LXXV International conference «Nucleus–2025. Nuclear physics, elementary particle physics and nuclear technologies»

Saint Petersburg, Russia, July *1-6, 2025*

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК *pp*-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕАКЦИИ $p+{}^2\mathrm{H}\rightarrow p+p+n$

Mitsuk V.V.[1] , Kasparov A.A.[1], Mordovskoy M.V.[1], Lebedev V.M.[2], Spassky A.V.[2]

[1]Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
[2]Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia;

E-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

Измерение a_{pp} и E_{pp} в различных реакциях

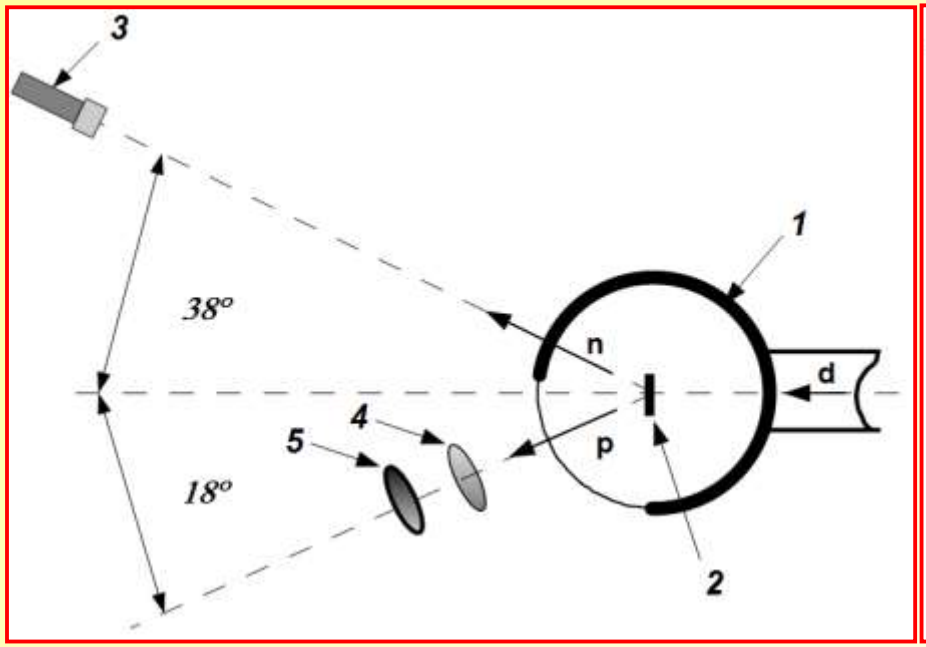
Одним из проявлений эффекта НЗС (CSB) является разница между синглетными длинами рассеяния a_{pp} и a_{nn}:

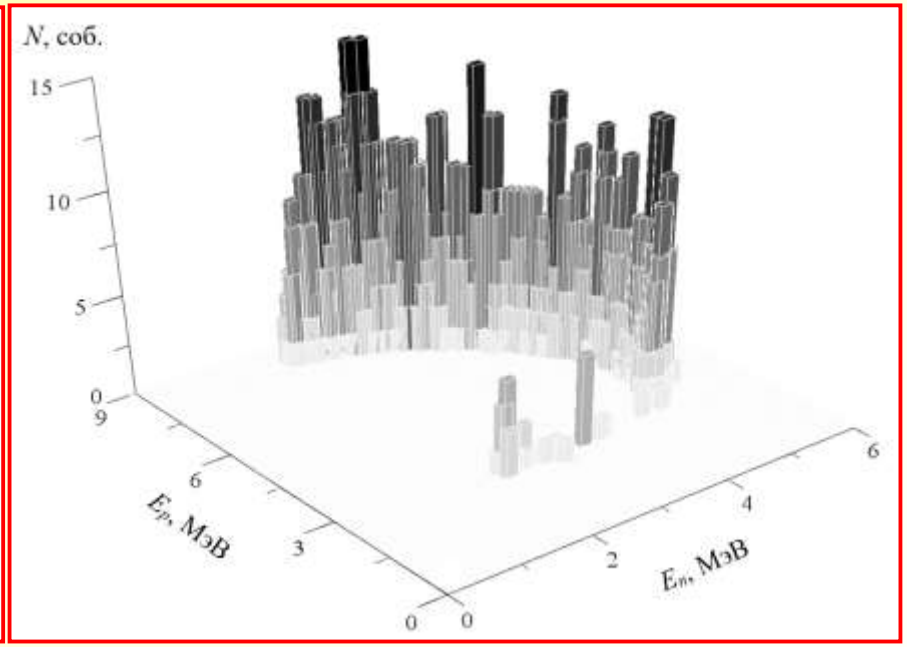
- a_{pp} измеряется в реакции pp-рассеяния, также может быть измерена в реакциях с двумя протонами в конечном состоянии, например $d+{}^2\mathrm{H}$, $d+{}^1\mathrm{H}$ и $p+{}^2\mathrm{H}$;

