



Секция ядерной физики ОФН РАН
Объединённый институт ядерных исследований

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

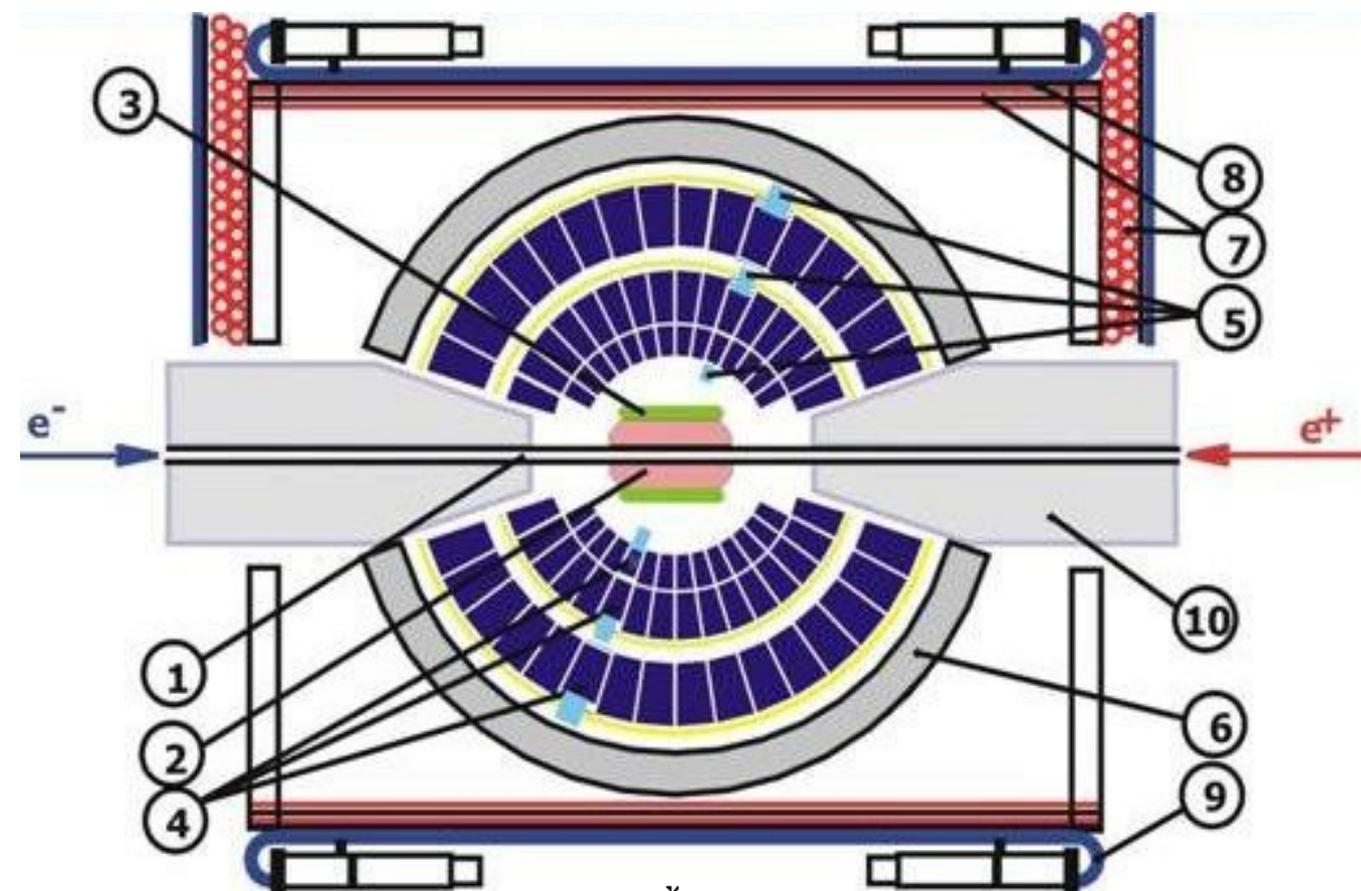
Измерение сечения процесса

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

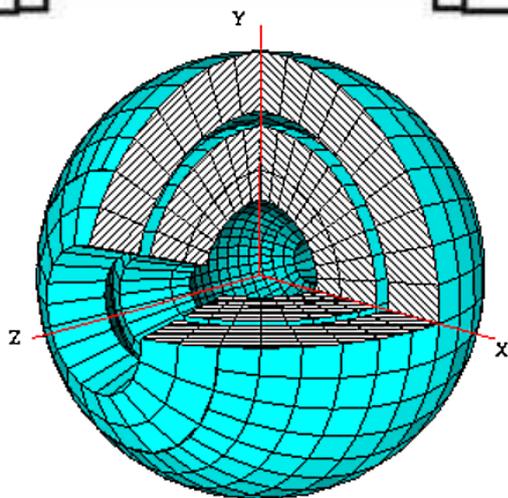
Александр Ботов

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

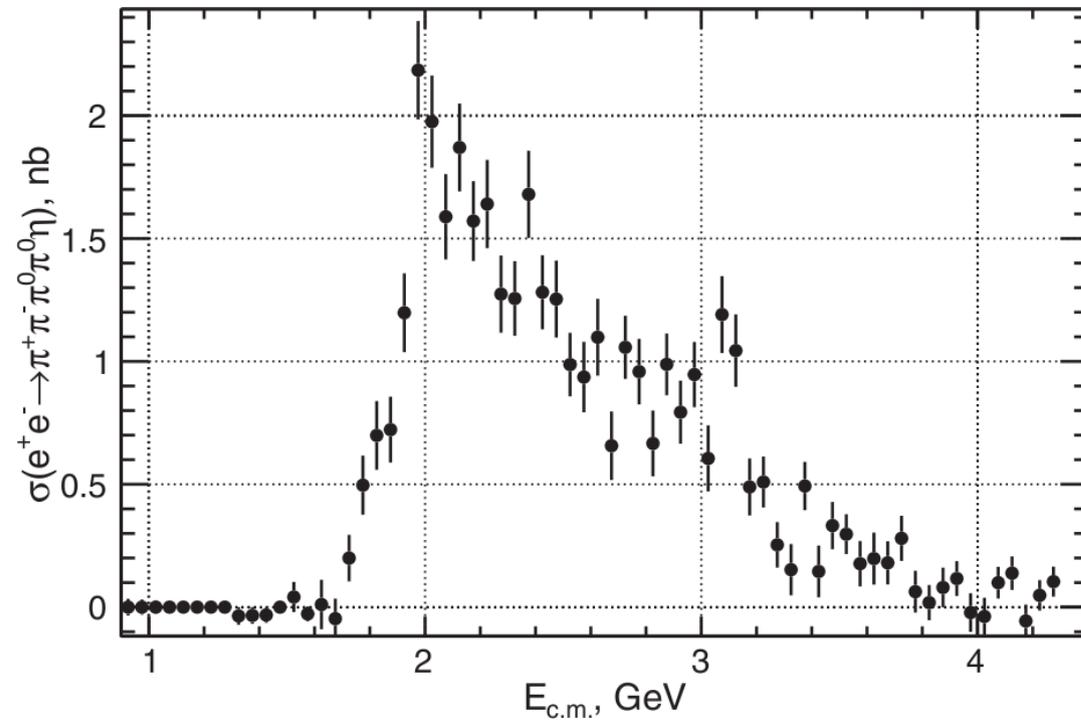




- 1 — вакуумная труба
- 2 — трековая система
- 3 — аэрогелевый черенковский счетчик
- 4 — кристаллы NaI(Tl)
- 5 — фототриоды
- 6 — железный поглотитель
- 7 — мюонные трубки
- 8 — железные пластины
- 9 — сцинтилляционные счетчики
- 10 — фокусирующие соленоиды

