



Семинар ОЭФ ИЯИ 29 сентября 2009 г.

Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $n+d \rightarrow p+n+n$

Е.С.Конобеевский, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, М.В.Мордовской,
С.И.Поташев, В.А.Сергеев, И.М.Шарапов (ИЯИ РАН)
В.И.Кукулин, В.Н.Померанцев, О.А.Рубцова (НИИЯФ МГУ)

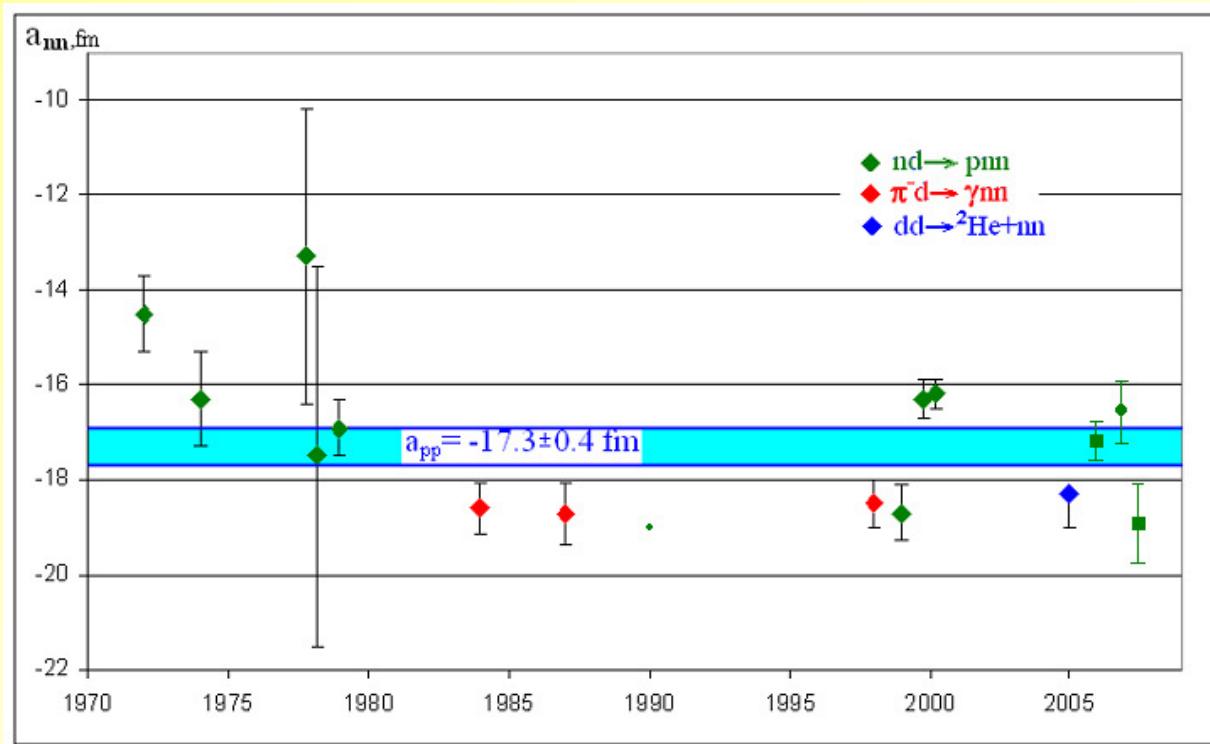
The Problem of CSB

It is known that the charge symmetry breaking (CSB) of nuclear forces, i.e., the difference in nuclear *nn* and *pp* interactions, is a small effect, which, according to the modern concepts, is related to the mass difference between *up* and *down* quarks and electromagnetic energy differences caused by their different electric charges and magnetic moments.

Due to the presence of a virtual level with a close to zero energy in the 1S_0 state of two nucleons, the corresponding scattering length is very sensitive to small changes in the NN potential.

Precise determination of singlet scattering lengths and their difference $a_{nn} - a_{pp}$ from experimental data is a convenient way for determining the measure of CSB of nuclear forces.

Data on proton-proton and neutron-neutron scattering lengths



The results obtained by now testify significant uncertainty of a_{nn} . Neutron scattering length values which are clustered near -16.3 ± 0.4 fm (Bonn) and just slightly -18.5 ± 0.4 fm ($n+d \rightarrow p+nn$ (TUNL-LAMPF)) so there is even uncertainty about the sign of the difference $a_{nn} - a_{pp}$, which is a measure of CSBall relative energy.

Comparison of recent works determining neutron-neutron scattering length in $nd \rightarrow pnn$ reaction

Gonzales99 (TUNL)	En=13 MeV, CD ₂ -active target	FSI geometry $\Theta_{nn}=20,28,35,43^\circ$ $\Delta\Theta=0^\circ$	3N Faddeev eq. Bonn B NN-potential and MC Absolute cross-section	$a_{nn}=-18,7 \pm 0,6$ $a_{np}=-23,5 \pm 0,8$
B.J.Crowe 06 (TUNL,Bonn) W.von Witch	En=19 MeV, CD ₂ -active target	FSI geometry $\Theta_{nn}=35,5^\circ$ $\Delta\Theta=0^\circ$	3N Faddeev eq. and MC Shape of cross-section	$a_{nn}=-17,6 \pm 0,2$ $a_{np}=-22,7 \pm 1,0$
Gonzales 06 (TUNL)	En=13 MeV, CD ₂ -active target	FSI geometry $\Theta_{nn}=20,28,35,43^\circ$ $\Delta\Theta=0^\circ$	3N Faddeev eq. Bonn B, CD Bonn, CDNijmegen I NN-potentials and MC Absolute cross-section Shape of cross-section	$a_{nn}=-18,72 \pm 0,13 \pm 0,65$ (absolute) $a_{nn}=-18,84 \pm 0,47$ (shape) a_{np} – no data
V.Huhn 00 (Bonn)	En=16,6 and 25,3 MeV, CD ₂ -target	Recoil geometry $\Theta_n=55,5^\circ$ $\Theta_p=41,15$	3N Faddeev eq. CD Bonn NN-potential and MC Absolute cross-section Relative(to np QFS) cross-section	$a_{nn}=-16,2 \pm 0,4$ (absolute) $a_{nn}=-16,2 \pm 0,3$ (shape) $a_{np}=-23,9 \pm 0,8$
W.von Witch (Bonn)	En=17,4 MeV, CD ₂ -target	Incomplete $\Theta_p=4,9^\circ$	3N Faddeev eq. Bonn B, CD Bonn, CD Nijmegen I NN-potentials and MC Absolute cross-section	$a_{nn}=-16,5 \pm 0,9$ (absolute)
Present experiment	En=30, 40, 50 and MeV, CD ₂ -target	FSI geometry $\Theta_{nn} \sim 30^\circ$ $\Delta\Theta=2,4,6,8,10^\circ$	WM – approach 3N Faddeev eq.??? and MC Shape of reaction yield on nn-relative energy	$a_{nn}=-???$

Другие нерешенные проблемы в реакции nd -развала

Так, например, измеренное тройное дифференциальное сечение реакции nd -развала в области SPACE-STAR кинематики на 20% выше теоретического предсказания [3,4].

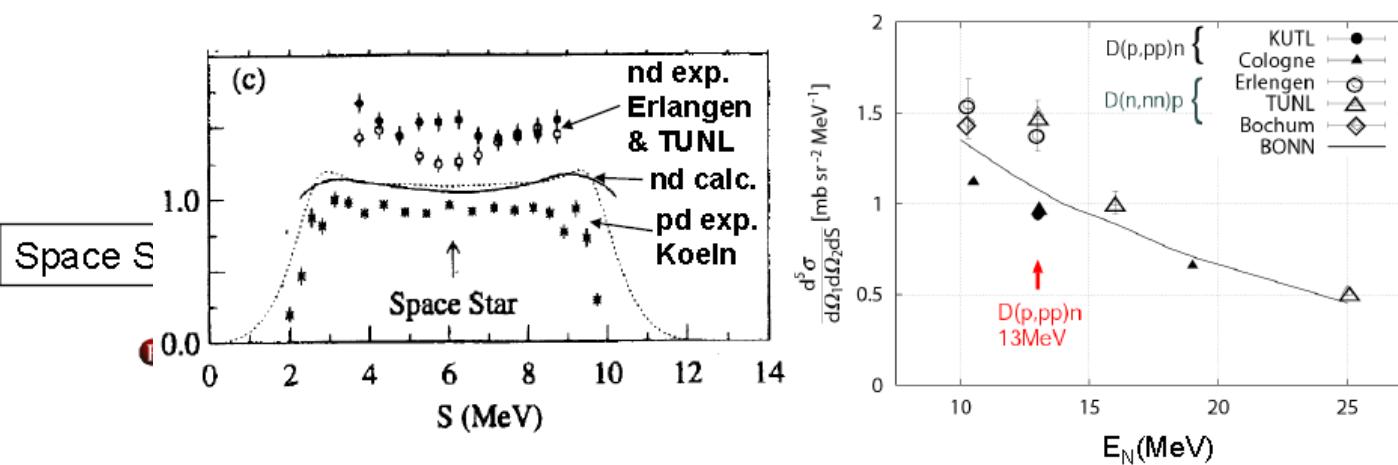
Space star anomaly (SS anomaly) is a curious phenomenon

FSI

SS anomaly was found at around $E_{beam}=13$ MeV.

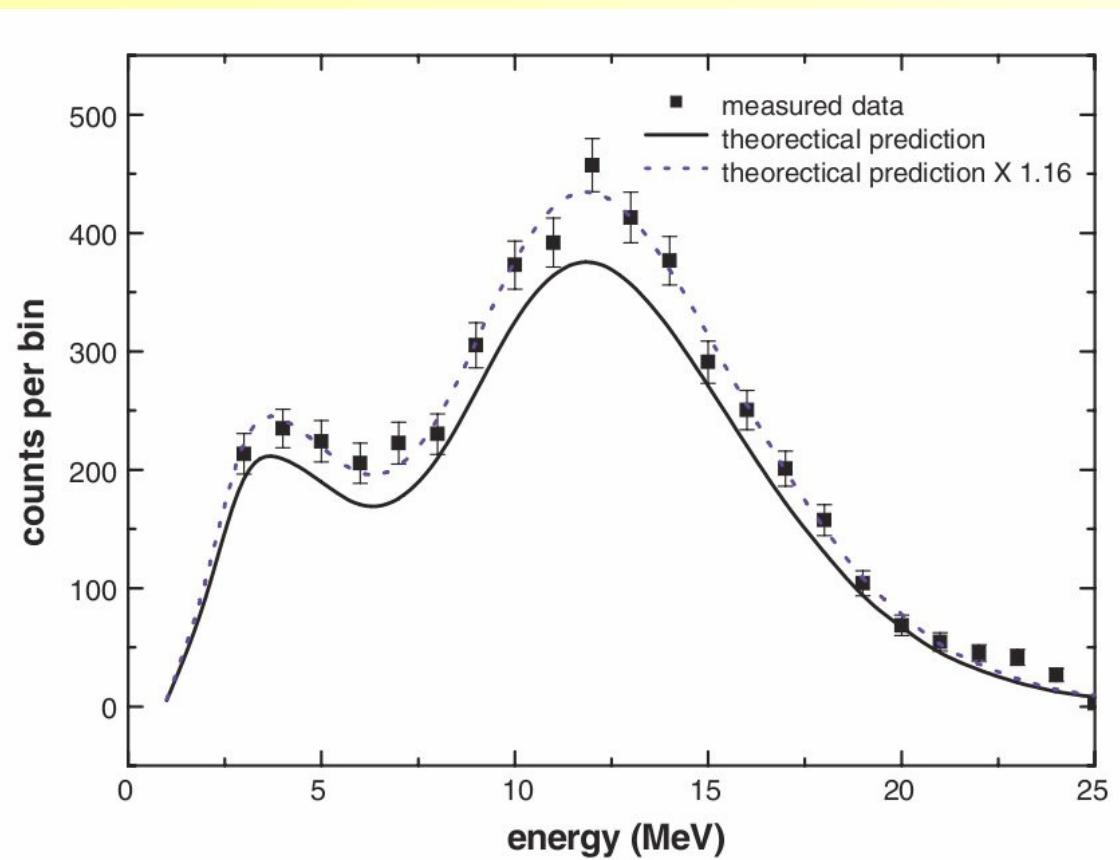
- nd breakup cross section around SS are ~30% larger than calculation.
- pd breakup cross section around SS are ~10% smaller than calculation.
(Coulomb effects decreases cross section by only a few %.)
- SS anomaly is dominant at 13 MeV and vanishes at higher energy.

