



Научная сессия Объединенного ученого совета  
по физическим наукам СО РАН  
21 декабря 2022 года

Экспериментальное изучение процесса  $e^+e^-$  аннигиляции  
в пару **нейтрон-антинейтрон** на коллайдере ВЭПП-2000

Авторы : коллаборация СНД  
ИЯФ СО РАН

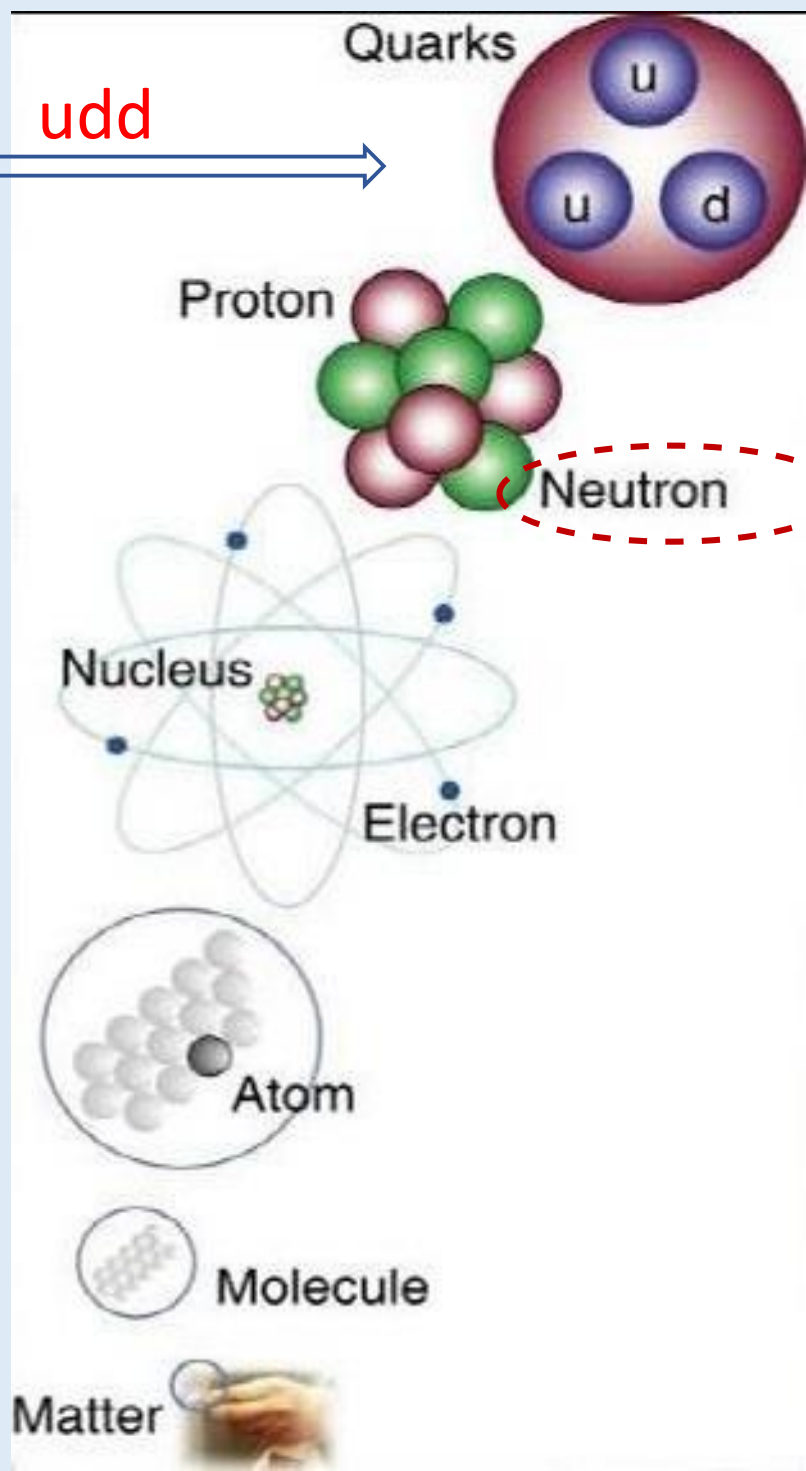


# Состав материи во Вселенной

Протоны и нейтроны, >99%



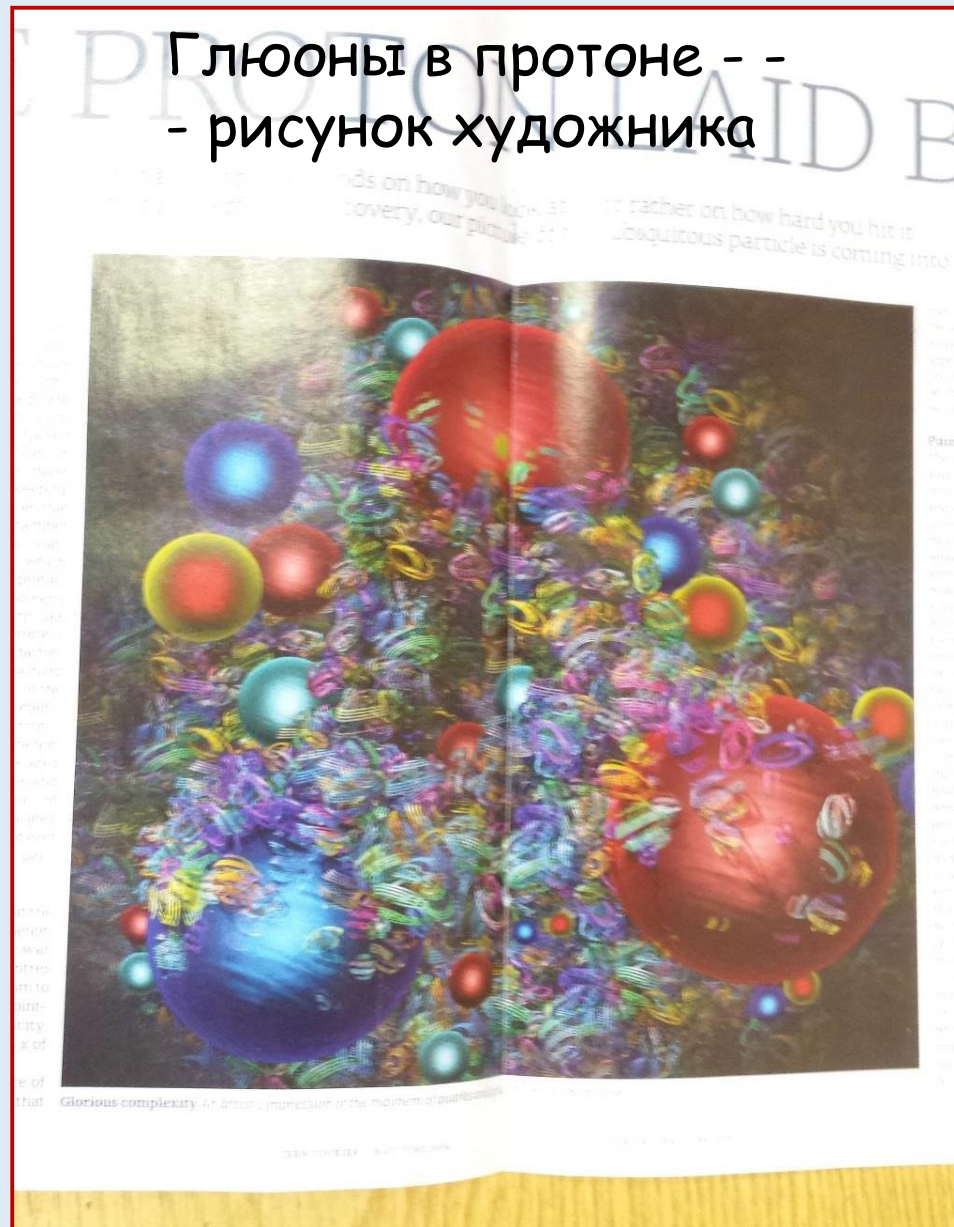
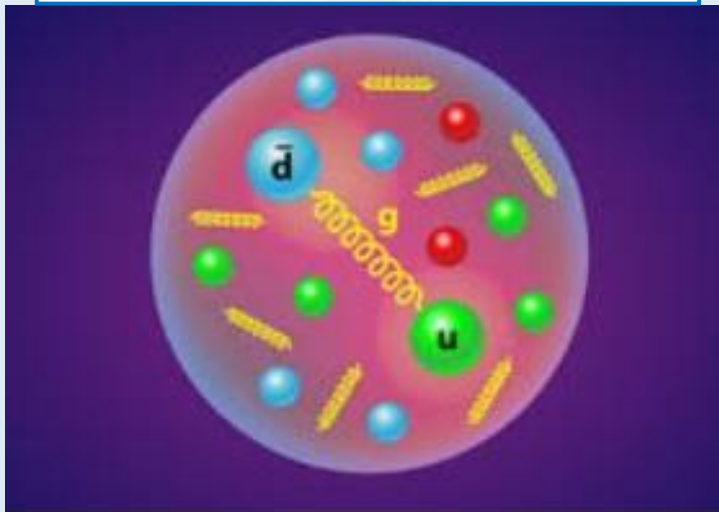
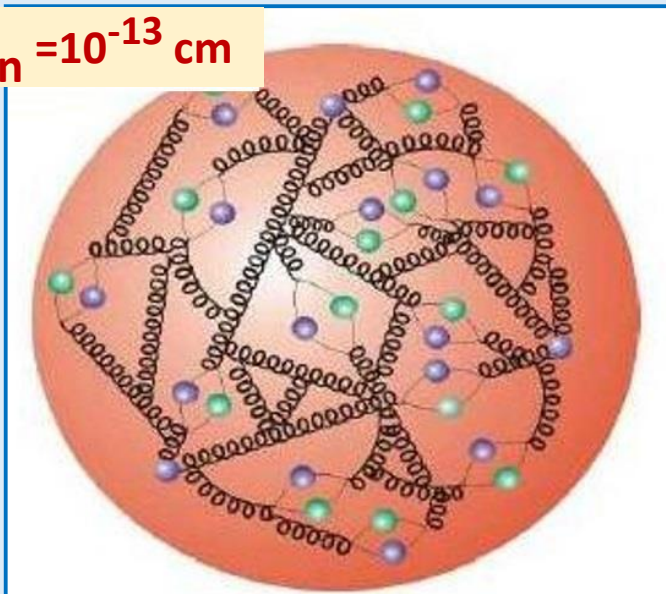
Структура нуклонов –  
нейтрона и протона,  
 $M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$   
 $R_n = 10^{-13} \text{ cm}$   
 $\tau_n = 880 \text{ sec}$



