



Секция ядерной физики ОФН РАН  
Объединённый институт ядерных исследований

НАУЧНАЯ СЕССИЯ  
СЕКЦИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК РАН,  
посвящённая 300-летию Российской академии наук

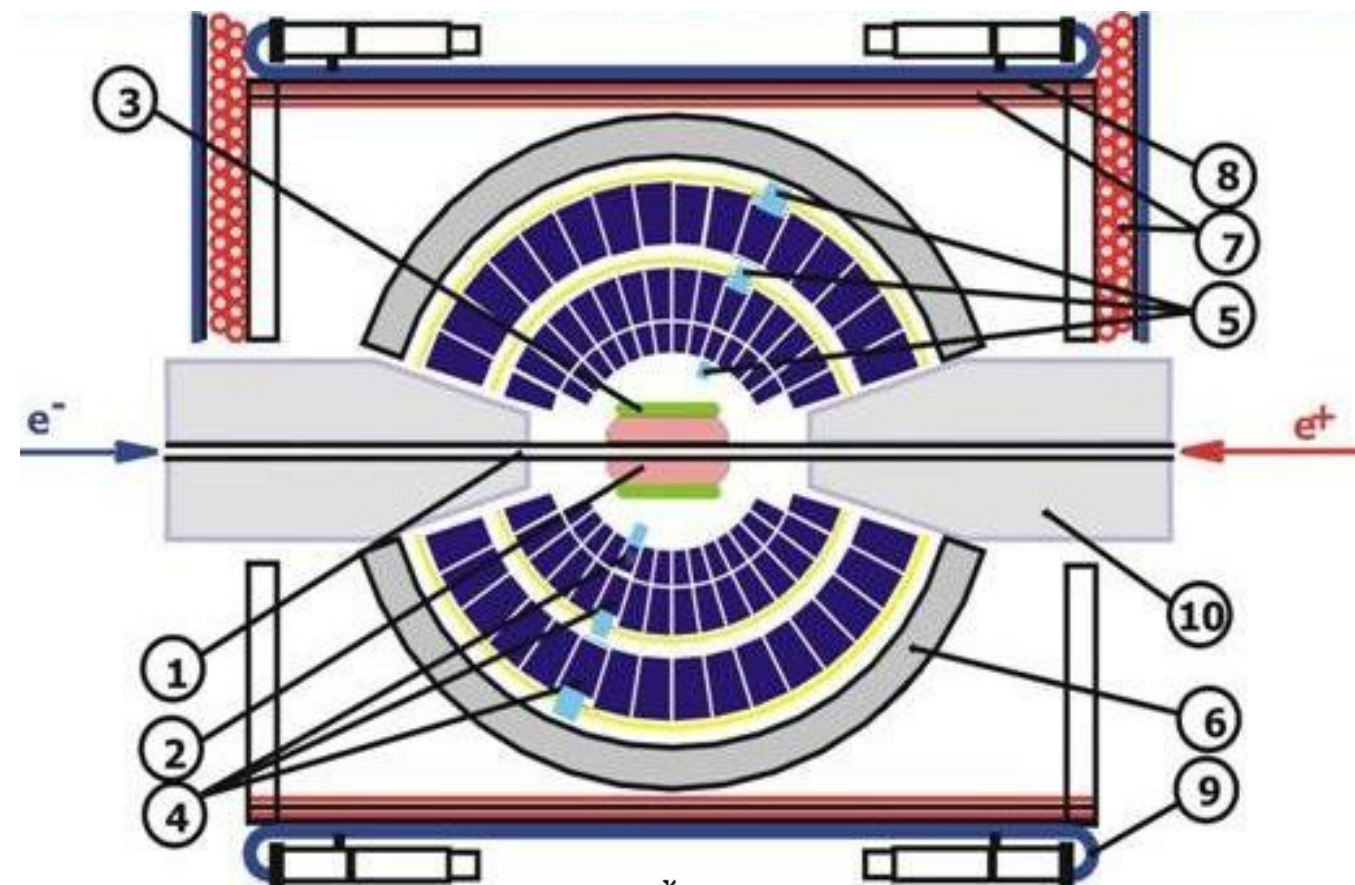
# Измерение сечения процесса

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0\eta, \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

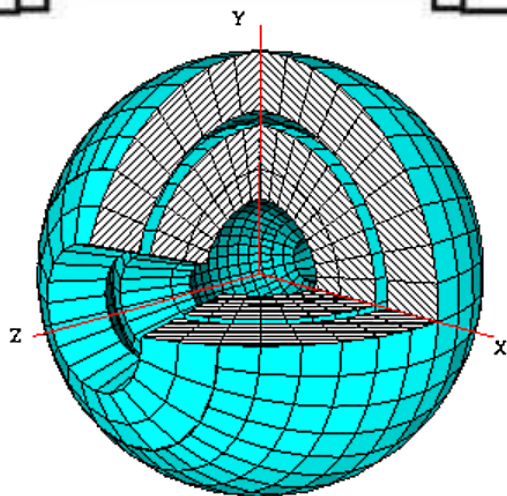
*Александр Ботов*

Институт Ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

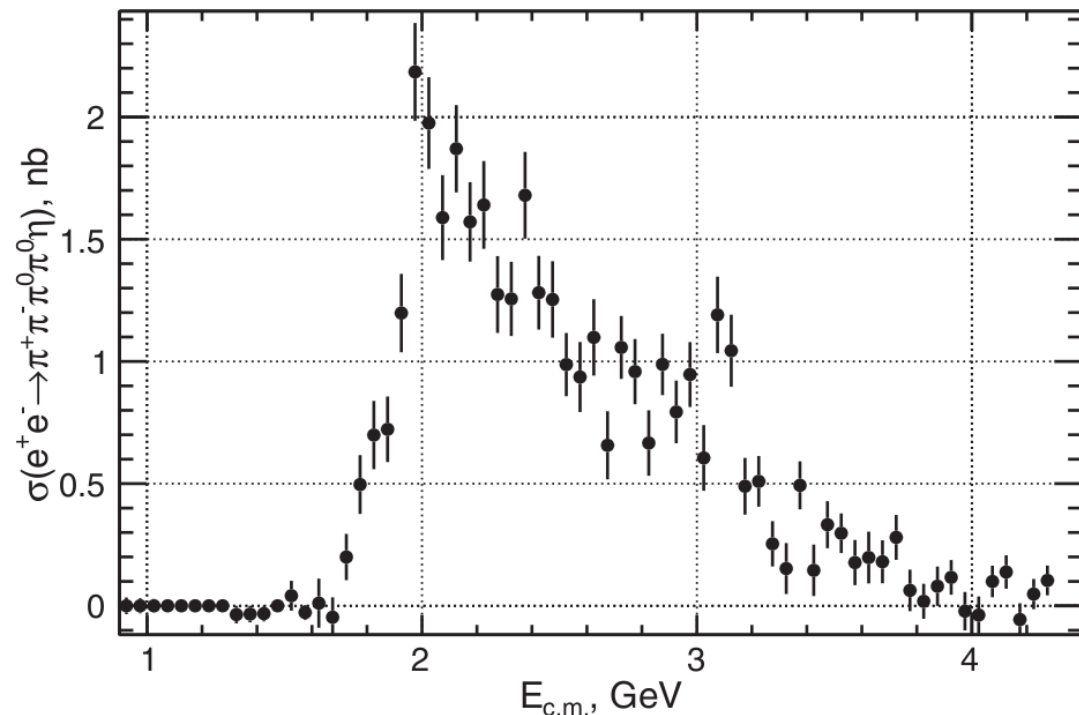




- 1 — вакуумная труба
- 2 — трековая система
- 3 — аэрогелевый черенковский счетчик
- 4 — кристаллы NaI(Tl)
- 5 — фототриоды
- 6 — железный поглотитель
- 7 — мюонные трубки
- 8 — железные пластины
- 9 — сцинтилляционные счетчики
- 10 — фокусирующие соленоиды

