

**Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН
посвященная 70-летию В. А. Рубакова**

17-21 февраля 2025 г.

**Измерение времениподобного электромагнитного
формфактора нейтрона на e⁺e⁻ коллайдере
ВЭПП-2000 с детектором СНД**

С.И. Середняков, В.П. Дружинин
Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера
Новосибирский государственный университет



N* Novosibirsk
State
University
***THE REAL SCIENCE**

Session-conference of the nuclear physics section of the
Physical Sciences Department of the Russian Academy of
Sciences dedicated to the 70th anniversary of V. A. Rubakov

February 17-21 (2025)

Measurement of the neutron electromagnetic timelike
form factor at the VEPP-2000 $e+e^-$ collider
with the SND detector

On the behalf of the SND Collaboration

S.I. Serednyakov, V.P. Druzhinin

Budker Institute of Nuclear Physics

Novosibirsk State University



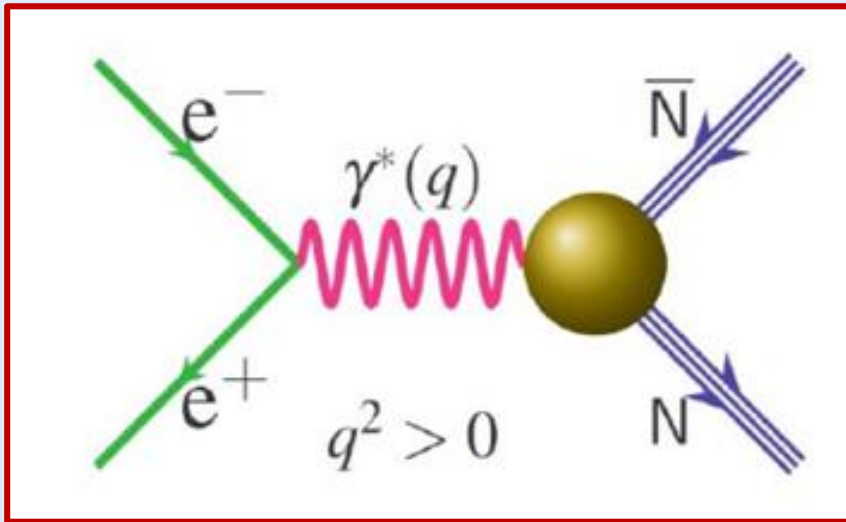
N* Novosibirsk
State
University
*THE REAL SCIENCE

Измерение времениподобного электромагнитного формфактора нейтрона на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 с детектором СНД

План доклада

1. Введение
2. Эксперимент
3. Отбор $n+\text{anti-n}$ событий
4. Определение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow n+\text{anti-n}$
5. Эффективный времениподобный формфактор нейтрона
6. Отношение $|GE/GM|$

$e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$ annihilation



B – baryon = p, n ;
 $m = 2E_b$ – cms energy ;
 β – nucleon velocity,
 θ – polar angle ;
 m_b – nucleon mass ;
 G_E, G_M - form factors

$J^{PC} = 1^{--}$, $J = L+S$,
 $P = (-1)^{L+1} = -1$, $L=0,2$

,
 $C = (-1)^{L+S} = -1$, $S=1$,

S, D – waves,

two form factors

e.g. G_E, G_M

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{\alpha^2 \beta C^2}{4m^2} \left(|G_M|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m_B^2}{m^2} |G_E|^2 (1 - \cos^2 \theta) \right)$$

$e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$ cross section

Differential cross section:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{\alpha^2 \beta C^2}{4m^2} \left(|G_M|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m_B^2}{m^2} |G_E|^2 (1 - \cos^2 \theta) \right)$$

Total cross section:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{4\pi \alpha^2 \beta C}{3m^2} \left(|G_M|^2 + \frac{2m_B^2}{m^2} |G_E|^2 \right)$$

Effective form factor

$$|F|^2 = \frac{|G_M|^2 + |G_E|^2 / 2\tau}{1 + 1/2\tau}, \quad \tau = \frac{m^2}{4m_B^2}$$

Two measurable values:

1 - effective FF,

2 - G_E/G_M

$C=1$ for neutrons

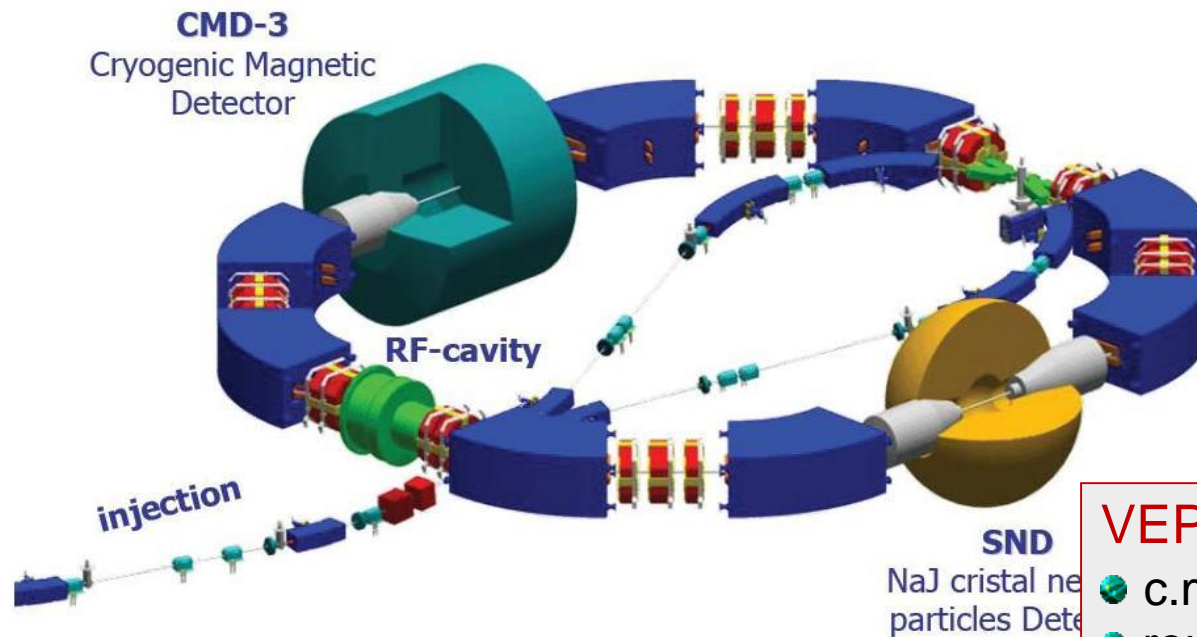
At threshold : $s=4m_B^2 \rightarrow |G_E| = |G_M| = |F|$

$F_n = -F_p / 2$

Asymptotic prediction: $F(+\infty) = -F(-\infty) \sim 1/s^2$

Коллайдер ВЭПП-2000

VEPP-2000 e^+e^- collider (2 x 1000 MeV)



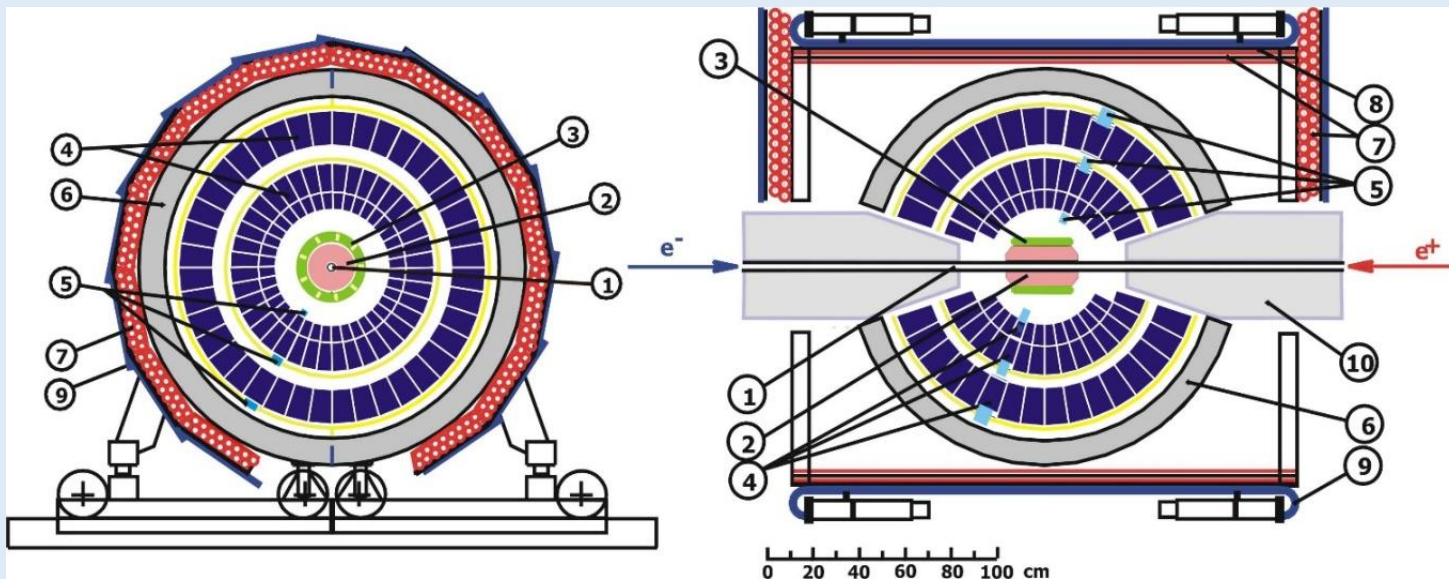
VEPP-2000 parameters:

- c.m. energy $E=0.3-2.0$ GeV
- round beam optics
- Luminosity at $E=1.8$ GeV
 $1 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (project),
 $7 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (achieved)

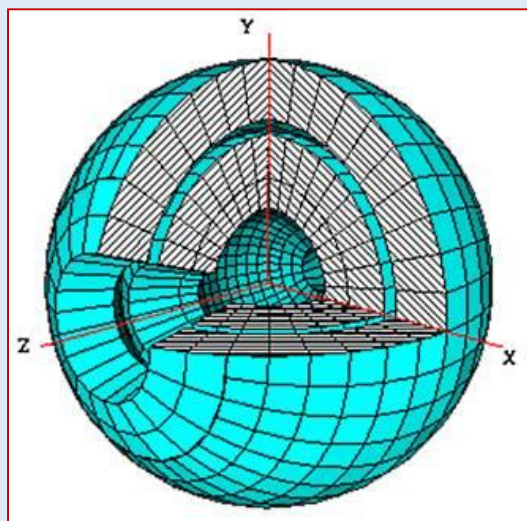
В работе – с 2010 года



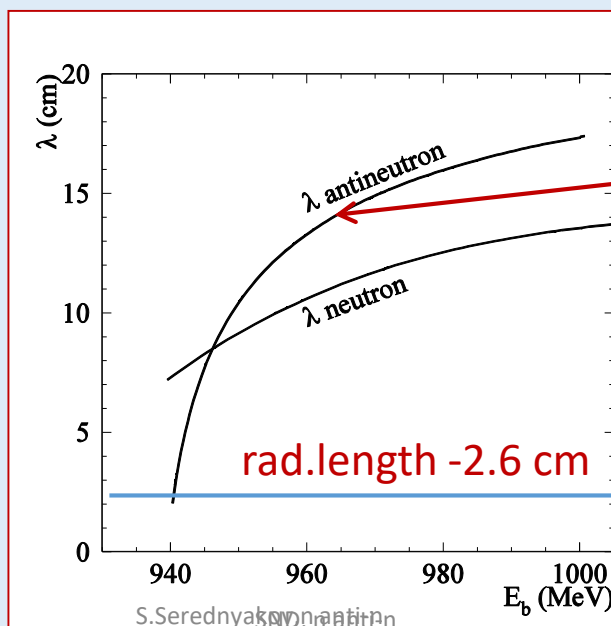
SND detector (since 1995)