Star



Другие нерешенные проблемы в реакции nd -развала

- Аналогичная ситуация имеет место в кинематической области квазисвободного рассеяния (КСР): измеренное сечение при энергии 26 МэВ превышает теоретические предсказания примерно на ~ 18% [5].



Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $n+d \rightarrow p+n+n$

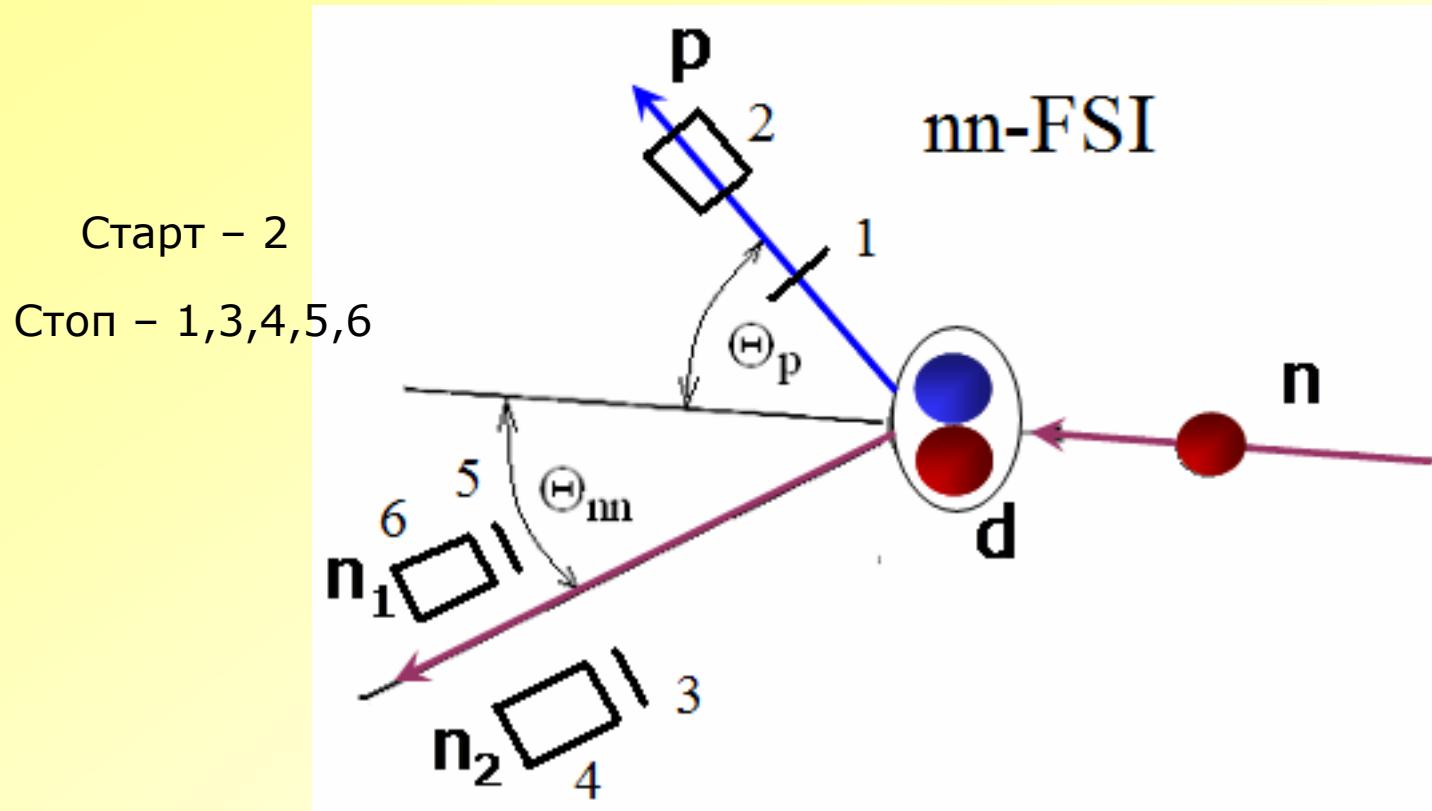
Работа направлена на решение одной из фундаментальных проблем всей ядерной физики: нахождение характерных параметров нейтрон-нейтронного взаимодействия и точного значения длины нейтрон-нейтронного рассеяния (a_{nn}), а также на новую аккуратную оценку величины эффектов нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

Предполагается проведение кинематически полного эксперимента по исследованию реакции $n+d \rightarrow p+n+n$ при $E_n = 13\text{--}60$ МэВ. При этом одновременно будет определяться как a_{nn} , так и a_{np} в двух методиках – взаимодействия в конечном состоянии (ВКС), и в геометрии отдачи. При изменении углов регистрации вторичных частиц будут проведены эксперименты в геометриях SPACE-STAR и квазисвободного рассеяния.

Источники нейтронов

- РАДЭКС
- Энергия, ток протонов – 209 МэВ, 20-50 мкА
- Энергия нейтронов 30-70 МэВ
- Плотность потока на CD_2 -мишени $10^6\text{--}10^7 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
- СУИВ-430
- Нейтроны 13-15 МэВ из реакции ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$
- Энергия, ток дейtronов 430 кэВ, 20 мА
- Поток 14 МэВ нейтронов – $\cdot 10^{12}\text{--}10^{13} \text{ с}^{-1}$
- Плотность потока 14 МэВ нейтронов после коллиматора $10^6\text{--}10^7 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

Схема эксперимента для определения a_{nn} и QFS



FSI-триггер

1-2-4-6 $\Theta_p=90^\circ$, $\Theta_{nn}=30^\circ$, $\Delta\Theta_n=2, 4, 6, 8, 10^\circ$

RECOIL-триггер

1-2-4 + 1-2-6 $\Theta_p=90^\circ$, $\Theta_n=24^\circ, 34^\circ$

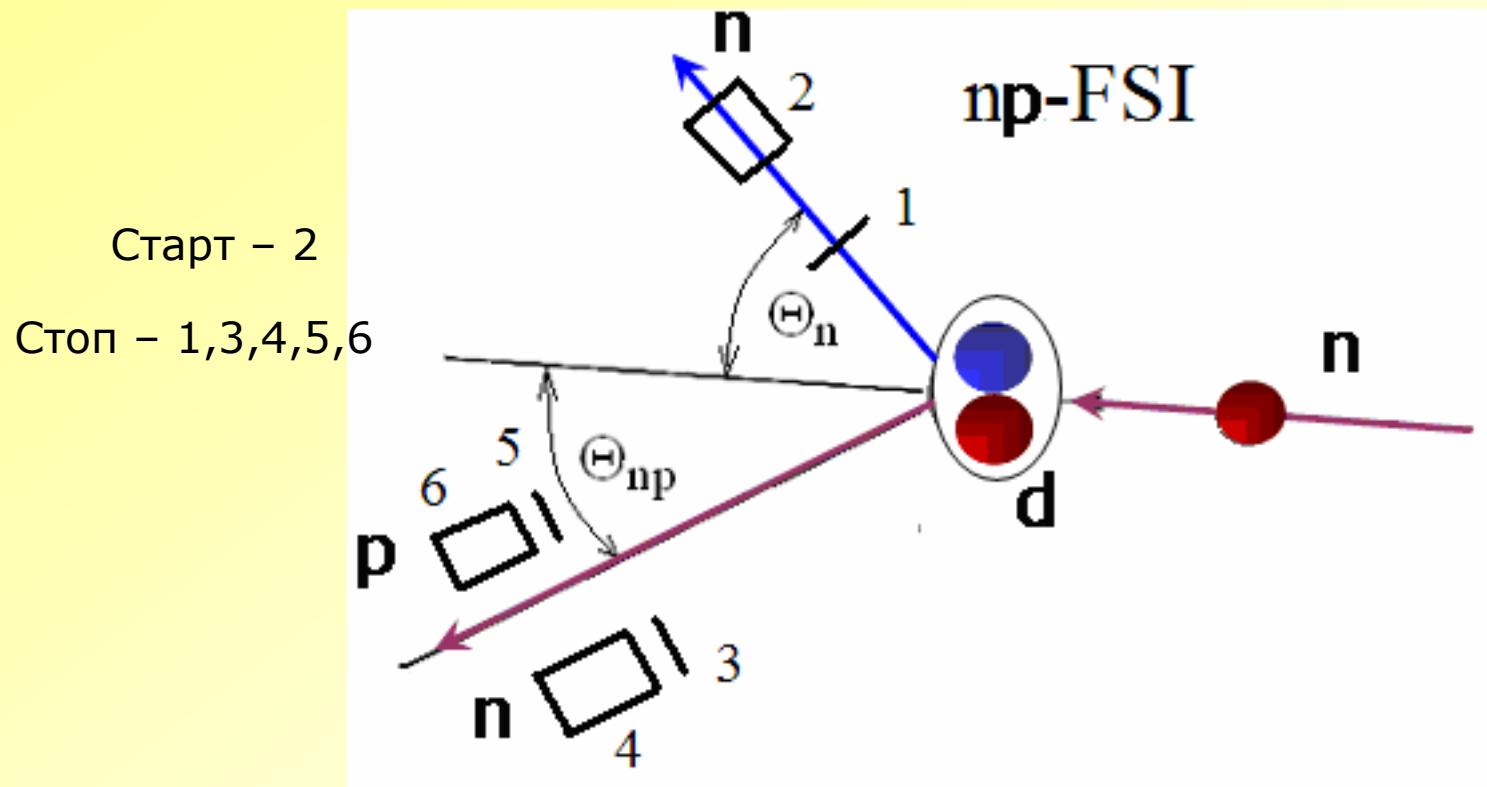
np QFS –триггер

1-2-4 + 1-2-6 $\Theta_p=60^\circ$, $\Theta_n=30^\circ$

nn QFS –триггер

2-4 + 2-6 $\Theta_{n1}=60^\circ$, $\Theta_{n2}=30^\circ$

Схема эксперимента для определения a_{np} и QFS



FSI-триггер	2-3-4-6 + 2-4-5-6	$\Theta_n=90^\circ$, $\Theta_{np}=30^\circ$, $\Delta\Theta_{np}=2, 4, 6, 8, 10^\circ$
RECOIL-триггер	2-3-4 + 2-5-6	$\Theta_n=90^\circ$, $\Theta_p=24^\circ - 34^\circ$
np QFS –триггер	2-5-6 + 2-3-4	$\Theta_n=60^\circ$, $\Theta_p=30^\circ$
nn QFS –триггер	2-4 + 2-6	$\Theta_{n1}=60^\circ$, $\Theta_{n2}=30^\circ$

Теоретический анализ

Теоретическая группа – В.И.Кукулин, В.Н.Померанцев, О.А.Рубцова
НИИЯФ МГУ

Новая решеточная форма
уравнений Фаддеева

Новая модель $2N$ и $3N$
взаимодействий

Полный трехчастичный анализ динамики
реакции трехнуклонного разрыва

- В результате объединения двух основных теоретических компонент будет создана единая компьютерная программа, позволяющая рассчитывать все основные процессы в $3N$ -системе, включая развал в различных кинематических комбинациях: в кинематике ВКС, в кинематике SPACE-STAR, и, наконец, в кинематике КСР, что необходимо для извлечения параметров нейтрон-нейтронного взаимодействия из трехчастичных экспериментов.