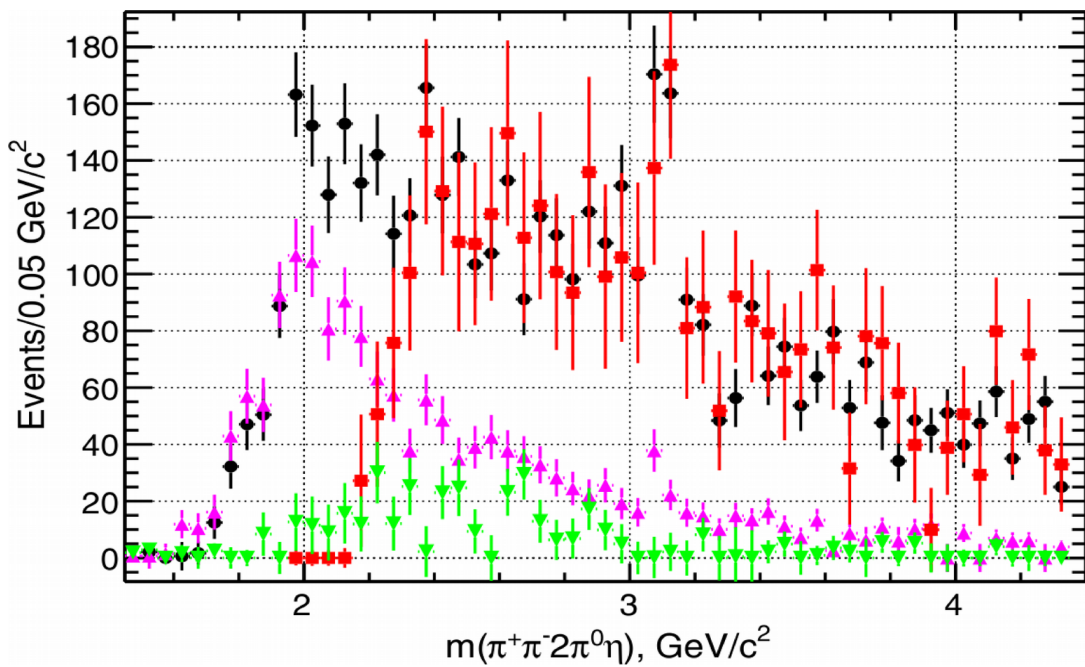


Телесных угол —  $0.95 \cdot 4\pi$



## BABAR 2018

- Точки — процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$
- Треугольники — канал  $\omega\eta\pi^0$
- Перевернутые треугольники — канал  $\phi\eta\pi^0$





- Энергии 1,55 – 2 ГэВ
- Экспериментальные данные: 2011, 2012, 2019, 2020, 2021
- Интегральная светимость — 146 пб<sup>-1</sup>
- Моделирование сигнального процесса
  - гипотеза  $e^+e^- \rightarrow \rho(1700) \rightarrow \omega a_0$ ,  $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $a_0 \rightarrow \eta\pi^0$
- Моделирование фоновых процессов
  - генератор, включающий все известные адронные процессы
- Моделирование учитывает **радиационны поправки**
  - определяются формой заданного борновского сечения
    - ▶ для фоновых процессов — заданные в генераторе
    - ▶ для сигнального процесса — первоначально из статьи BABAR



- Процесс **Vhabha**-рассеяния  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
- $\geq 2$  заряженных частиц, вылетающих из места встречи
- 2 наиболее энергичные из них удовлетворяют условиям
  - энергосодержание  $> 0.6$  энергии пучка
  - $d_0 < 1$  см — расстояние от траектории до оси пучков (ось z)
  - $|z_0| < 10$  см — z-координата ближайшей к оси z точки трека
  - $|\Delta z_0| < 5$  см — между треками
  - $50^\circ < \theta = [\theta_1 + (180^\circ - \theta_2)]/2 < 130^\circ$  — средний полярный угол
  - $\Delta\theta = |\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 15^\circ$  — расколлинearность по полярному углу
  - $\Delta\phi = ||\phi_1 - \phi_2| - 180^\circ| < 10^\circ$  — расколлинearность по азимутальному углу
- **Вычисленный аппаратный триггер** — как для изучаемого процесса
- Генератор **VHWISE** — теоретическая неопределенность не хуже 0.5%
- Систематическая неопределенность — **2%**

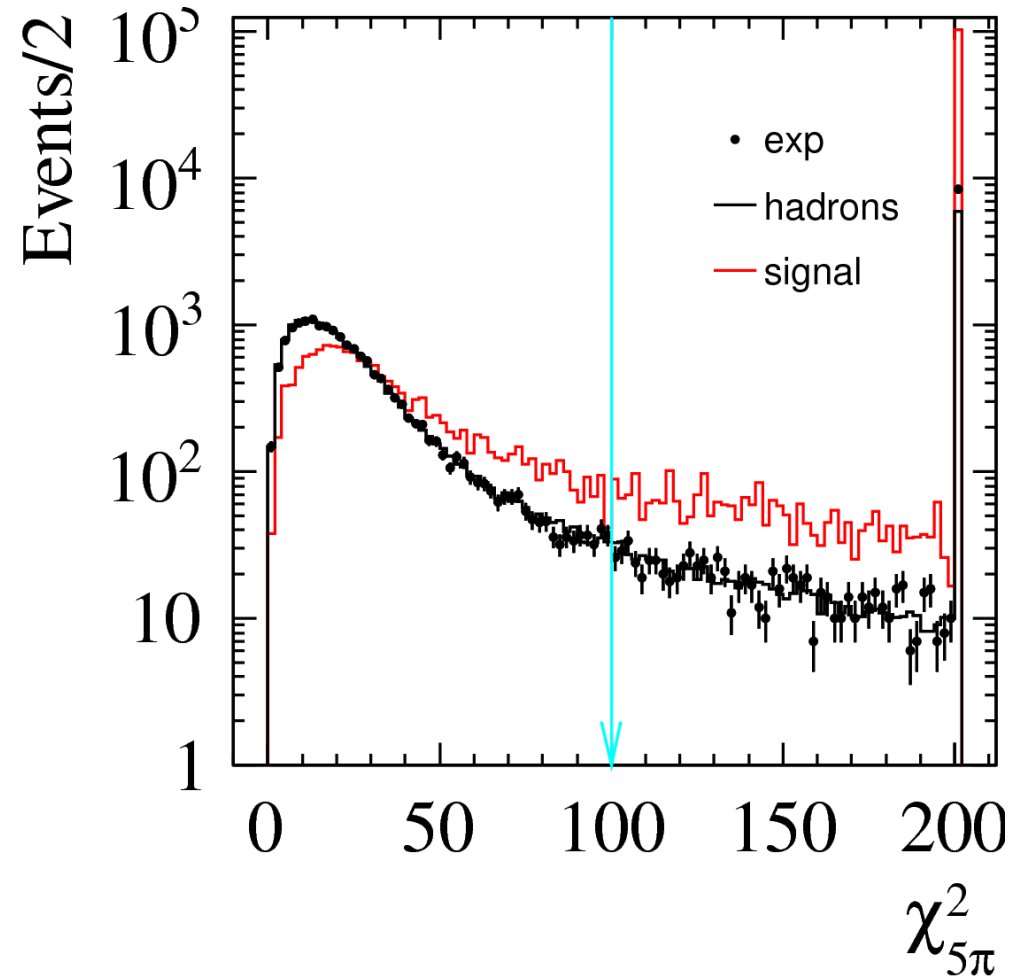
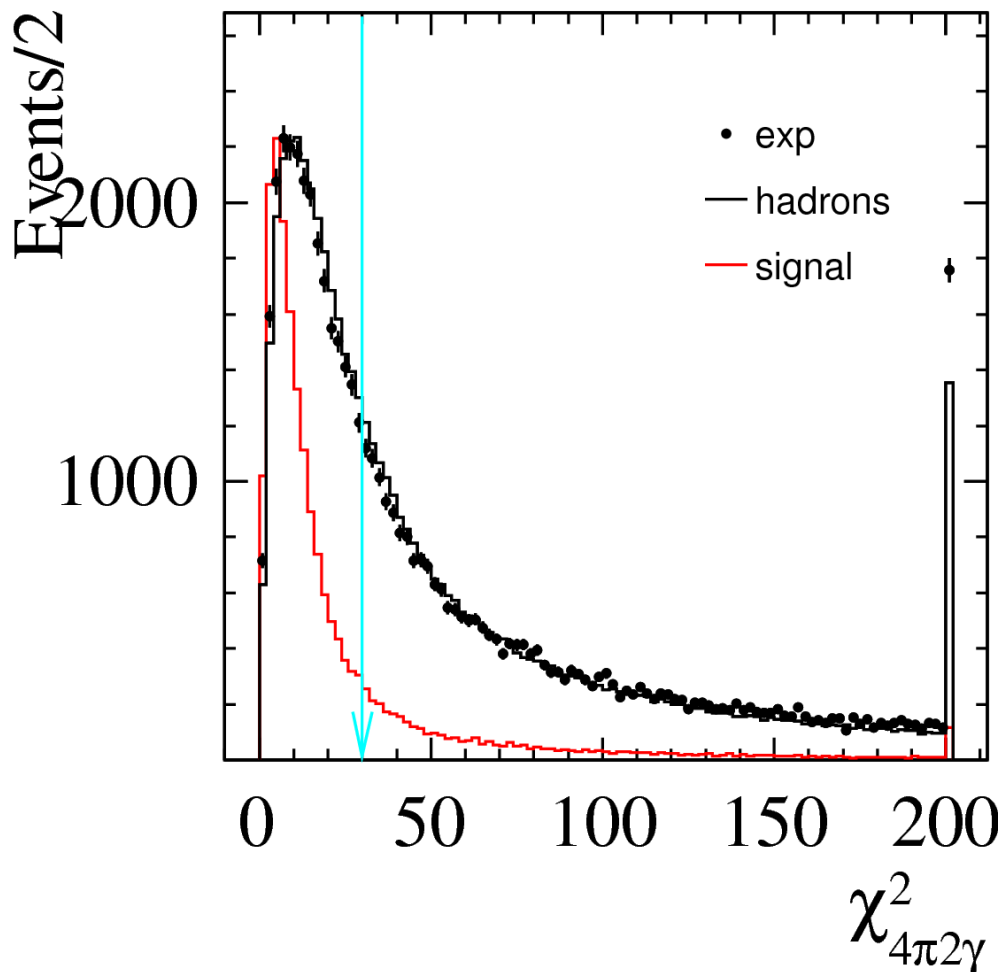