- a_{nn} измеряется, в основном, в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии $n+d$ и π^-+d, но также может быть измерена в реакции $d+{}^2\mathrm{H}$.

Измерение a_{pp} и E_{pp} в реакции $p+{}^2H \rightarrow p+p+n$ в случае углов регистрации $\Theta_p = 18^o \pm 2^o$ и $\Theta_n = 38^o \pm 1.5^o$

(А.А. Каспаров и др., ЯФ, 2025, Т. 88, № 2, с. 220–227)





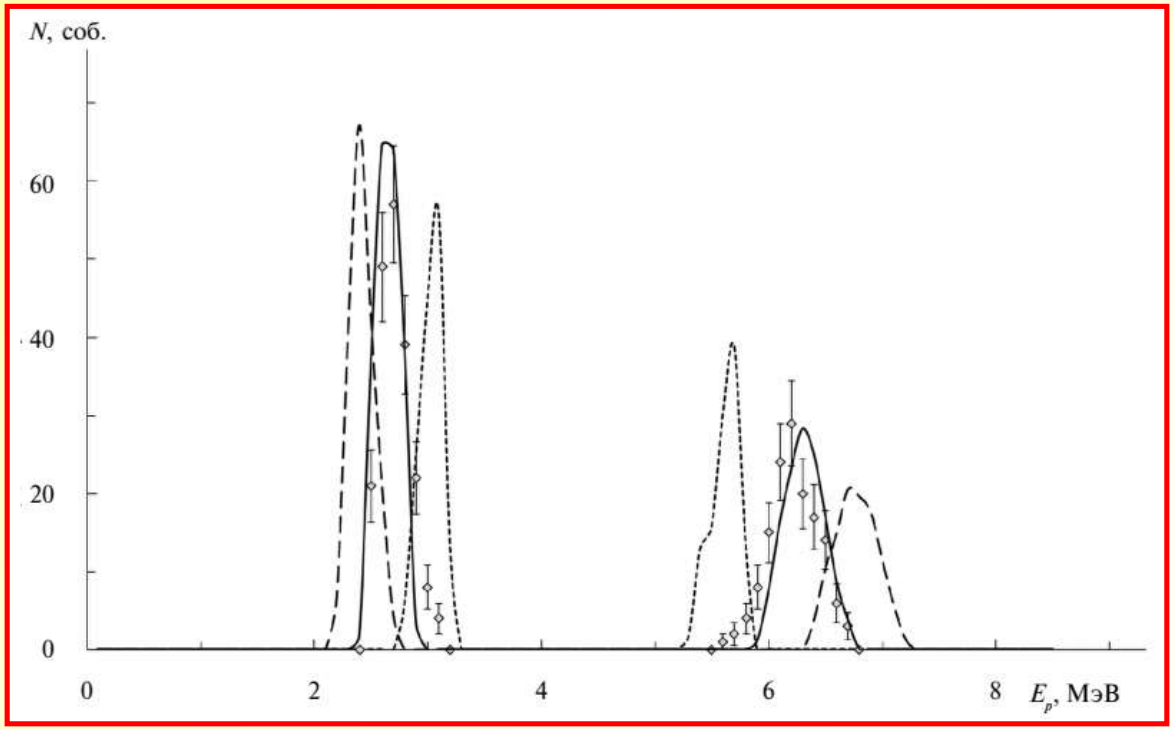
Экспериментальная схема: 1 — вакуумная камера рассеяния (Ø 23 см с выходным окном из лавсана толщиной 20 мкм), 2 — мишень CH_2 (толщина 30 мкм), 3 — нейтронный детектор (Ø 5 см, толщина 5 см), 4 — ΔE-детектор (Ø 5 мм, толщина 25 мкм), 5 — E-детектор (Ø 10 мм, толщина 1000 мкм).

