

# Процессы

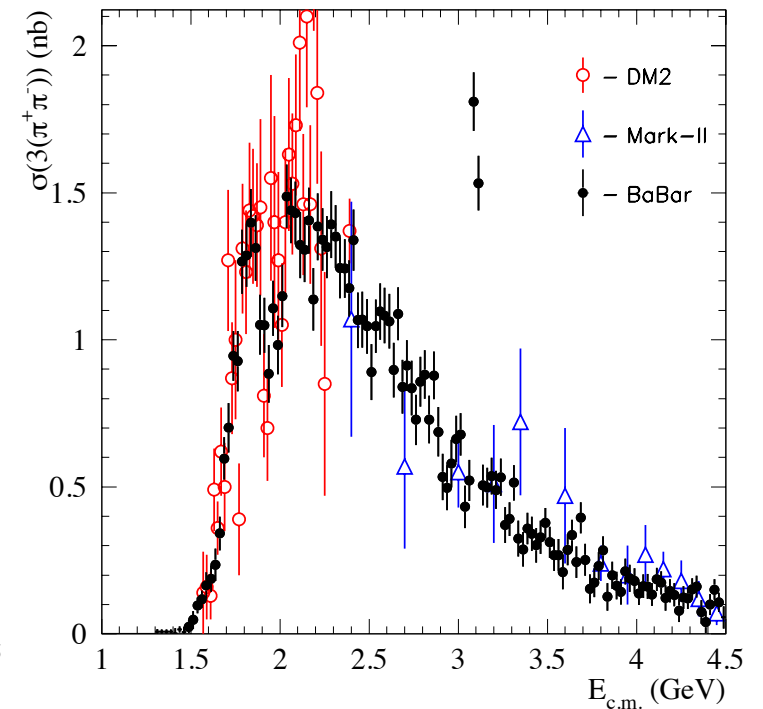
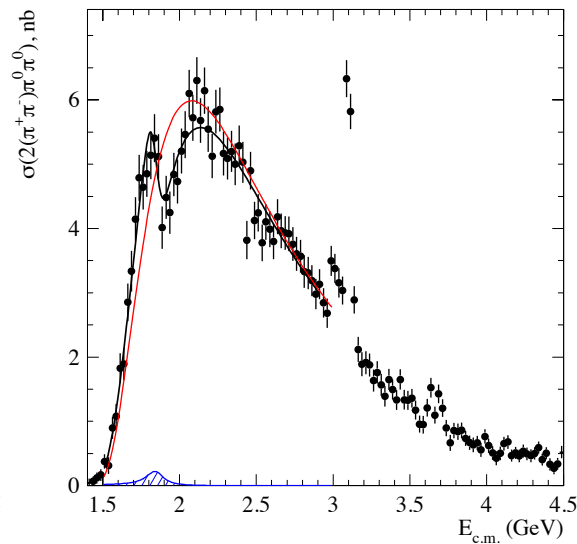
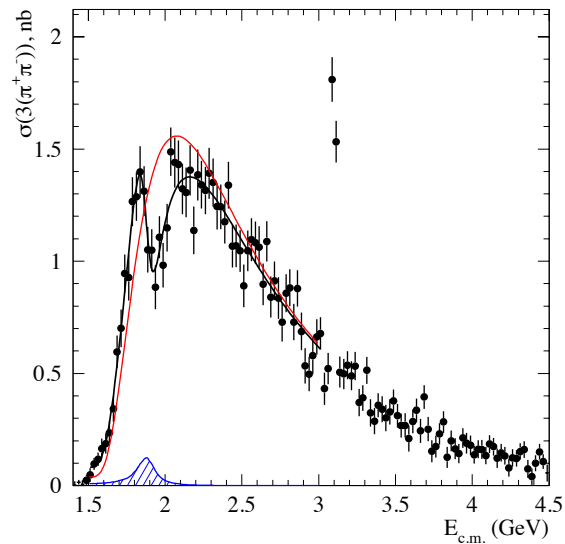
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  вблизи  
порога рождения нуклонов

Солодов Е.П.

КМД-3 Коллаборация

# 6 пи до ВЭПП2000

- Наблюдалось интересное поведение сечения
- Попытка описать провал как интерференцию с узким резонансом на (под) пороге NNbar



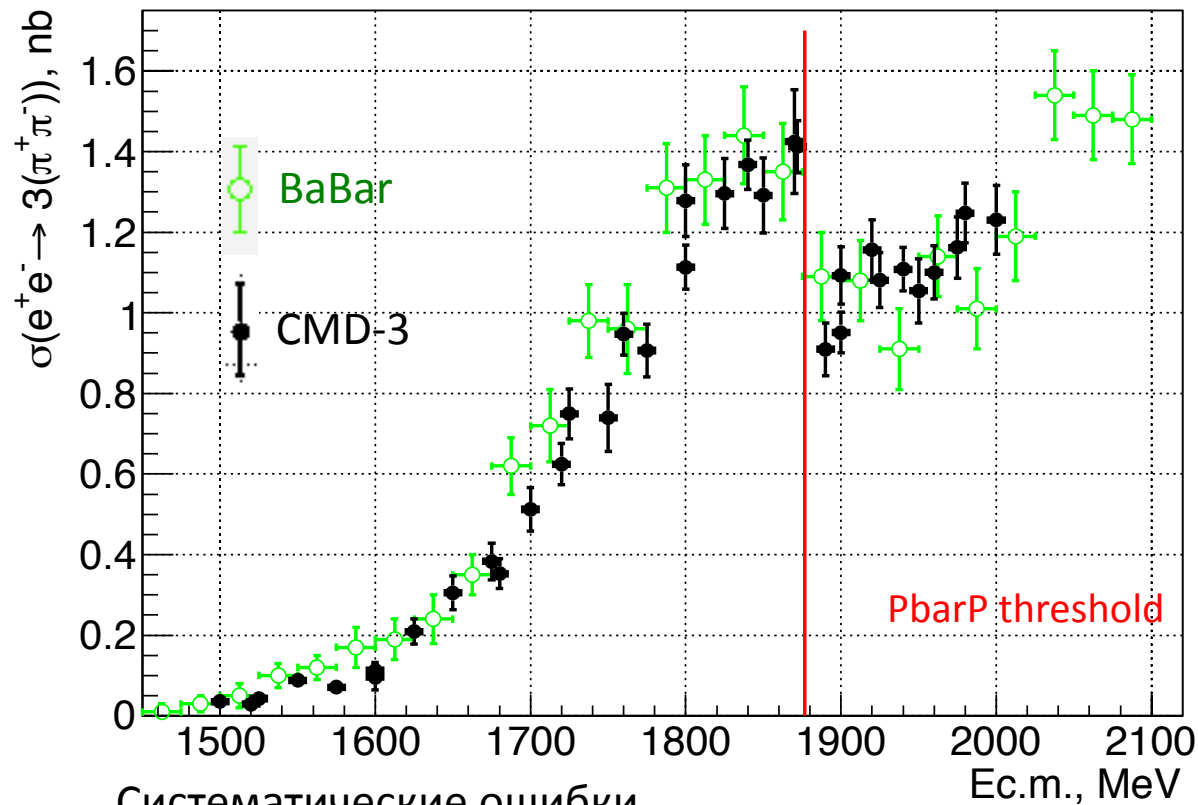
# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$

Результат КМД-3 по данным 2011-2012 г.г.

Phys. Lett. B 723 (2013) 73

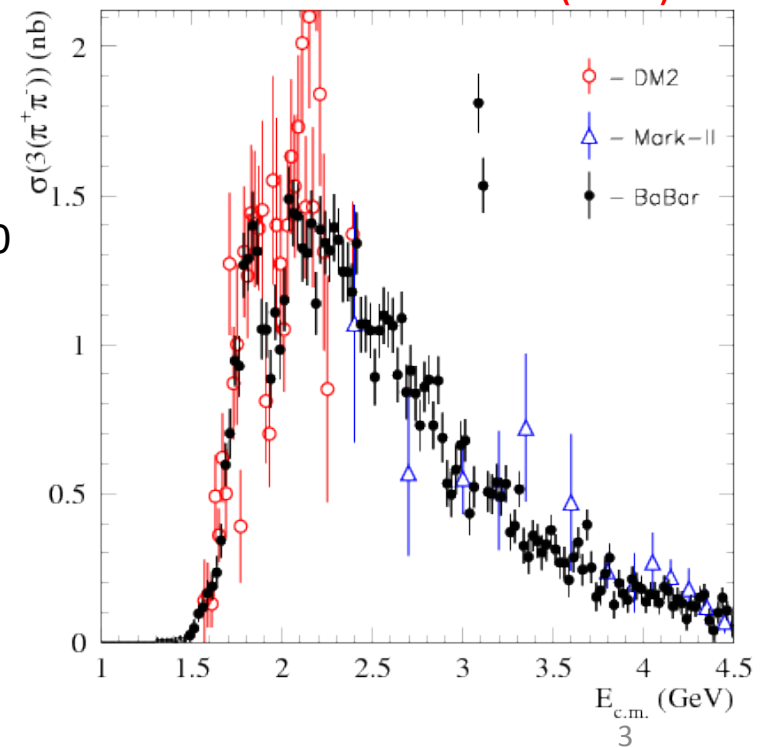
Не похоже на интерференцию !?

Other data for  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$

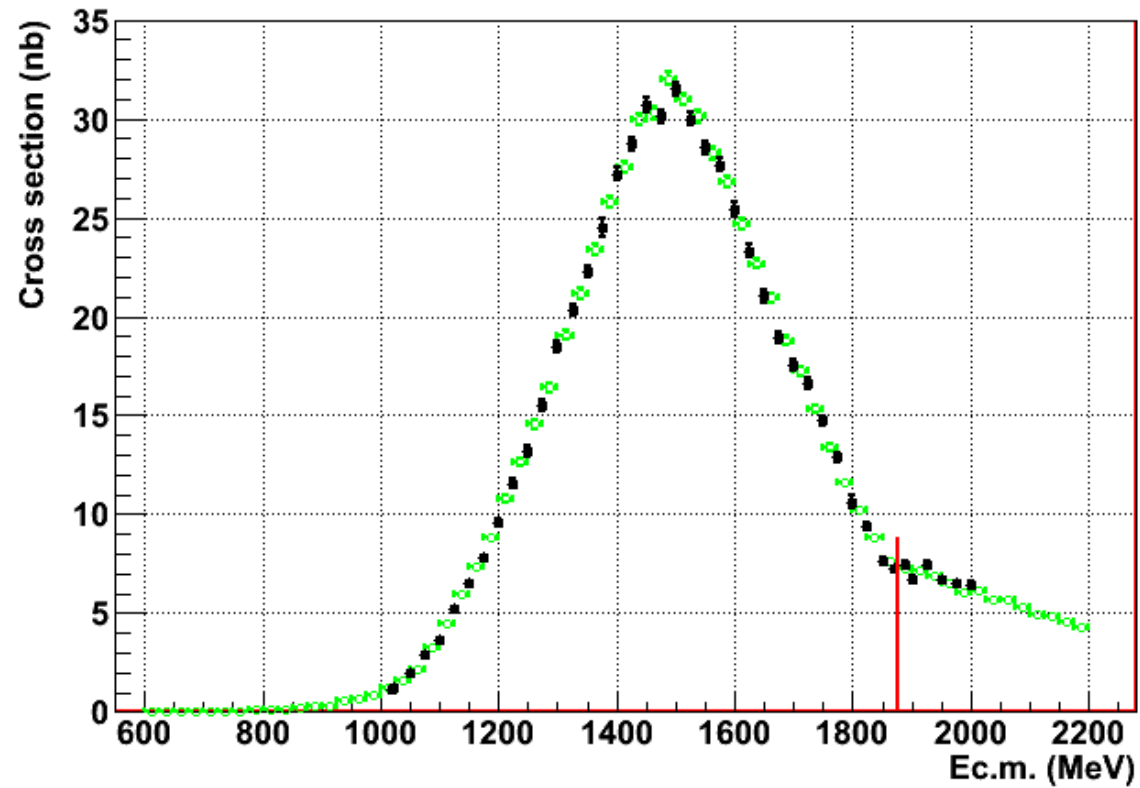


Систематические ошибки

Модель	- 4%
Отбор событий 5 тр.	- 3%
Отбор событий 6 тр.	- 1%
Светимость	- 2%
Рад. поправка	- 1%
Энергия ВЭПП	- 1%
<b>Сумма</b>	<b>- 6%</b>



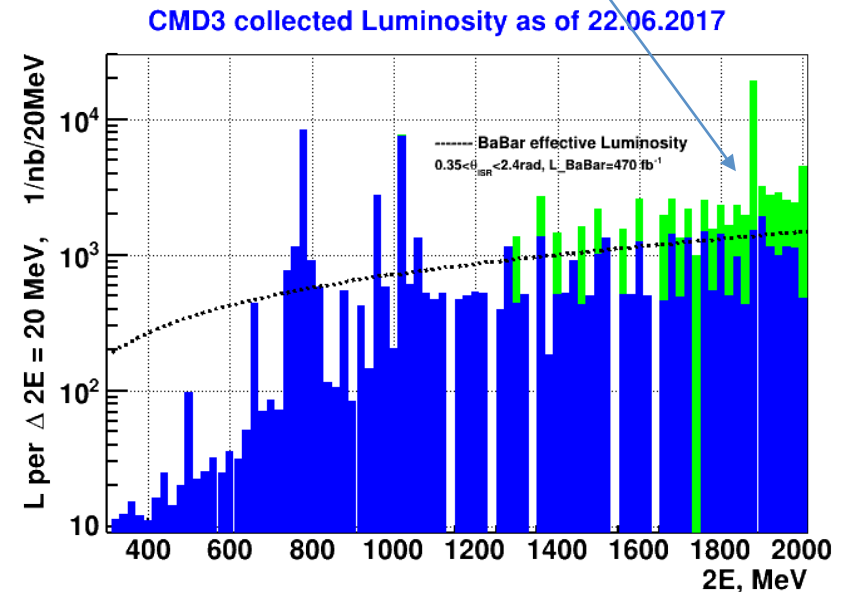
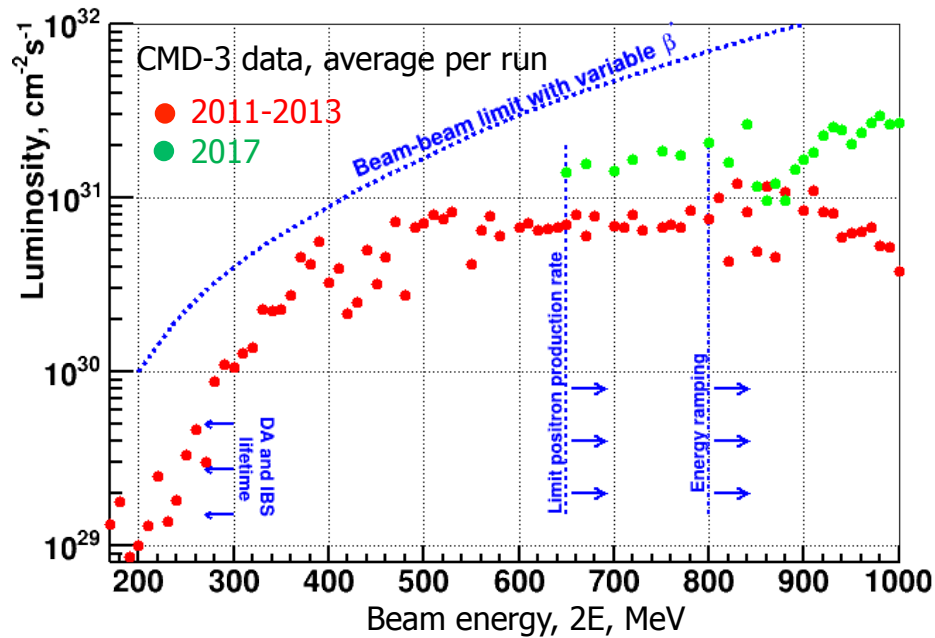
# Ничего похожего в 4 пи!?