- Энерговыделение в калориметре  $> 300$  МэВ
- Сработал вычисленный первичный триггер
- Кинематическая реконструкция:
  - 2 или 3 заряженные частицы, вылетающие из места встречи
    - ▶  $d_0 < 1$  см — расстояние от траектории до оси пучков
    - ▶  $|z_0| < 15$  см —  $z$ -координата (относительно места встречи) ближайшей к оси пучков точки трека
    - ▶  $|\Delta z_0| < 5$  см — разница  $z$ -координат между любыми 2 треками
  - вершина события по 2 трекам (качество реконструкции —  $\chi^2_r$ )
    - ▶ если 3 трека — пара с наименьшим  $\chi^2_r$
    - ▶ далее они считаются треками от пионов  $\pi^\pm$
    - ▶ вершина события  $\Rightarrow$  уточненные углы вылета частиц
  - $N_\gamma \geq 6$  — число фотонов с энергиями  $> 20$  МэВ
    - ▶ для  $N_\gamma > 10$  берутся 10 наиболее энергичных



- проверяется гипотеза  $\pi^+\pi^-2\pi^0\gamma\gamma$ 
  - ▶ выбираются комбинации из 6 фотонов, имеющие  $100 < m_{12}, m_{34} < 170$  МэВ — инвариантные массы пар фотонов — кандидатов в  $\pi^0$ -мезон
  - ▶ реконструкция с требованием выполнения законов сохранения энергии-импульса: выбираются комбинации с  $\chi^2_{2\pi 6\gamma} < 200$
  - ▶ реконструкция в гипотезе  $\pi^+\pi^-2\pi^0\gamma\gamma$  (параметр  $\chi^2_{4\pi 2\gamma}$ )
    - для перевычисленных  $m^*_{12}, m^*_{34}$  требуется равенство  $M_{\pi^0}$
  - ▶ выбирается комбинация с
    - $400 < m^{**}_{56} \equiv M_{\eta} < 700$  МэВ — инвариантная масса пары фотонов — кандидатов в  $\eta$ -мезон
    - наименьшим  $\chi^2_{4\pi 2\gamma}$

- Отбираются события с  $\chi^2_{4\pi 2\gamma} < 30$  (подавляет 55% оставшегося фона, сохраняет 80% сигнала)
- Основные фоновые процессы:  $\pi^+\pi^-4\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-3\pi^0$  ( $\chi_{5\pi}$ ),  $\pi^+\pi^-2\pi^0$ ,  $K^+K_s^-\pi^-\pi^0$ 
  - $\chi_{5\pi} > 100$  (подавляет 70% оставшегося фона, сохраняет 90% сигнала)
  - $N_\gamma = 6$  (подавляет 50% оставшегося фона, сохраняет 80% сигнала)