# Структура нейтрона и протона

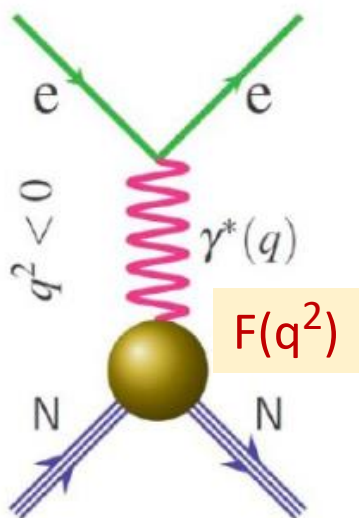
$n = udd + \text{gluons} + \text{quarks} + \dots$

$R_n = 10^{-13} \text{ cm}$



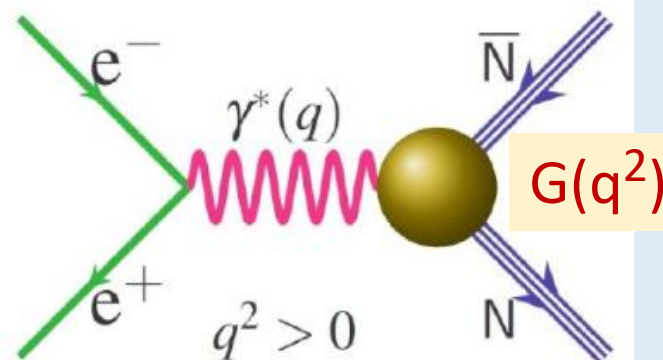
# Две возможности изучать электромагнитную структуру нуклона

$e^- N \rightarrow e^- N$   
Рассеяние



Spacelike form  
factor:  $F(q^2)$

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



Timelike form  
factor  $G(q^2)$

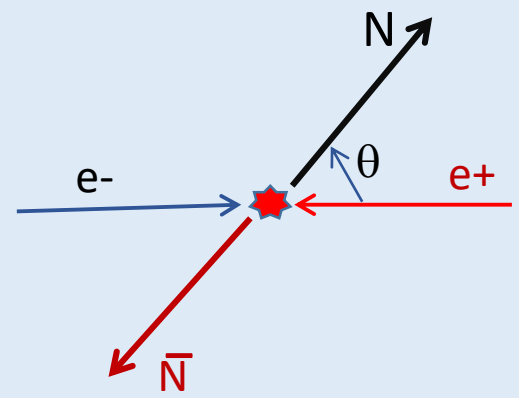
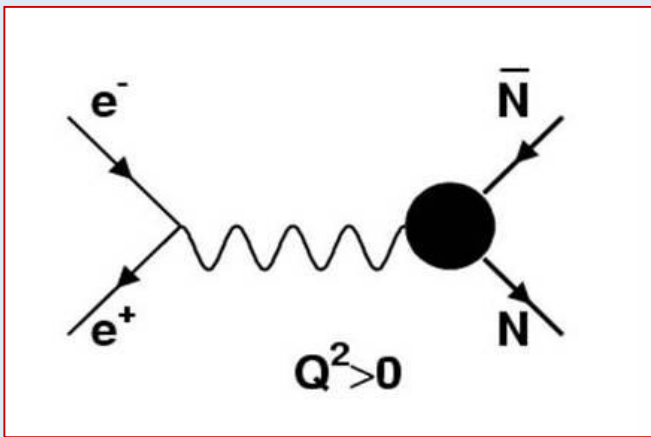
ВЭПП-2000

# $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$ cross section

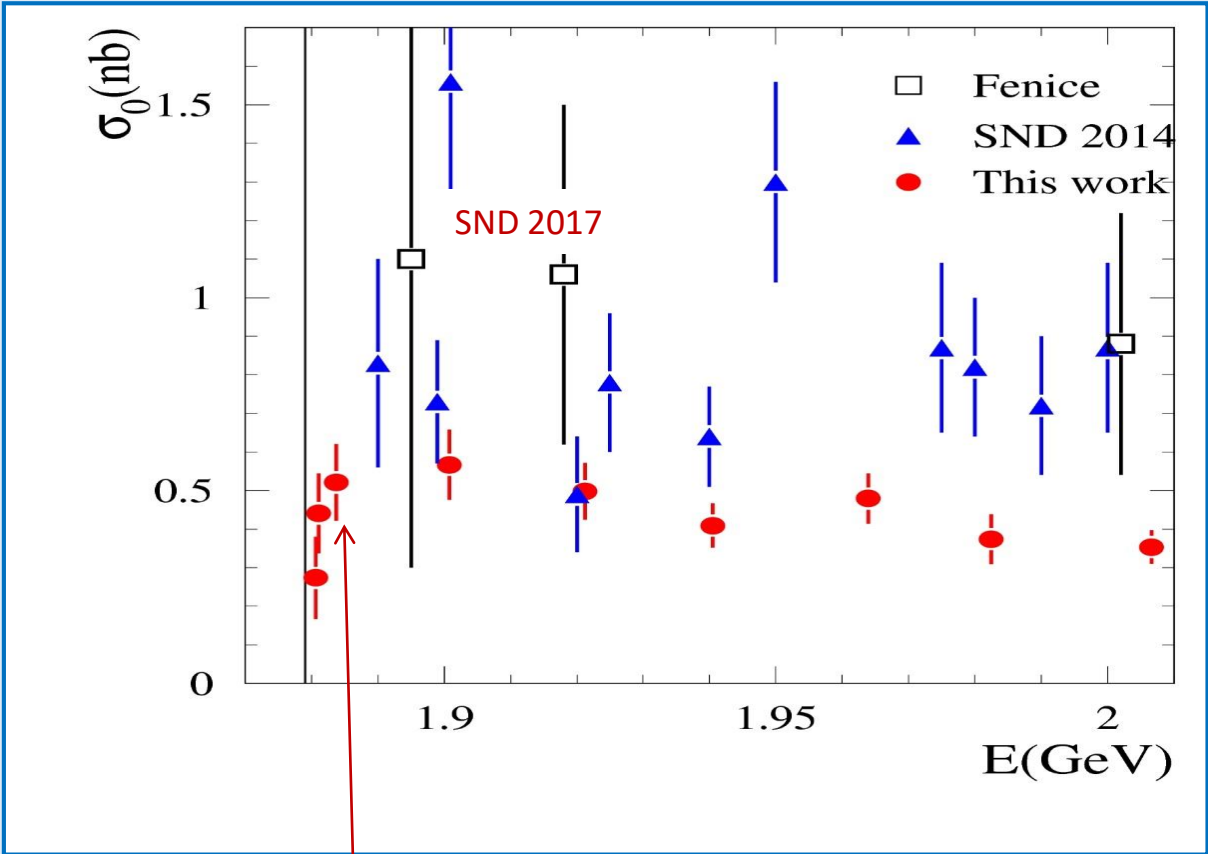
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{\alpha^2 \beta C^2}{4m^2} \left( |G_M|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m_B^2}{m^2} |G_E|^2 (1 - \cos^2 \theta) \right)$$