Данные Бабар и предварительные КМД-3

# Мотивация для 2017 data taking

CMD-3  
26/01-20/06/2017



In 2017: big improvement in luminosity at high energy, still way to go

Collected data at “high” energies

About  $50 \text{ pb}^{-1}$  collected

$2.007 \text{ GeV} (e^+e^- \rightarrow D^{0*})$	4 $1/\text{pb}$
---	-----------------

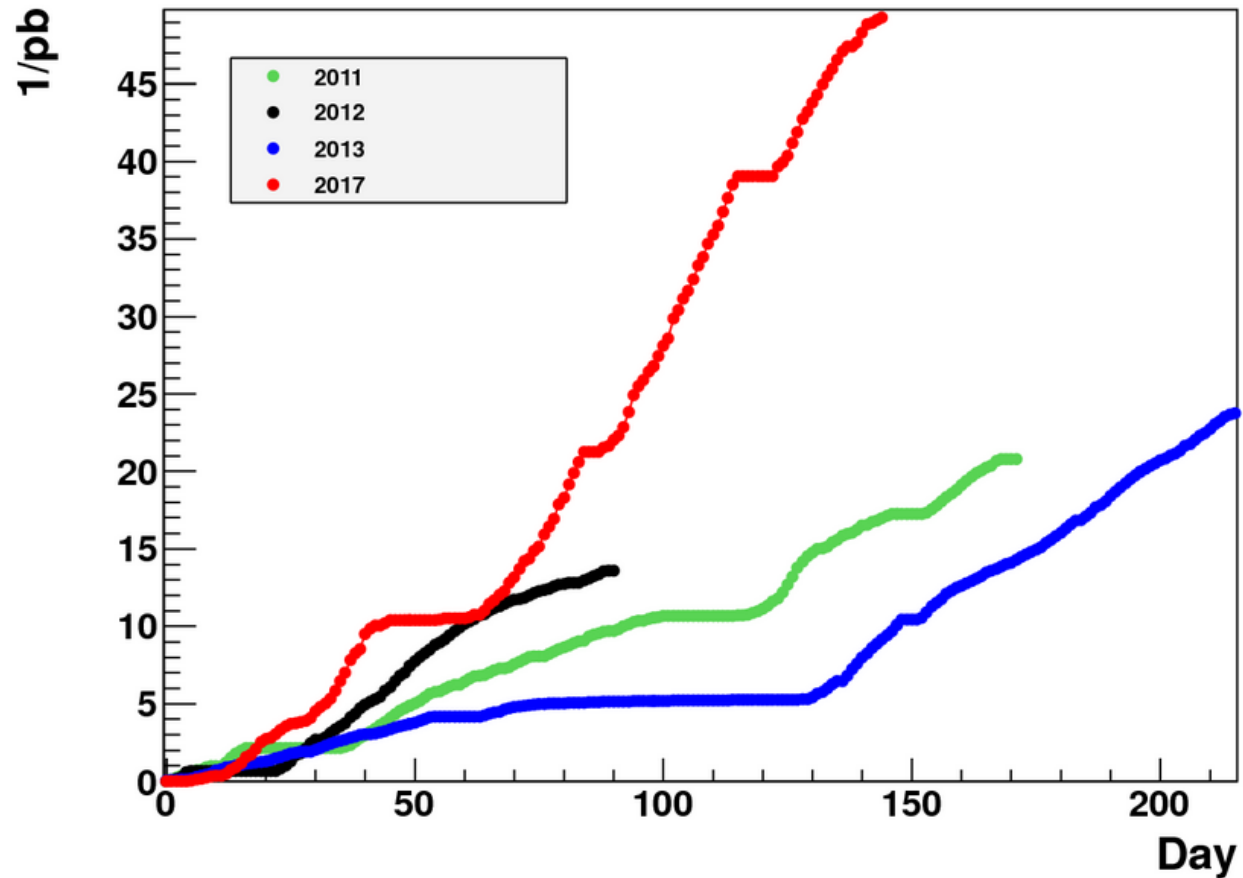
$p\bar{p}$ and $n\bar{n}$ threshold	14 $1/\text{pb}$
-------------------------------------	------------------

Overall:

1.28 – 2.007 GeV	50 $1/\text{pb}$
------------------	------------------

# Overview of CMD-3 data taking runs

## CMD-3 Integrated Luminosity



# Отбор событий

Отработано на сканировании 2011, 2012 г.г., повторено заново для 2011,2012,2017

В событии есть 5 или 6 “хороших” треков (3 и 4 для 4пи):

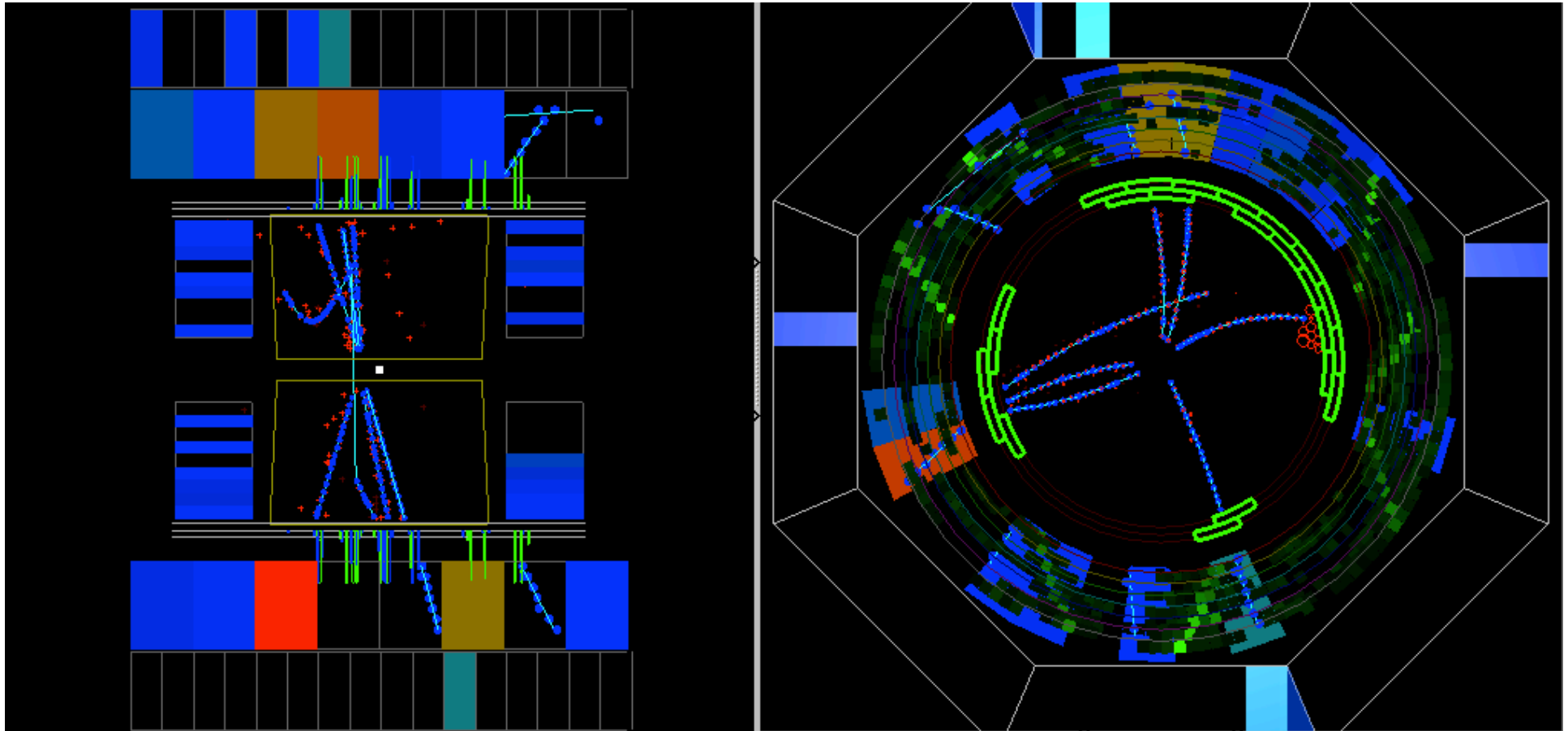
- минимум 5 точек на треке
- импульс  $P_{tot} > 40 \text{ MeV}/c$
- расстояние до пучка  $R_{max} < 0.5 \text{ cm}$
- расстояние до центра места встречи  $|Z| < 10 \text{ cm}$
- полярный угол достаточный для прохождения 10 см в ДК

Нет событий с 6 треками ниже 1.5 ГэВ - Анализ для Ес.м. 1.5 – 2.0 ГэВ

Нет событий с 8 треками

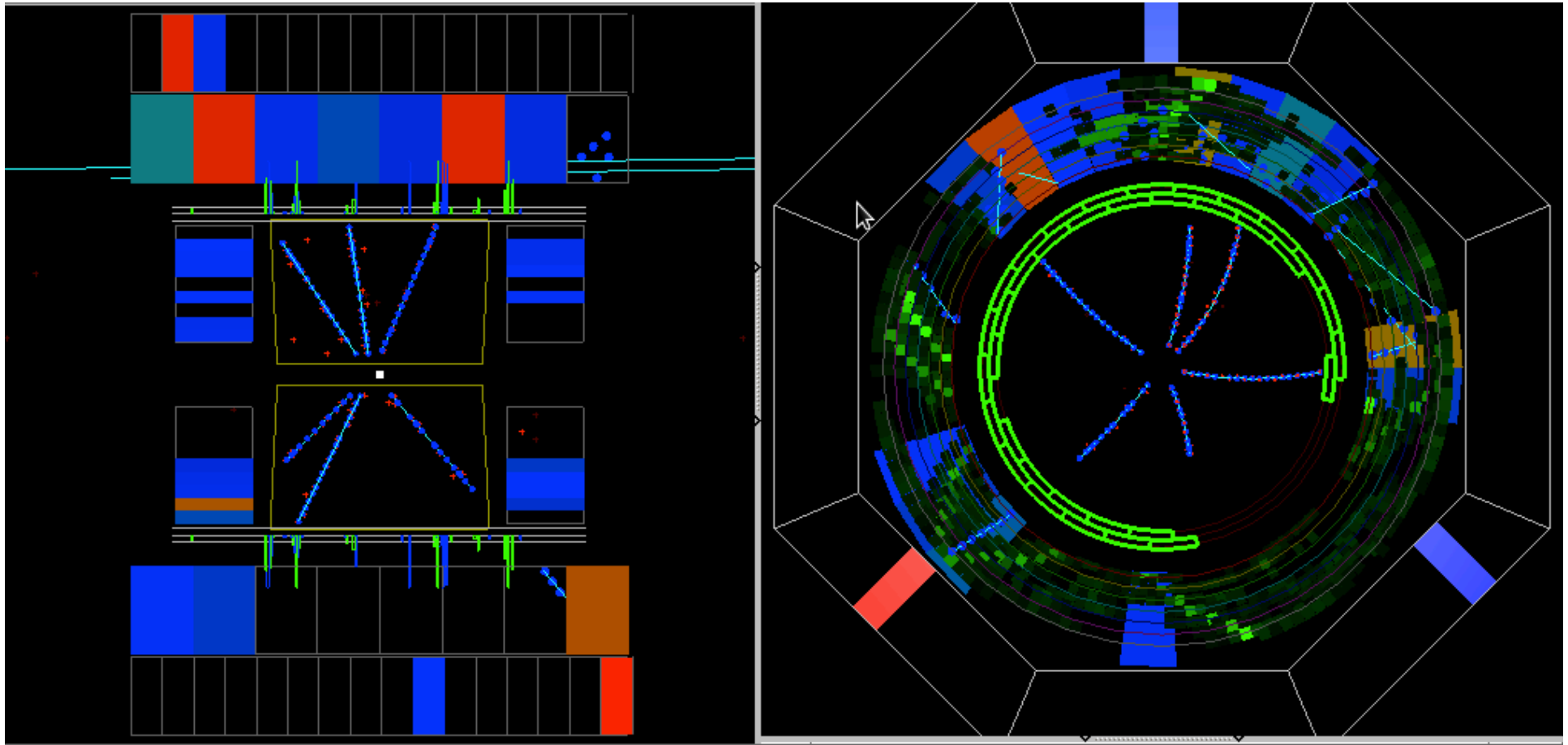
Несколько событий с 7 треками  $\ll 1\%$

# Example of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ from CMD-3

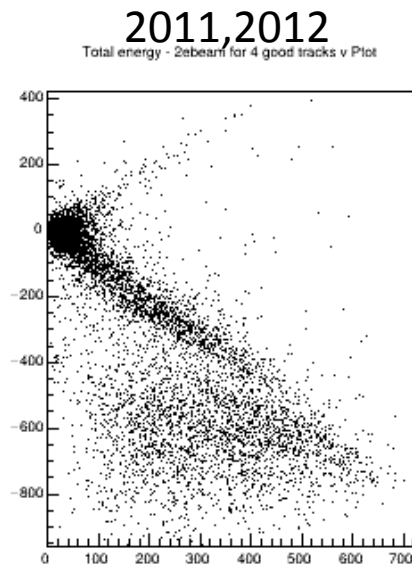
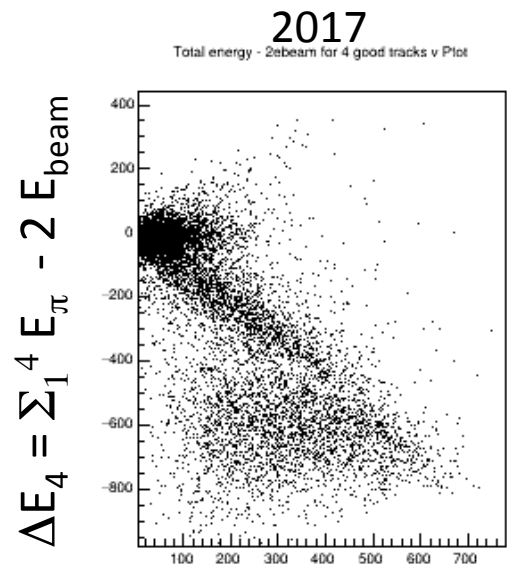