- 1 – vacuum chamber,
- 2 – tracking DC,
- 3 – aerogel $n=1.13, 1.05$
- 4 – NaI(Tl) crystals,
- 5 – phototriodes,
- 6 – absorber,
- 7–9 – muon detector,
- 10 – SC solenoids



Solid angle - 95% 4π



Attenuation length

SND – good antineutron detector

Измерение времениподобного электромагнитного формфактора нейтрона на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 с детектором СНД

Экспериментальные данные в данной работе

1. Область энергии $E_b=939.6(\text{Мн})—954 \text{ МэВ}$
2. 13 точек по энергии
3. Интегральная светимость – 90 pb^{-1}
4. Число $n\bar{n}$ событий - 8000

Публикация:

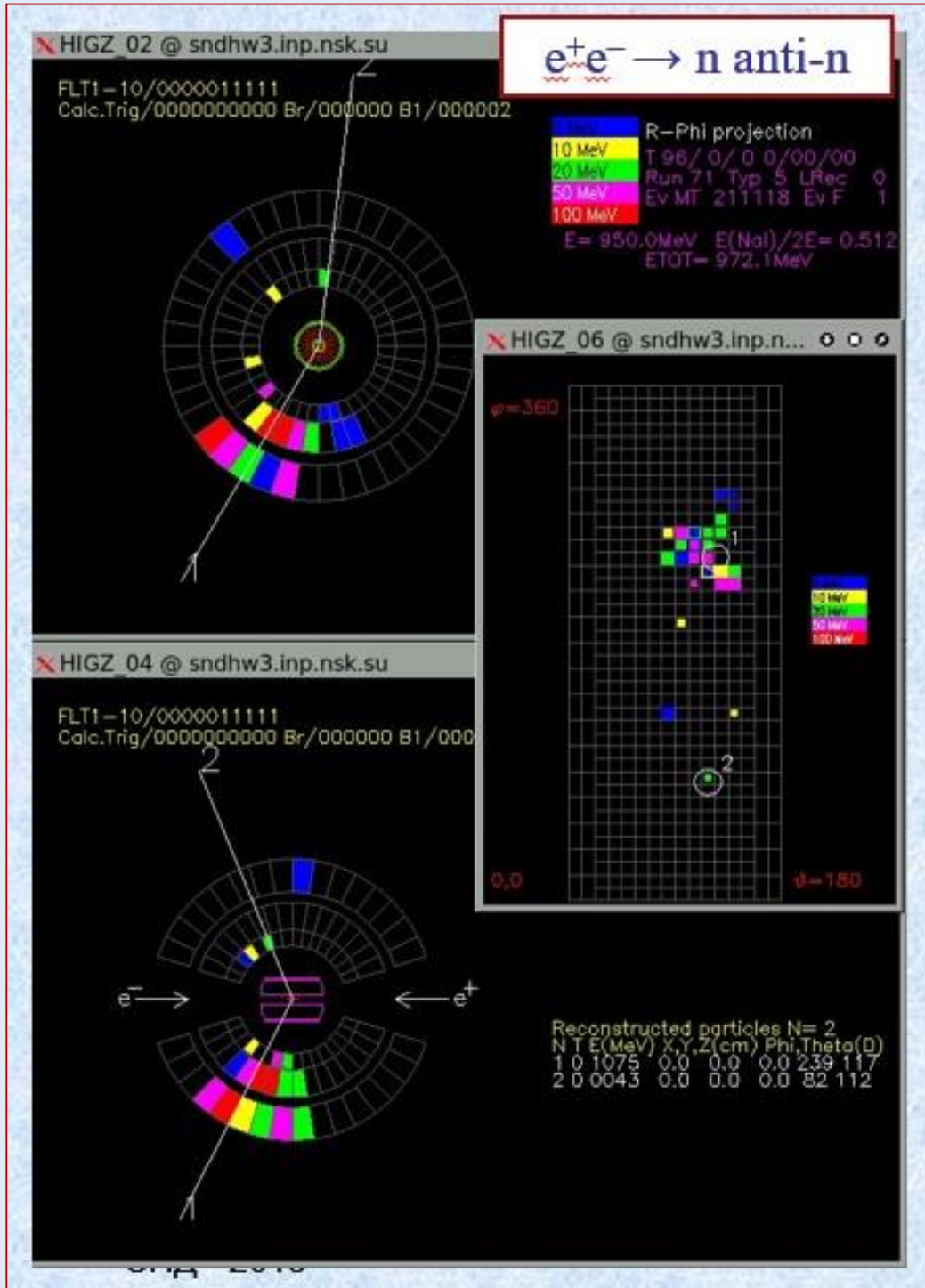
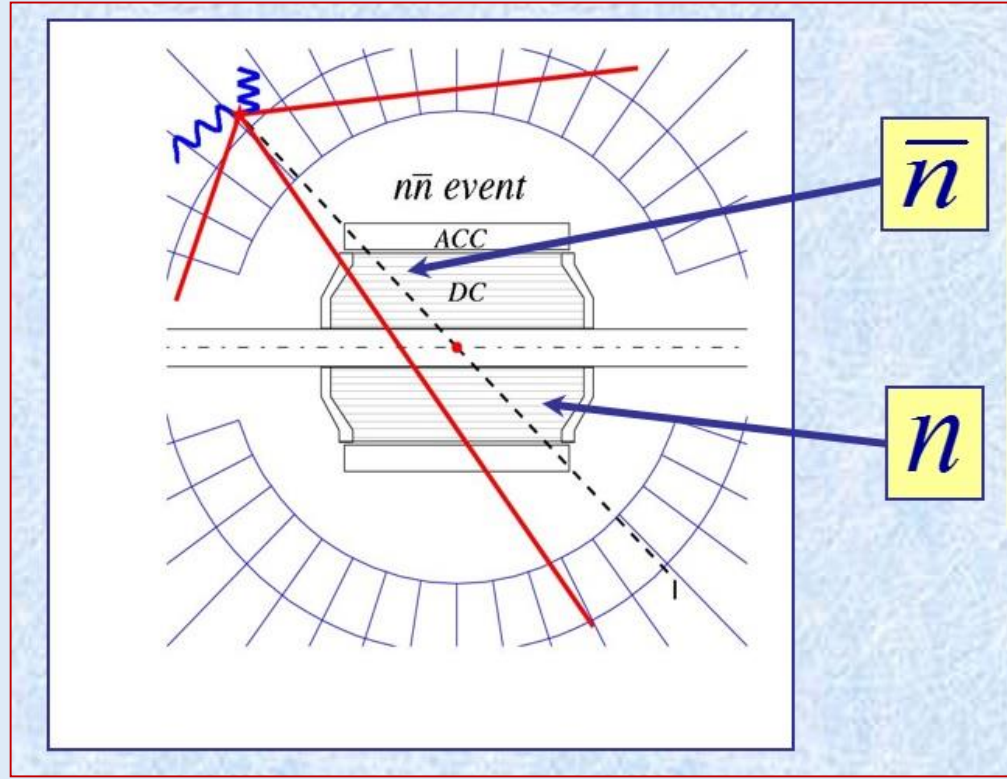
Ядерная физика, 2024, т.87, N5, с.400-413

Грант РФФ : No. 23-22-00011

$e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-}n$ data :

FENICE(1998), SND(2014), BESIII(2021), SND(2022)

Typical view
nn - events



Выделение n anti-n событий

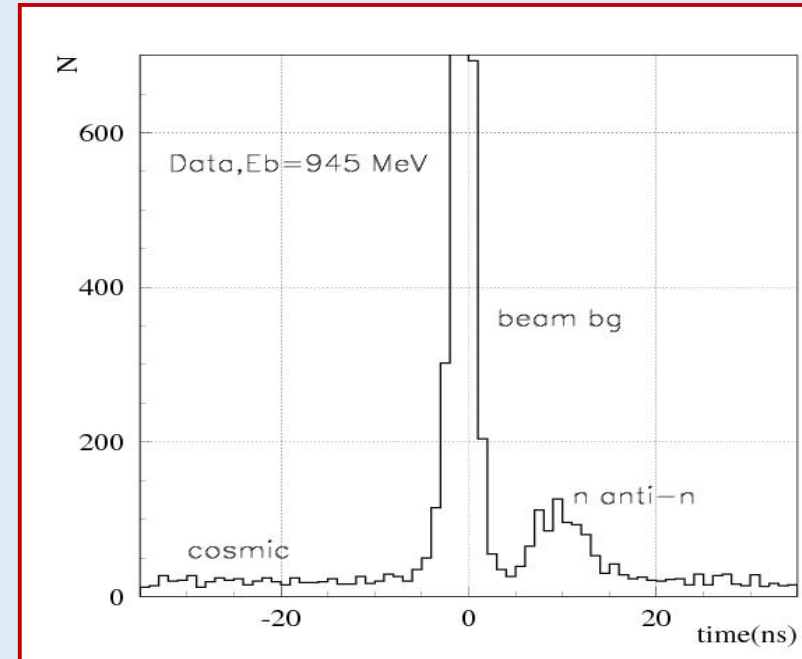
Условия отбора

(No tracks*, no photons*, no kinematic χ^2)

- 1 - veto μ system
- 2 - no cosmic track in EMC, incl. cosm. showers
- 3 - no charged tracks
- 4 - event momentum : $P > 0.2 E_{beam}$
- 5 - EMC energy : $E_{tot} > E_{beam}$
- 6 - photon χ^2 : > -2.5