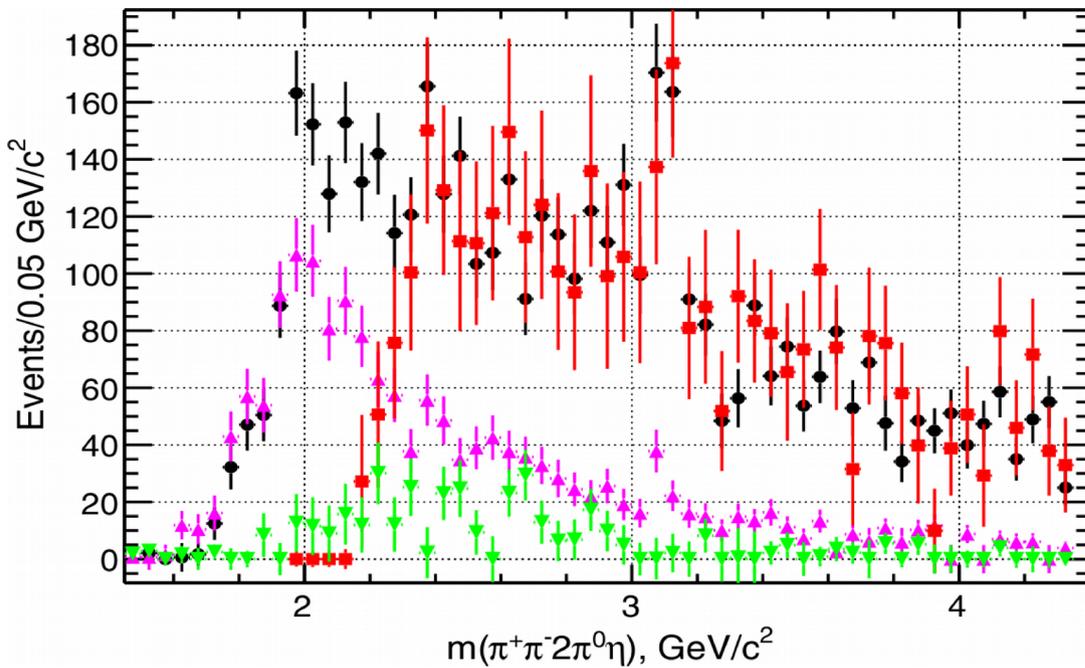


Телесных угол — $0.95 \cdot 4\pi$



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⁻¹
- 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 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
- ≥ 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
 - $\Delta\theta = |\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 15^\circ$ — расколлинеарность по полярному углу
 - $\Delta\phi = ||\phi_1 - \phi_2| - 180^\circ| < 10^\circ$ — расколлинеарность по азимутальному углу
- **Вычисленный аппаратный триггер** — как для изучаемого процесса
- Генератор **VHWISE** — теоретическая неопределенность не хуже 0.5%
- Систематическая неопределенность — **2%**