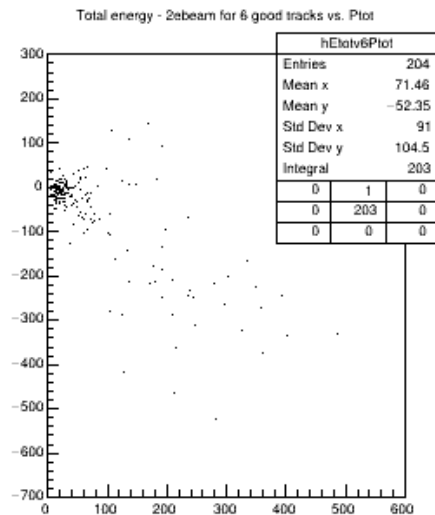
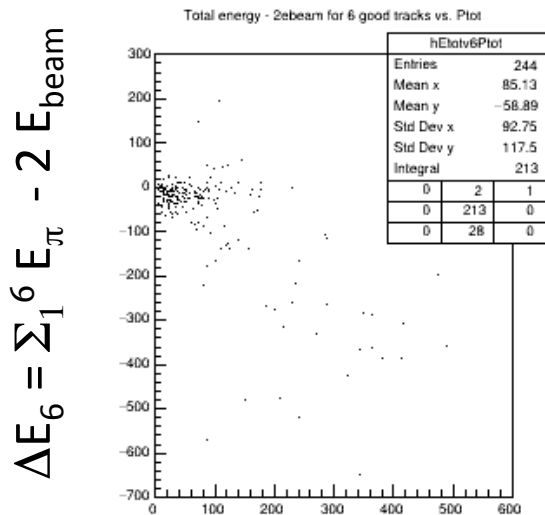
# Example of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ from CMD-3



# Основные параметры – полная энергия и полный импульс

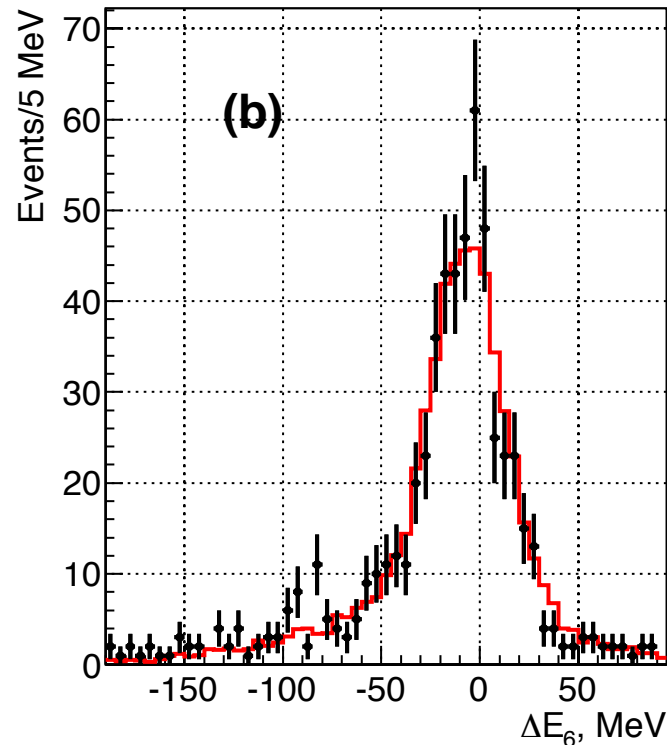
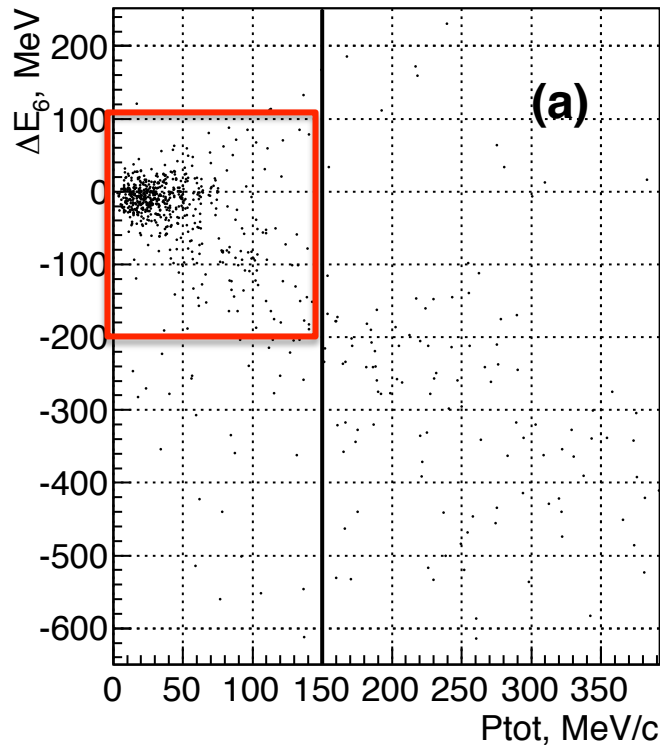


События 4пи с 4-мя треками и бпи с 6-ю треками отбираются практически без фона



Видно, как злополучная наводка портит наше разрешение!

# События $3(\pi^+\pi^-)$ с 6-ю треками (1)



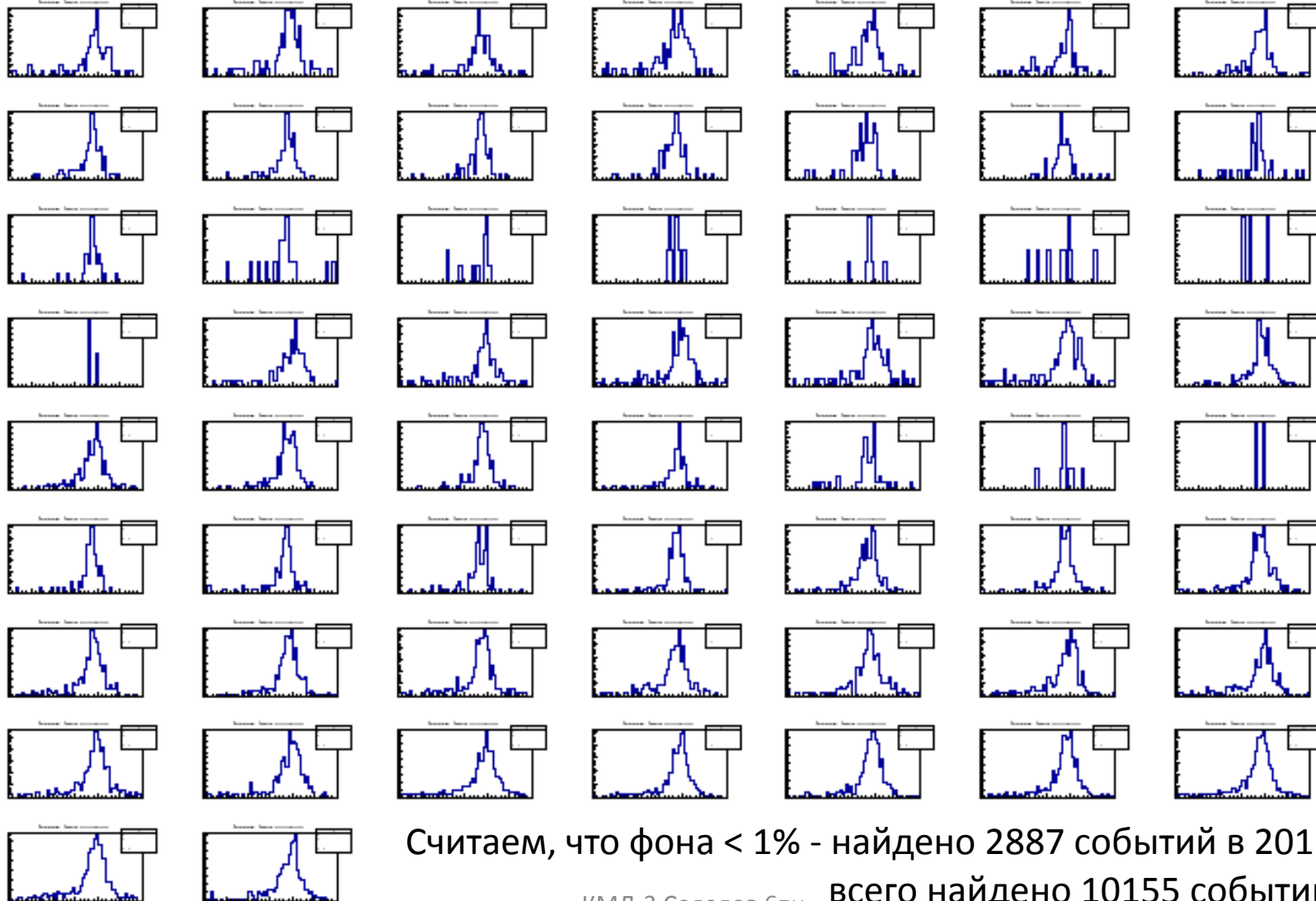
$$\Delta E_6 = \sum_1^6 E_\pi - 2 E_{\text{beam}}$$

Сумма событий из 3-х точек по энергии  
Гистограмма - моделирование

Из-за наводки на ДК отбор по полному импульсу  $P_{\text{tot}} < 200 \text{ MeV}$  для 2017 г.

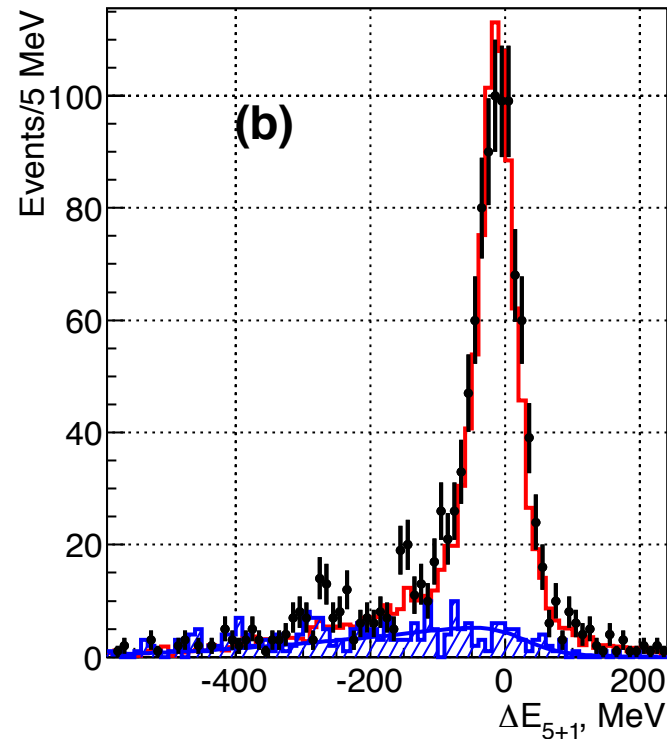
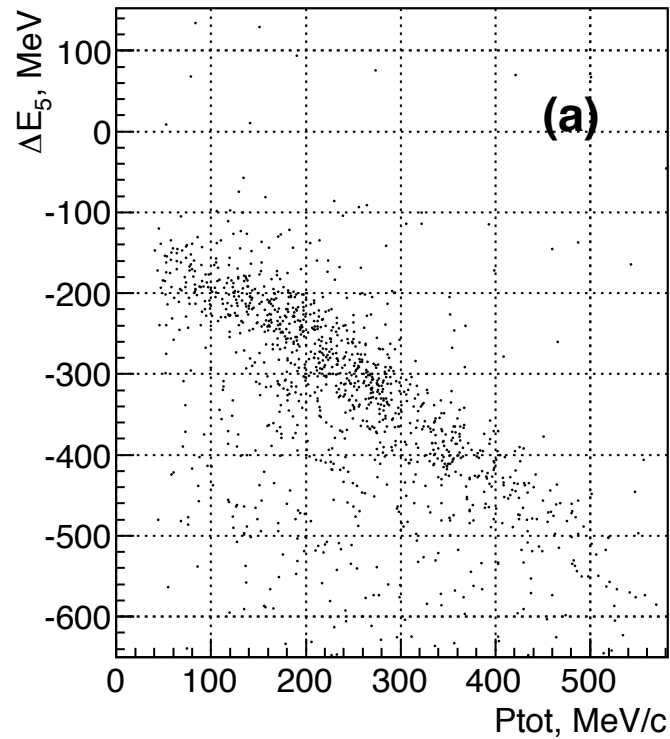
# События $3(\pi^+\pi^-)$ с 6-ю треками (2)

Сканирования 2011, 2012, 2017 г.г.



Считаем, что фона  $< 1\%$  - найдено 2887 событий в 2011,2012  
всего найдено 10155 событий

# События $3(\pi^+\pi^-)$ с 5-ю треками (1)



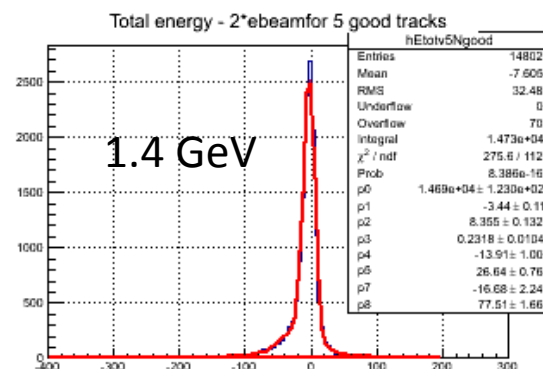
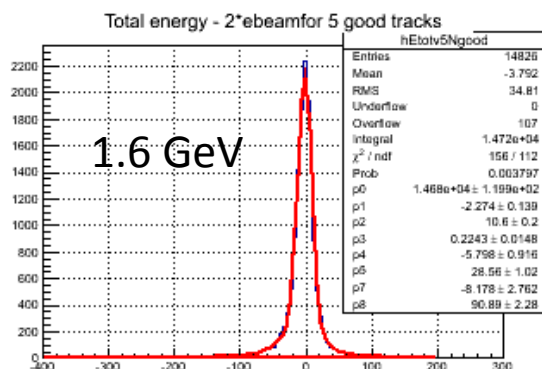
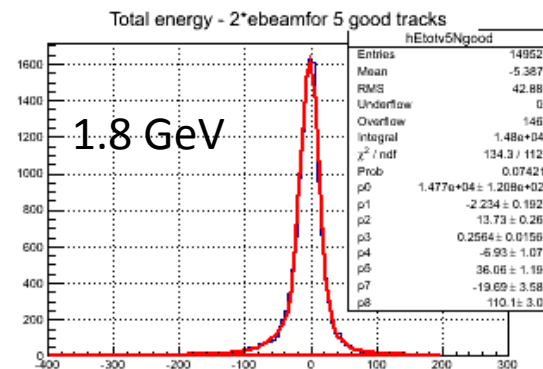
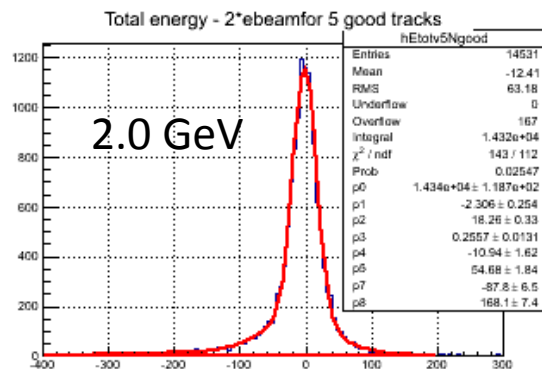
$$\Delta E_5 = \sum_1^5 E_\pi - 2 E_{\text{beam}}$$

$$\Delta E_{5+1} = \sum_1^5 E_\pi + E_{\text{mis}} - 2 E_{\text{beam}}$$

Сумма событий из 3-х точек по энергии  
Гистограмма - моделирование

# События $3(\pi^+\pi^-)$ с 5-ю треками (2)

Форма сигнала берется из моделирования с излучением радиационного фотона, фитировалось 3-мя Гауссами, соотношения фиксировались, кроме положения и сигмы основного Гаусса. Параметры интерполировались между точками по энергии.