$B$  – baryon =  $p, n$ ;  $m=2E_b$  – cms energy;  $\beta$  – nucleon velocity  
 $\theta$  – polar angle;  $m_b$  – nucleon mass;  $G_E, G_M$  – two form factors

Feynman diagram of  $e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$  process



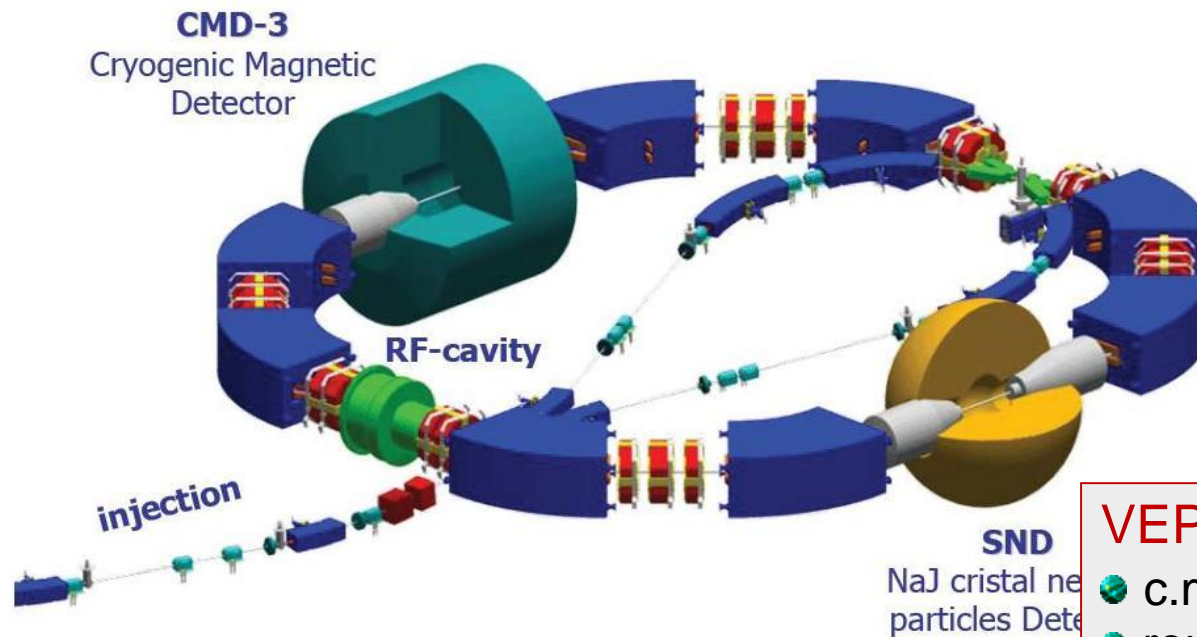
# Существующие данные по сечению $e^+e^- \rightarrow n + \text{anti-}n$



SND preliminary  
PhiPsiConf2019; EPJ Web Conf 212 07007 (2019)

## Коллайдер ВЭПП-2000

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



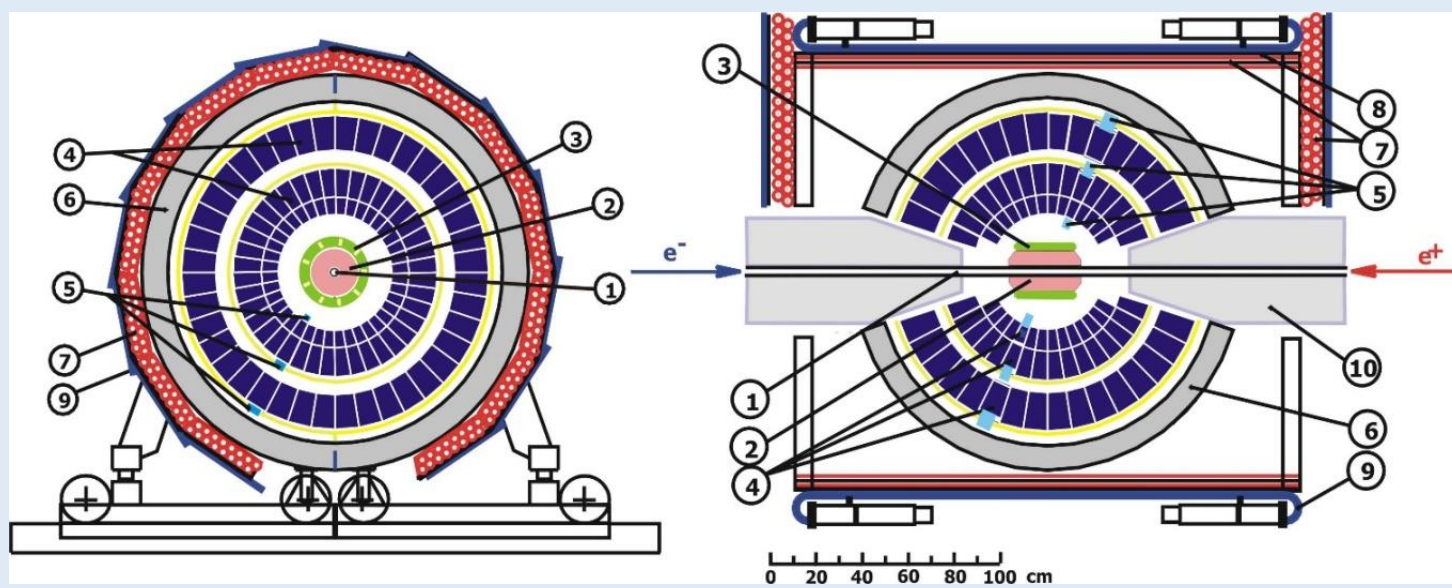
#### VEPP-2000 parameters:

- 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)

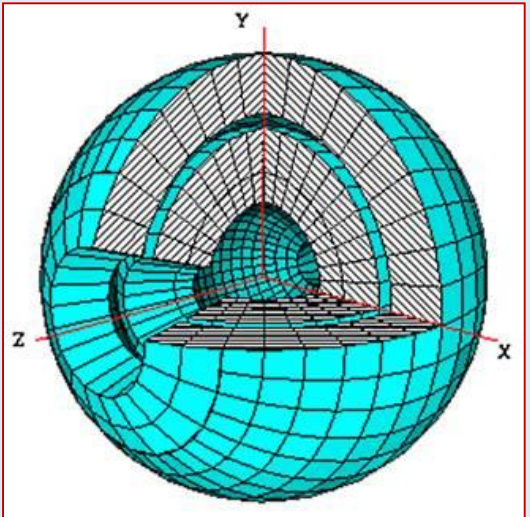




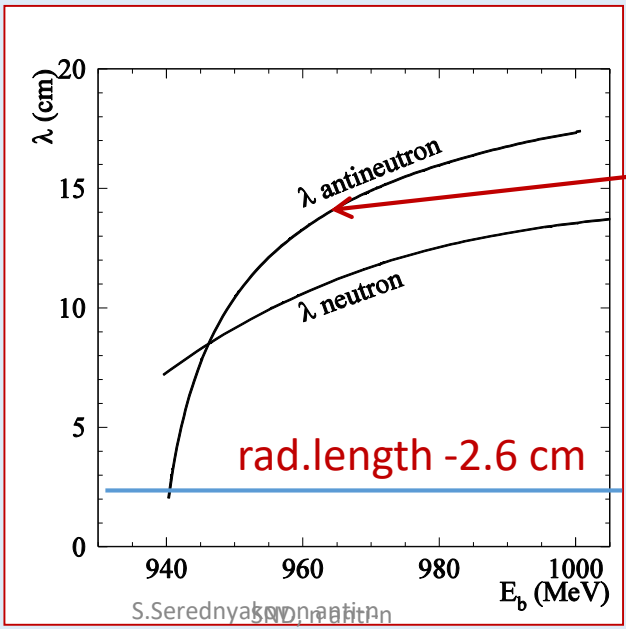
# SND detector (since 1995)



- 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%  $4\pi$



Attenuation length

SND – good antineutron detector

## Набор экспериментальных данных – 2017, 2019 гг.

$E_{\text{beam}} = 940 - 1004 \text{ MeV}$ , ( $m_n = 939.6 \text{ MeV}$ )