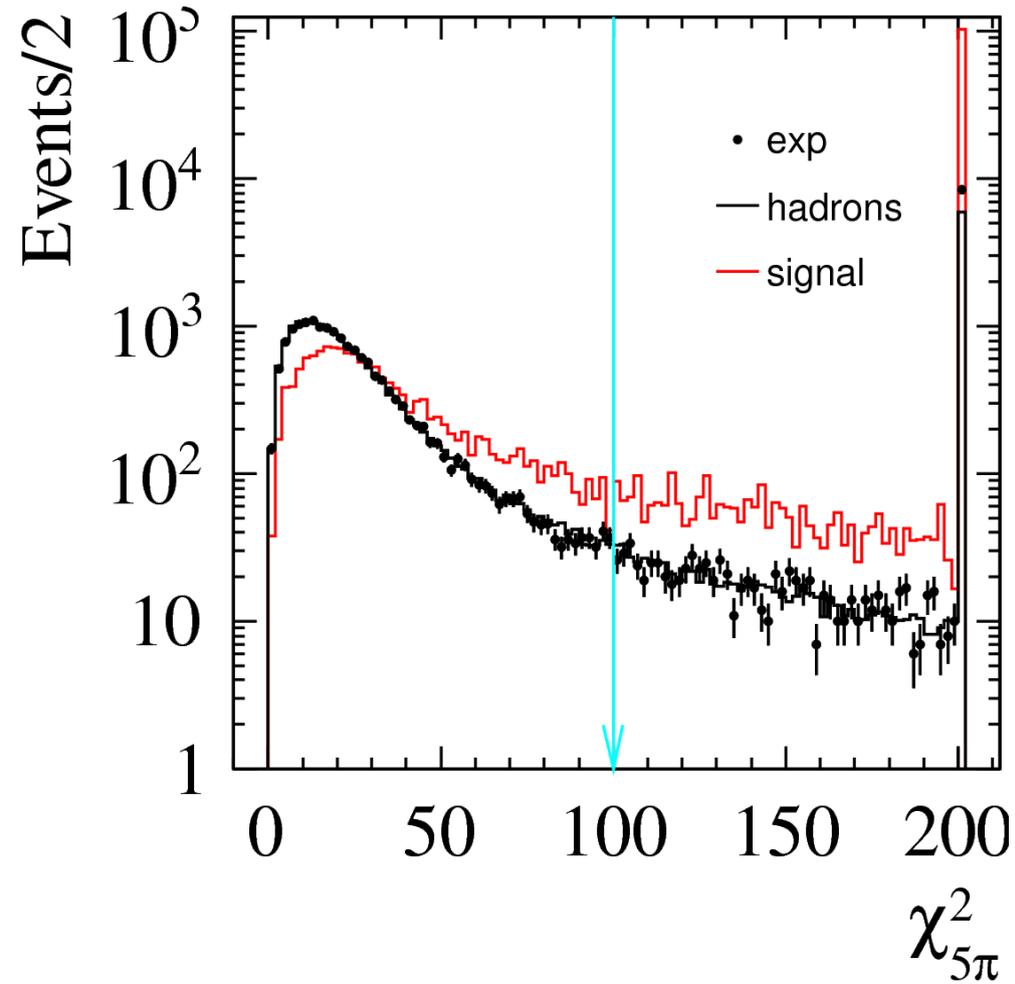
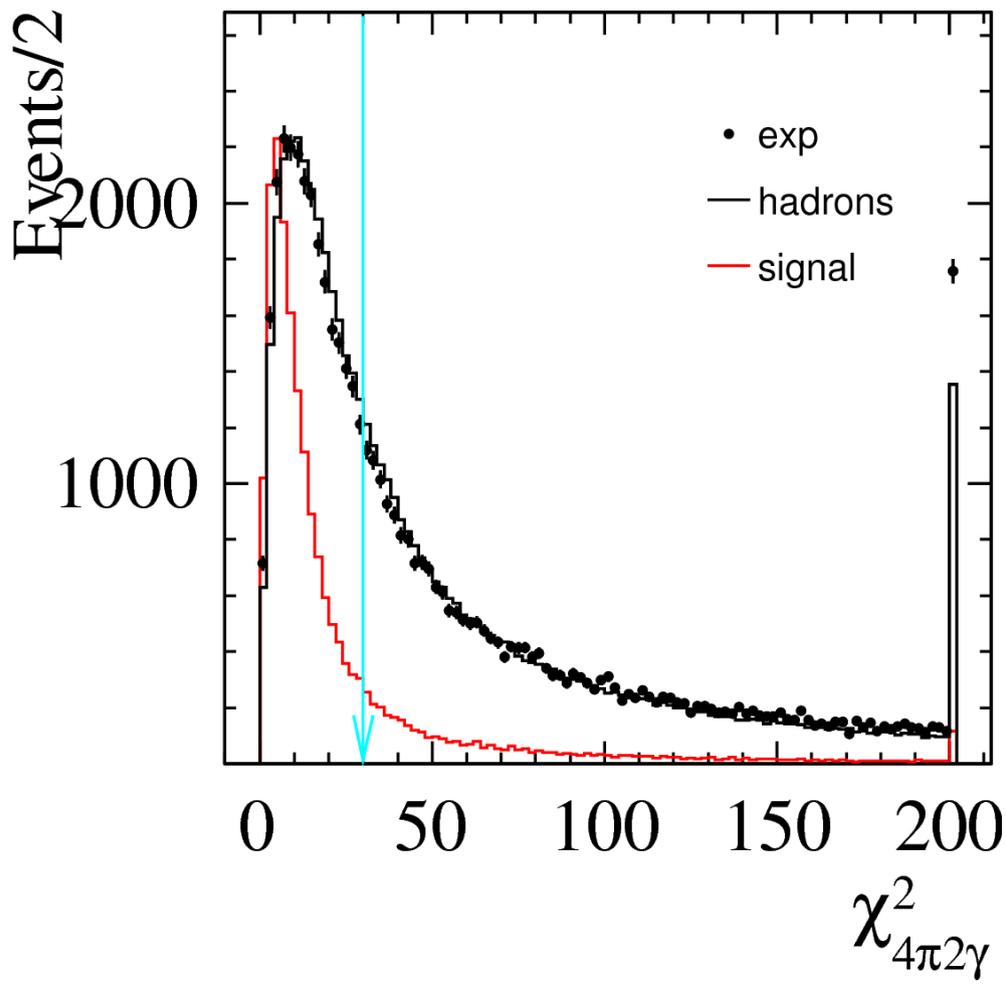
- Энерговыделение в калориметре > 300 МэВ
- Сработал вычисленный первичный триггер
- Кинематическая реконструкция:
 - 2 или 3 заряженные частицы, вылетающие из места встречи
 - ▶ $d_0 < 1$ см — расстояние от траектории до оси пучков
 - ▶ $|z_0| < 15$ см — z -координата (относительно места встречи) ближайшей к оси пучков точки трека
 - ▶ $|\Delta z_0| < 5$ см — разница z -координат между любыми 2 треками
 - вершина события по 2 трекам (качество реконструкции — χ^2_r)
 - ▶ если 3 трека — пара с наименьшим χ^2_r
 - ▶ далее они считаются треками от пионов π^\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 π^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_{π^0}
 - ▶ выбирается комбинация с
 - $400 < m^{**}_{56} \equiv M_{\eta} < 700$ МэВ — инвариантная масса пары фотонов — кандидатов в η -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)