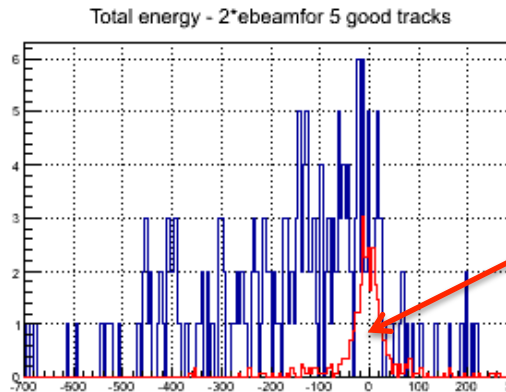
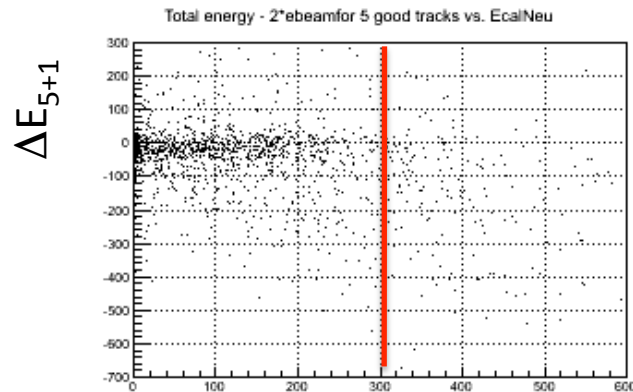


# Фон для событий с 5-ю треками (1)

Форма фона берется из моделирования фоновых процессов.

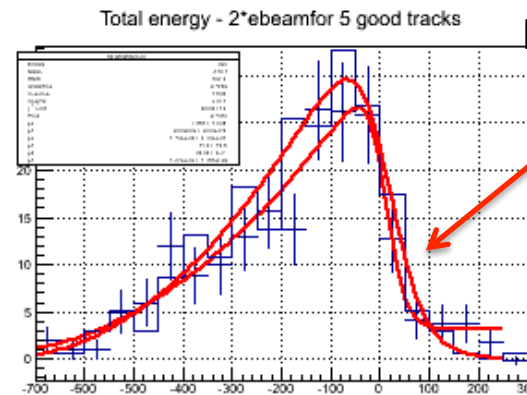
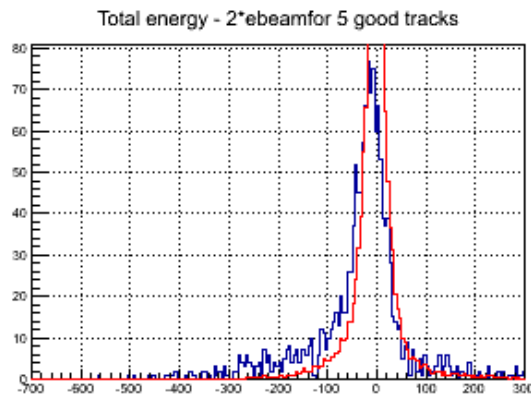
Основной вклад дают  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)\pi^0\pi^0$ ,  $2(\pi^+\pi^-)\pi^0$  с конверсией одного фотона

Для сравнения с экспериментом изучались события с  $E_{\text{neutral}} > 300 \text{ MeV}$  - энергия в калориметре, не связанная с заряженными треками.



2% сигнала из MC

Точки – эксперимент  
Гистограмма – MC



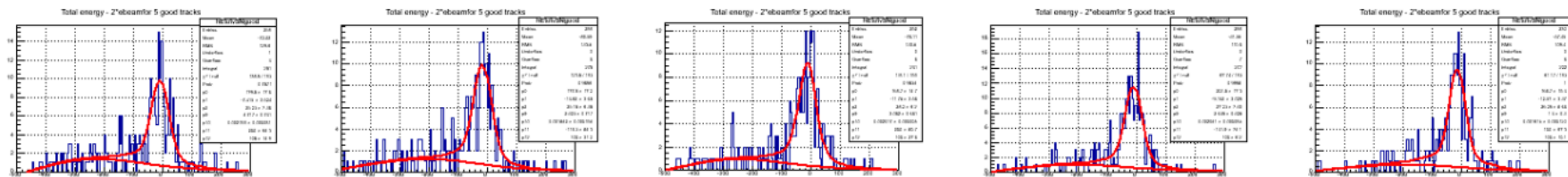
$\Delta E_{5+1}$

Фон аппроксимировался функцией Ферми умноженной на полином 3-й степени

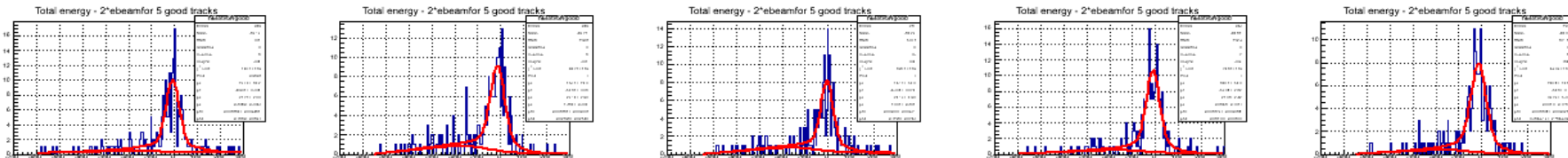
# Фон для событий с 5-ю треками (2)

Проводилось определение числа событий с отбором  $E_{\text{neutral}} < 300 \text{ MeV}$  – и без него.  
параметры Ферми фиксировались (и менялись от энергии)  
– параметры полинома свободны

Нет отбора по  $E_{\text{neutral}}$



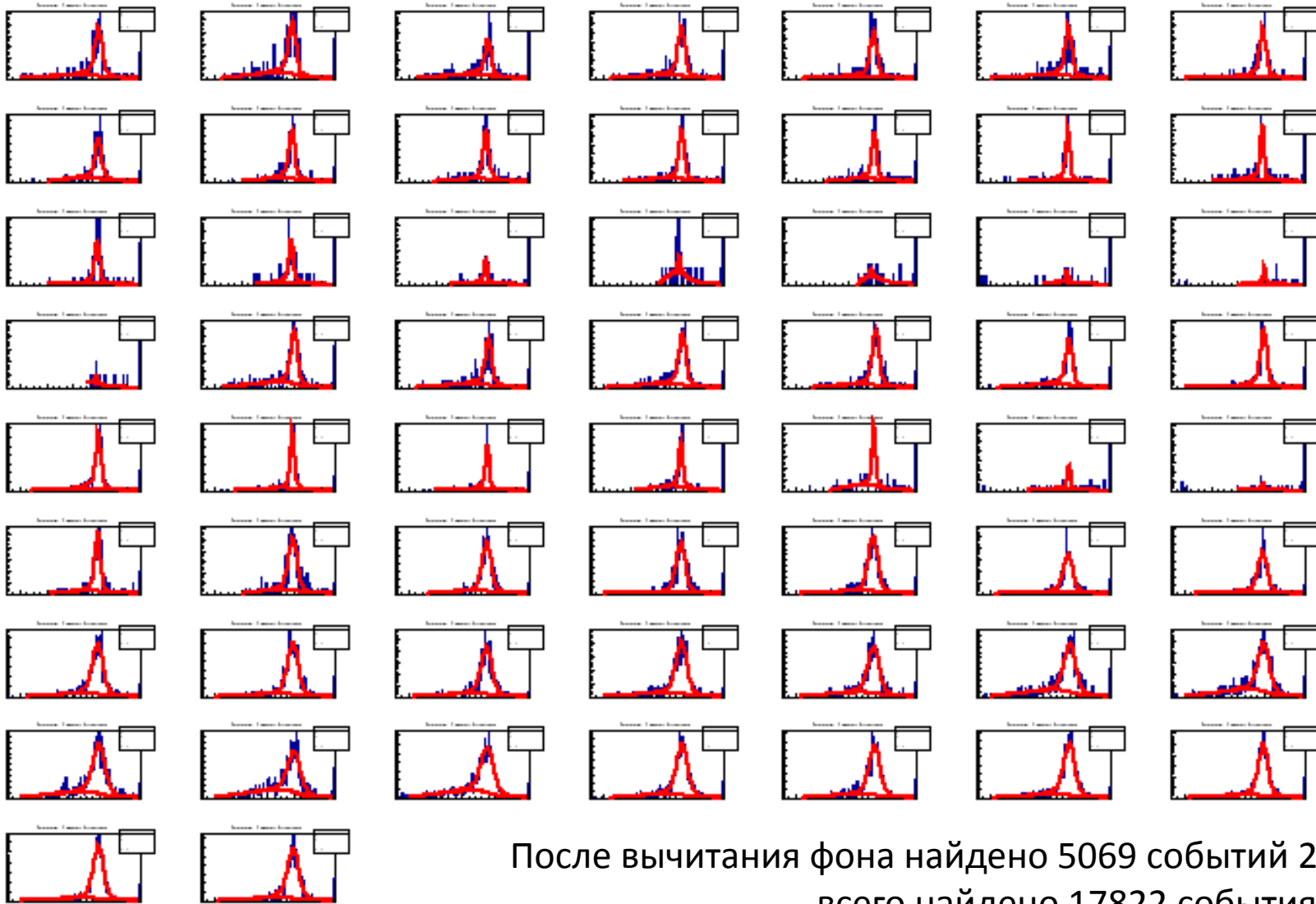
$E_{\text{neutral}} < 300 \text{ MeV}$



Интегрально число событий менялось не более,  
чем на 3% - оценка систематической ошибки.  
Статистически в каждой точке разница незаметна.



# События $3(\pi^+\pi^-)$ с 5-ю треками (3)



После вычитания фона найдено 5069 событий 2011, 2012  
всего найдено 17822 события

Сканирования 2011, 2012, 2017 г.

# Угловые распределения $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ событий (1)

Изучение динамики: ДК акцептанс не 100% и эффективность регистрации из МС зависит от углового распределения пионов. Мы воспользовались модификацией генератора БаБар Кардапольцева и написали адронные токи для нескольких моделей (Спасибо З.Силагадзе и А.Мильштейну), провели моделирование отклика КМД-3 и реконструкцию стандартной процедурой.

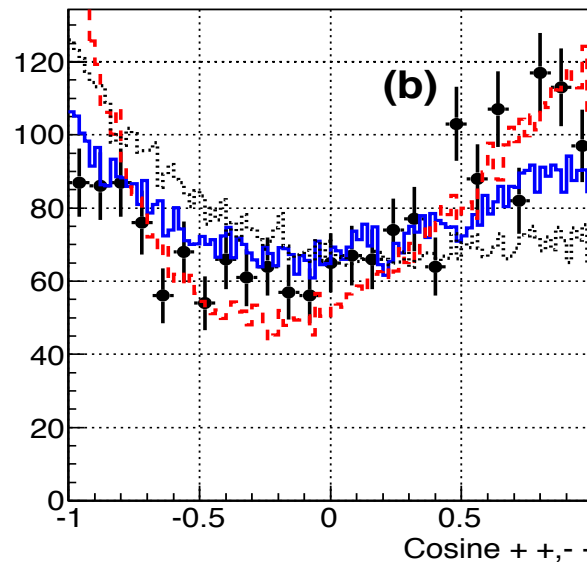
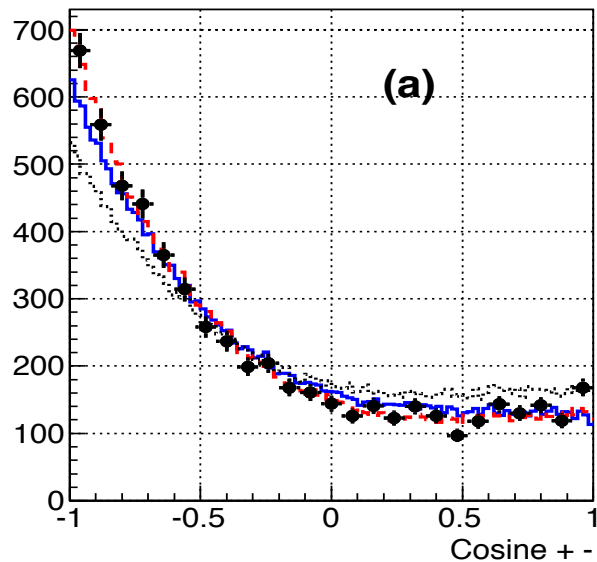
Мы тестировали:  $e^+e^- \rightarrow$  Phase Space,

$\rho(1420,1700)f_0(600)$ ,  $(\rho(1240,1700) \rightarrow a_1(1260)\pi \rightarrow \rho(770)2\pi)$

$\rho(770)2(\pi^+\pi^-)$ ,

$\rho(770)f_0(1370,1500)$ ,  $f_0 \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$ ,

