

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного
ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

1–6 июля 2025 года, г. Санкт-Петербург, Россия

А.А. Каспаров, М.В. Мордовской, А.А. Афонин, В.В. Мицук

(Институт ядерных исследований Российской академии наук)

**Исследование проявлений $3N$ -взаимодействия
в малонуклонных реакциях**

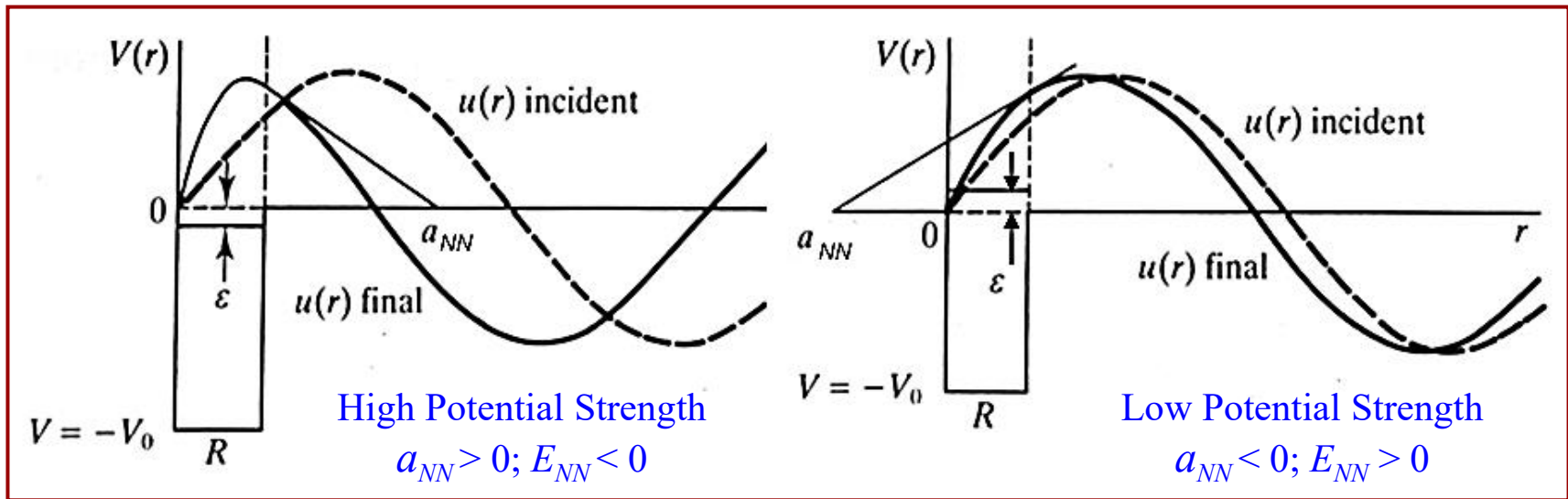


ИЯИ РАН 2025

Низкоэнергетические характеристики NN -взаимодействия

Низкоэнергетических характеристики NN -взаимодействия (1S_0 длина рассеяния a_{NN} и энергия виртуального 1S_0 состояния E_{NN}) играют центральную роль в исследовании сильного NN -взаимодействия и имеют важное значение при построении различных реалистических моделей ядерных сил

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



Небольшое изменение NN -потенциала может приводить к значительному изменению длины NN -рассеяния.

Данные экспериментов по определению синглетных длин NN -рассеяния

Эксперименты по определению a_{pp} и a_{np}

Свободное pp -рассеяние: $a_{pp} = -7.8149 \pm 0.0029$ Фм, после модельно-зависимой процедуры по исключению электромагнитной компоненты $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ Фм.

Свободное np -рассеяние: $a_{np} = -23.748 \pm 0.010$ Фм.

Эксперименты по определению a_{nn}

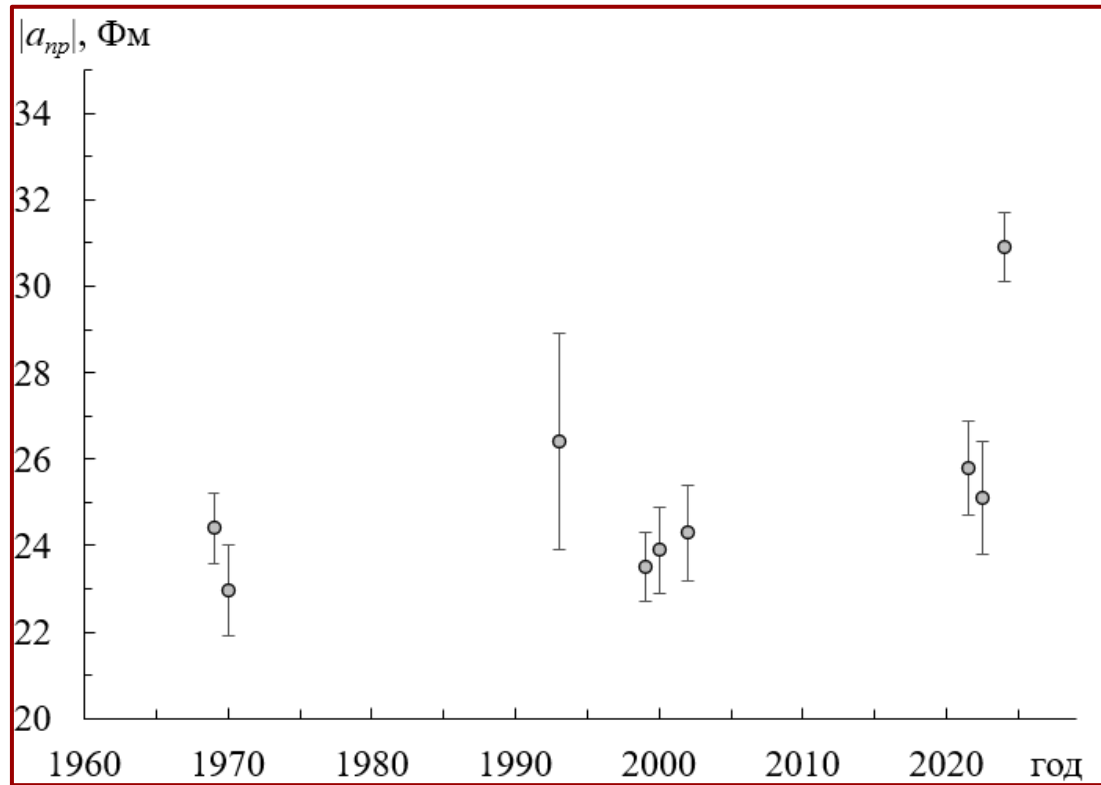
Первое значение: $a_{nn} \approx -16.5$ Фм – усреднение значений, извлеченных из экспериментов по развалу нейтроном дейтрона, проведенных до 1993 г.