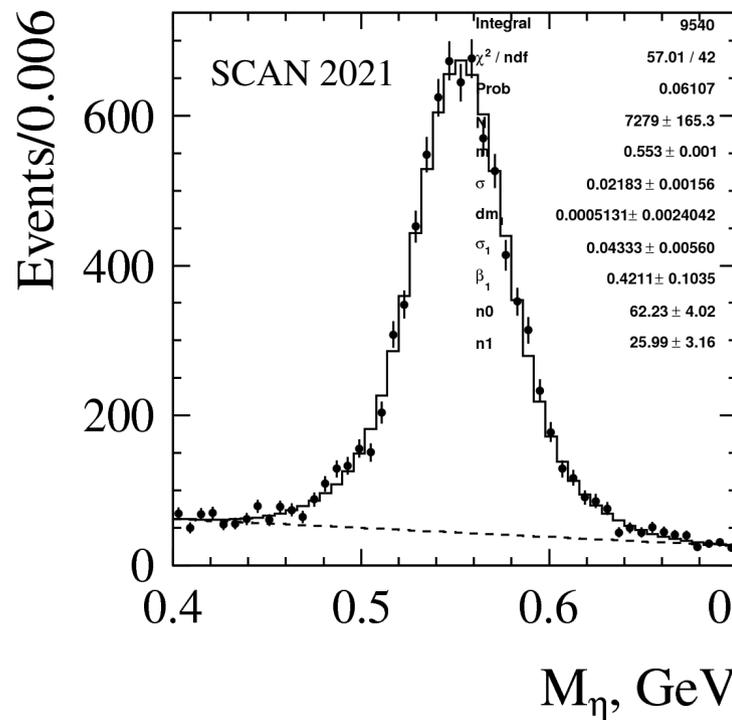
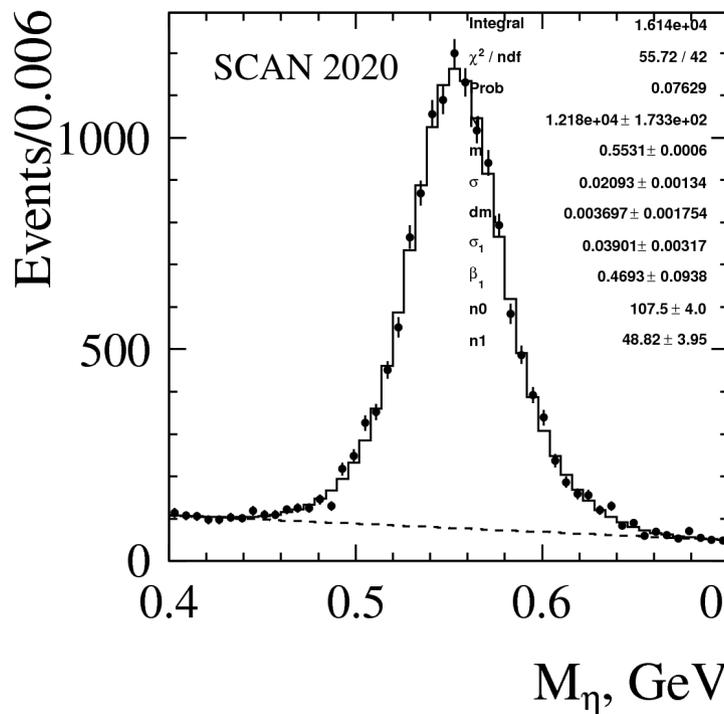
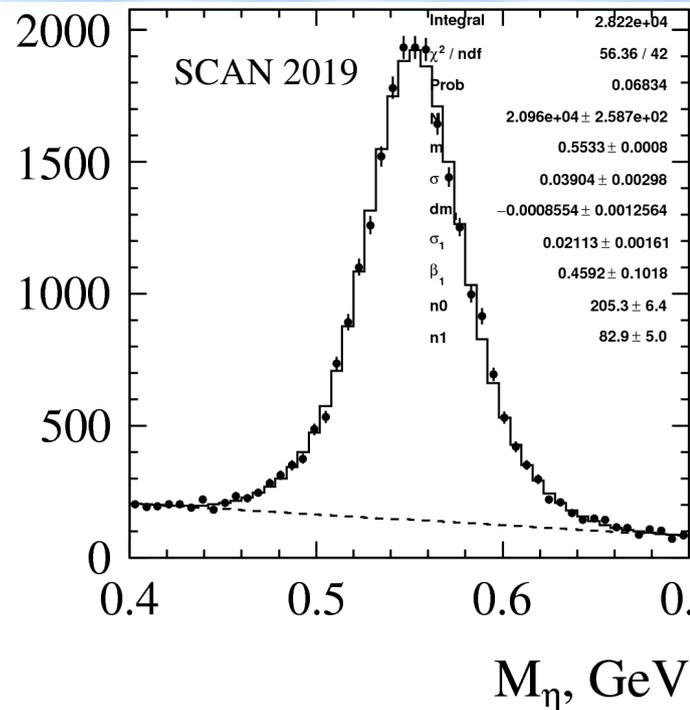
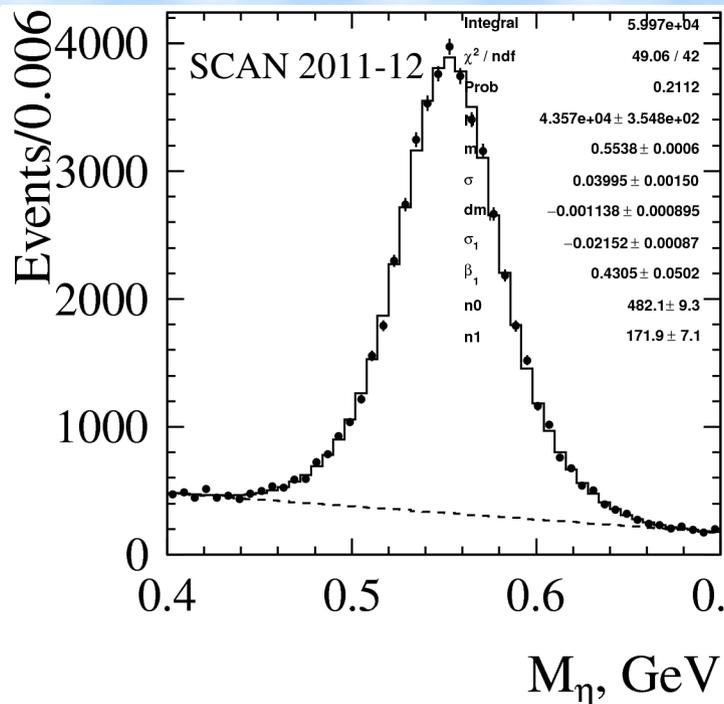




Аппроксимация распределений по M_η (МС)

Моделированные распределения по M_η аппроксимируются сигнальной функцией

- сумма 2 распределений Гаусса
- линейная функция





Аппроксимация распределений по M_η (Exp)

Аппроксимирующая функция

- **сигнальная функция**

→ $\Delta M, \Delta \sigma_M$

(из суммарного распределения)