Эффективность регтстрации : $\epsilon_{MC} \sim 20\%$

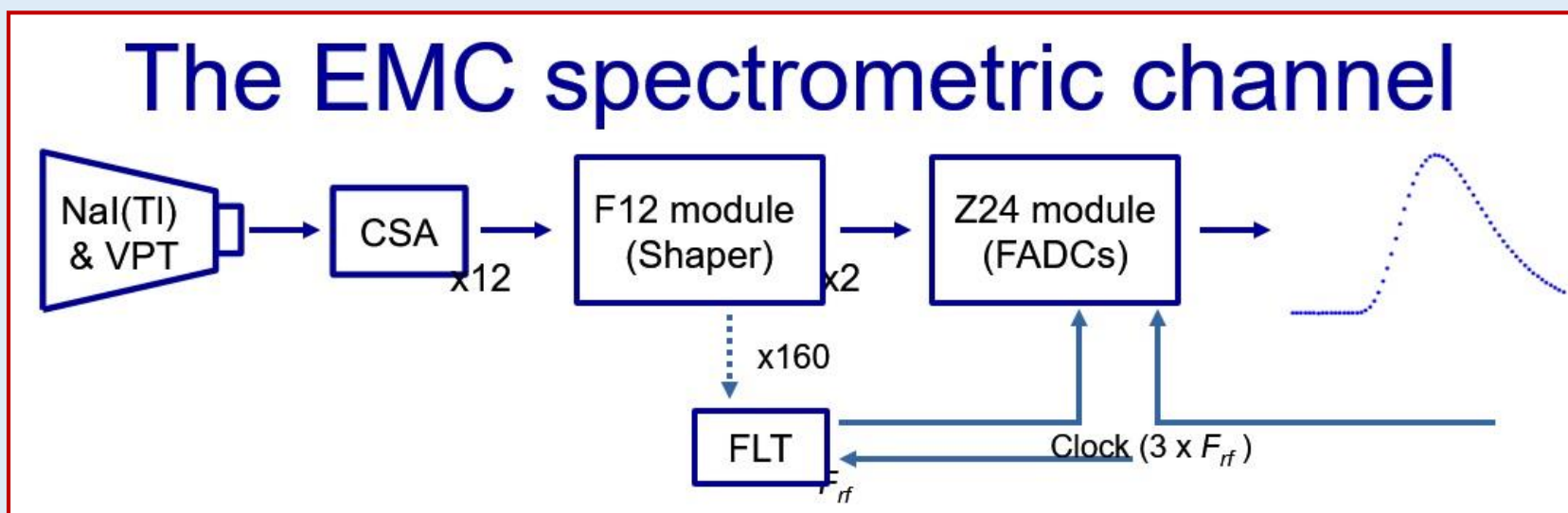
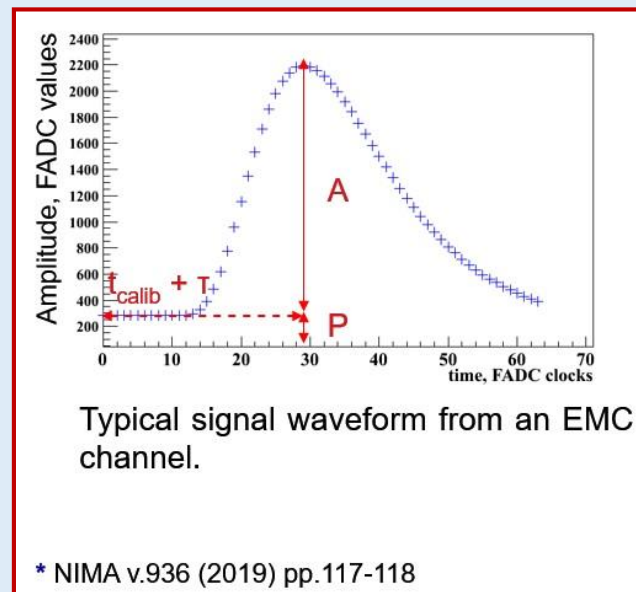
Временной спектр



Источники фона:

- 1 – **косм. фон** – плоский по времени,
- 2 -- **пучковый фон** - пик при $t=0$;
- 3 -- **физический фон** - $e+e- \rightarrow n\gamma(QED), \pi^0, \eta^0, \dots$

Spectrometric channel in 2019 run.
The measured parameters are pulse time and pulse height.



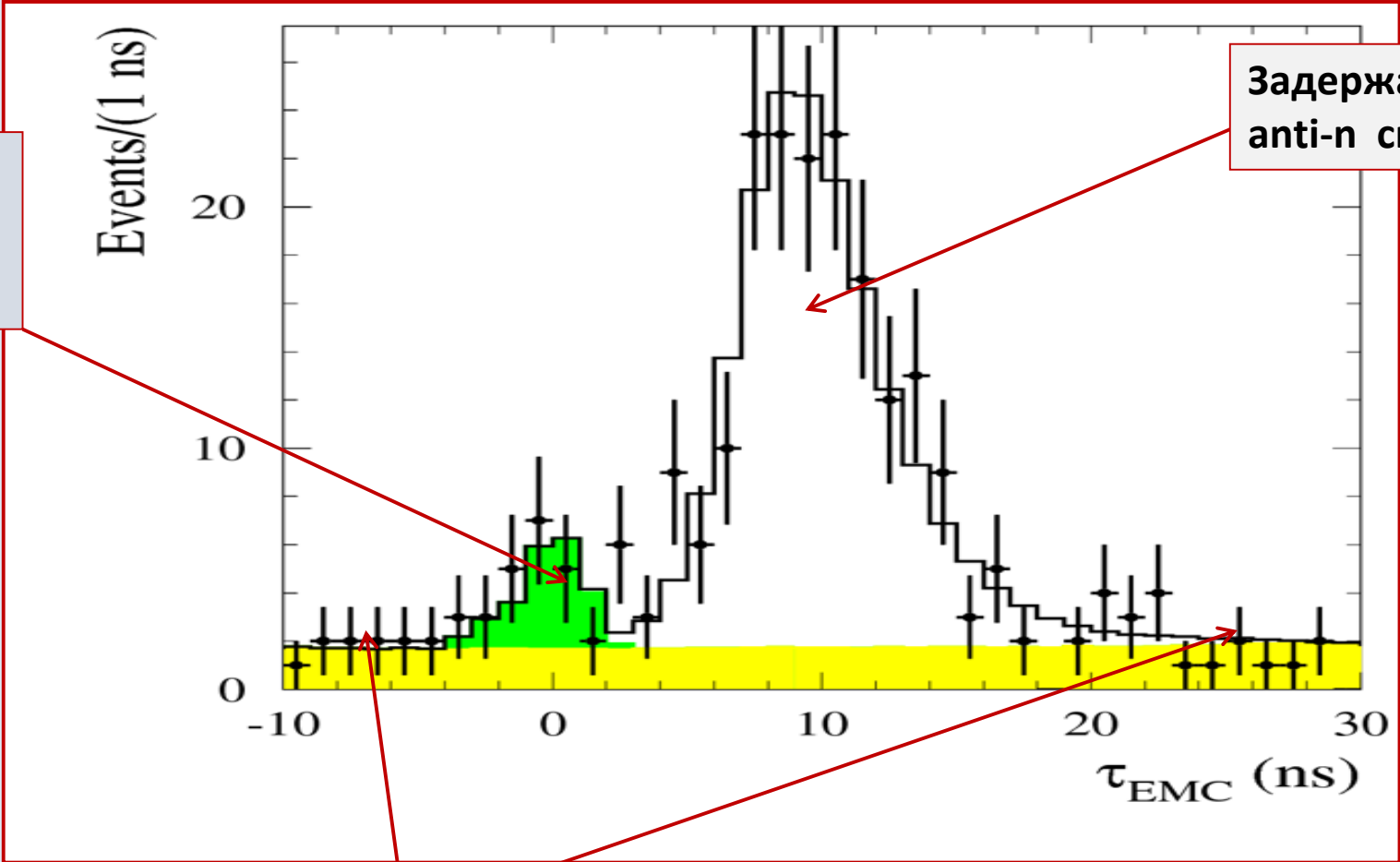
N.A. Melnikova

Временные спектры

Фит временного спектра :

$$N(t) = N_{\text{csm}} * H(t)_{\text{csm}} + N_{\text{bg}} * H(t)_{\text{bg}} + N_{\text{nn}} * H(t)_{\text{nn}}$$

$t=0$,
пучковый
и физич. фон

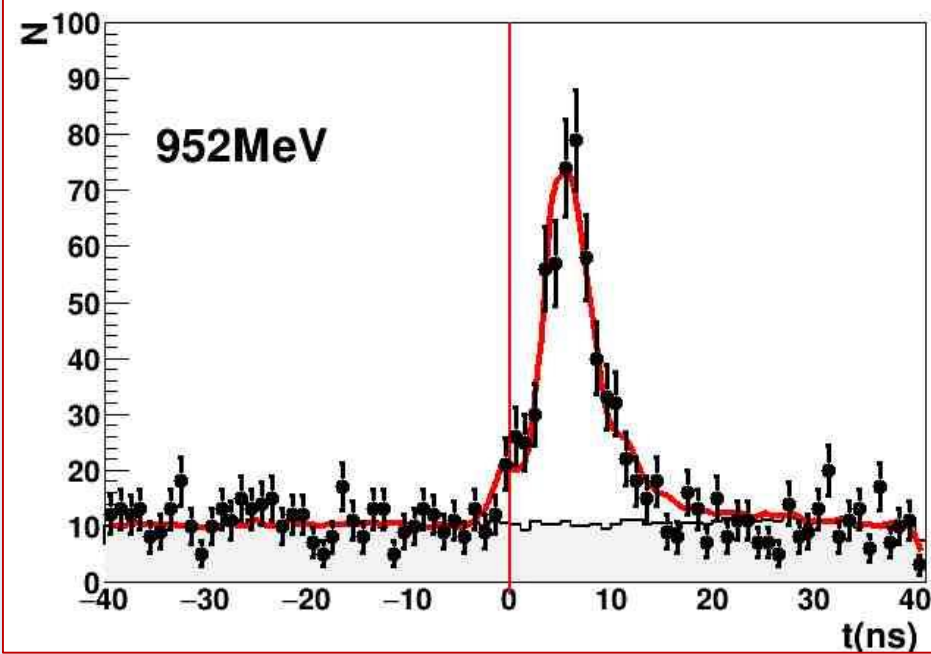
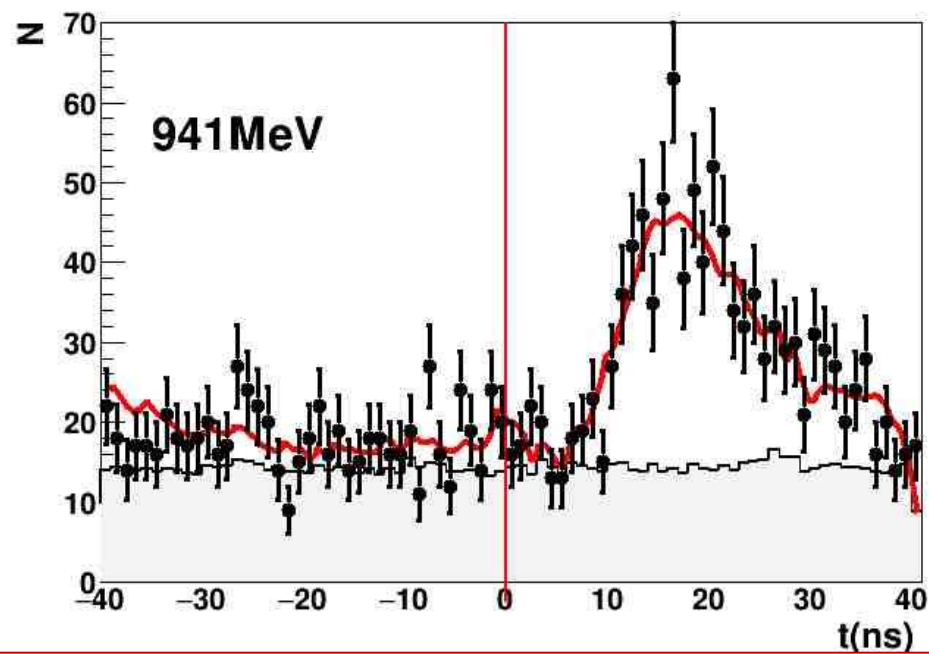


Задержанный
anti-n сигнал

Космический фон

Временные спектры МНAD2022, станд.отбор

n+anti-n



Моделирование МС, $e^+e^- \rightarrow n+\text{anti}n$.