- существует несколько экспериментов по трехнуклонному развалу, которые также обеспечивают более высокое (по модулю) значение a_{nn} ;
- нельзя исключить влияние $3N$ -сил.

Второе значение: $a_{nn} \approx -18.7$ Фм – усредненные данные, извлеченные из экспериментов по захвату остановившихся пионов на дейтроне, выполненные после 1975 г.

- принимается для большинства современных реалистичных NN -потенциалов;
- реакция $\pi^- + d$ считается не подверженной влиянию $3N$ -сил;
- разница между первым и вторым значениями a_{nn} обычно приписывалось вкладу $3N$ -сил.

Данные о нейтрон-протонной длине рассеяния, извлеченные из различных малонуклонных реакций



Значения a_{NN} или E_{NN} также можно с высокой степенью достоверности извлечь из малонуклонных реакций при правильно выбранных кинематических условиях [H. Brückmann *et al.* Nucl. Phys. A. 1970. V. 157(1). P. 209.]

Разброс значений a_{np} , полученных в реакциях с тремя и четырьмя частицами в конечном состоянии, может быть обусловлен значительным влиянием $3N$ -сил.

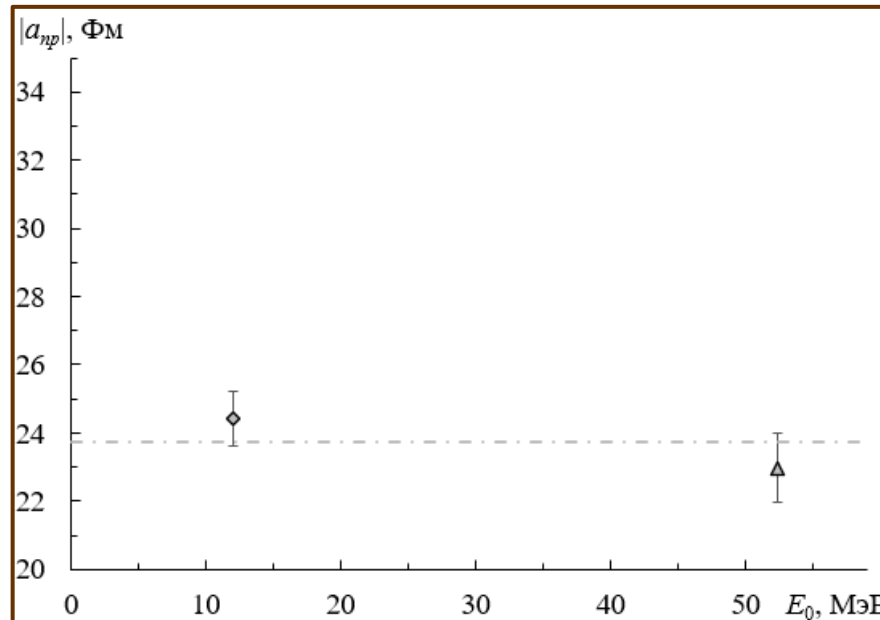
Исследование pd - и dp -реакций

pd -реакция при $E_p = 6.5 \div 13$ МэВ (Техас, США)

dp -реакция при $E_d = 52.3$ МэВ (Карлсруэ, Германия)

- регистрация совпадающих энергетических спектров протонов;
- подгонка методом наименьших квадратов трех форм функции плотности состояний;
- $a_{np} = -23.9 \pm 0.8$ Фм.