- **фоновая функция**

→ моделирование фона

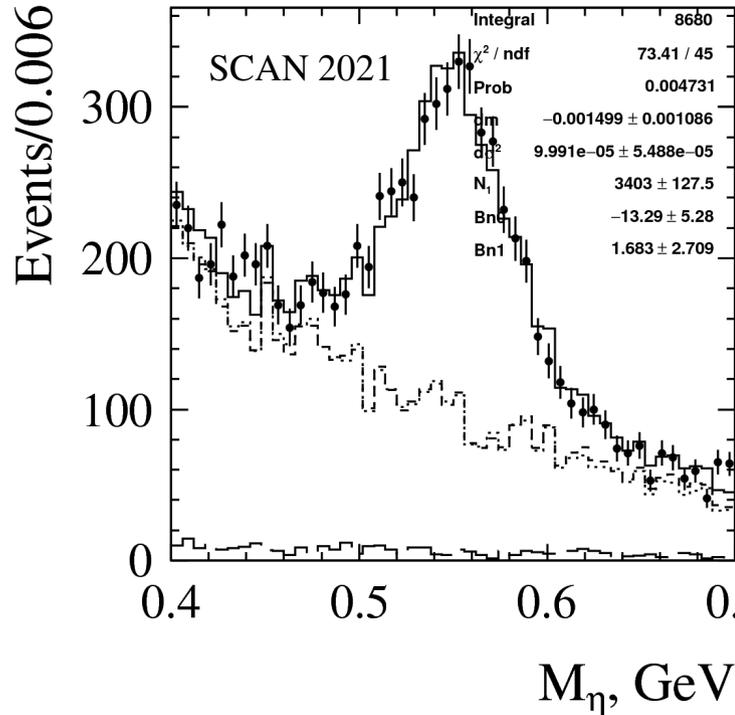
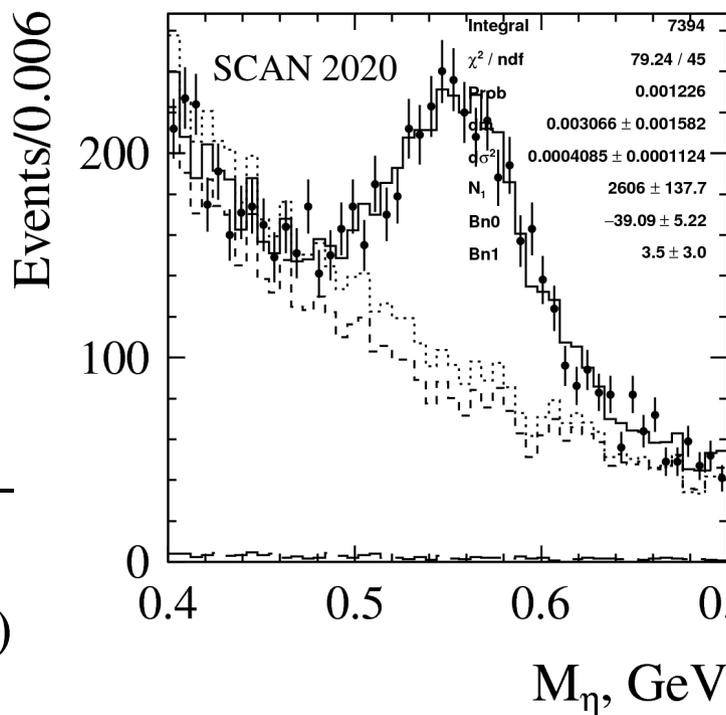
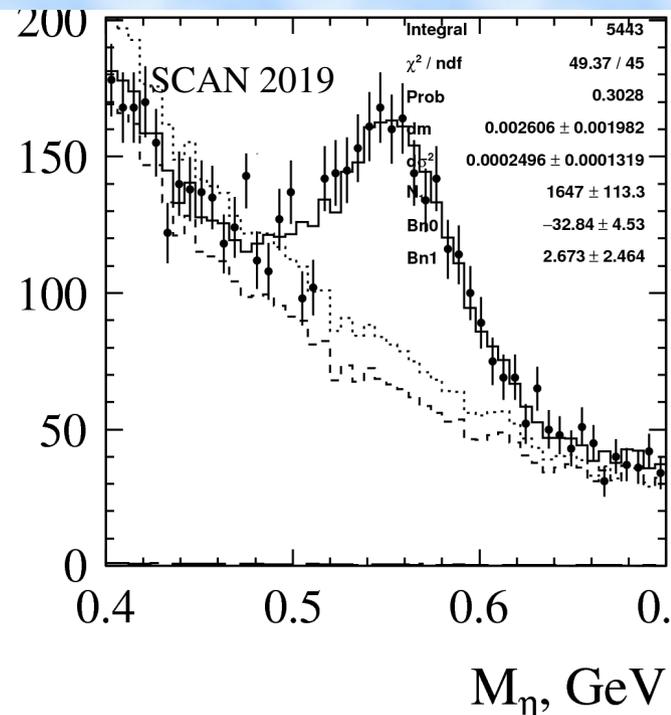
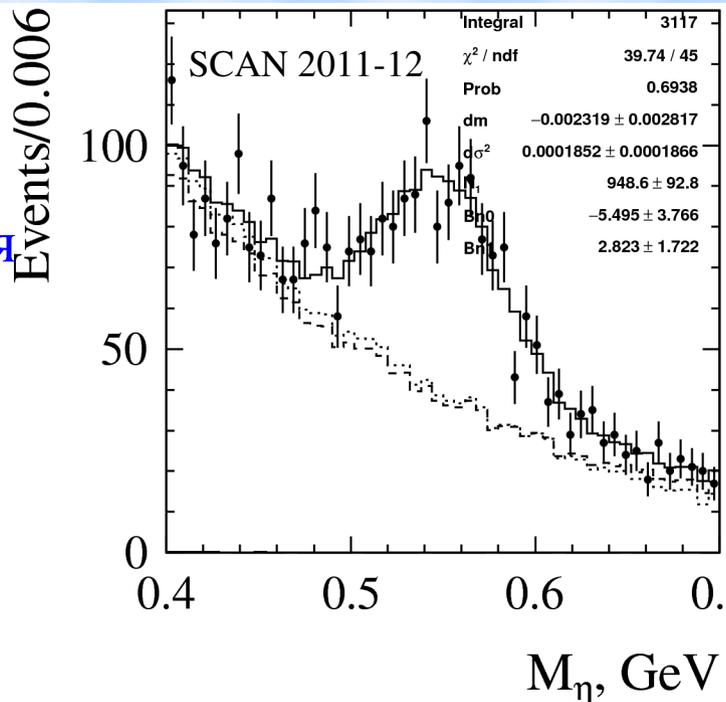
(фиксировано)