2N and 3N Interaction in DBM

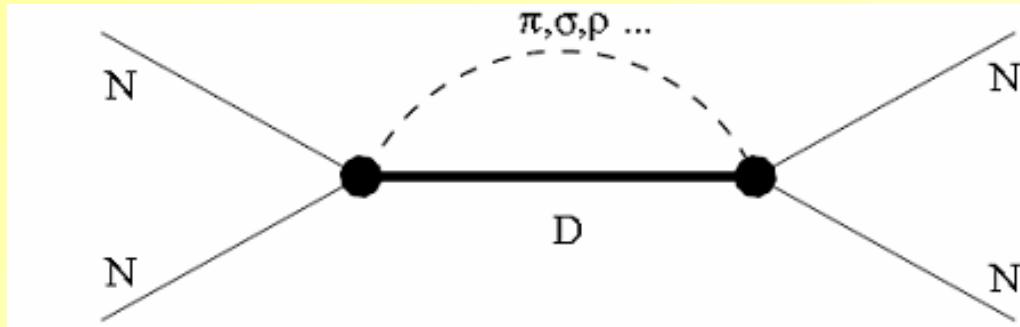


Fig. 1. *s*-channel mechanism for NN interaction with an intermediate dibaryon dressed with π -, σ -, ρ -, etc. mesonic fields.

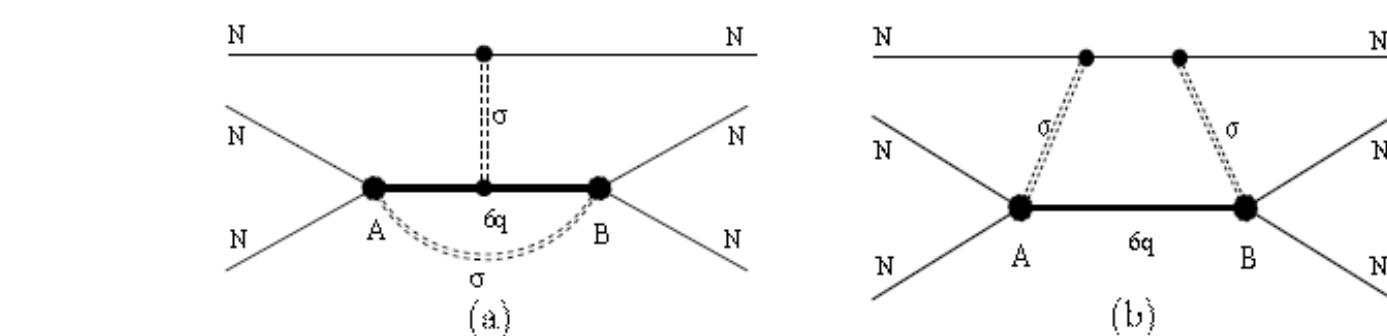


Fig. 3. The graphs illustrating the new $3N$ scalar force induced by σ -exchange between the dressed bag and third nucleon.

Цели работы

- В рамках настоящего проекта реакция $n+d \rightarrow p+n+p$ будет исследована при энергии падающих нейтронов 13–60 МэВ в различных кинематических областях с целью получения дополнительной информации о нуклон-нуклонных и трехнуклонных ядерных силах. Предполагается получить экспериментальные данные о реакции в кинематике КСР, в кинематике SPACE-STAR, а также в кинематике нейtron-нейtronного и нейtron-протонного ВКС. Теоретическая часть работы будет включать полный трехчастичный анализ динамики реакции трехнуклонного развала на основе новой решеточной формы уравнений Фаддеева, развитой авторами проекта, а также новой модели трехнуклонного взаимодействия.
- Авторы данного проекта планируют, что усовершенствованная во многих отношениях схема эксперимента совместно с новым прецизионным трехчастичным формализмом, а также с использованием усовершенствованной модели NN и $3N$ сил приведет, во-первых, к более ясному пониманию основных зависимостей в трехчастичных реакциях такого типа, а также к более надежному и, главное, однозначному определению параметров pp взаимодействия, позволяющему описать основные наблюдаемые.



Семинар ОЭФ ИЯИ 29 сентября 2009 г.

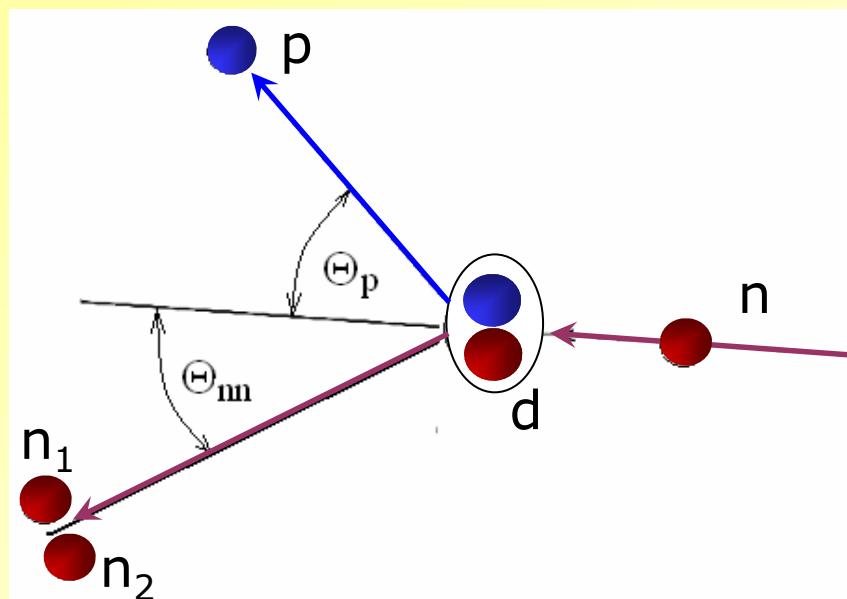
Determination of 1S_0 neutron-neutron scattering length in nd-breakup reaction at 40-60 MeV

E.Konobeevski, Yu.Burmistrov, S.Zuyev, M.Mordovskoy, S.Potashev, V.Sergeev

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

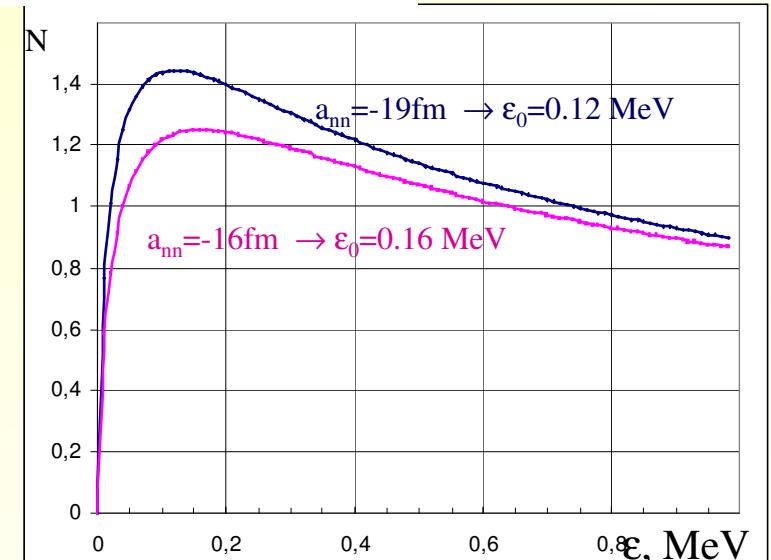
Investigation of neutron–neutron final state interaction (FSI) in the $n + d \rightarrow p + n + n$ reaction

Registration of two neutrons having a very small relative momentum



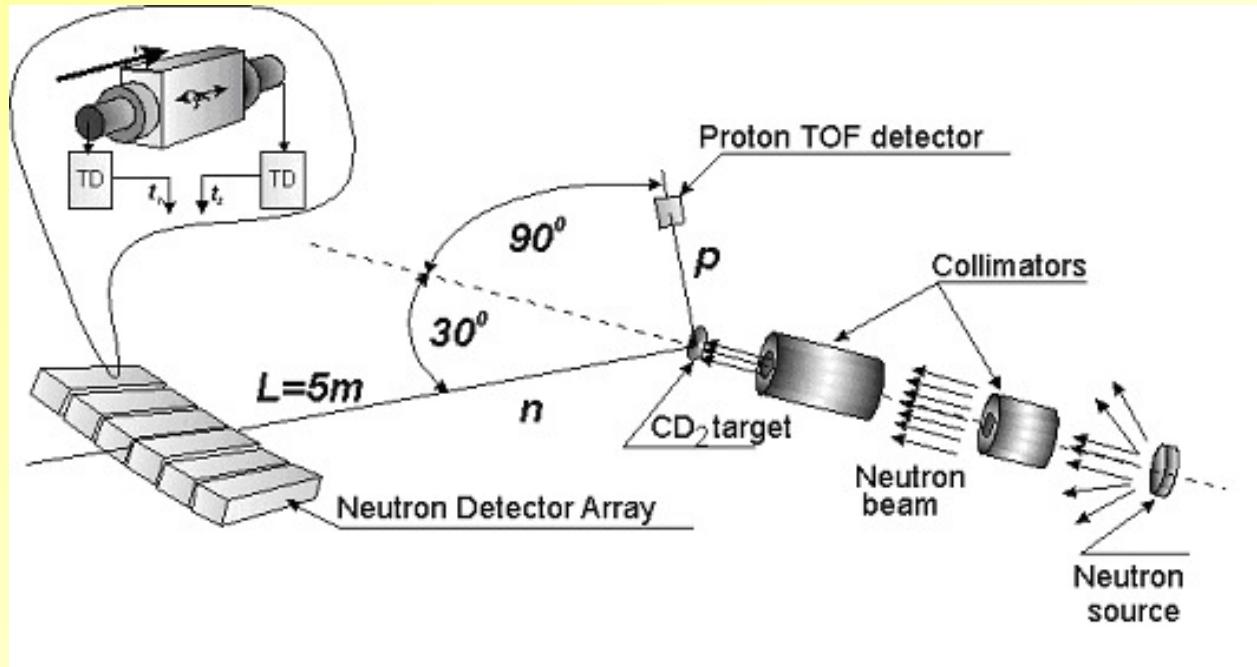
Watson-Migdal approximation

$$N \sim \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon_0 + \varepsilon(1 - \frac{r_0}{a_{NN}})} \approx \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon_0 + \varepsilon} \quad \varepsilon_0 = \frac{\hbar^2}{m_N a_{NN}^2}$$



Neutron–neutron FSI manifests itself as a peak in the dependence of the reaction yield on the relative energy of two neutrons $\varepsilon = (E_1 + E_2 - 2(E_1 * E_2)^{1/2} \cos \Theta)/2$. The shape of this dependence $N(\varepsilon)$ is sensitive to a_{nn} .