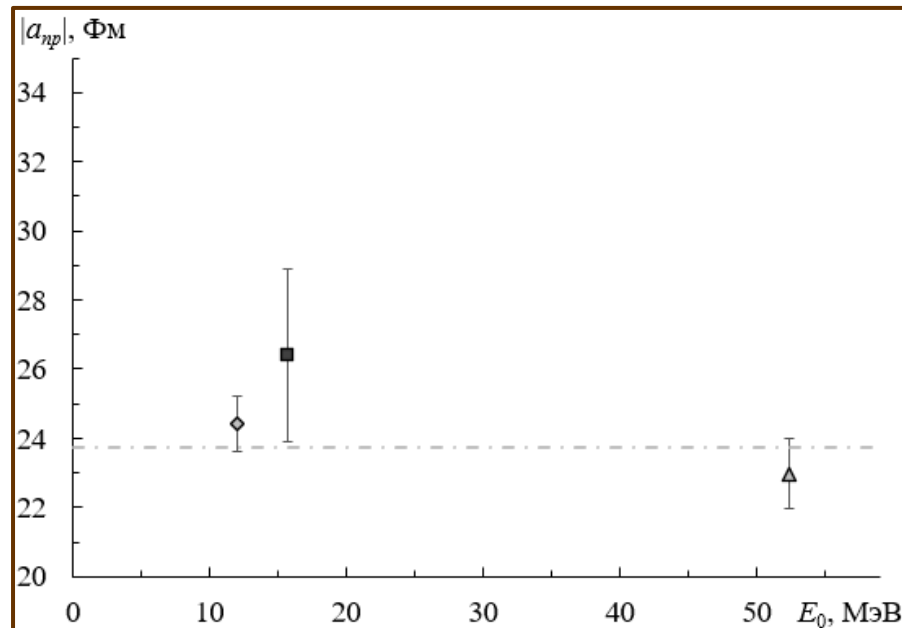
- анализ экспериментальных сечений в рамках модели Мигдала-Ватсона;
- угловое распределение для образования 1S_0 np -пары в с.ц.м. $55^\circ < \Theta_{d^*} < 152^\circ$;
- $a_{np} = -22.98 \pm 1.05$ Фм.



Исследование dd -реакции

dd -реакция при $E_d = 15.7$ МэВ (Шанхай, Китай)

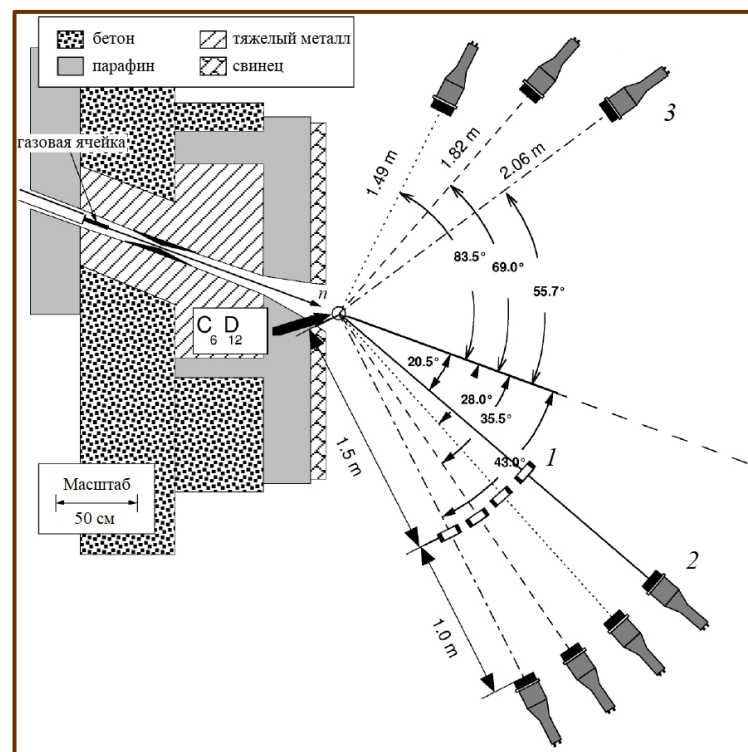
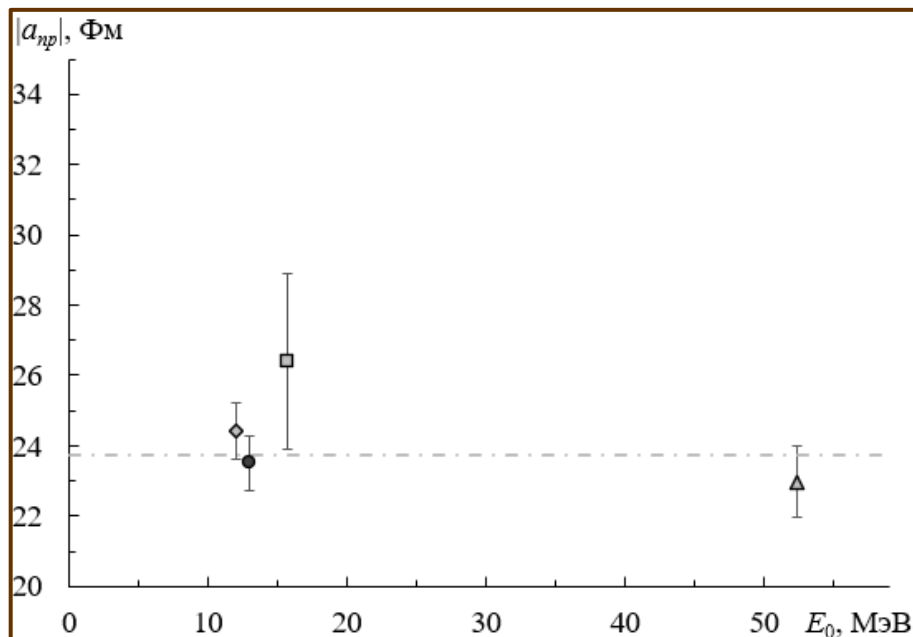
- каскадный процесс $d + d \rightarrow d^* + d^* \rightarrow p + n + p + n$;
- использовалась система сбора с включением тройных совпадений;
- определялся радиус сферы, образованный скоростями продуктов развала d^* в с.ц.м. путем подгонки по энергиям и углам вылета одного из протонов;
- $E_{d^*} = 0.054 \pm 0.012$ МэВ $\rightarrow a_{np} \approx -26.4 \pm 2.5$ Фм при значении $r_{np} = 2.76$ Фм.