→ линейная функция

→ моделирование сигнала в моде

не $\eta \rightarrow 2\gamma$

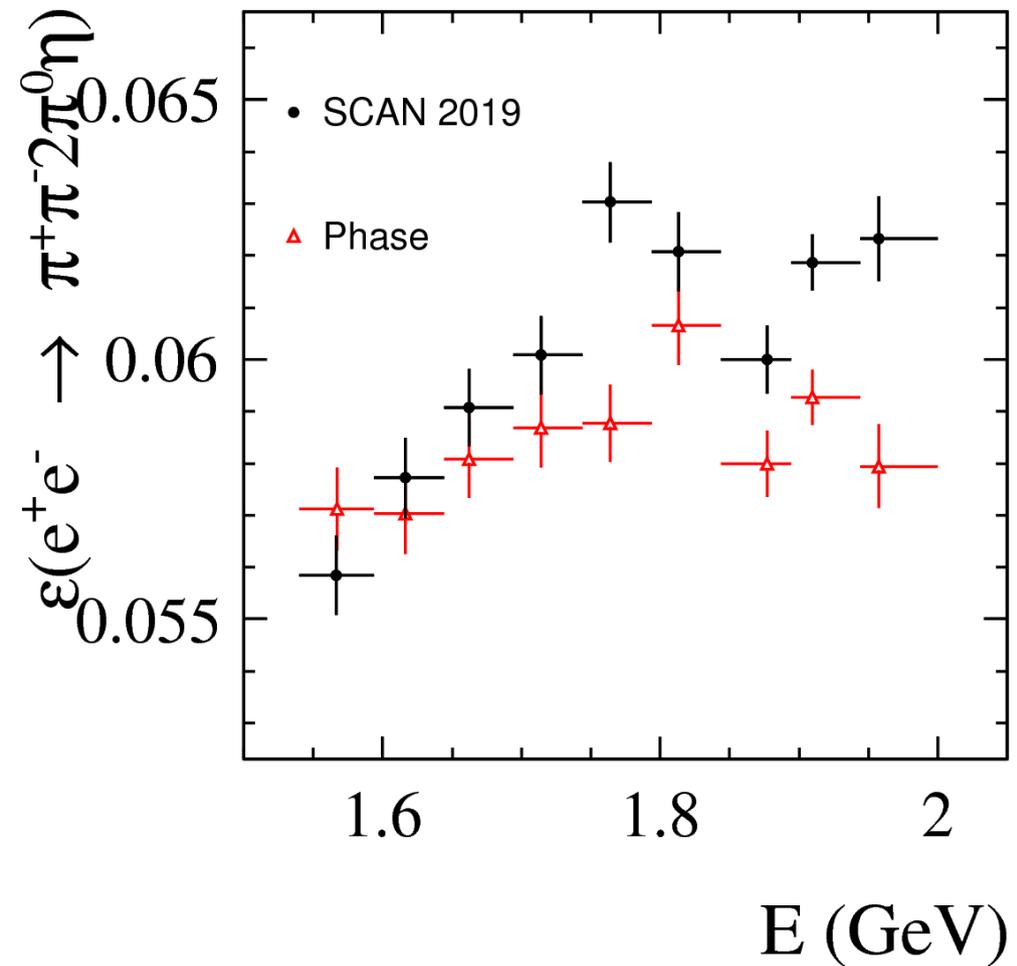
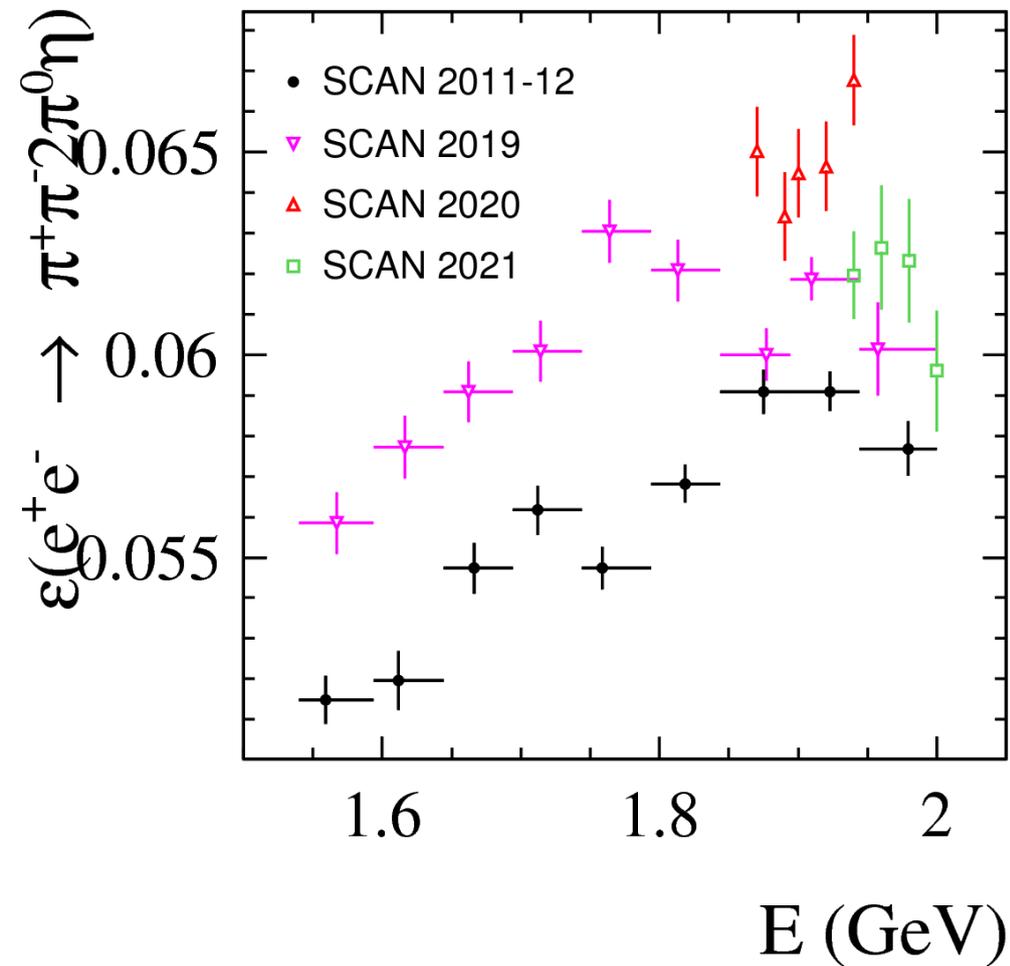
(пропорционально сигналу по моделированию)





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

Сканирование	Ошибка фона (%)	Ошибка сигнала (%)		Полная (%)
		ΔM	$\Delta\sigma_M$	
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

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

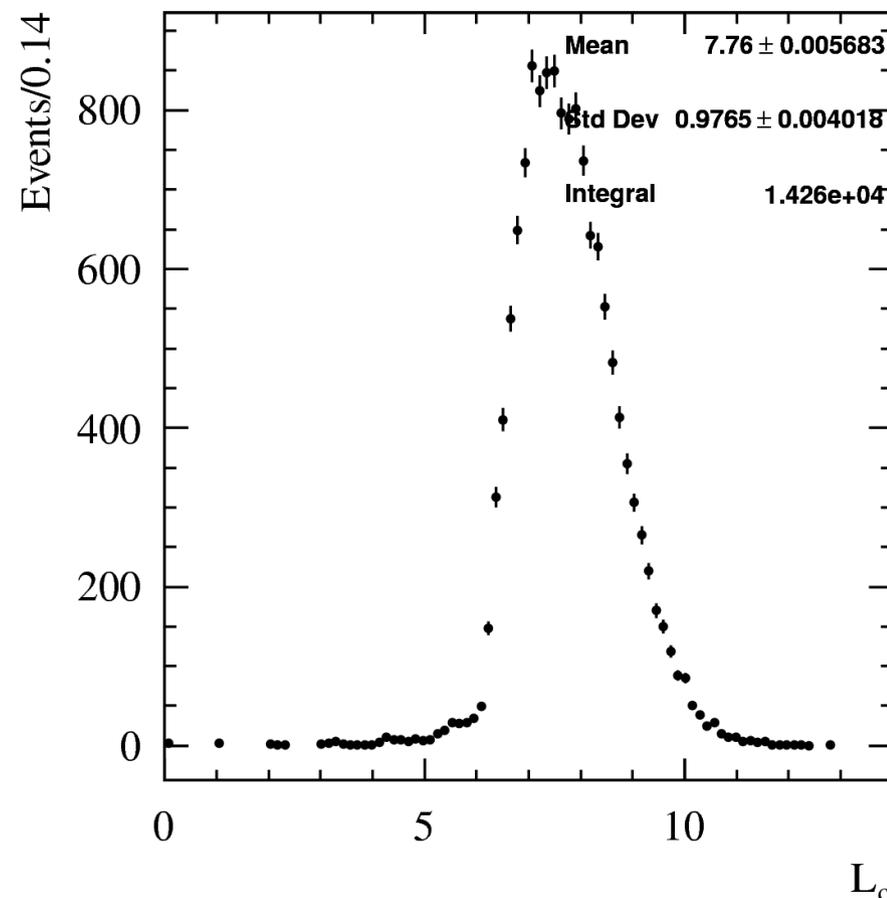
- Условие $\chi^2_{4\pi 2\gamma} < 30$
 - статистики изучаемого процесса недостаточно
 - для оценки используем поправку для условия $\chi^2_{4\pi} < 30$ (ослабляя до 70) для процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0$ в диапазоне энергии $1.4 < E < 1.6$ ГэВ с максимумом сечения
 - поправка $\delta_1: 0.5 \pm 0.8$ (для 2011/12 годов), 1.5 ± 0.5 (для 2019 года)
 - вместо поправки консервативно берется систематическая ошибка 2%
- Условие $\chi^2_{5\pi} > 100$
 - пика от η -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/π -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 $N_\gamma > 6$

