	22,3	20,82	-0,467466	-41,87	25,3562083									40	670,6
26						Вычислять:		39,016	26,1	3,6	7,3	2	442	82,6	117	81	1,202	3,998	20,86	-0,183633	-26,59	-11,3003134									40	670,8
27						Число циклов по Stage 1 n		39,0772	26	4,5	2,3	6,3	441	91,8	96	109	-1,22	7,21	23,14	-0,645397	-2,814	-30,1349286									40	671,3
28						событий (I-O) по Stage 2 n	3090	39,0646	26	11	0,9	1,6	441	141	41,6	34	-1,04	4,703	-12,18	0,091321	1,47	-1,0006199									40	671,2
29								38,9544	26,1	11	0,6	1,6	442	144	32,4	33	-0,72	0,362	-27,73	0,3849746	23,27	9,19982176									39,9	670,3
30								39,1257	25,8	4,5	1,7	4,3	439	80,3	71	109	1,3	22,85	17,97	-0,607596	-17,42	-3,1857413									40,1	671,7
31								39,0084	25,8	2,5	9,1	1,7	439	68,1	131	36	1,757	-5,62	-10,26	0,2848265	17,14	-18,5259338									40	670,6
32						Выполнить		39,0258	26	7,7	1,1	4,3	441	121	44,5	90	-0,46	11,43	4,373	-0,286384	-13,46	-19,0740114									40	671,2
33								38,9913	26	7,4	0,7	4,9	441	118	36,8	96	0,173	18,61	-5,261	-0,33261	-29,43	-10,6254911									40	670,6
34								38,9335	25,8	0,9	5,9	6,8	439	46,9	105	110	-0,82	-29	25,75	-0,214308	-12,39	-6,96209911									39,9	670,1
35								38,9548	26	2,1	10	1,3	441	62,3	140	30	-0,85	-2,84	-25,94	1,771841											39,9	670,3
36								39,0444	25,9	7,5	1,4	1,2	440	119	80,4	64	-0,13	14,38	16,77	-0,804437	-23,36	-0,33606774	25,9	7,54	3,4	3,21	-0,1	14,38	16,8	-63,6	40	671
37						Число событий (I-O) по Stage 2 можно задать		38,9743	26,1	9,4	0,2	3,3	442	139	18	79	-1,59	25,77	1,703	-0,188053	-36,08	27,0479943									39,9	670,5
38								38,9854	26,1	8,5	2,6	1,8	442	137	69,3	39	-1,15	-18,7	1,403	0,7426834	47,96	-1,27828672									40	670,5
39								38,9544	26,1	11	0,6	1,6	442	144	32,4	33	-0,72	0,362	-27,73	0,3849746	23,27	9,19982176									39,9	670,3
40								39,1257	25,8	4,5	1,7	4,3	439	80,3	71	109	1,3	22,85	17,97	-0,607596	-17,42	-3,1857413									40,1	671,7
41								39,0084	25,8	2,5	9,1	1,7	439	68,1	131	36	1,757	-5,62	-10,26	0,2848265	17,14	-18,5259338									40	670,6
42								39,1055	25,8	1,5	9,3	2,3	439	53,8	131	88	0,082	9,305	-10,71	0,2343125	12,97	-17,6891184									40,1	671,6
43								39,0941	26	0,5	11	1,9	442	50,1	142	59	-0,82	-11,3	14,6	-0,400105	-23,59	8,53506235									40,1	671,5
44								39,0772	26	4,5	2,3	6,3	441	91,8	96	109	-1,22	7,21	23,14	-0,645397	-2,814	-30,1349286									40,1	671,8
45								39,032	26,1	5,5	6,5	0,8	442	102	111	41	-0,59	-11,57	6,975	-1,138983											39,9	670,9
46								39,0403	25,9	2,4	4,3	6,4	440	67,2	90,1	120	-1,83	-18,1	-0,349	0,3016356	17,36	-28,6071824									40	671

$$0 = p_3 \sin \theta_3 + p_4 \sin \theta_4 + \dots + p_n \sin \theta_n$$

$$p_1 - (p_3 \cos \theta_3 + p_4 \cos \theta_4 + \dots + p_n \cos \theta_n) \leq \Delta p$$

Входные данные:

- 1) E_1
- 2) $m_1; m_2; \dots; m_n$
- 3) $\theta_3; \theta_4; \dots; \theta_{n-1}$

