

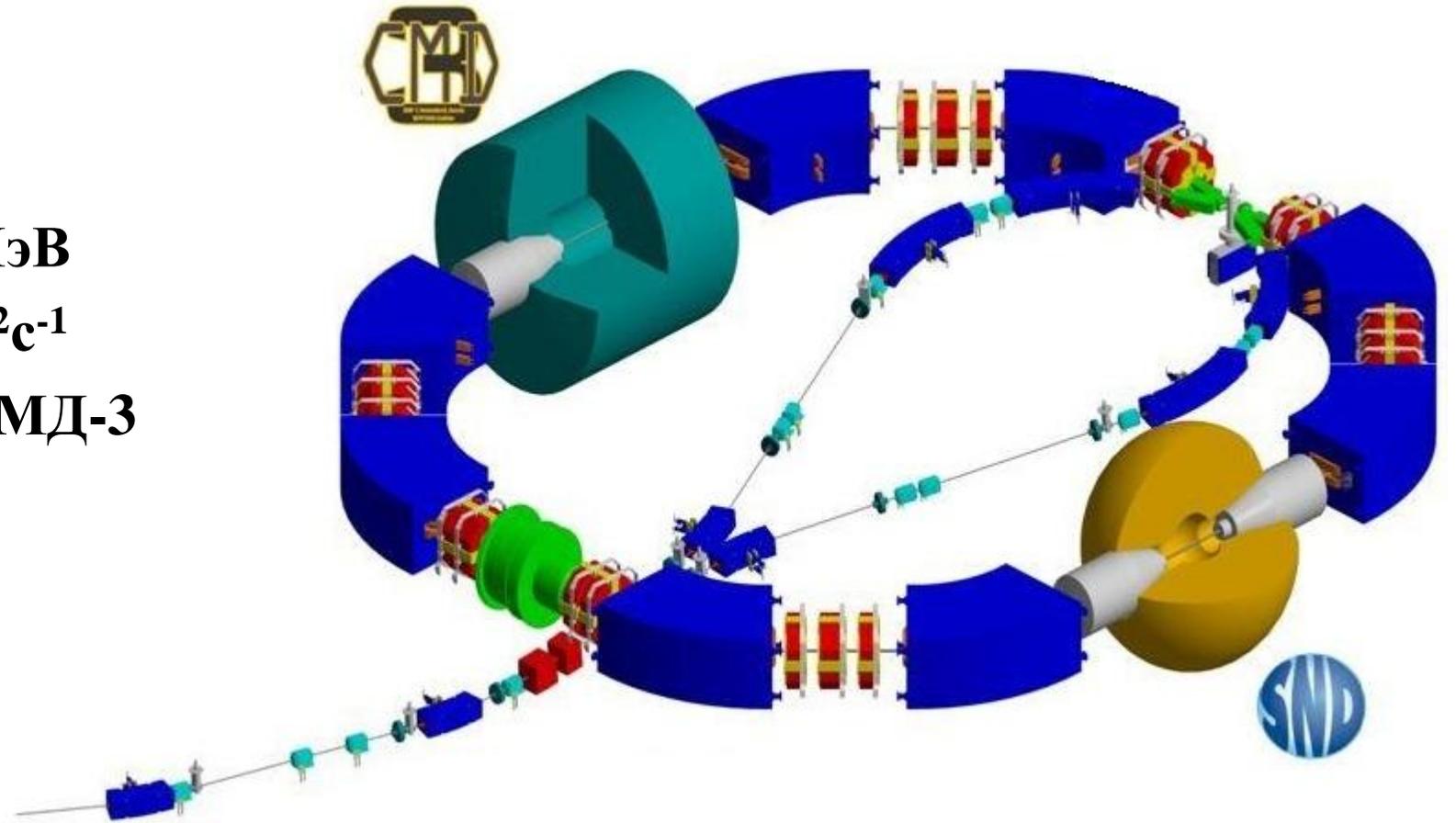
**Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ и $\eta'\gamma$
при энергии \sqrt{s} от 1.075 до 2 ГэВ
на детекторе СНД**

Бердюгин А.В.