21 energy points,

Luminosity :  $\Delta L = 38 \text{ pb}^{-1}$ ,

Number of  $nn$  events = 2730 (recorded )

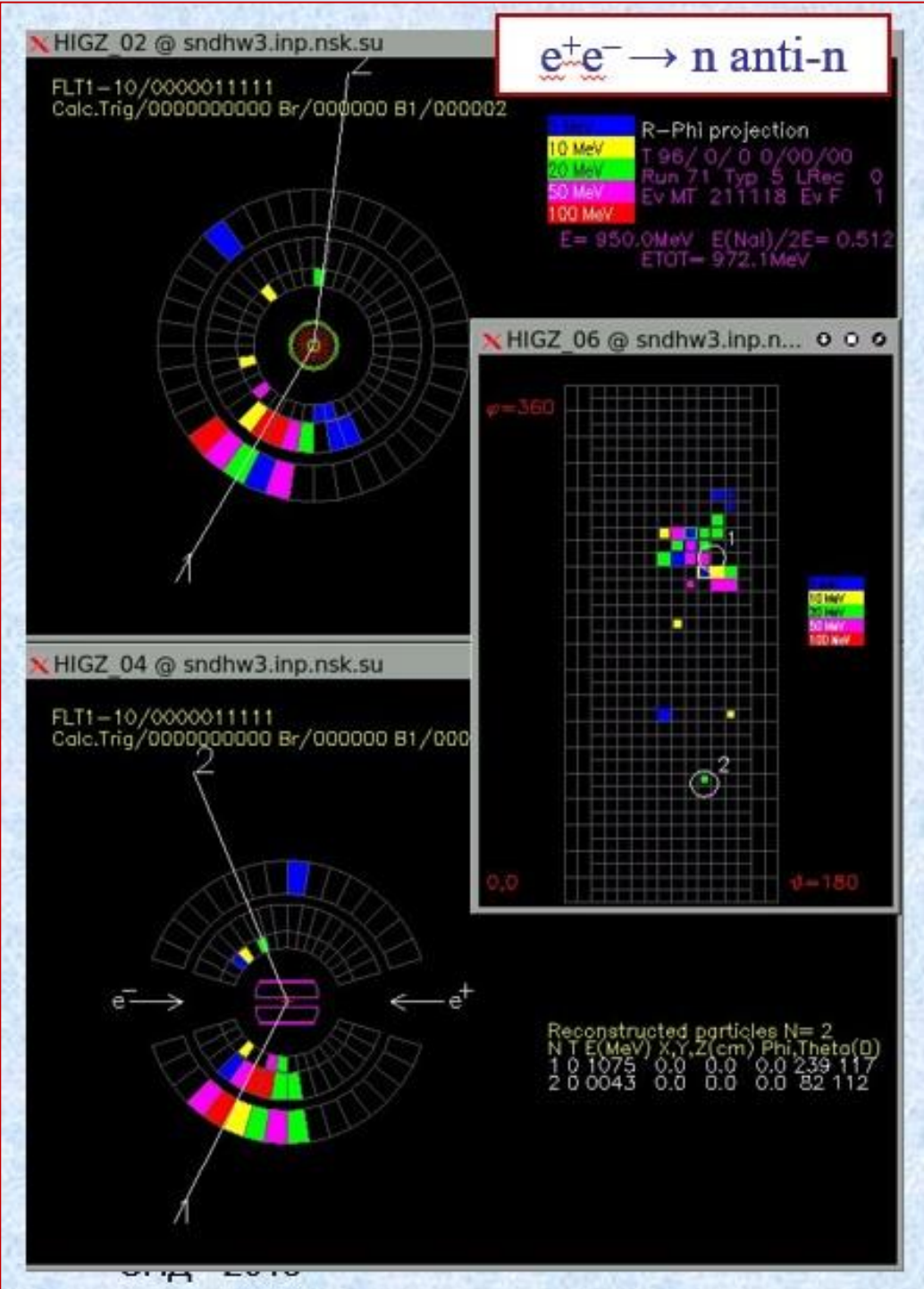
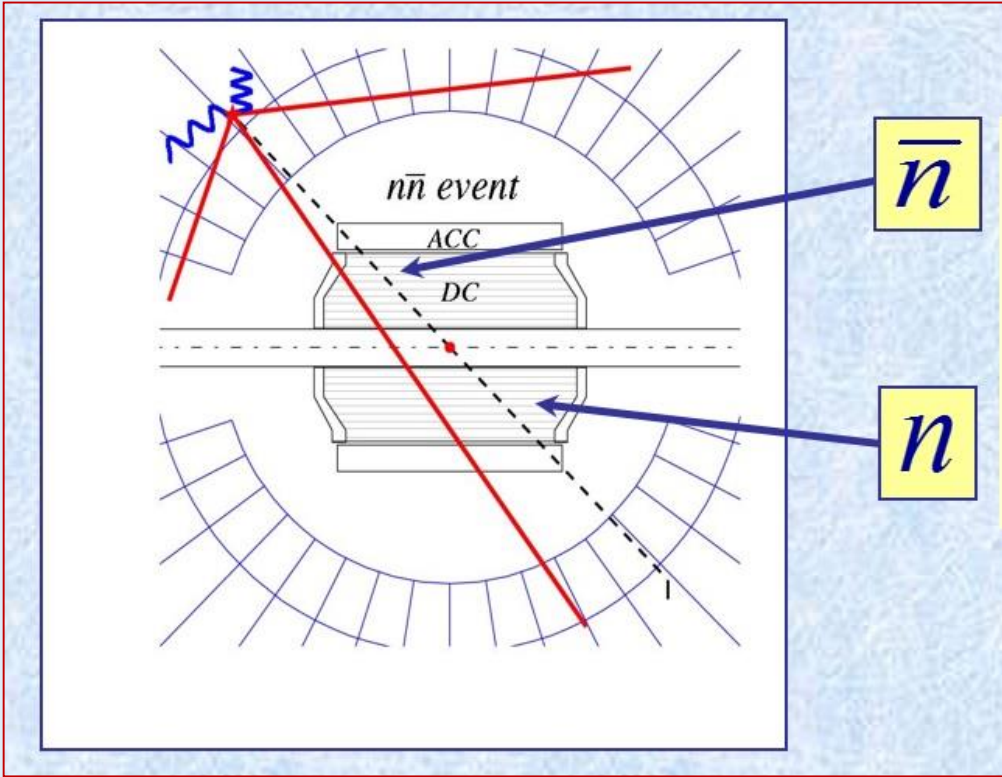
Number of  $nn$  events  $\sim 15\,000$  (produced)

Эффективность регистрации  $\sim 18\%$

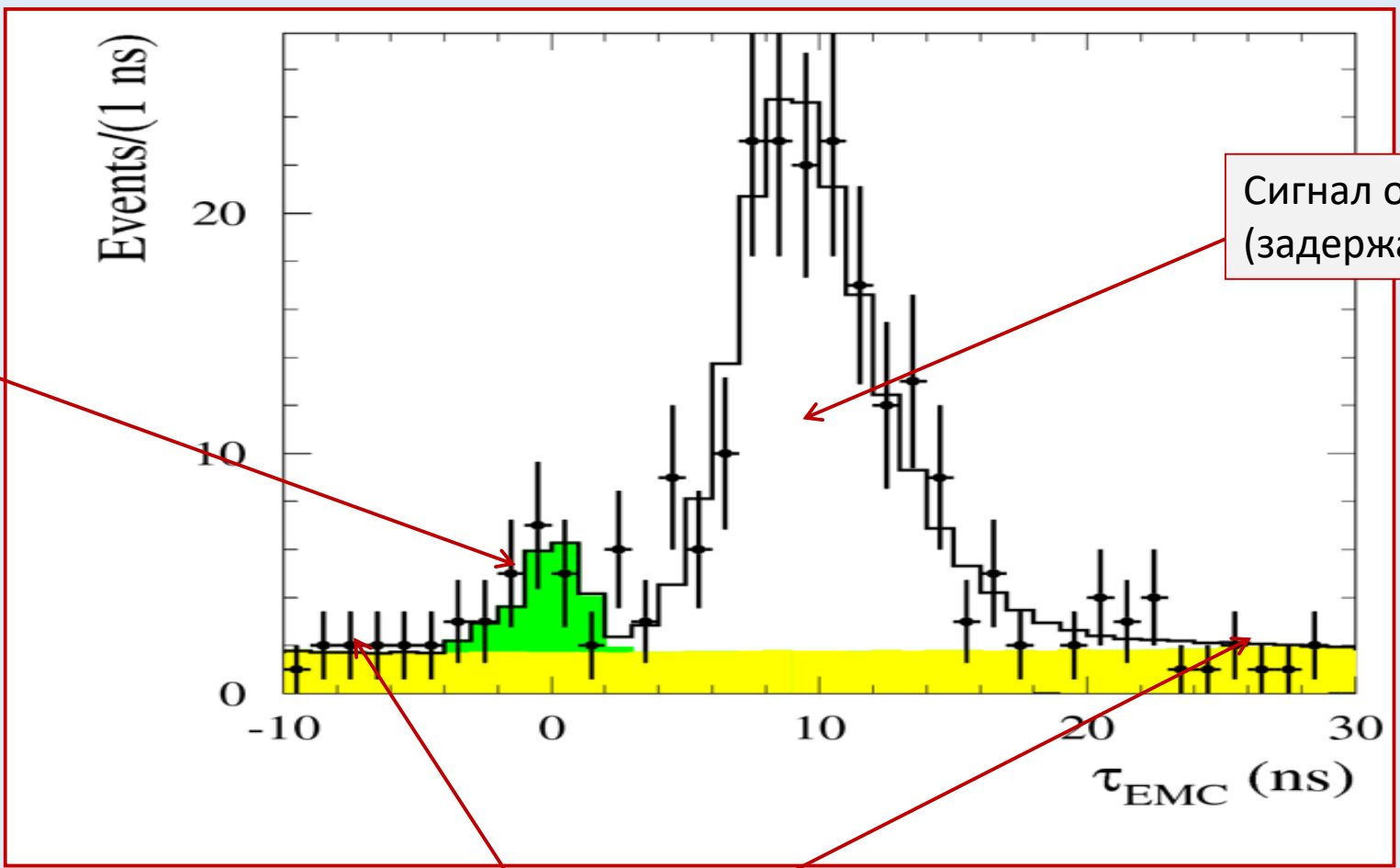
Полное число записанных событий  $> 10^9$