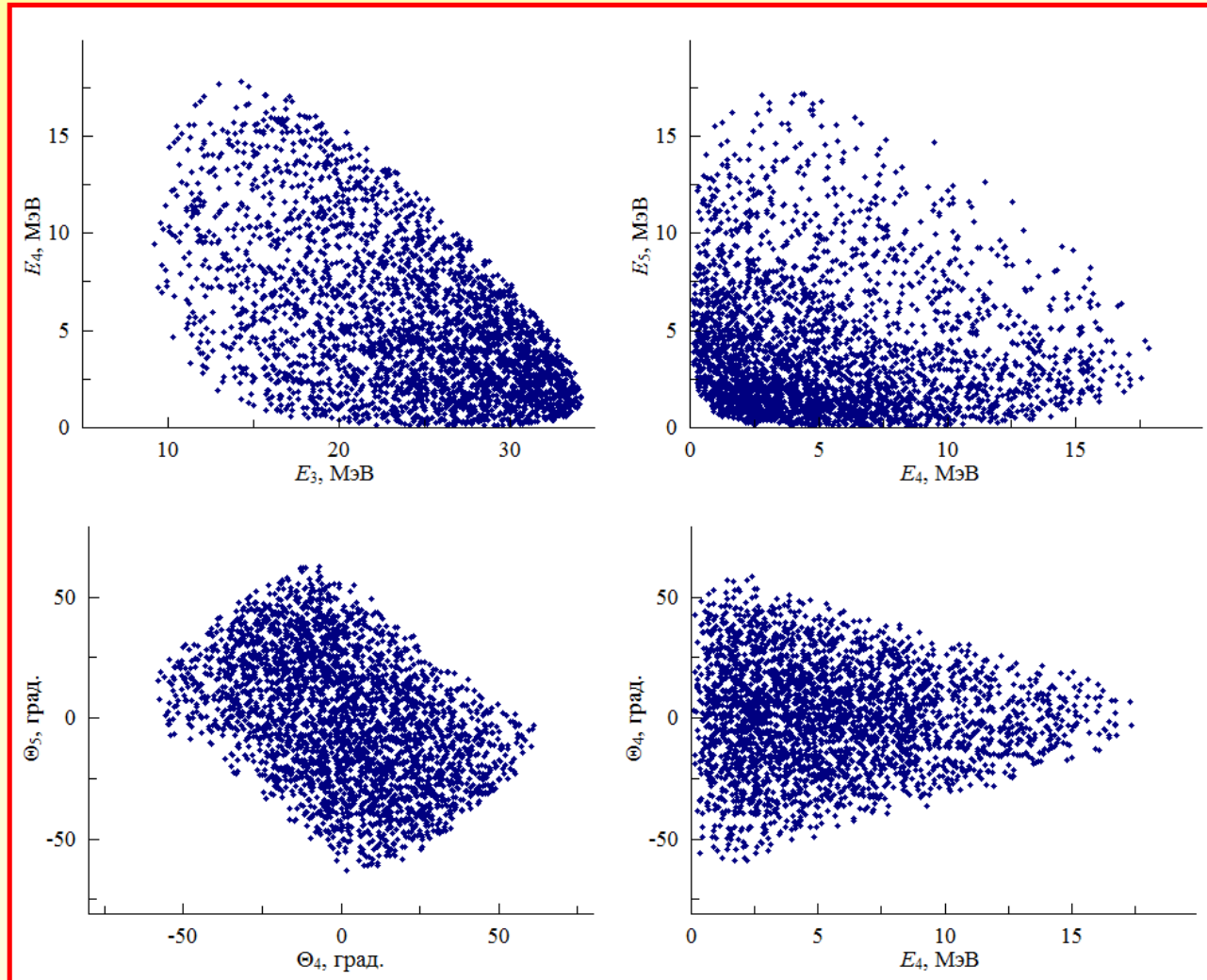


Выходные данные:

- 1) $E_3; E_4; \dots; E_n$
- 2) $\theta_3; \theta_4; \dots; \theta_n$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ${}^6\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + p + n + n$.
ПАРАМЕТРЫ: $E_{{}^6\text{He}}=40$ МэВ; $\Theta_{{}^4\text{He}}=0^\circ \pm 2^\circ$;
 $\Theta_p=0^\circ \pm 90^\circ$; $\Theta_{n1}=0^\circ \pm 90^\circ$

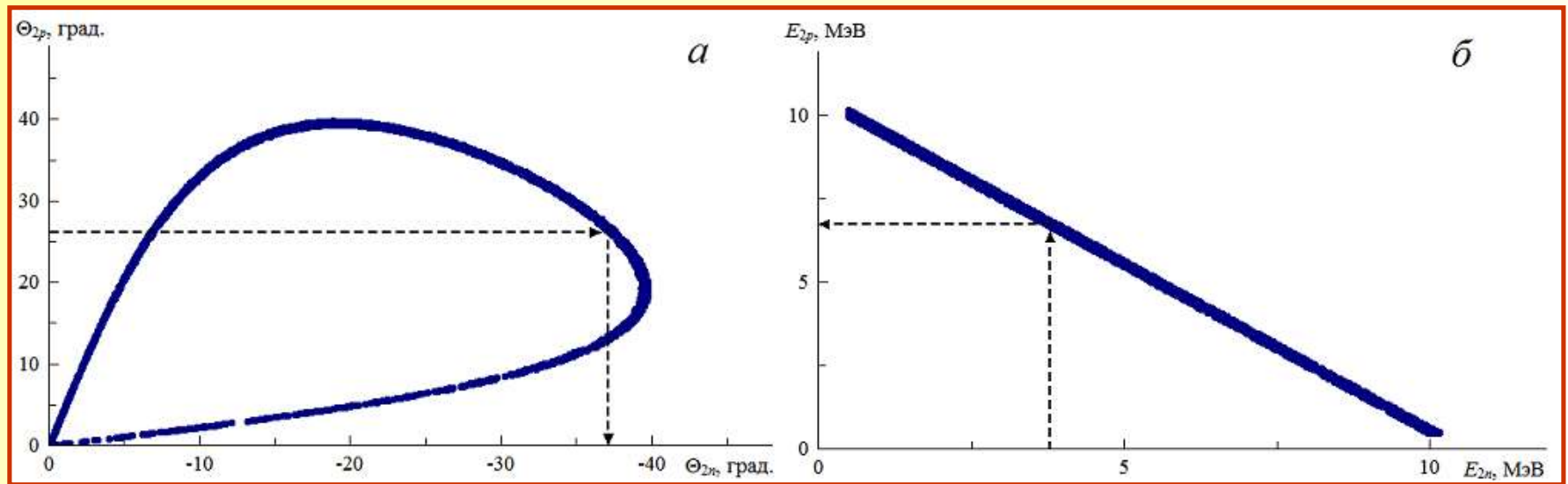
Двумерные диаграммы кинематических переменных



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

$d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Моделирование «квазибинарной» реакции: $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2p^s + {}^2n^s$
Энергия дейтронов 15 МэВ