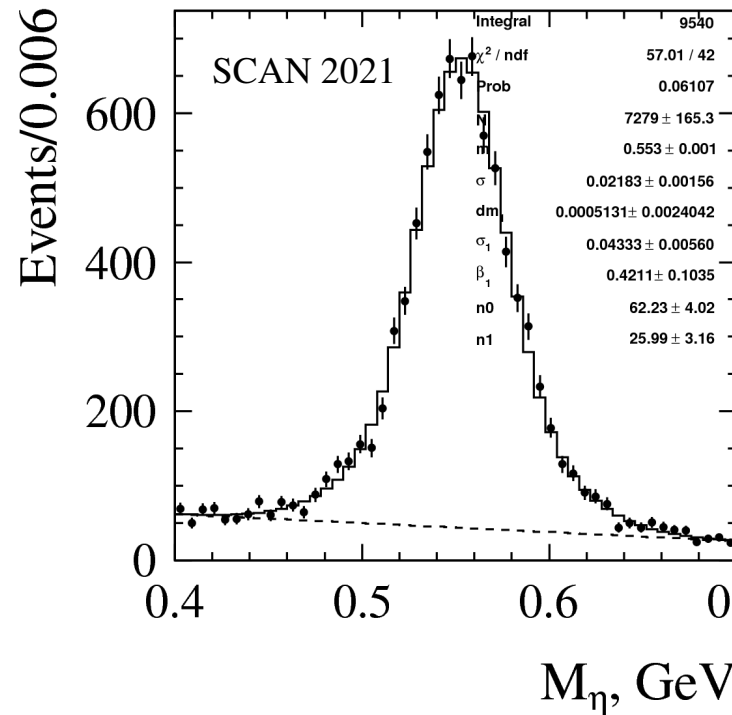
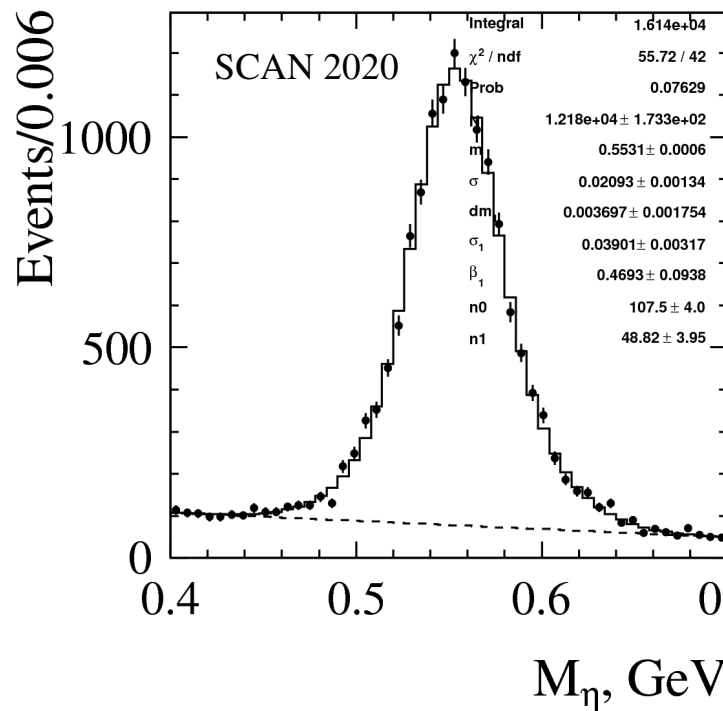
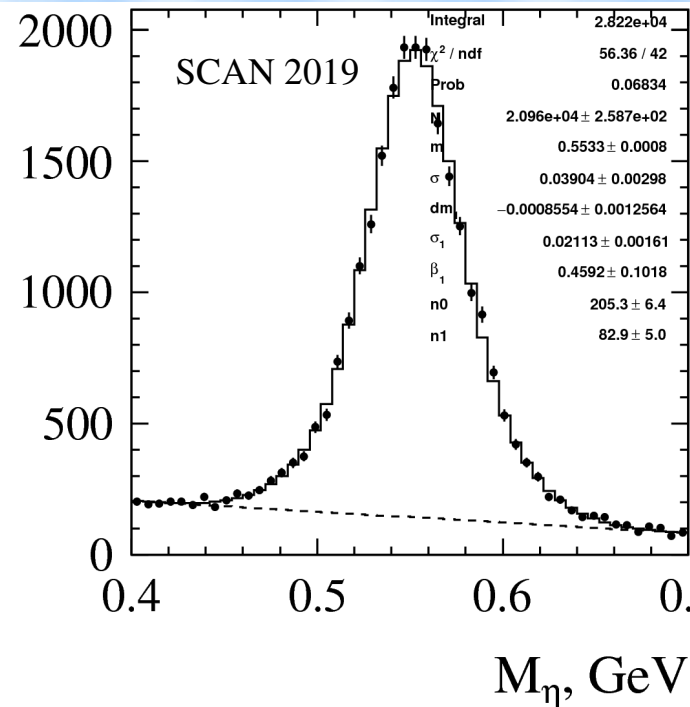
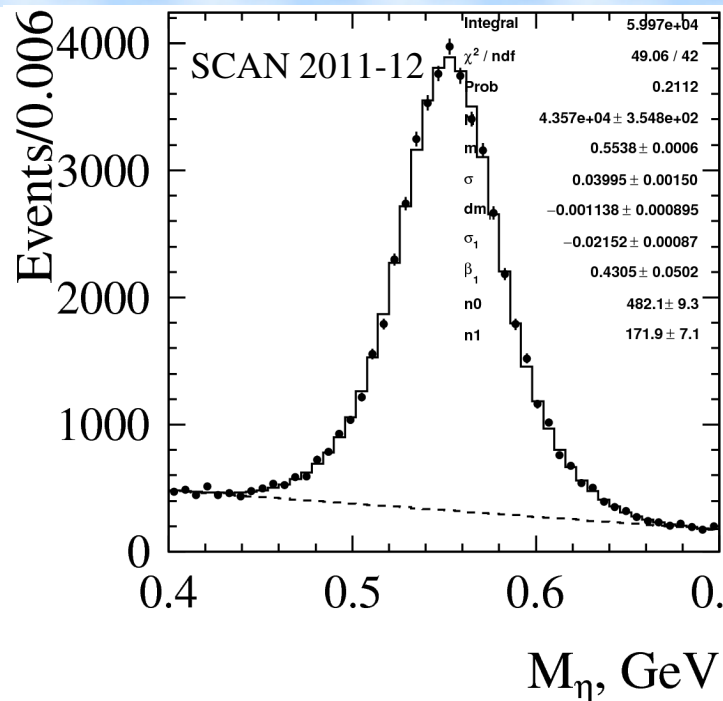




# Аппроксимация распределений по $M_\eta$ (МС)

Моделированные  
распределения по  $M_\eta$   
аппроксимируются  
сигнальной функцией

- сумма 2 распределений Гаусса
- линейная функция





# Аппроксимация распределений по $M_\eta$ (Exp)

Аппроксимирующая функция

- **сигнальная функция**

→  $\Delta M, \Delta \sigma_M$

(из суммарного распределения)