Experimental setup for determination nn-scattering length in nd-breakup reaction at neutron beam of Moscow meson factory



- ❖ Neutron beam is produced in the beam stop of INR proton accelerator
- ❖ A CD_2 disk ($\sim 100 \text{ mg cm}^{-2}$) is used as the scattering target.
- ❖ Registration in coincidence of one proton and two neutrons
- ❖ Protons are detected by a plastic detector located at 90°
- ❖ Neutrons are detected by a six-detector hodoscope at 24° - 34°
- ❖ Energies of secondary neutrons are determined by a TOF technique

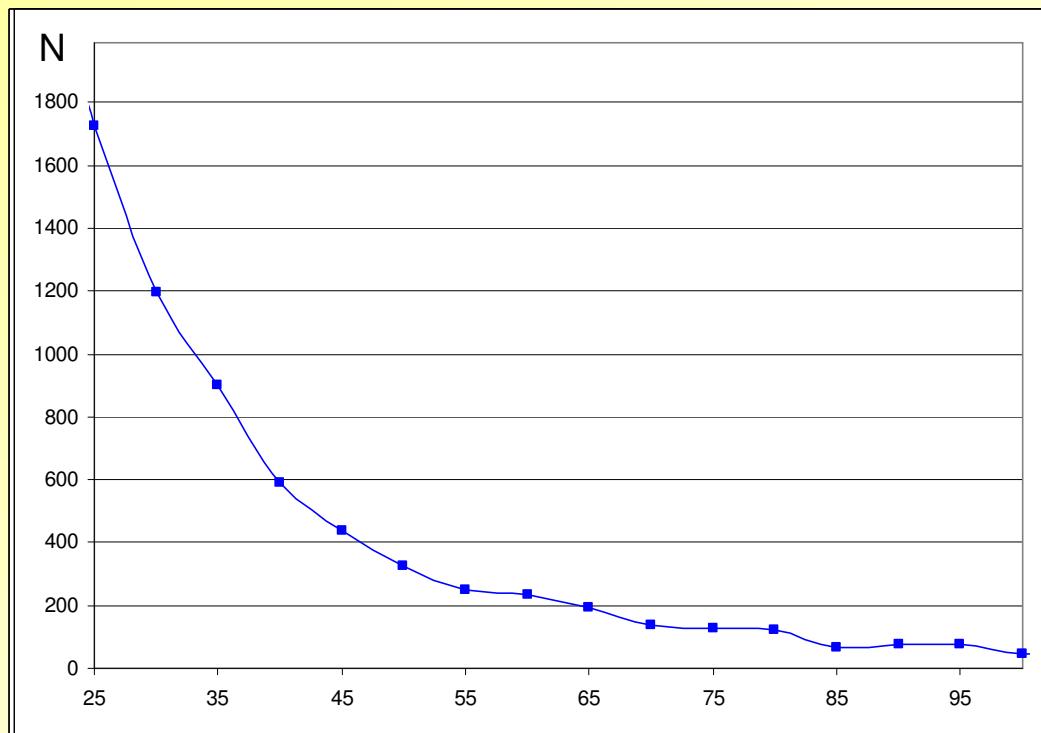
Combinations of neutron detectors

$\Theta_i \setminus \Theta_j$		24°	26°	28°	30°	32°	34°
	$N_i \setminus N_j$	1	2	3	4	5	6
24°	1		1-2 24°-26° $\Delta\Theta=2^\circ$	1-3 24°-28° $\Delta\Theta=4^\circ$	1-4 24°-30° $\Delta\Theta=6^\circ$	1-5 24°-32° $\Delta\Theta=8^\circ$	1-6 24°-34° $\Delta\Theta=10^\circ$
26°	2			2-3 26°-28° $\Delta\Theta=2^\circ$	2-4 26°-30° $\Delta\Theta=4^\circ$	2-5 26°-32° $\Delta\Theta=6^\circ$	2-6 26°-34° $\Delta\Theta=8^\circ$
28°	3				3-4 28°-30° $\Delta\Theta=2^\circ$	3-5 28°-32° $\Delta\Theta=4^\circ$	3-6 28°-34° $\Delta\Theta=6^\circ$
30°	4					4-5 30°-32° $\Delta\Theta=2^\circ$	4-6 30°-34° $\Delta\Theta=4^\circ$
32°	5						5-6 32°-34° $\Delta\Theta=2^\circ$
34°	6						

For the six-detector hodoscope there exist 15 combinations of opening angles of two neutrons $2^\circ - 10^\circ$.

Information on nd-breakup reaction for 5 various opening angles is collected simultaneously.

Reconstructed Energy Spectrum of Incident Neutrons Opening angle of two neutrons 6°



The energy spectrum of neutrons incident at the deuterium target includes all energies, up to the one, equal to the proton beam energy. Detection of three particles in coincidence allows one to reconstruct the primary neutron energy and obtain data on reaction yield in a wide range of neutron energies.

Simulation

The experimental dependence of the yield is compared with the simulation results. In this case, the three body kinematics of the $n + d \rightarrow p + n + n$ reaction is modeled in two stages: $n + d \rightarrow p + (nn)$ and $(nn) \rightarrow n_1 + n_2$.

The dependence of the reaction yield on relative energy ε of two neutrons is taken into account by the number of simulated events with different values of ε , according to the curves calculated from the simplified Watson–Migdal formula with a certain value of the parameter a_{nn} :

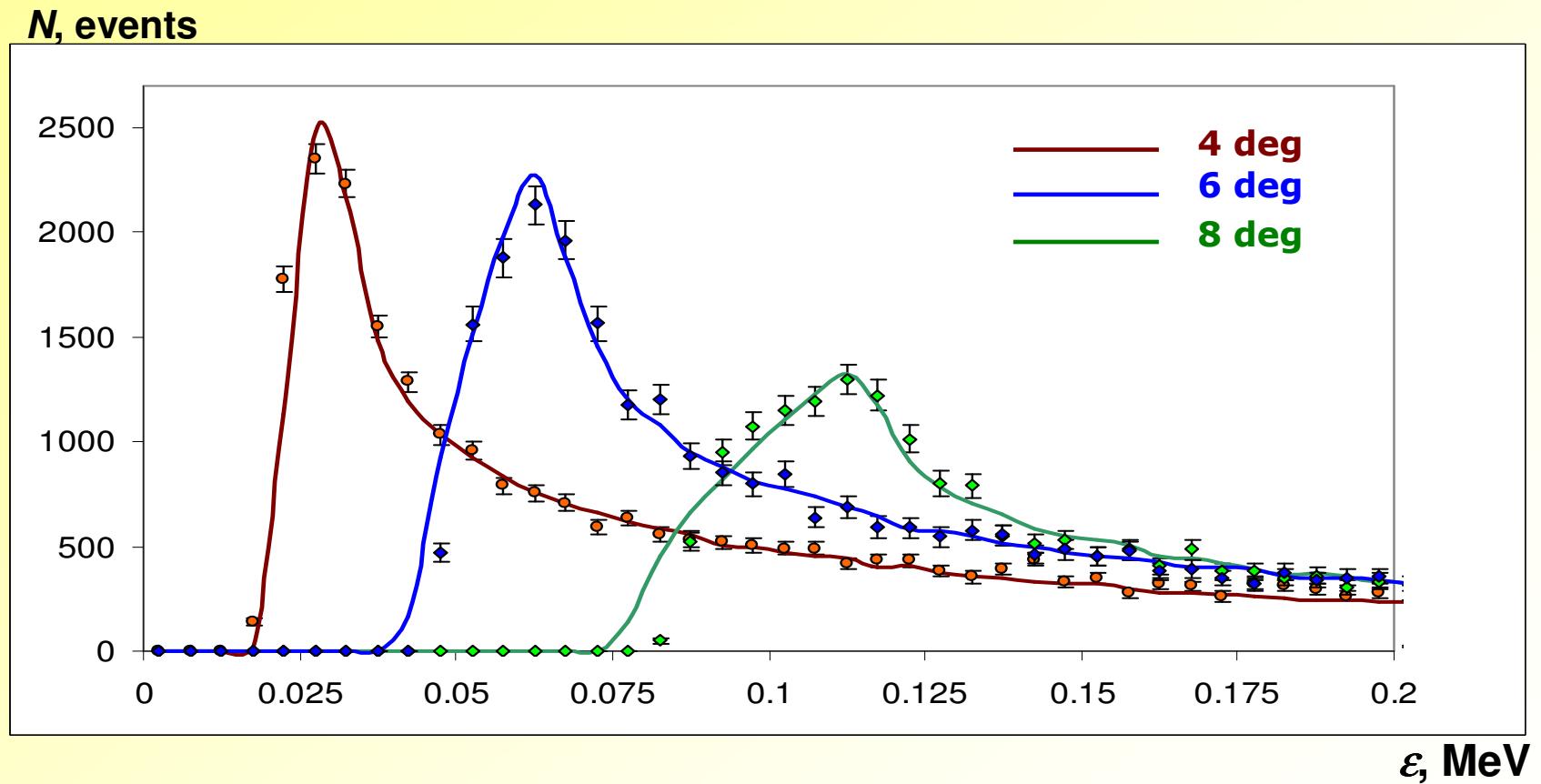
$$F_{WM} \sim \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon + \varepsilon_0}$$

where the parameter ε_0 (MeV) and scattering length a_{nn} (fm) are related by the formula:

$$\varepsilon_0 = \frac{\hbar^2}{m_N a_{nn}^2} \approx \frac{41.5}{a_{nn}^2}$$

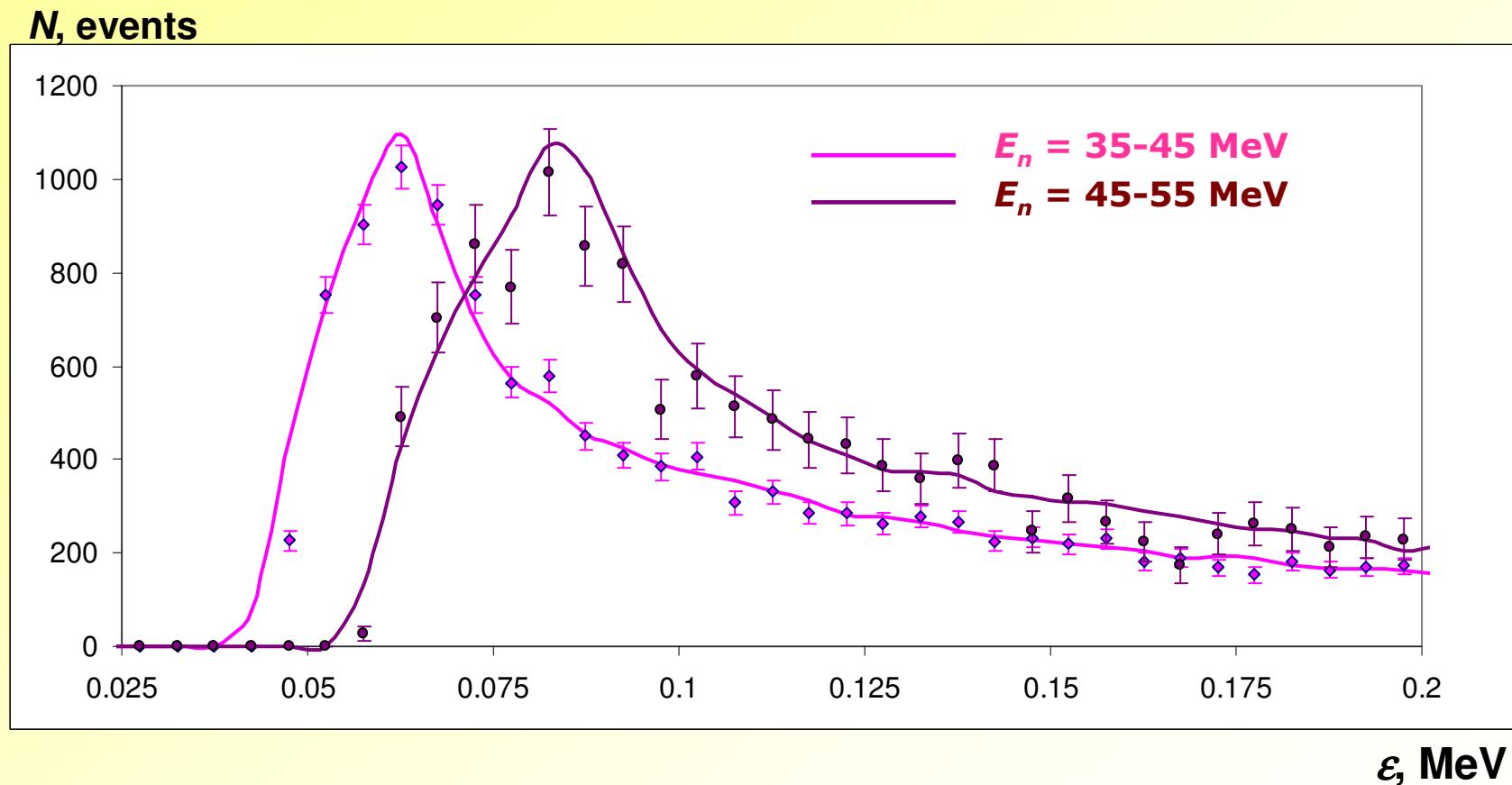
Then the experiment geometry is taken into account: the position and number of the detectors and their energy and angular resolution.