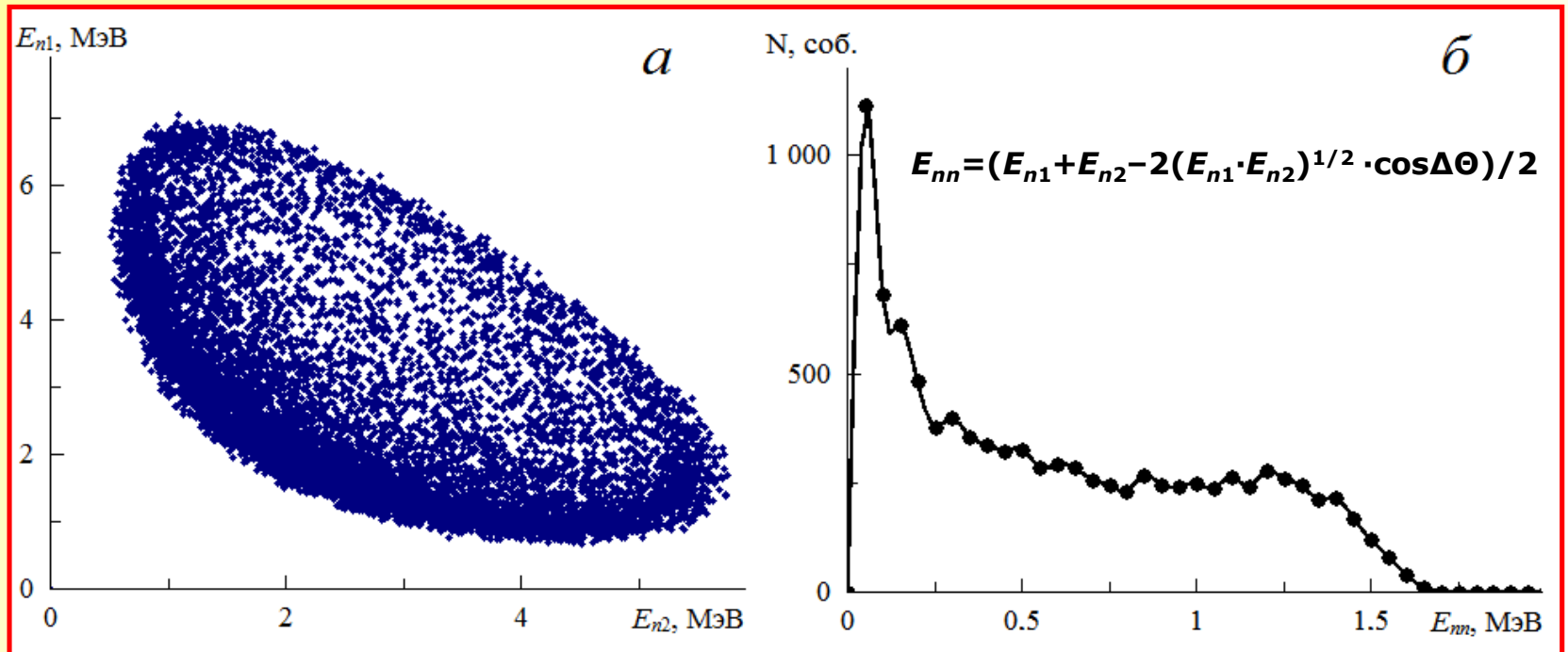


Выходные данные: $\Theta_{2p} = 27^\circ$; $\Theta_{2n} = -36^\circ$

Соответствующие энергии: $E_{2p} \sim 6$ МэВ; $E_{2n} \sim 4$ МэВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.
ПАРАМЕТРЫ: $E_d=15$ МэВ, $\Theta_{p1}=\Theta_{p2}=27^\circ$; $\Theta_n=-36^\circ$

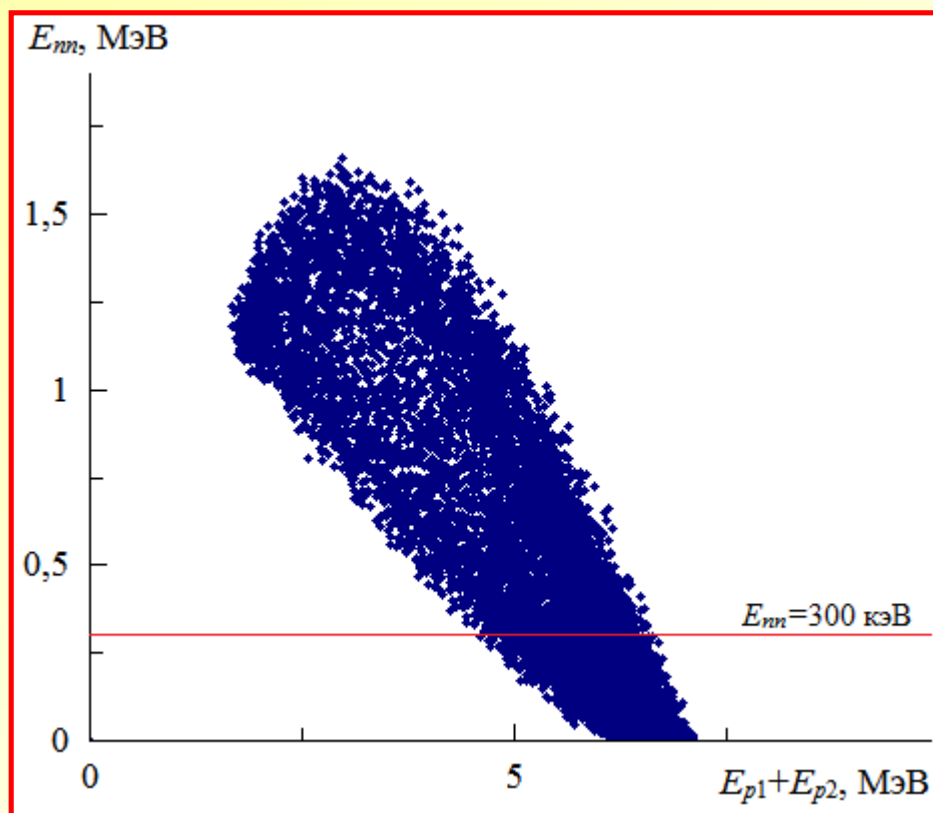
Двумерная диаграмма $E_{n1} - E_{n2}$ и спектр относительной энергии двух нейтронов



$E_{n1}: 1 - 7$ МэВ
 $E_{n2}: 1 - 6$ МэВ
 }
→
 $E_{nn}: 0 - 1.8$ МэВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.
ПАРАМЕТРЫ: $E_d=15$ МэВ, $\Theta_{p1}=\Theta_{p2}=27^\circ$; $\Theta_n=-36^\circ$

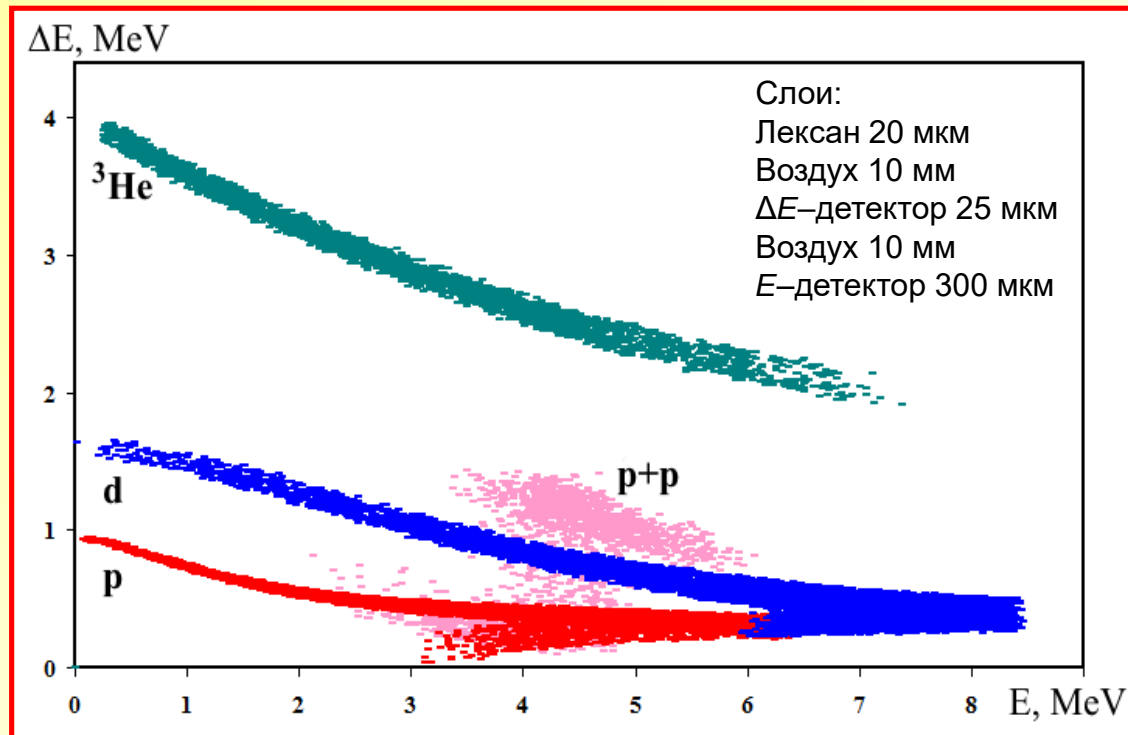
Моделированная зависимость относительной энергии E_{nn} от суммарной энергии двух протонов