Исследование nd -реакции на установке TUNL

nd -реакция при $E_n = 13$ МэВ (TUNL, США)

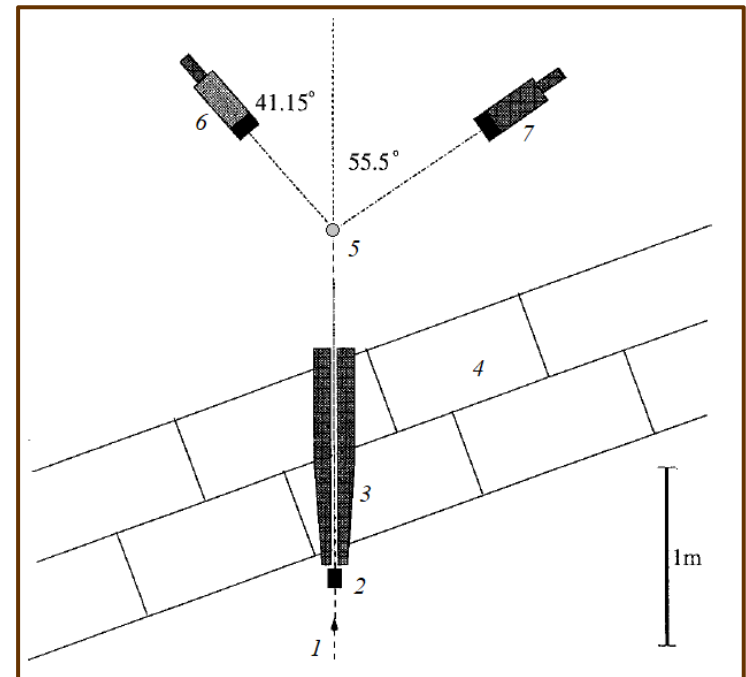
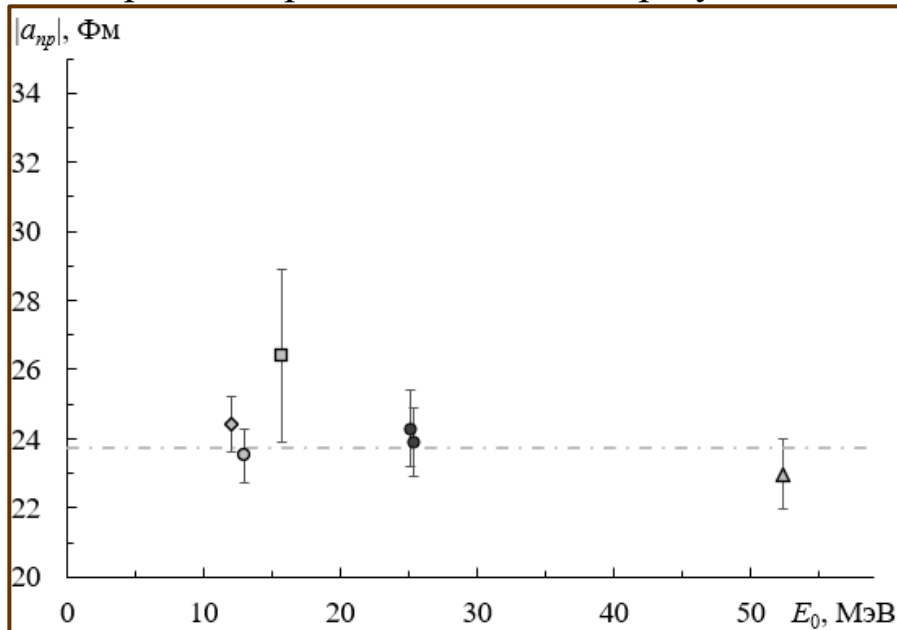
- одновременное измерение в эксперименте a_{nn} и a_{np} ;
- экспериментальные сечения сравнивались с результатами расчетов по уравнению Фаддеева задачи трех тел с использованием Bonn-B (OBERQ) NN -потенциала;
- установлен верхний предел влияния $3N$ -сил на значение длин NN -рассеяния, определенных в эксперименте, $\Delta a_{np}^{3NF} \leq a_{np}^{nd} - a_{np}^{free} = -0.2 \pm 0.8$ Фм;
- $a_{np} = -23.5 \pm 0.8$ Фм.