СНД – ВЭПП-2000

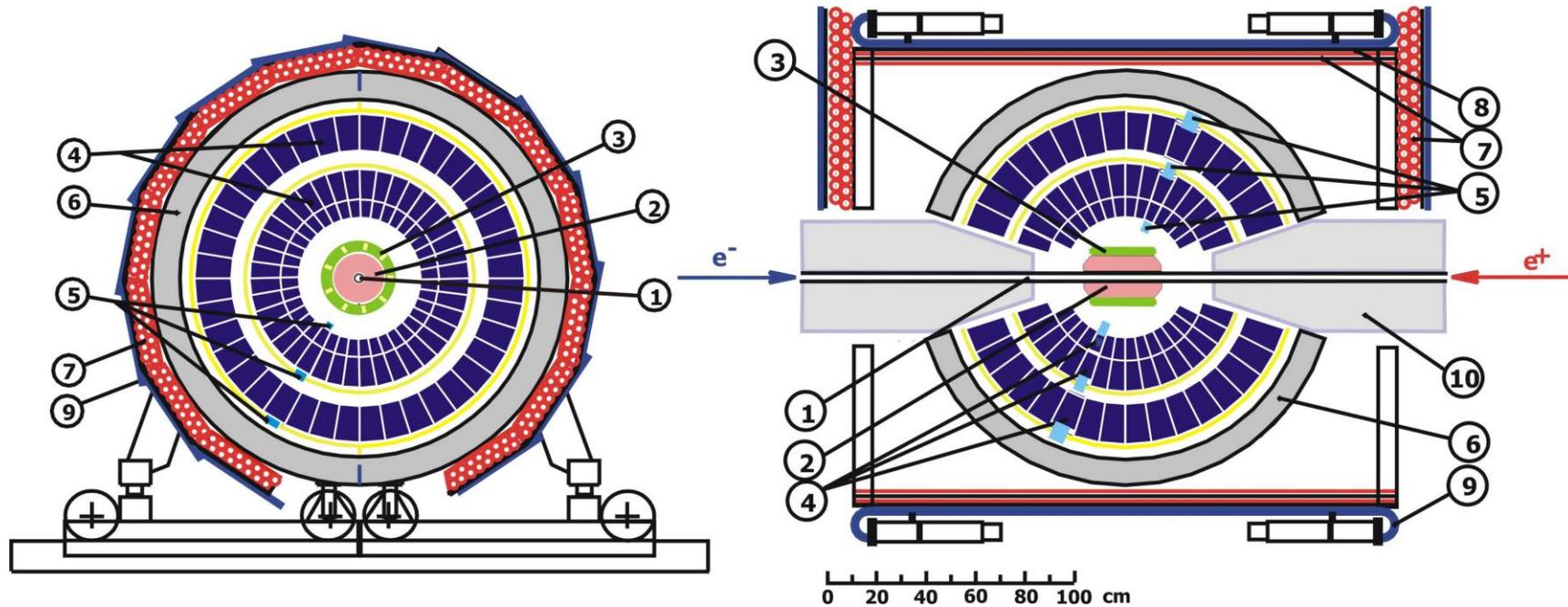
Комплекс ВЭПП-2000

- e^+e^- коллайдер
- Энергия 160 – 1000 МэВ
- Светимость $4 \cdot 10^{31} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- Детекторы: СНД и КМД-3