- **фоновая функция**

→ моделирование фона

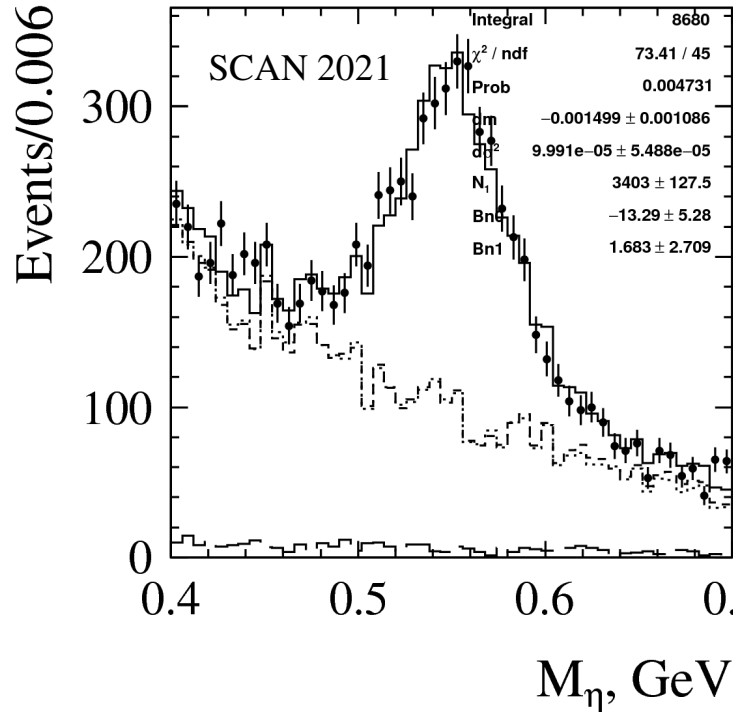
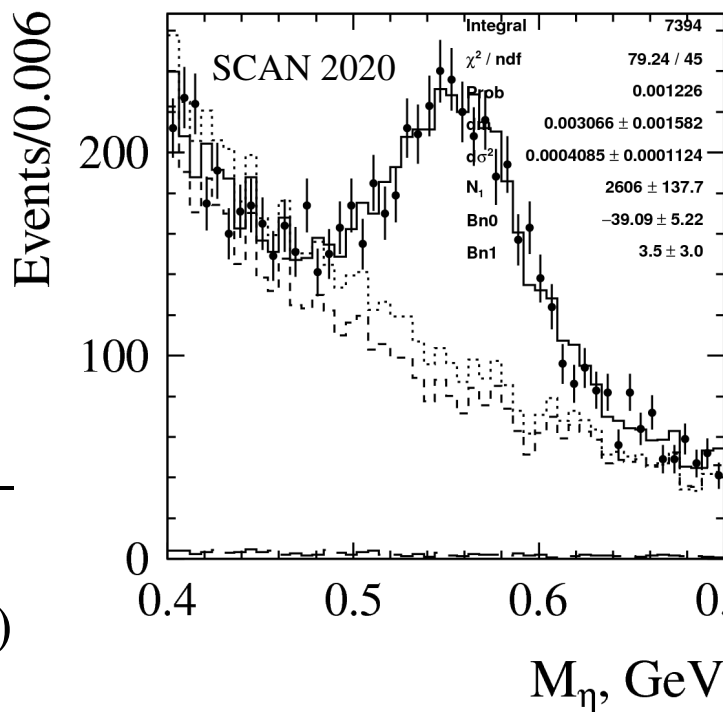
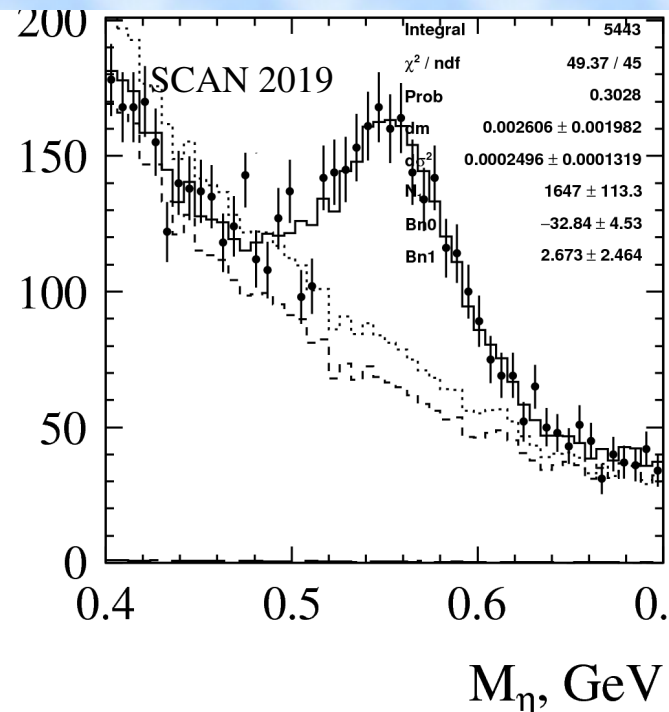
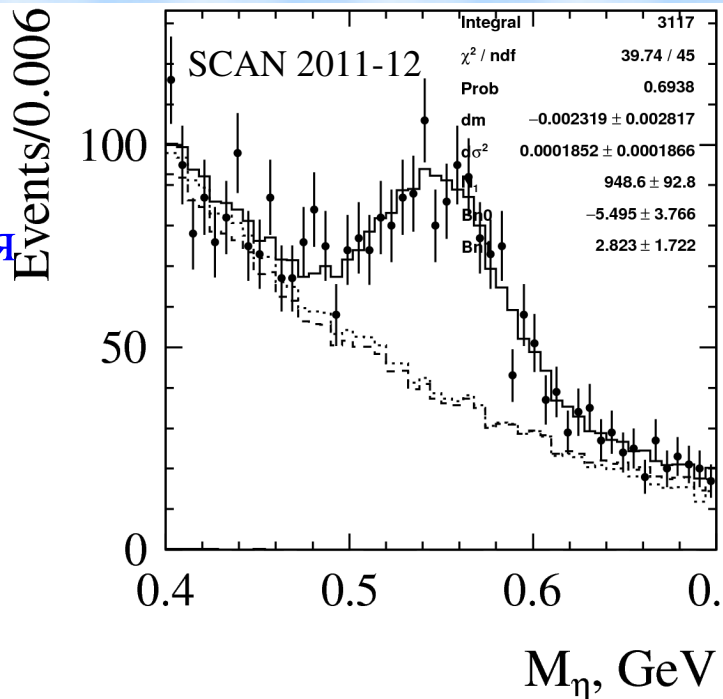
(фиксировано)

→ линейная функция

→ моделирование сигнала в моде

не  $\eta \rightarrow 2\gamma$

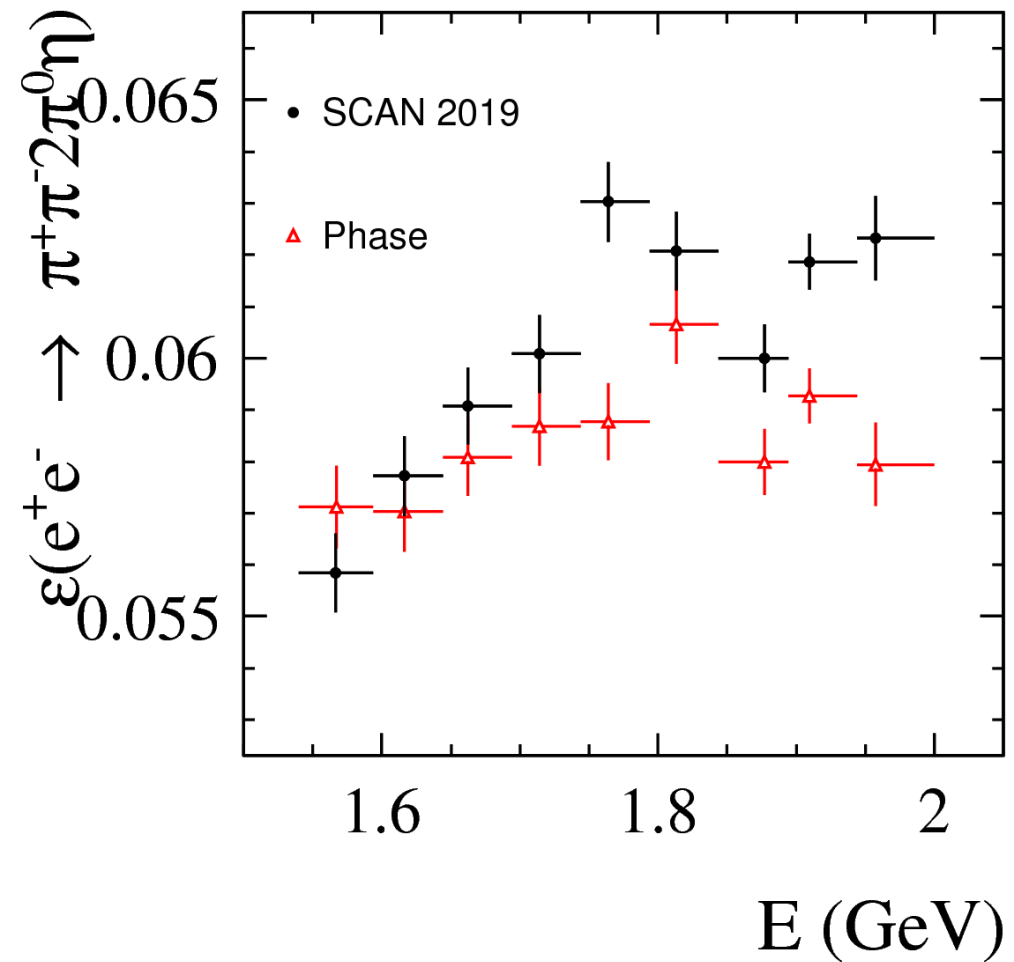
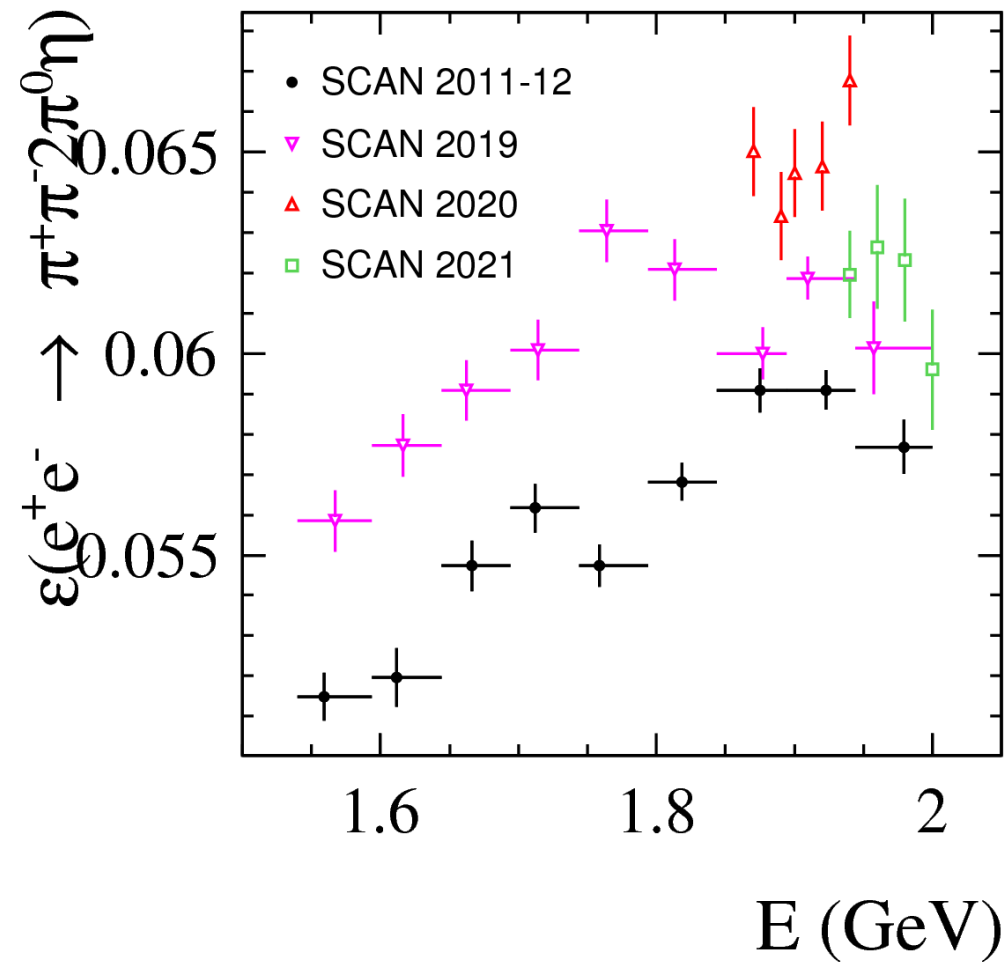
(пропорционально сигналу по моделированию)