Энергетические корреляции E_p – E_n, измеренные в реакции $p + {}^2H \rightarrow p + p + n$ при $\Theta_p = 18^o \pm 2^o$ и $\Theta_n = 38^o \pm 1.5^o$.

Измерение a_{pp} и E_{pp} в реакции $d+{}^1\mathrm{H} \rightarrow p+p+n$

(А.А. Каспаров и др., ЯФ, 2025, Т. 88, № 2, с. 220–227)

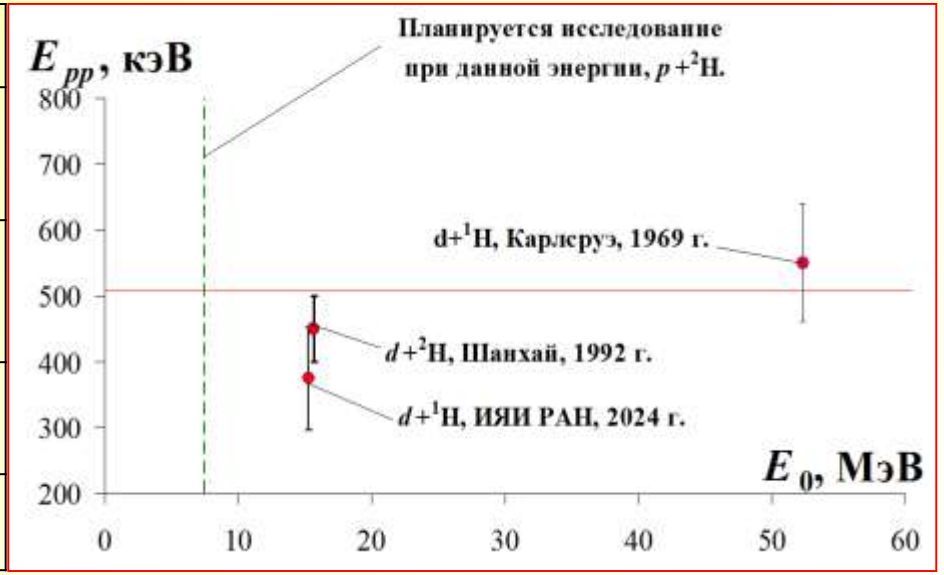
Сравнение полученного в эксперименте энергетического спектра протонов с моделированными спектрами, соответствующими E_{pp} = 200 ± 10 (точечная кривая), 400 ± 50 (сплошная), 600 ± 50 кэВ (штриховая).



Проведенный χ^2-анализ показал, что наиболее вероятное значение энергии ${}^1S_0$ *pp*-состояния составляет E_{pp} = 375 ± 5 кэВ.

Сравнение с результатами исследований *pp*-корреляций, проведенных другими группами

Группа	Энергия, МэВ	Реакция	E_{pp}, кэВ
Неймеген, 1988 г.	0-30	свободное *pp*-рассеяние	510±5 r_{pp}=2.85 фм
Карлсруэ, 1969 г.	52.3	$d+^1H \rightarrow p+p+n$	550±70 r_{pp}=2.85 фм
Шанхай, 1992 г.	15.7	$d+^2H \rightarrow p+p+n+n$	450±50
ИЯИ РАН, 2024 г.	15.3	$d+^1H \rightarrow p+p+n$	E_{pp} =375±5 ΔE_{pp} =70±3



Формула для пересчета E_{NN} в a_{NN}:

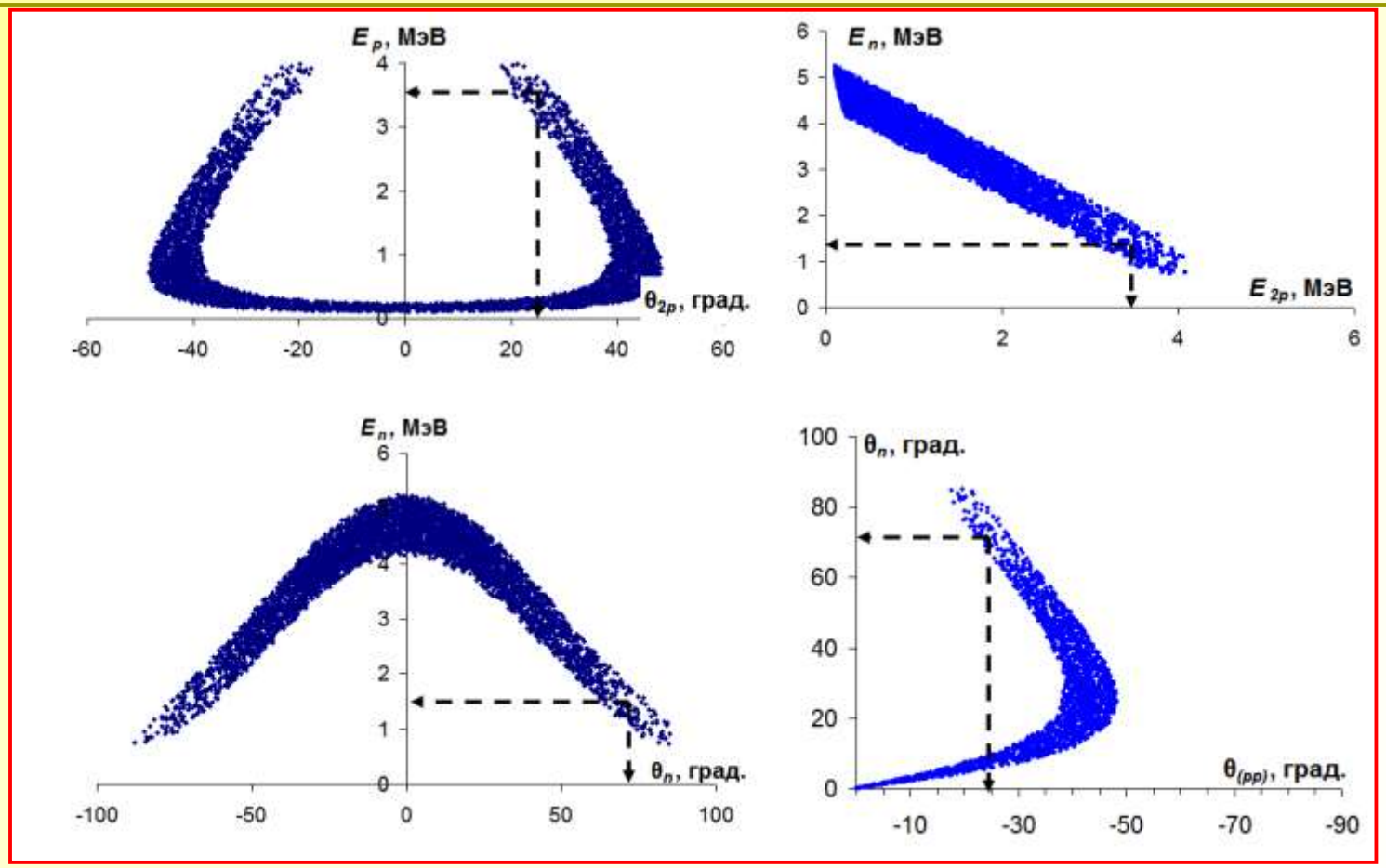
$$\frac{1}{a_{NN}} = -\left(\frac{m_N E_{NN}}{\hbar^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} r_{NN} \frac{m_N E_{NN}}{\hbar^2} + \ldots$$

Цель настоящей работы – поиск отличия низкоэнергетических характеристик *pp*-взаимодействия (E_{pp} и a_{pp}) в случае реакции $p+^2H \rightarrow p+p+n$ от их значений в случае свободного *pp*-рассеяния. Данное отличие может быть обусловлено влиянием 3*N*-сил.

Кинематическое моделирование реакции $p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow (pp) + n$: первый этап