Для моделирования прохождения частиц через детектор СНД используется пакет моделирования **GEANT-4, V.10.5**

+

В генератор процесса $e^+e^- \rightarrow n+\text{anti}n$ добавлено излучение фотонов начальными e^+ и e^-

+

Учитывается разброс энергии частиц в коллайдере $\sigma E \sim 0.7 \text{ MeV}$

+

Учитываются неработающие каналы в детекторе

+

Учитываются наложения событий пучкового фона на искомые события

+

Рассчитываются и добавляются поправки на отличие данных и МС

Эффективность регистрации МС $\sim 20\%$

Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$ вблизи порога

Вычисление сечения

$$\sigma_B = N_{nn} / \varepsilon (1+\delta) L$$

Example :

N_{nn} – detected events number, ~ 300 ,
 L - integrated luminosity, $\sim 5 \text{ pb}^{-1}$,
 ε - MC detection efficiency, ~ 0.2 ,
 $1+\delta$ - radiative correction, ~ 0.8 ,
 σ_B - total cross section $\sim 0.4\text{-}0.6 \text{ nb}$,
 σ_{vis} - visible cross section,
 $\text{err}(\text{stat}) \sim 5\%$,
 $\text{err}(\text{syst}) \sim 10\%$,
 both errs are shown.

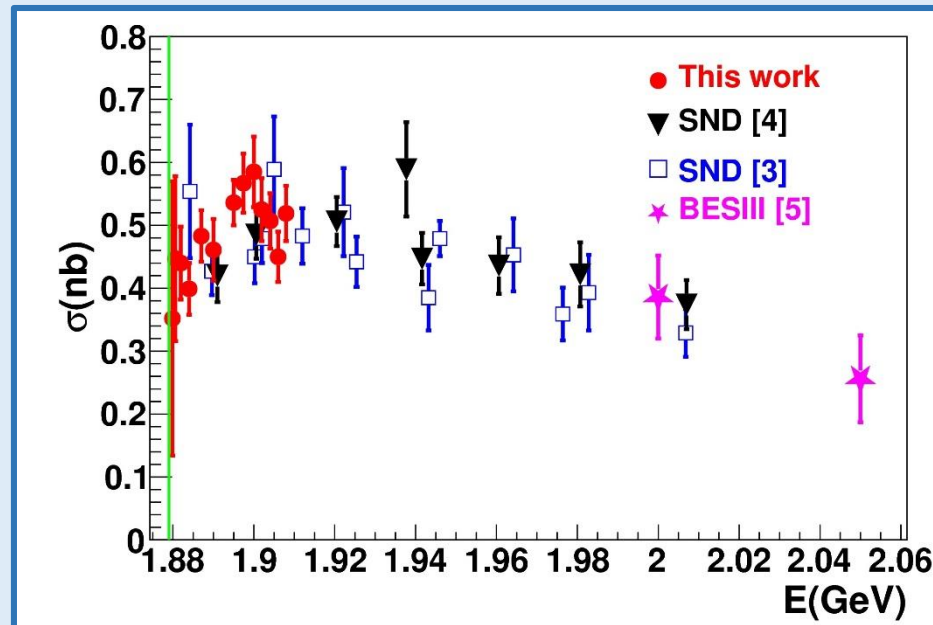
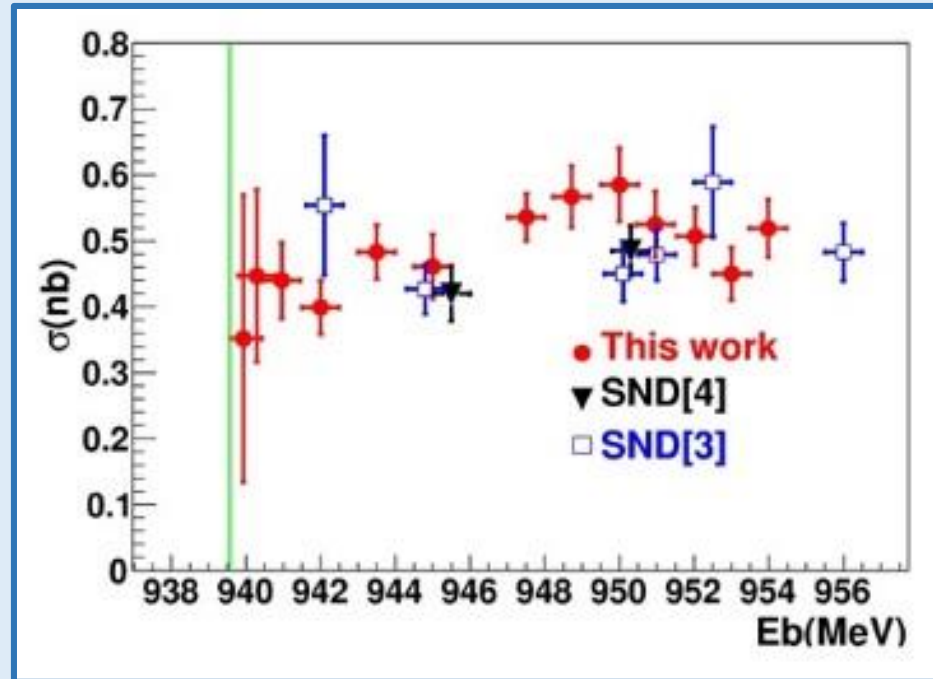
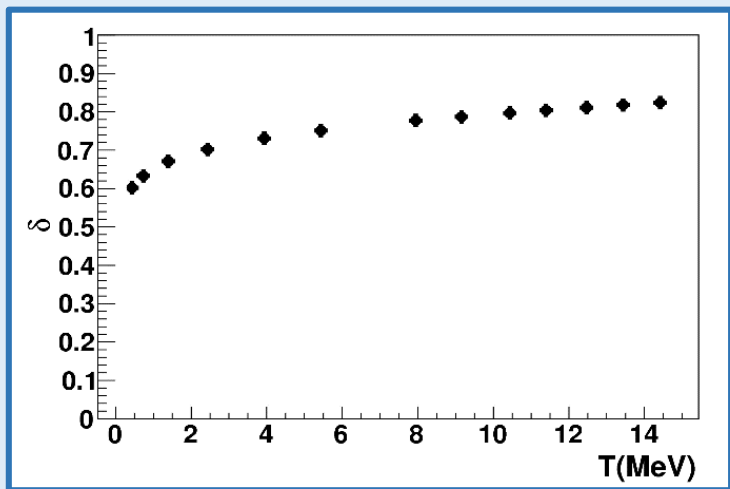


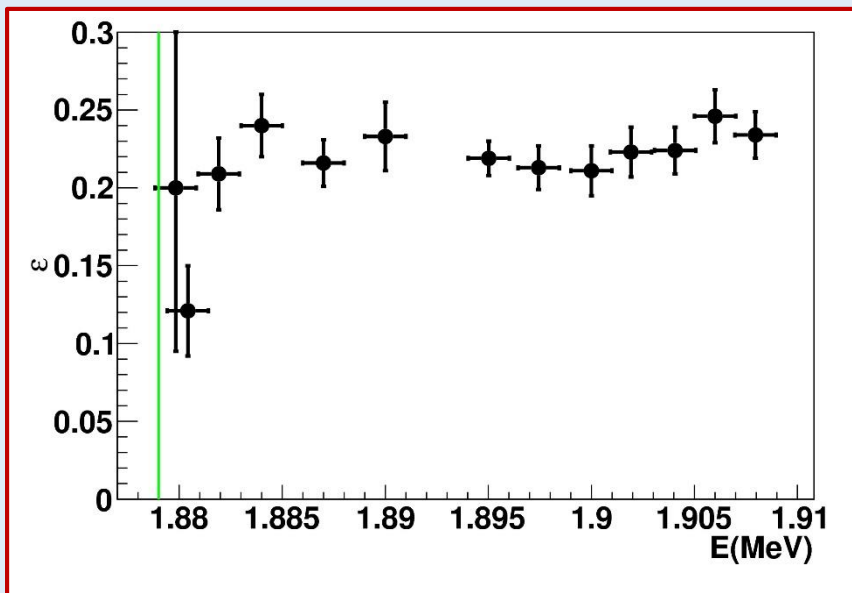
Таблица результатов

TABLE I: The beam energy (E_b), integrated luminosity (L), number of selected nn events (N_{nn}), the factor taking into account radiative corrections and energy spread ($1 + \delta$), corrected detection efficiency (ε), measured $e^+e^- \rightarrow nn$ cross section, and neutron effective form factor (F_n). The quoted errors for N , are statistical and systematic. For the detection efficiency, the systematic uncertainty is quoted. For F_n , the combined statistical and systematic uncertainty is listed.