$E_{nn} = 0-300 \text{ кэВ} \longrightarrow E_{p1} + E_{p2} > 4.5 \text{ МэВ}$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.
ПАРАМЕТРЫ: $E_d = 15$ МэВ, $\Theta_{\text{ch}} = 27^\circ \pm 1.5^\circ$ (ch=p; d; ${}^3\text{He}$),
 $\Theta_n = -36^\circ \pm 1.2^\circ$

Моделированная ΔE - E диаграмма



Реакции:

$$d + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + d,$$

$$d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n,$$

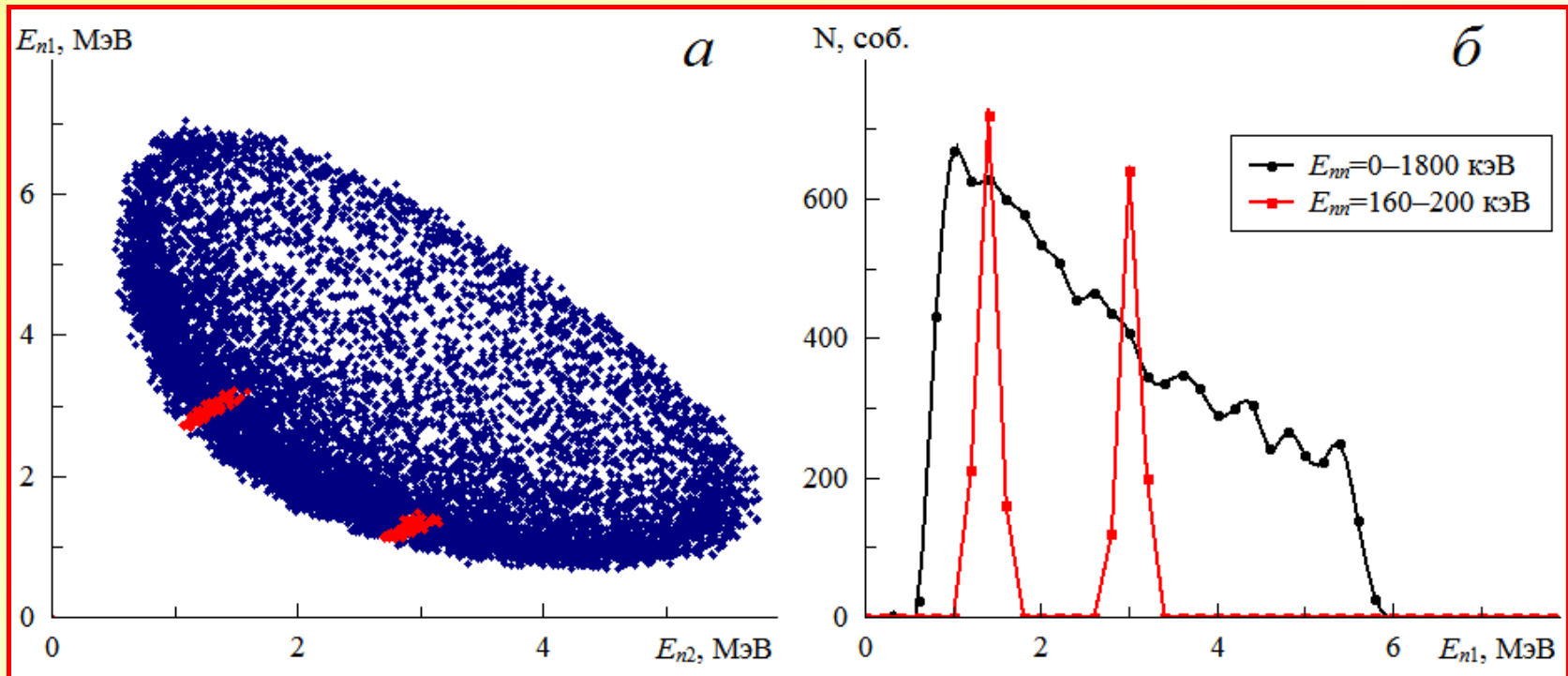
$$d + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + n + {}^{12}\text{C},$$

$$d + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^3\text{He} + n + {}^{12}\text{C}.$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.
ПАРАМЕТРЫ: $E_d=15$ МэВ, $\Theta_{p1}=\Theta_{p2}=27^\circ$; $\Theta_n=-36^\circ$

$E_{n1} - E_{n2}$

Спектр E_{n1}

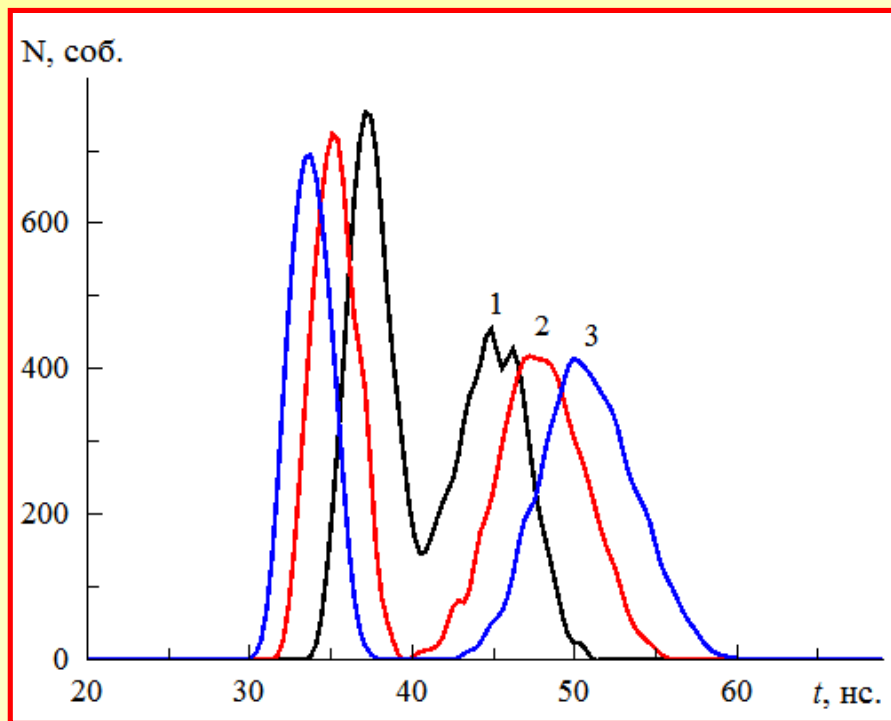


Отбор событий со значениями относительной энергии nn -системы E_{nn} в интервале $\pm\Gamma_{nn}$ (соответствующий развалу виртуального nn -состояния с определенной энергией E_{nn}) выделяет области на двумерной диаграмме и в спектре нейтронов