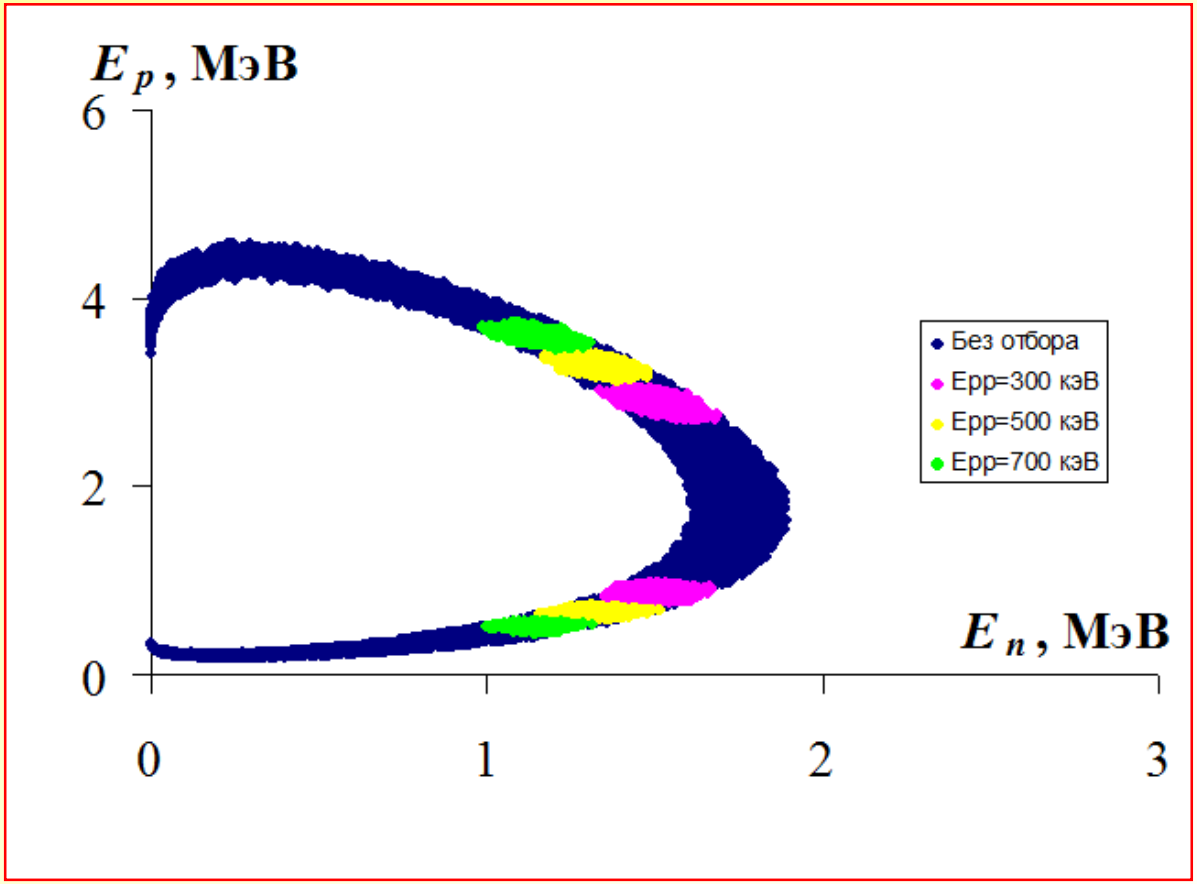
- На первом этапе моделируется двухчастичная реакция $p+{}^2\mathrm{H}\rightarrow (pp)+n$ при энергии пучка протонов $E_p = 7.5$ МэВ.
- Затравочная масса двухпротонной системы берётся как $M_{2p} = 2m_p + E_{pp}$.
- Искомое значение энергии *pp*-состояния при моделировании берется в широком интервале $E_{pp} = 0 – 0.8$ МэВ.

Кинематическое моделирование реакции $p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow (pp) + n$: первый этап



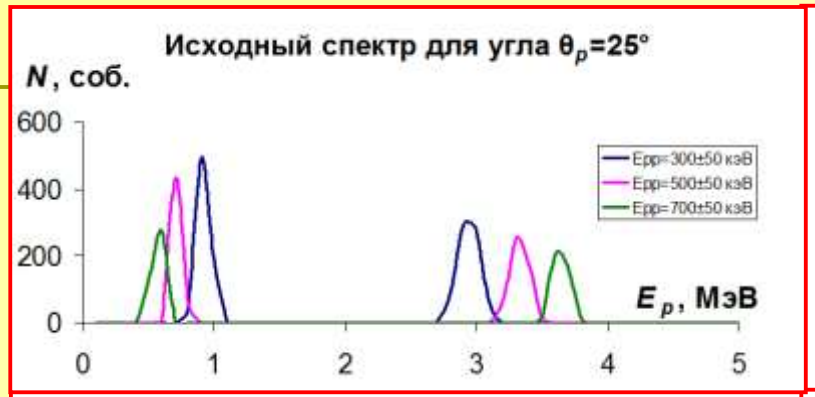
Были определены углы вылета *pp*-системы и нейтрона, соответствующие максимальной энергии протонов, что способствует лучшей регистрации протонов в ΔE-E-системе.