Experimental and simulated dependences $N(\epsilon)$ for various opening angles ($4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$) @ $E_0 = 40 \pm 5$ MeV



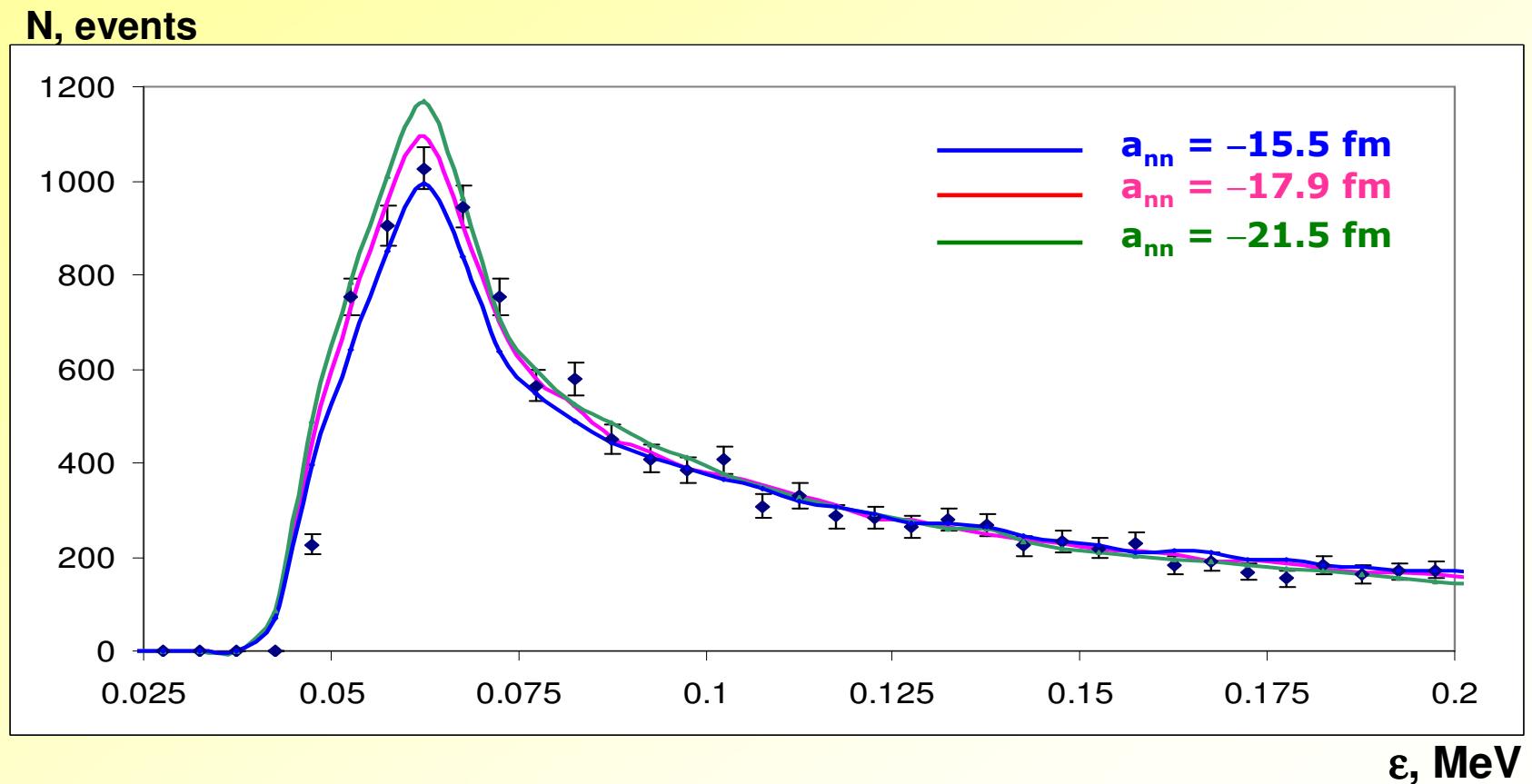
Significant difference in the shape of the experimental distributions is well reproduced by simulation

Experimental and simulated dependences $N(\varepsilon)$ for various energies of primary neutrons @ $\Delta\Theta = 6^\circ$



Dependence on energy of primary neutrons is also well reproduced by simple calculations using Watson-Migdal formula

Experimental and simulated dependences $N(\varepsilon)$ for various values of a_{nn} ; $\Delta\Theta = 6^\circ$, $E_0 = 40 \pm 5$ MeV



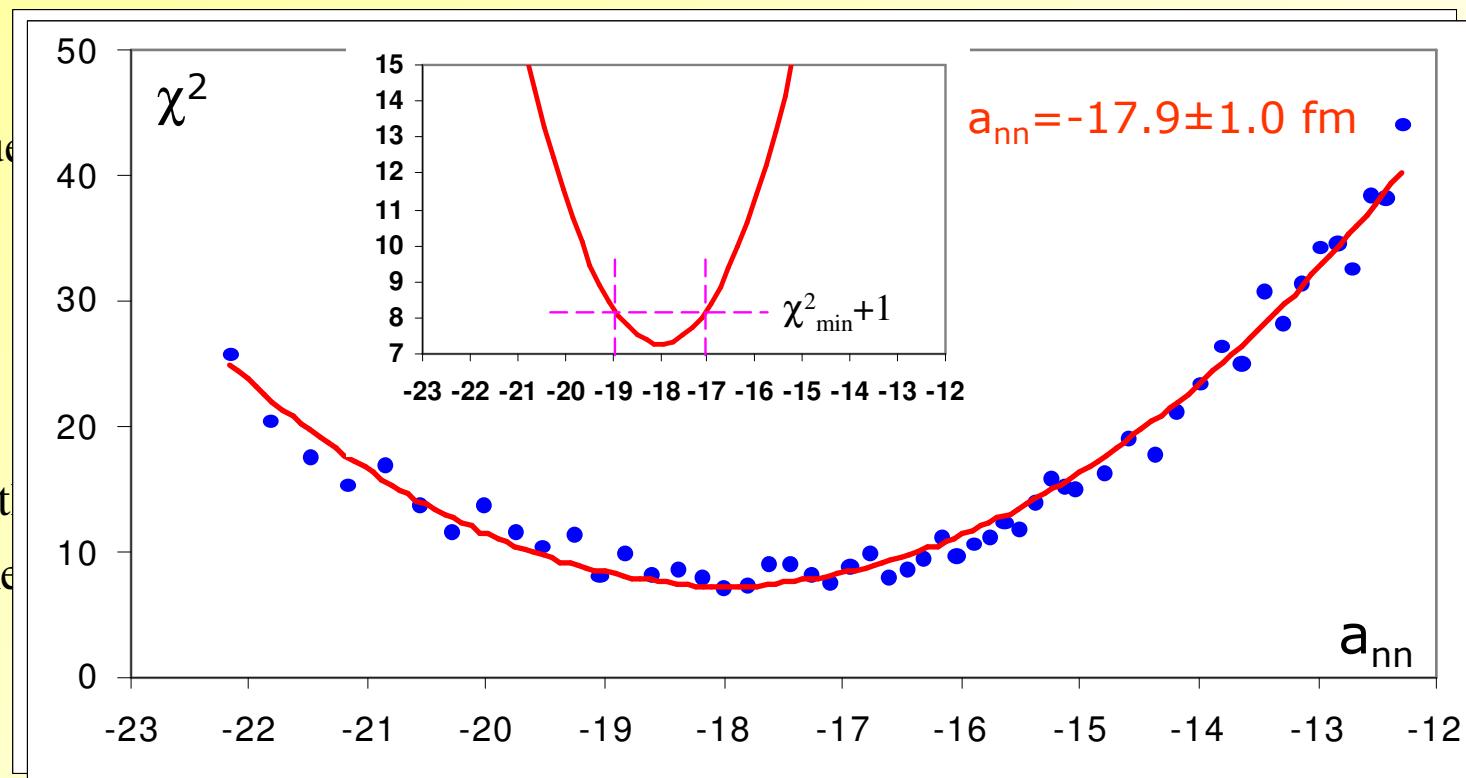
The best fit is obtained for $a_{nn} = -17.9 \pm 1.0$ fm.

Determination of a_{nn} from χ^2 versus a_{nn} curve

$\Delta\Theta = 6^\circ$; $E_0 = 40 \pm 5$ MeV

χ^2 value

where A is the
experimental

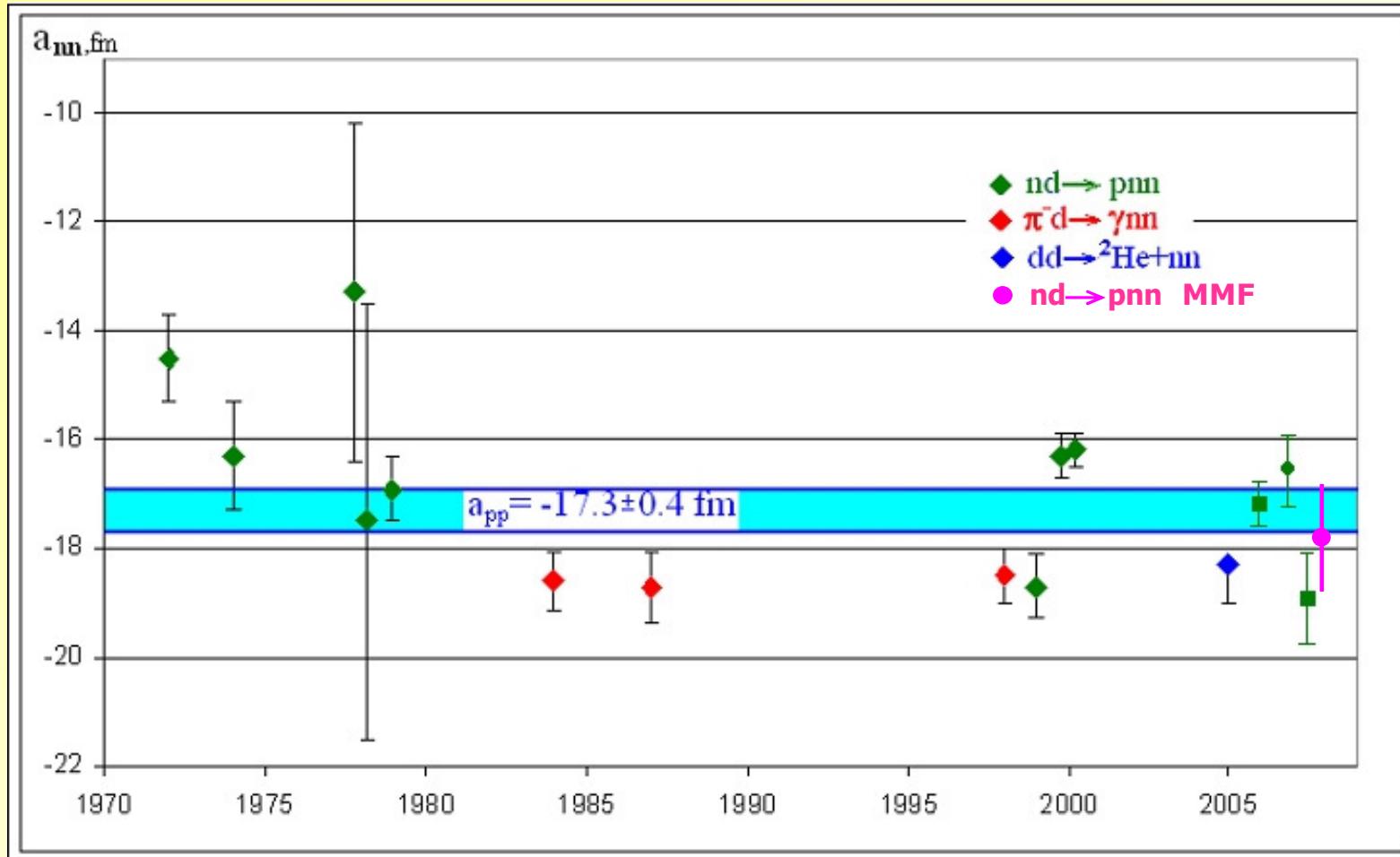


The values of $\chi^2(a_{nn})$ are approximated by a quadratic polynomial.