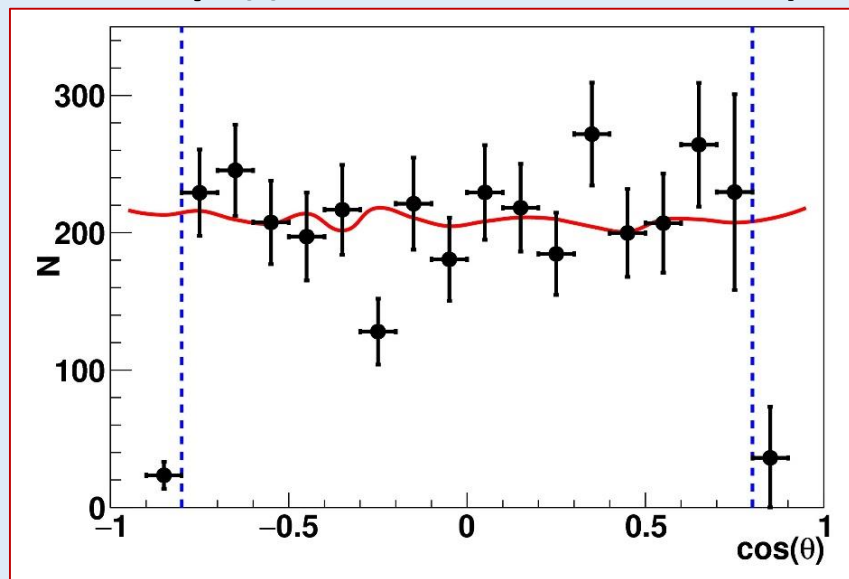
N	E_b	$L(\text{pb})$	N_{nn}	$1 + \delta$	ε	$\sigma(\text{nb})$	F_n
1	939.6	11.41	266+-75	0.651	0:210+-0:117	0:340+-0:048+-0:094	0:583+-0:182
2	940.2	10.34	316+-55	0.671	0:123+-0:034	0:370+-0:064+-0:102	0:522+-0:085
3	941.0	9.70	598+-41	0.693	0:202+-0:022	0:439+-0:031+-0:048	0:469+-0:032
4	942.0	10.12	680+-37	0.721	0:226+-0:019	0:412+-0:023+-0:034	0:396+-0:021
5	943.5	9.81	746+-36	0.741	0:208+-0:014	0:492+-0:024+-0:033	0:380+-0:017
6	945.0	11.45	920+-38	0.762	0:227+-0:021	0:460+-0:020+-0:044	0:347+-0:019
7	947.5	10.41	946+-37	0.781	0:211+-0:011	0:553+-0:022+-0:028	0:345+-0:012
8	948.8	6.42	611+-30	0.788	0:208+-0:013	0:579+-0:029+-0:037	0:342+-0:015
9	950.	5.20	513+-29	0.794	0:204+-0:015	0:611+-0:035+-0:046	0:340+-0:017
10	951.	5.55	522+-29	0.798	0:223+-0:016	0:528+-0:024+-0:039	0:310+-0:014
12	953.	5.68	514+-28	0.806	0:242+-0:017	0:464+-0:025+-0:032	0:280+-0:013
13	954.	5.17	517+-27	0.809	0:222+-0:014	0:557+-0:029+-0:036	0:302+-0:013

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2024, том 87, №5, с. 400–413

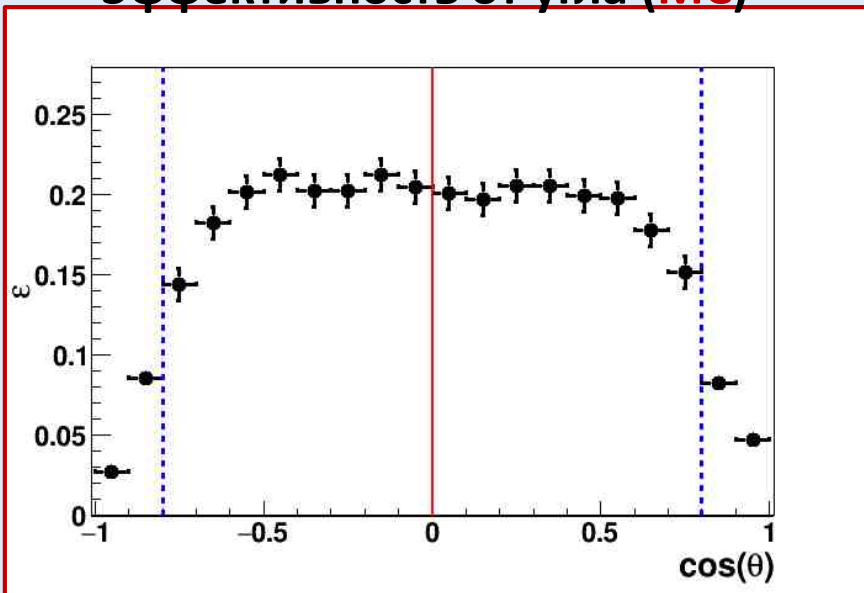
Эффективность от энергии (MC)



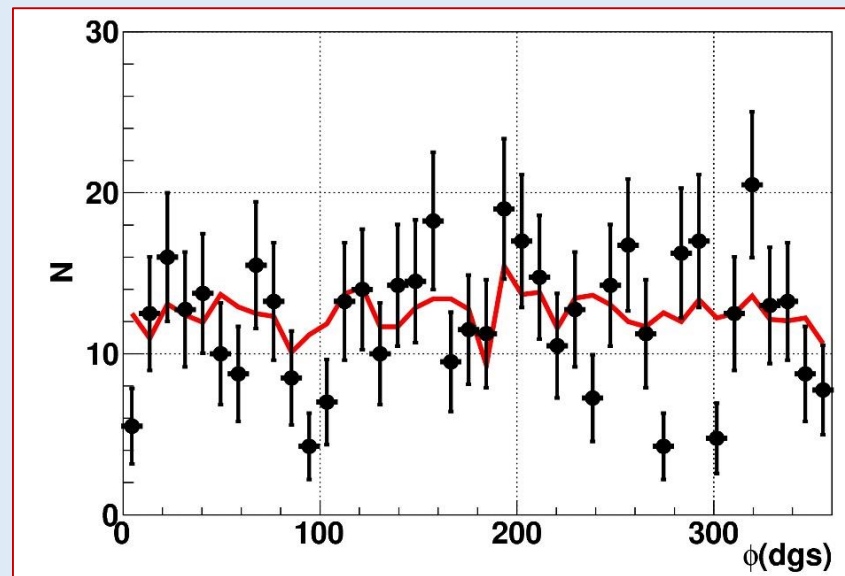
Распределение по $\cos\theta$ anti-n (data)



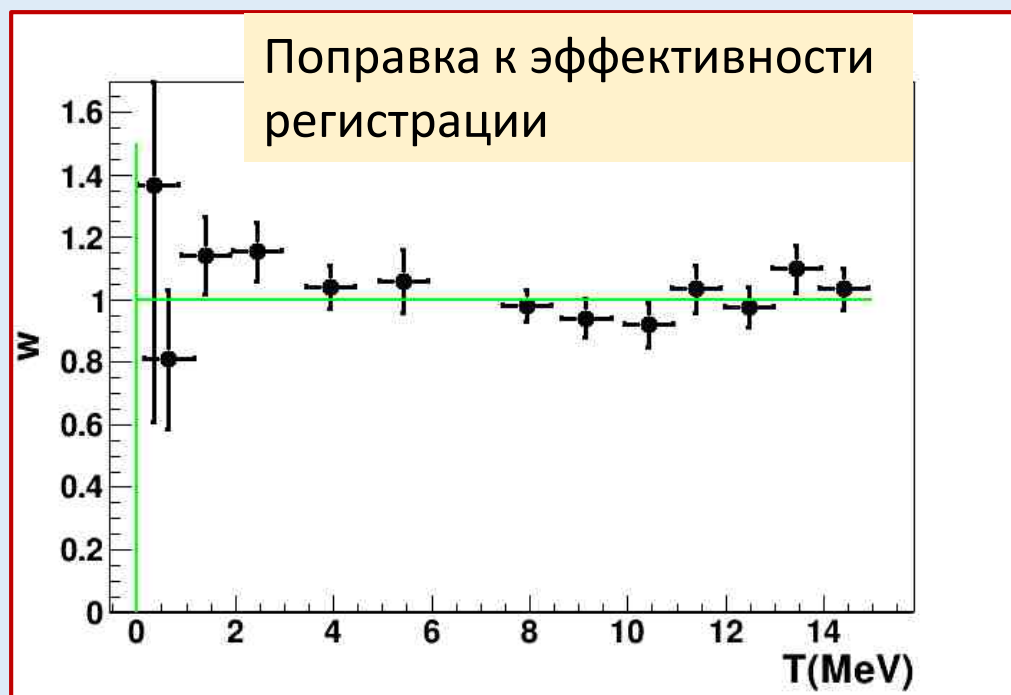
Эффективность от угла (MC)



Распределение по ϕ anti-n (data)



Систематические неопределенности



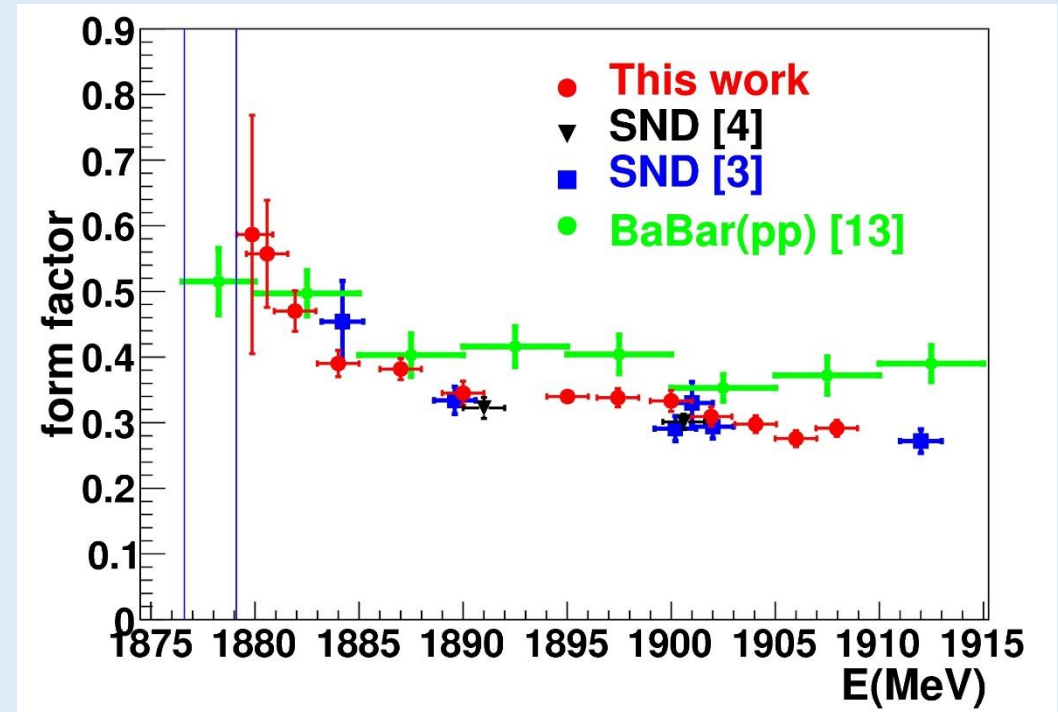
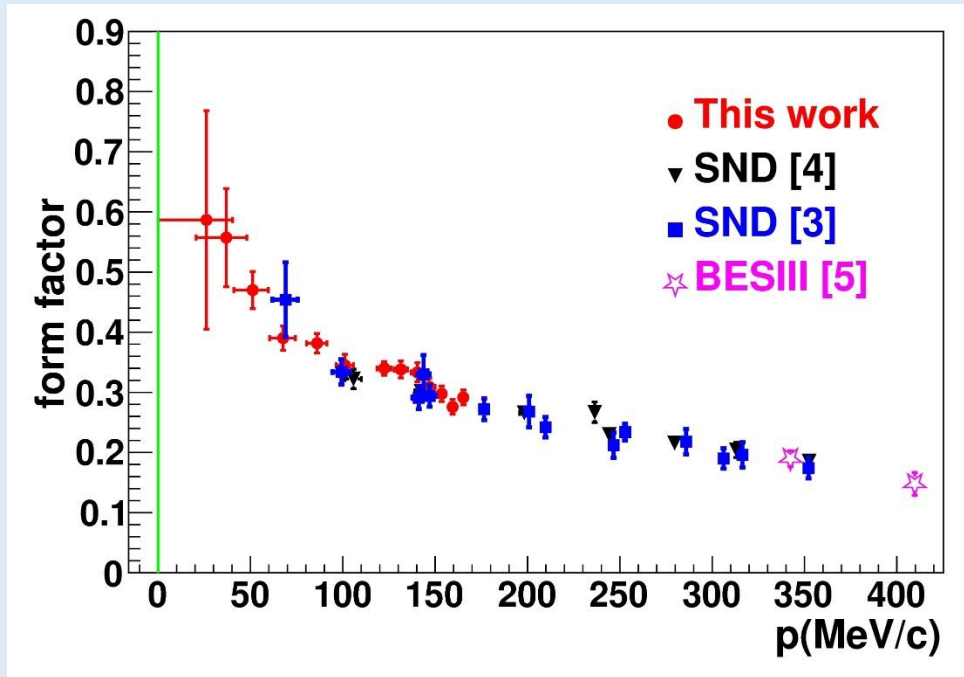
Поочередно инвертируются условия отбора :