событий  $n \text{ anti-}n \sim 1 / 1\,000\,000$

# Снимки типичных $n\bar{n}$ - событий



# Распределение по времени отобранных событий



$t=0$ ,  
фон пучка

Сигнал от anti-n  
(задержан)

Космический фон

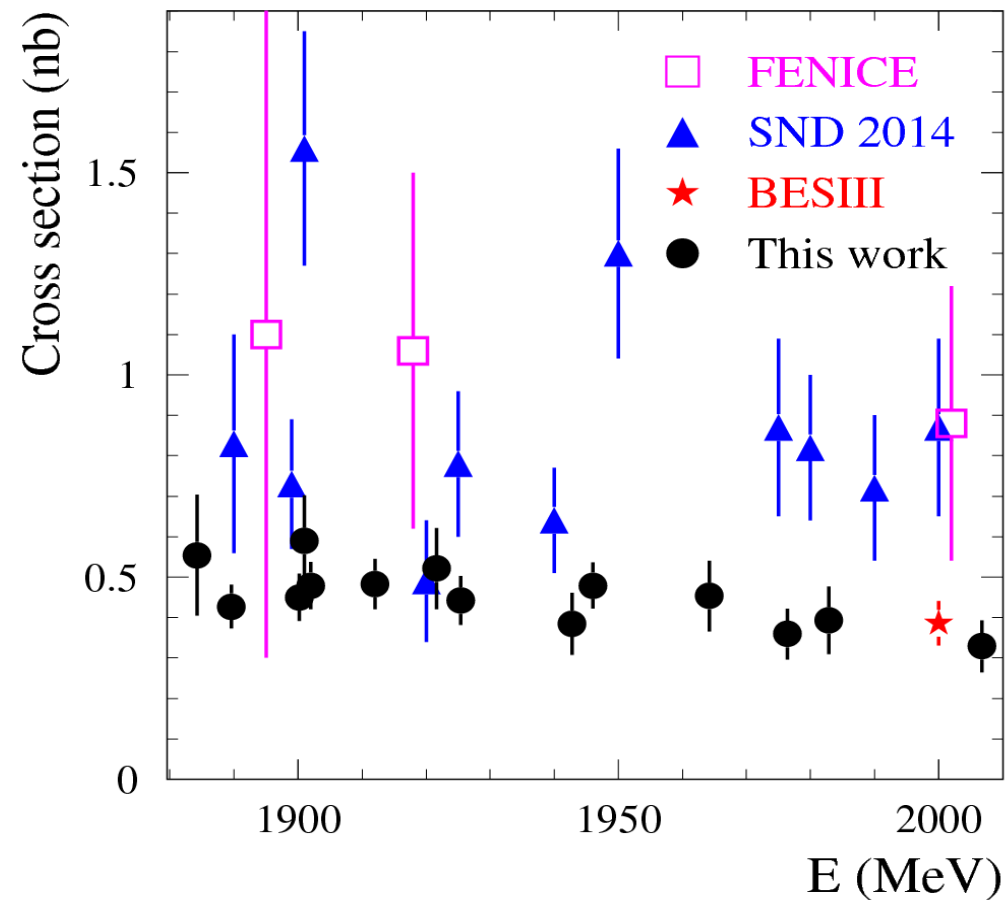
## Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$

### Вычисление сечения $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$

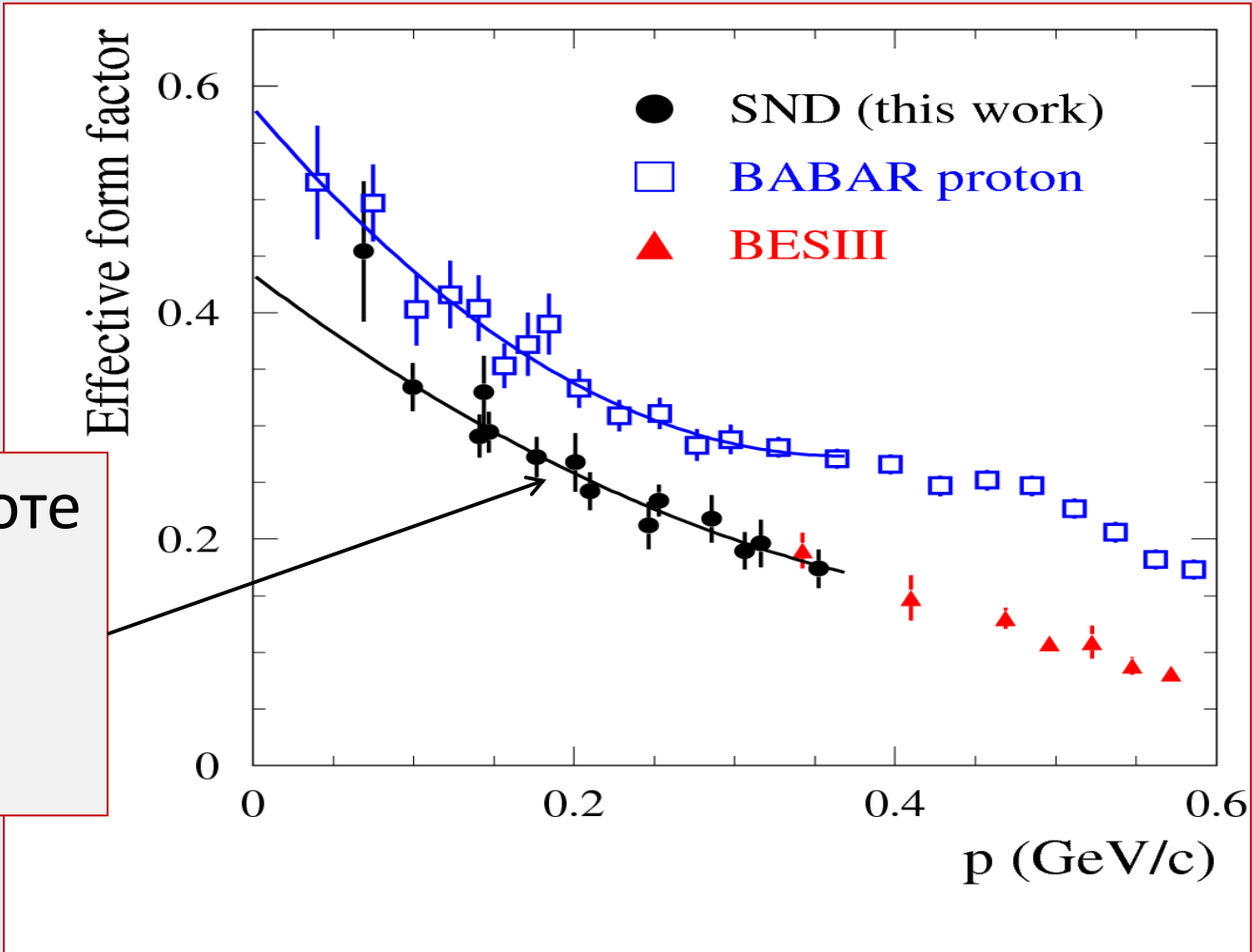
$$\sigma_B = N_{nn} / \varepsilon (1+\delta) L$$

-----  
Example :

- $N_{nn}$  – detected events number,  $\sim 100$ ,
- $L$  - integrated luminosity,  $\sim 1 \text{ pb}^{-1}$ ,
- $\varepsilon$  - MC detection efficiency,  $\sim 0.2$ ,
- $1+\delta$  - radiative correction,  $\sim 0.8$ ,
- $\sigma_B$  - total cross section  $\sim 0.4\text{-}0.8 \text{ nb}$ ,
- $\sigma_{vis}$  - visible cross section.