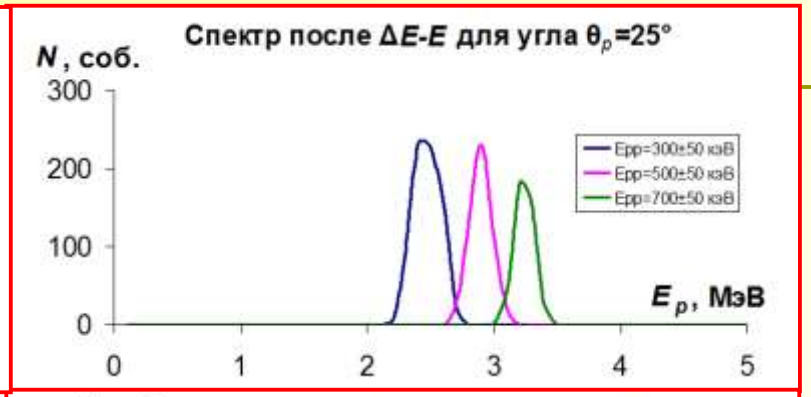
Кинематическое моделирование реакции $p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow p + p + n$: второй этап

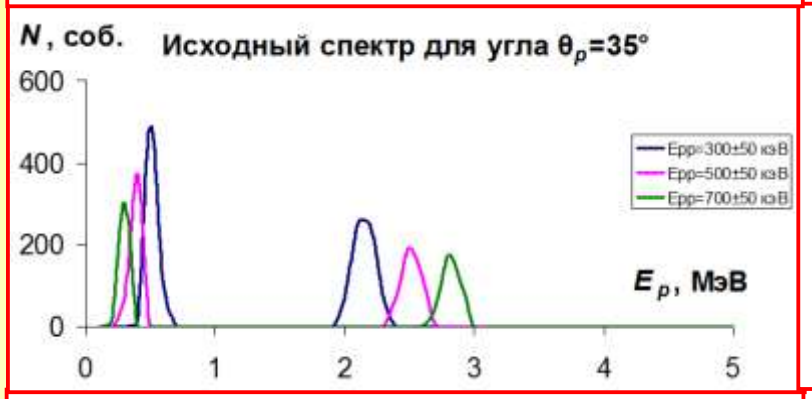


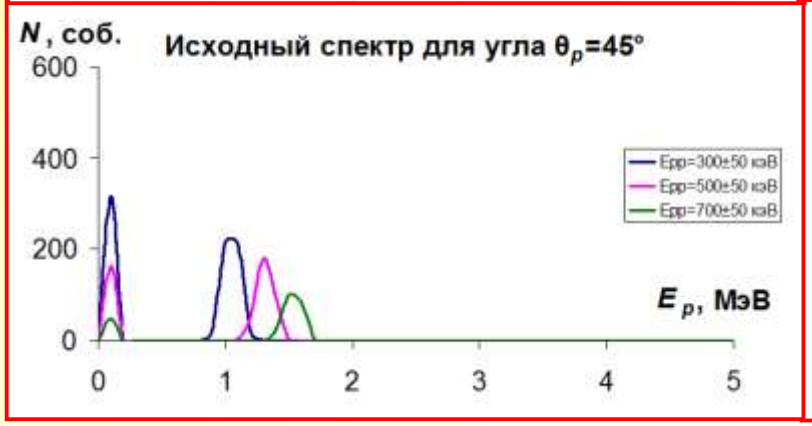
E_n и E_p – энергии нейтрона и одного из протонов, образующихся в реакции $p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow p + p + n$ для случая угла вылета протона Θ_p=25°. Отбор по E_{pp} проводится в интервале $E_{pp} \pm \Delta E_{pp}$.

