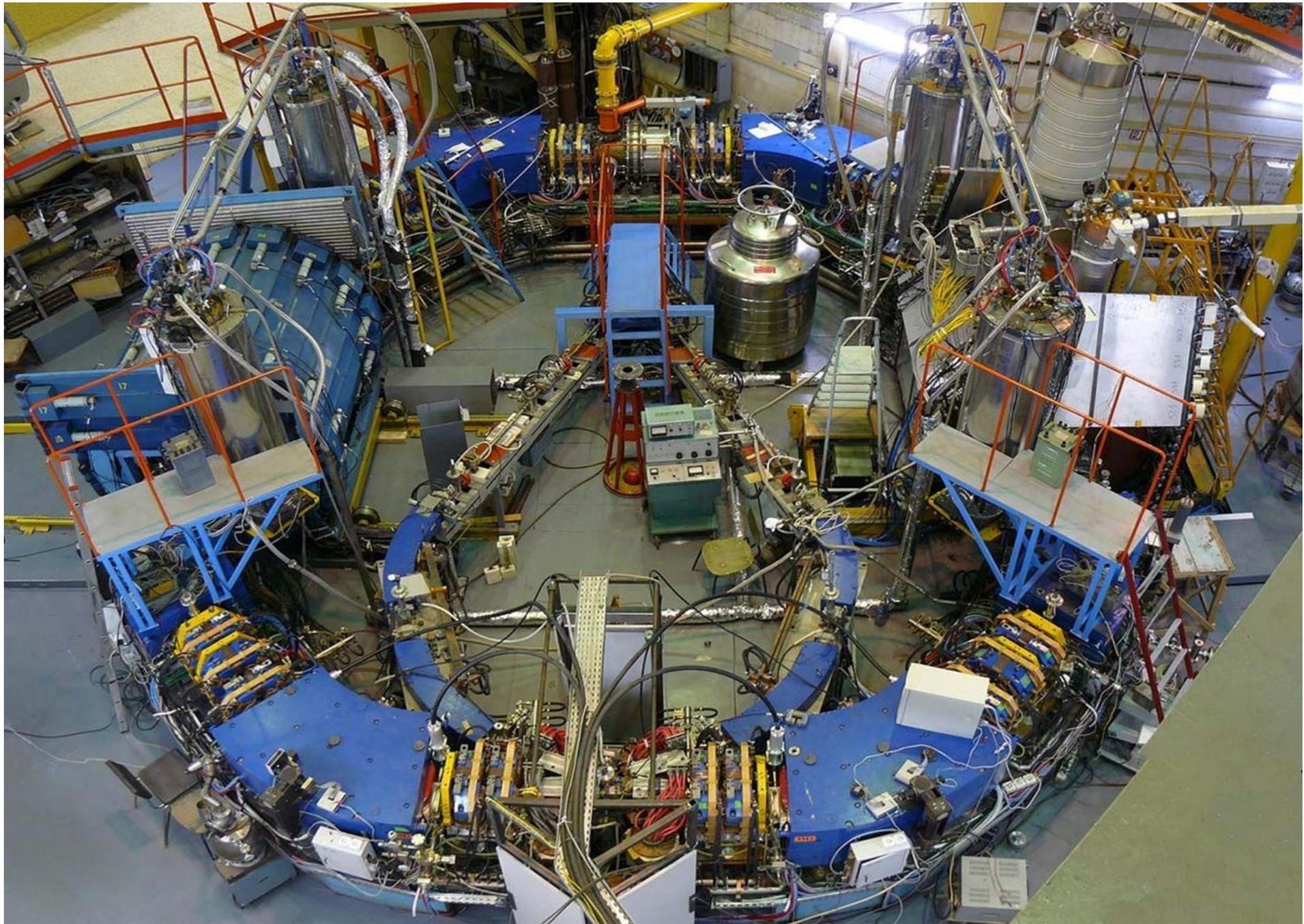


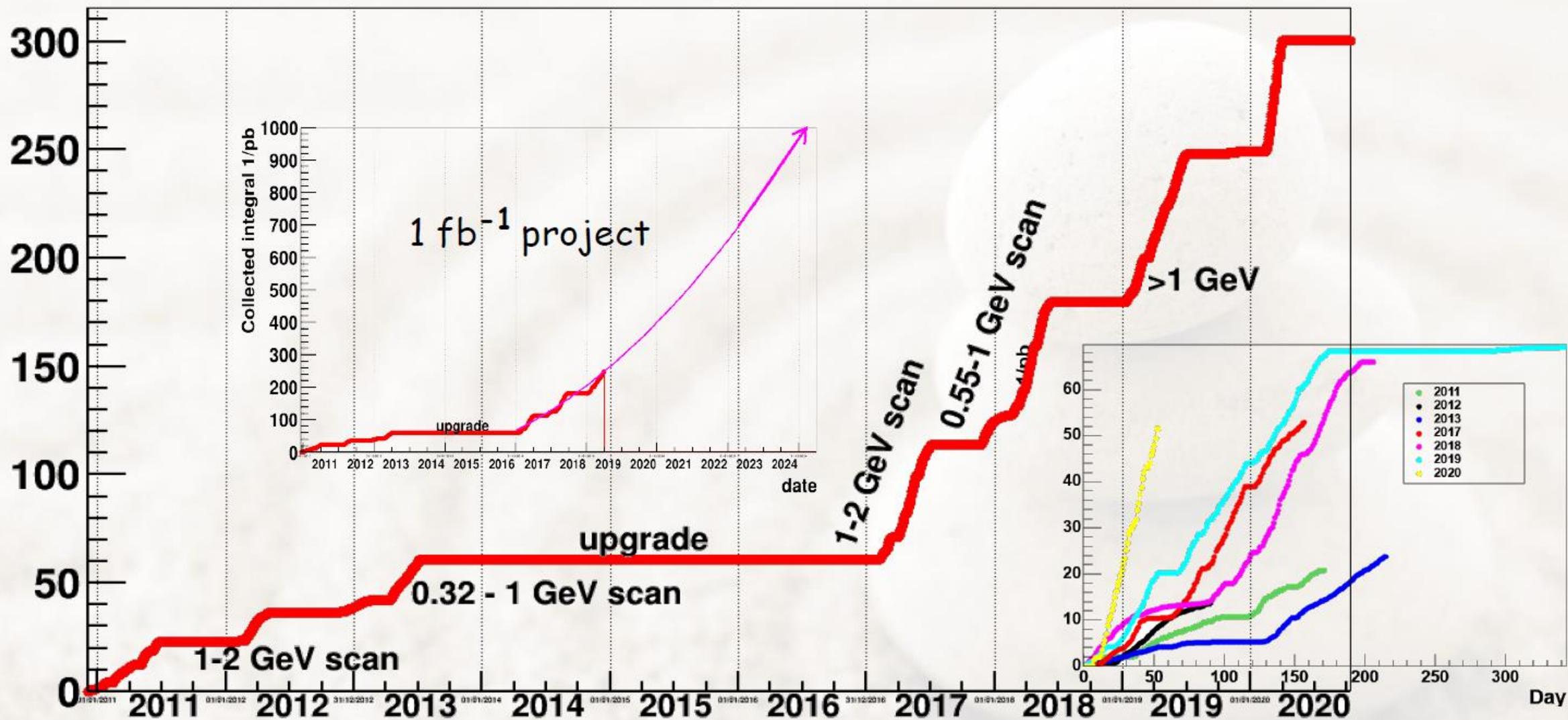
Физическая программа ВЭПП-2000 (КМД-3 и СНД)

В.Дружинин

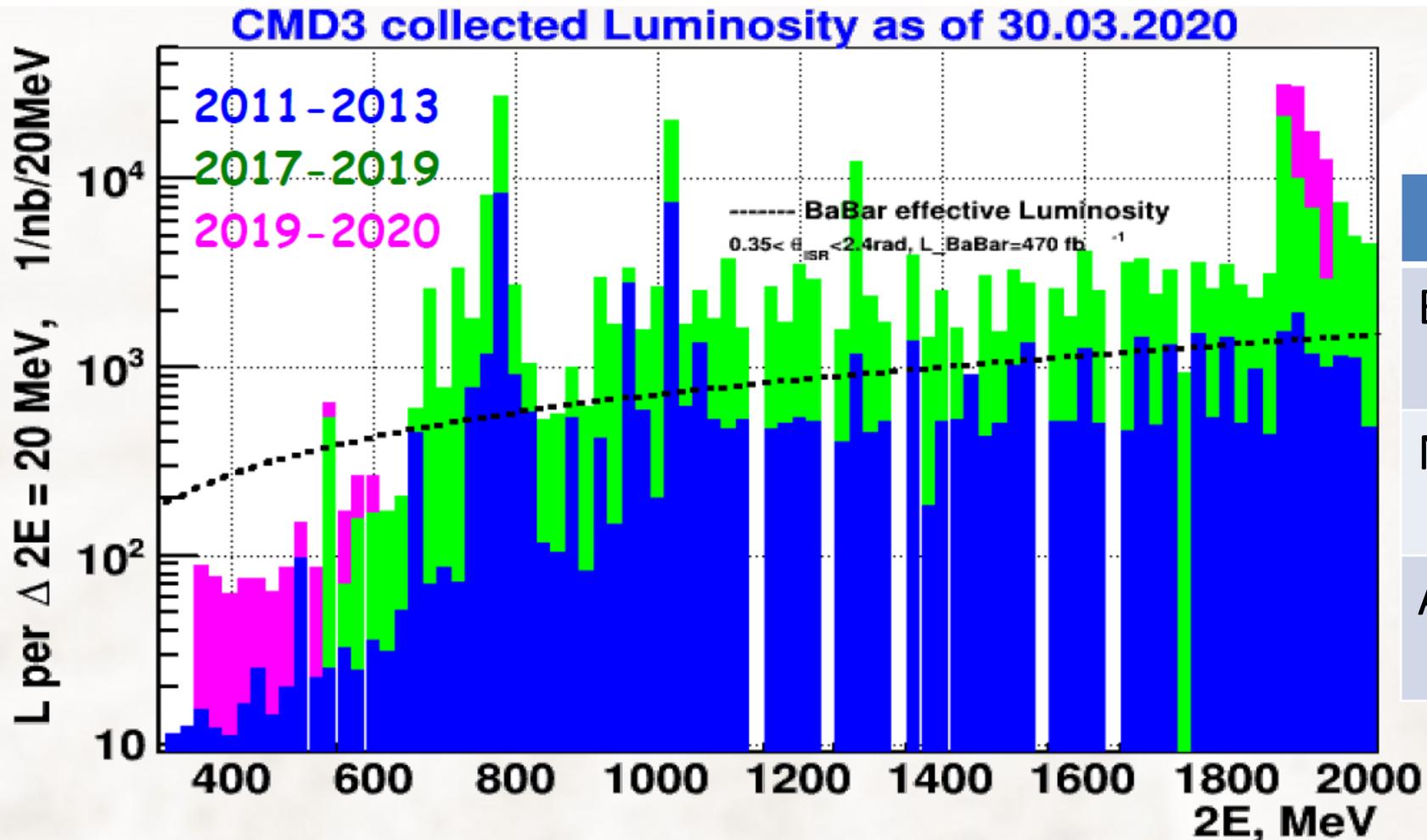
ИЯФ СО РАН , 21 мая 2021 г.



Накопленная статистика



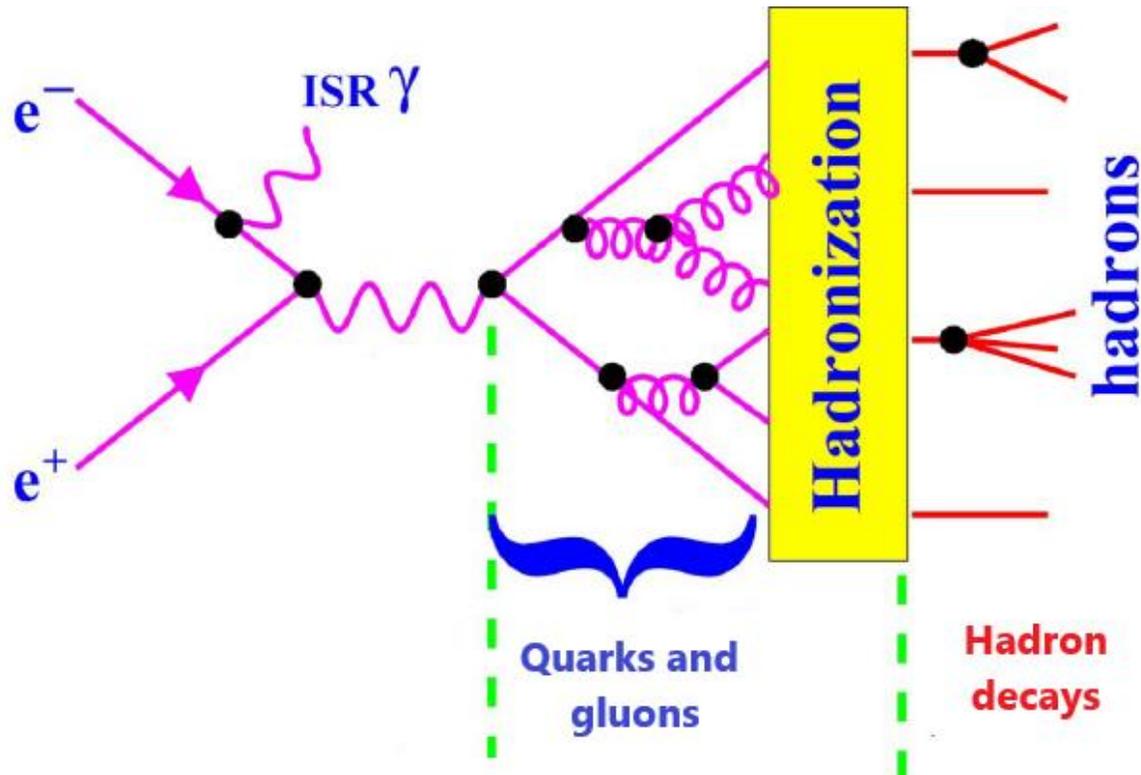
Накопленная статистика



ВЭПП-2000 / ВЭПП-2М

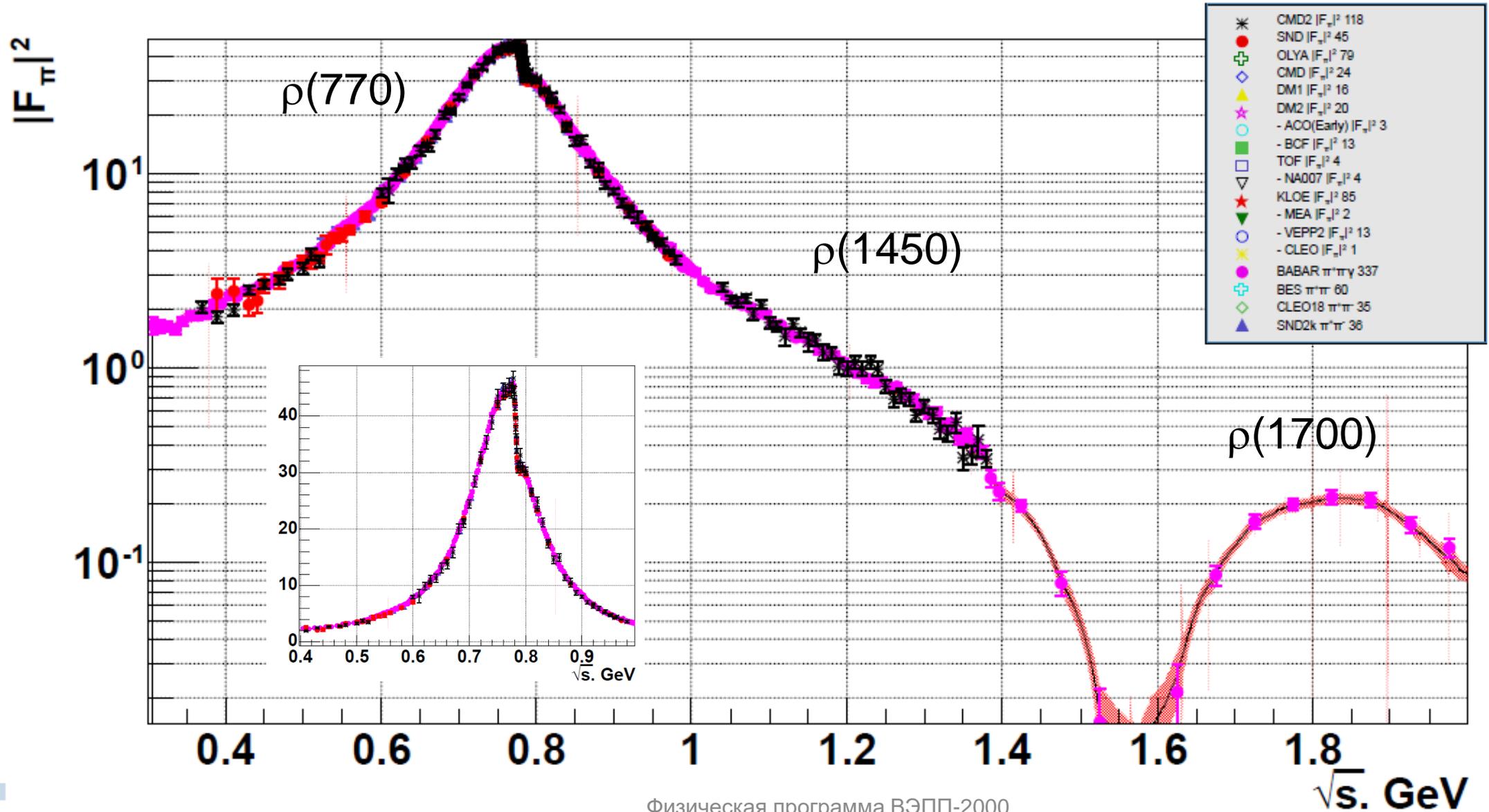
	$E_{\text{cm}}, \text{ GeV}$	$IL, \text{ pb}^{-1}$
Below ϕ	0.30-0.97	77/9
Near ϕ	0.98-1.05	31/13
Above ϕ	1.05-2.00	209/9

Физика на ВЭПП-2000 (0.3-2.0 ГэВ)