Измеренный в работе  
эффективный  
формфактор  
нейтрона

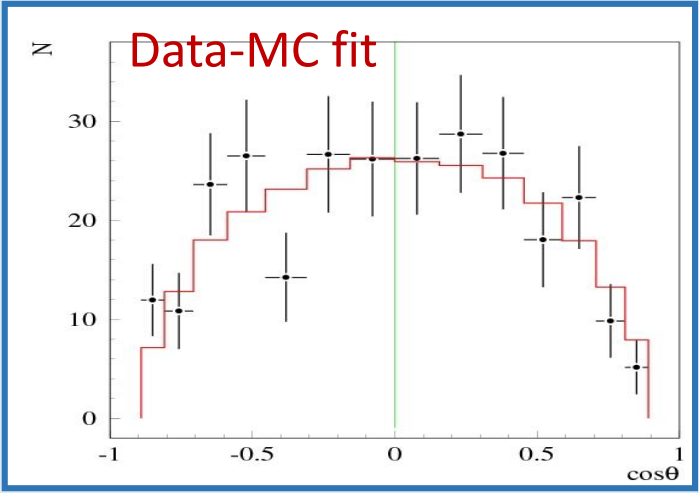
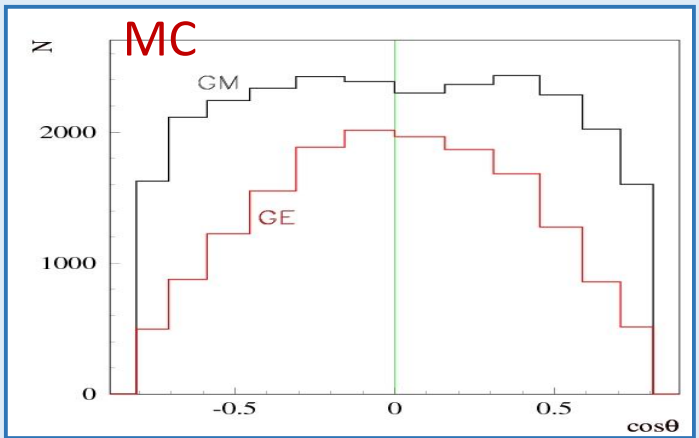


$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) = \frac{4\pi\alpha^2\beta C}{3m^2} \left( |G_M|^2 + \frac{2m_B^2}{m^2} |G_E|^2 \right)$$

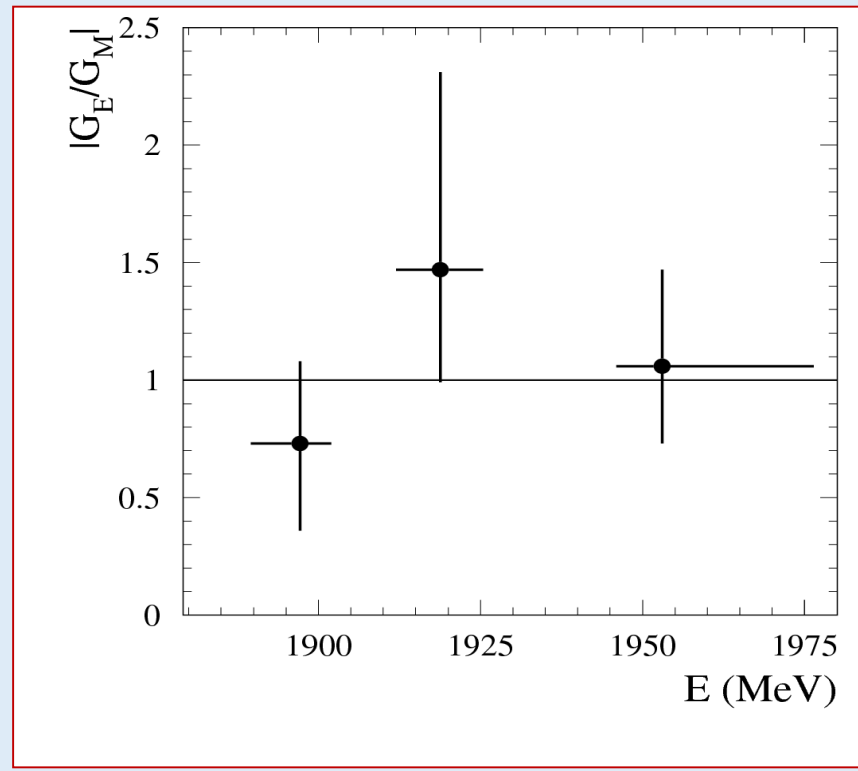
$$|F|^2 = \frac{|G_M|^2 + |G_E|^2 / 2\tau}{1 + 1/2\tau}, \quad \tau = \frac{m^2}{4m_B^2}$$

Отношение электрического и магнитного формфакторов нейтрона  $|G_E|/|G_M|$

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



Измеренный результат для  $|G_E|/|G_M|$



## Выводы

На электрон-позитронном коллайдере **ВЭПП-2000** (slide 8) с детектором СНД (slide 9) изучался процесс  $e^+e^- \rightarrow$  **нейтрон + антинейтрон** в области энергии вблизи порога процесса. В результате эксперимента (slide 10) были зарегистрированы более **2500** пар нейтрон+антинейтрон, что позволило измерить сечение процесса (**0.5-0.3 нанобарна**, slide 13), а также впервые вблизи порога определить эффективный электромагнитный времениподобный **формфактор нейтрона** (slide 14) и отношение электрического и магнитного формфакторов нейтрона (slide 15). Формфактор нейтрона оказался меньше протонного формфактора.

Полученный в данной работе нейтронный формфактор стыкуется с измерениями детектора BESIII при большей энергии .





# Experimental study of the $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ process at the VEPP-2000 $e^+e^-$ collider with the SND detector

## SND Collaboration

M. N. Achasov<sup>1,2</sup>, A. Yu. Barnyakov<sup>1,3</sup>, K. I. Beloborodov<sup>1,2</sup>, A. V. Berdyugin<sup>1,2</sup>, D. E. Berkaev<sup>1,2</sup>,  
A. G. Bogdanchikov<sup>1</sup>, A. A. Botov<sup>1</sup>, G. S. Chizhik<sup>1,2</sup>, T. V. Dimova<sup>1,2</sup>, V. P. Druzhinin<sup>1,2</sup>, L. V. Kardapoltsev<sup>1,2</sup>,  
A. G. Kharlamov<sup>1,2</sup>, V. A. Kladov<sup>1,2</sup>, I. A. Koop<sup>1,2,3</sup>, A. A. Korol<sup>1,2</sup>, D. P. Kovrizhin<sup>1</sup>, A. S. Kupich<sup>1,2</sup>, A. P. Lysenko<sup>1</sup>,  
N. A. Melnikova<sup>1</sup>, N. Yu. Muchnoi<sup>1,2</sup>, A. E. Obrazovsky<sup>1</sup>, E. V. Pakhtusova<sup>1</sup>, E. A. Perevedentsev<sup>1,2</sup>,  
K. V. Pugachev<sup>1,2</sup>, S. I. Srednyakov<sup>1,2,a</sup>, Z. K. Silagadze<sup>1,2</sup>, P. Yu. Shatunov<sup>1,2</sup>, Yu. M. Shatunov<sup>1,2</sup>, D. A. Shtol<sup>1</sup>,  
D. B. Schwartz<sup>1,2</sup>, I. K. Surin<sup>1</sup>, Yu. V. Usov<sup>1</sup>, I. M. Zemlyansky<sup>1,2</sup>, V. N. Zhabin<sup>1</sup>, V. V. Zhulanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk 630073, Russia

Received: 27 June 2022 / Accepted: 9 August 2022

© The Author(s) 2022

**Abstract** The process  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  is studied in the experiment at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider with the SND detector. The technique of the time measurements in the multichannel NaI(Tl) electromagnetic calorimeter is used to select  $n\bar{n}$  events. The value of the measured cross section in the center-of-mass energy range from 1.894 to 2 GeV varies from 0.5 to 0.35 nb. The effective neutron timelike form factor is derived from the measured cross section and compared with the proton form factor. The ratio of the neutron electric and magnetic form factors is obtained from the analysis of the antineutron polar angle distribution and found to be consistent with unity.

where  $\alpha$  is the fine structure constant,  $s = 4E_b^2 = E^2$ ,  $E_b$  is the beam energy,  $E$  is the center-of-mass (c.m.) energy,  $\beta = \sqrt{1 - 4m_n^2/s}$ ,  $m_n$  is the neutron mass,  $\gamma = E_b/m_n$ , and  $\theta$  is the antineutron production polar angle. The  $|G_E/G_M|$  ratio can be extracted from the analysis of the measured  $\cos\theta$  distribution. At the threshold  $|G_E| = |G_M|$ . The total cross section has the following form:

$$\sigma(s) = \frac{4\pi\alpha^2\beta}{3s} \left(1 + \frac{1}{2\gamma^2}\right) |F(s)|^2, \quad (2)$$

with

S.Serednyakov, n anti-n

Грант РФФ № 23-22-00011 (2023-2024 гг.)

