



Измерение сечения процесса
 $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$
в области энергий 1.08 – 2 ГэВ
на детекторе СНД

Ооржак А.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН
“Физика фундаментальных взаимодействий”

г. Новосибирск

11.03.2026

Актуальность работы

- Изучение радиационных распадов $V \rightarrow P\gamma$ возбуждённых векторных мезонов позволяет проверить предсказания теоретических моделей
- Определение внутренней структуры векторных мезонов
- В канал $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ вносят вклад четыре состояния: $\omega(1420)$, $\rho(1450)$, $\omega(1650)$, $\rho(1700)$
- По сравнению с предыдущим измерением статистическая точность лучше в 5 раз

Использованные данные

Накопленная статистика позволяет провести самое точное измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$

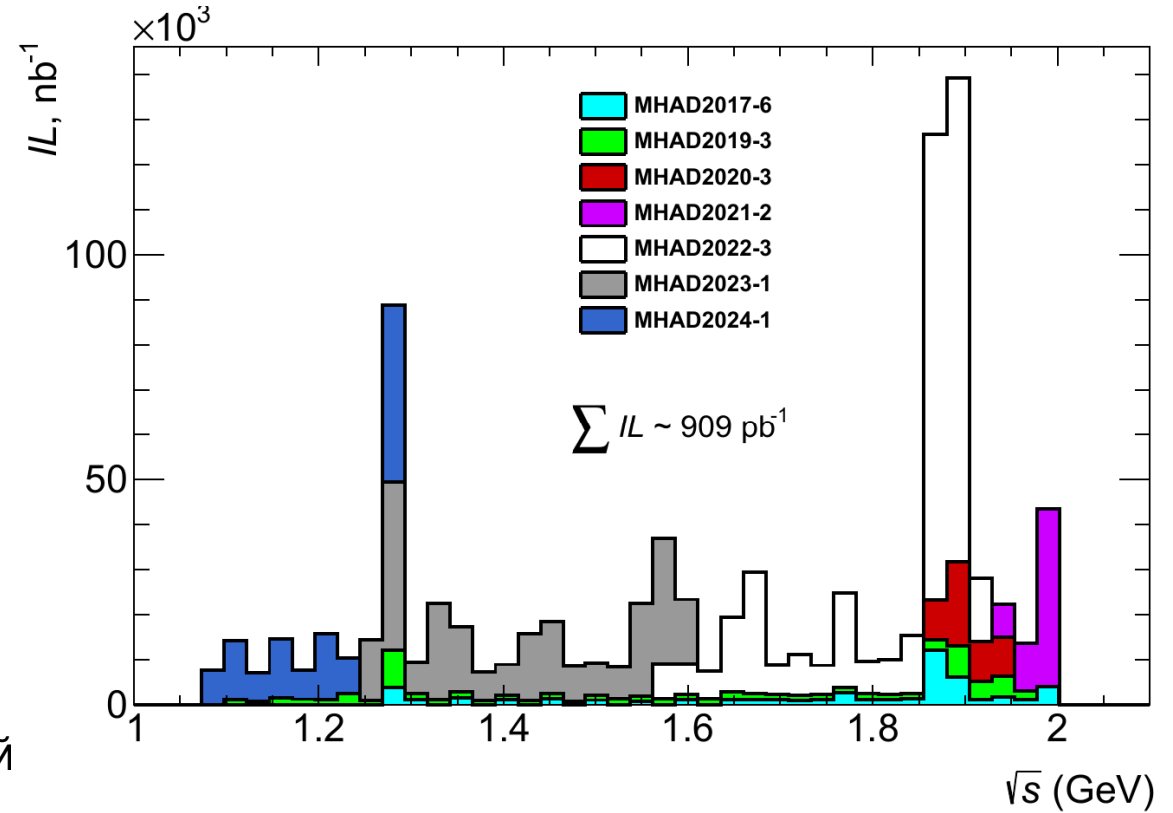
Предыдущие эксперименты:

[1] $\sqrt{s} = 0.6 - 1.38$ ГэВ, $IL = 21$ пбн $^{-1}$ 1997 – 1998 гг.

[2] $\sqrt{s} = 0.6 - 1.4$ ГэВ, $IL = 26$ пбн $^{-1}$ 1997 – 2000 гг.

[3] $\sqrt{s} = 1.075 - 2$ ГэВ, $IL = 41$ пбн $^{-1}$ 2010 – 2012 гг.

В этой работе область энергий 1.08 – 2 ГэВ,
153 - энергетических точек с суммарной интегральной светимостью $IL = 909$ пбн $^{-1}$



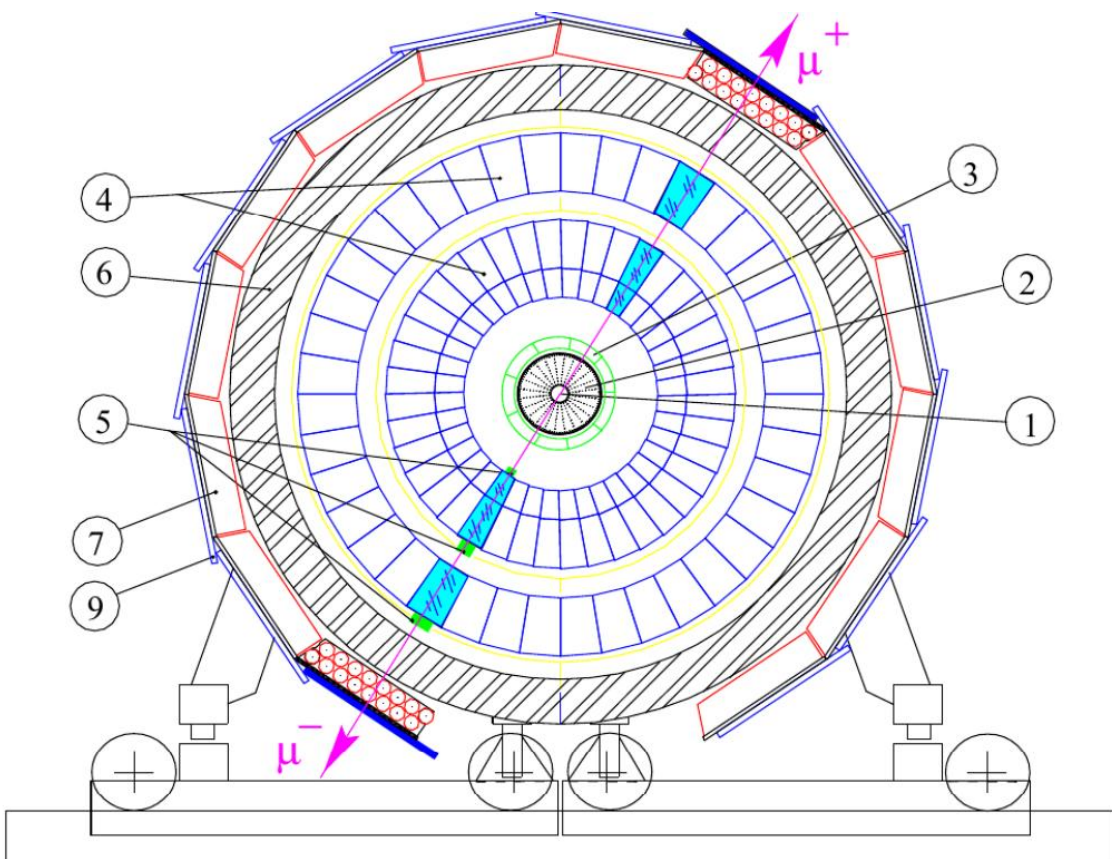
Распределение интегральной светимости статистики, набранной с 2017 г. по 2024 г.

[1] CMD-2 Collaboration, R.R. Akhmetshin et al., Phys.Lett.B 605 (2005), 26-36

[2] SND Collaboration, M.N. Achasov et al., Phys.Rev.D 93 (2016) 9, 092001

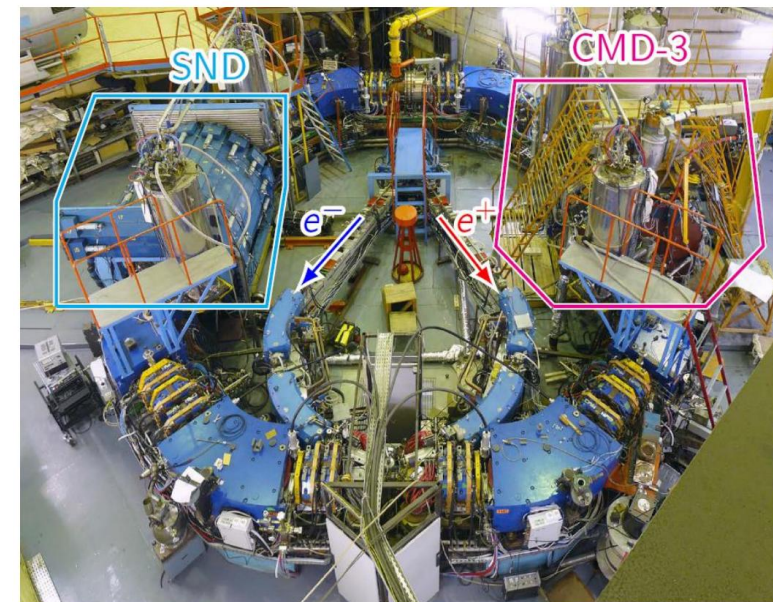
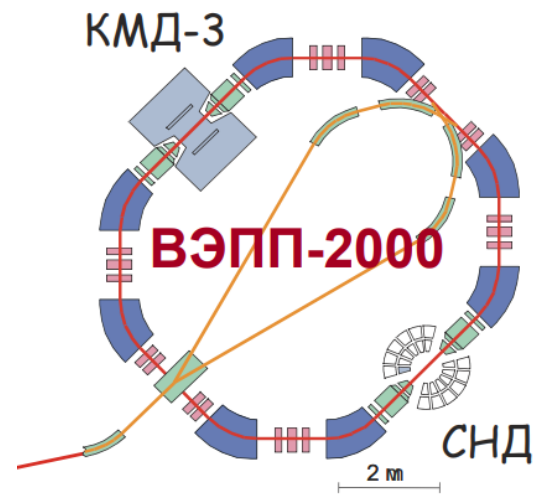
[3] SND Collaboration, M.N. Achasov et al., Phys.Rev.D 98 (2018) 11, 112001