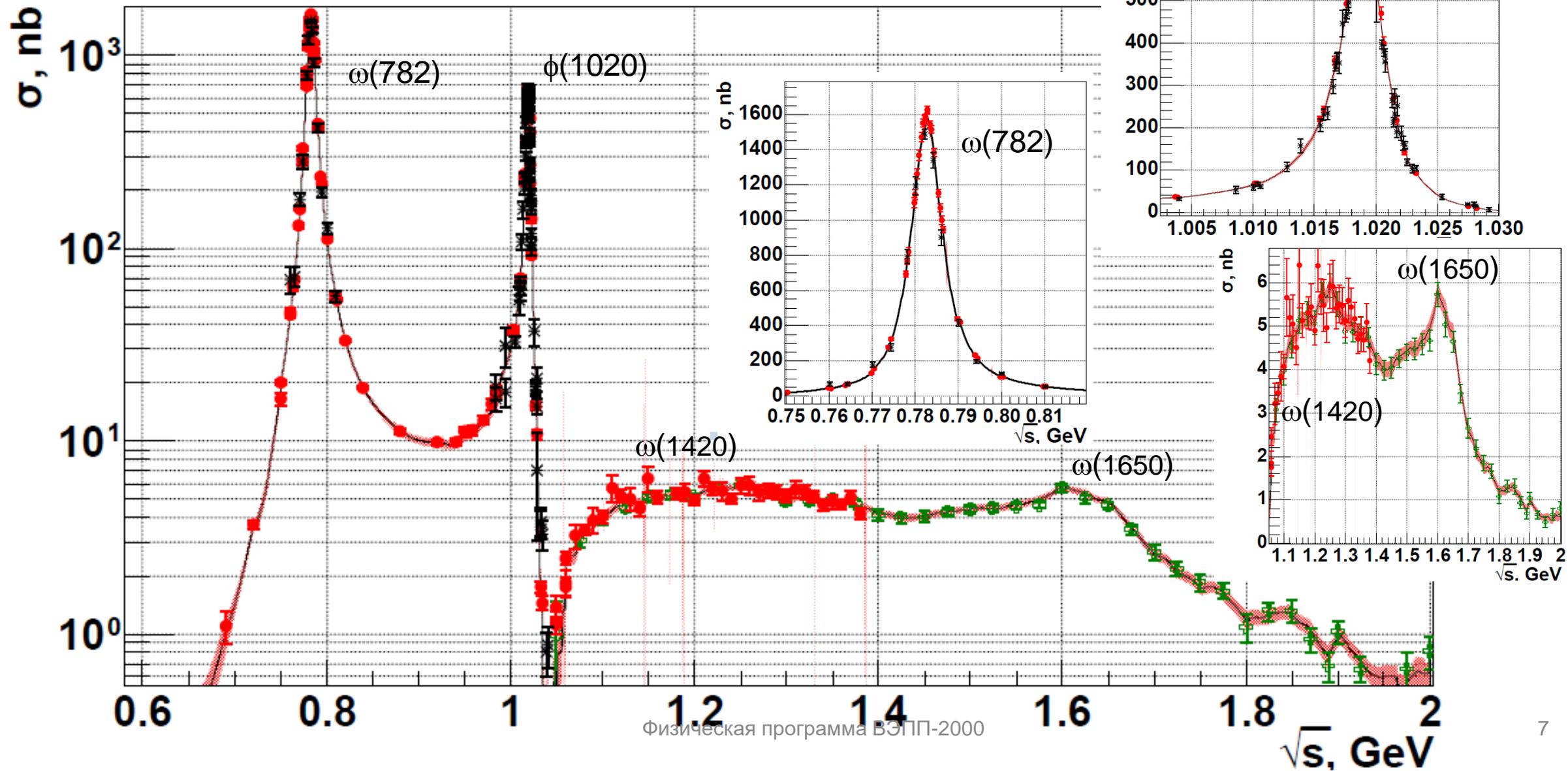


- ✓ Первичная реакция $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$, $q=u,d,s$
- ✓ ВЭПП-2000 работает в области резонансов в системе $q\bar{q}$
- ✓ Три семейства векторных резонансов:
 - ✓ $\rho(770)$, $\rho(1450)$, $\rho(1700)$
 - ✓ $\omega(782)$, $\omega(1420)$, $\omega(1650)$
 - ✓ $\phi(1020)$, $\phi(1680)$

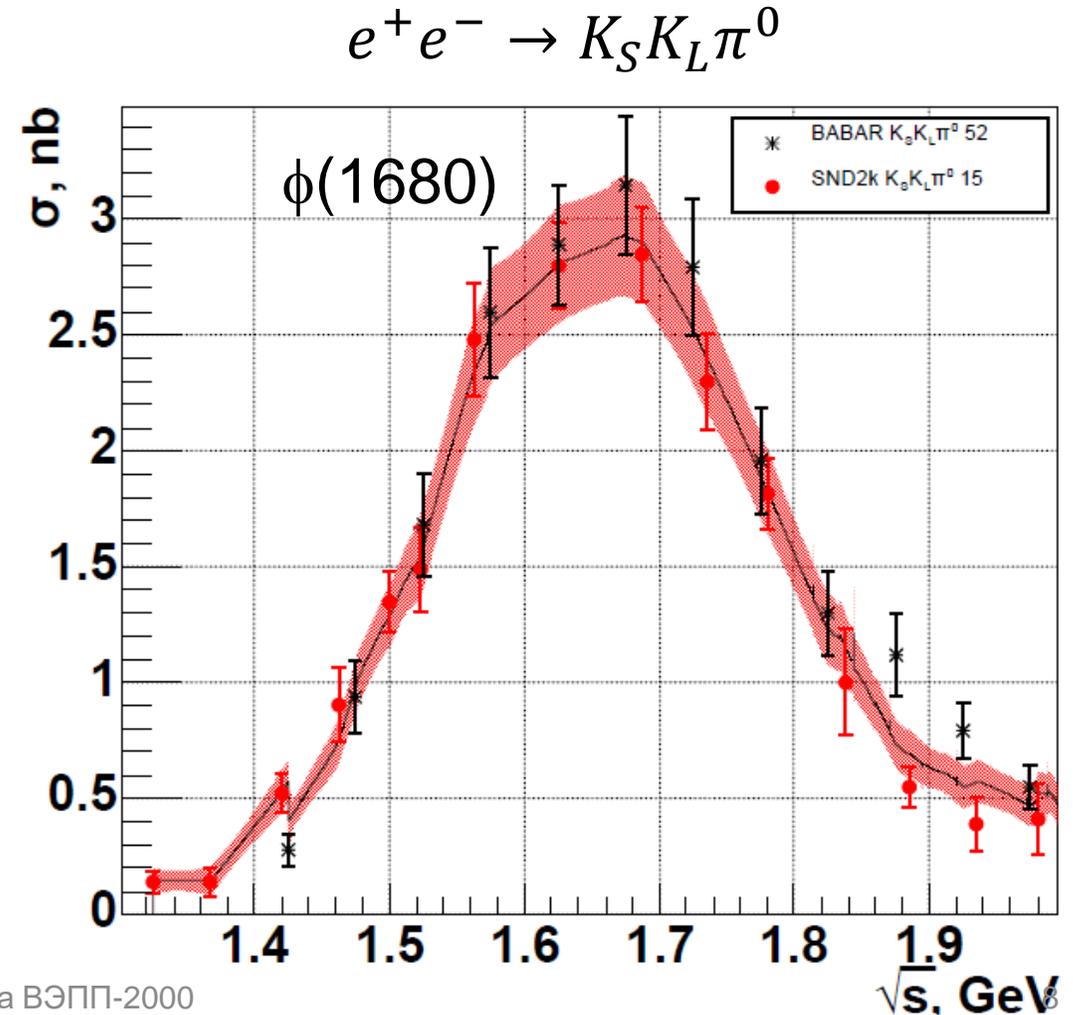
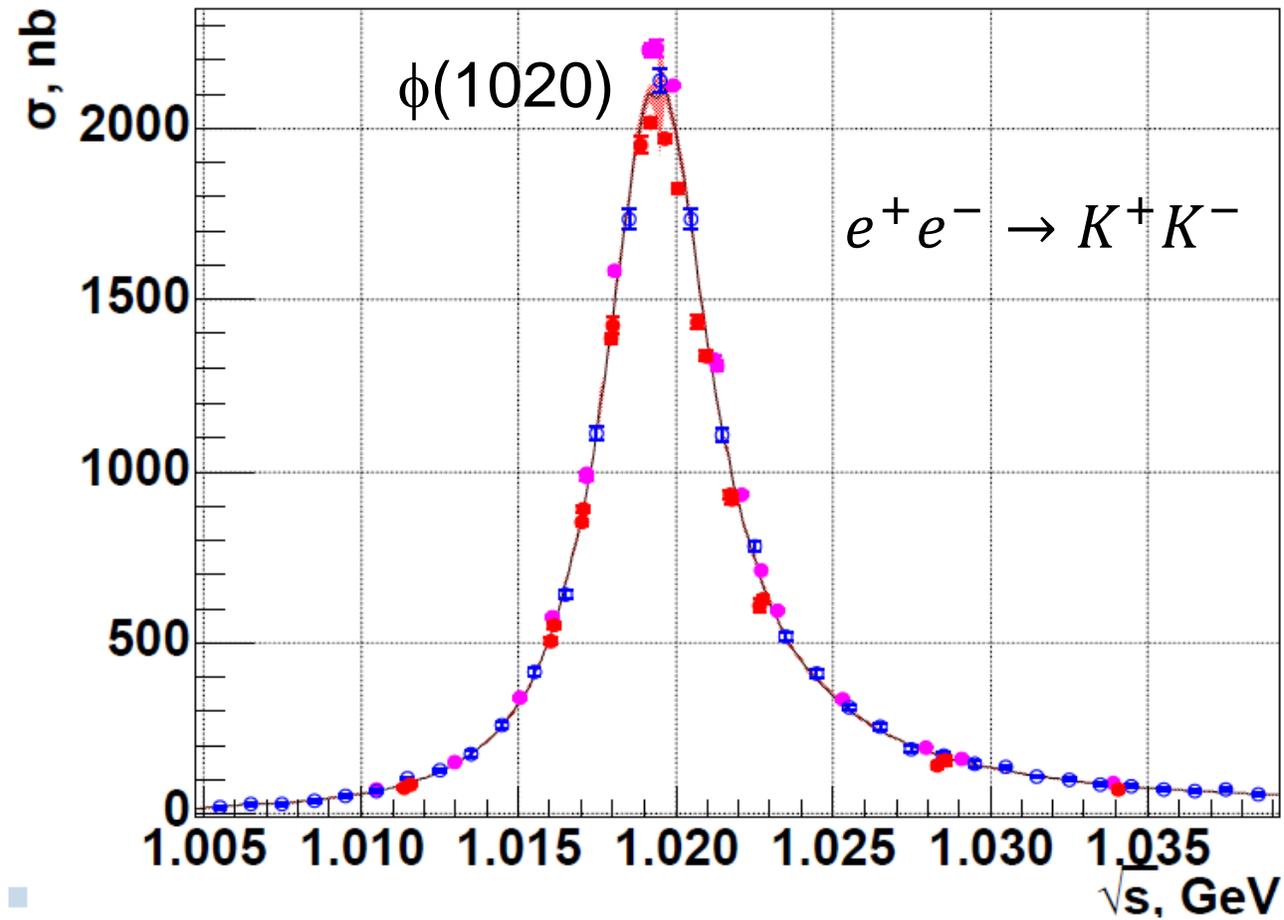
$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$$



$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$$



$$e^+e^- \rightarrow K\bar{K}, K\bar{K}\pi$$



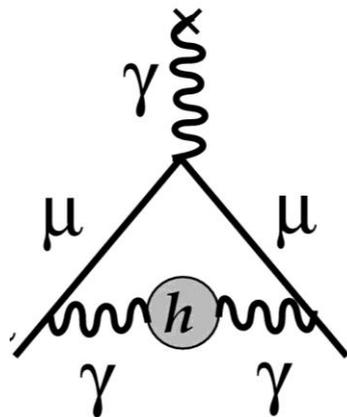
Измерение адронных сечений

Измерение полного адронного сечения

- ✓ В резонансной области (ниже 2 ГэВ) полное адронное сечение не может быть вычислено в рамках КХД
- ✓ Это сечение необходимо для вычисления в рамках Стандартной модели таких параметров как бегущая константа электромагнитных взаимодействий и аномальный магнитный момент мюона (вклад адронов в поляризацию вакуума)

$$\alpha(E) = \frac{\alpha(0)}{1 - \Delta\alpha(E)}, \quad \Delta\alpha = \sum_f \text{loop diagram}$$

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$



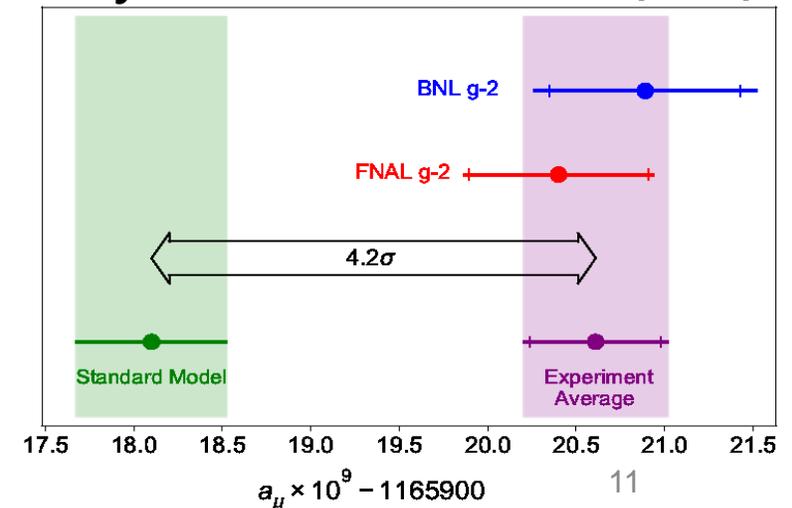
$$a_\mu^{had(LO)} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{R(s)\hat{K}(s)}{s^2}$$

- ✓ Для аномального магнитного момента мюона имеется разница между расчетом и измерением на уровне около 4.2 σ.

Individual SM contributions $\times 10^{-10}$

a_μ^{QED}	11658471.893 ± 0.010
a_μ^{EW}	15.4 ± 0.1
$a_\mu^{\text{had,LO-VP}}$	693.1 ± 4.0
$a_\mu^{\text{had,HQ-VP}}$	-8.59 ± 0.07
$a_\mu^{\text{had,LbLs}}$	9.4 ± 1.9
$a_\mu^{\text{total-SM}}$	11659181.0 ± 4.3
$a_\mu^{\text{BNL-FNAL}}$	11659206.1 ± 4.1
Data - SM	$25.1 \pm 5.9 (4.2\sigma)$

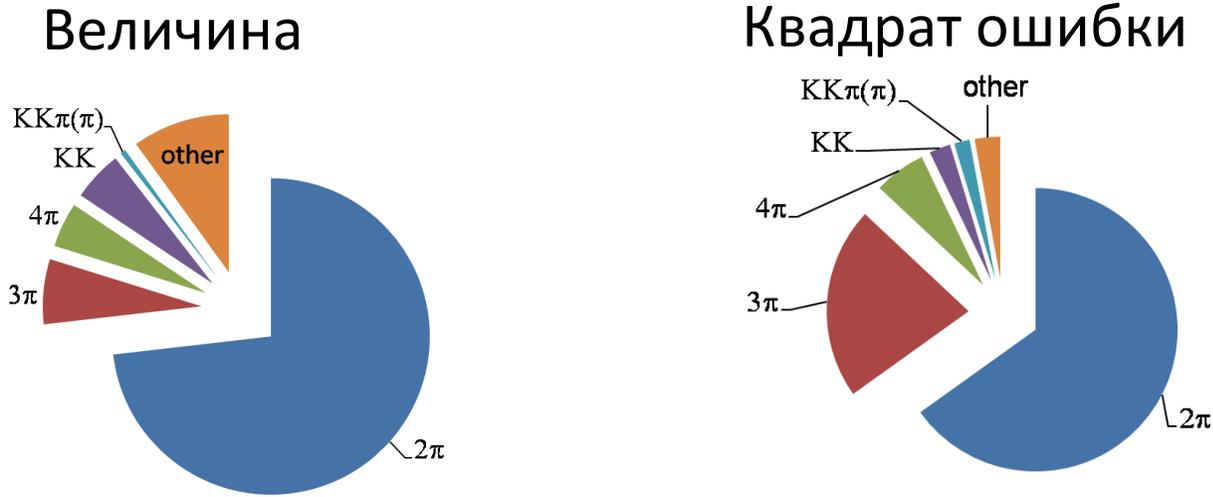
Phys. Rev. Lett. 126, 141801 (2021)



Измерение полного адронного сечения

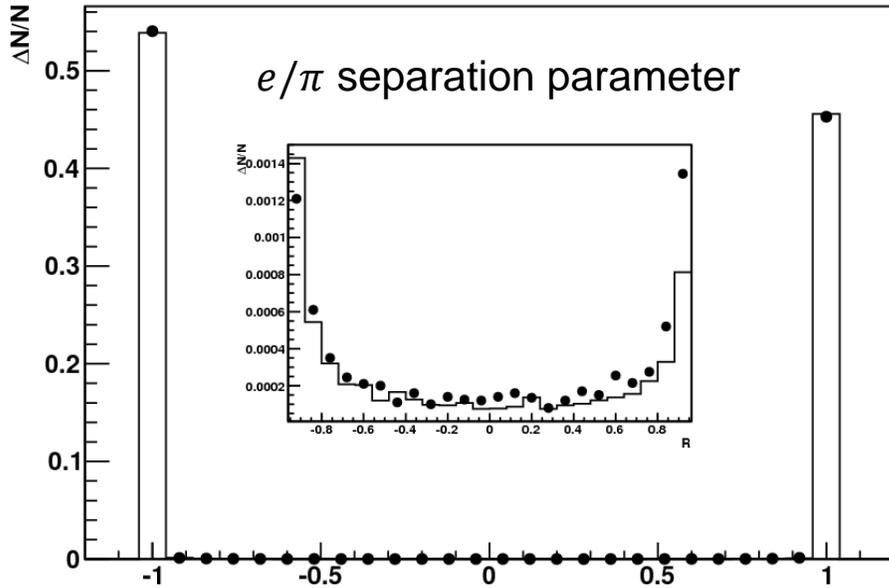
- ✓ Ожидается улучшение точности измерения a_μ в ~ 3 раза.
- ✓ Нужно улучшить точность полного адронного сечения.

Вклад различных реакций в $a_\mu^{\text{had,HQ-VP}}$



- ✓ Требуется измерить все адронные сечения ниже 2 ГэВ, а сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с точностью лучше 0.5%.