The minimum of the curve determines the scattering length a_{nn}

Statistical uncertainty Δa_{nn} is given as $\Delta a_{nn} = |a_{nn}(\chi^2_{\min}) - a_{nn}(\chi^2_{\min} + 1)|$

Preliminary Data @ $E_n=40$ MeV and $\Delta\Theta=6^\circ$:

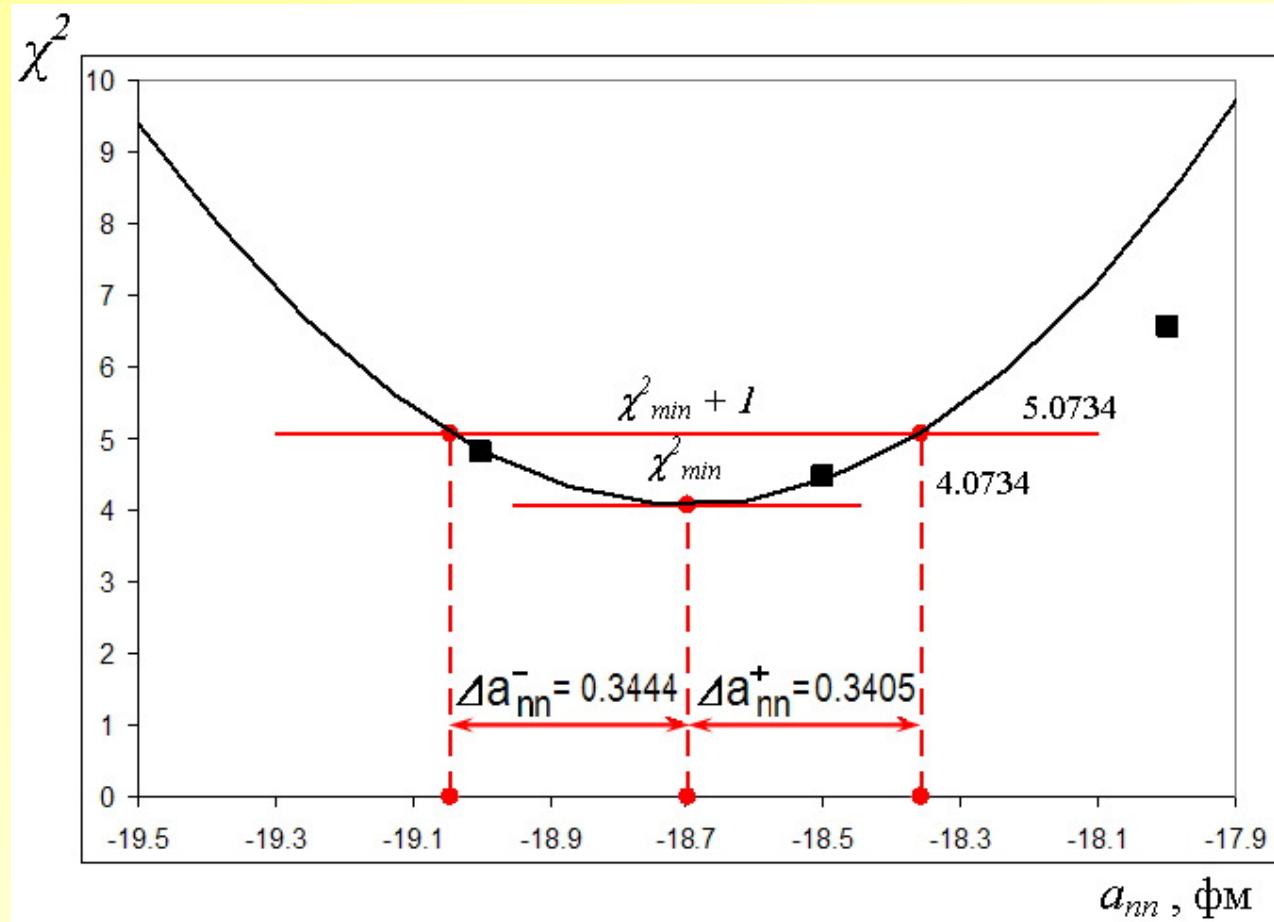
$$a_{nn} = -18.0 \pm 1.0 \text{ fm}$$


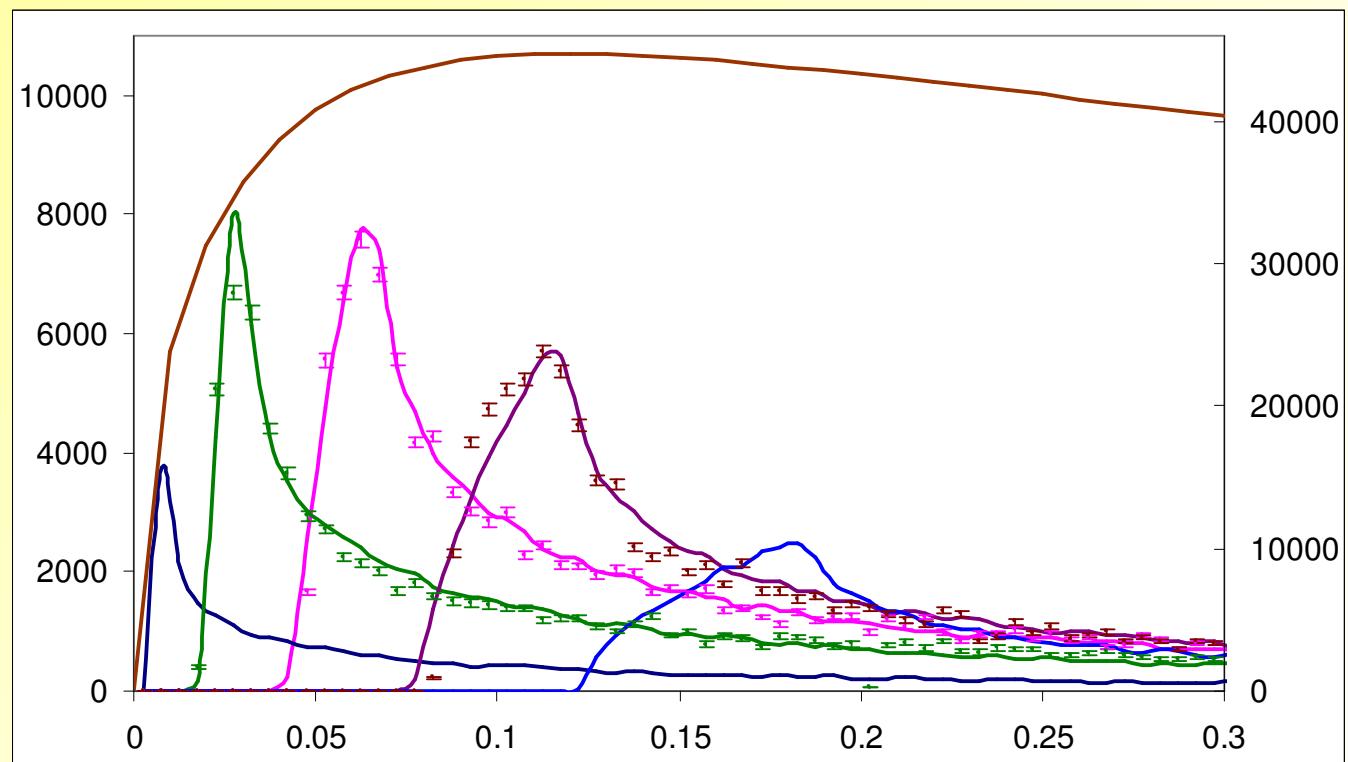
Conclusions

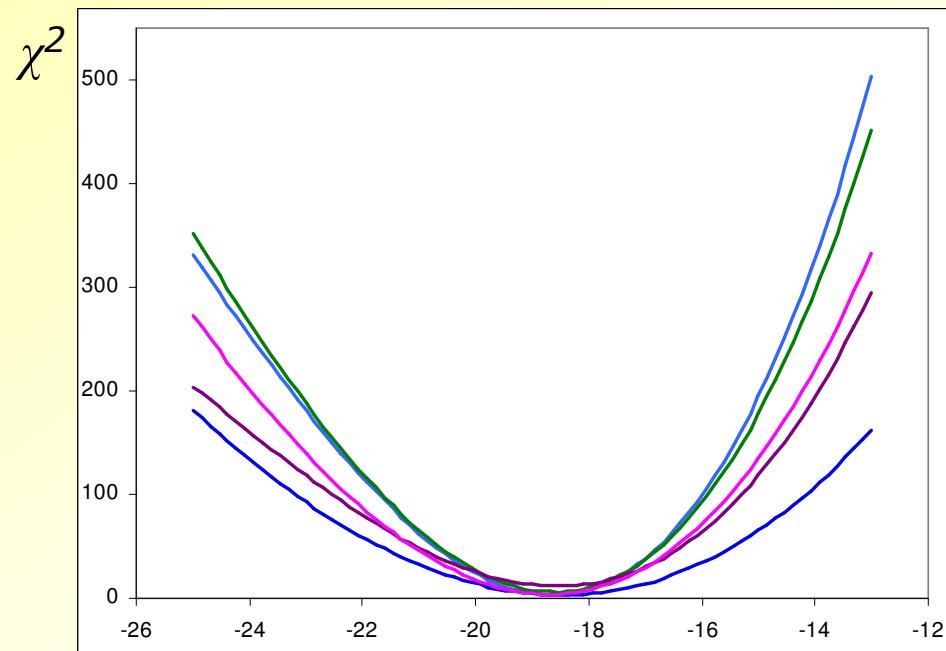
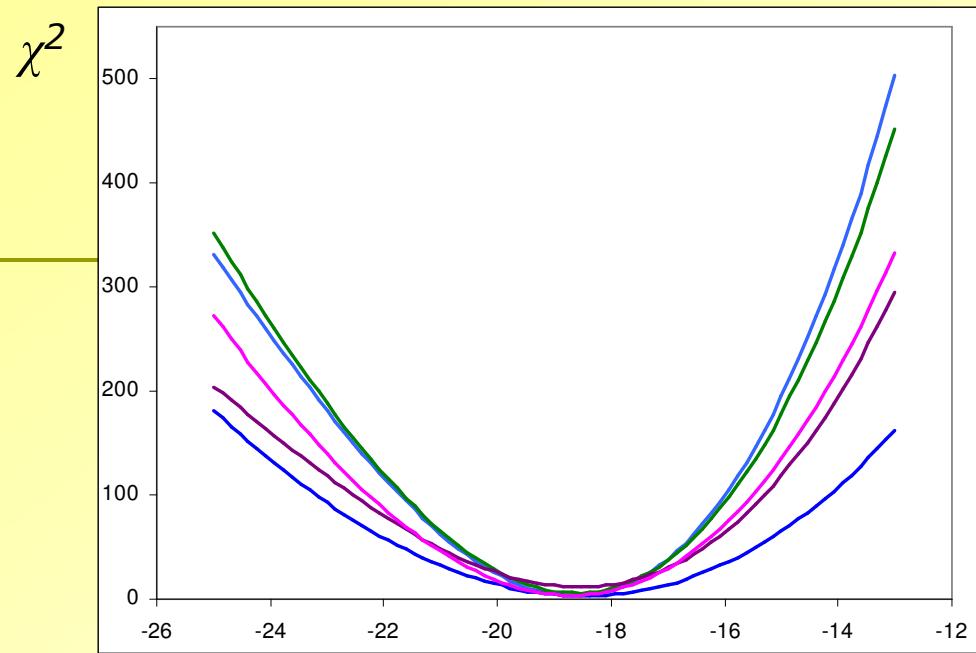
- The neutron-neutron 1S_0 scattering length a_{nn} has been determined from a kinematically complete nd breakup experiment at $E_n = 40\text{-}60$ MeV and four opening angles of the nn pair between 4° and 10° .
- We performed the shape analysis of the FSI dependence of reaction yield on relative energy of nn pair.
- The value of $a_{nn} = -17.9 \pm 1.0$ fm was obtained at energy of incident neutrons of 40 ± 5 MeV and opening angle of 6° .
- Data obtained for other opening angles: $\Delta\Theta = 4^\circ, 8^\circ$ and 10° have poorer statistics and cannot be used at this stage to determine the nn -scattering length.
- To eliminate the discrepancy in the existing data on nn -scattering length greater statistics should be collected in our experiment.