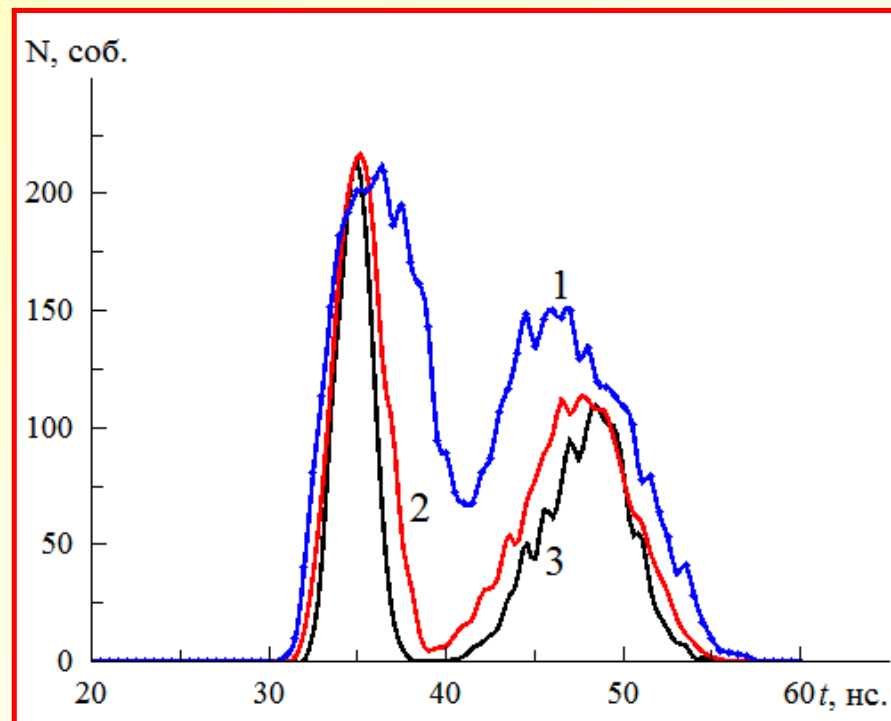
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.

ПАРАМЕТРЫ: $E_d=15$ МэВ, $\Theta_{p1}=\Theta_{p2}=27^\circ$; $\Theta_n=-36^\circ$

Времяпролетные спектры нейтронов при различных значениях E_{nn} и Γ_{nn}
Времяпролетная база 79 см



- 1 – $E_{nn}=50$ кэВ, $\Gamma_{nn}=30$ кэВ
- 2 – $E_{nn}=120$ кэВ, $\Gamma_{nn}=70$ кэВ
- 3 – $E_{nn}=200$ кэВ, $\Gamma_{nn}=100$ кэВ



- 1 – $E_{nn}=120$ кэВ, $\Gamma_{nn}=30$ кэВ
- 2 – $E_{nn}=120$ кэВ, $\Gamma_{nn}=70$ кэВ
- 3 – $E_{nn}=120$ кэВ, $\Gamma_{nn}=110$ кэВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$. ВЫВОДЫ

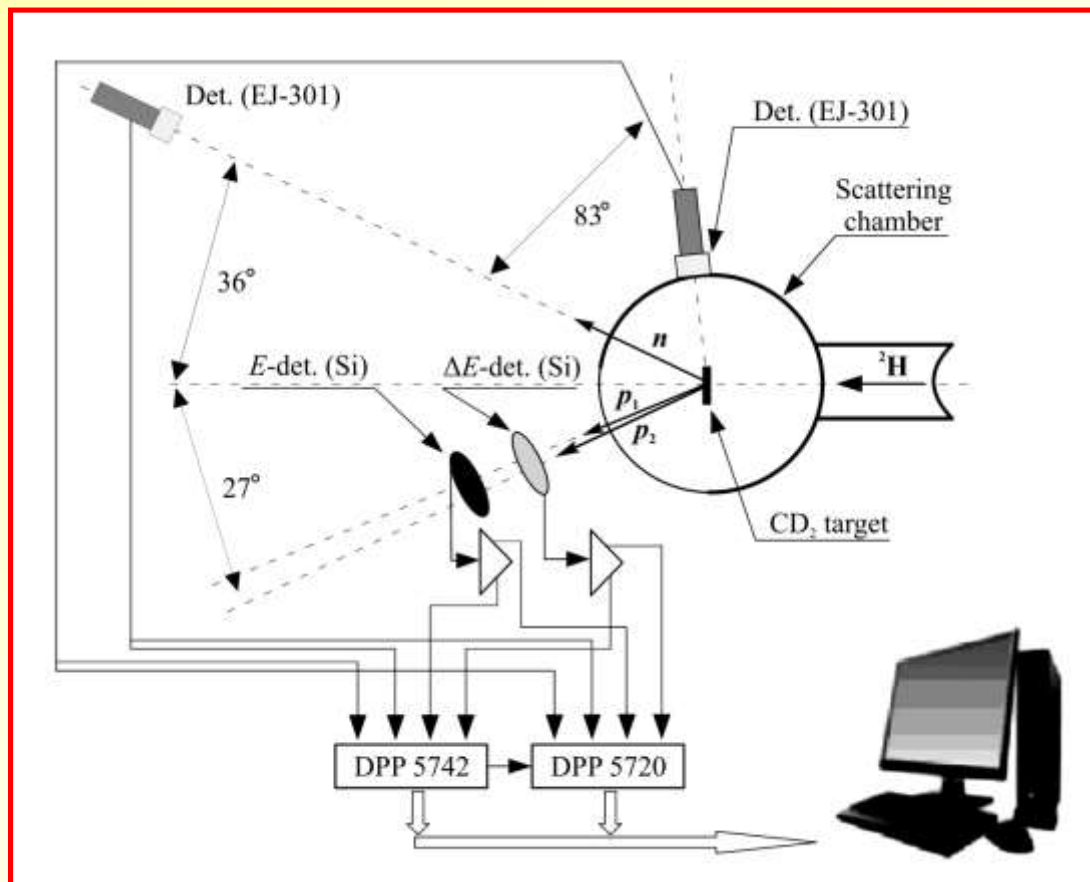
Кинематическое моделирование реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$:

1. Позволило выбрать параметры экспериментальной установки для регистрации двух протонов и нейтрона, определить спектры фоновых реакций.
2. Показало возможность отбора событий, отвечающих прохождению двух протонов через ΔE – E телескоп.
3. Позволило установить ограничение на суммарную энергию двух протонов $E_{p1} + E_{p2}$, и, соответственно, снизить фон нерезонансных событий без уменьшения количества полезных (от развала nn -состояния).
4. Показало возможность извлечения данных о величине энергии виртуального состояния nn -системы из формы временного спектра нейтронов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

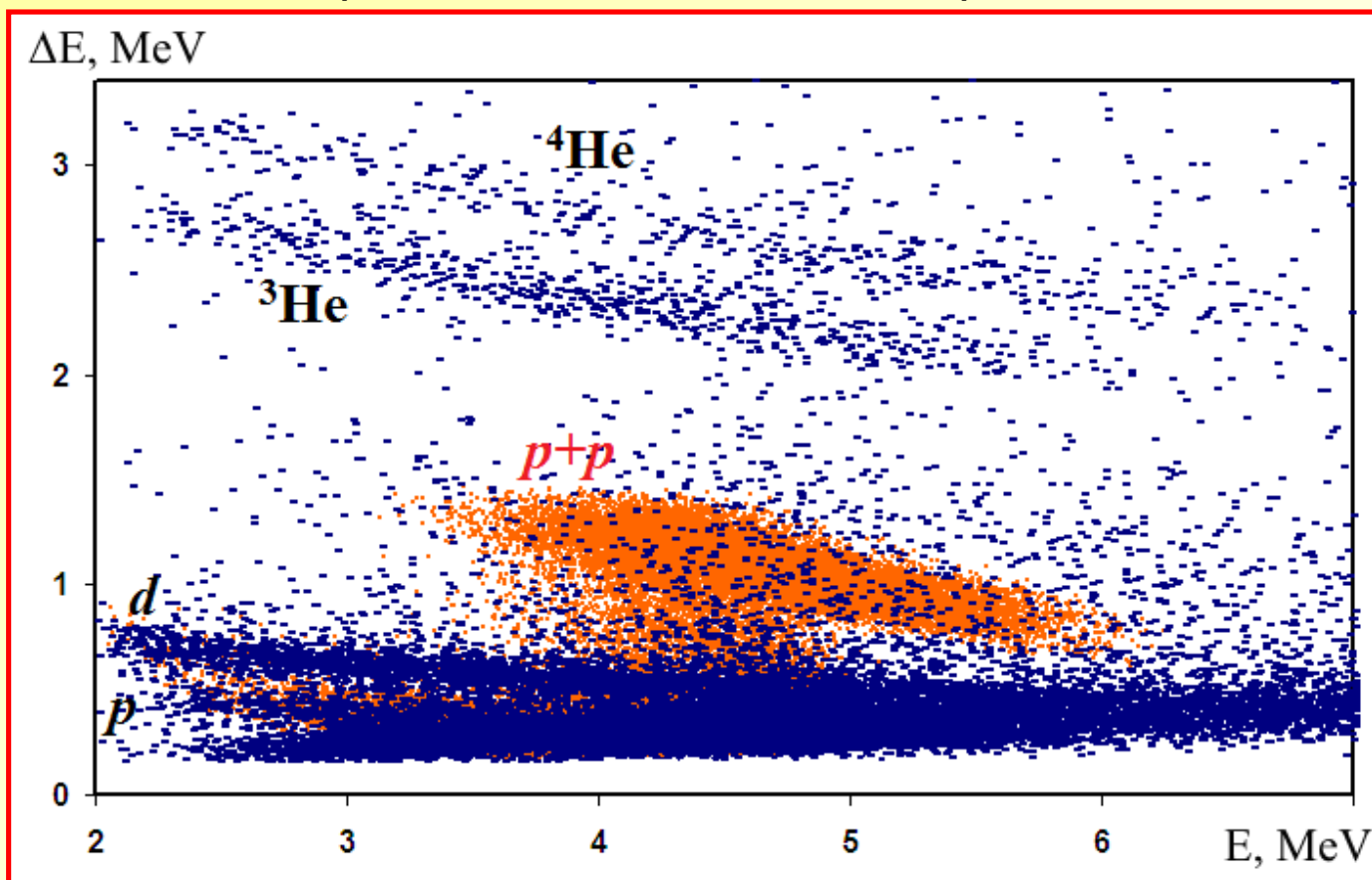
Из результатов моделирования определена
схема экспериментальной установки

- 1) Энергия дейтронов 15 МэВ (НИИЯФ МГУ)
- 2) Мишень CD_2
- 3) Детекторы протонов и нейтронов под углами вылета 2n и 2p -систем
- 4) Оба протона регистрируются одним телескопом ΔE - E
- 5) Энергия нейтрона определяется по времени пролета
- 6) Детектор нейтронов перемещался на угол 83° для временной калибровки