Исследование nd -реакции на установке Bonn

nd -реакция при $E_n = 25.3$ МэВ и $E_n = 25.1$ МэВ (Bonn, Германия)

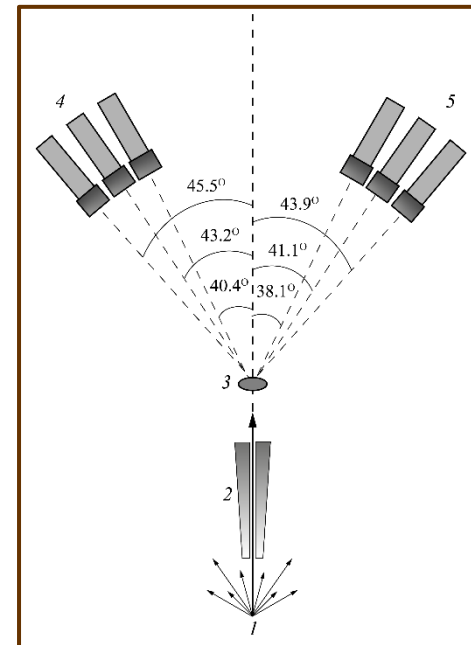
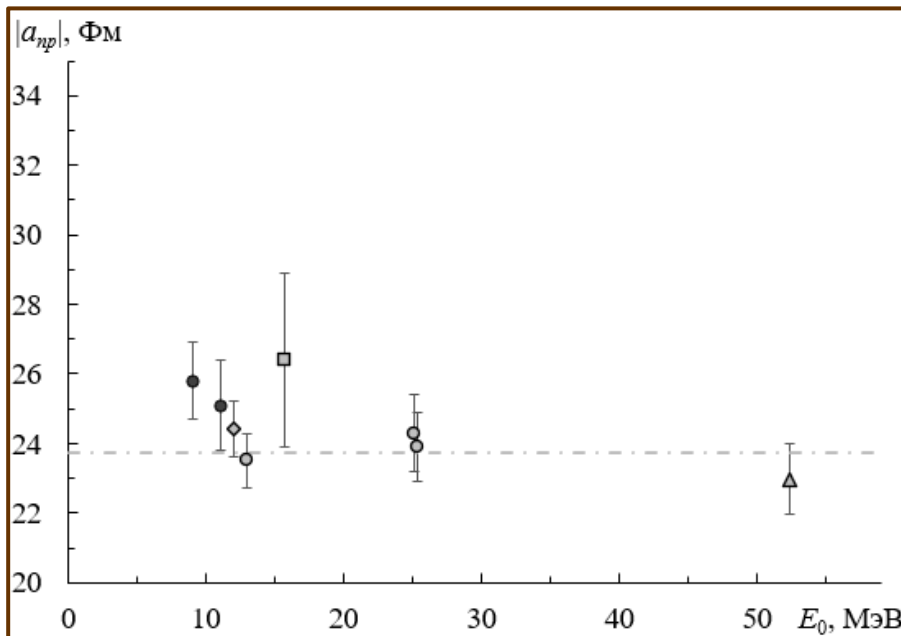
- измерения a_{np} в геометрии отдачи и геометрии ВКС;
- кинематика реакции выбрана в соответствии с теоретическим предписанием, согласно которому влияние $3N$ -сил минимизировано и, возможно, исчезает;
- экспериментальные сечения сравнивались с результатами расчетов по уравнению Фаддеева задачи трех тел с использованием СВ-Bonn NN -потенциала;
- $a_{np} = -23.9 \pm 1.0$ Фм при $E_n = 25.3$ МэВ и $a_{np} = -24.3 \pm 1.1$ Фм при $E_n = 25.1$ МэВ;
- геометрия измерения не влияет на результат для a_{np} .



Исследование nd -реакции на установке ИЯИ РАН

nd -реакция при $E_n = 9$ МэВ и $E_n = 11$ МэВ (ИЯИ РАН, Россия)