Thank you!

Показана область от χ^2_{min} до $\chi^2_{min} + 1$ для нахождения a_{nn} и при анализе зависимости $\chi^2(a_{nn})$

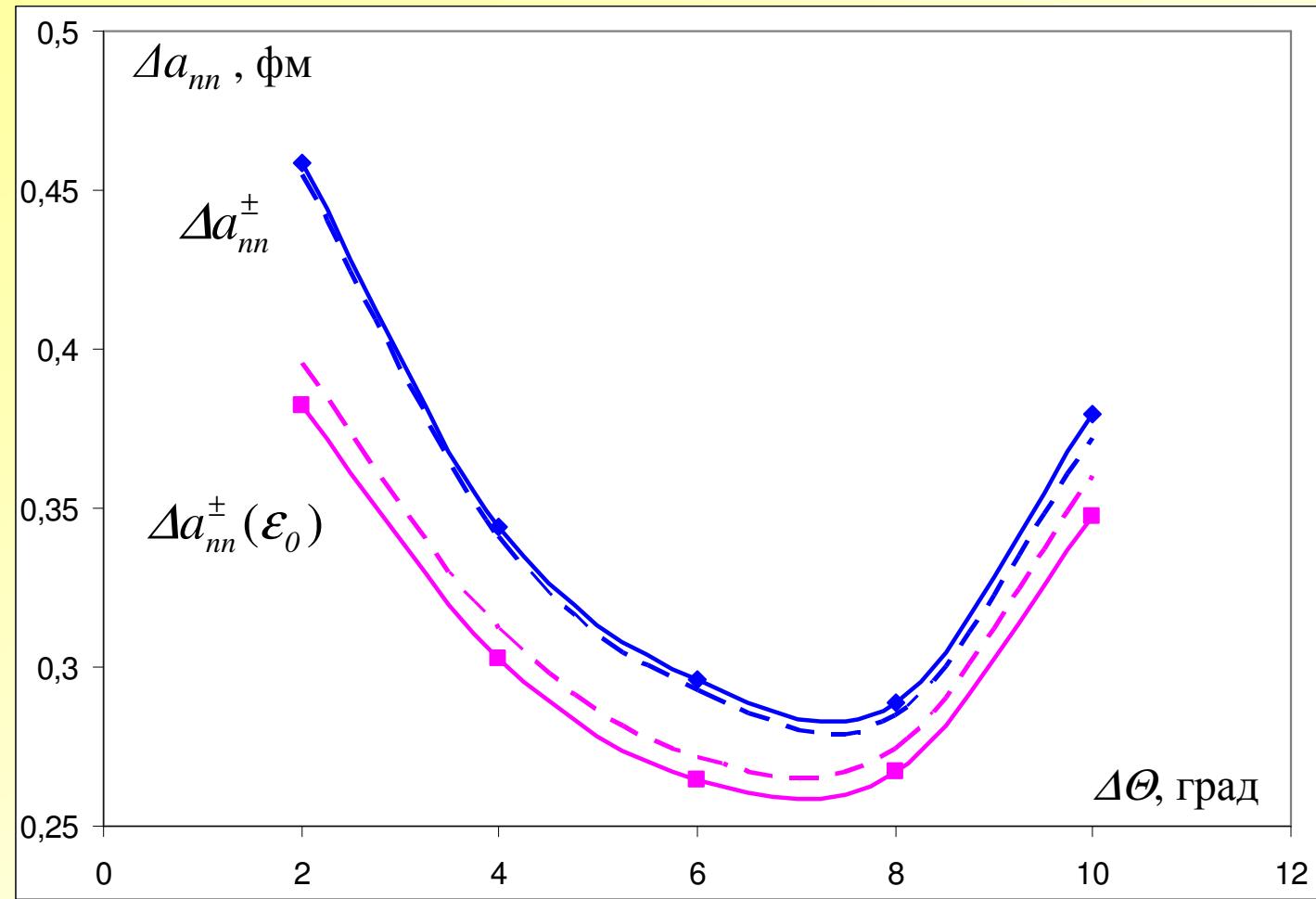




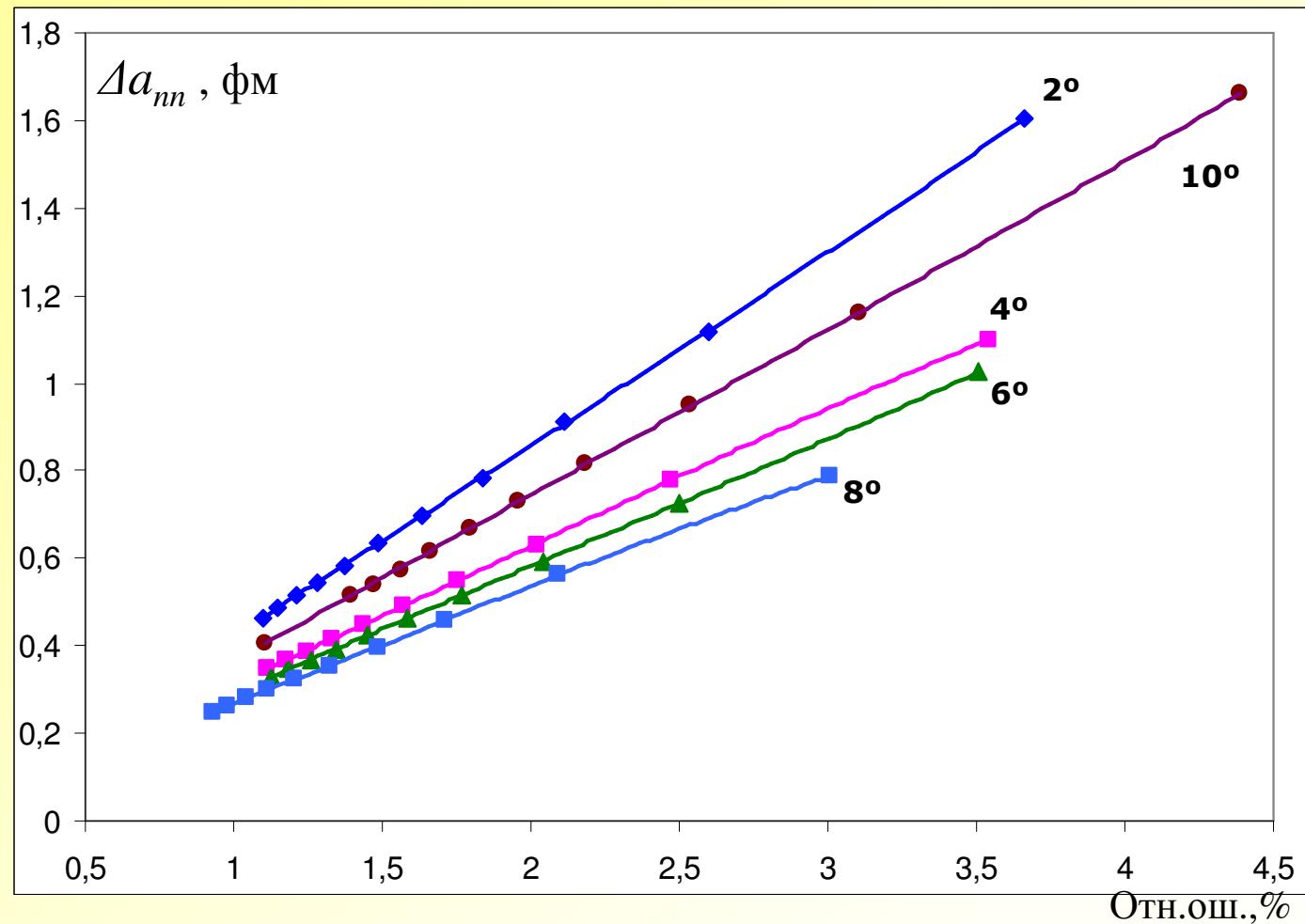


ε_0 , МэВ

Зависимость (сплошная линия) и (пунктирная линия) для (кружки) и (квадраты) от угла разлета нейтронов $\Delta\Theta$. При определении и использовалась аппроксимация зависимостей $\chi^2(\alpha_{nn})$ и $\chi^2(\varepsilon_0)$ многочленом третьей степени



Зависимость от относительной ошибки (в %) числа событий в максимуме пика взаимодействия в конечном состоянии зависимости выхода реакции nd -развала от \mathcal{E} для углов $\Delta\Theta = 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ и 10°



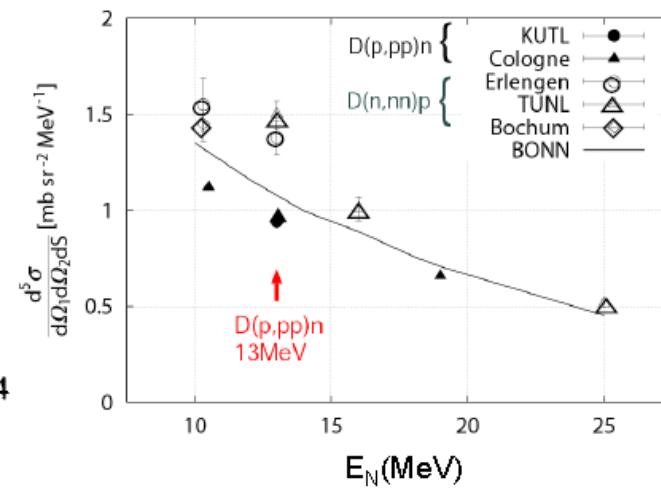
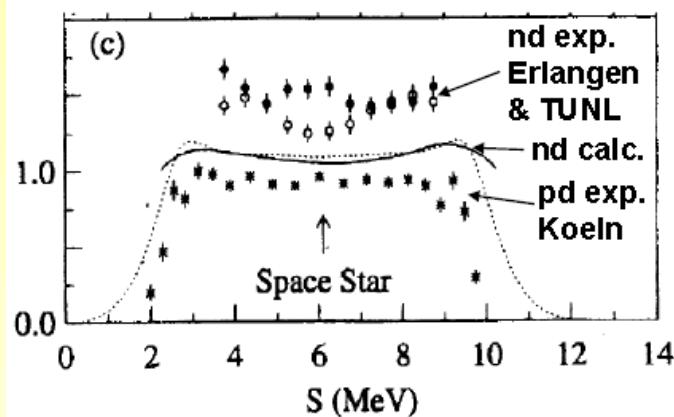
Изучение реакции nd -развала

- Источники нейтронов – РАДЭКС (30-70 МэВ) и СУИВ-430 (13-15 МэВ)
- Дейтериевые мишени
- Аппаратура для регистрации n и p - ДС
- Эксперимент – одновременное определение a_{nn} и a_{np}
- Изменение геометрии – КСР и SPACE-STAR
- Теоретический анализ

Space star anomaly (SS anomaly) is a curious phenomenon

SS anomaly was found at around $E_{beam}=13$ MeV.

- nd breakup cross section around SS are ~30% larger than calculation.
- pd breakup cross section around SS are ~10% smaller than calculation.
(Coulomb effects decreases cross section by only a few %.)
- SS anomaly is dominant at 13 MeV and vanishes at higher energy.



Проект направлен на решение одной из фундаментальных проблем всей ядерной физики: нахождение характерных параметров нейтрон-нейтронного взаимодействия и точного значения длины нейтрон-нейтронного рассеяния, а также на новую аккуратную оценку величины эффектов нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил (charge-symmetry breaking (CSB) effects).