Экспериментальное изучение процесса рождения пар нейтрон-антинейтрон в  $e^+e^-$  столкновениях в пороговой области

## Перспективы

### Коллайдер ВЭПП-2000 - “фабрика” $\text{anti-n}$ ! ?

ВЭПП-2000 – самый интенсивный в мире  
источник  $\text{антинейтронов}^*$

Процесс  $e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-n}$  имеет сечение  $\sigma_{nn} \sim 0.4 \cdot 10^{-33} \text{ cm}^2$

Светимость  $L \sim 5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Время 1 год -  $T = 10^7 \text{ sec}$

Число событий  $N = \sigma L T = 2 \cdot 10^5 \text{ nn /год/детектор}$

#### Параметры –

- импульс  $pn$  0-350 MeV/c;
- монохроматичность  $\sigma E \sim 1 \text{ MeV}$
- источник меченых  $n^*$
- источник точечный \*
- широкоугольный  $\Delta\Omega \sim 4\pi$

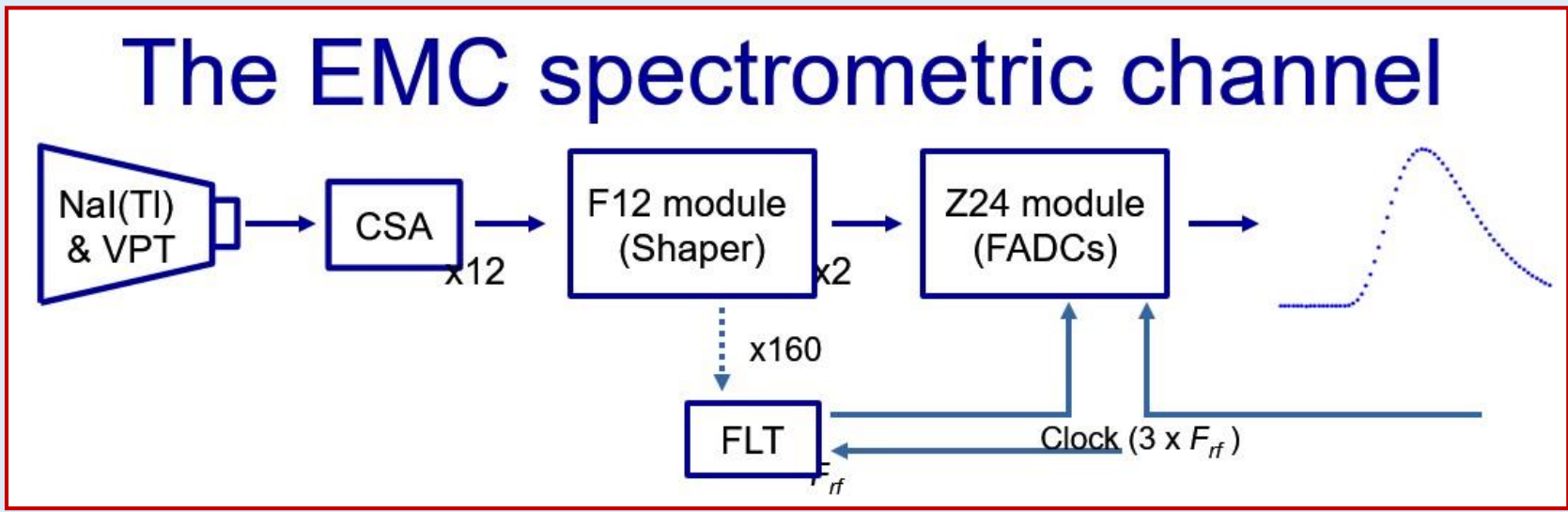
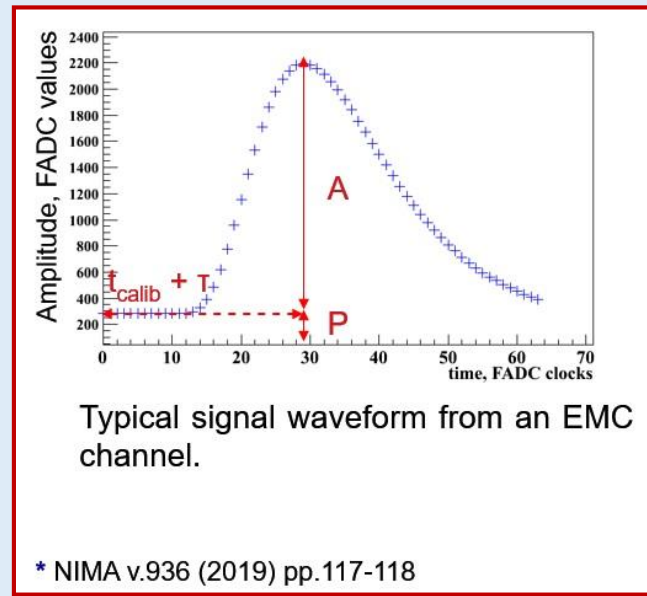
#### Возможности :

- новое измерение нейтронного формфактора на пороге;
- поиск узких нуклон-антинуклонных резонансов ,  $\Gamma \sim 1-10 \text{ МэВ}$ ;
- измерение сечений взаимодействие  $\text{anti-n}$  с разными веществами

Спасибо за внимание !

# BackUps

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



N.A. Melnikova

$e^+e^- \rightarrow NN$  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 -  $G_E/G_M$

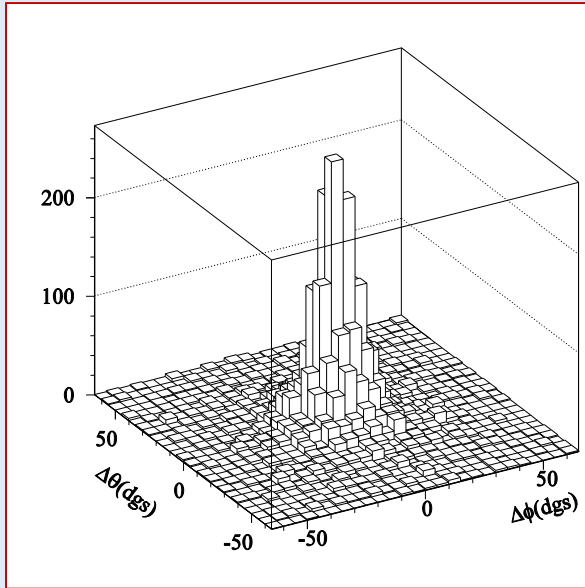
$C=1$  for neutrons

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

$F_n = -F_p / 2$

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

## Selection of $n$ +anti- $n$ events



### Key features

(No tracks\*, no photons\*, no kinematic  $\chi^2$ )

- 1 - veto  $\mu$  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  $\chi^2$  :  $> -2.5$