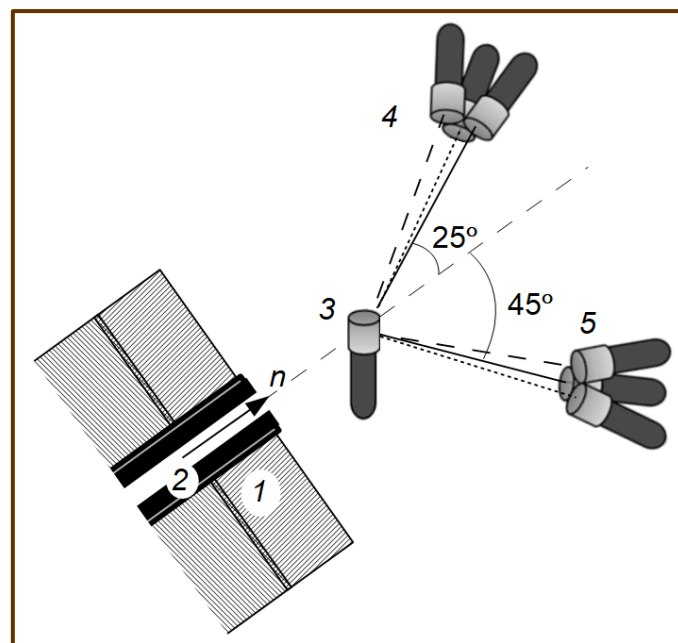
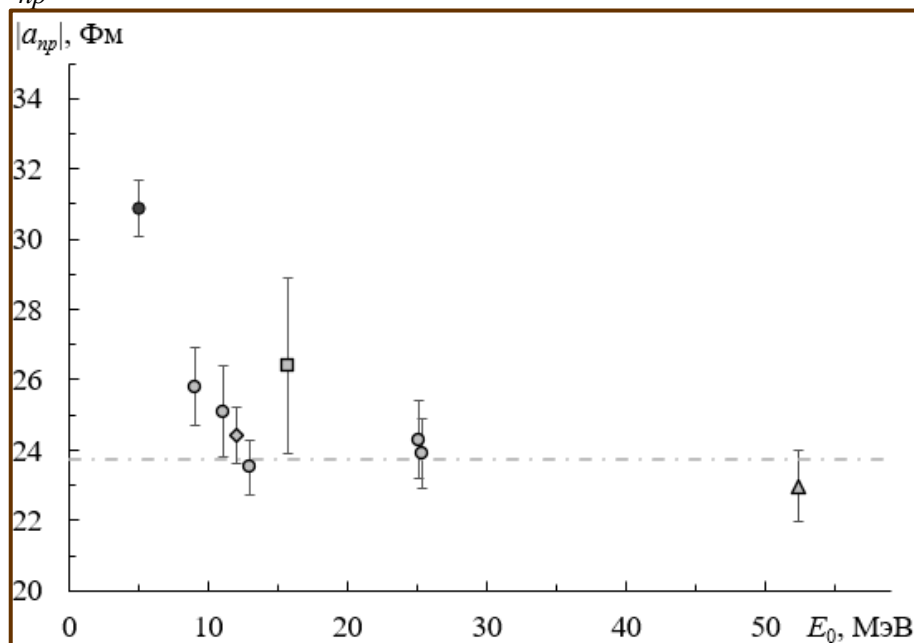
- одновременная регистрация всех трех частиц в конечном состоянии;
- восстановление E_0 , E_p , Θ_p решением уравнений законов сохранения энергии и импульса;
- отбор событий, лежащих в кинематической области $E_p - \Theta_p$ диаграммы, соответствующей образованию и развалу синглетного дейтрона;
- сравнение экспериментальной зависимости выхода реакции от относительной энергии np -системы и результатов моделирования с использованием модели Мигдала-Ватсона;
- $a_{np} = -25.8 \pm 1.1$ Фм при $E_n = 9$ МэВ и $a_{np} = -25.1 \pm 1.3$ Фм при $E_n = 11$ МэВ.



Исследование nd -реакции на установке ИЯИ РАН

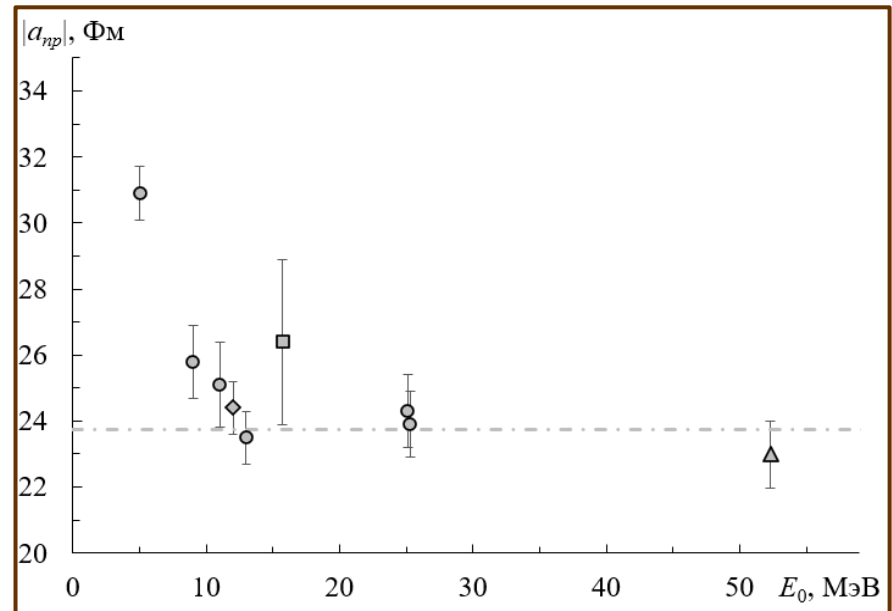
nd -реакция при $E_n = 5$ МэВ (ИЯИ РАН, Россия)

- одновременная регистрация всех трех частиц в конечном состоянии;
- восстановление E_0 , E_p , Θ_p решением уравнений законов сохранения энергии и импульса;
- отбор событий, лежащих в кинематической области $E_p - \Theta_p$ диаграммы, соответствующей образованию и развалу синглетного дейтрона;
- сравнение экспериментальной зависимости выхода реакции от относительной энергии np -системы и результатов моделирования с использованием модели Мигдала-Ватсона;
- $a_{np} = -30.9 \pm 0.8$ Фм.