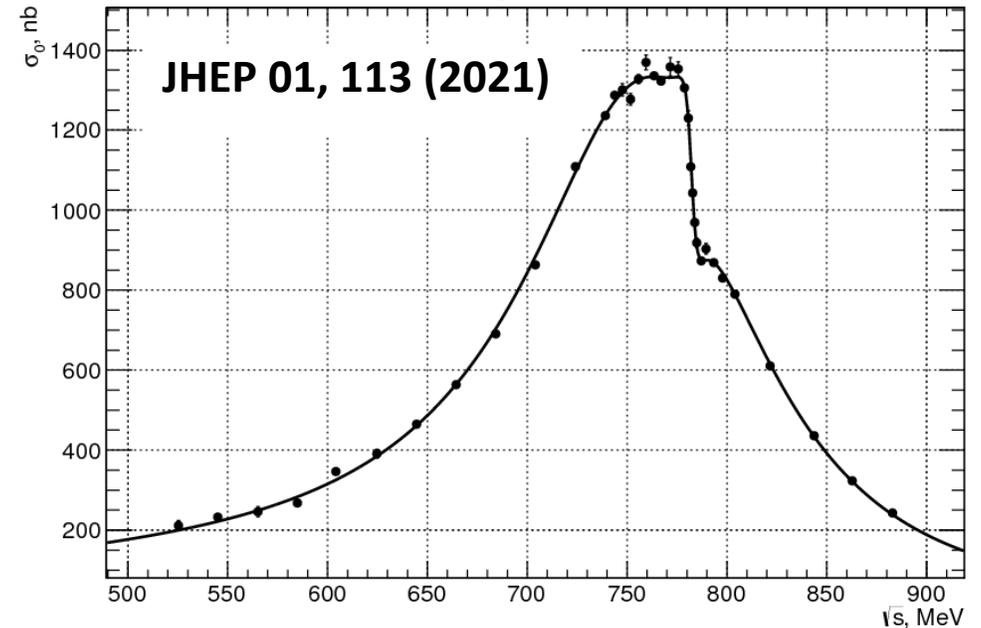
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на СНД



The analysis is based on 4.7 pb⁻¹ data (1/10 full SND data set) recorded in 2013

$$0.53 < \sqrt{s} < 0.88 \text{ GeV}$$

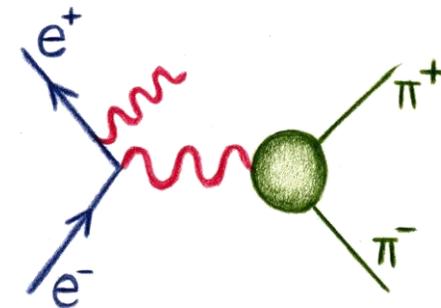
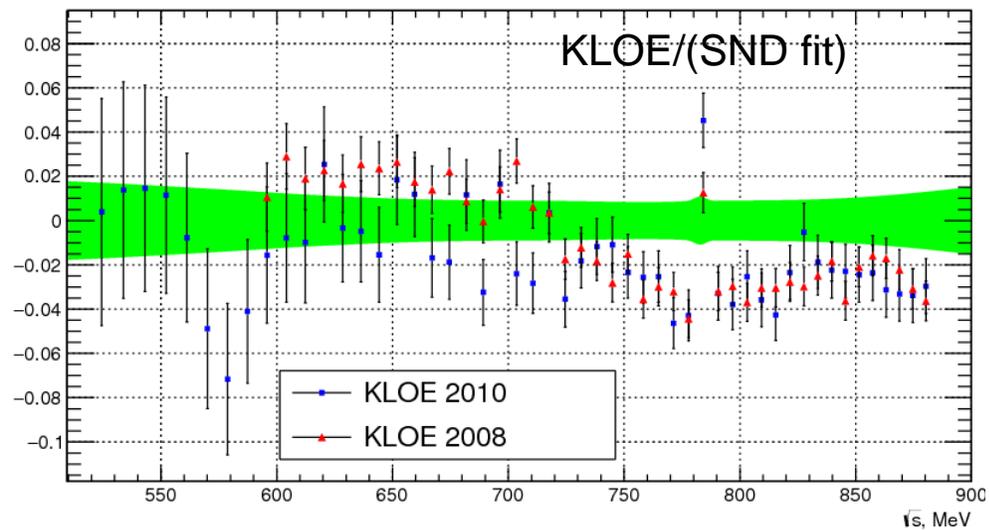
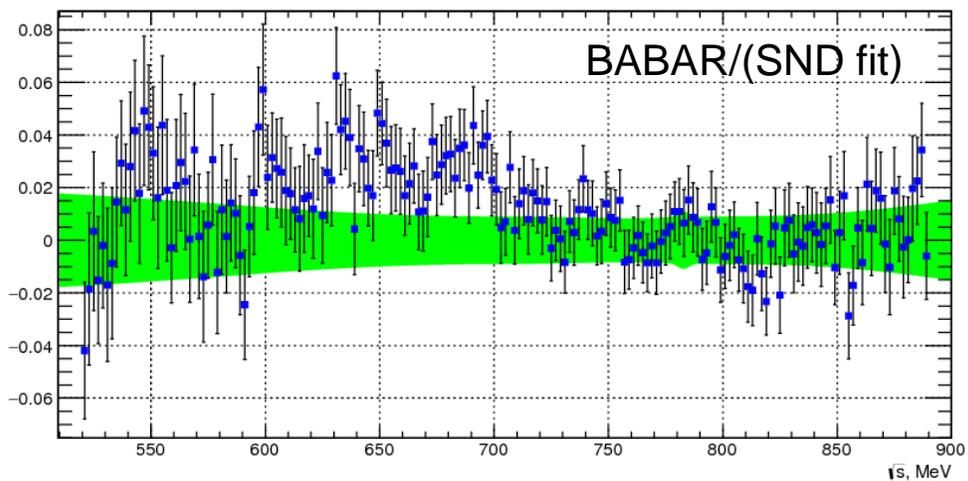
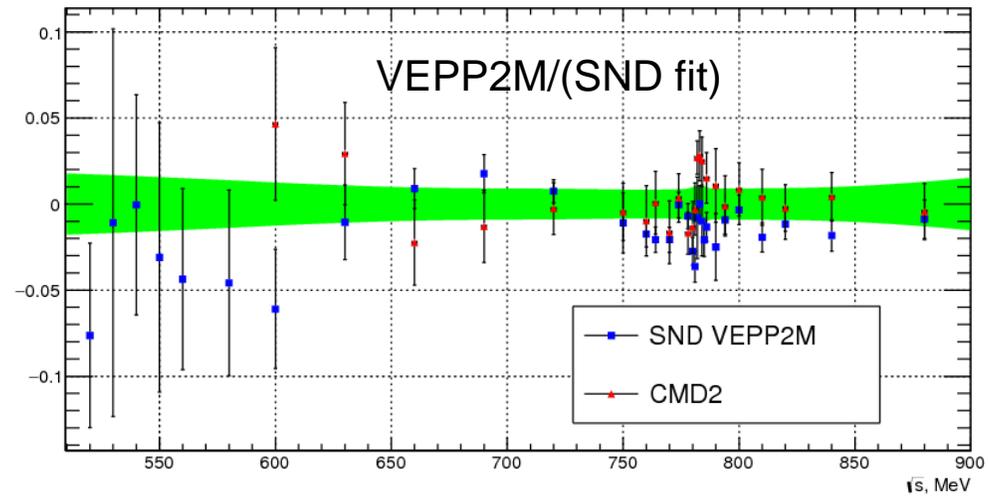
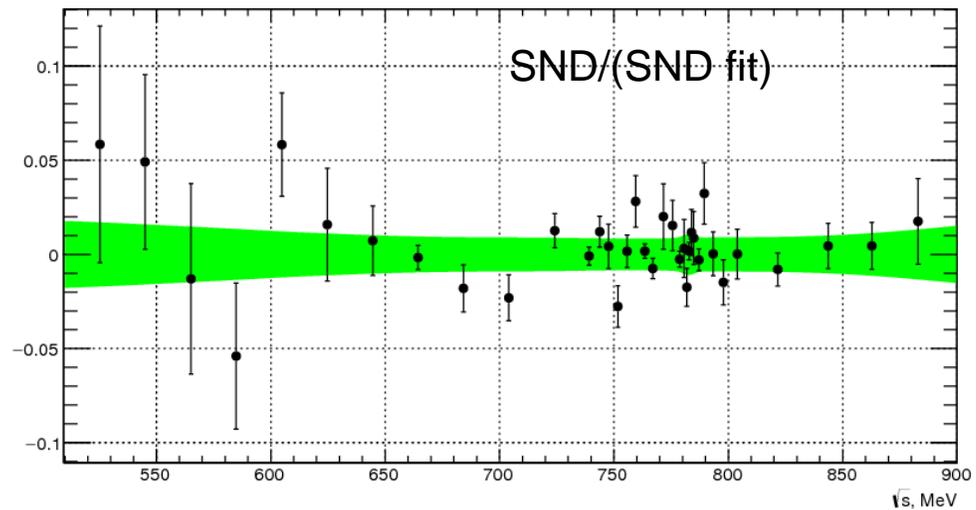
	$a_\mu(\pi^+\pi^-) \times 10^{10}$
SND @ VEPP-2000	$411.8 \pm 1.0 \pm 3.7$
SND @ VEPP-2M	$408.9 \pm 1.3 \pm 5.3$
BABAR	$414.9 \pm 0.3 \pm 2.1$



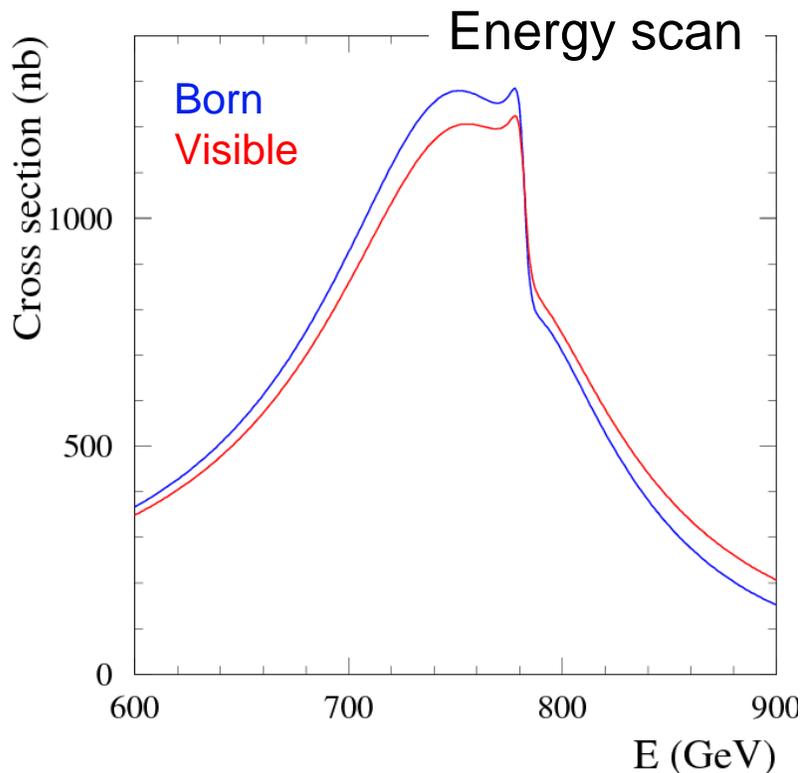
Systematic uncertainty on the cross section (%)

Source	< 0.6 GeV	0.6 - 0.9 GeV
Trigger	0.5	0.5
Selection criteria	0.6	0.6
e/π separation	0.5	0.1
Nucl. interaction	0.2	0.2
Theory	0.2	0.2
Total	0.9	0.8

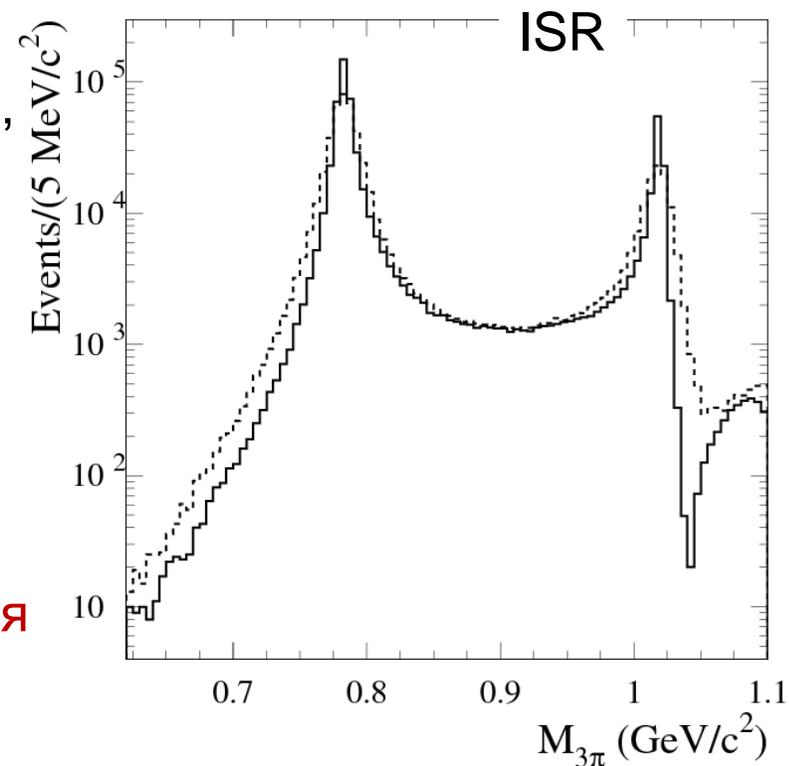
$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$$



Direct scan vs ISR



- ❑ В обоих подходах, чтобы получить борновское сечение, надо решить интегральное уравнение.
- ❑ Функция $W(x, E)$ хорошо известна теоретически.
- ❑ Функция разрешения детектора $R(M_m, M_t)$ определяется по моделированию и проверяется по данным на узких резонансах.



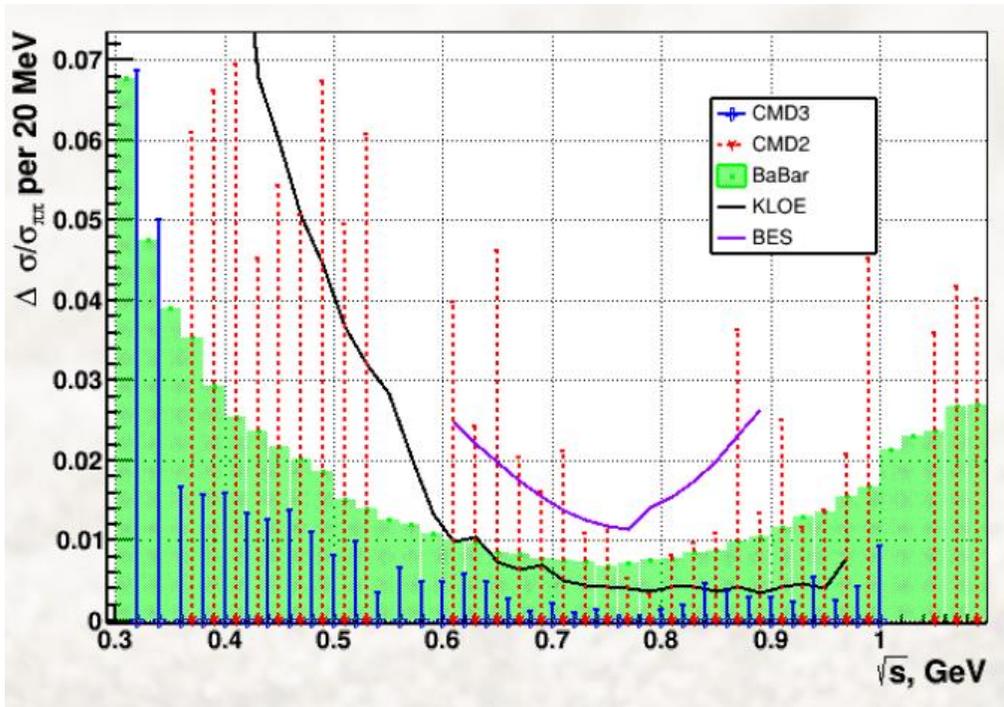
$$\sigma_{vis} = \int_0^{x_m} W(x, E) \sigma_b(\sqrt{E(1-x)}) dx$$

$$\frac{dN}{dM_m} = \int_0^\infty R(M_m, M_t) \frac{dN}{dM_t} dM_t$$

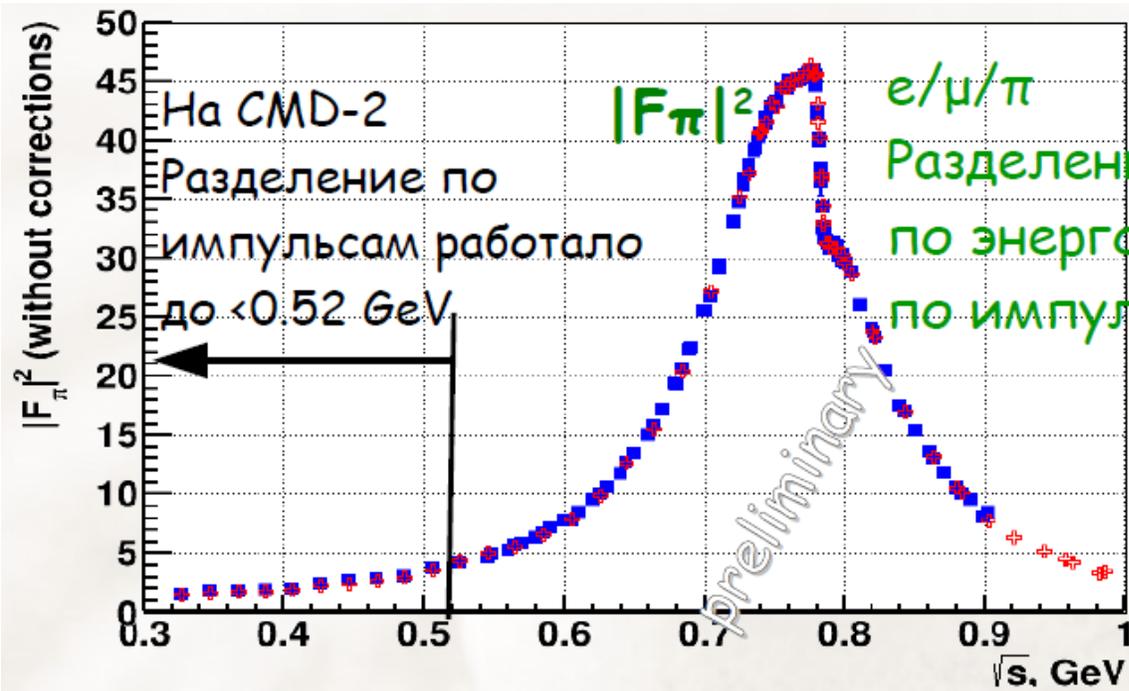
$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

- Мы должны не только измерить сечение с высокой точностью, но и убедить всех, что наше измерение правильное
- **Статья с детальным описанием методики измерения и оценки систематических ошибок**
 - e/π/μ разделение
 - Разрешение и точность измерения полярного угла
 - Учет радиационных поправок к начальному состоянию
 - Учет излучения из конечного состояния
 - Измерение сечения $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$
 - ...