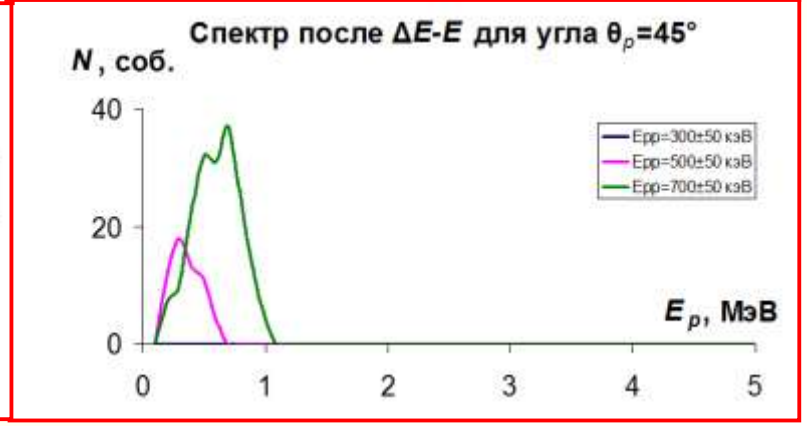
Спектры энергии протонов для разных величин E_{pp} (300, 500 и 700 кэВ)



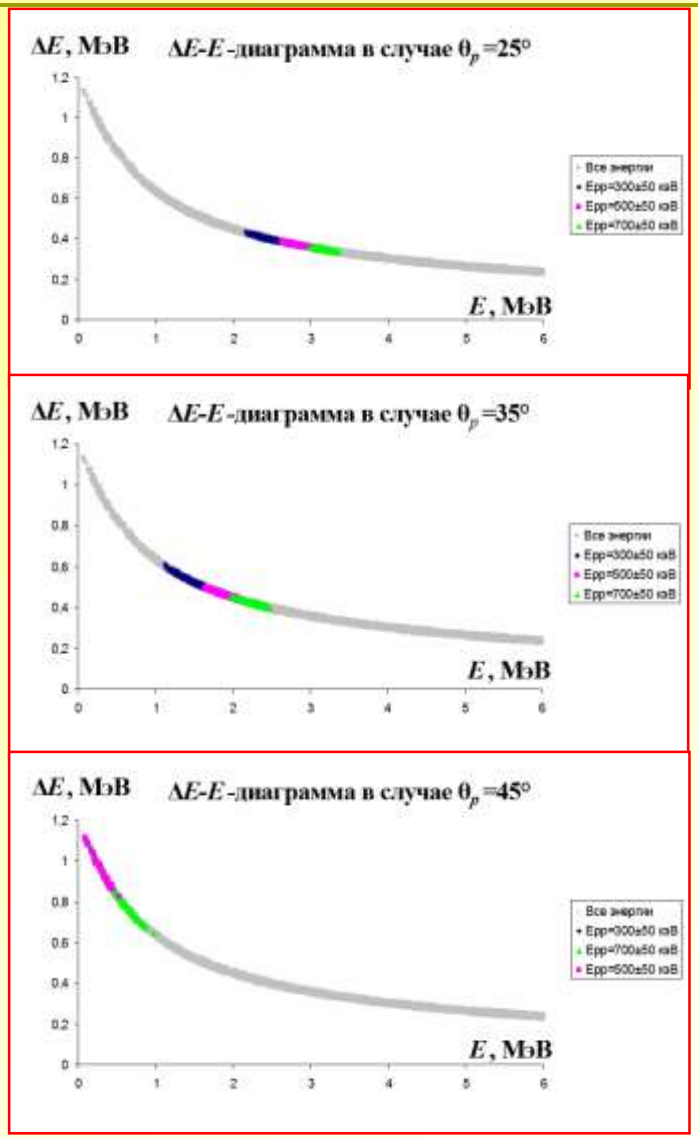








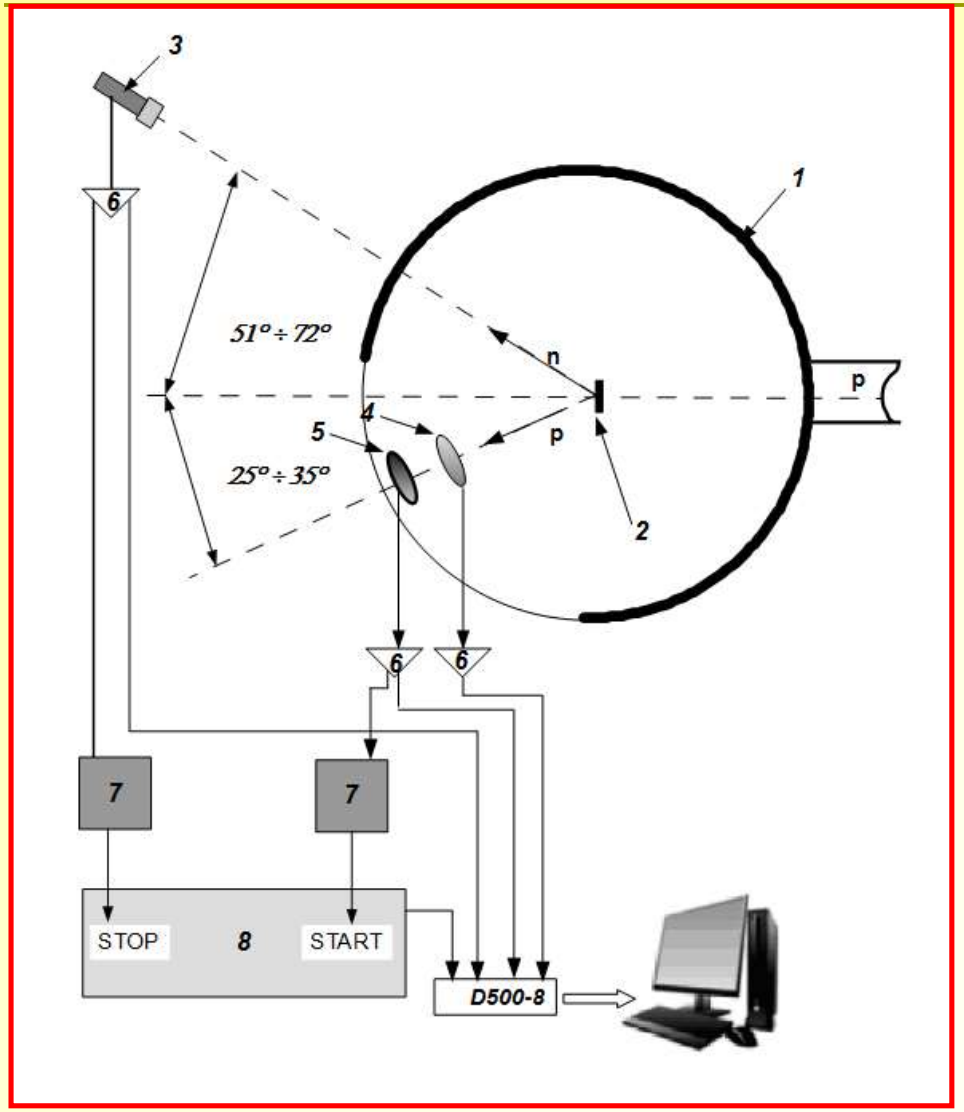
Кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\mathrm{H} \rightarrow p + p + n$: второй этап



Моделирование прохождения протонов через ΔE-E-систему в случае трёх углов детектирования протонов для нескольких вариантов значения энергии протон-протонного состояния $E_{pp} \pm \Delta E_{pp}$.

Были определены оптимальные углы вылета *pp*-системы (–35° ÷ –25°) и нейтрона (51° ÷ 72°), соответствующие максимально возможным в эксперименте энергиям протонов. Положительным и отрицательным углам соответствуют углы вылета налево и направо от оси пучка соответственно.

Экспериментальная установка для регистрации заряженных частиц и нейтронов в реакции $d+{}^1\mathrm{H}\rightarrow p+p+n$



1 – вакуумная камера рассеяния,
2 – мишень CD_2,
3 – сборка нейтронных детекторов,
4 – кремниевый ΔE-детектор (20 мкм),
5 – E-детектор (1000 мкм),
6 – система, включающая в себя предусилитель и/или усилитель,
7 – формирователь со следящим порогом,
8 – время-амплитудный преобразователь.
Оцифровывание сигналов будет осуществляться с помощью ЦСП D500-8 отечественного производства.
Планируется проведние измерений на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ.

Заключение и выводы

- **Результаты кинематического моделирования реакции $p+^2H \rightarrow p+p+n$ показали, что анализ формы спектра протонов при определенных параметрах эксперимента может дать информацию об энергии протон-протонного состояния E_{pp}.**
- **По результатам проведенного моделирования определены оптимальные параметры эксперимента и схема экспериментальной установки.**
- **Предполагается проведение эксперимента по исследованию реакции $p+^2H \rightarrow p+p+n$ при энергии пучка налетающих протонов 7.5 МэВ на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ с учётом более строгого теоретического анализа.**

Спасибо за внимание!