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

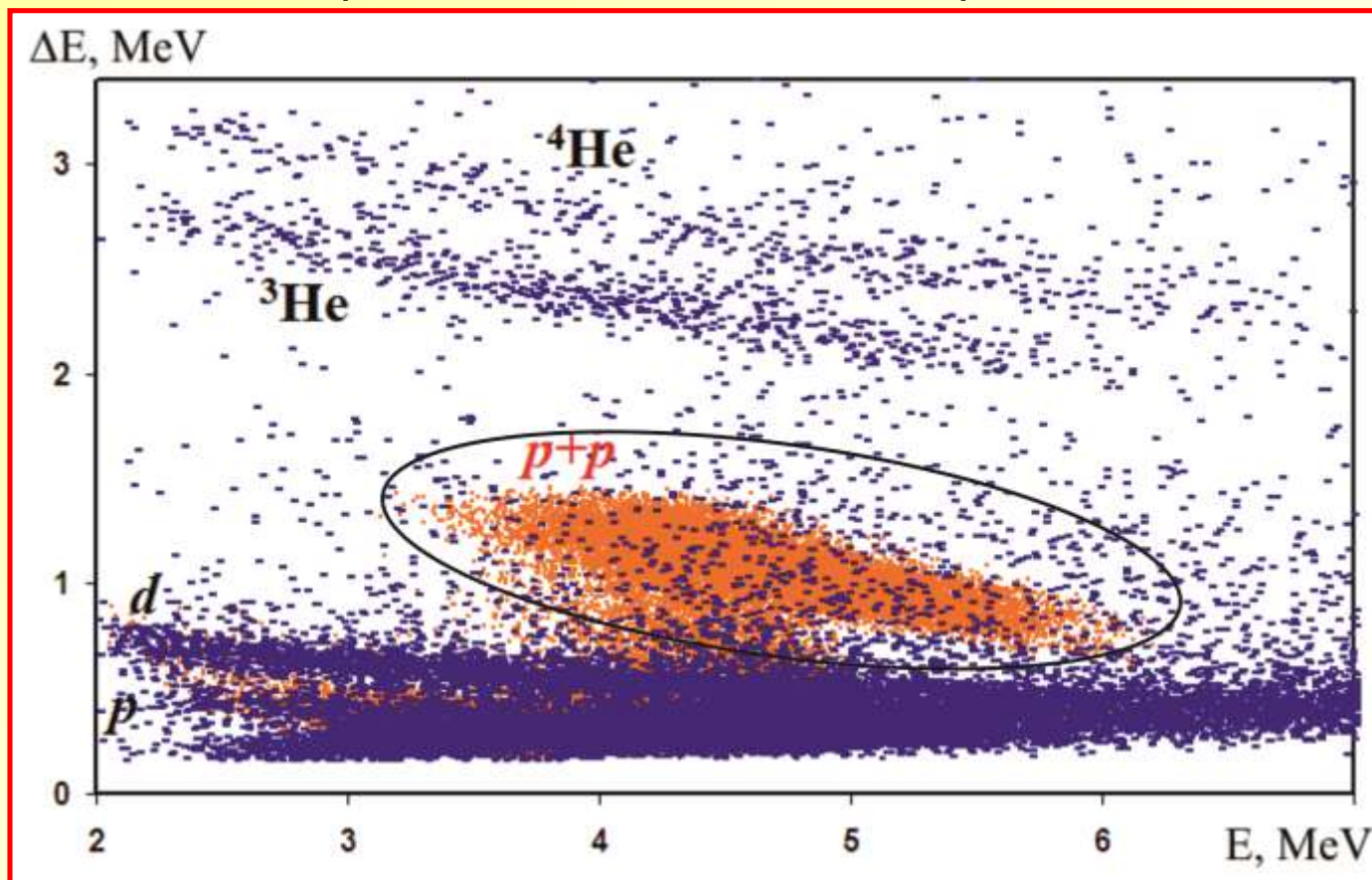
Экспериментальная ΔE – E диаграмма



Отбор событий по области $p+p$ и определение времени пролета нейтрона приводит временному спектру нейтронов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Экспериментальная ΔE – E диаграмма

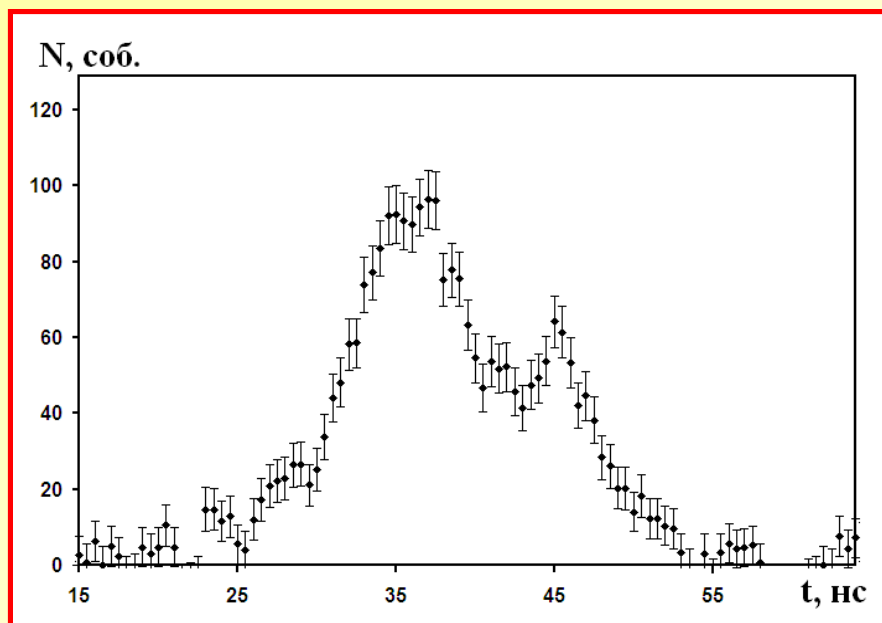


Отбор событий по области $p+p$ и определение времени пролета нейтрона приводит временному спектру нейтронов

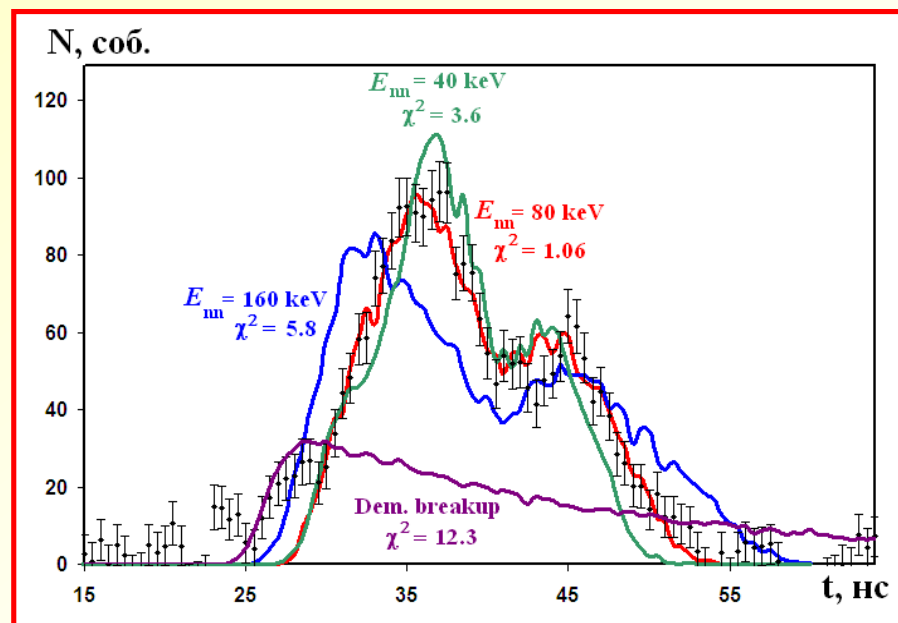
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Экспериментальный времяпролетный
спектр нейтронов.