$$w_i = n_0 / (n_0 + n_1) / m_0 / (m_0 + m_1)$$

$$W_{\text{tot}} = \prod (1 + w_i) - 1$$

$$W < \sim 10 - 20\%$$

Измеренный эффективный временеподобный формфактор нейтрона



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{4\pi\alpha^2\beta C}{3m^2} \left(|G_M|^2 + \frac{2m_B^2}{m^2} |G_E|^2 \right)$$

$$|F|^2 = \frac{|G_M|^2 + |G_E|^2 / 2\tau}{1 + 1/2\tau}, \quad \tau = \frac{m^2}{4m_B^2}$$

← Эффективный формфактор

Определение GE/GM из углового распределения вылета нейтронов

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{\alpha^2 \beta C^2}{4m^2} \left(|G_M|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m_B^2}{m^2} |G_E|^2 (1 - \cos^2 \theta) \right)$$

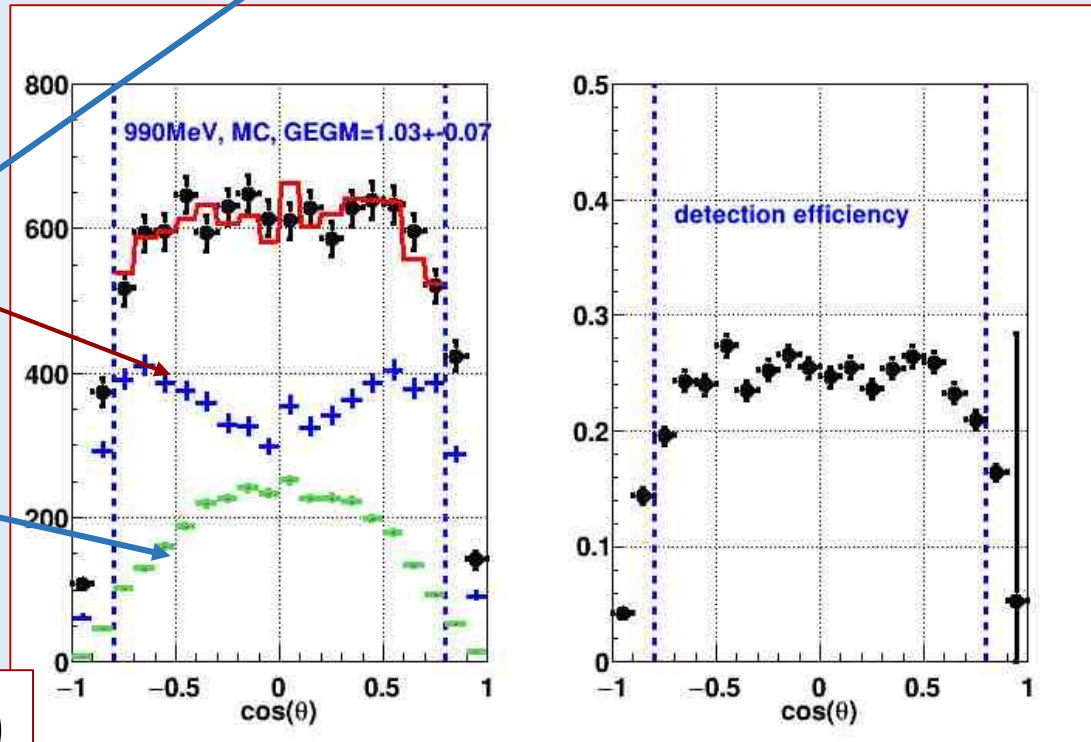
На пороге
 $|G_E| = |G_M|$

GM

$N(GM) = 2 N(GE) !$

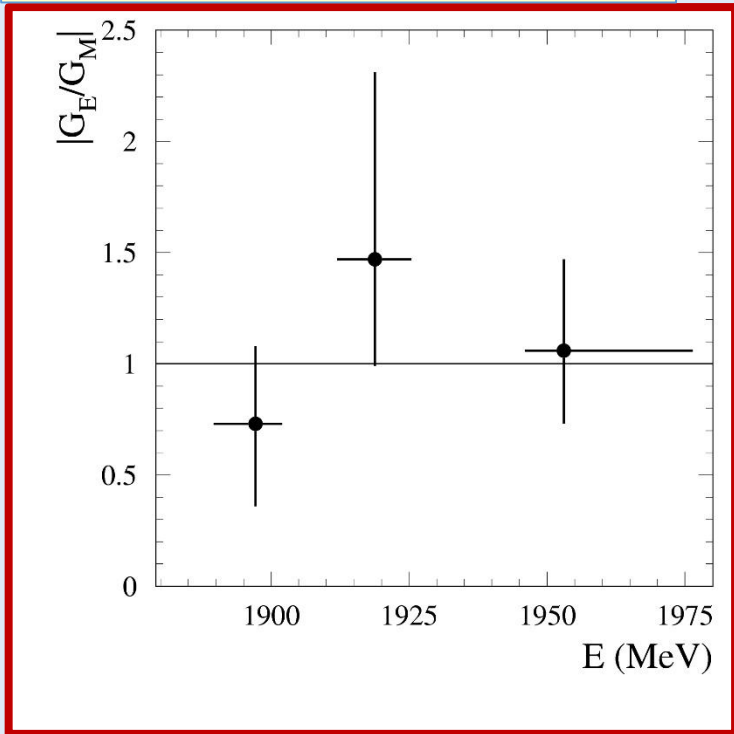
GE

$$H(x) = \text{par}[0] (H_{GM} + \text{par}[1] H_{GE})$$

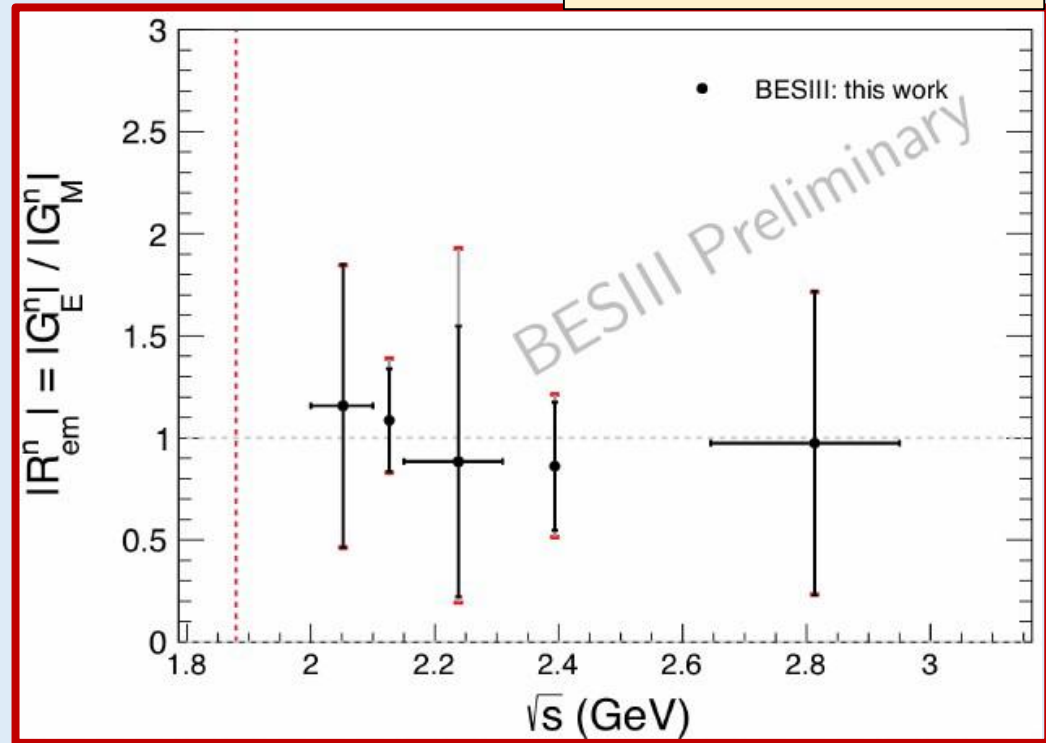


Существующие данные GE/GM во времениподобной области

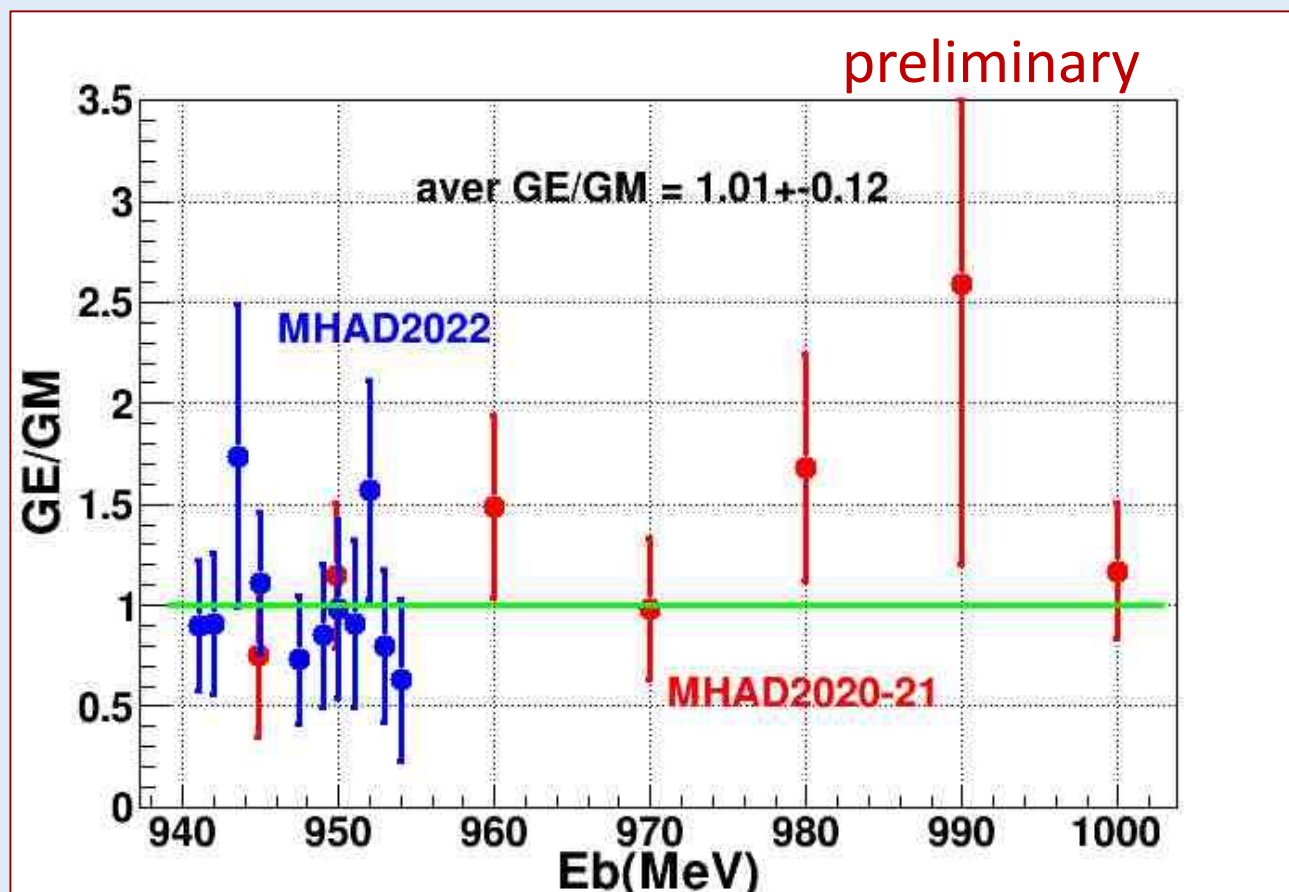
SND, 2023, 18 pb⁻¹, EPJC



BESIII, 355 pb⁻¹,



GE/GM (данные 2020-2022) – предварительно !



Заключение

1. На e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 проводятся эксперименты по измерению времениподобных нуклонных формфакторов при энергии от порога до 2 ГэВ
2. В настоящее время накоплены данные с интегральной светимостью около 180 pb^{-1} , зарегистрировано около 10^4 $n+\text{anti-n}$ событий, опубликовано 4 статьи по этому процессу.
3. В представленном докладе приводятся последние данные по изучению процесса $e^+e^- \rightarrow n+\text{anti-n}$ при энергии от порога до $E=1910 \text{ МэВ}$
4. Измеренное сечение изменяется с энергией в пределах 0.4-0.6 нб. В точке ближайшей к порогу сечение составляет около 0.4 нб.
5. Эффективный времениподобный формфактор нейтрона падает с энергией. Его величина на пороге около 0.5, при энергии 2000 МэВ – 0.15.
6. Проводится анализ данных для определения отношения $|G_E/G_M|$ электрического и магнитных времениподобных формфакторов нейтрона.

Настоящая работа поддержана грантом **№. 23-22-00011 (РНФ)**