Коллайдер ВЭПП-2000 и СНД



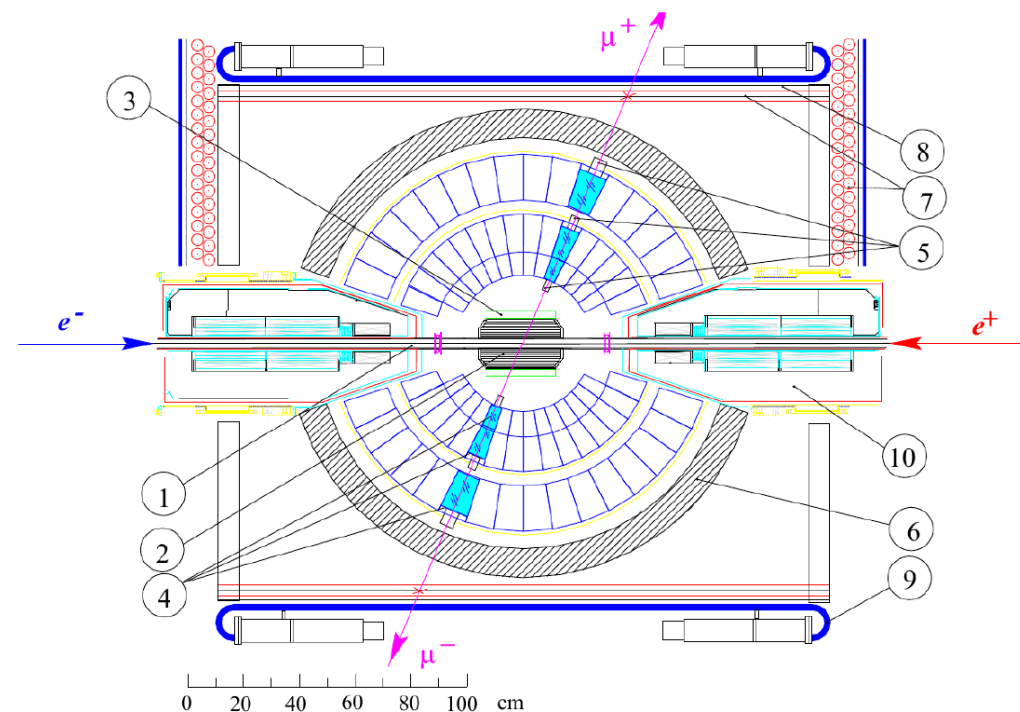
СНД: вид вдоль пучков

$18^\circ < \theta < 162^\circ$ (95% от телесного угла)
 Угловой размер кристалла в электромагнитном
 калориметре $\Delta\theta = 18^\circ$



Коллайдер ВЭПП-2000.

Сверху слева- схема, сверху справа – фото, снизу – СНД вид сбоку



Измерение интегральной светимости

Интегральная светимость измерялась по процессу: $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ согласно работе [1]

Используется генератор BabaYaga@NLO

Условия отбора:

1. $N_{\text{charged}} = 0$
2. $E_{\text{total}} > 0.65\sqrt{s}$
3. $P_{\text{total}} < 0.3\sqrt{s}$
4. $N_{\text{neutral}} = 2$
5. $E_1 > 0.3\sqrt{s}, E_2 > 0.3\sqrt{s}$
6. $|\Delta\varphi| = ||\varphi_1 - \varphi_2| - 180^\circ| < 15^\circ$ (коллинеарные события)
7. $|\Delta\theta| = |\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 25^\circ$ (коллинеарные события)
8. $\theta^* = \frac{180^\circ - |\theta_1 - \theta_2|}{2} > 45^\circ$

Систематическая неопределенность оценивается в 1.0%

[1] SND Collaboration, M.N. Achasov et al., Phys.Rev.D 110 (2024), 072001

Отбор событий $\pi^0\gamma$

Изучается процесс: $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$
в канале $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Фоновые процессы:

1. $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ (QED)
2. $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma \rightarrow 5\gamma$
3. $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma(\gamma) \rightarrow 3\gamma(\gamma)$

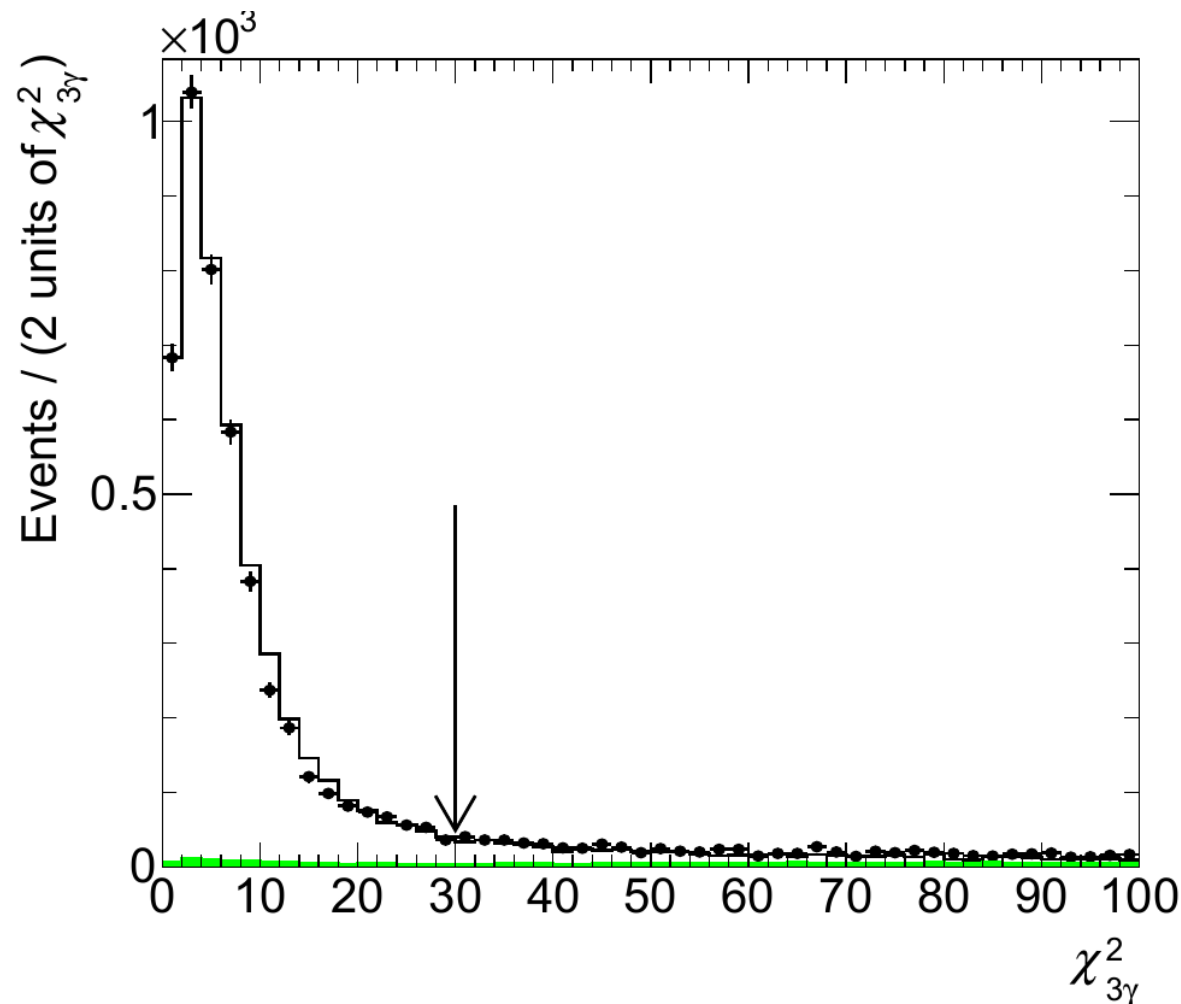
Условия отбора

- $N_{\text{charged}} = 0$
- $E_{\text{total}} > 0.65\sqrt{s}$
- $P_{\text{total}} < 0.3\sqrt{s}$
- $N_{\text{neutral}} = 3$

Проводилась кинематическая реконструкция (4C) в гипотезе 3γ

Условия на параметры фотонов после кинематической реконструкции

- $70 < M_{\gamma\gamma} < 200 \text{ МэВ}/c^2$
- $\chi_{3\gamma}^2 < 30$
- $36^\circ < \theta_{1,2,3} < 144^\circ$
- $E_{\gamma,\text{min}} > 125 \text{ МэВ}$



Распределения $\chi_{3\gamma}^2$ для экспериментальных событий (точки с ошибками) и моделирования сигнала и фона (открытая гистограмма)