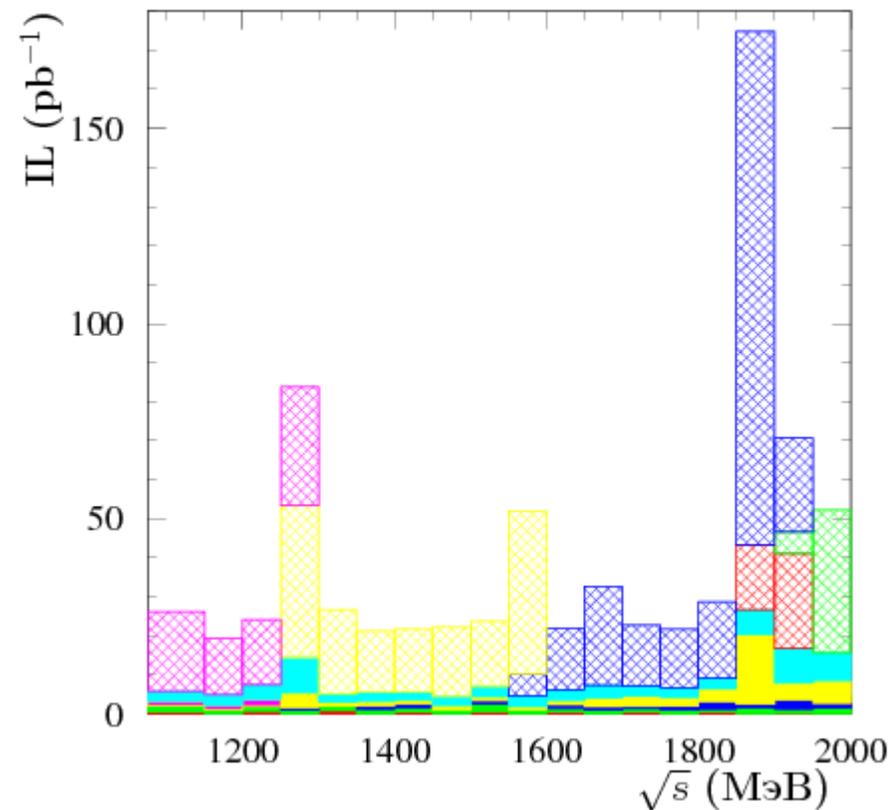
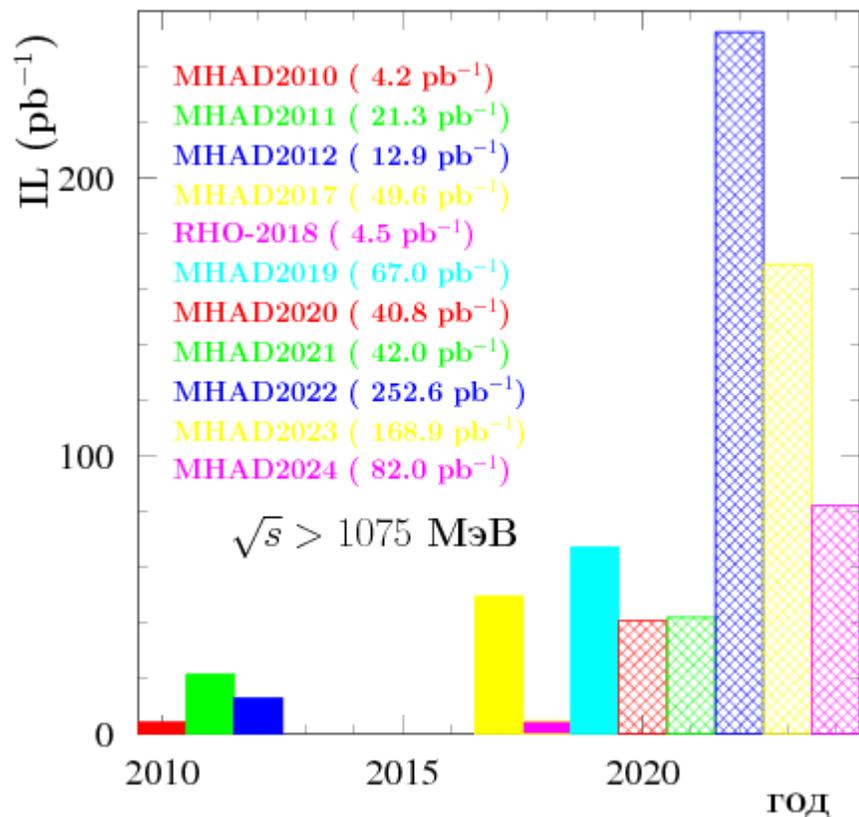
Детектор СНД на ВЭПП-2000