Данные о np -длине рассеяния, извлеченные из реакций с тремя и четырьмя нуклонами в конечном состоянии

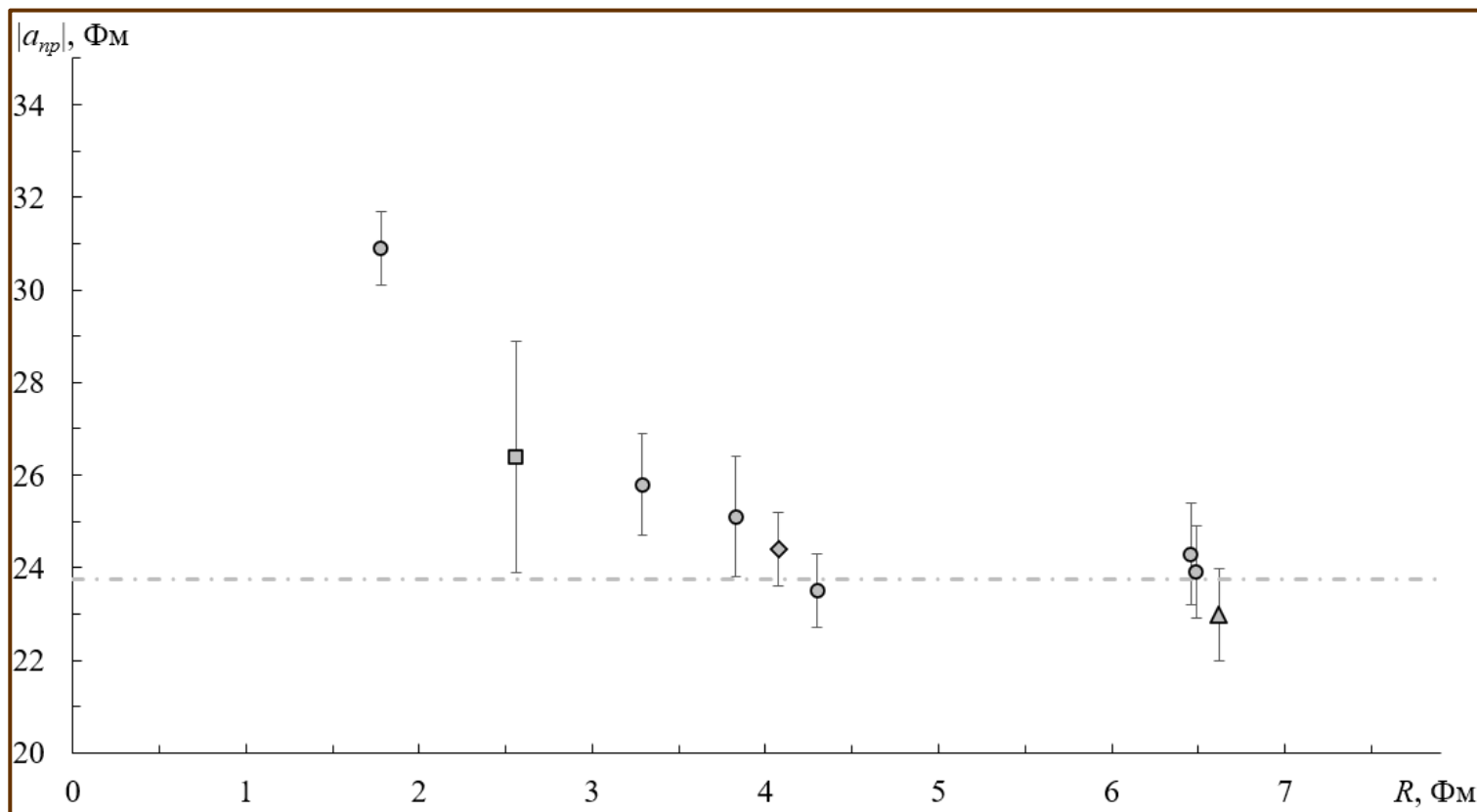
Реакция	Группа	a_{np} (Фм)	R (Фм)	E_0 (МэВ)
nd	TUNL	-23.5 ± 0.8	4.3	13
nd	Bonn	-24.3 ± 1.1	6.46	25.1
nd	Bonn	-23.9 ± 1.0	6.49	25.3
dd	SINR	-26.4 ± 2.5	2.56	15.7
nd	INR RAS	-25.8 ± 1.1	3.29	9
nd	INR RAS	-25.1 ± 1.3	3.83	11
nd	INR RAS	-30.9 ± 0.8	1.78	5
dp	IENP	-23.0 ± 1.1	6.62	52.3
pd	RU	-24.4 ± 0.8	4.08	12



Значения $|a_{np}|$ длин рассеяния извлеченные из малонуклонных реакций в зависимости от энергии налетающих частиц, используемых в этих экспериментах. Точки: данные, полученные в $\diamond$ – pd -реакции; Δ – dp -реакции; $\square$ – dd -реакции; $\circ$ – nd -реакции. Горизонтальная линия соответствует значению $a_{np} = -23.748 \pm 0.010$ Фм, извлеченному из экспериментов по свободному np -рассеянию.