Сканирование	$\Delta M$ (МэВ)	$\Delta\sigma_M$ (МэВ)
SCAN 2011/12 ( $E \geq 1.54$ ГэВ)	$-2.3 \pm 2.8$	$13.6 \pm 14.6$
SCAN 2019 ( $E \geq 1.54$ ГэВ)	$2.6 \pm 2.0$	$15.8 \pm 12.0$
SCAN 2020 ( $E \geq 1.87$ ГэВ)	$3.1 \pm 1.6$	$20.2 \pm 11.0$
SCAN 2021 ( $E \geq 1.94$ ГэВ)	$-1.5 \pm 1.1$	$10.0 \pm 7.6$

Сканирование	Ошибка фона (%)	Ошибка сигнала (%)		Полная (%)
		$\Delta M$	$\Delta\sigma_M$	
SCAN 2011/12	3,9	1.1	6.3	4.7
SCAN 2019	3,1	0.6	4.4	4.0
SCAN 2020	4,5	0.4	3.3	5.2
SCAN 2021	3,4	0.4	1.8	4.3



Для  $E \geq 1.944$  ГэВ используется

- средняя эффективность для моделирования сигнала и по фазовому объему
- ошибки складываются квадратично
- попуризация (3–5%) квадратично добавляется к систематической ошибке сечения

$$\varepsilon = \varepsilon_{MC} \prod_{i=1}^n (1 + \delta_i), \text{ где } \delta_i = \frac{1 + N''_{MC,i}/N_{MC,i}}{1 + N''_i/N_i} - 1$$

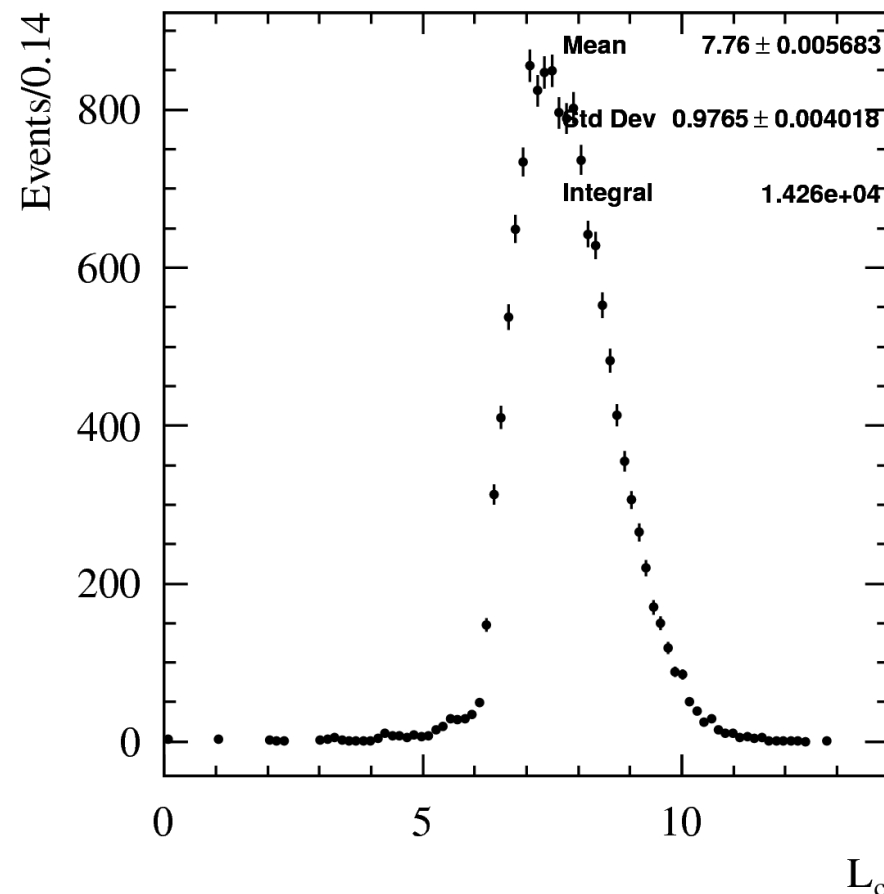
- Условие  $\chi^2_{4\pi 2\gamma} < 30$ 
  - статистики изучаемого процесса недостаточно
  - для оценки используем поправку для условия  $\chi^2_{4\pi} < 30$  (ослабляя до 70) для процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0$  в диапазоне энергии  $1.4 < E < 1.6$  ГэВ с максимумом сечения
  - поправка  $\delta_1: 0.5 \pm 0.8$  (для 2011/12 годов),  $1.5 \pm 0.5$  (для 2019 года)
  - вместо поправки консервативно берется систематическая ошибка 2%
- Условие  $\chi^2_{5\pi} > 100$ 
  - пика от  $\eta$ -мезона в области  $\chi^2_{5\pi} < 100$  не видно
  - в качестве оценки берем ошибку 4.6% поправки на условие  $\chi^2_{4\pi(\gamma)} > 200$  из анализа процесса  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta: 3.8 \pm 4.6 \%$ 
    - ▶ M.N.Achasov et al. (SND Collaboration), Phys. Rev. D 94, 092002 (2016)
- Поправка на несокращающееся при нормировке на светимость отличие в  $e/\pi$ -реконструкции:  $\delta_2 = -0.3 \pm 0.2 \%$ 
  - M.N.Achasov et al. (SND Collaboration), JETP 101, 1053 (2005)



- Условие  $N_\gamma = 6$ 
  - дополнительное условие  $\chi^2_{4\pi(\gamma)} > 30$
  - 2 варианта:  $N_\gamma = 6$  и  $N_\gamma > 6$