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на КМД-3

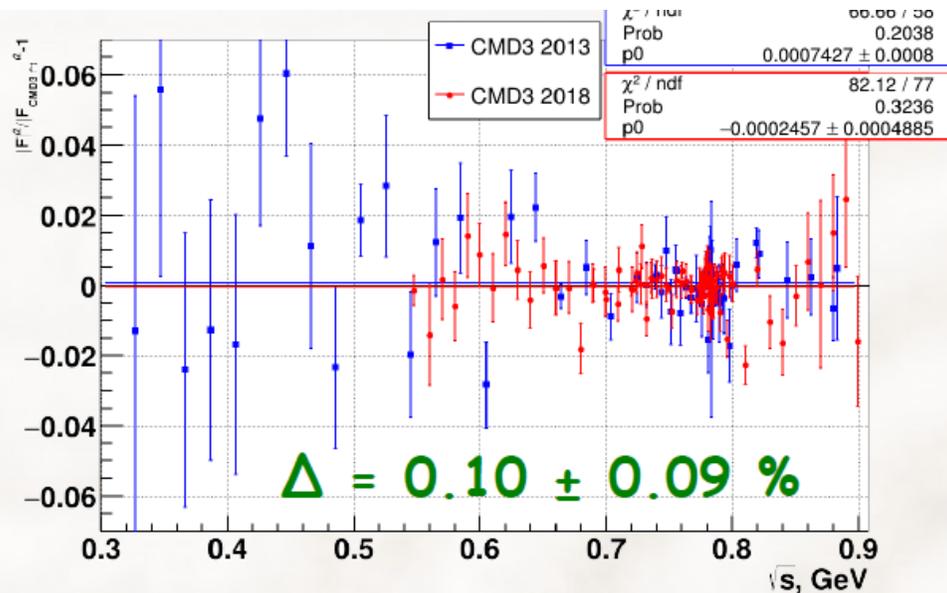


Ожидаемая статистическая точность

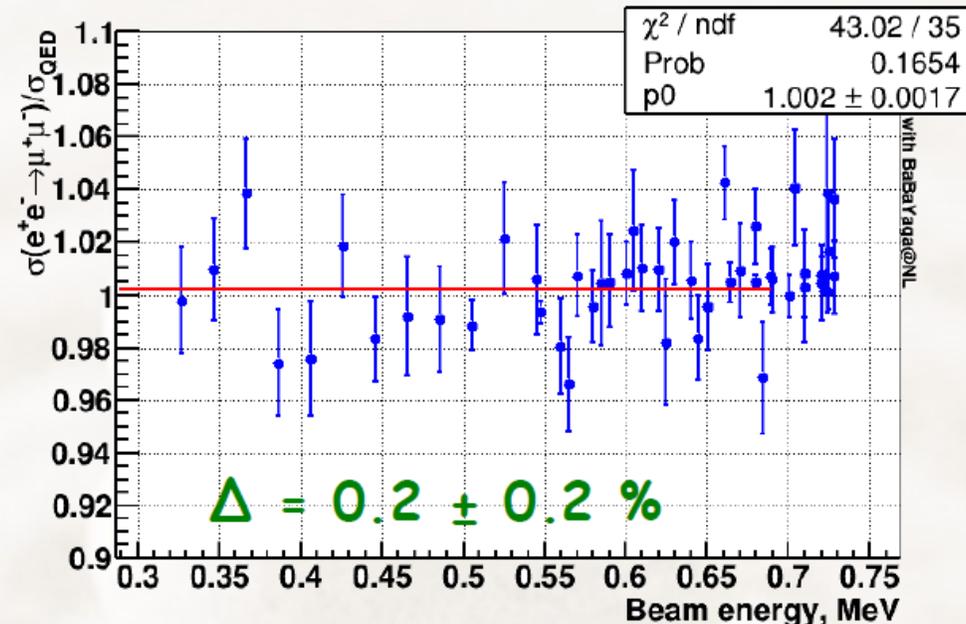


$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на КМД-3

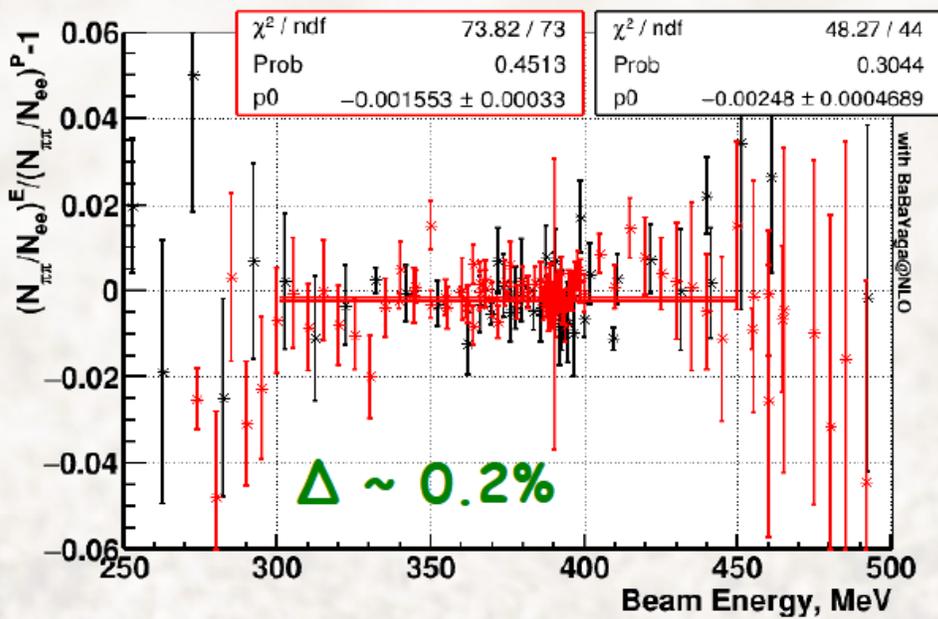
Сравнение RHO2013/2018
(PID по импульсам)



Количество мюонов/QED



Два метода разделения
энерговыведения/импульсы

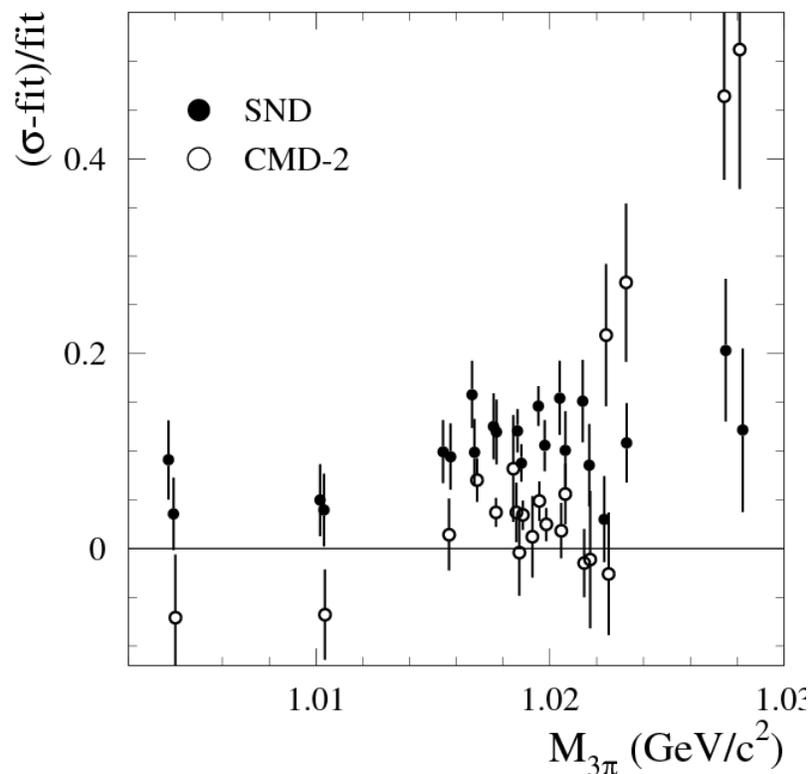
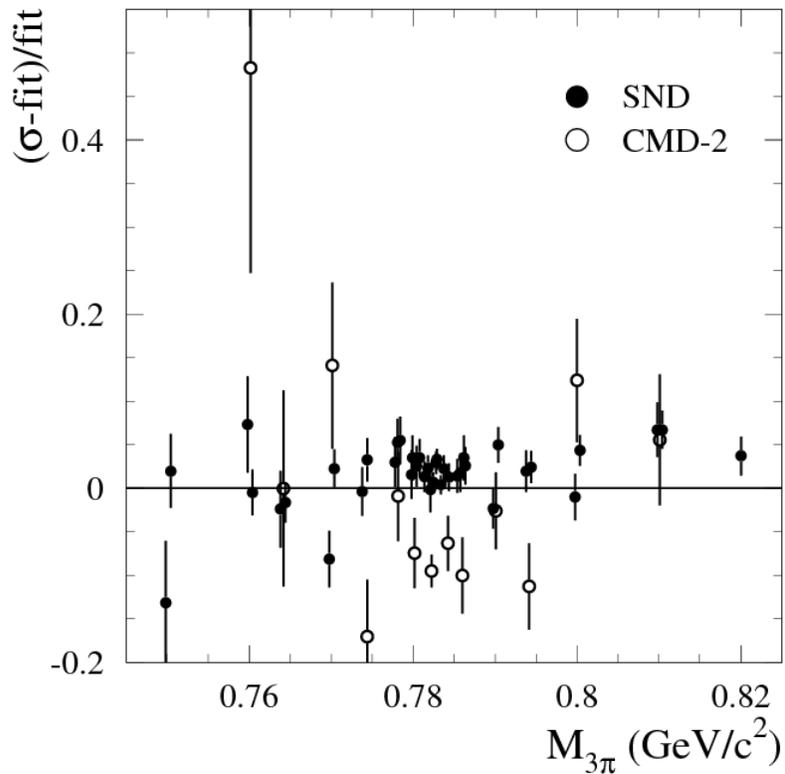


Анализ почти на финишной прямой
Идет детальный анализ систематик
Есть вопросы к телесному углу/
генератору $\pi^+\pi^-$ (экспериментальной асимметрии)
Хочется получить систематику $\sim 0.5\%$

Сейчас идет переобработка после перекалибровки
ДК, улучшения в анализе где часть проблемных
эффектов будет подавлена

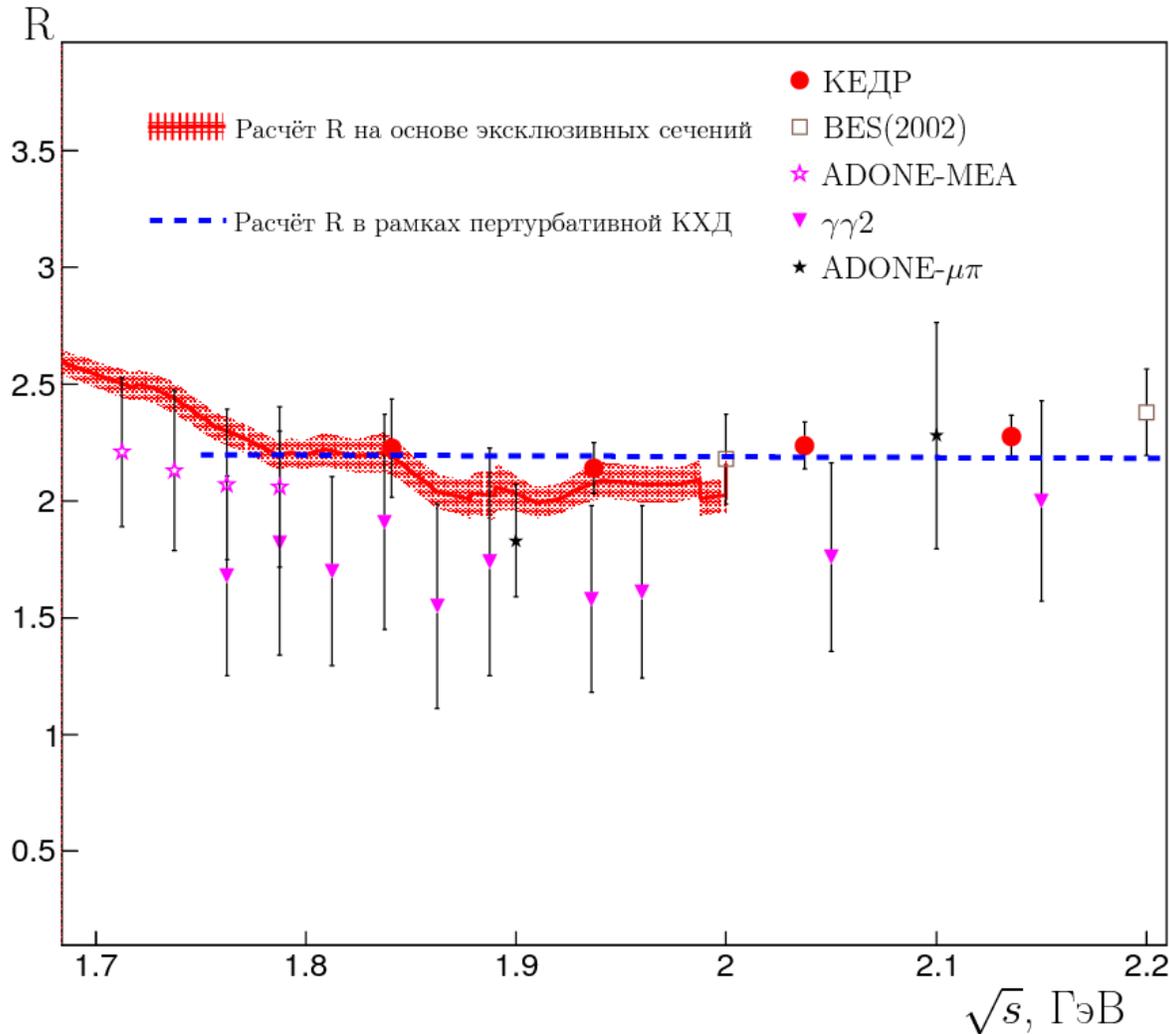
$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

- ✓ The process $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ gives the second largest contribution into $a_\mu^{\text{had,LO-VP}}$ and its error.
- ✓ Currently $a_\mu^{3\pi}$ is known with about 3% accuracy
- ✓ New measurements are expected from BES-III and BABAR



The difference between SND and CMD-2 measurements is about 8% at the $\omega(782)$ and about 8% at the $\phi(1020)$.

R measurement near 2 GeV



- Too many multihadron reactions contribute to the total hadronic cross section above 1.8 GeV
- Example: recent measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0$ cross section (0.6 nb near 2 GeV) at BABAR
- Inclusive measurement above 1.7 GeV; at SND: $1h^\pm + n\gamma$ ($n>1$), $2h^\pm + n\gamma$ ($n>0$), $n\gamma$ ($n>4$)
- Study of fine structure in R near $N\bar{N}$ threshold

Адронная спектроскопия

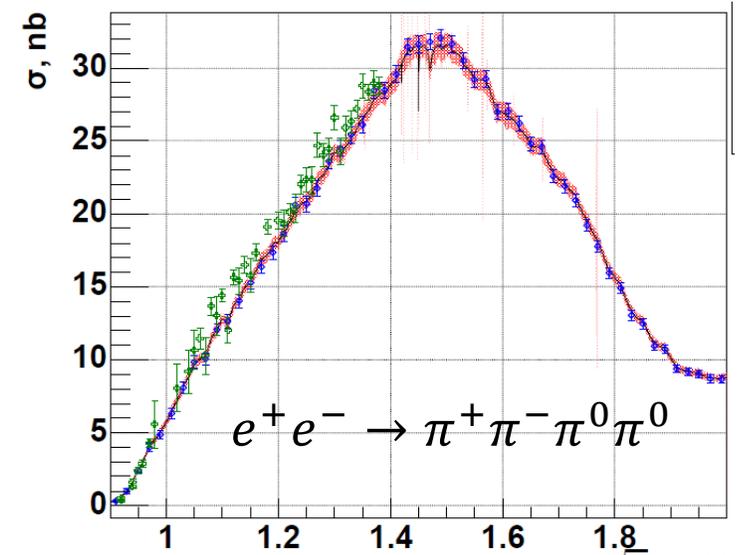
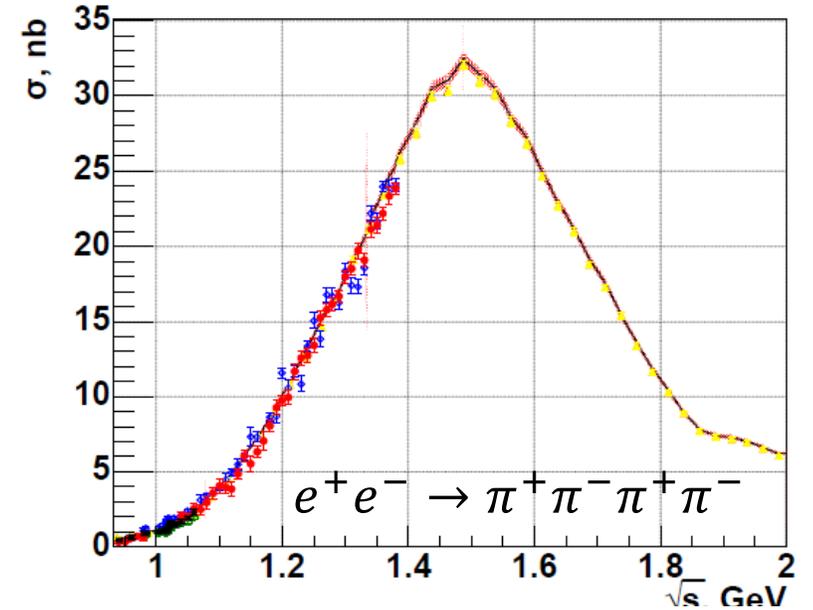
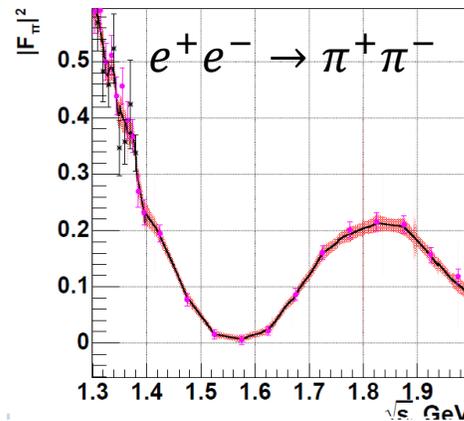
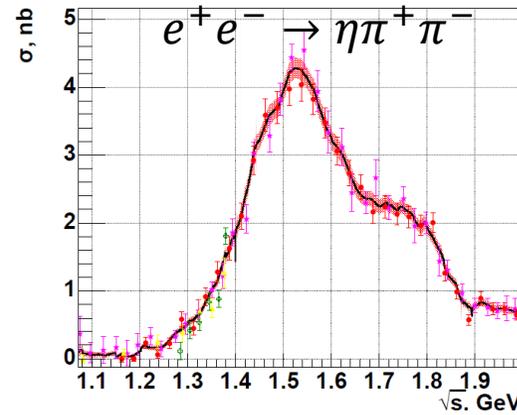
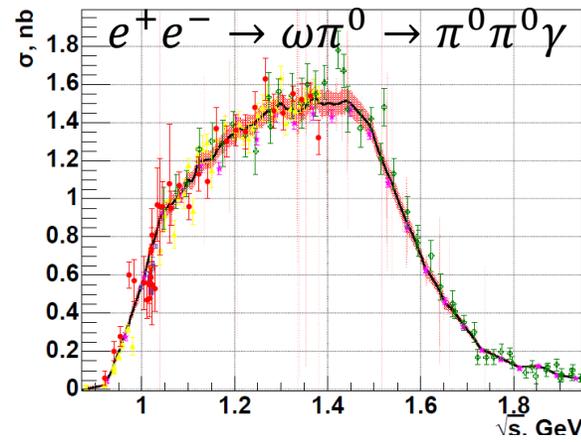
Спектроскопия ρ , ω , ϕ