Conclusions

1. Experiments are carried out at the VEPP-2000 e^+e^- collider to measure time like nucleon form factors at energies from the threshold to 2 GeV
2. At present, data have been accumulated with an integrated luminosity of about 180 pb^{-1} , about 10^4 $n+\text{anti-}n$ events have been registered, and 4 articles on this process have been published.
3. The presented report presents the latest data on the study of the $e^+e^- \rightarrow n+\text{anti-}n$ process at energies from the threshold to $E=1910 \text{ MeV}$
4. The measured cross-section changes with energy within 0.4-0.6 nb. At the point closest to the threshold, the cross-section is about 0.4 nb.
5. The effective time-like form factor of the neutron decreases with energy. Its value at the threshold is about 0.5, at an energy of 2000 MeV – 0.15.
6. Data analysis is performed to determine the ratio $|GE/GM|$ of the electric and magnetic time-like form factors of the neutron.

The work is supported by RNF grant : No. 23-22-00011 (PHΦ)

Спасибо за внимание!

Запасные слайды

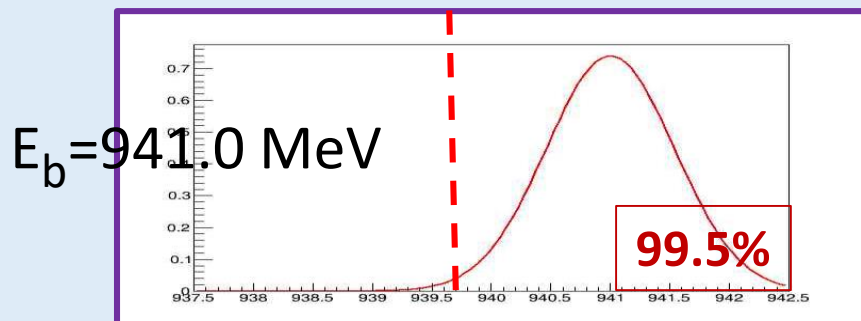
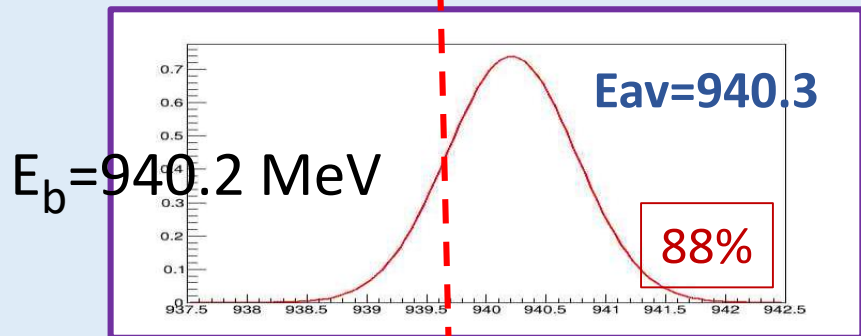
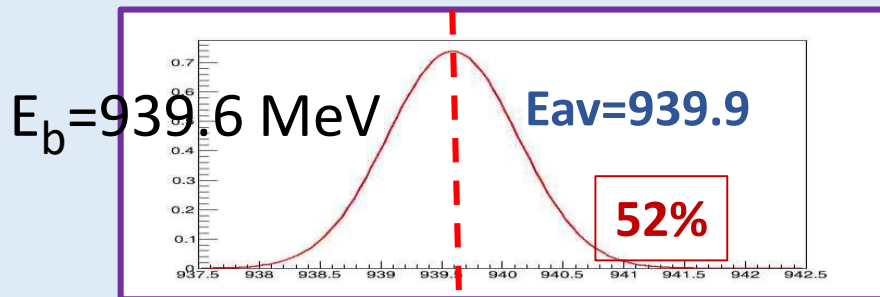
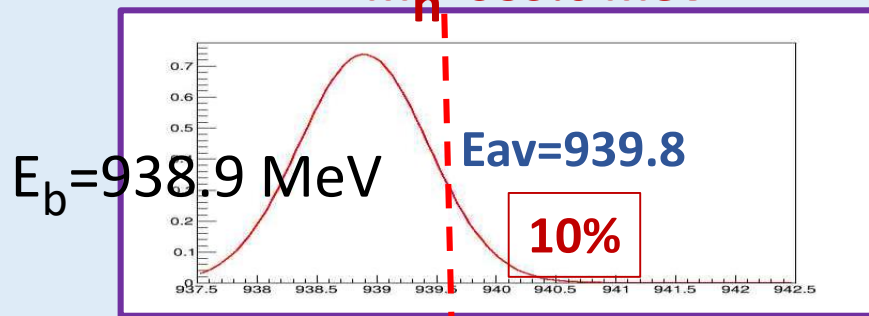
Данная работа : МНАД 2022

Точки по энергии (МэВ) выше порога $n+\text{anti-}n$ (939.6) :
939.6, 940.2, 941, 942, 943.5, 945, 947.5, 949,
950, 951, 952, 953, 954; $\Delta L=106 \text{ pb}^{-1}$,

Точки по энергии (МэВ) ниже порога $n+\text{anti-}n$:
910, 920, 930, 935, 937.5, 938.3, 938.9,
 $\Delta L=64 \text{ pb}^{-1}$,

Средняя светимость $\sim 3 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$M_n = 939.6 \text{ MeV}$



→ $E_b(\text{MeV})$

Пересечение нейтронного порога
при энергетическом разбросе
 $\sigma_E = 0.54 \text{ MeV}$

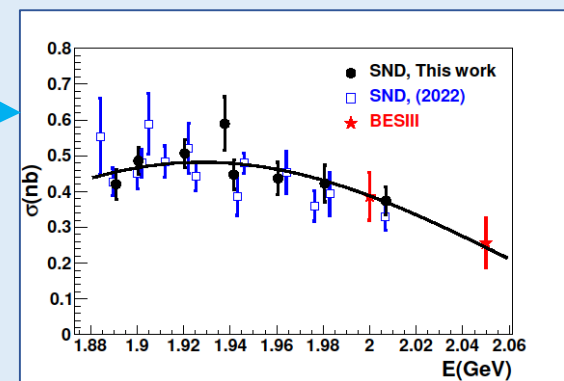
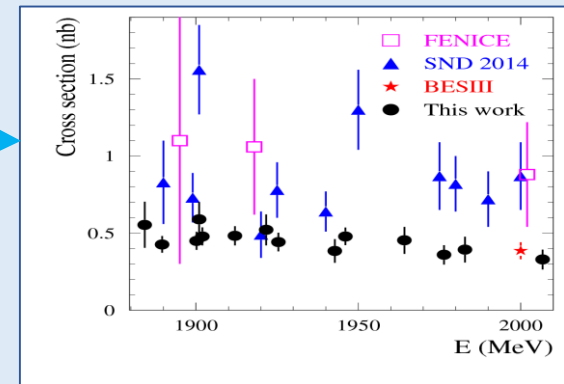
Предыдущие публикации по процессу $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-}n$

1. M.N. Achasov et al, European Physical Journal C 22, 761 (2022);
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10696-0>