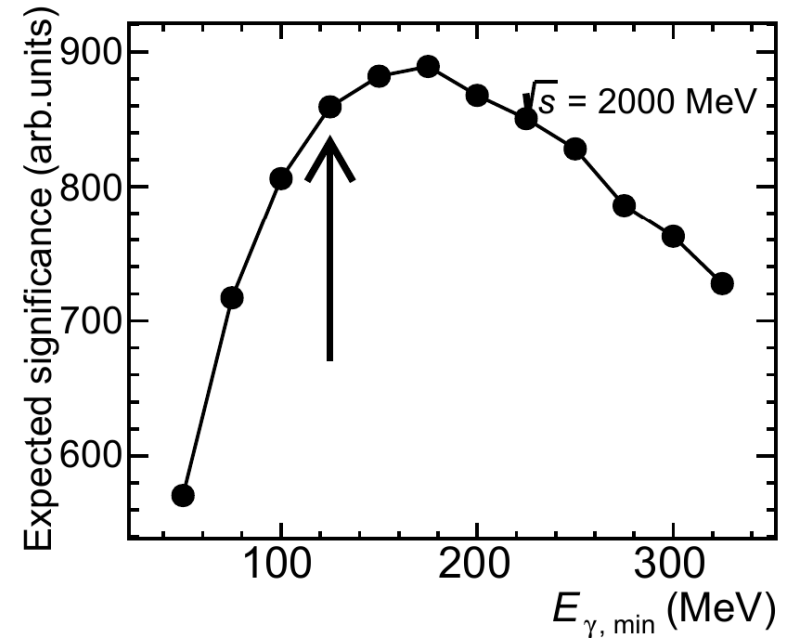
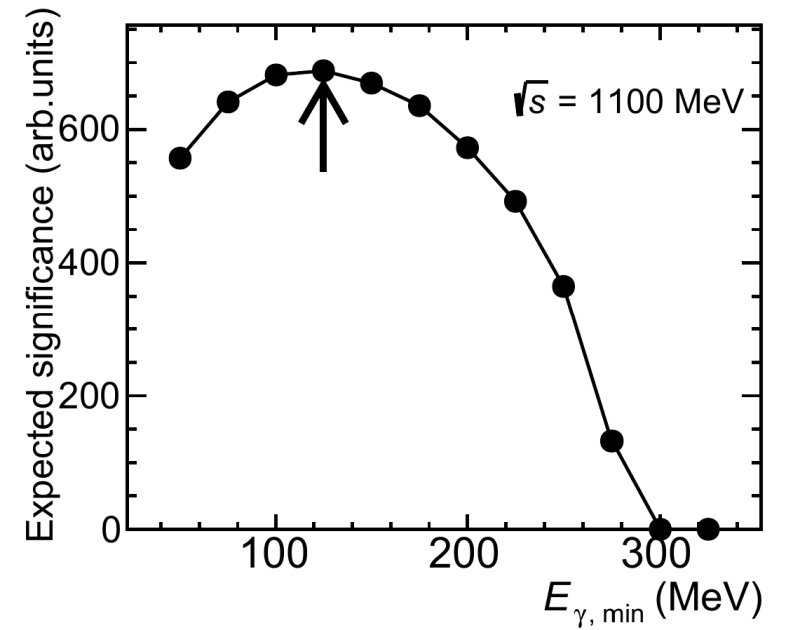
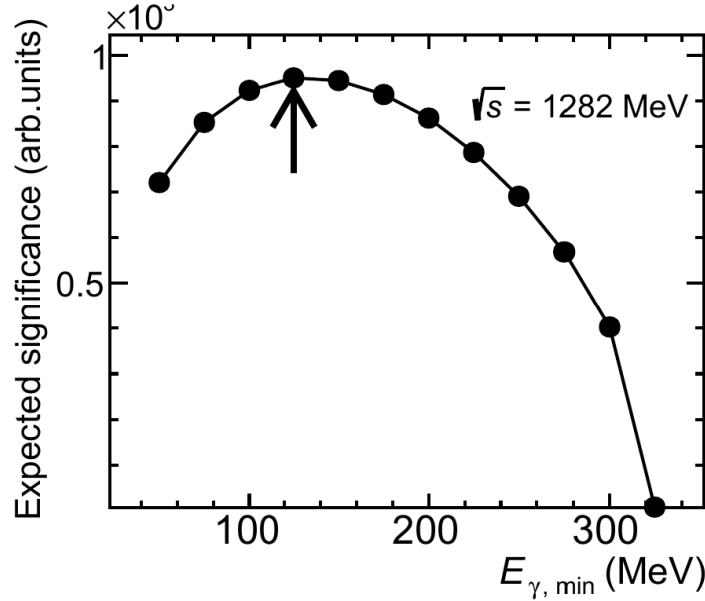
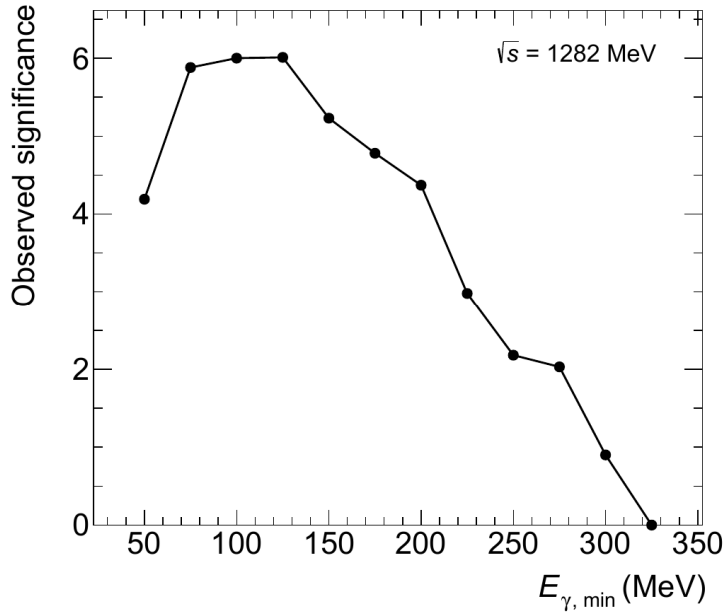
при энергии $\sqrt{s} = 1282 \text{ МэВ}$.

Цветом выделен расчётный вклад по моделированию от многофотонного адронного фона.

Стрелка указывает на условие отбора.

Изучение порога на минимальную энергию фотона

Значимость сигнала: $Z = N_{\text{signal}} / \sqrt{N_{\text{bkg}} + N_{\text{signal}}} \approx N_{\text{signal}} / \sqrt{N_{\text{bkg}}}$



Наблюдаемая значимость от минимальной энергии фотона в точке $\sqrt{s} = 1282$ МэВ

Условия отбора по минимальной энергии фотона:

$1080 < \sqrt{s} < 1600$ МэВ: $E_{\gamma, \text{min}} > 125$ МэВ

$1600 < \sqrt{s} < 2000$ МэВ: $E_{\gamma, \text{min}} > 150$ МэВ

Подгонка распределения по $M_{\gamma\gamma}$ для определения N_{signal}

Подгоночная функция:

$$F(M_{\gamma\gamma}) = F_{signal}(M_{\gamma\gamma}) + F_{background}(M_{\gamma\gamma}),$$

Сигнальная функция:

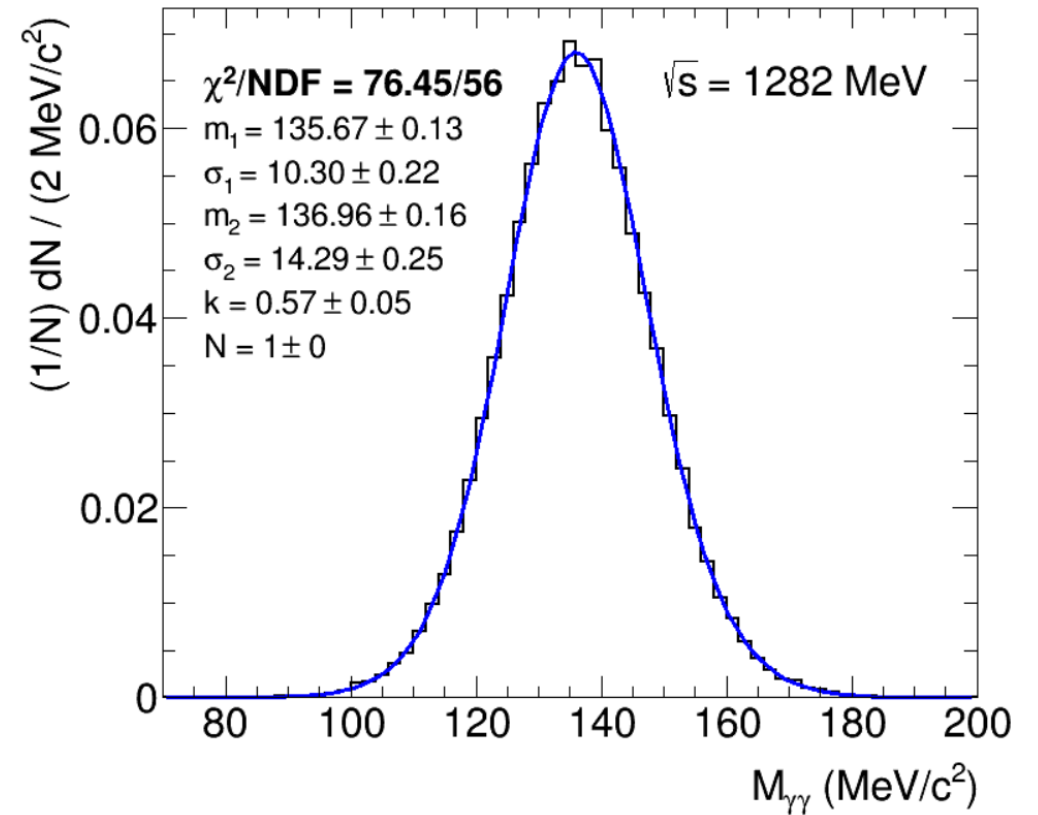
$$F_{signal}(M_{\gamma\gamma}) = N_{signal} \left(\frac{k}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(M_{\gamma\gamma} - m_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{(1-k)}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} e^{-\frac{(M_{\gamma\gamma} - m_2)^2}{2\sigma_2^2}} \right)$$