Прецизионное измерение сечений $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ + **точное измерение энергии.**

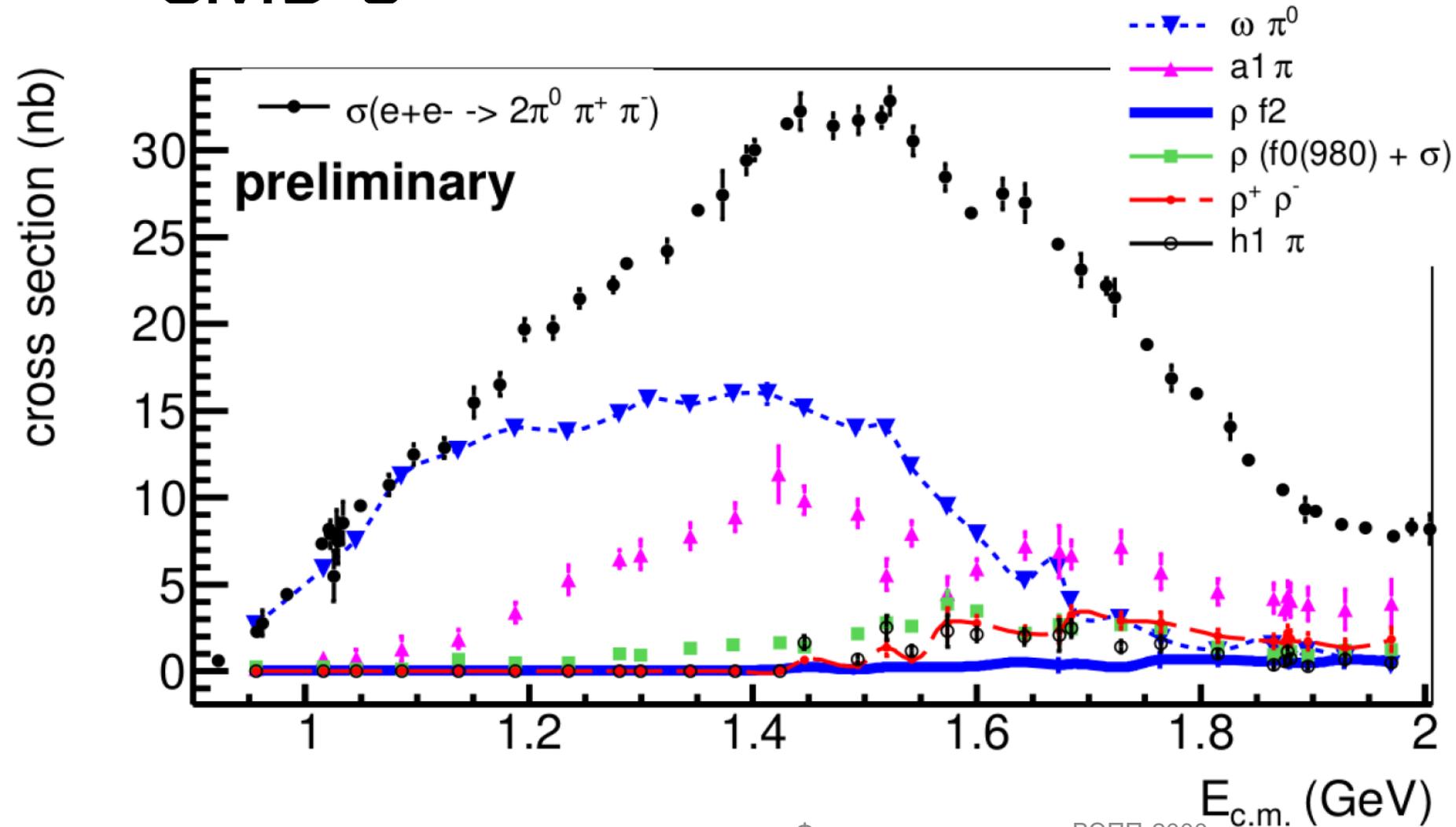
- ✓ Уточнение массы и ширины ω .
- ✓ Прецизионное измерение вероятностей распадов ρ , ω и ϕ и фаз интерференции между ними (интерференция \rightarrow сдвиги масс резонансов).
- ✓ Изучение изоспин-нарушающих распадов $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $\rho \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$. ρ - ω смешивание и прямые распады.
- ✓ Редкие распады, $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^0\mu^+\mu^-$, ...

Адронная спектроскопия выше ϕ

- Изучение свойств возбуждённых векторных мезонов. Для них неизвестны массы, ширины, формы резонансов, вероятности распадов.
- В частности, для изучения резонансов $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$ нужно провести анализ промежуточных состояний ($\omega\pi^0$, $a_1\pi$, $f_2\rho^0$, $\rho^+\rho^-$, ...) в процессах $e^+e^- \rightarrow 4\pi$.
- Поиск радиационных процессов, например, $e^+e^- \rightarrow \rho(1700) \rightarrow f_2\gamma$



Amplitude analysis of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ at CMD-3

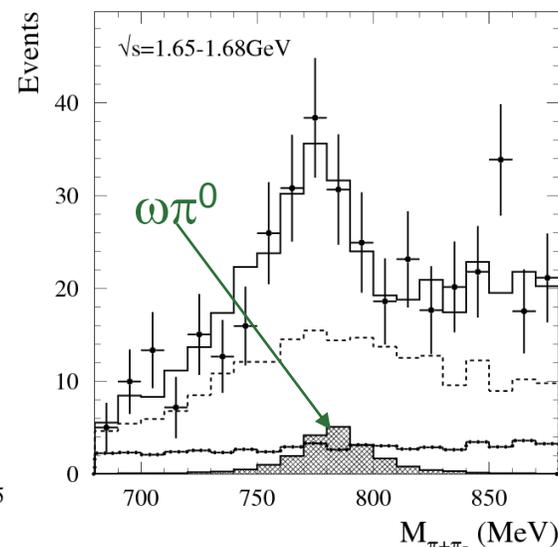
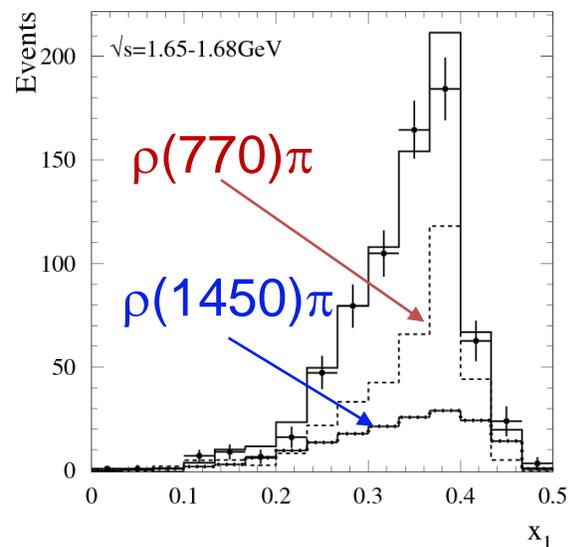
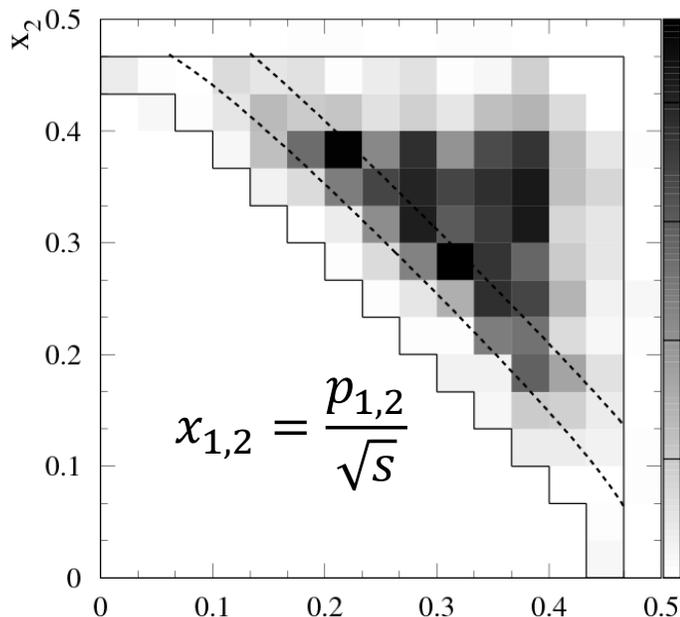


- 43 pb^{-1}
- $\omega\pi^0, a_1\pi, \rho^+\rho^-, \rho^0f_0$ intermediate states are clearly seen
- Simultaneous fit to $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ and $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ may improve separation between modes

Изучение динамики и спектроскопия

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ at SND

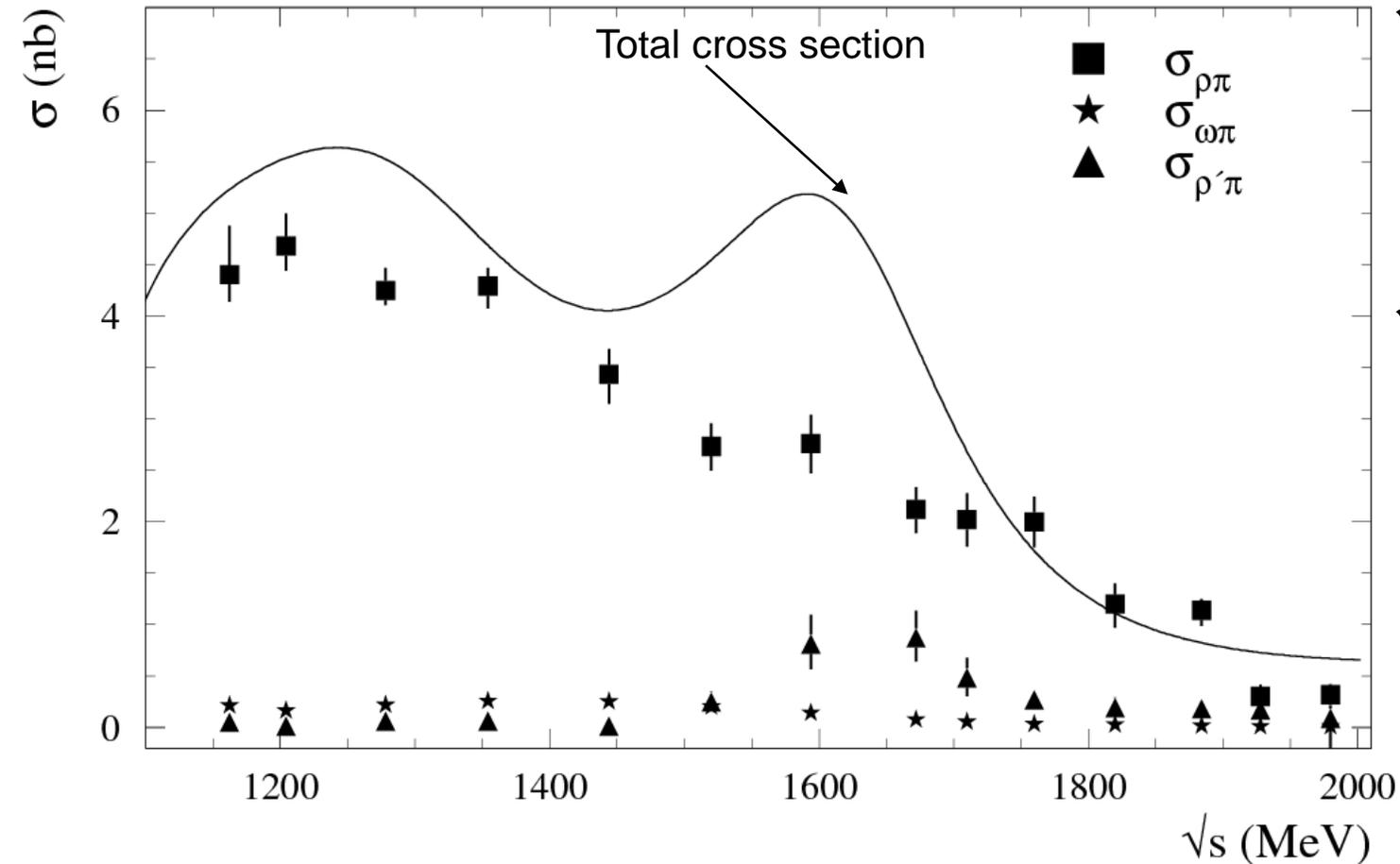
EPJ C **80**, 993 (2020)



34 pb^{-1}

- We analyze the two-dimensional distribution of the charged-pion momenta and the $\pi^+\pi^-$ mass spectrum.
- These distributions are fitted with a model including the $\rho(770)\pi$, $\rho(1450)\pi$, and $\omega\pi^0$ intermediate states.
- A significant fraction of the $\rho(1450)\pi$ intermediate state is observed in the energy region 1.55-1.75 GeV.

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ dynamics

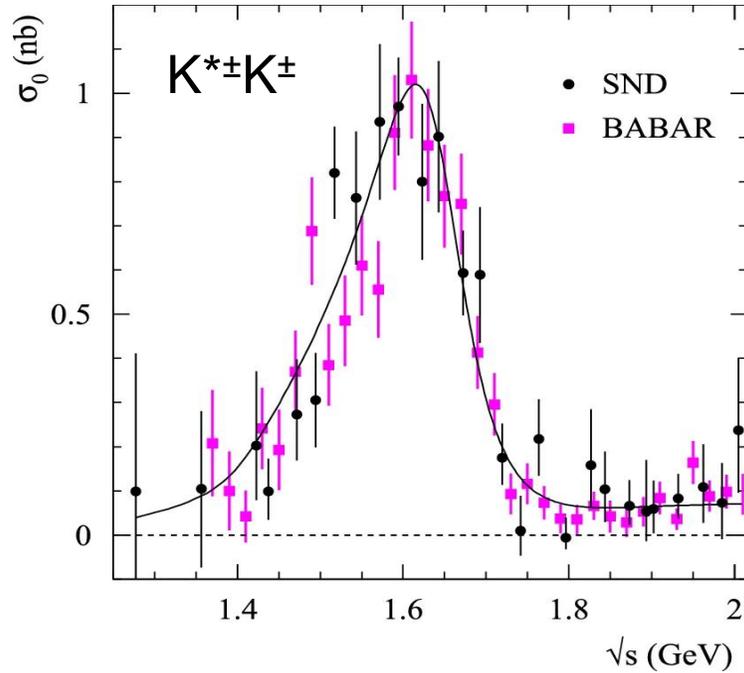


- ✓ The cross section for the intermediate state $\rho(1450)\pi$ differs significantly from zero in the range 1.55 - 1.75 GeV, where the resonance $\rho(1680)$ is located.
- ✓ In the $\rho(770)\pi$ cross section the resonance structure near 1680 MeV is not seen.

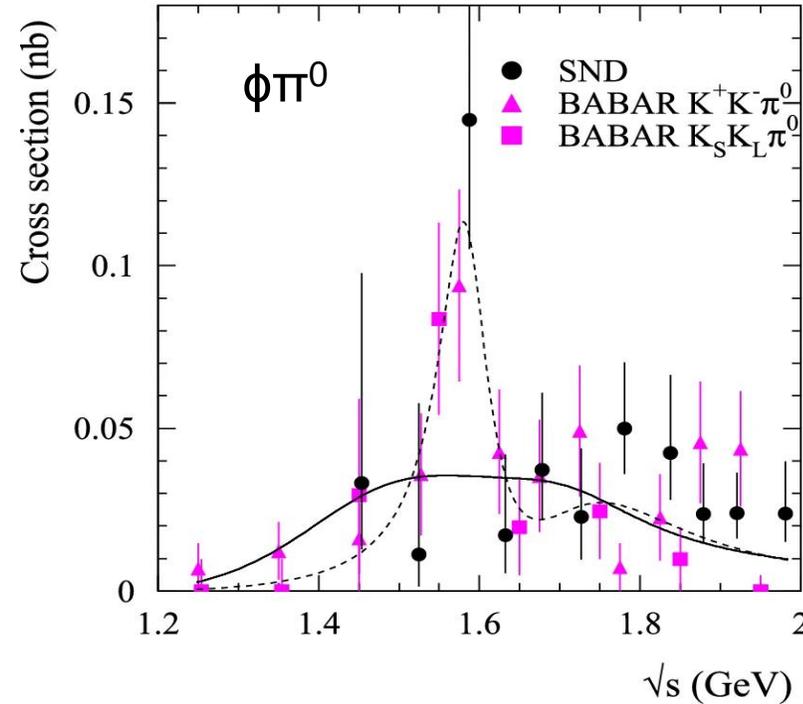
We conclude that the $\rho(1450)\pi$ mechanism gives a significant contribution to the decay $\omega(1680) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, while the $\omega(1420) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ decay is dominated by the $\rho(770)\pi$ intermediate state.

$$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$$

EPJ C **80** (2020) 1139



$\phi(1680)$ dominates in the $e^+e^- \rightarrow K^*K$ cross section



$e^+e^- \rightarrow \phi\pi^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0$ cross section can not be described by $\rho(1450)$ and $\rho(1700)$.