----- Данные МНАД 2017, 2019 ---

2. М.Н. Ачасов и др., Ядерная физика, 2023, т.86, No.6, с.672-680

----- Данные МНАД 2020, 2021 ---

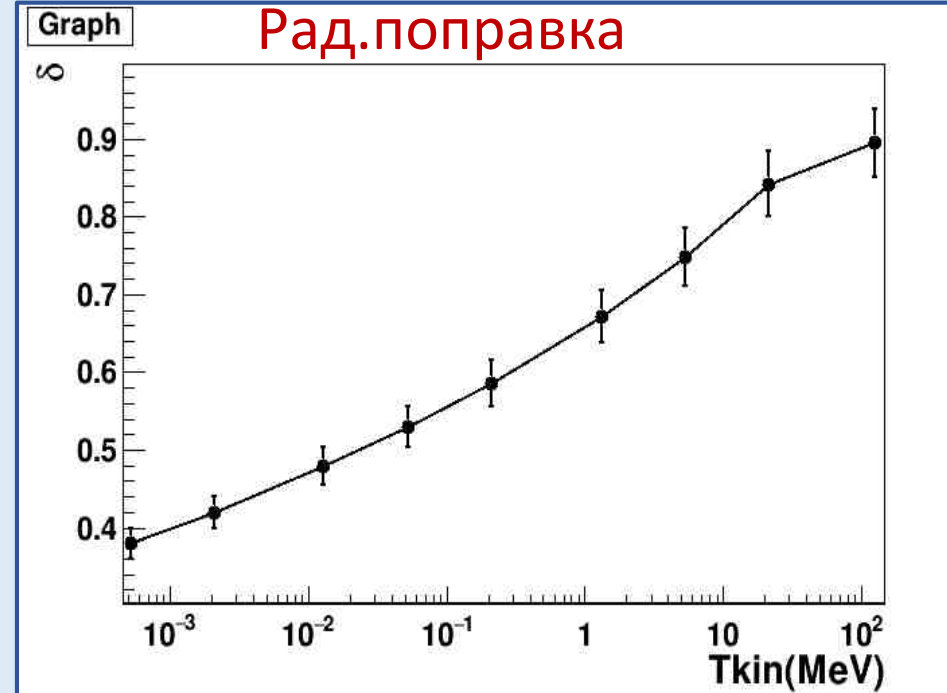


Вычисление сечения

$$\sigma_B = N_{nn} / \varepsilon (1 + \delta) L$$

Example :

N_{nn} – detected events number, ~ 500 ,
 L - integrated luminosity, $\sim 5\text{-}10 \text{ pb}^{-1}$,
 ε - MC detection efficiency, ~ 0.2 ,
 $1 + \delta$ - radiative correction, $\sim 0.6\text{-}0.9$,
 σ_B - total cross section $\sim 0.4\text{-}0.6 \text{ nb}$,
 $\sigma_{vis} = N_{nn} / \varepsilon L$ - visible cross section,
 $\text{err}(\text{stat}) \sim 5\%$, $\text{err}(\text{syst}) \sim 10\%$,



$$\sigma_{vis} = N / (\varepsilon L) = \sigma_0 (1 + \delta);$$

$$\sigma_{vis} = \int_{\Delta E} P(E', E) dE' \int_0^{x_{max}} W(s, x) \sigma_0(s(1-x)) dx,$$

Предыдущие публикации по процессу $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$

Совместная регистрации антинейтрона и нейтрона
в событиях $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$ (MHAD 2017 data)

EPJ Web of Conferences 212 07007 (2019)

V.P. Druzhinin, S.I. Serednyakov

**Measurement of the $e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$ cross section with the SND
detector at the VEPP-2000 collider**

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201921207007>

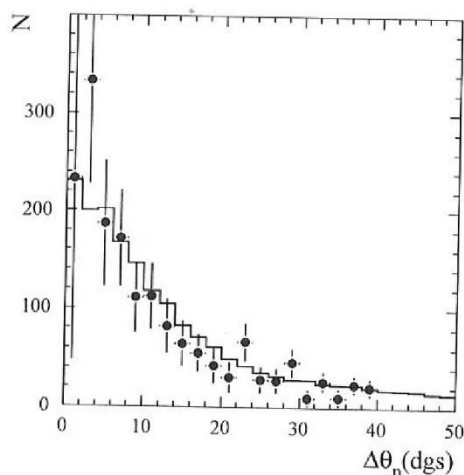
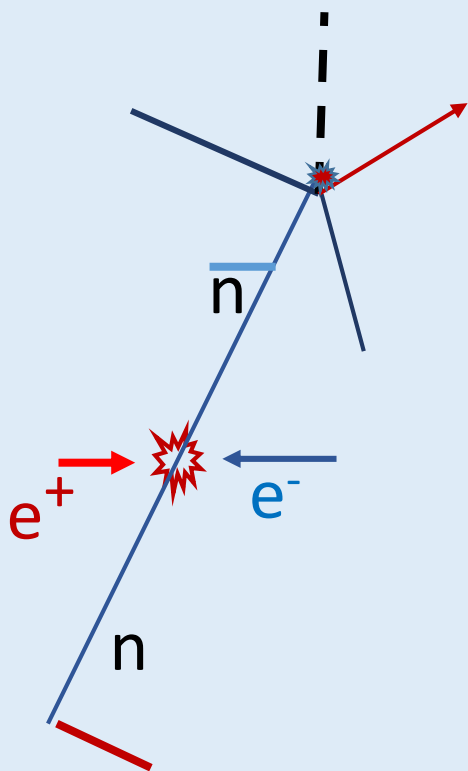


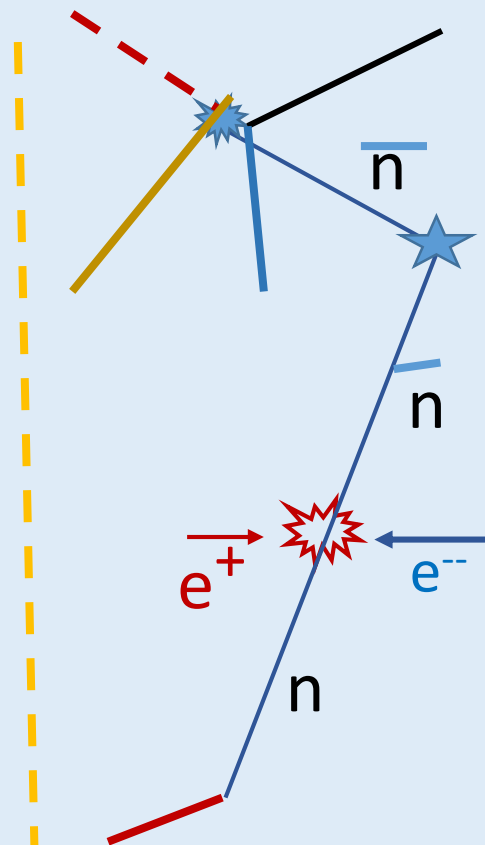
Figure 3. The distribution of the angle between the neutron-candidate direction and the reverse antineutron direction for data (points with error bars) and simulated (histogram) events.

The recoiled neutron can be also observed in EMC in the direction opposite to the antineutron direction as a photon or several photons. We construct the distribution of the angle between the photon direction and the expected neutron direction n for photons with energy greater than **20 MeV**. The n distribution for the energy range $E_b = 970-1000 \text{ MeV}$ is shown in Fig. 3. The peak in the distribution near zero is clearly seen. The data and simulated n distributions are in good agreement. The efficiency of the recoiled neutron detection is about **30%**.

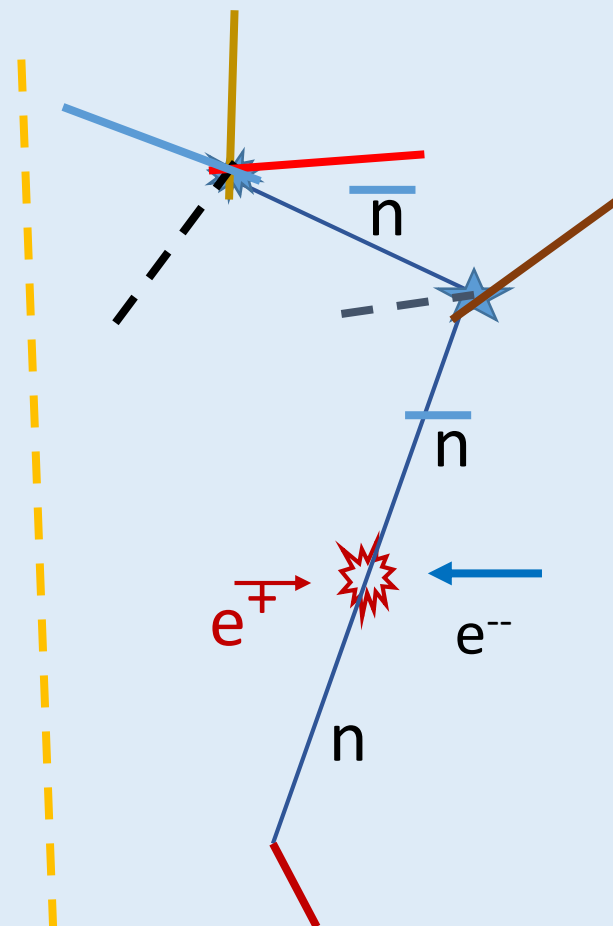
Три вида первого взаимодействия антинейтрона в детекторе



1 - аннигиляция

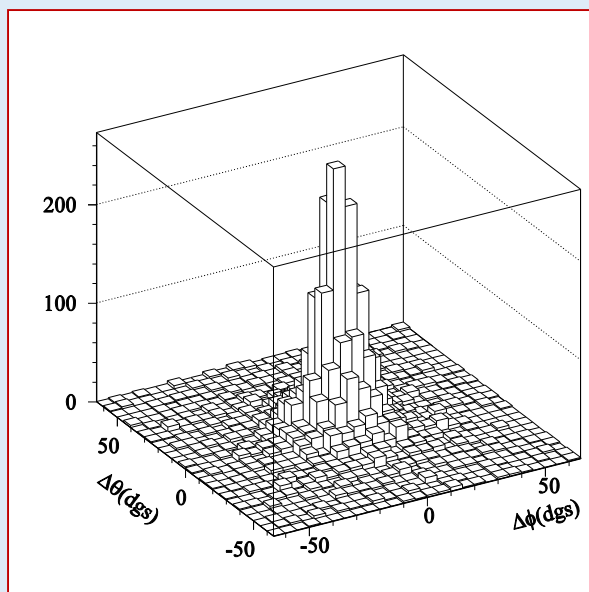


2 – упр. рассеяние + аннигиляция



3 – неупр. рассеяние + аннигиляция

Selection of n+anti-n events



Key features

(No tracks*, no photons*, no kinematic χ^2)

- 1 - veto μ system
- 2 - no cosmic muon track in EMC
- 3 - event momentum : $P > 0.3E_{\text{beam}}$
- 4 - EMC energy : $E_{\text{tot}} > E_{\text{beam}}$
- 5 - 3-d EMC layer energy: $E_3 < 0.7E_{\text{beam}}$
- 6 - photon χ^2 : > -2.5

Selection results:

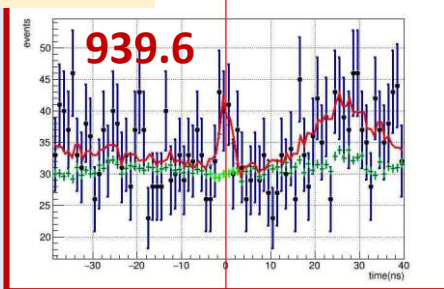
- 1 – total events recorded $\sim 2 \cdot 10^7$ events/pb -1
- 2 – after applying cuts ~ 100 events/pb⁻¹, including physical, beam and cosmic background and n anti-n events

Selection efficiency :

$$\varepsilon_{\text{MC}} \sim 20 \% (945 - 1000 \text{ MeV})$$

Временные спектры MHAD2022, R008-002

940.0



940.3