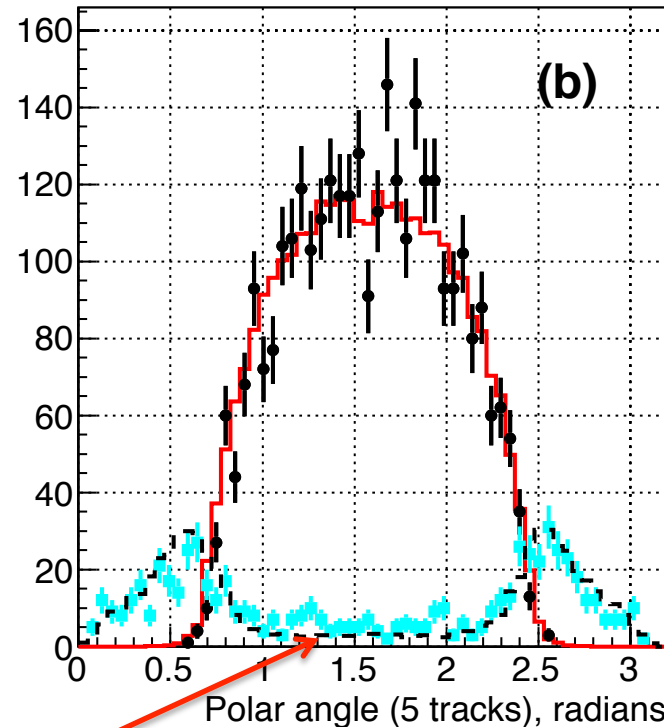
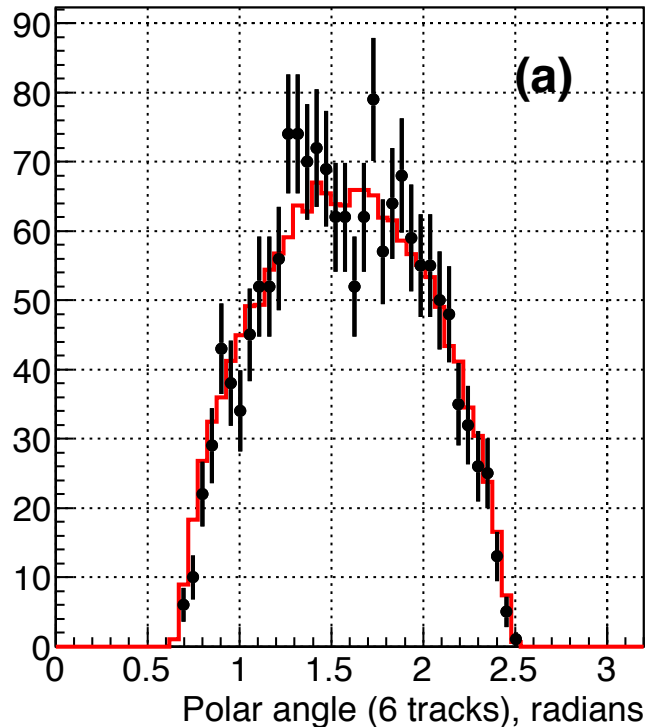
$\rho(770)f_2(1270)$ ,  $f_2 \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$ ,



Examples:

- .....  $\rho(1420,1700)f_0(600)$
- $\rho(770)f_0(1370,1500)$
- - -  $\rho(770)f_2(1270)$

## Угловые распределения $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ событий (2)



У 15-17% событий трек в ДК, но не восстановлен:  
не зависит от динамики и хорошо моделируется

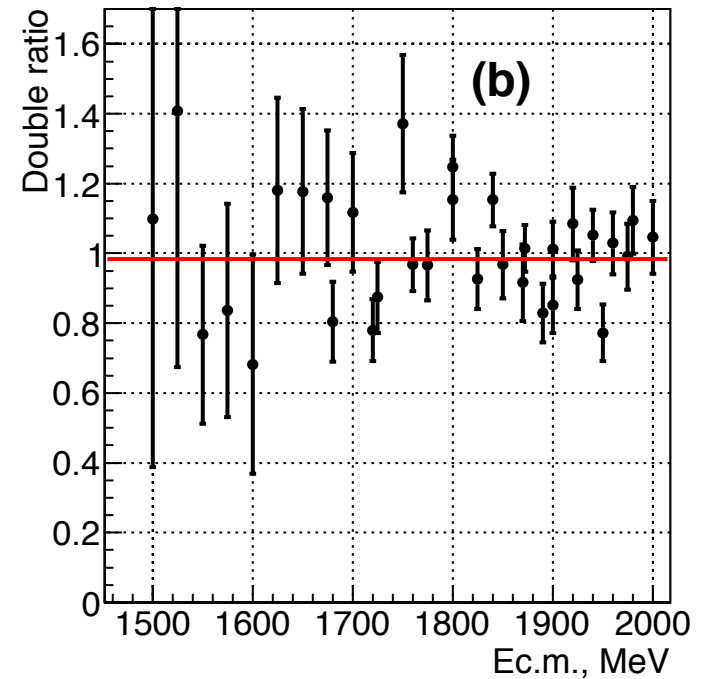
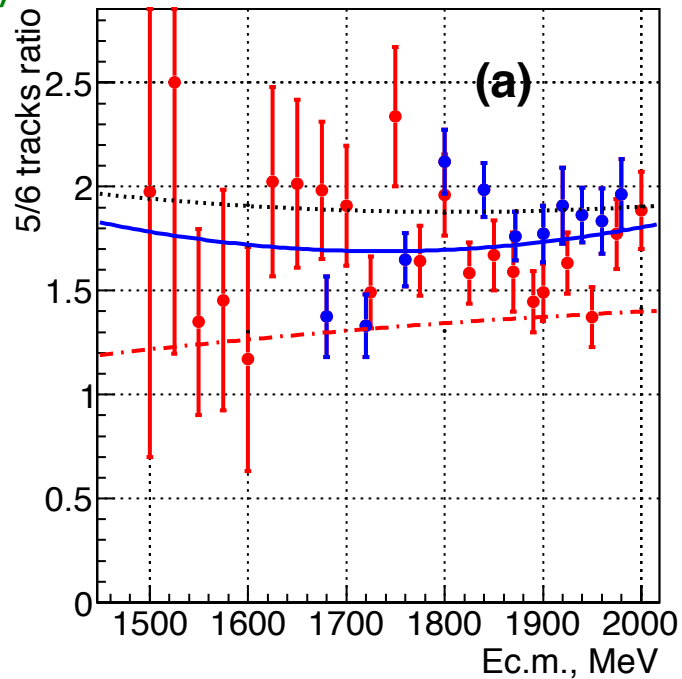
Телесный угол ДК не 100% и динамика рождения бп меняет соотношение 6-ти и 5-ти трековых событий.

# 5/6 отношение – оценка модельной ошибки

Examples:

- .....  $\rho(1420,1700)f_0(600)$
- $\rho(770)f_0(1370,1500)$
- - -  $\rho(770)f_2(1270)$

$$\text{Double ratio} = (N5/\varepsilon_{mc5})/(N6/\varepsilon_{mc6})$$

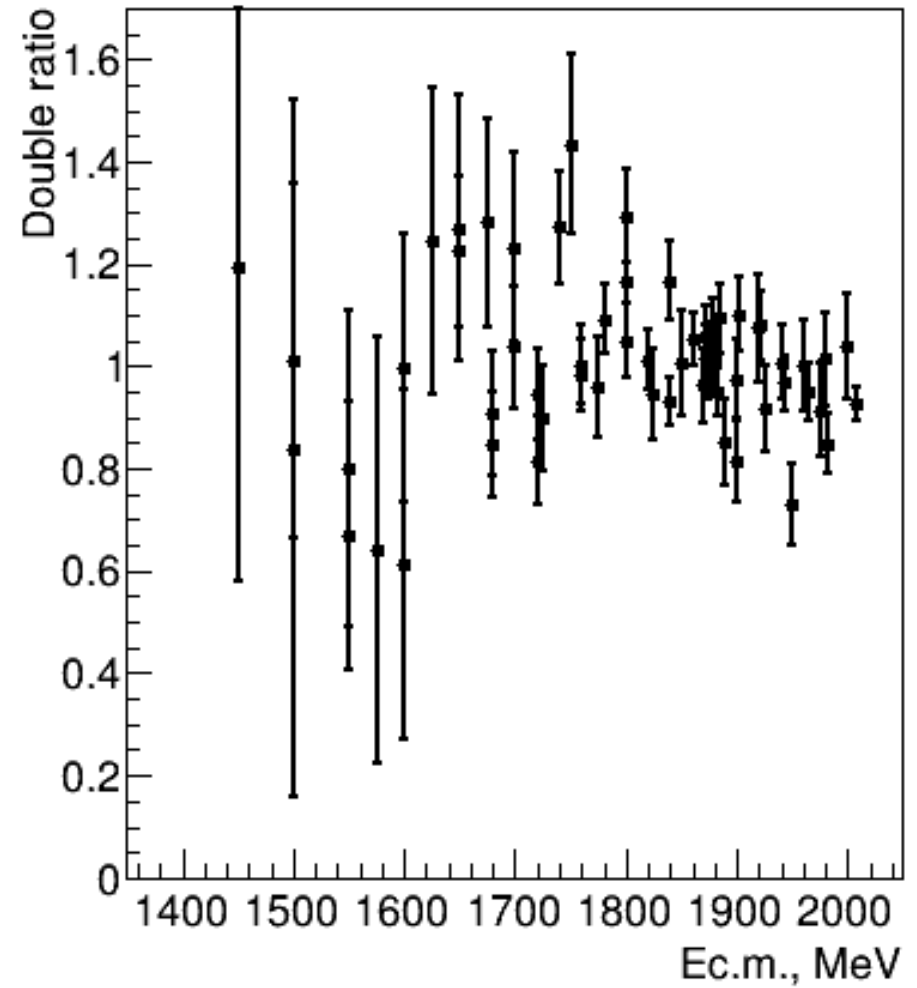
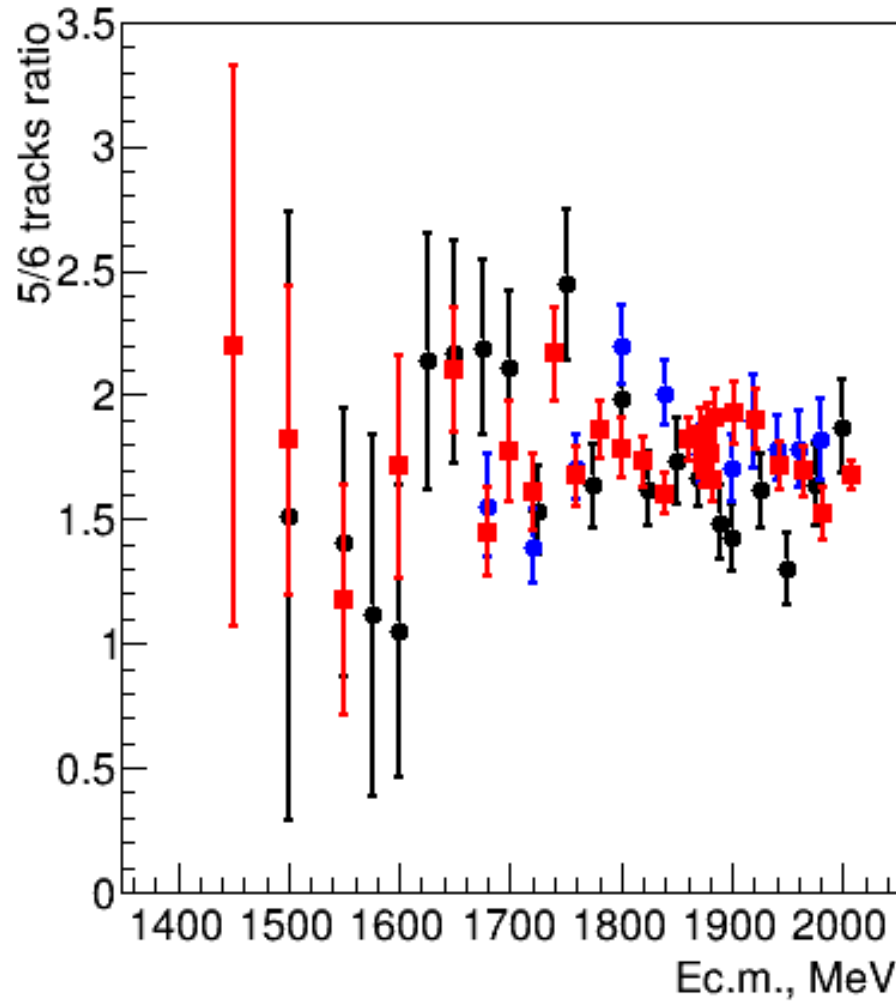