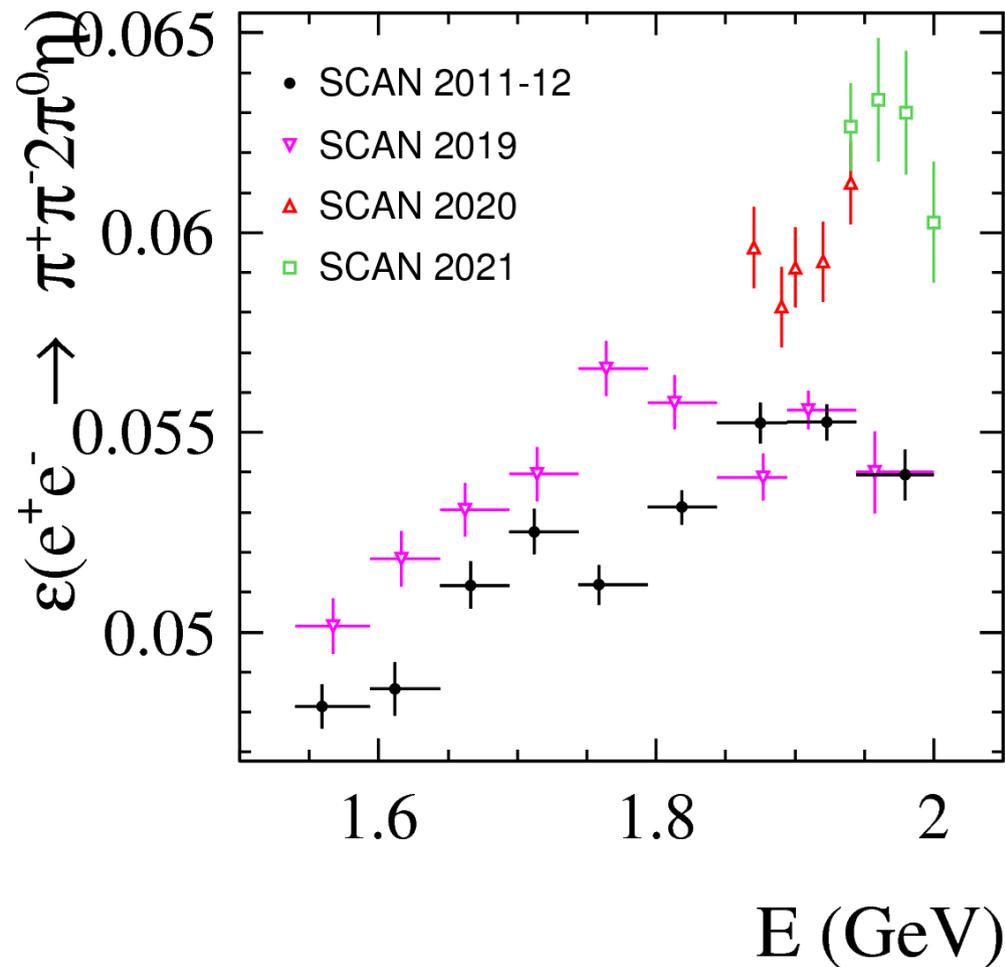
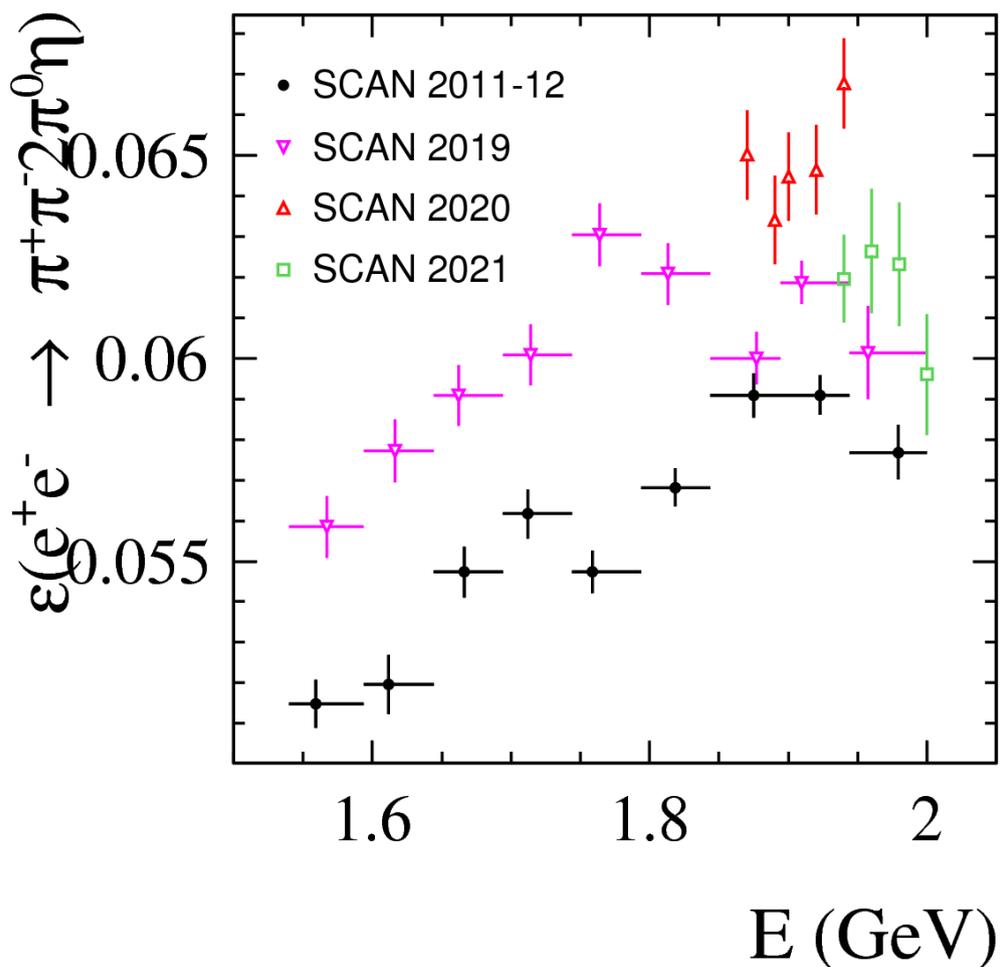
Сканирование	Поправка (%)
SCAN 2011/12 (E > 1.844 ГэВ)	-4.3 ± 5.9
SCAN 2019 (E > 1.844 ГэВ)	-8.1 ± 4.3
SCAN 2020 (E > 1.87 ГэВ)	-6.1 ± 3.2
SCAN 2021 (E > 1.94 ГэВ)	3.5 ± 2.5