Fit with $\rho(1700)$ and unknown resonance with $m=1585 \pm 15$ MeV and $\Gamma=75 \pm 30$ MeV

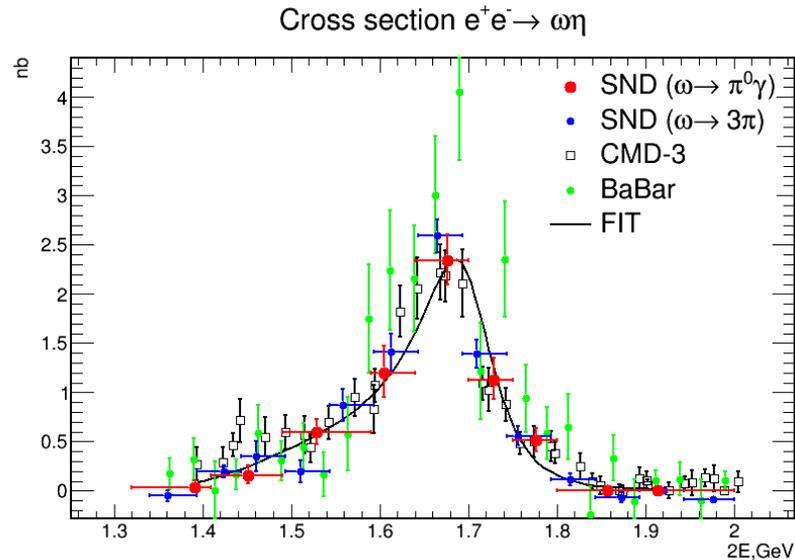
- ✓ The analysis is based on 26 pb^{-1} recorded in 2011-2012
- ✓ Cross sections for the K^*K and $\phi\pi^0$ intermediate states are measured separately

Радиационные процессы выше ϕ

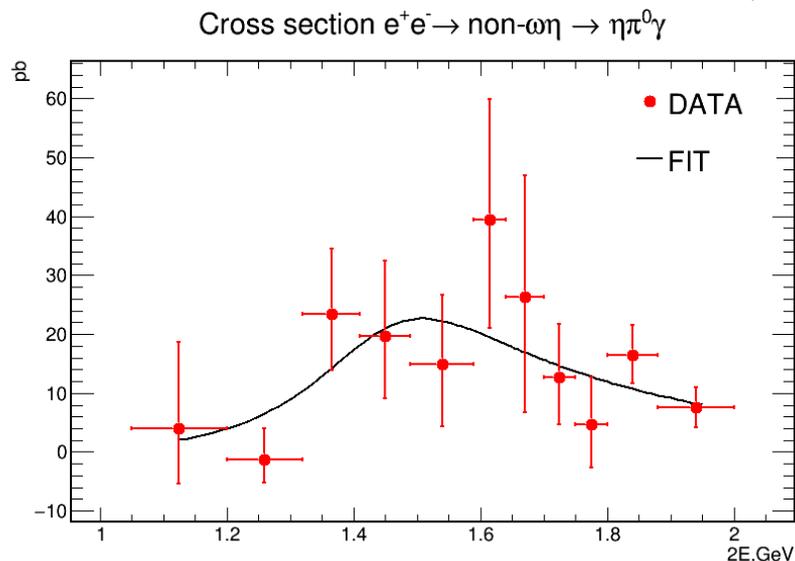
- Важны для понимания кварковой структуры возбужденных векторных резонансов
- $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma, \eta\gamma$: на СНД обнаружены вклады $\rho(1450)$, $\phi(1680)$
 - В канале 3γ КМД-3 может использовать высокое разрешение по точке конверсии фотона
- $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma, \pi^0\eta\gamma, \eta\eta\gamma$: доминируют адронные промежуточные состояния $\omega\pi^0, \omega\eta, \phi\eta$. Однако вклады радиационных процессов также видны.
 - На КМД-3 интересно изучить зарядовую асимметрию в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ (интерференция ISR и FSR).

$$e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$$

EPJ C **80**, 1008 (2020)



The measured $e^+e^- \rightarrow \omega\eta$ cross section is in good agreement with the SND and CMD-3 measurements in the $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ decay mode.



The non-VP $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ process has been observed with significance of 5.8σ .

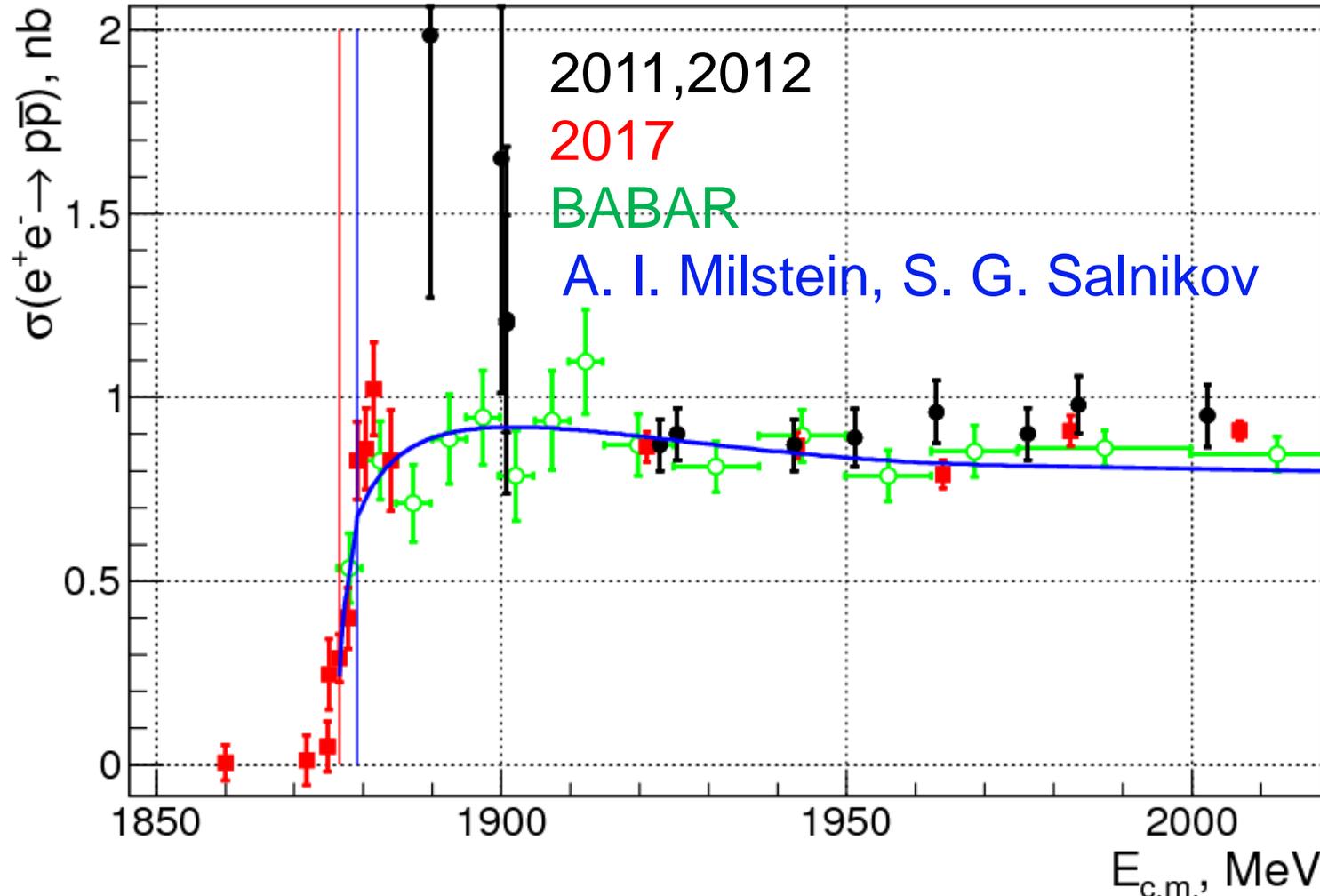
We have performed the first measurement of the cross section for this process in the energy range 1.05-2.00 GeV.

The value of the cross section is about 15-20 pb in the region 1.4-1.9 GeV.

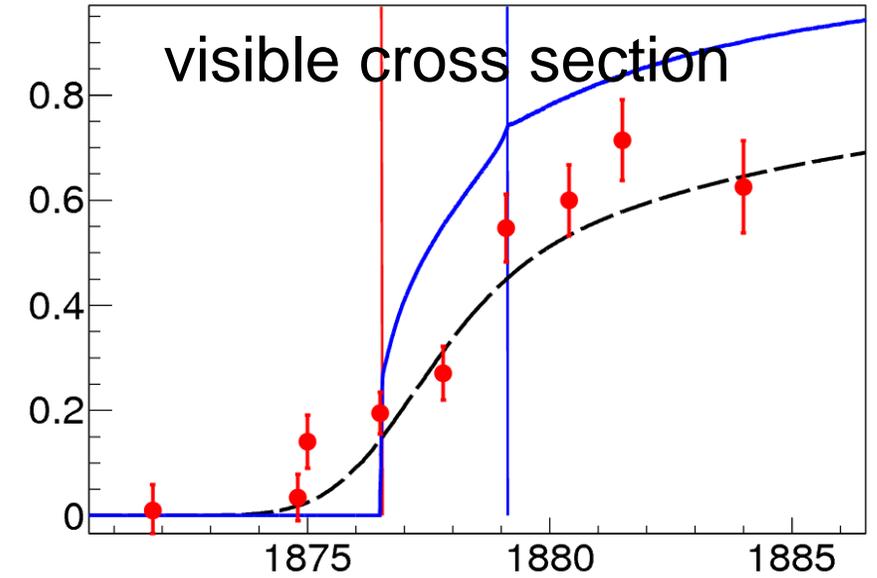
$$e^+ e^- \rightarrow N \bar{N}$$

$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ at CMD-3

Phys. Lett. B 794, 64 (2019)



Физическая программа ВЭИ II-2000



- Near-threshold behavior of the cross section is in reasonable agreement with the theoretical prediction
- C.m. energy spread is about 1 MeV. Fit with the step function

$$B \left(1 - \exp \left(-\frac{E-2m_p}{\rho} \right) \right)$$

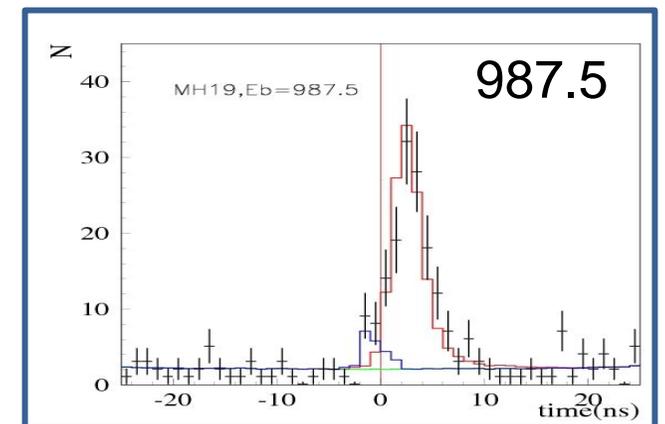
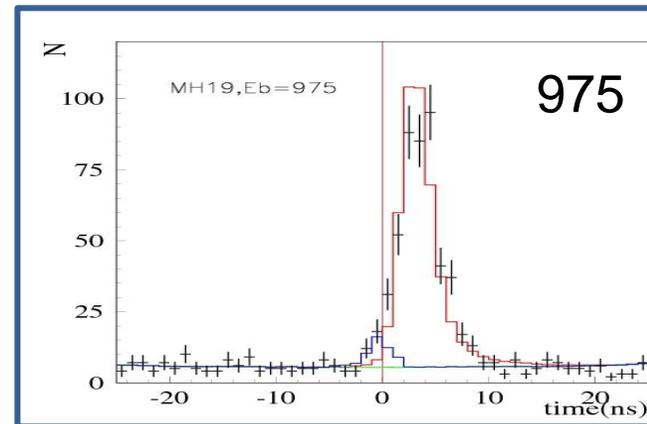
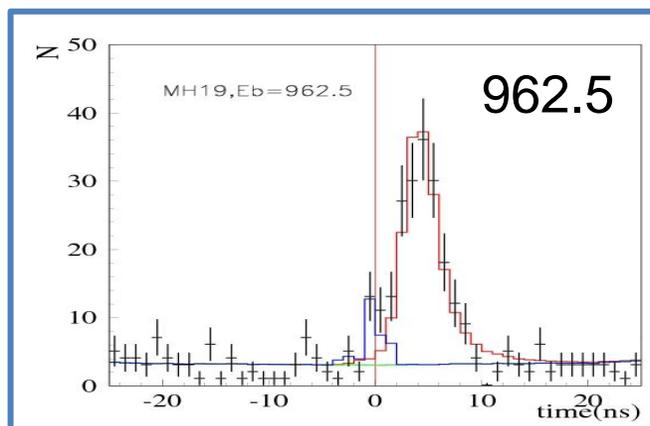
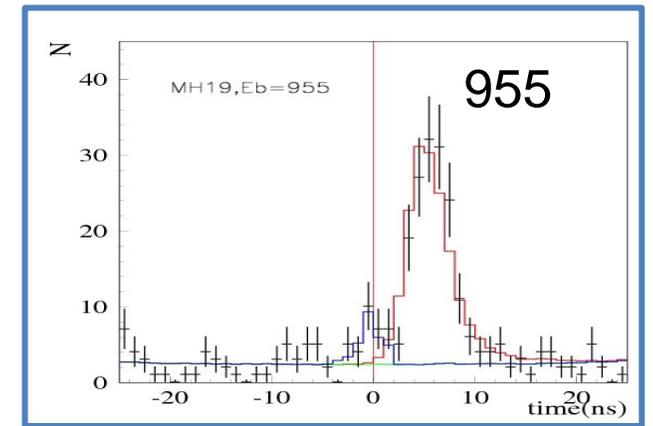
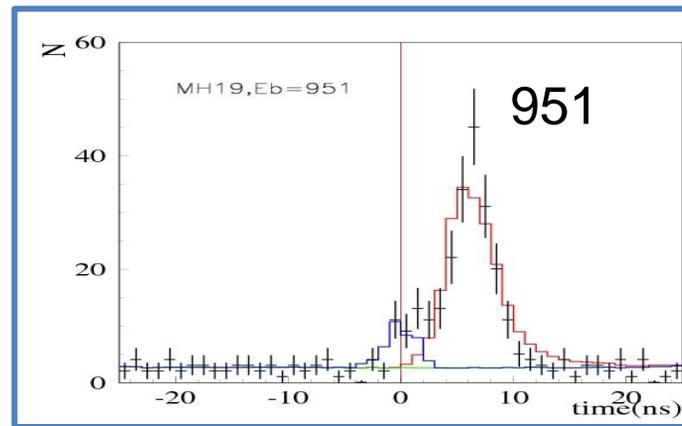
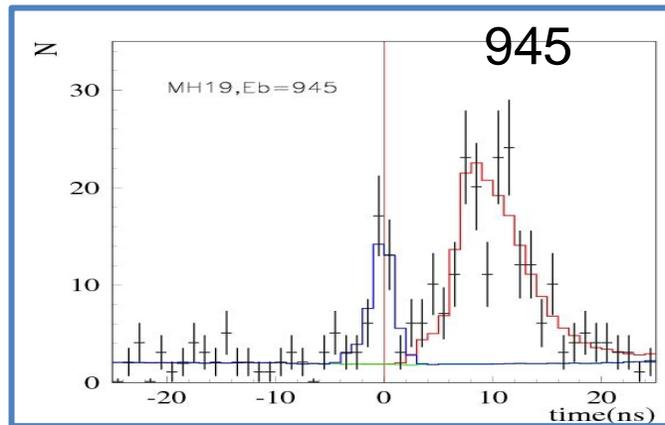
gives $\rho=0.76 \pm 0.28 \text{ МэВ}$

$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ at SND

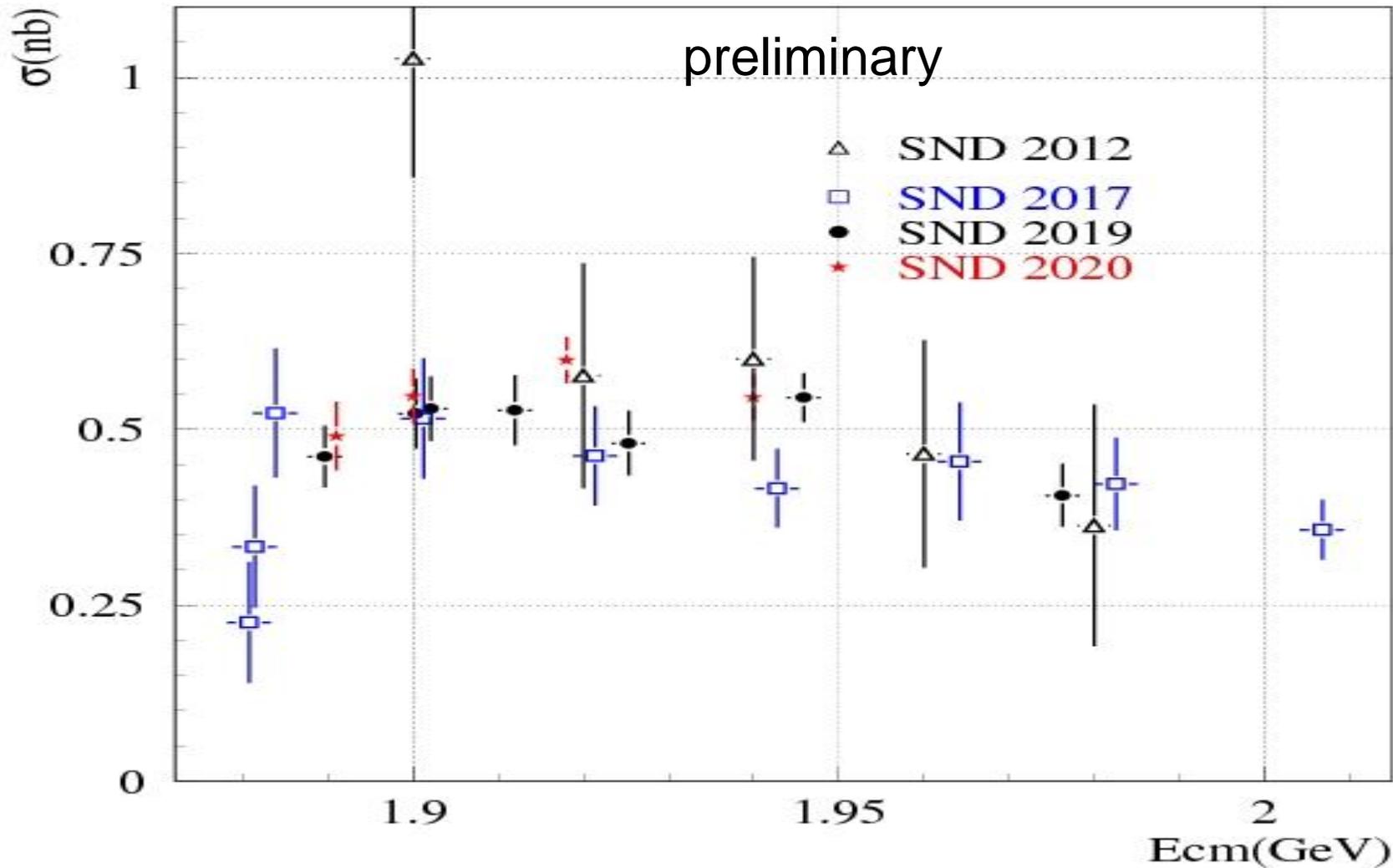
С 2019 года в калориметре СНД
используется новая электроника