Fit:  $0.984 \pm 0.018$

$\chi^2 / \text{n.d.f} = 56/35$

Отличие от единицы + ошибка\* Scale Factor = 4% - оценка модельной ошибки

# 5/6 отношение – добавлены точки 2017 г.

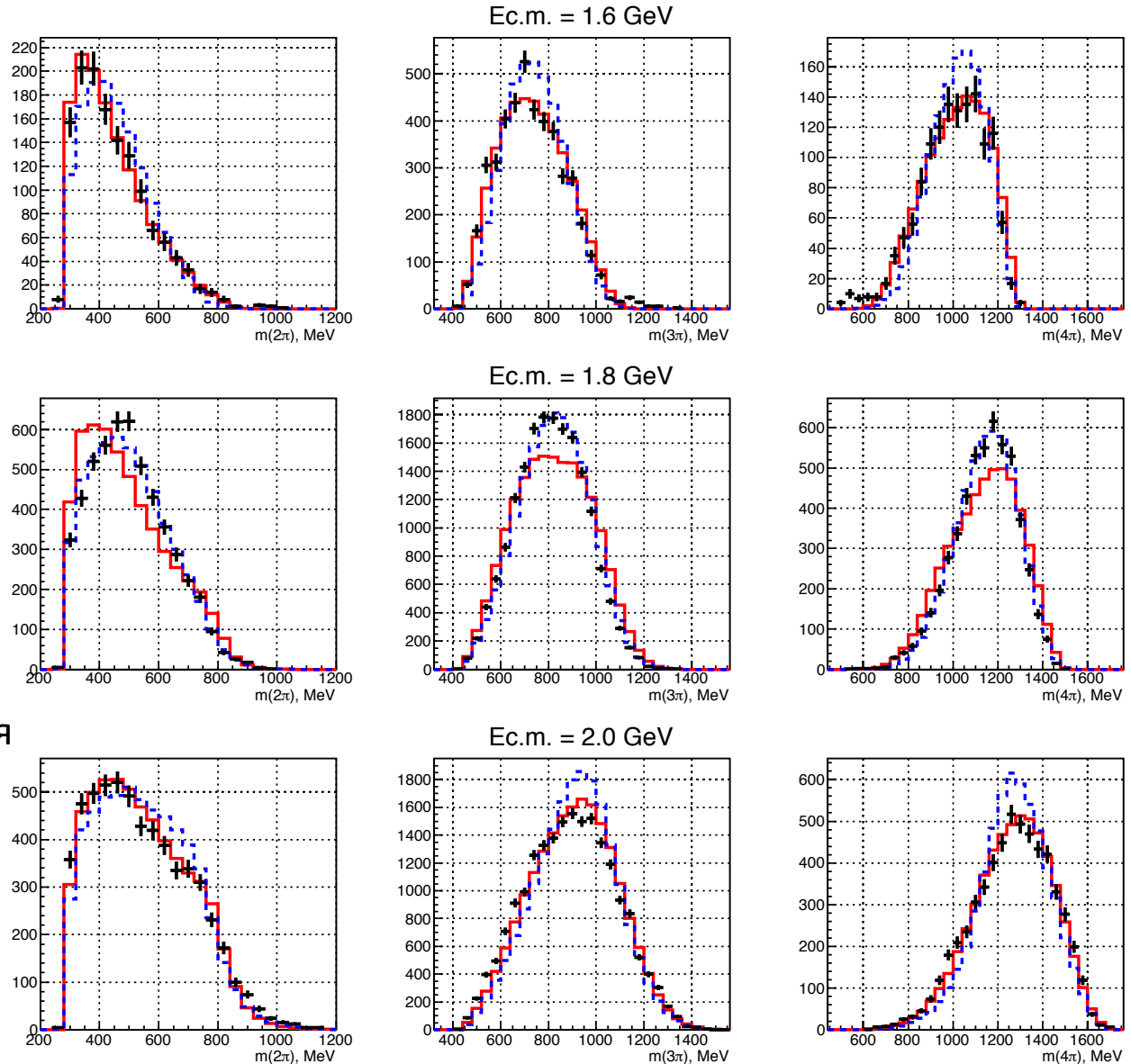


# Изучение динамик процесс $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$

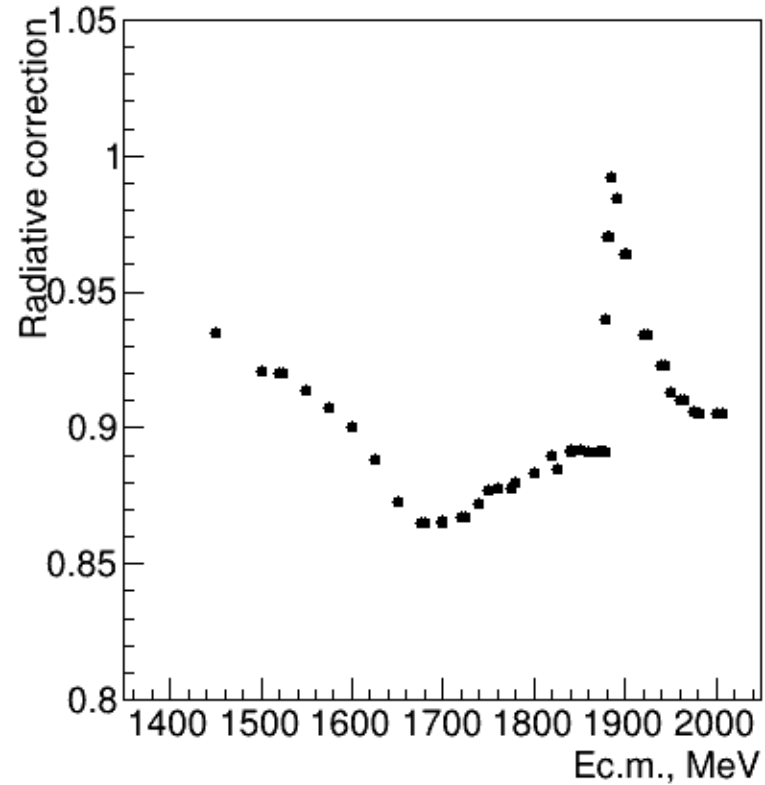
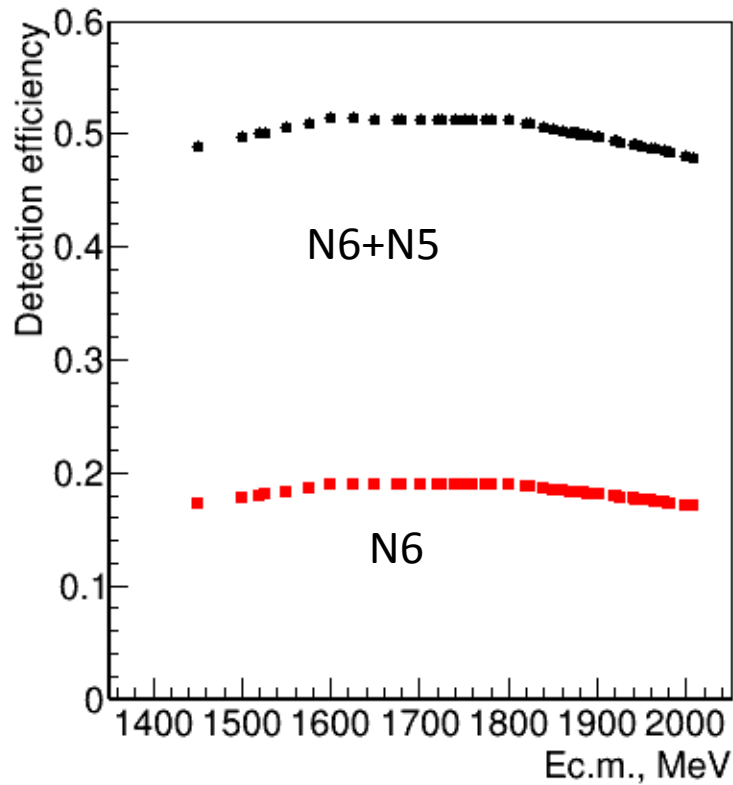
Мы показали, что “простая” модель  $\rho(770)2(\pi^+\pi^-)$  или  $\rho(770)f_0(1370,1500)$  хорошо описывает угловые распределения и дает правильный акцептанс. Но первая хорошо описывает распределения по массам для  $E_{c.m.}=1.6$  и  $2.0$  GeV, а при  $1.8$  GeV нужен резонанс в 4-х пионах. (!?)

Динамика процесса меняется в области  $1700-1900$  MeV !

По данным 2017 г. это никак не связано с порогом  $N\bar{n}$ !



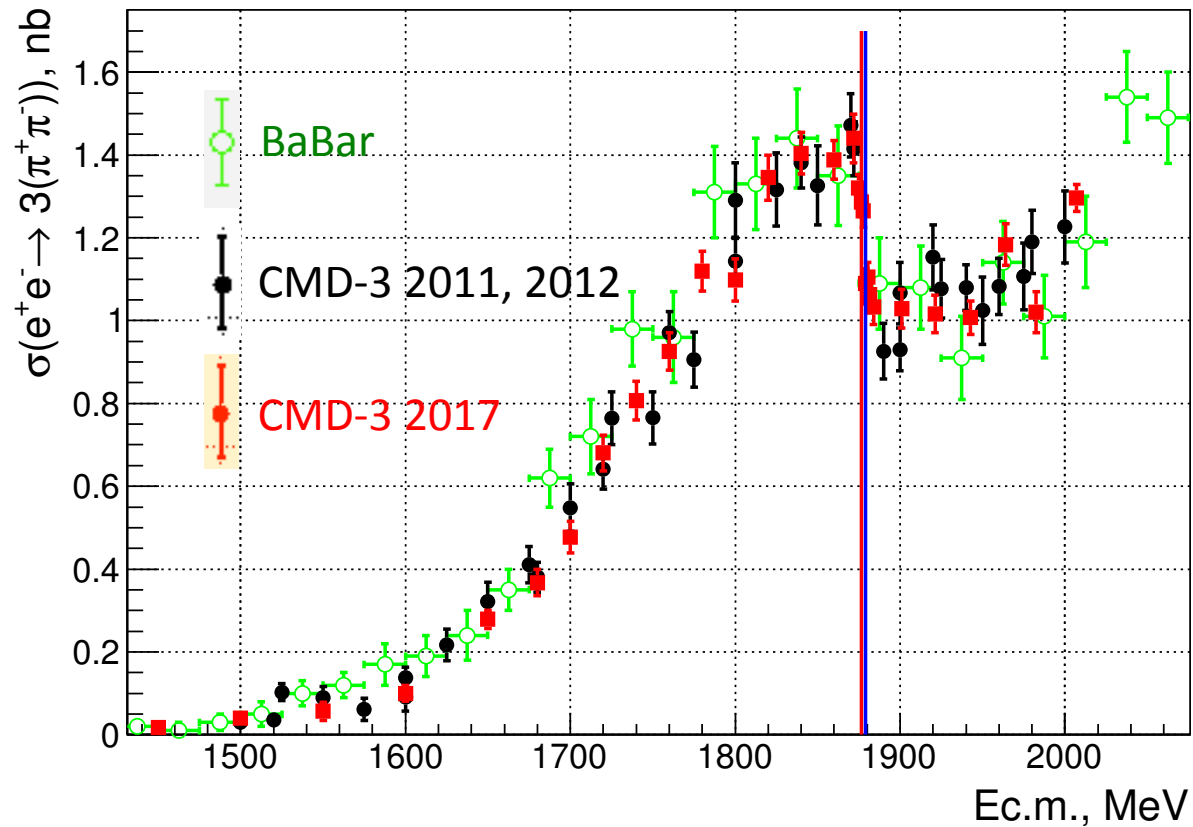
# Эффективность и рад. поправка



Для расчета сечений бралась сумма N6+N5

Рад. поправка рассчитывалась итерациями:  
Бралось сечение Бабар, потом подставлялось  
наше экспериментальное сечение.

# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$



Результат КМД-3 по данным  
2011-2012 г.г.  
Phys. Lett. B 723 (2013) 73

Добавлены точки  
сканирования 2017 г.

Скачок в сечении подтвержден.

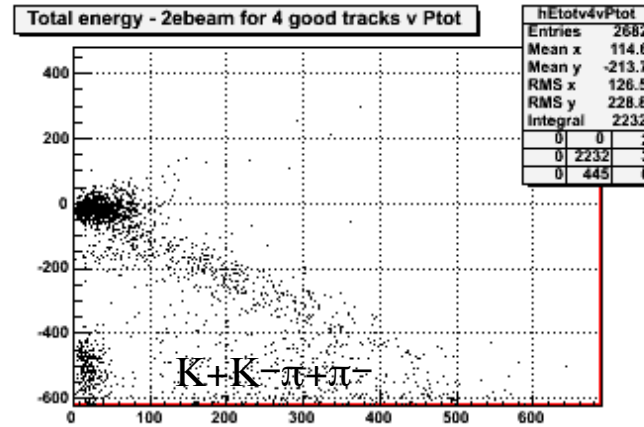
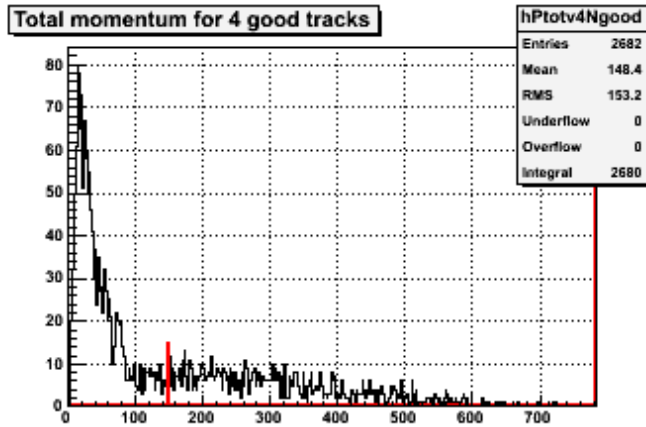
Систематические ошибки та же - 6%



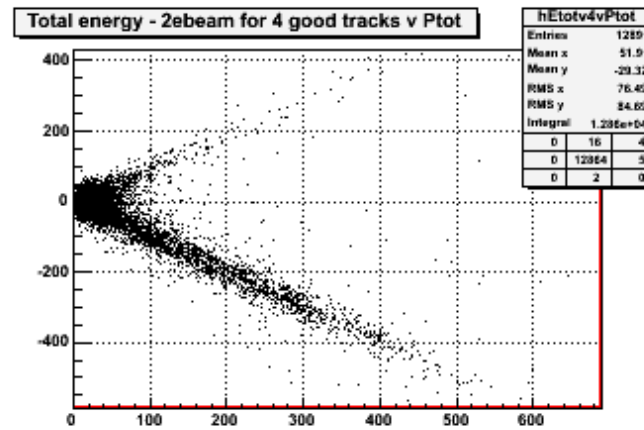
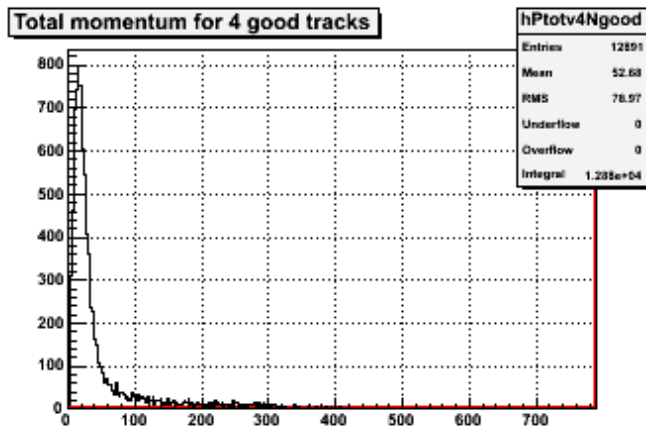
# Похожий анализ процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$

Ebeam = 900 МэВ

Data



MC



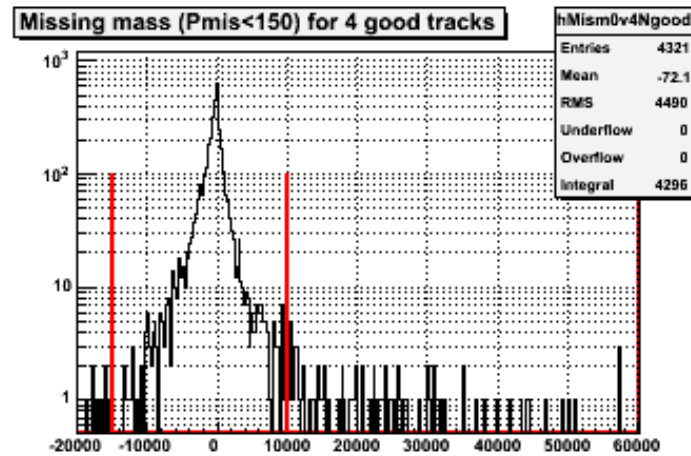
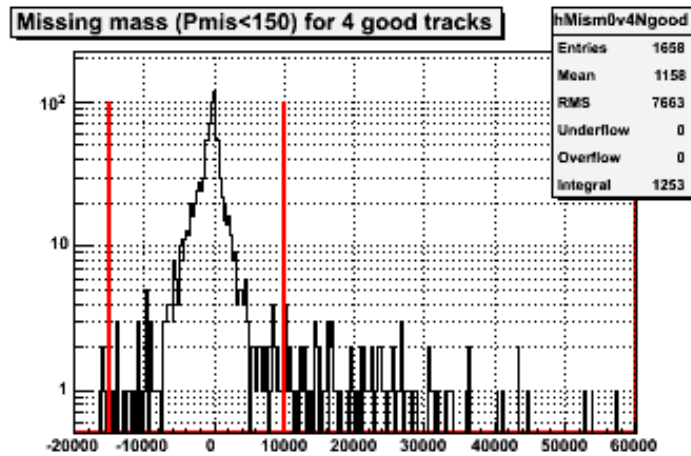
Ptot