$\mathcal{L} = 746 \text{ пб}^{-1}$ при $2E_{\text{beam}} = 1.075 - 2.00 \text{ ГэВ}$



1 – beam pipe, 2 – tracking system, 3 – aerogel Cherenkov counter, 4 – NaI(Tl) crystals, 5 – phototriodes, 6 – iron muon absorber, 7–9 – muon detector, 10 – focusing solenoids.

Детектор СНД на ВЭПП-2000



Исследуемый процесс $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$

Канал распада: $\eta \rightarrow 3\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Фоновые процессы:

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

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

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

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

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

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0\pi^0 \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \eta \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$$

✓ изменились сечения процессов
(по сравнению с 2014 г.)

✓ вклад ранее не учитывался
(в статье 2014 г.)

Условия отбора

Предварительные:

- $N_{\text{ch}} = 0 ; N_{\gamma} > 6$
- Не сработала мюонная система
- $0.7 < E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} < 1.2 ; P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} < 0.3$
- $E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} - P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} > 0.7$

Кинематическая реконструкция:

- $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$
- $e^+e^- \rightarrow 3\pi^0\gamma$, где γ не входящий в π^0 -мезоны – фотон с максимальной энергией

Число событий

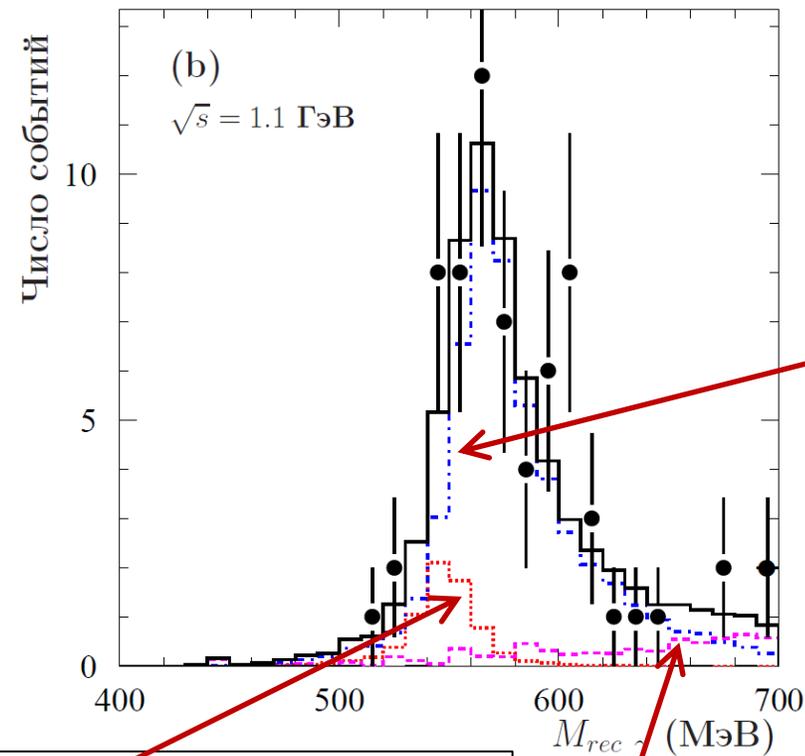
Аппроксимация распределения $M_{rec\ \gamma}$:

- моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ (без r.c. γ)
- моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma\gamma$ (события с $M_{rec\ r.c.\ \gamma} < 1030$ МэВ)
- ожидаемый вклад всех фоновых процессов, определенный по моделированию

$P_{\phi\gamma}$ – расчетный вклад

свободные параметры: $N_{\eta\gamma}$ и α_{bkg}

$$P(M_{rec}) = N_{\eta\gamma}P_{\eta\gamma}(M_{rec}) + \alpha_{bkg}P_{bkg}(M_{rec}) + P_{\phi\gamma}(M_{rec})$$