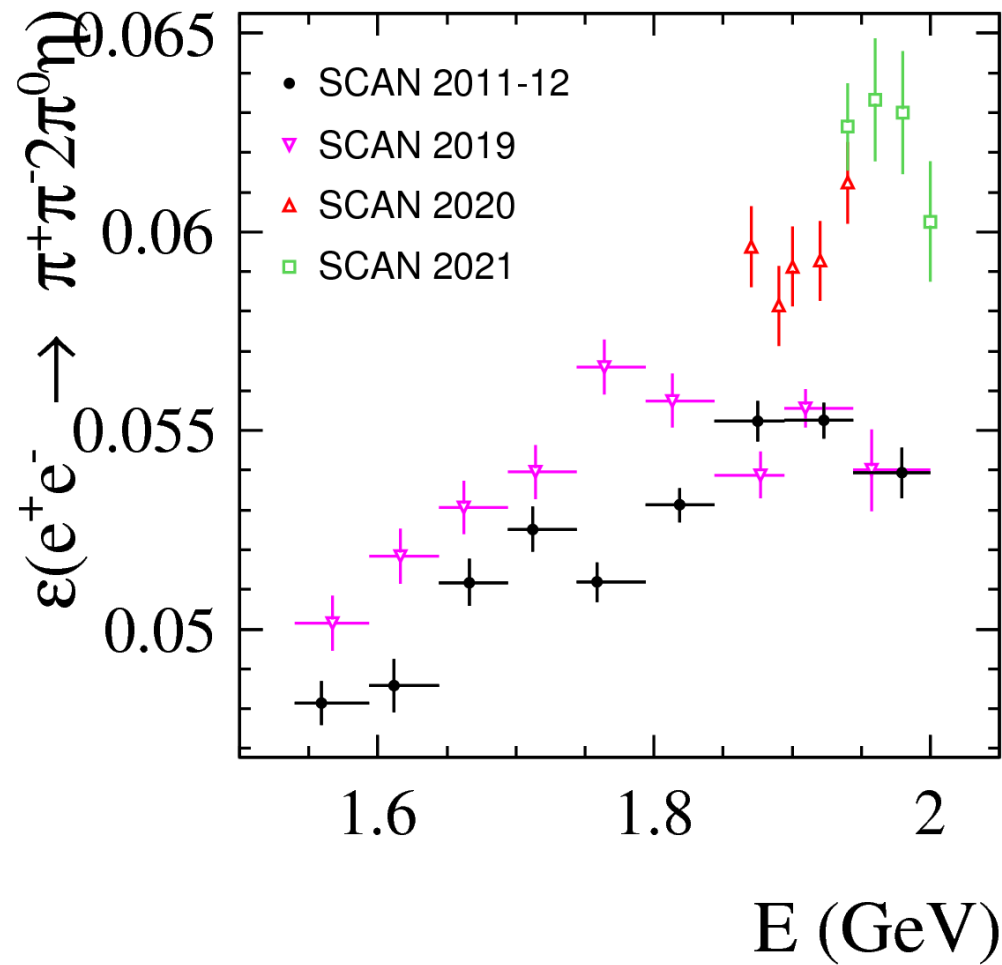
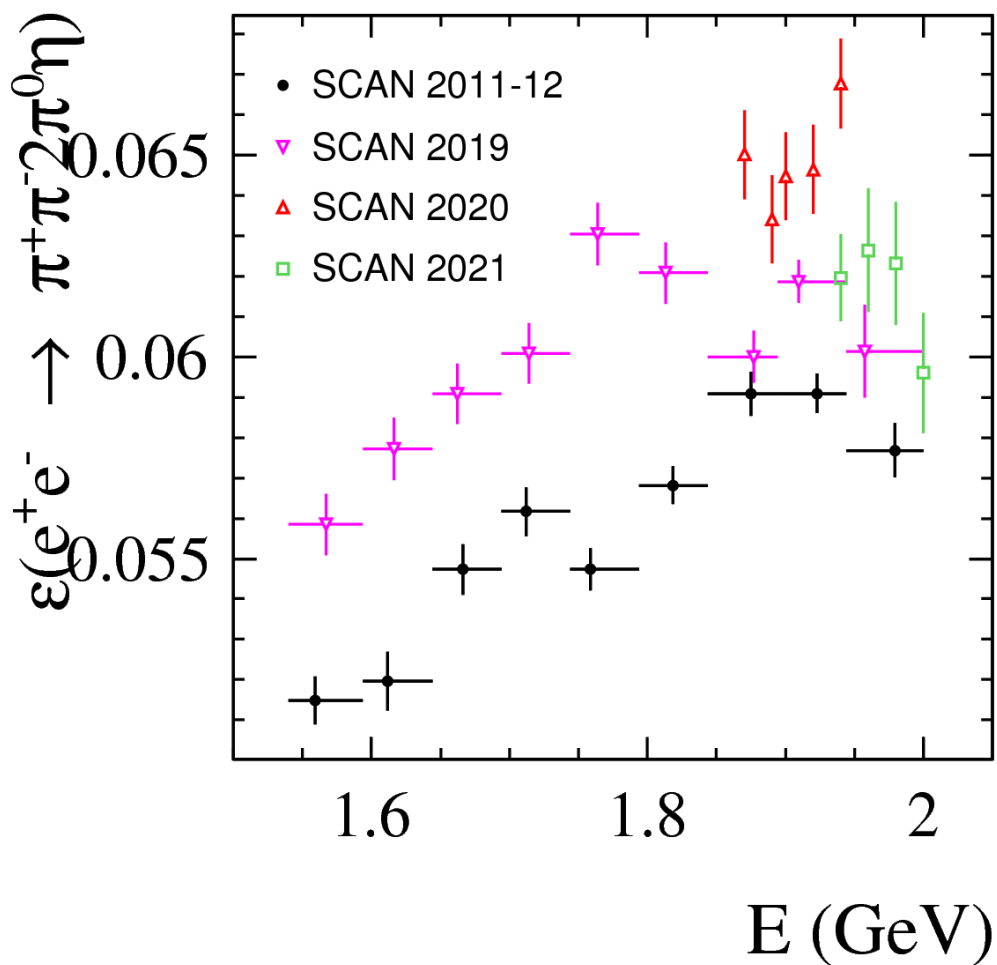
Сканирование	Поправка (%)
SCAN 2011/12 (E > 1.844 ГэВ)	$-4.3 \pm 5.9$
SCAN 2019 (E > 1.844 ГэВ)	$-8.1 \pm 4.3$
SCAN 2020 (E > 1.87 ГэВ)	$-6.1 \pm 3.2$
SCAN 2021 (E > 1.94 ГэВ)	$3.5 \pm 2.5$

- Поправка на конверсию фотонов
  - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
 $\delta k (\theta = 90^\circ) = k_0 - k_0^{MC} = 0.26 \pm 0.01\%$
  - $L_c = \Sigma 1 / \sin(\theta_i) = 7.76 \pm 0.01$
  - $\delta_3 = -\delta k L_c = -2.0 \pm 0.1\%$
- Изменение эффективности для моделирования с новым борновским сечением не превышает 1%





Сканирование	Поправка (%)	Ошибка (%)
SCAN 2011/12 ( $E > 1.844$ ГэВ)	$-6.5 \pm 5.9$	7.8
SCAN 2019 ( $E > 1.844$ ГэВ)	$-10.2 \pm 4.3$	6.7
SCAN 2020 ( $E > 1.87$ ГэВ)	$-8.3 \pm 3.2$	6.1
SCAN 2021 ( $E > 1.94$ ГэВ)	$1.1 \pm 2.5$	5.7



- Объединение сканирований SCAN 2011/12 и SCAN 2019
  - видимое сечение усредняется с учетом статистических ошибок (для SCAN 2020 и SCAN 2021 — только точка 1.94 ТэВ)
  - энергия для диапазонов усредняется по ожидаемому числу событий (для отрицательного числа — по светимости)
  - $\chi^2/\text{ndf} = 18.8/20 \Rightarrow$  приводить к 1 не требуется

$$\sigma_{vis}(E) = \int_0^{x_{max}} F(x, E) \sigma(E \sqrt{1-x}) dx \equiv \sigma(E)(1 + \delta(E))$$