Параметры $m_1, m_2, \sigma_1, \sigma_2, k$ **определяются** из подгонки спектра инвариантной массы моделирования $\pi^0\gamma$ и **фиксируются** при подгонки экспериментального распределения

Фоновая функция:

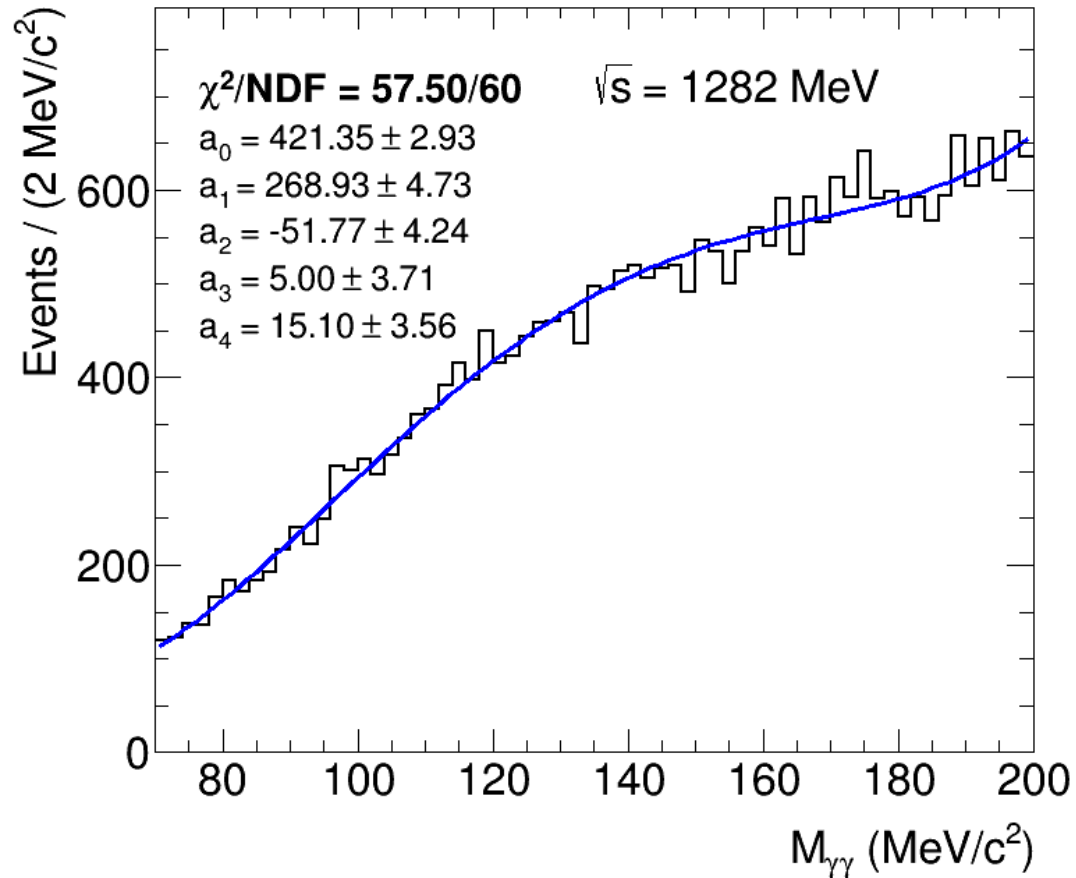
$$F_{background}(M_{\gamma\gamma}) = P_{\text{Чеб}}^{\gamma\gamma}(x) + P_1(M_{\gamma\gamma}) + H_{\pi^0\pi^0\gamma} + H_{\eta\gamma} + H_{ISR} + H_{\pi^0\pi^0\gamma}(\text{non} - \omega)$$

$$P_1(M_{\gamma\gamma}) = a (M_2 - M_{\gamma\gamma}) / (M_2 - M_1) + b (M_{\gamma\gamma} - M_1) / (M_2 - M_1)$$

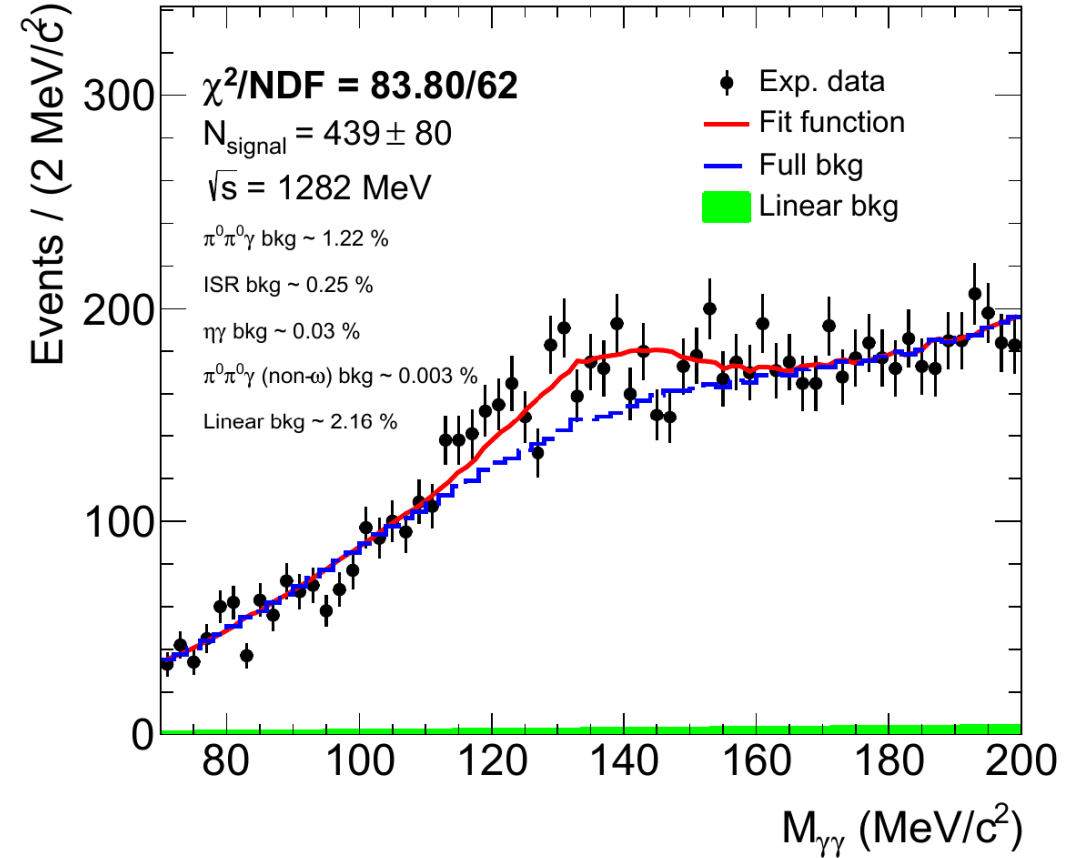


Распределение $M_{\gamma\gamma}$ для моделирования $\pi^0\gamma$ и фит 2-мя гауссовыми функциями (синяя кривая)