$$N(t) = N_{n\bar{n}}H_{n\bar{n}}(t) + N_{csm}H_{csm}(t) + N_{bkg}H_{bkg}(t)$$

2019 data set



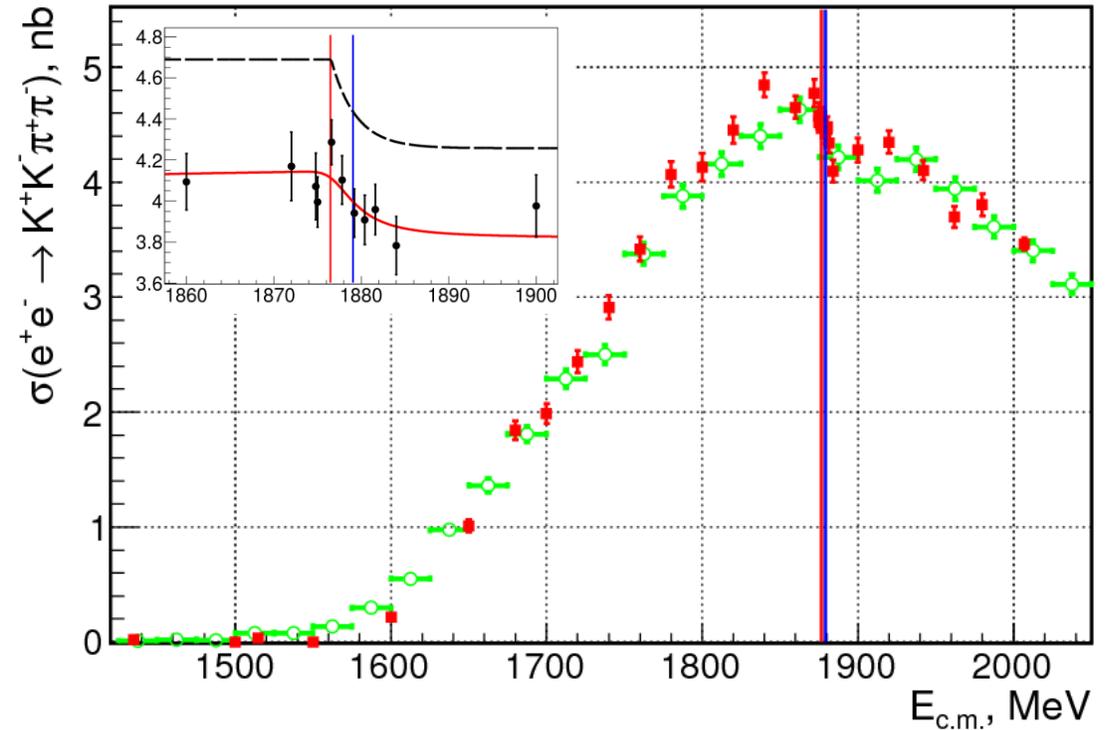
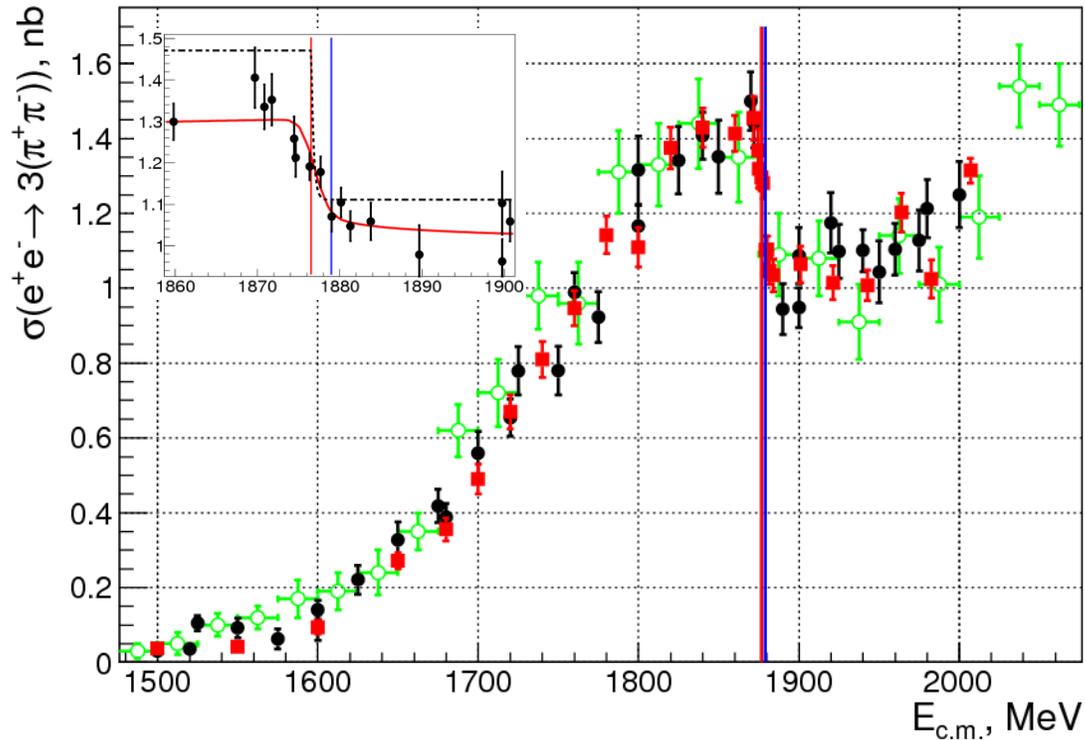
$e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ at SND



- ✓ Data collected in 2012, 2017, 2019, 2020
- ✓ 2012, 2017 – time measurement in FLT
- ✓ 2019, 2020 – time measurement in each calorimeter channel

Адронные сечения около порога $N\bar{N}$

Phys. Lett. B 794, 64 (2019)



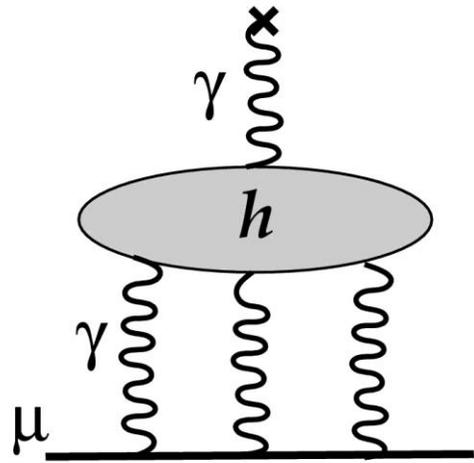
- Структуры около порога $N\bar{N}$ обнаружены в двух процессах $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$
- Параметр ρ равен 0.0 ± 2.5 МэВ для 6π и 2.4 ± 2.0 для $KK\pi\pi$
- Наличие структуры в $KK\pi\pi$ выглядит неожиданно для модели $e^+e^- \rightarrow N\bar{N} \rightarrow \text{mesons}$

Адронные сечения около порога $N\bar{N}$

Существенное увеличение статистики выше и на пороге $N\bar{N}$ позволит

- Заглянуть внутрь энергетического разброса. Можно дополнительно использовать информацию о времени срабатывания калориметра
- Сделать измерение $|G_E/G_M|$
- Изучить структуры в реакциях $e^+e^- \rightarrow \text{mesons}$, в частности, $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ и $e^+e^- \rightarrow K_S K^-\pi^+\pi^0$
- В полном адронном сечении М+С ожидают скачка 2.5 нб/10 МэВ

HLBL вклад в a_μ



Phys. Rept. 887 (2020) 1

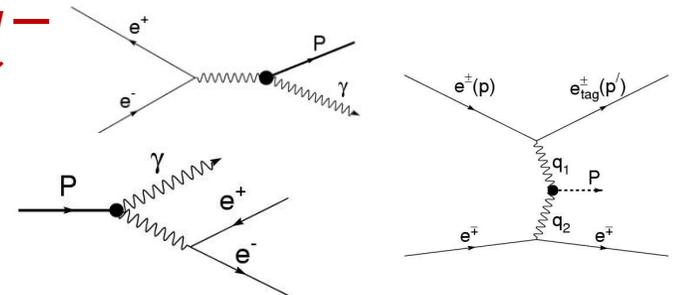
$a_\mu^{\text{had,LO-VP}} \times 10^{-10}$	693.1 ± 4.0
$a_\mu^{\text{had,LbLs}} \times 10^{-10}$	9.4 ± 1.9

- $a_\mu^{\text{had,LbLs}}$ вычисляется теоретически
- Требует знания мезон-фотонных переходных формфакторов $P, A, T \rightarrow \gamma^* \gamma^*$
- Эти формфакторы измеряются в процессах

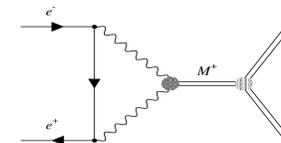
- $e^+ e^- \rightarrow M \gamma, M l^+ l^-$

- $M \rightarrow \gamma \gamma, \gamma l^+ l^-$

- $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- M$

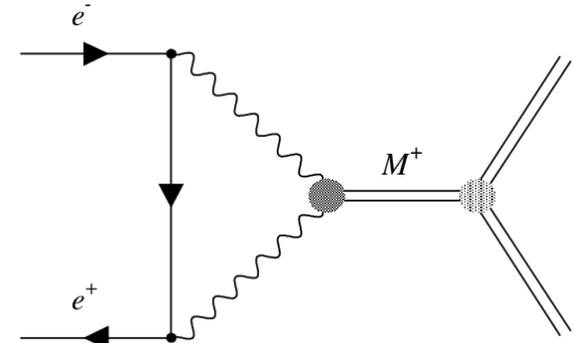


- Интегралы от формфакторов входят в распады $M \rightarrow l^+ l^-$



- Интересны также процессы $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \pi \pi$

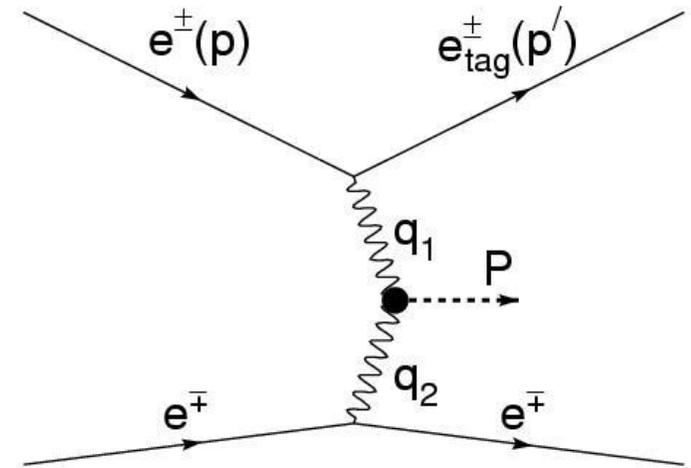
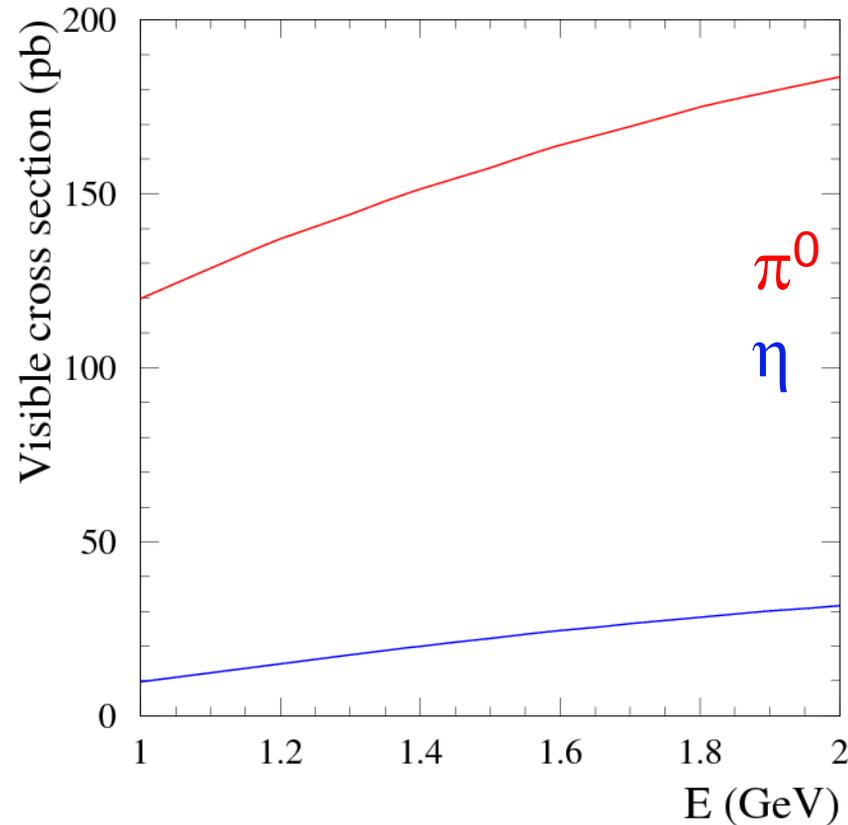
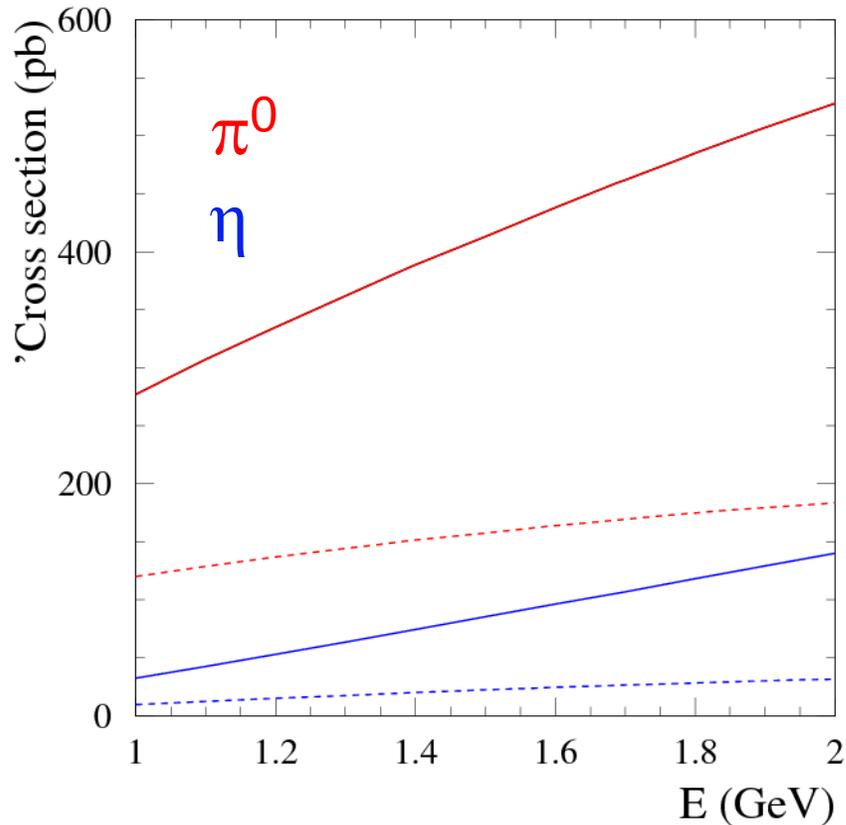
Поиск процессов $e^+e^- \rightarrow P, A, T$



$$\sigma = \frac{4(2J+1)}{M^2} B(M \rightarrow e^+e^-)$$

- ✓ Для псевдоскалярных мезонов процесс подавлен $(m_e/m_p)^2$
- ✓ На ВЭПП-2000 установлены пределы
 $B(\eta \rightarrow e^+e^-) = 7 \times 10^{-7}$ и $B(\eta' \rightarrow e^+e^-) = 5.6 \times 10^{-9}$
- ✓ Для аксиальных и тензорных мезонов подавления по спиральности нет.
- ✓ СНД ведет поиск в конечных состояниях, не рождающихся в однофотонном канале: $f_1(1285) \rightarrow \eta\pi^0\pi^0$, $f_2(1270) \rightarrow \pi^0\pi^0$, $a_2(1320) \rightarrow \eta\pi^0$, $f_2'(1525) \rightarrow K_S K_S$
 - First indication (2.5σ): $\sigma(e^+e^- \rightarrow f_1(1285)) = 45_{-24}^{+33}$ pb,
 $B(f_1(1285) \rightarrow e^+e^-) = 5.1_{-2.7}^{+3.7} \times 10^{-9}$
- ✓ На КМД-3 можно изучать зарядовую асимметрию в процессах $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, K^+K^- , $\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^+\pi^-\eta$ и искать рождение резонансов семейств a_1 , a_2 , f_1 , f_2

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-P$ at VEPP-2000



$$\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

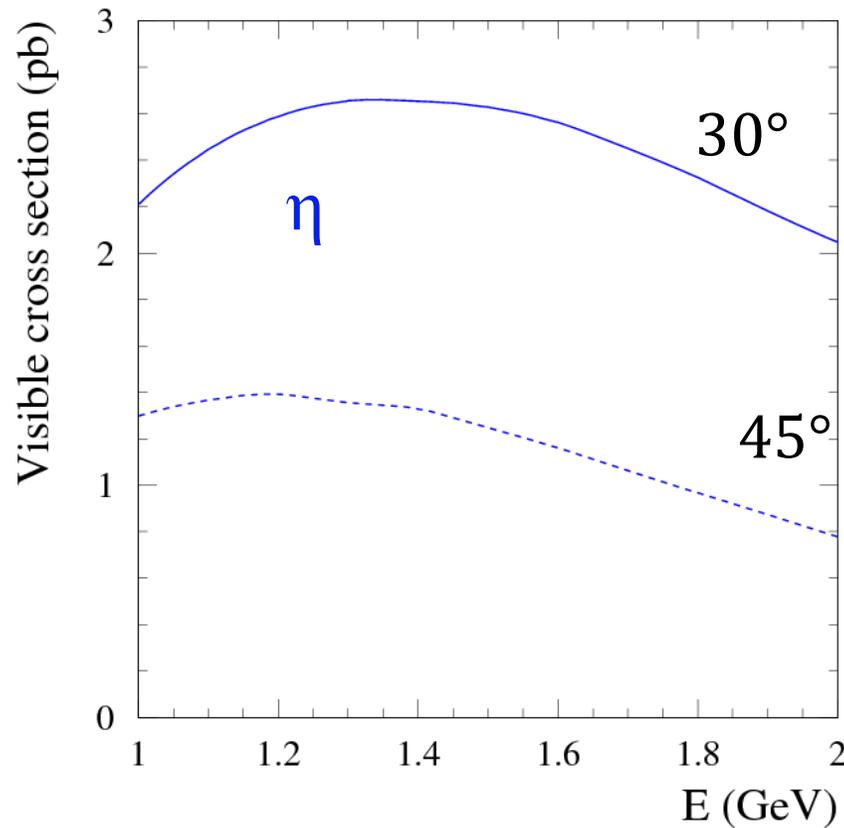
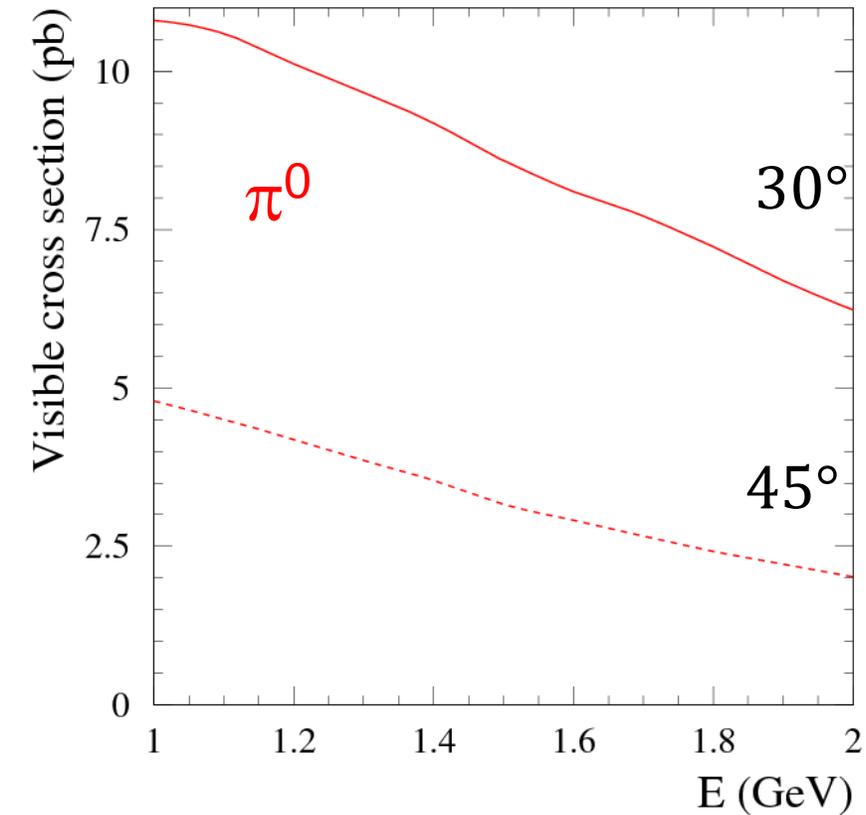
$$30^\circ < \theta_\gamma < 150^\circ$$