Времяпролетная база – 79 см,
временное разрешение – 2.5 нс



Сравнение экспериментального
времяпролетного
спектра с результатами
моделирования

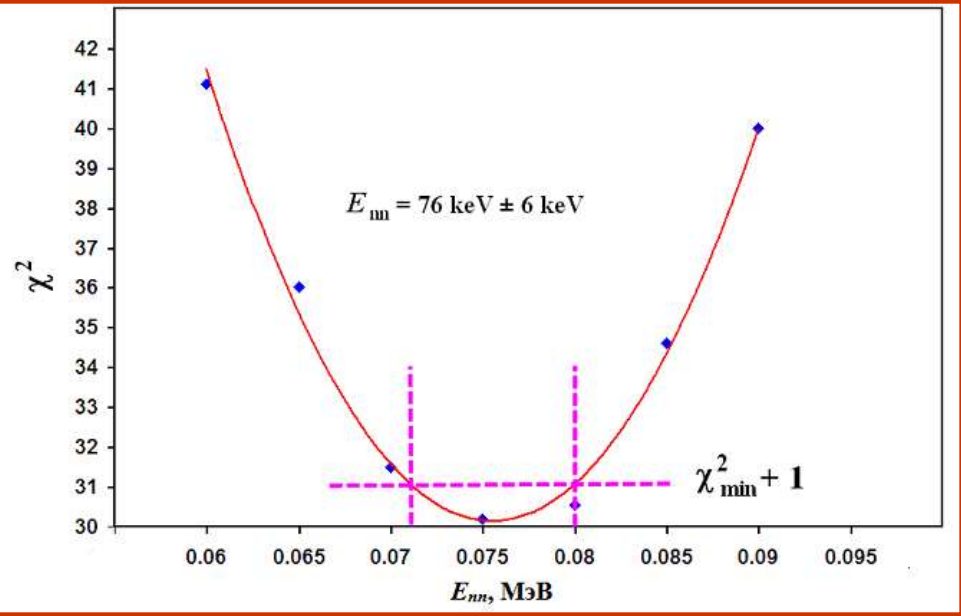
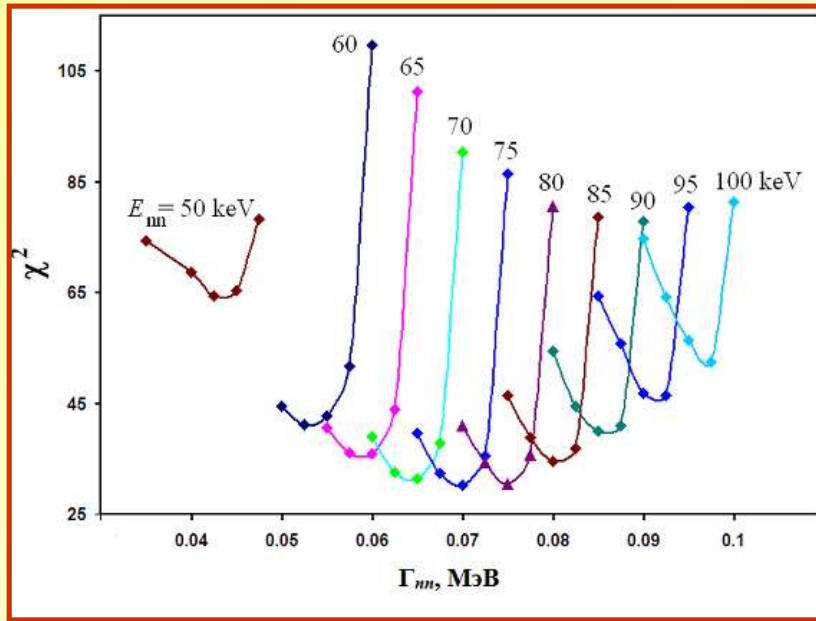


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

Сравнение экспериментального времяпролетного спектра с результатами моделирования

$$\chi^2(E_{nn}, \Gamma_{nn}) = \sum_t \frac{(N_{E_{nn}, \Gamma_{nn}}^{\text{mod}}(t) - A \cdot N^{\text{exp}}(t))^2}{(\Delta N^{\text{exp}}(t))^2}$$

$$\Delta E_{nn} = |E_{nn}(\chi_{\min}^2) - E_{nn}(\chi_{\min}^2 + 1)|$$



Минимум χ^2 достигается
при $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ

$\longrightarrow$
 $r_{nn} = 2.82$ фм

$a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ фм

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1) Разработан новый подход для извлечения данных о низкоэнергетических параметрах NN -взаимодействия в реакциях с образованием и развалом виртуальных NN -состояний, основанных на выборе оптимальной геометрии для регистрации развальных частиц, введении ограничений на параметры вторичных частиц и анализе их спектров.
- 2) Создание программ для моделирования реакция с тремя и более частицами в конечном состоянии в рамках этого подхода.
- 3) Обнаружение зависимости формы энергетического спектра развальной частицы от энергии и ширины виртуального NN -состояния.
- 4) На основе расчетов моделирования реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ определены параметры экспериментальной установки для исследования данной реакции. Проведено соответствующее экспериментальное исследование.
- 5) На основе сравнения экспериментальных данных, полученных в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ и результатов моделирования извлечены данные о длине nn -рассеяния в исследуемой реакции $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский. Программа для моделирования экспериментов по изучению реакций с тремя частицами в конечном состоянии // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78(5). С. 527–531; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2014. V. 78(5). P. 345–349.
- 2) E.S. Konobeevski, S.V. Zuyev, A.A. Kasparov, V.V. Ostashko. The Results of Simulation of $d + t \rightarrow 3\text{He} + 2n$; $2n \rightarrow n + n$ Reaction // Few-Body Systems. 2014. V. 55(8–10). P. 1059–1060.
- 3) Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский. Исследование реакции $d + d \rightarrow 2\text{He} + 2n$ при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015. Т. 78(7–8). С. 687–695; Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78(5). P. 643–651.
- 4) С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский. Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях // Ядерная физика. 2015. Т. 78(7–8). С. 739–747; Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78(5), P. 694–702.
- 5) С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский. Реакция $d + 2\text{H} \rightarrow 3\text{He} + n$ как источник квазимоноэнергетических нейтронов для исследования свойств нейтронных детекторов // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80(3). С. 260–265; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. V. 80(3). P. 232–236.
- 6) С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, И.М. Железных, А.Г. Гасанов, В.М. Лебедев, А.В. Спасский. Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + 2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80(3). С. 254–259; Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. V. 80(3). P. 227–231.
- 7) А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев. Моделирование кинематики реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$ // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2016. №2. С. 257–261.
- 8) Konobeevski E., Kasparov A., Mordovskoy M., Zuyev S., Lebedev V., Spassky A. Determination of energies of nn-singlet virtual state in $d + 2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction // Few-Body Syst (2017) 58: 107.
- 9) E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky. Determination of n-n correlations in $d + 2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction // Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) P. 012076 (1–4)
- 10) С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский. Математическое моделирование малонуклонных экспериментов с тремя и более частицами в конечном состоянии // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81(6). С. 753–757.

БЛАГОДАРНОСТИ

Конобеевскому Евгению Сергеевичу

(за неоценимую помощь в написании работы, проявленное терпение, важные замечания к тексту диссертации)

Зуеву Сергею Викторовичу

(за ценные советы и многочисленные обсуждения результатов, положенных в основу диссертации)

Спасибо за внимание