В настоящем проекте предполагается проведение кинематически полного эксперимента по исследованию реакции $n+d \rightarrow p+n+n$ при энергии падающих нейтронов 13–60 МэВ.

При этом одновременно будет определяться как a_{nn} , так и a_{np} в двух методиках – взаимодействия в конечном состоянии (ВКС), и в RECOIL геометрии. Данные будут получены в широком интервале энергии первичных нейтронов и для различных углов вылета вторичных частиц.

При изменении углов регистрации вторичных частиц будут проведены эксперименты в геометриях SPACE-STAR, и квазисвободного рассеяния.

-
- Теоретическая часть работы будет включать полный трехчастичный анализ динамики реакции трехнуклонного развала на основе новой решеточной формы уравнений Фаддеева, развитой авторами проекта, а также новой модели трехнуклонного взаимодействия. В результате такого объединения двух основных теоретических компонент проекта авторы проекта получат в свое распоряжение единую компьютерную программу, позволяющую рассчитывать все основные процессы в трехнуклонной системе, включая упругое рассеяние (в том числе для спин-поляризованных частиц) и развал в различных кинематических комбинациях, в кинематике ВКС, в кинематике SPACE-STAR, и, наконец, в кинематике квазисвободного рассеяния, что необходимо для извлечения параметров нейtron-нейtronного взаимодействия из трехчастичных экспериментов.
 - Предлагаемый эксперимент позволит определить (при соответствующем теоретическом анализе) как длины pp и pr рассеяния (последняя используется для проверки правильности и точности экспериментальных данных), так и параметры амплитуды pp рассеяния при различных энергиях

If the mass of mesons exchanged between two nucleons exceeds 500 MeV (this relates to all mesons except pion) the respective characteristic scale for meson-exchange NN interaction is less than 0.5 fm, i.e. the meson exchange proceeds when two nucleons overlap deeply and thus the picture of two isolated nucleons which are exchanged with a such heavy meson gets fully meaningless. The picture becomes much closer to a unified $6q$ -bag surrounded with π -, σ -, ρ -, etc. mesonic fields. We developed the respective microscopic quark-meson model for such dressed six-quark bag as an intermediate in a short-range NN interaction (see Fig. 1)^{1,2}:

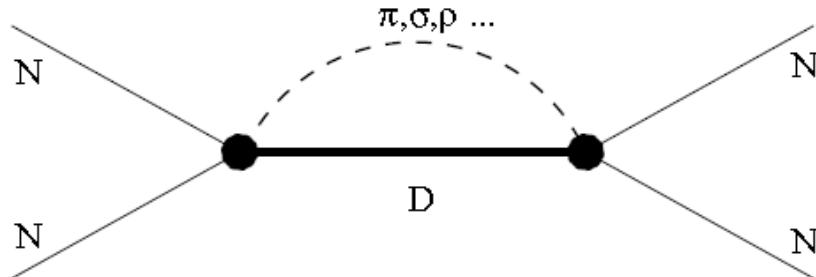
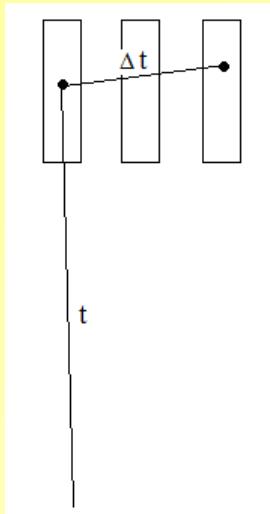


Fig. 1. s -channel mechanism for NN interaction with an intermediate dibaryon dressed with π -, σ -, ρ -, etc. mesonic fields.

This s -channel mechanism replaces the conventional t -channel (i.e. Yukawa-like) mesonic exchange at ranges $r_{NN} \lesssim 1$ fm. Using this mechanism as a guide we constructed² the respective potential model for NN interaction which easily fits (with a few free parameters only) the NN phase shifts at lower partial waves until 1 GeV and higher. This simple model predicts the deuteron properties even more accurately than the best modern phenomenological NN potentials like Argonne, Nijmegen etc. models.

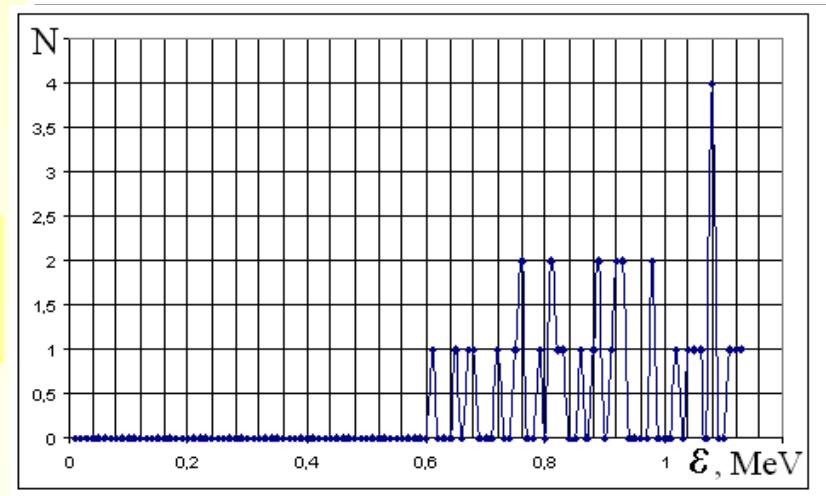
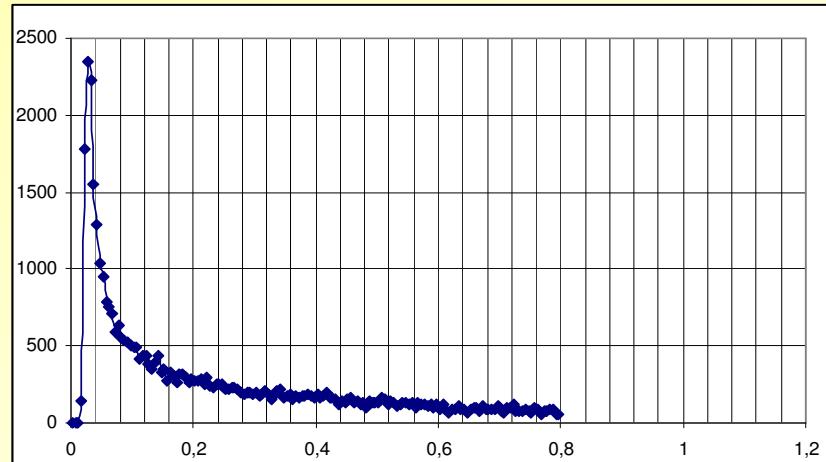
Cross talk problem

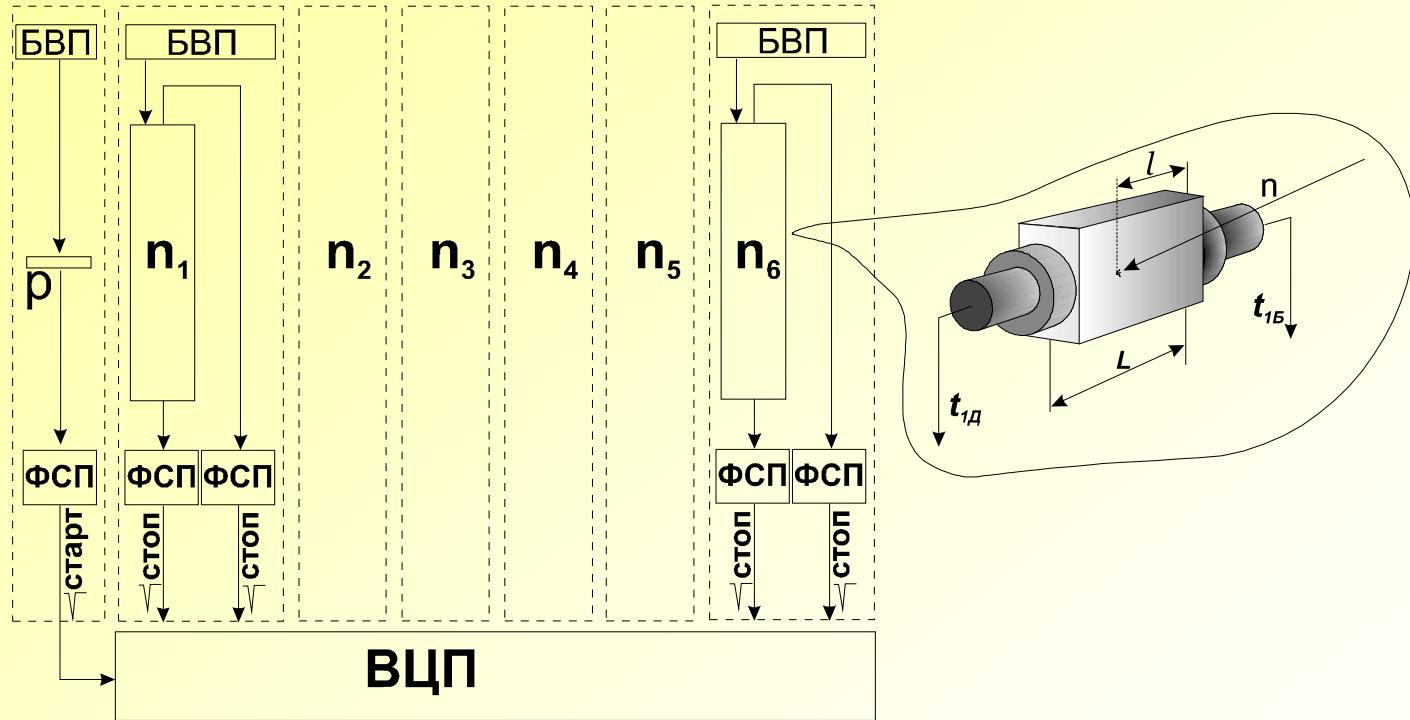


$$E_1 = f(t)$$
$$E_2 = f(t + \Delta t)$$
$$\Delta t \rightarrow \text{big } \varepsilon$$

$$\Delta\phi = 64^\circ$$

Cross talk events correspond to greater values of relative energy of two neutrons





Электроника

- Стартовый сигнал протонного детектора и стоповые сигналы нейтронных детекторов формируются во временных дискриминаторах (формирователях со следящим порогом) и подаются на соответствующие входы время-цифровых преобразователей.
- Два сигнала с каждого нейтронного детектора (t_d и t_b) позволяют определять как момент возникновения сигнала в детекторе , так и место взаимодействия нейтрона в детекторе.
- Программа сбора информации выполняет одновременное кодирование до 16-ти коррелированных сигналов (времен пролета), принадлежащих одному событию. Последовательные события записываются в файл, который накапливается в течение заданного времени или с заданным количеством событий. Передача данных через 32-х разрядные контроллер КАМАК и контроллер ветви в стандарте PCI осуществляется 32 разрядными словами.
- В дальнейшем из общего массива событий в режиме off-line отбираются события, для которых зарегистрированы сигналы с двух концов двух детекторов (четыре сигнала).
- Затем, используя информацию о временах пролета и пролетном расстоянии (скорректированных на время и место возникновения световой вспышки в детекторах) вычисляются энергии двух нейтронов, а по номерам сработавших детекторов определяется угол разлета нейтронов.

The Problem of CSB

The problem of precise determination of neutron - neutron scattering length remains actual despite the large number of experiments performed. The importance of this quantity is connected with the problem of charge symmetry (CS).

In QCD charge symmetry is a symmetry of the Lagrangian under the exchange of the up and down quarks. At the hadronic level this symmetry translates into invariance of the strong nuclear force under the exchange of protons and neutrons.

CS is broken by the different masses of up and down quarks and thus the strong interaction manifests charge symmetry breaking (CSB)

One of the most fundamental evidence for CSB in nuclear physics is the difference between the neutron-neutron a_{nn} and proton-proton a_{pp} scatterings lengths. But as the CSB is a small effect this difference is small and precise data on scattering lengths are needed.