Подгонка распределения по $M_{\gamma\gamma}$ для определения N_{signal}

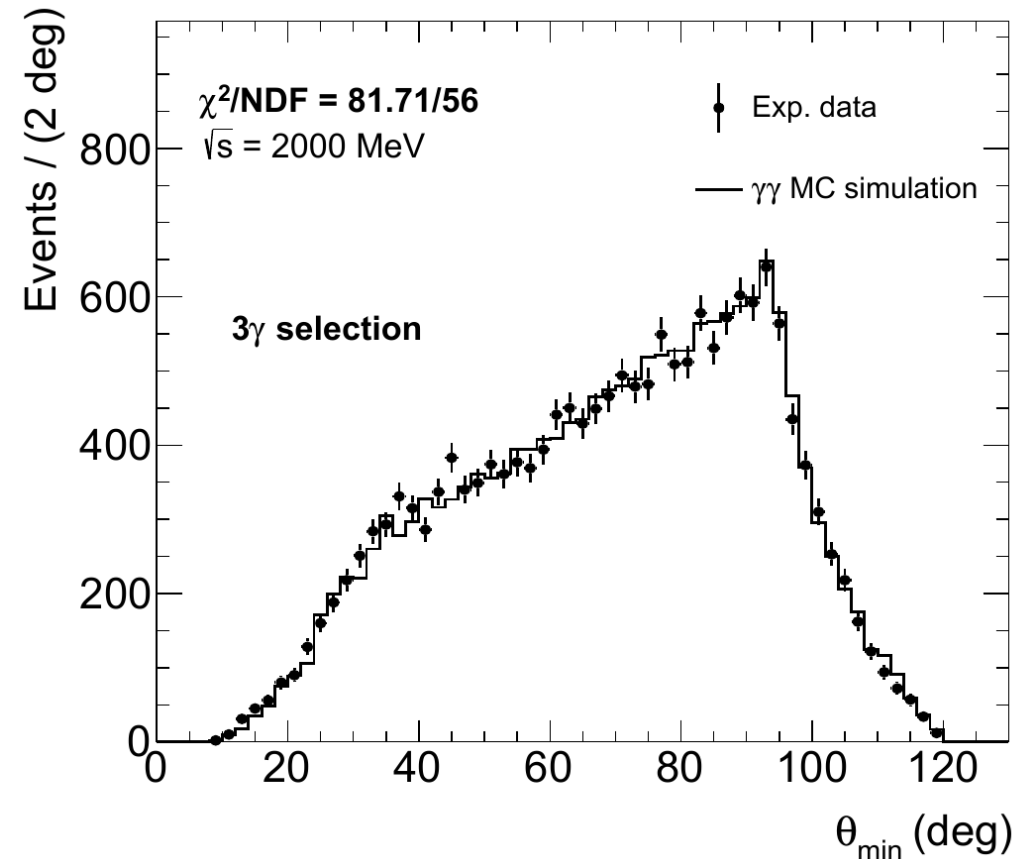
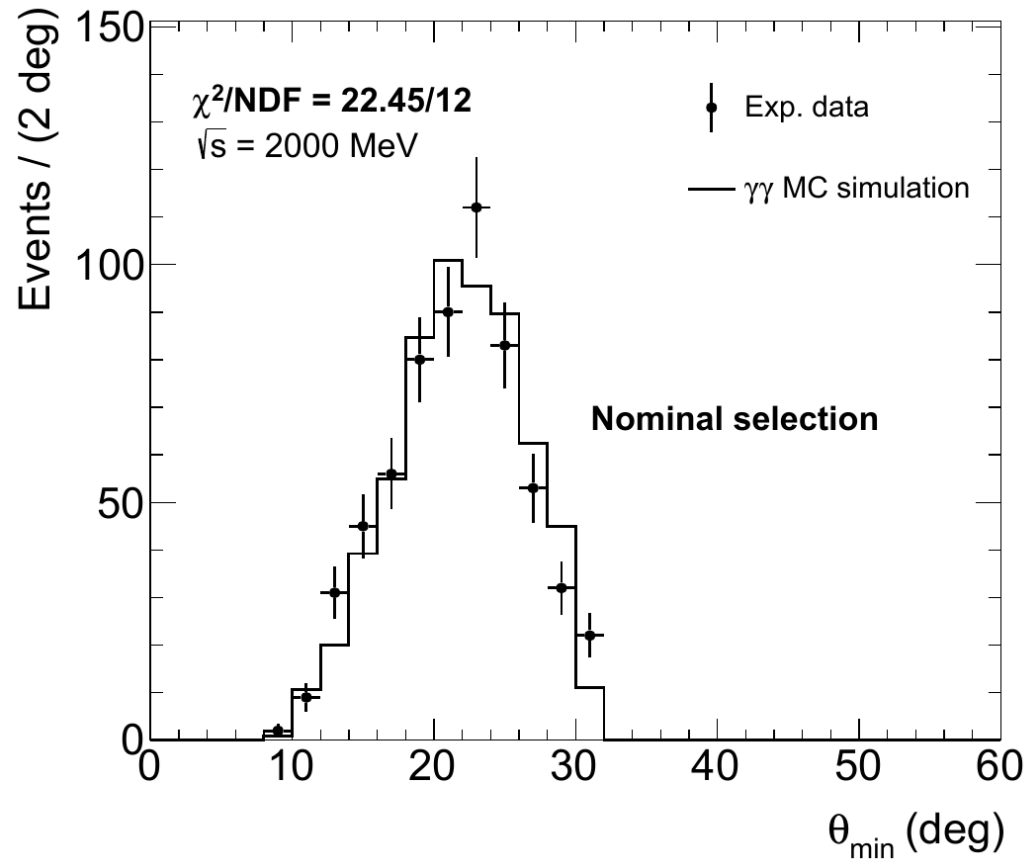


Распределение $M_{\gamma\gamma}$ для моделирования $\gamma\gamma$ и фит полиномами Чебышева до 4-й степени



Распределение M для экспериментальных данных и результирующий фит красным

Изучение эффективности регистрации при высоких энергиях



Распределения минимального угла между фотонами при энергии 2000 МэВ.
Использованы условия отбора с кинематической реконструкцией

с условиями $70 < M_{\gamma\gamma} < 200 \text{ МэВ}/c^2$

без условий $70 < M_{\gamma\gamma} < 200 \text{ МэВ}/c^2$

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ выше 1 ГэВ

Связь видимого сечения и борновского (**формула Фадына-Кураева**):

$$\sigma_{\text{visible}}(s) = \int_0^{x_{\text{max}}} \varepsilon_r(s, x) F(s, x) \sigma_{\text{Born}}(s(1-x)) dx = \sigma_{\text{Born}}(s) \varepsilon_0(s) (1 + \delta(s))$$

$x_{\text{max}} = 1 - m_{\pi^0}^2/s$, x – доля уносимой энергии рад. фотона, $\delta(s)$ – радиационная поправка

Описание борновского сечения в **модели векторной доминантности**:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma) = \frac{P_f(s)}{s^{\frac{3}{2}}} \left| \sum_V A_V(s) \right|^2 = \frac{P_f(s)}{s^{\frac{3}{2}}} |A_\rho + A_\omega + A_\phi + A_{V_1} + A_{V_2}|^2$$

$$P_f(s) = \left(\frac{\sqrt{s}}{2} \left(1 - \frac{m_{\pi^0}^2}{s} \right) \right)^3, \quad A_V(s) = \frac{e^{i\varphi_V}}{m_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(s)} \sqrt{\frac{m_V^5 \Gamma_V^2(s)}{P_f(m_V^2)}} \sigma_V, \quad \sigma_V = \frac{12\pi}{m_V^2} \text{Br}(V \rightarrow e^+e^-) \text{Br}(V \rightarrow \pi^0\gamma)$$

Были введены 2 эффективные резонансы для описания возбужденных состояний $\omega(1420)$, $\rho(1450)$ и $\omega(1650)$, $\rho(1700)$ с массами $m_{V_1} = 1450$ МэВ, $m_{V_2} = 1700$ МэВ.

Параметры подгонки:

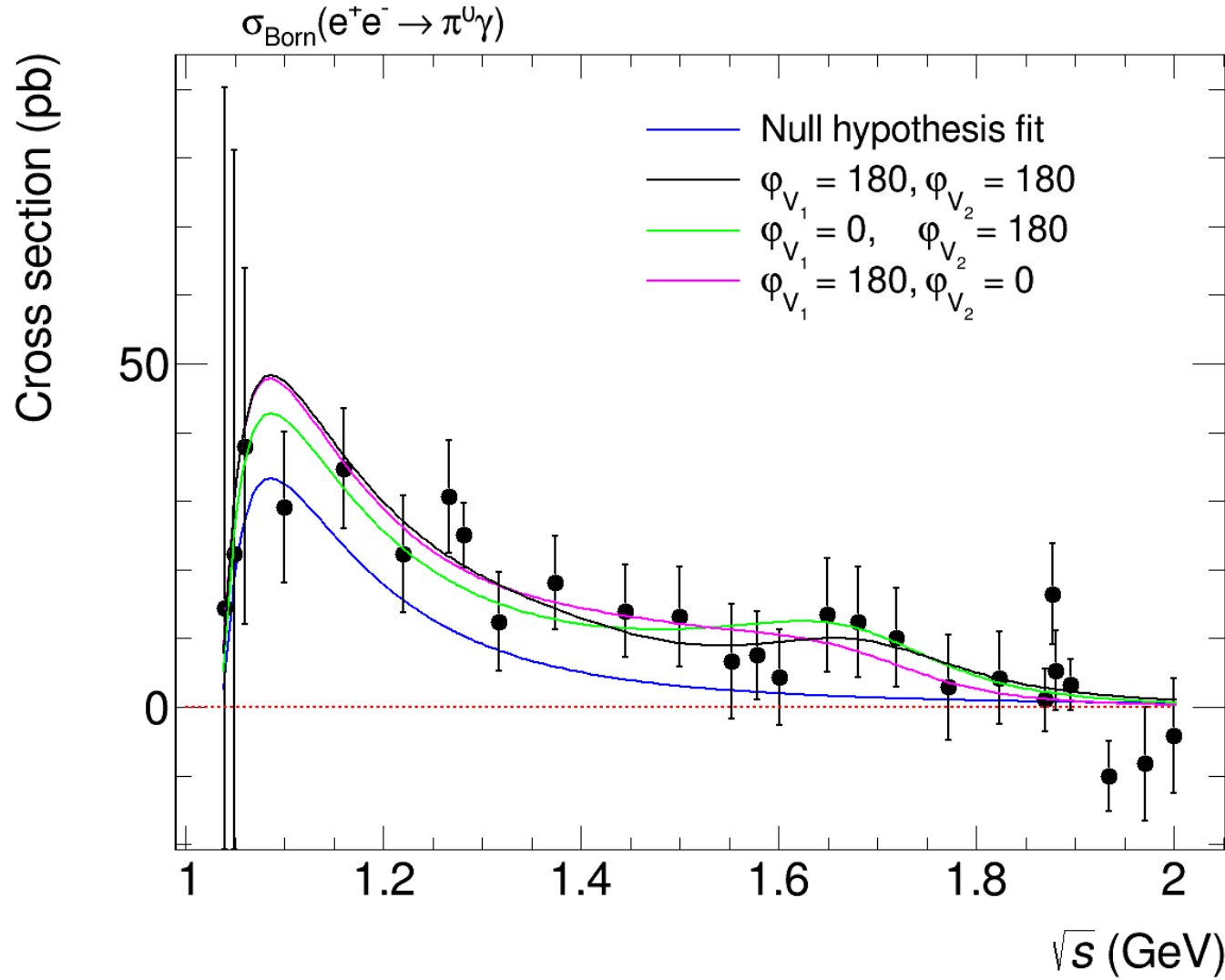
фиксированные: $\varphi_\omega = 0$, $\varphi_\rho = -12.7$, $\varphi_\phi = 163$, $\Gamma_{V_1} = 400$ MeV, $\Gamma_{V_2} = 300$ MeV, φ_{V_1} , φ_{V_2}