Данные о np -длине рассеяния, извлеченные из реакций с тремя и четырьмя нуклонами в конечном состоянии

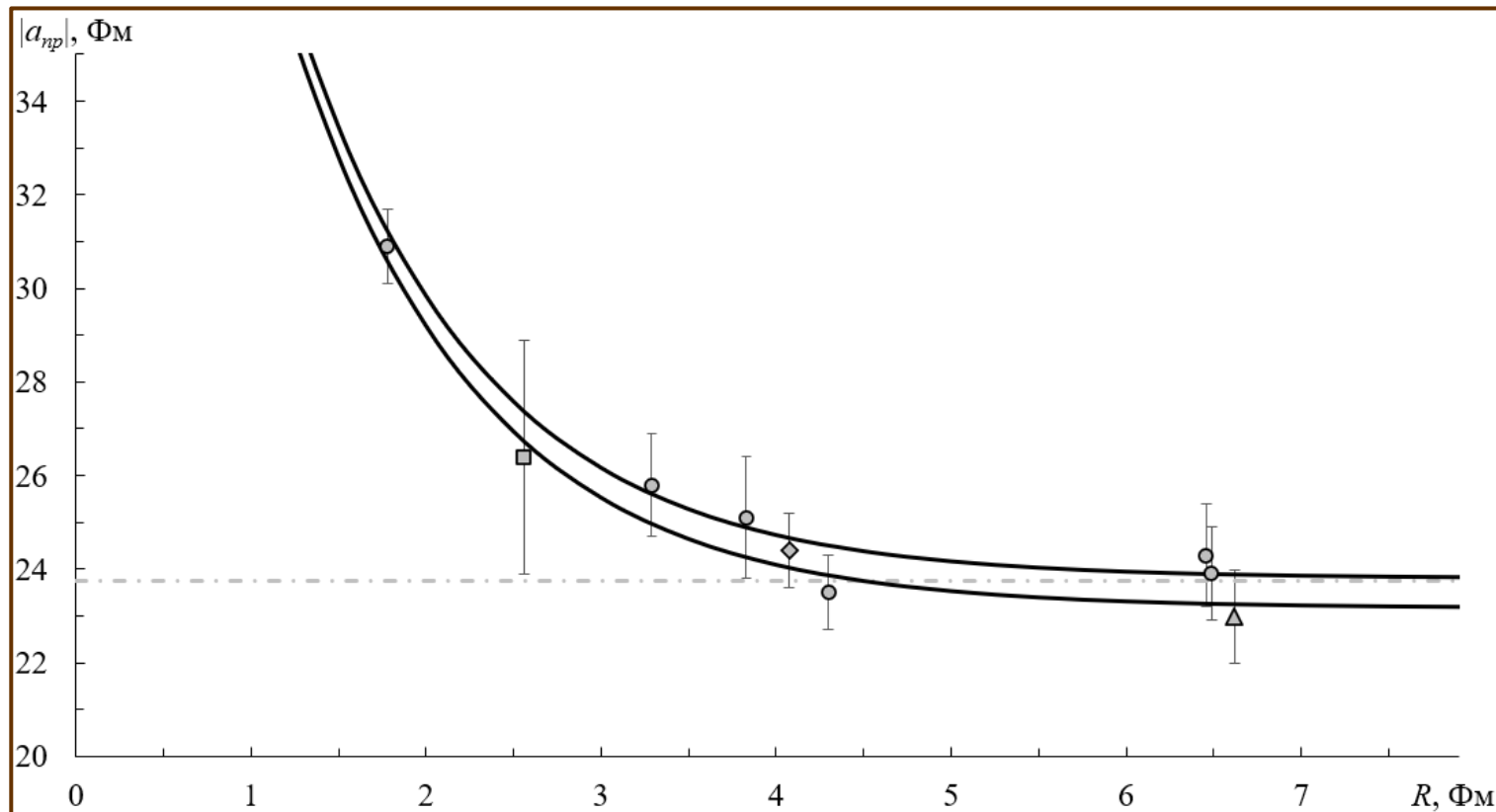
Параметр R определяет расстояние разлета фрагментов (np синглета и заряженного фрагмента) за фиксированное время t (например, $t = 10^{-22}$ с).



Данные о np -длине рассеяния, извлеченные из реакций с тремя и четырьмя нуклонами в конечном состоянии

Параметр R определяет расстояние разлета фрагментов (np синглета и заряженного фрагмента) за фиксированное время t (например, $t = 10^{-22}$ с).

$$a_{np}(R) = a + b \cdot \exp(-R/r_0); \quad a \equiv a_{np}(\infty) = -23.5 \pm 0.3 \text{ ФМ.}$$



Выводы и заключение

- Рассмотрены и проанализированы результаты экспериментов, в которых извлекались низкоэнергетические характеристики np -взаимодействия в различных малонуклонных реакциях ($p+d \rightarrow ppn$, $d+p \rightarrow ppn$, $d+d \rightarrow ppnn$ и $n+d \rightarrow pnn$). Отмечено расхождение экспериментальных данных о a_{np} , полученных в различных геометриях и при различных энергиях налетающих частиц.
- Расхождения между экспериментальными данными о a_{np} , полученными в различных работах, объяснены влиянием $3N$ -сил, зависящих от относительной скорости разлета np -пары и третьей частицы (различной в рассматриваемых экспериментах), т.е. о заметном неучтенном вкладе $3N$ -сил.
- Показано, что чем больше скорость разлета фрагментов, тем быстрее фрагменты покидают область действия $3N$ -сил, и тем меньше должно быть их влияние на низкоэнергетические характеристики np -взаимодействия, извлекаемые из эксперимента.
- Показано, что учет этого влияния позволяет согласовать данные о длине нейтрон-протонного рассеяния различных экспериментов. Сделан вывод, что из данных, полученных при различных энергиях можно выделить эффект $3N$ -сил и получить значения низкоэнергетических характеристик np -взаимодействия в их отсутствии.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

Спасибо за внимание!

Москва, ВДНХ, 3.10.2021