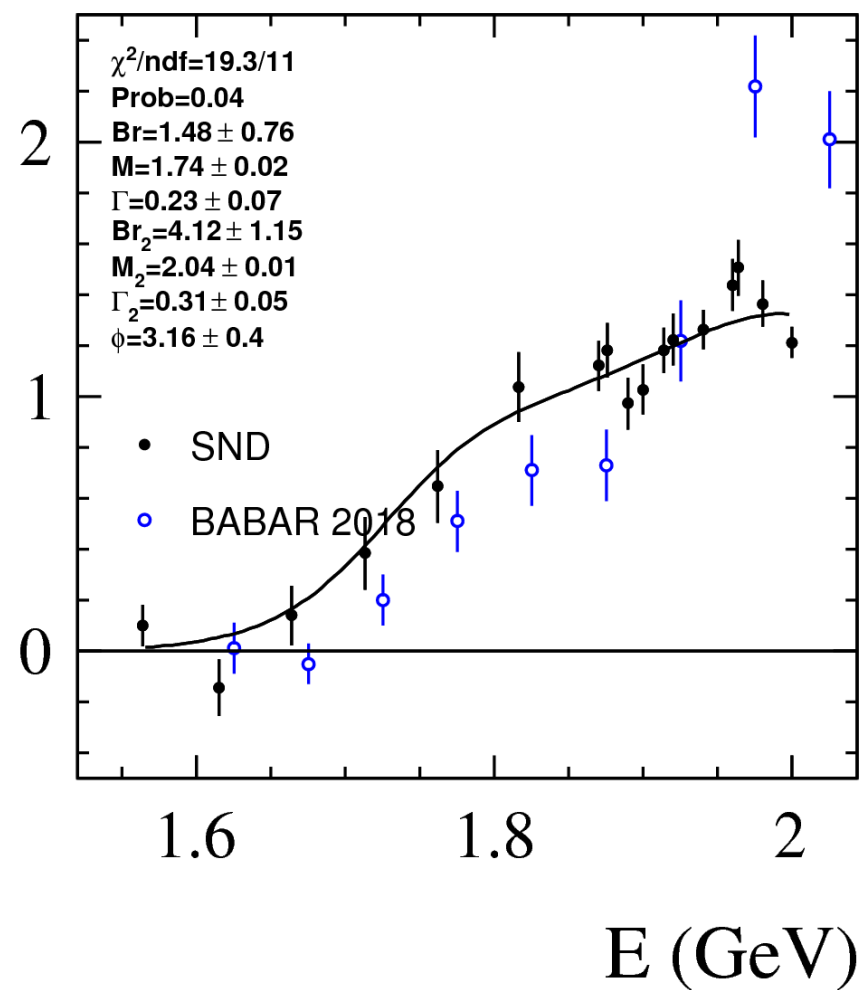
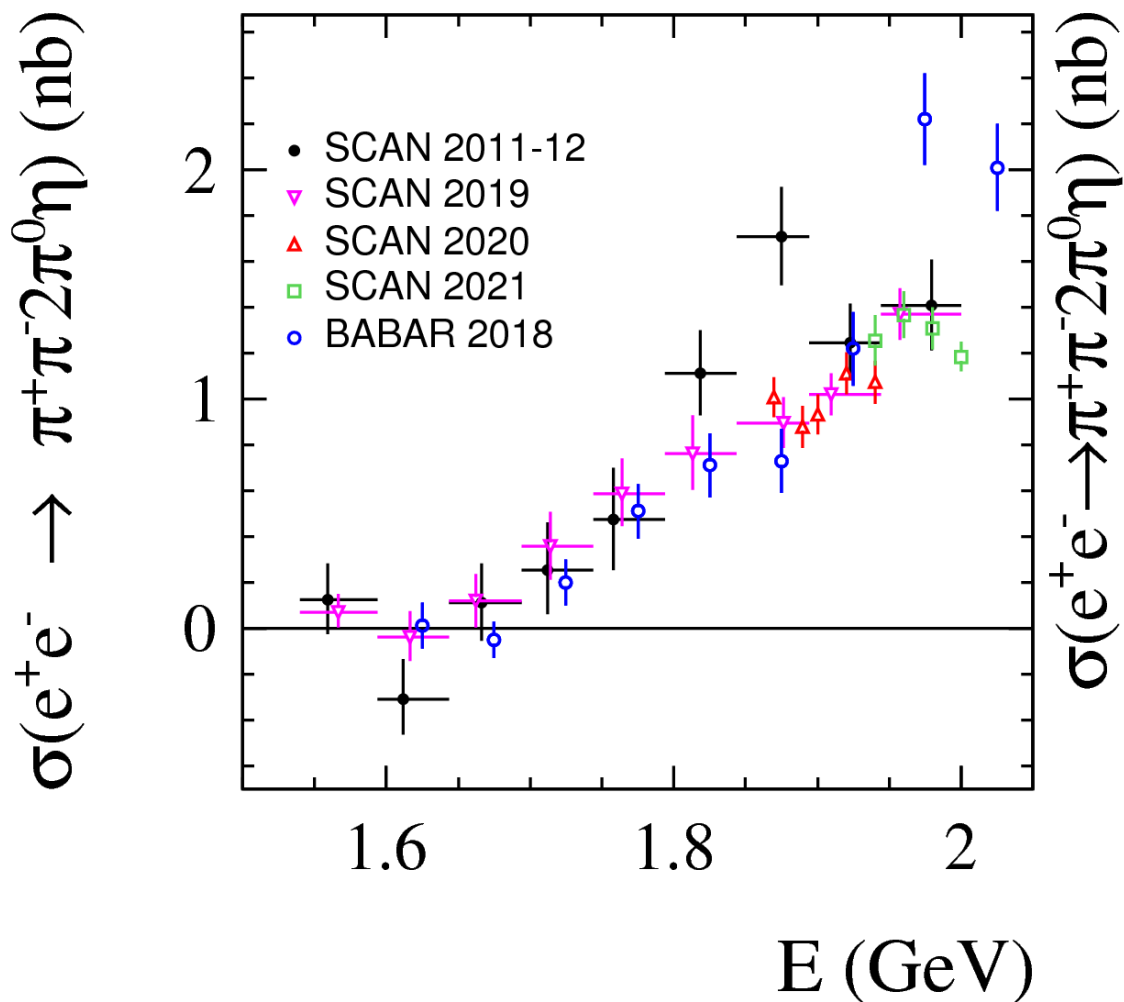
$$\sigma(s) = \frac{12\pi}{s^{3/2}} \left| \sqrt{\frac{B_{\rho'}}{P_f(m_{\rho'}^2)} \frac{m_{\rho'}^{3/2} \Gamma_{\rho'}}{D_{\rho'}}} + \sqrt{\frac{B_{\rho''}}{P_f(m_{\rho''}^2)} \frac{m_{\rho''}^{3/2} \Gamma_{\rho''}}{D_{\rho''}}} e^{i\varphi} \right|^2 P_f(s),$$

$$\rho' \equiv \rho(1700), \quad \rho'' \equiv \rho(2150)$$

$$P_f(s) = \frac{1}{3} q_f \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{9} \int_{(m_\eta + m_\pi)^2}^{(\sqrt{s} - m_\omega)^2} \frac{dm^2}{\pi} \frac{m \Gamma_{a_0} q(s, m, m_\omega)}{(m^2 - m_{a_0}^2)^2 + (m \Gamma_{a_0})^2},$$

$$q(s, m, m_\omega) = \frac{1}{2\sqrt{s}} \sqrt{(s - (m - m_\omega)^2)(s - (m + m_\omega)^2)}$$





- Систематическая ошибка рад. поправки
  - 1.0 – 1.4 % для E < 1.762 ГэВ
  - < 0.5% для E ≥ 1.762 ГэВ