свободные: $\text{Br}(\phi \rightarrow \pi^0\gamma)$, σ_{V_1} , σ_{V_2}

Данные подгоняются одновременно с данными из работы [1]

[1] SND Collaboration, M.N. Achasov et al., Phys.Atom.Nuclei 88, 453-463 (2025)

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ выше 1 ГэВ



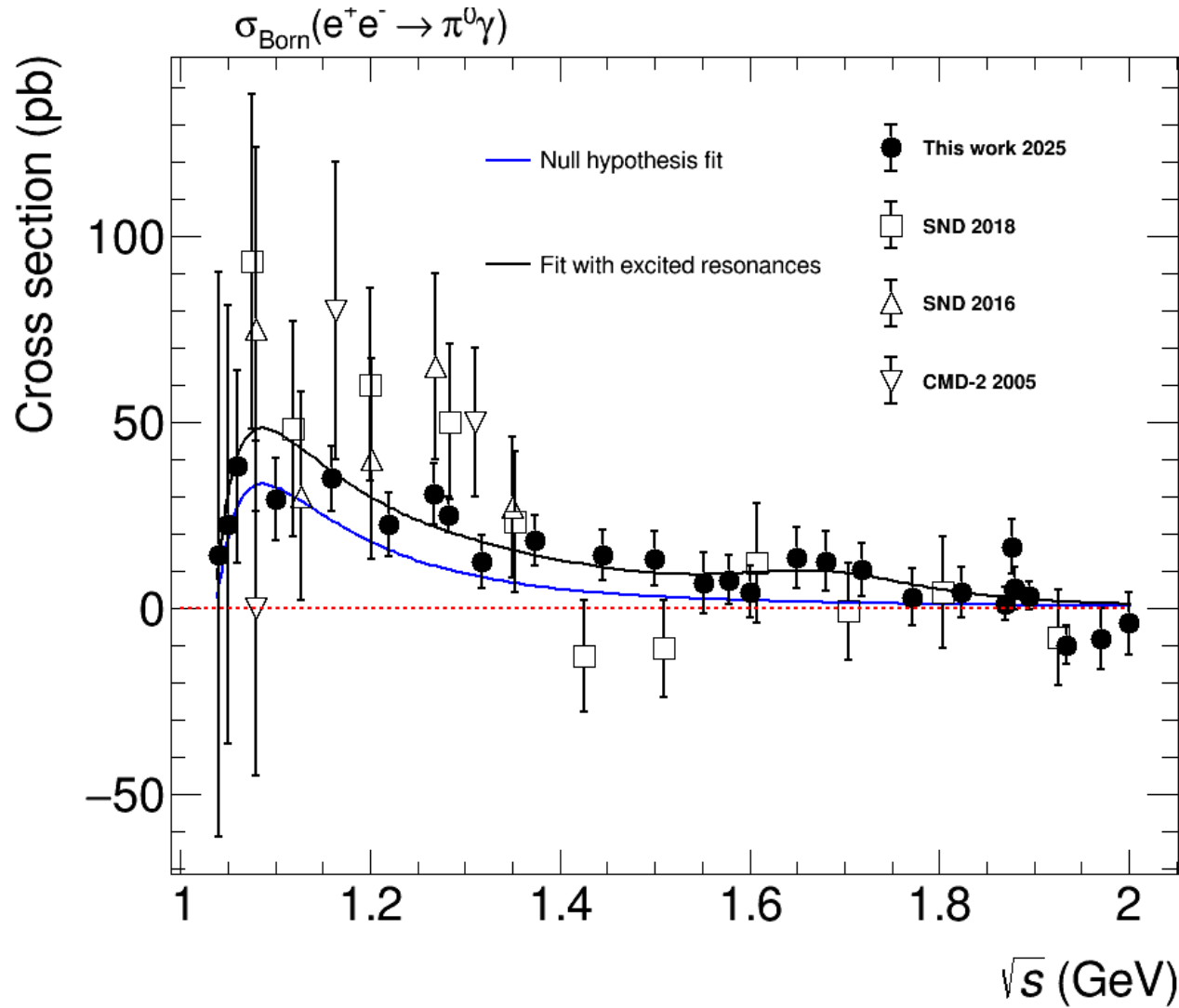
	χ^2
Нулевая гипотеза	44
Фит с эфф. резонансами	17.4

Нулевая гипотеза отвергается со значимостью 4.65σ

Phases	χ^2/NDF	σ_{V_1} (pb)	σ_{V_2} (pb)
$\varphi_{V_1} = 0, \varphi_{V_2} = 0$	27.6/22	5 ± 2	0 ± 0
$\varphi_{V_1} = 180, \varphi_{V_2} = 180$	17.4/22	3 ± 4	10 ± 6
$\varphi_{V_1} = 0, \varphi_{V_2} = 180$	20.4/22	0 ± 0	14 ± 3
$\varphi_{V_1} = 180, \varphi_{V_2} = 0$	18.2/22	36 ± 5	12 ± 5

Зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ от энергии пучков в СЦМ в различных гипотезах

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ выше 1 ГэВ



Зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ от энергии пучков в СЦМ и экспериментальные значения из предыдущих измерений

Источники систематической ошибки сечения	$\Delta\sigma/\sigma, \%$
Форма сигнала	0.2%
Форма фона	2.7%
Эффективность регистрации	1.0%
Интегральная светимость	1.0%
Радиационная поправка	0.1%
Результирующая систематика в точке $\sqrt{s} = 1282$ МэВ	3.1%

Заключение

- Проведено самое точное измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в области энергий 1.08 – 2 ГэВ на сегодняшний день
- Систематическая ошибка меняется (2.5 – 10.4)% в области энергий от 1100 до 1500 МэВ
- Сечение хорошо описывается моделью векторной доминантности с двумя эффективными резонансами
- Нулевая гипотеза (без возбуждённых резонансов) исключается на уровне 4.65σ

Спасибо за внимание!