Ptot

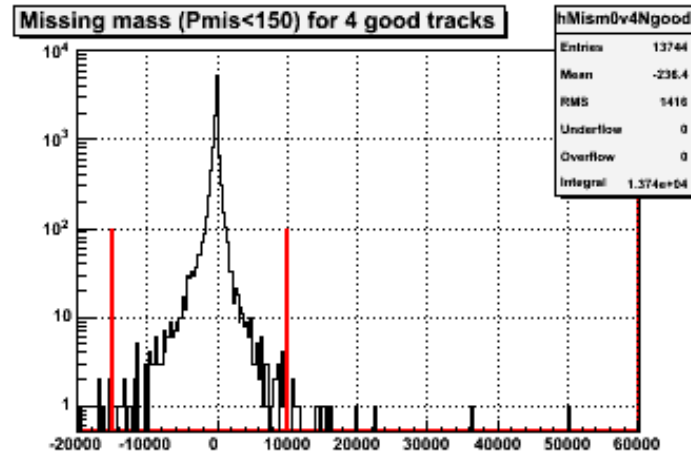
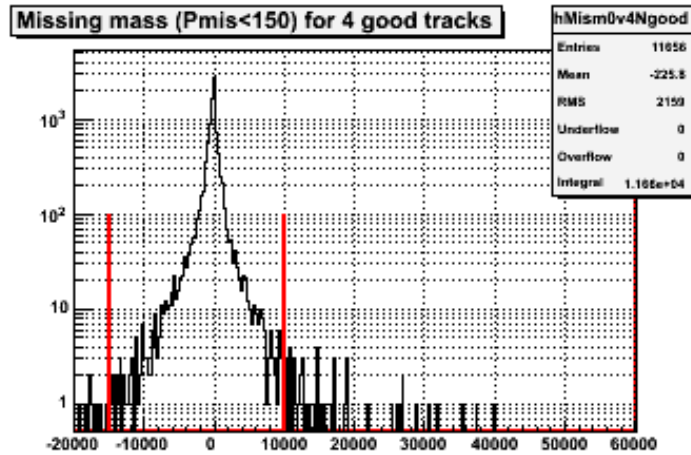
# Недостающая масса для 4-х треков

Ebeam = 700 МэВ

Ebeam = 900 МэВ

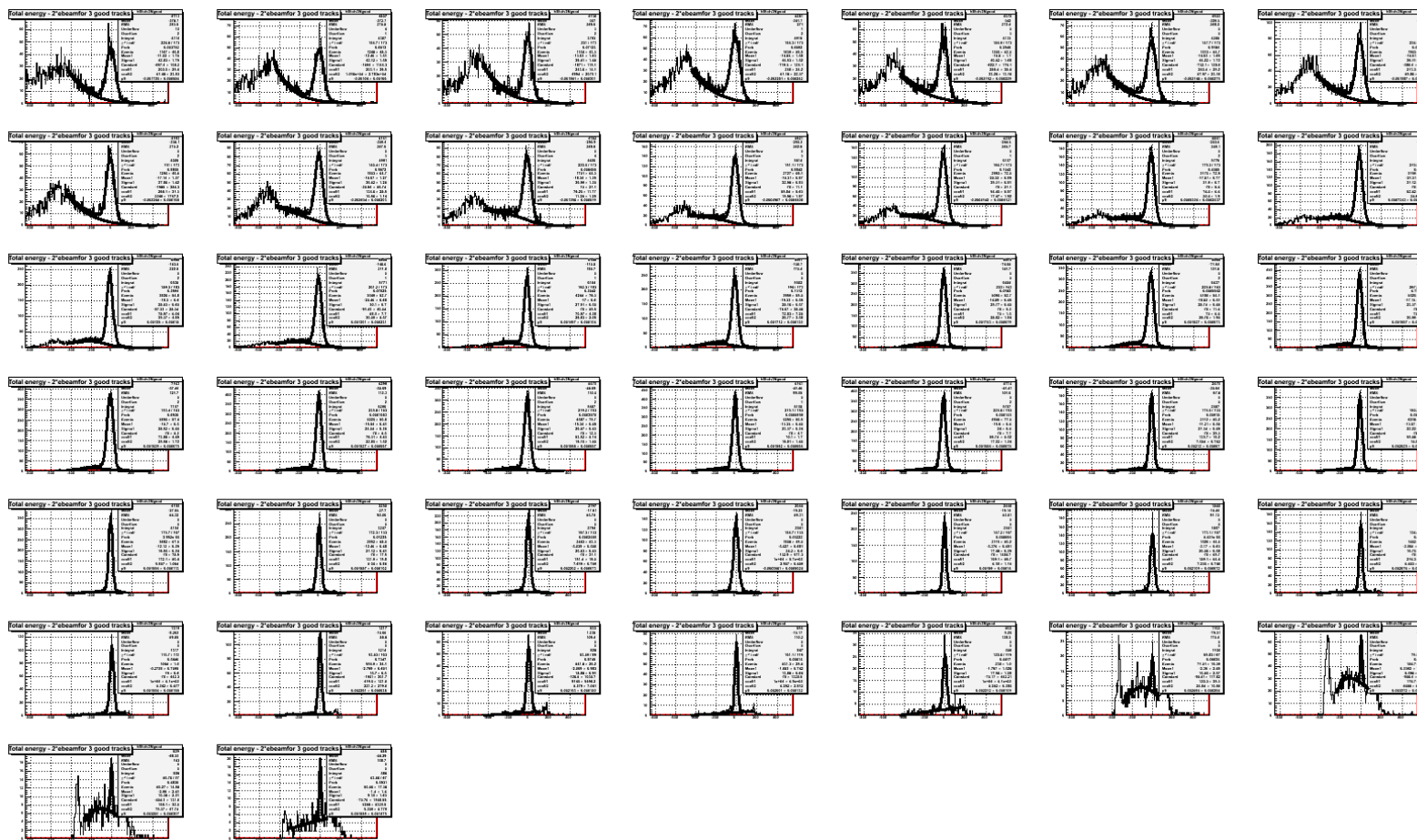


Data

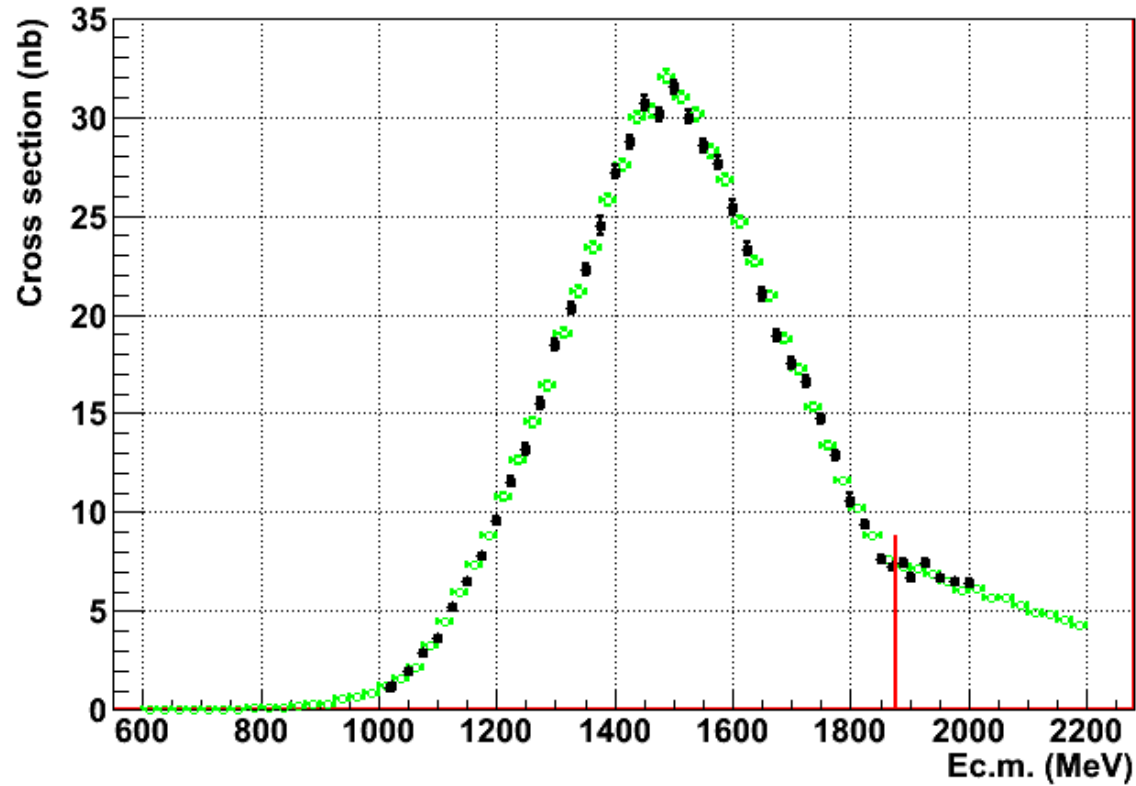


MC

# Энергия для 3-х треков + улетевший $\pi$

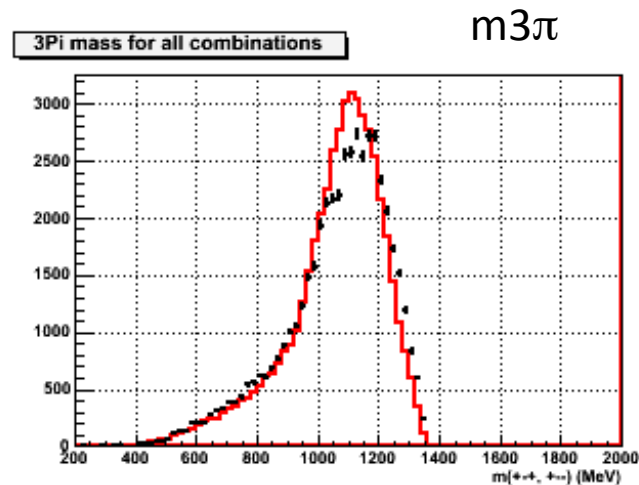
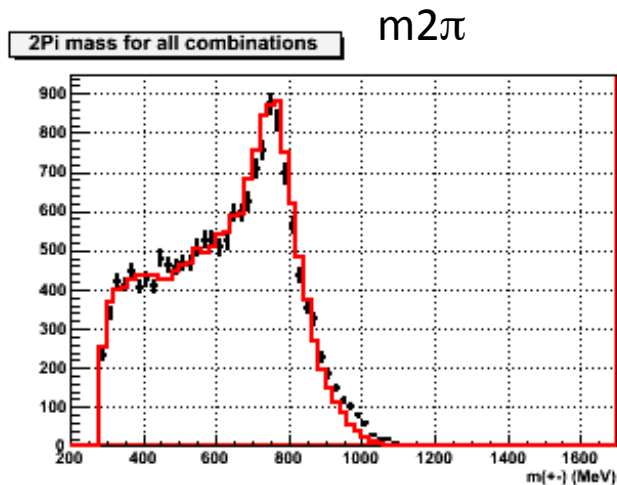


# Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$

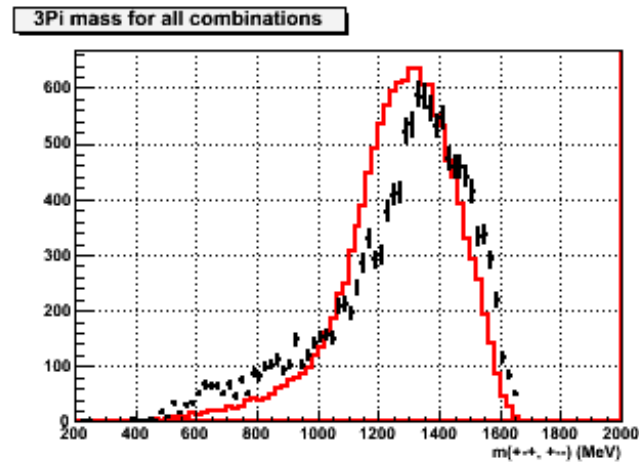
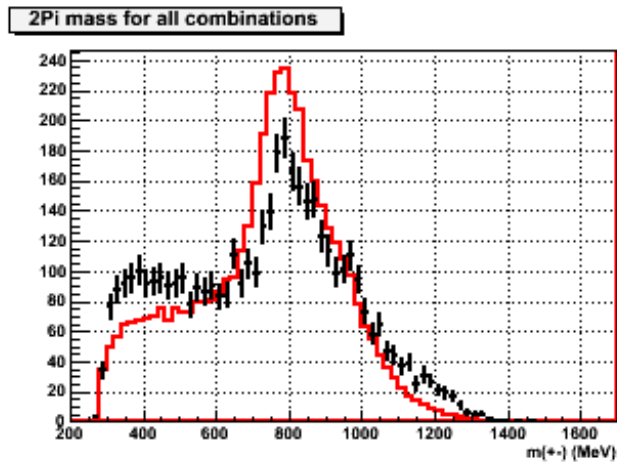


Данные БаБар и предварительные КМД-3

# Проблемы с пониманием динамики



Ebeam = 750 MeV

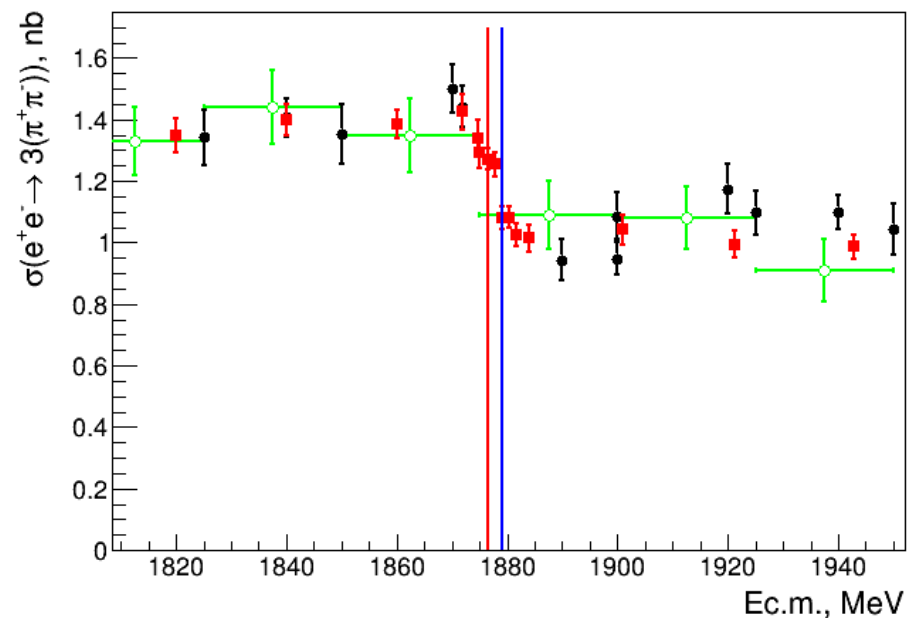
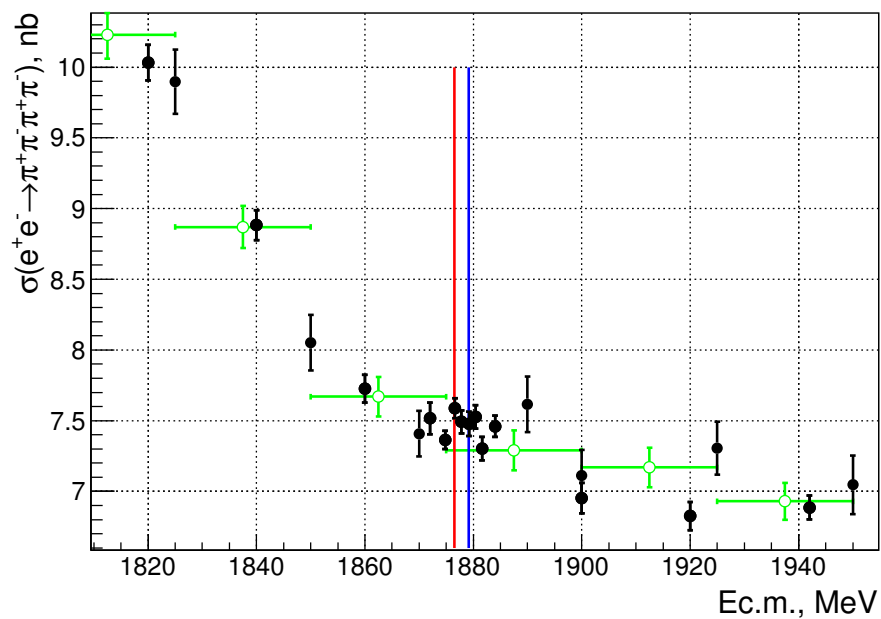