$$\varepsilon(\pi^0) = 0.44 \div 0.35$$

$$\varepsilon(\eta) = 0.76 \div 0.57$$

$$B(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = 39.4\%$$

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-P$, tagged electron



$$\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

$$30^\circ < \theta_\gamma < 150^\circ$$

$$30^\circ < \theta_e < 150^\circ \text{ or}$$

$$45^\circ < \theta_e < 135^\circ$$

$$\varepsilon(\pi^0, 30^\circ) = 3.9 \div 1.2\%$$

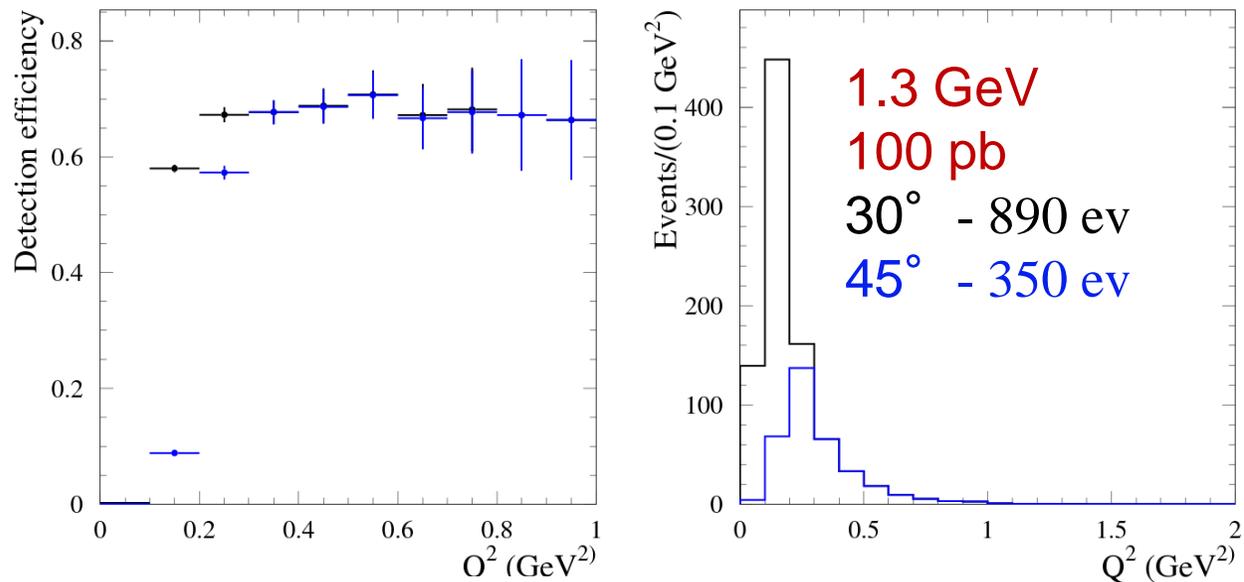
$$\varepsilon(\pi^0, 45^\circ) = 1.7 \div 0.4\%$$

$$\varepsilon(\eta, 30^\circ) = 17.3 \div 3.7\%$$

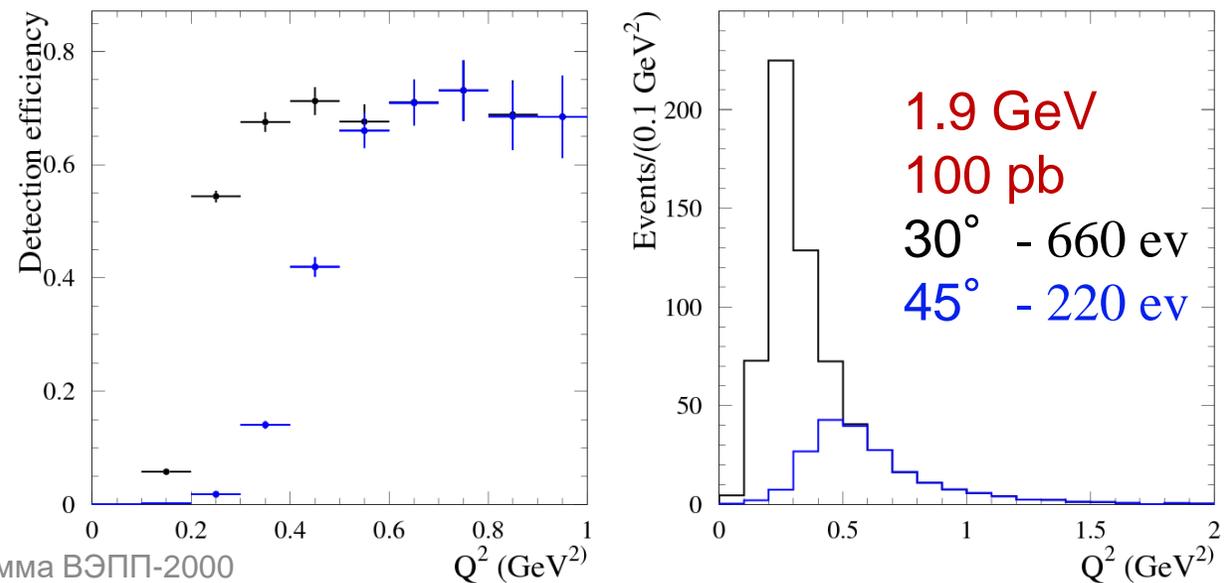
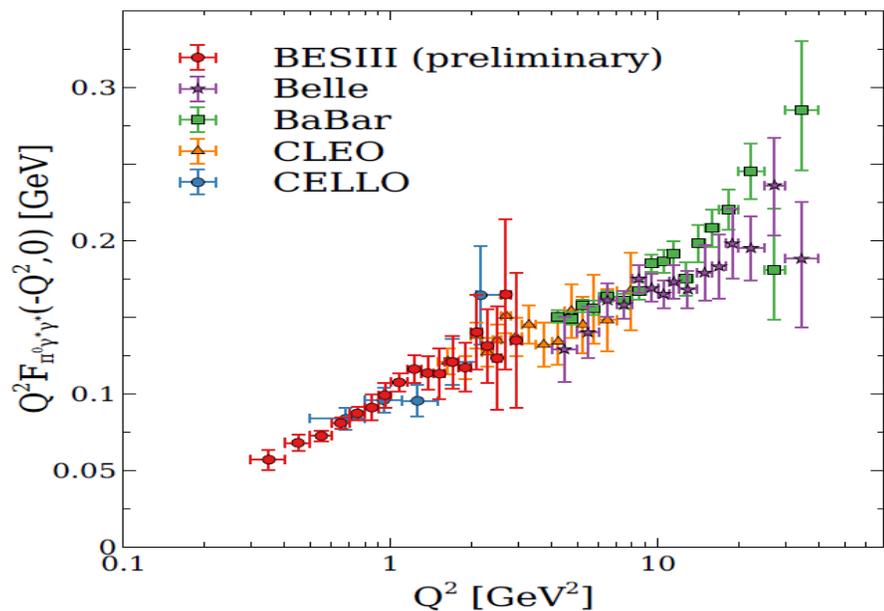
$$\varepsilon(\eta, 45^\circ) = 10.2 \div 1.4\%$$

$$B(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = 39.4\%$$

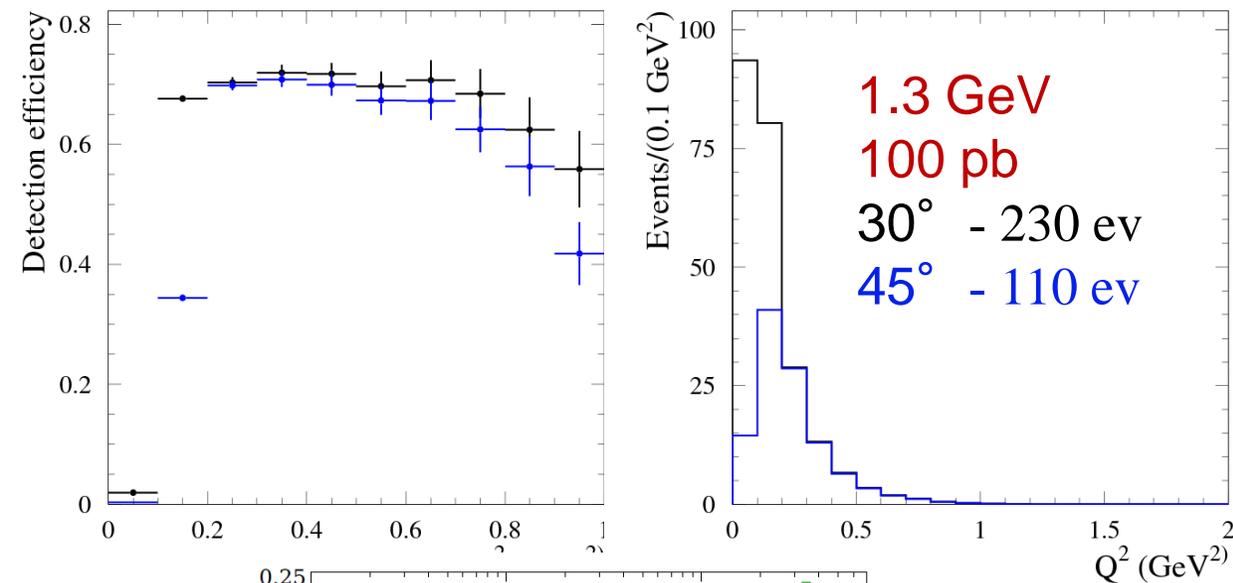
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0$, tagged electron



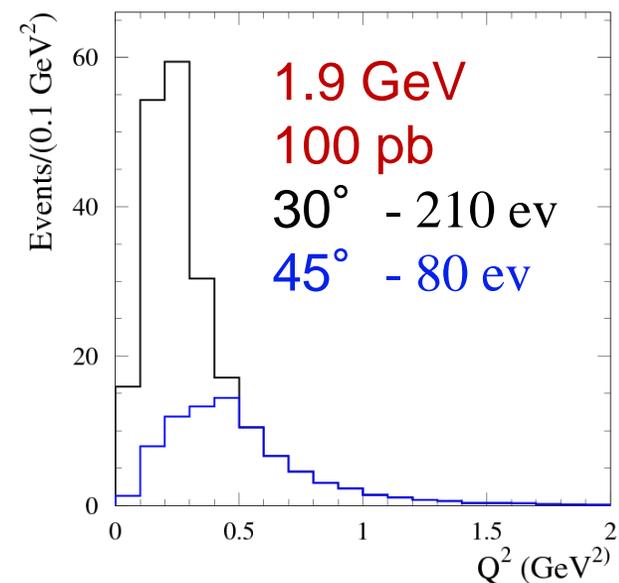
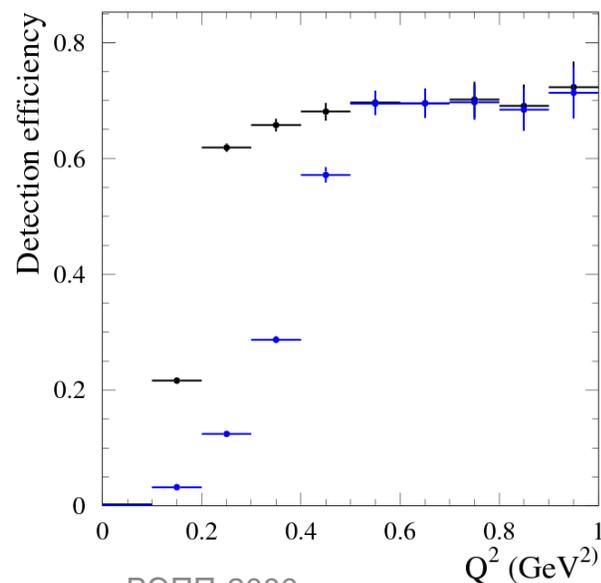
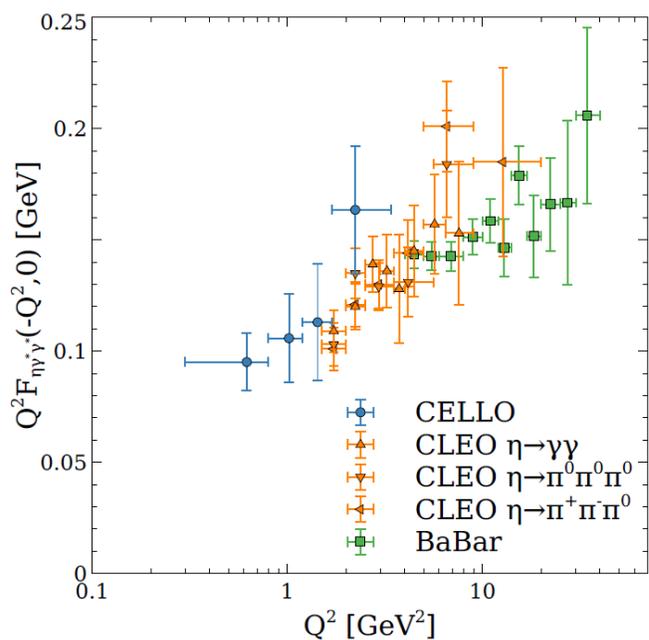
Transition form factor squared can be measured with an accuracy of about and better than 10% in the q^2 range from 0.1 to 0.5 GeV².



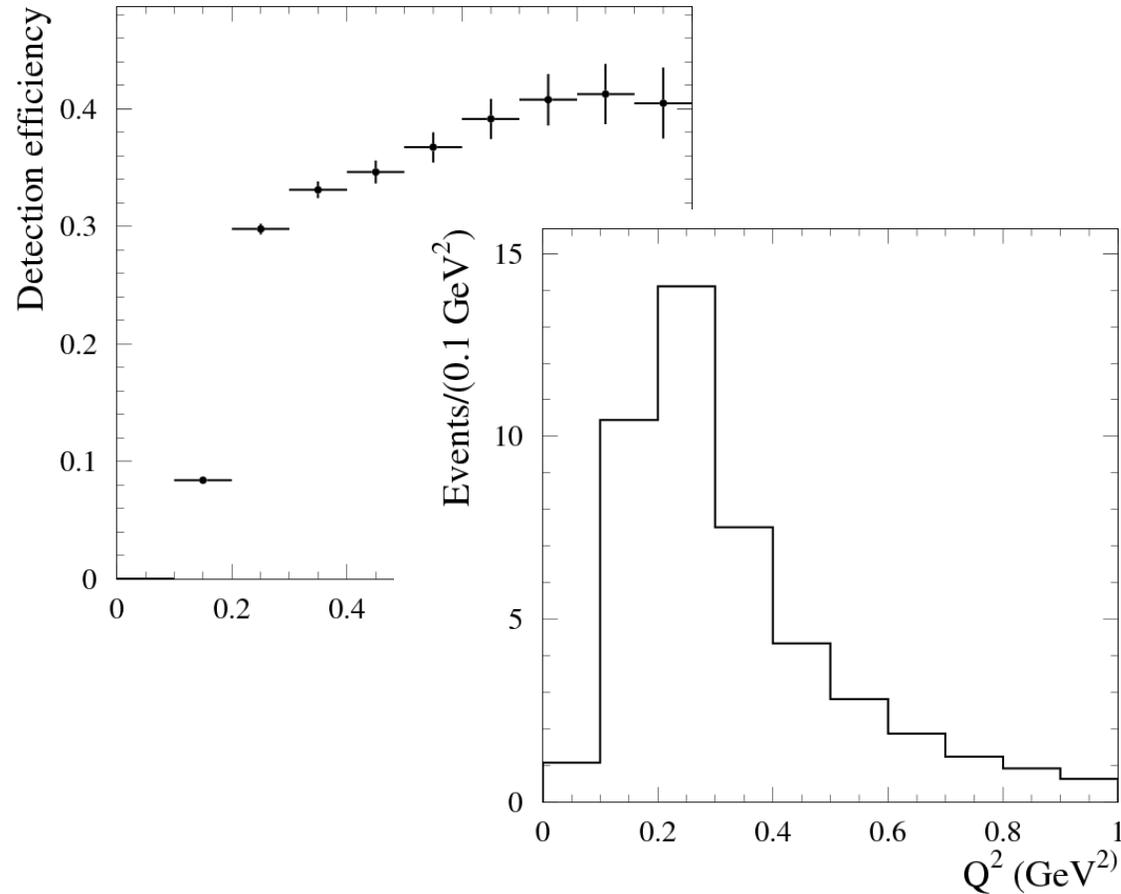
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta$, tagged electron



Transition form factor squared can be measured with an accuracy of about and better than 15% in the q^2 range from 0.05 to 0.5 GeV².



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta, \eta \rightarrow 3\pi^0$$



$E=1.9$ GeV 100 pb

$$\eta \rightarrow 3\pi^0$$

$$27^\circ < \theta_\gamma < 153^\circ$$

$$\varepsilon(\eta) = 0.24$$

$$B(\eta \rightarrow 3\pi^0) = 32.7\%$$

No tag ~1000 events

Tagged e ~ 50 events

$$30^\circ < \theta_e < 150^\circ$$

PDG value: $\Gamma_{\gamma\gamma} = 0.515 \pm 0.018$ keV

Заключение

- Очень богатая физическая программа
- Недостаток физиков, в частности из-за сложности анализов
- Набрано 30% требуемой статистики
- Ближайшие планы
 - Сканирование порога $N\bar{N}$
 - Сканирование области 1.05 -2 ГэВ
- Понадобится как минимум еще одно сканирование области ниже 1.05 ГэВ