BACKUP

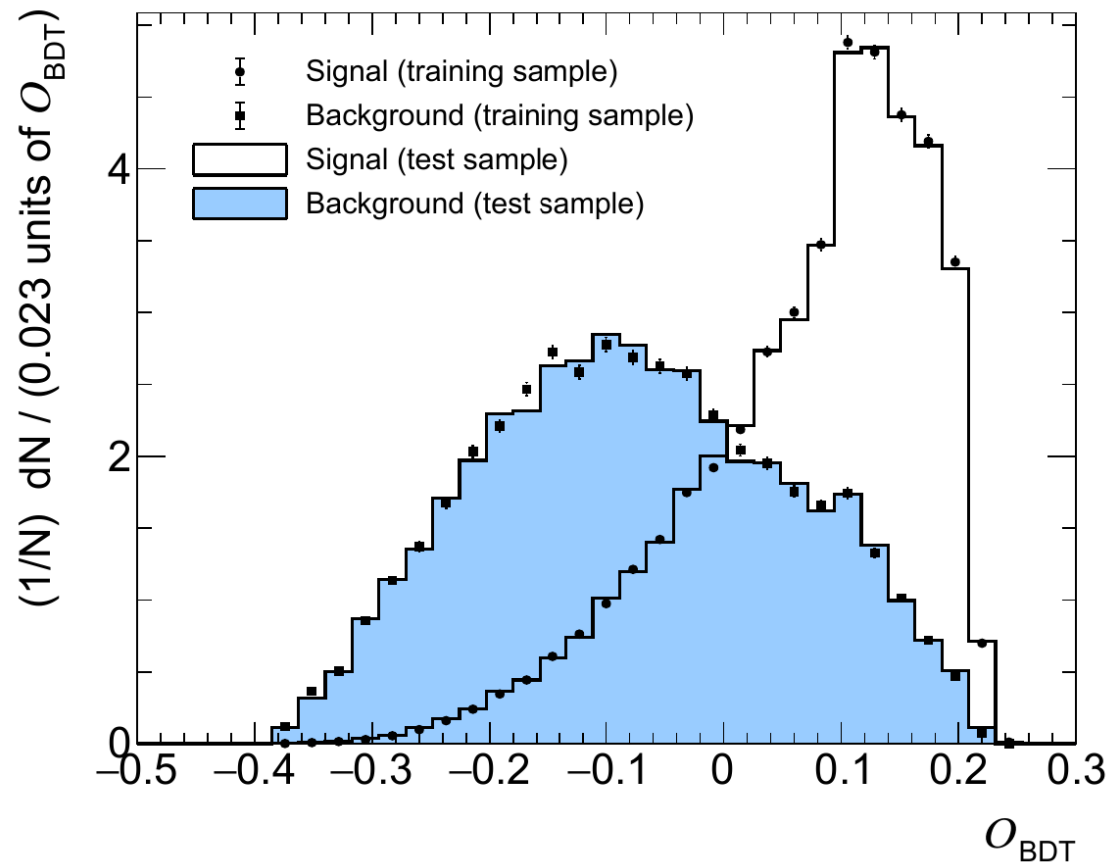
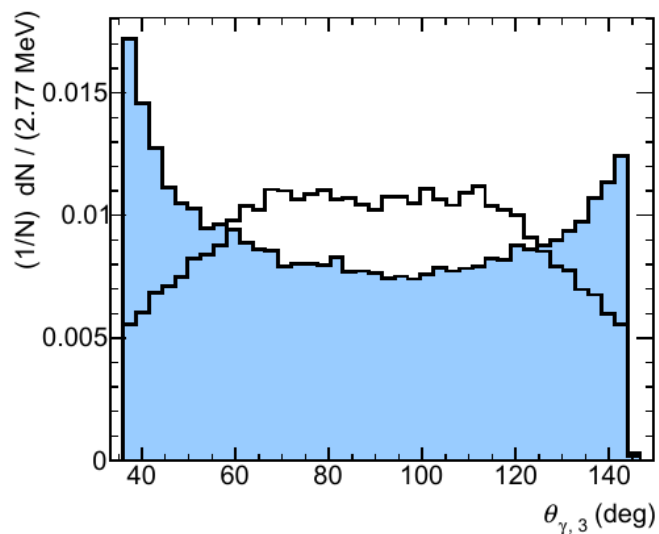
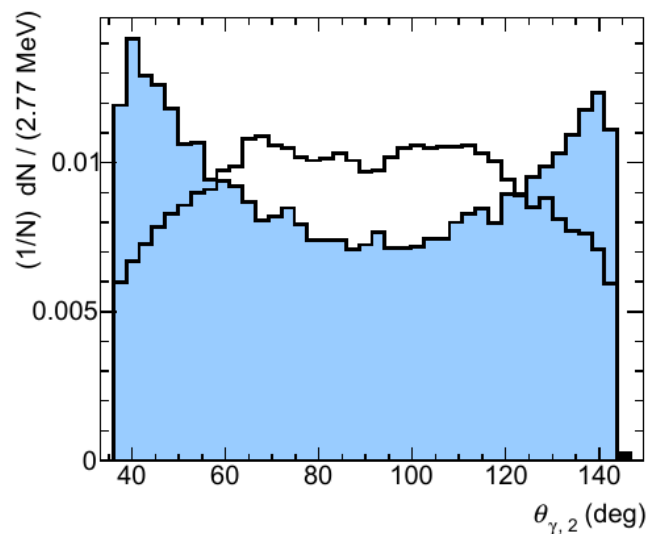
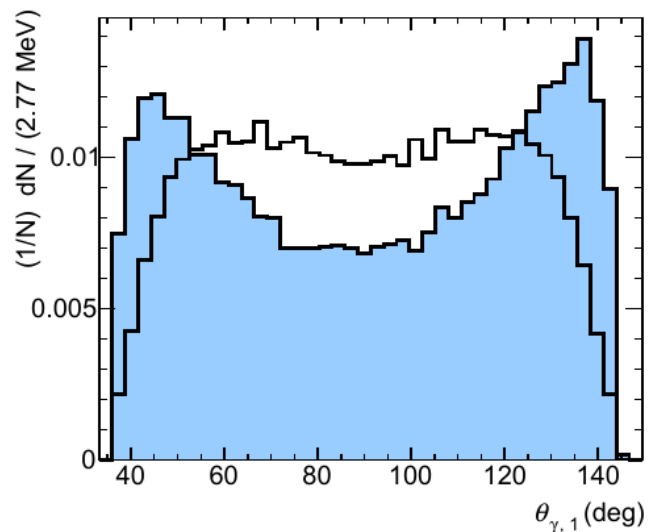
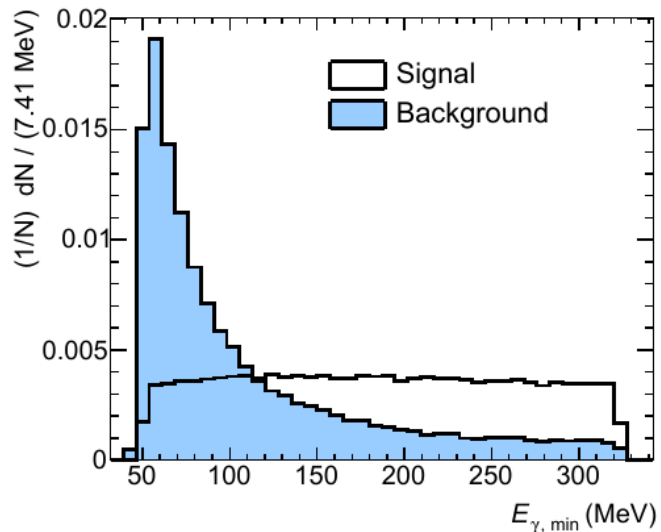
Вклад многофотонного фона $\pi^0\pi^0\gamma$

Conditions	$N_{\pi^0\gamma}^{\text{observed}}$	$N_{\gamma\gamma}^{\text{observed}}$	$N_{\pi^0\pi^0\gamma}^{\text{observed}}$
Base cuts + $\chi_{3\gamma}^2 < 100$	3178	49123	1833
Base cuts + $\chi_{3\gamma}^2 < 30$	3001	41700	670
Base cuts + $\chi_{3\gamma}^2 < 100$ + $N_{\text{neutral}} = 3$	2702	41116	161
Base cuts + $\chi_{3\gamma}^2 < 30$ + $N_{\text{neutral}} = 3$	2559	35597	85

Таблица с наблюдаемыми числами событий после последовательного применения условий отбора в точке $\sqrt{s} = 1282$ МэВ.

Последняя строка отвечает наиболее оптимальному условию отбора по подавлению многофотонного фона