Ebeam = 900 MeV

Модель  $a_1\pi$  не описывает массовые распределения выше 1.5 ГэВ

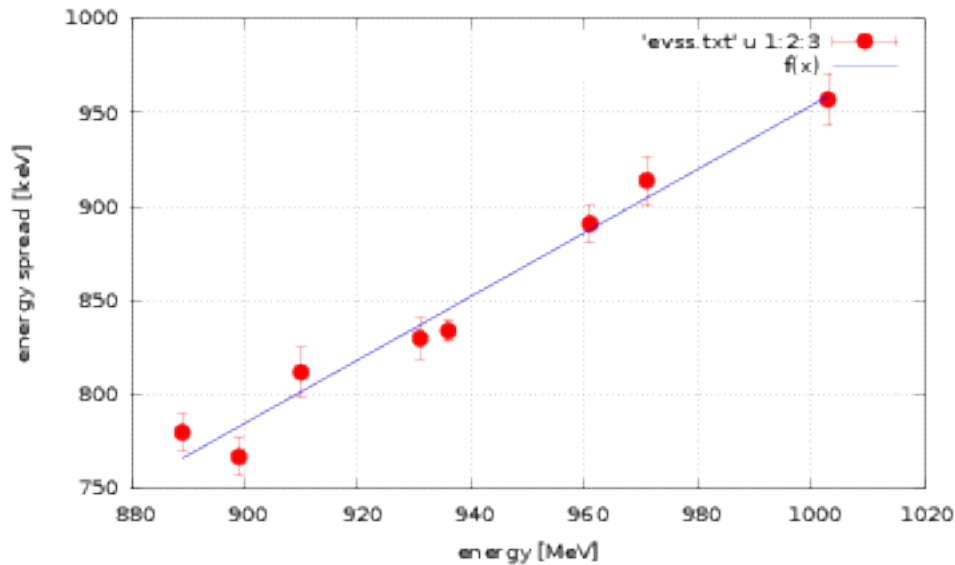
Мы не готовы оценить систематику в сечении  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$

# Сечения вблизи порога NN



Структуры в сечении  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$  связанной с порогом NN не наблюдается

# При какой энергии и на каком энергетическом интервале ?



Быстрое изменение сечения в измерении размывается излучением фотонов и разбросом энергии в пучках.

Разброс энергии в с.ц.м. измеряется по обратному Комптону и на пороге NN составляет  $\sigma_{\text{E.c.m.}} = 1.3 \text{ МэВ}$  - fixed

Наблюдаемое сечение это свертка “радиационного” сечения с разбросом энергии в с.ц.м.

$$\sigma_{\text{vis}}(E_{\text{c.m.}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{E.c.m.}}} \int dE'_{\text{c.m.}} \sigma_{f\gamma}(E'_{\text{c.m.}}) \cdot \exp\left(-\frac{(E_{\text{c.m.}} - E'_{\text{c.m.}})^2}{2\sigma_{\text{E.c.m.}}^2}\right)$$

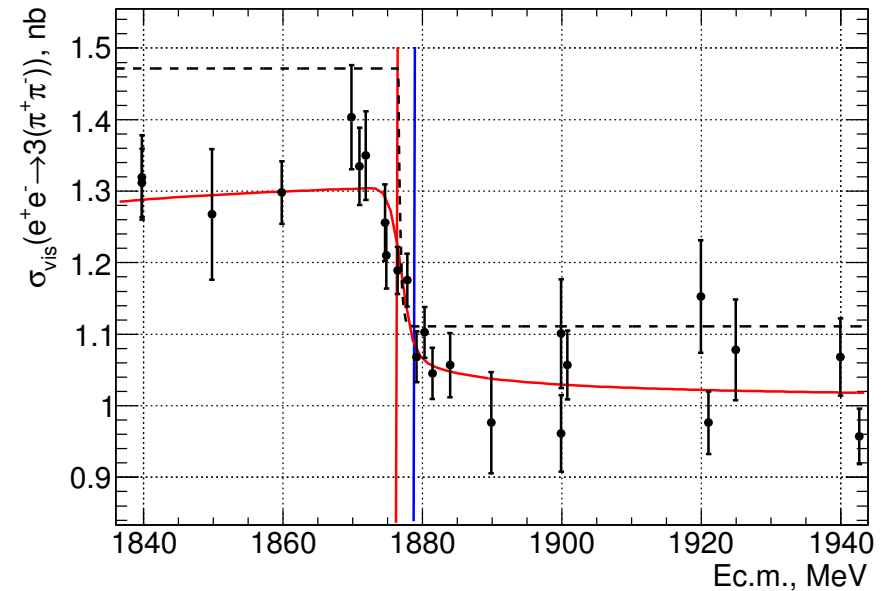
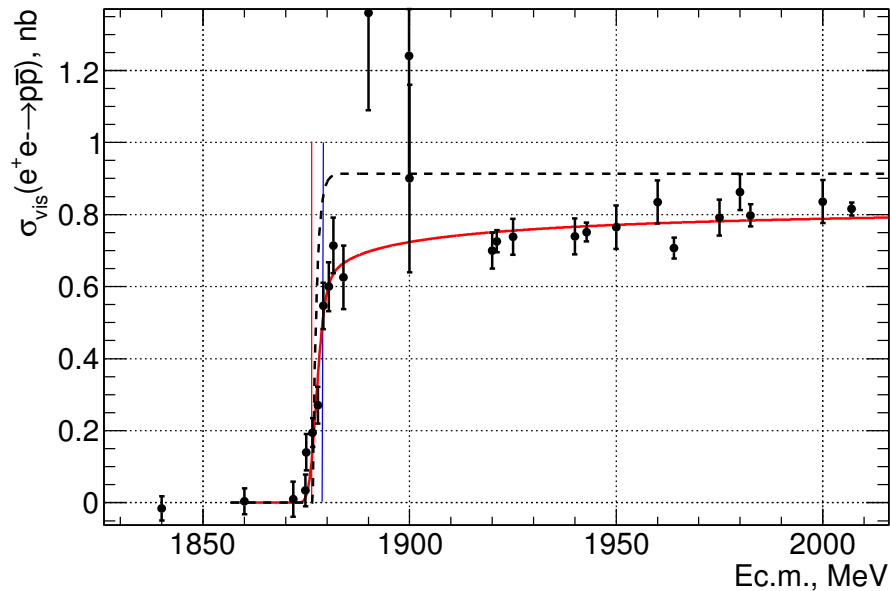
“Радиационное” сечение это свертка Борновского сечения и спектра радиационных фотонов

$$\sigma_{f\gamma}(E_{\text{c.m.}}) = \int_0^{E_{\text{c.m.}}} dE_{\gamma} \cdot \sigma_{\text{Born}}(E_{\text{c.m.}} - E_{\gamma}) \cdot F(E_{\text{c.m.}}, E_{\gamma})$$

# Очень быстрое изменение сечений!

Для **демонстрации** мы отфитировали наблюдаемые изменения сечений функцией описывающей экспотенциальный рост (спад) Борновского сечения от порога  $E_{thr}$  со значения сечения  $A$  до значения  $B$  с показателем  $\sigma_{thr}$

$$\sigma_{Born}(E_{c.m.}) = A \pm B(1 - \exp(-\frac{(E_{c.m.} - E_{thr})}{\sigma_{thr}}))$$

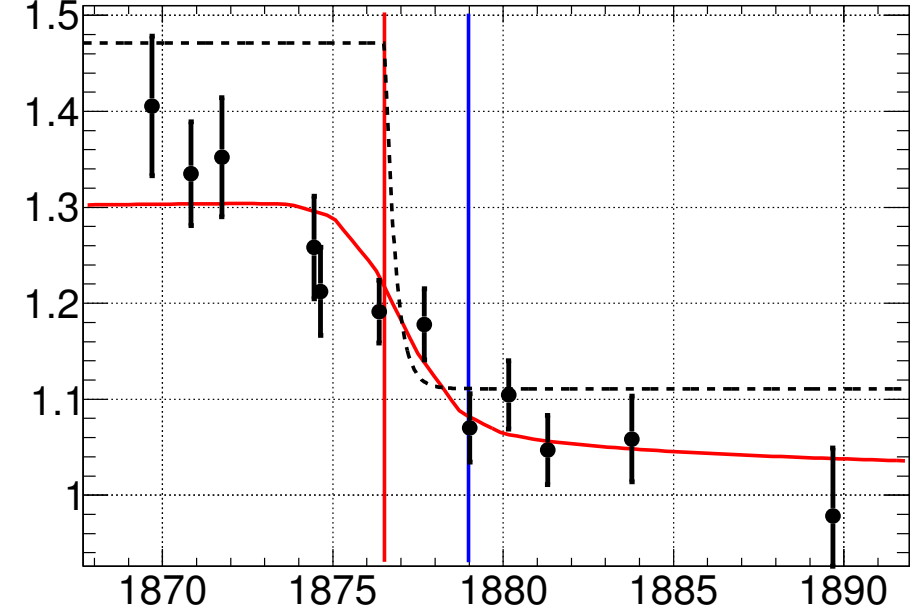
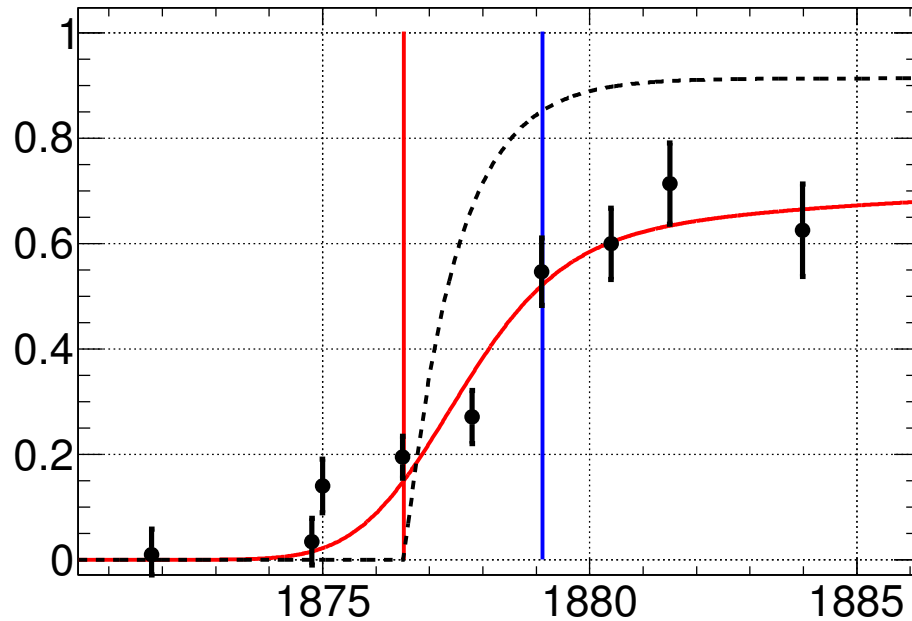




# Очень быстрое изменение сечений!

$$\sigma_{\text{Born}}(E_{\text{c.m.}}) = A \pm B(1 - \exp(-\frac{(E_{\text{c.m.}} - E_{\text{thr}})}{\sigma_{\text{thr}}}))$$

$$\Delta E_{\text{pp-nn}} = 2.6 \text{ MeV}$$



	<b>A, nb</b>	<b>B, nb</b>	<b><math>E_{\text{thr}}</math>, MeV</b>	<b><math>\sigma_{\text{thr}}</math>, MeV</b>	<b><math>\chi^2/\text{n.d.f.}</math></b>
pp	0-fixed	0.91±0.01	1875.8±0.5	1.76±0.58	34/25
6π	1.49±0.02	-0.40±0.03	1873.7±0.6	3.1±0.9	17/20
pp	0-fixed	0.914±0.011	1876.54-fixed	0.95±0.25	35/26
6π	1.47±0.03	-0.36±0.03	1876.54-fixed	0.29±0.73	22/21

# Заключение

- В 2017 г. мы увеличили статистику при высоких энергиях более, чем в 3 раза!  
**Наши благодарности команде ВЭПП2000 и службам !!!**
- Измерены сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow \rho\rho, 3(\pi^+\pi^-), 2(\pi^+\pi^-)$  в диапазоне 1.5 – 2.0 ГэВ
- Подтвердилось наличие структуры в сечении  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  на пороге рождения  $\rho\rho$
- Скачок в сечении 6-ти пионов трудно объяснить интерференцией с резонансом ?
- Сканирование области порога позволило наблюдать “тонкую” структуру сечения
- **В процессе  $e^+e^- \rightarrow \rho\rho$  сечение нарастает на масштабе 1 МэВ !**
- Недостаток статистики и разброс энергии в пучках не позволяет наблюдать “сверх-тонкую” структуру перехода через порог – не видно влияния порога  $\eta\eta$
- Не наблюдается наличие структуры в сечении  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$  на пороге рождения  $N\bar{N}$ 
  - гипотеза о пропорциональности “скачка” вероятности аннигиляции  $N\bar{N}$  в этот канал предполагает величину “скачка” в 14%/6% раз больше для этого канала
  - происходит какая то сложная динамика, предпочитающая 6 пионов и отсутствие интерференции с континуумом!!!

**Нам надо больше статистики на пороге  
и очень желательно уменьшить энергетический разброс!**

**Спасибо!**