- 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 ± 5.9	7.8
SCAN 2019 ($E > 1.844$ ГэВ)	-10.2 ± 4.3	6.7
SCAN 2020 ($E > 1.87$ ГэВ)	-8.3 ± 3.2	6.1
SCAN 2021 ($E > 1.94$ ГэВ)	1.1 ± 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 ГэВ)
 - 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

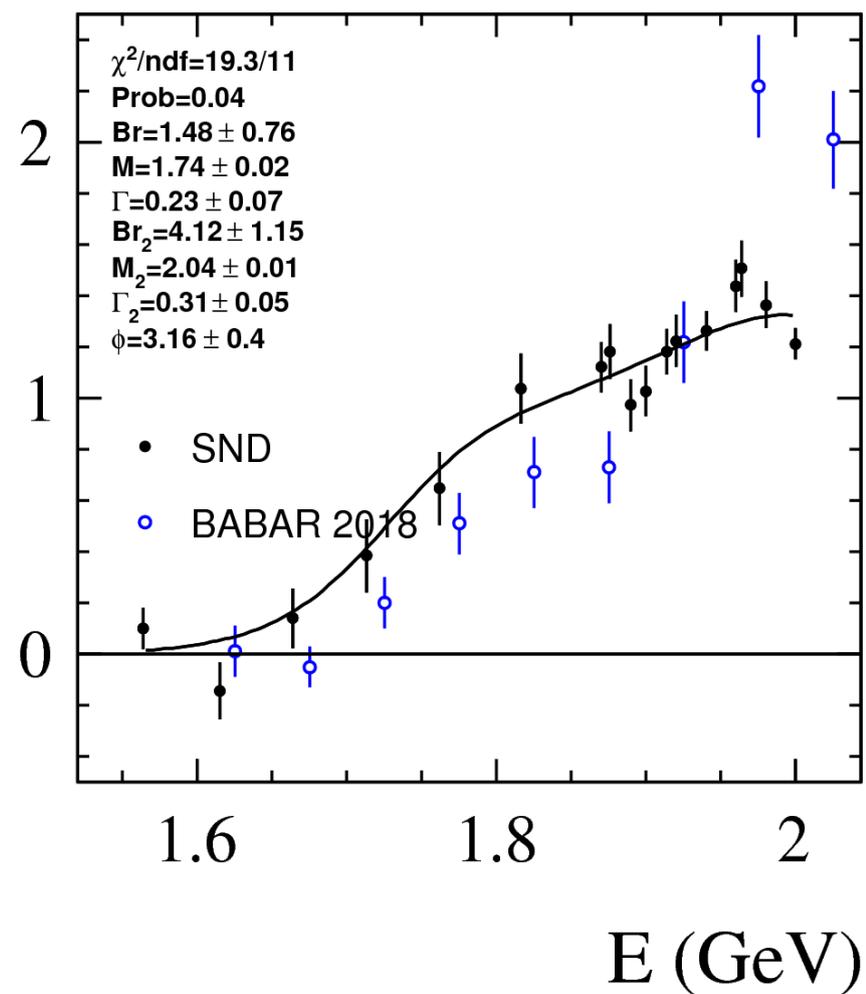
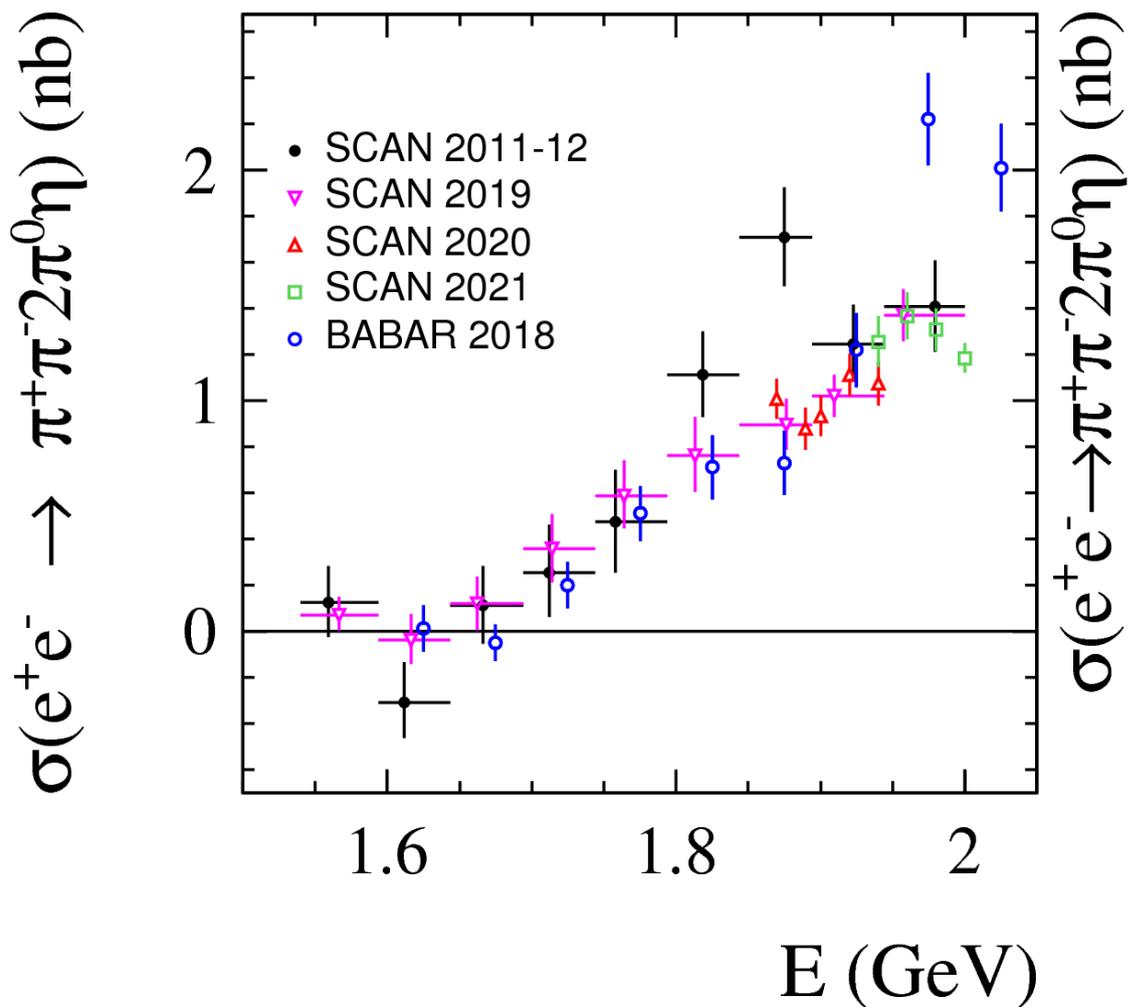
$$\sigma_{vis}(E) = \int_0^{x_{max}} F(x, E) \sigma(E \sqrt{1-x}) dx \equiv \sigma(E)(1 + \delta(E))$$

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

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

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

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



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