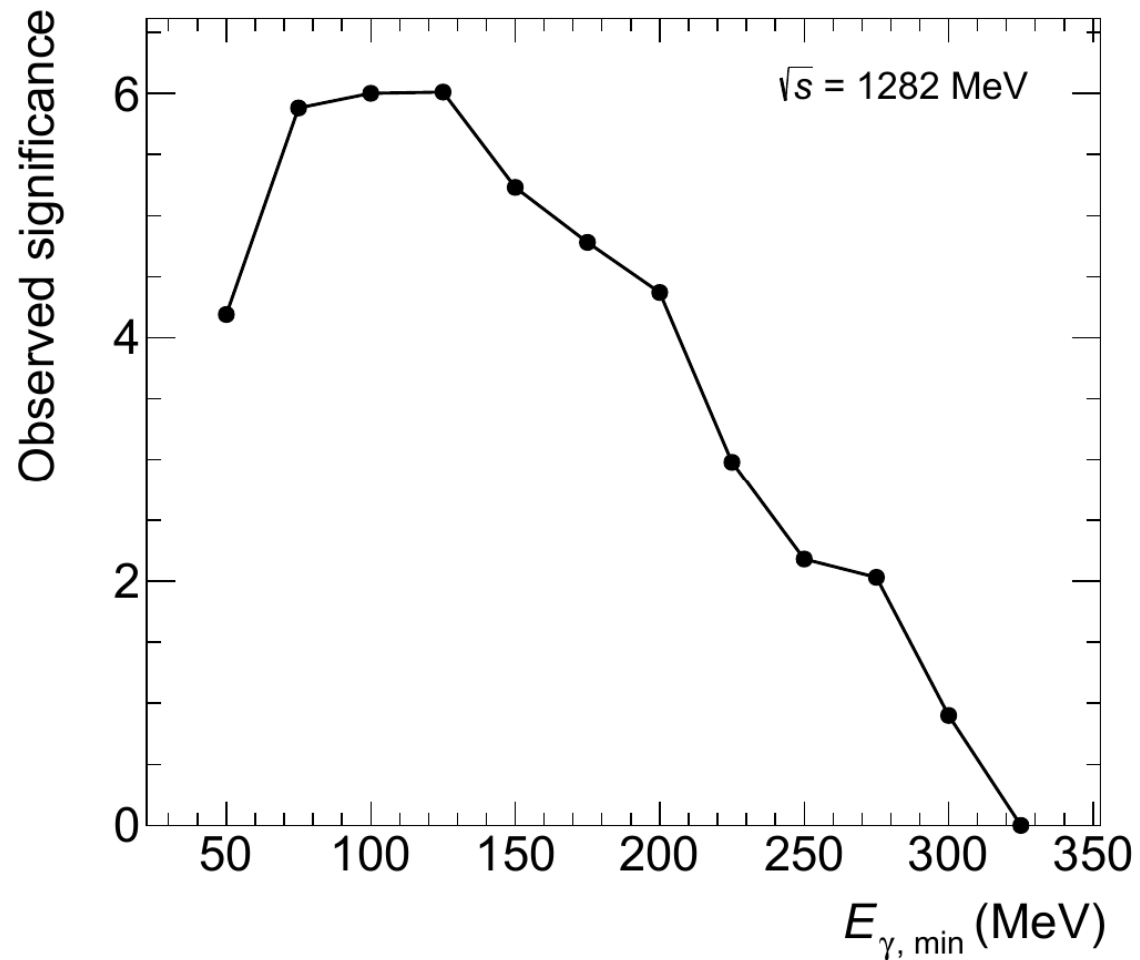
MVA с использованием BDT



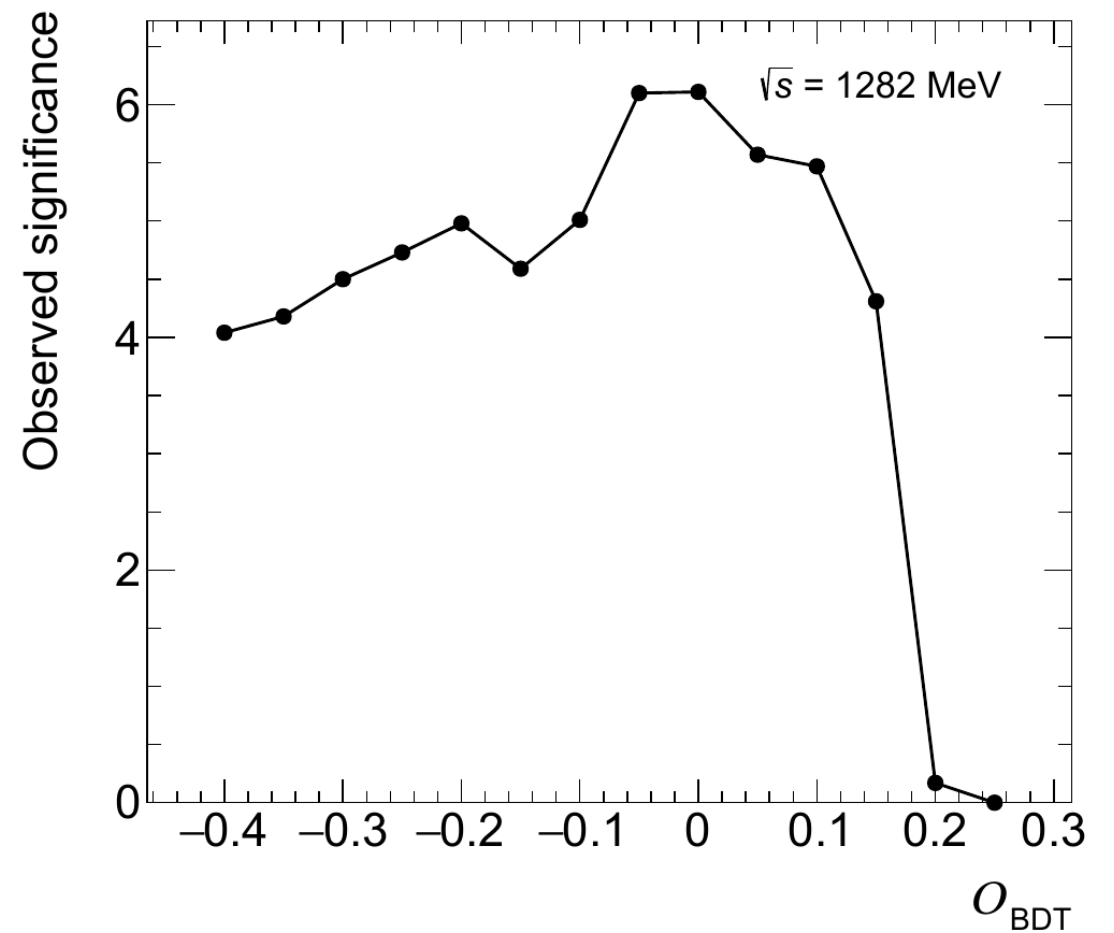
Распределение параметра разделения

Входные параметры для обучения и тестирования

Наблюдаемая значимость сигнала $\pi^0\gamma$

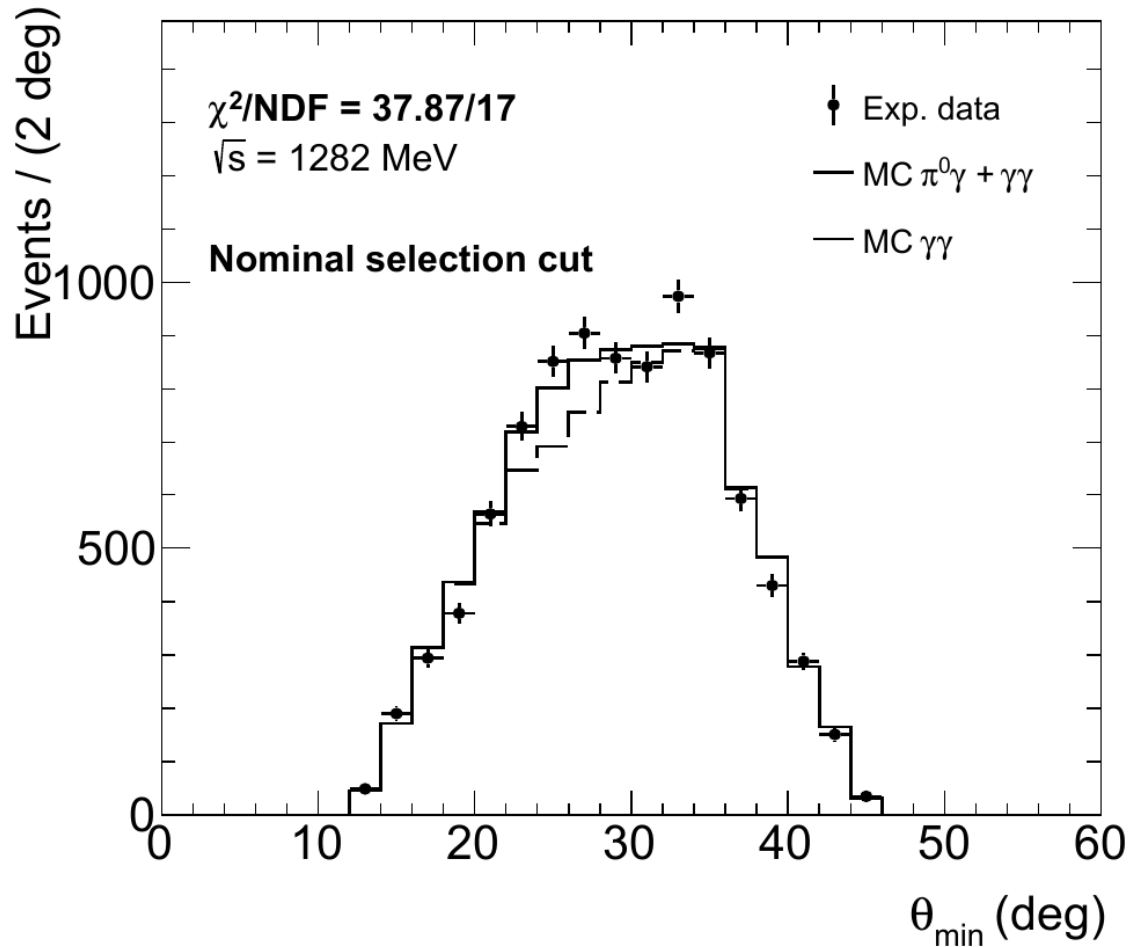


Наблюдаемая значимость в зависимости от минимальной энергии фотона



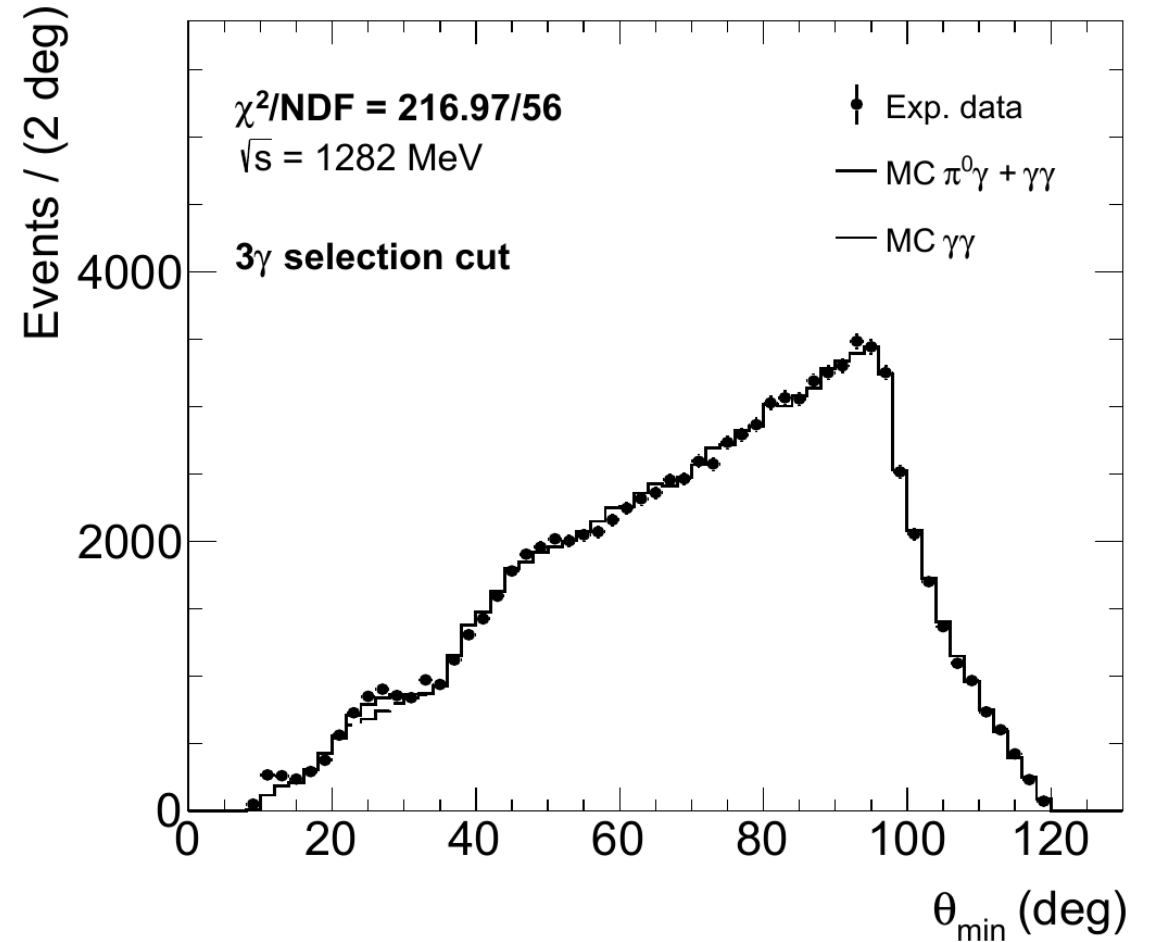
Зависимость наблюдаемой значимости от отклика BDT

Изучение эффективности регистрации при высоких энергиях



Распределение минимального угла между фотонами при энергии 1282 МэВ.

Использованы условия отбора с кин. реконструкцией для $\pi^0\gamma$



Распределение минимального угла между фотонами при энергии 1282 МэВ.

Использованы условия отбора с кин. реконструкцией $\gamma\gamma\gamma$