### Selection results:

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

### Selection efficiency :

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

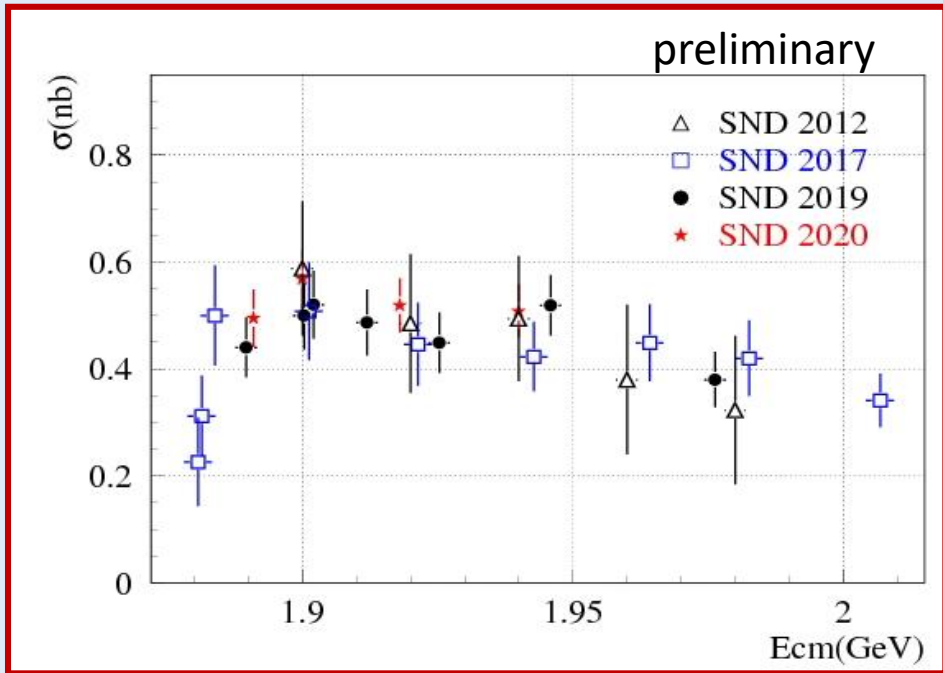


## Systematic uncertainties in $e^+e^- \rightarrow n + \text{anti-n}$ cross section

1. Detection efficiency uncertainty  $\sim 10\%$
2. |GE/GM| uncertainty  $\sim 1-5\%$
2. Physical and beam background subtraction  $\sim 5-10\%$
3. Energy calibration  $\sim 3\%$
4. Luminosity and radiative corrections  $\sim 3-5\%$
5. Total systematics  $\sim 15\%$

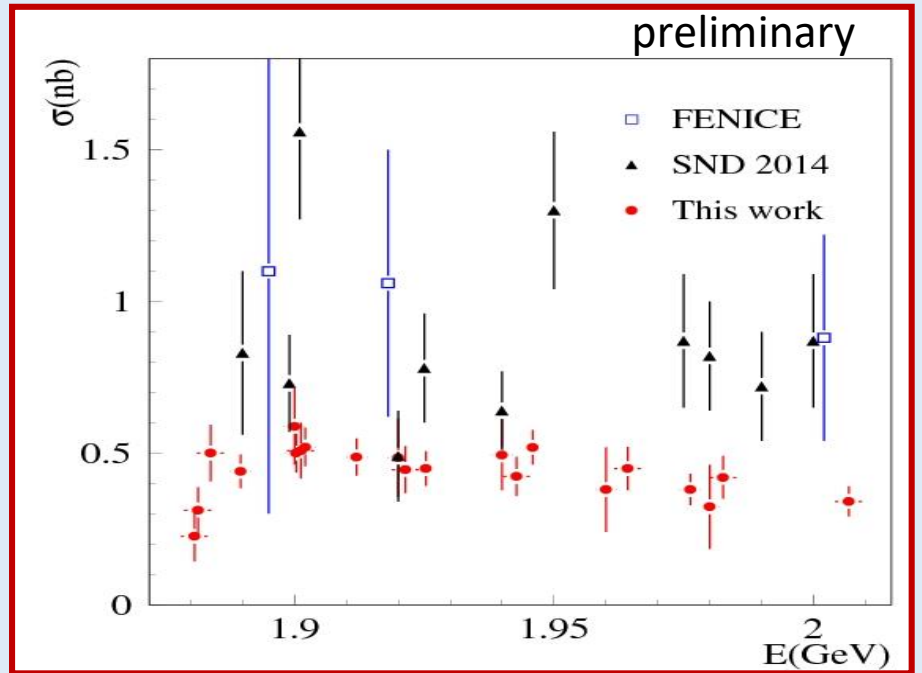
$e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-}n$  cross sections, this work

Runs 2012,2017, 2019,2020 comparison



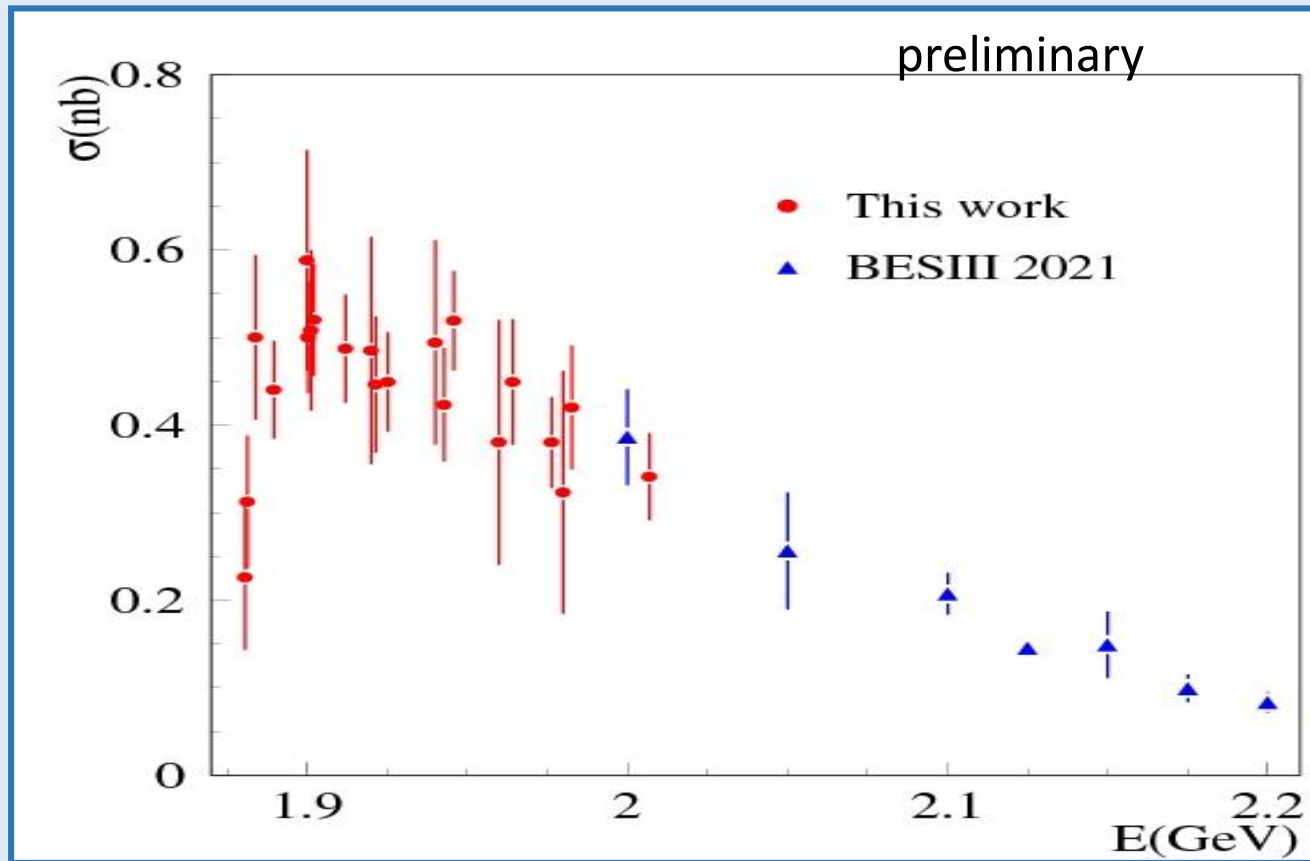
Runs 2012 - reanalyzed

Comparison with previous works up to 2 GeV

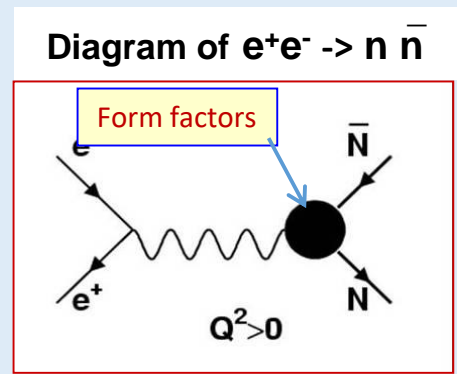


$e^+e^- \rightarrow n \text{ anti-}n$  cross sections, this work

Comparison between SND and BESIII



**Cosθ distributions. Extraction of  $|G_E|/|G_M|$ .**



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

S, D – waves,

two form factors  
 e.g.  $G_E, G_M$

Expression for nucleon pair  $e^+e^-$  production,  $C=1$  for neutrons

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

$m$  – cms energy  
 $\beta$  – nucleon velocity  
 $\theta$  – polar angle  
 $m_b$  – nucleon mass