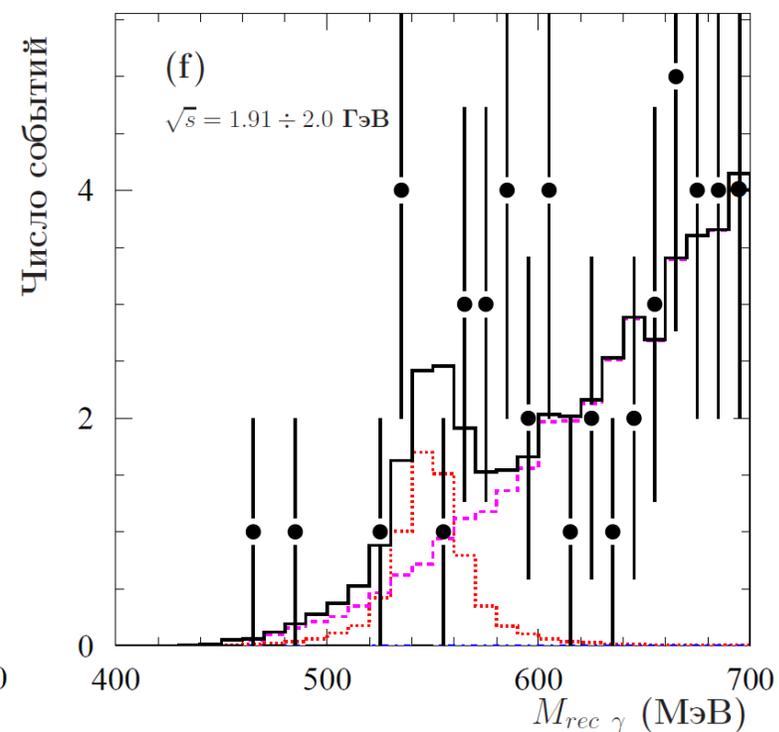
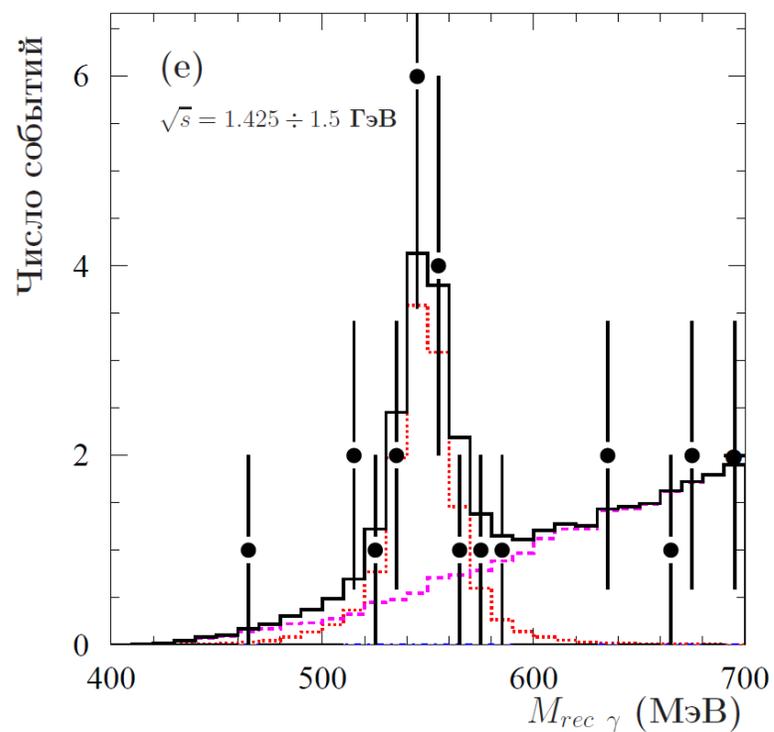
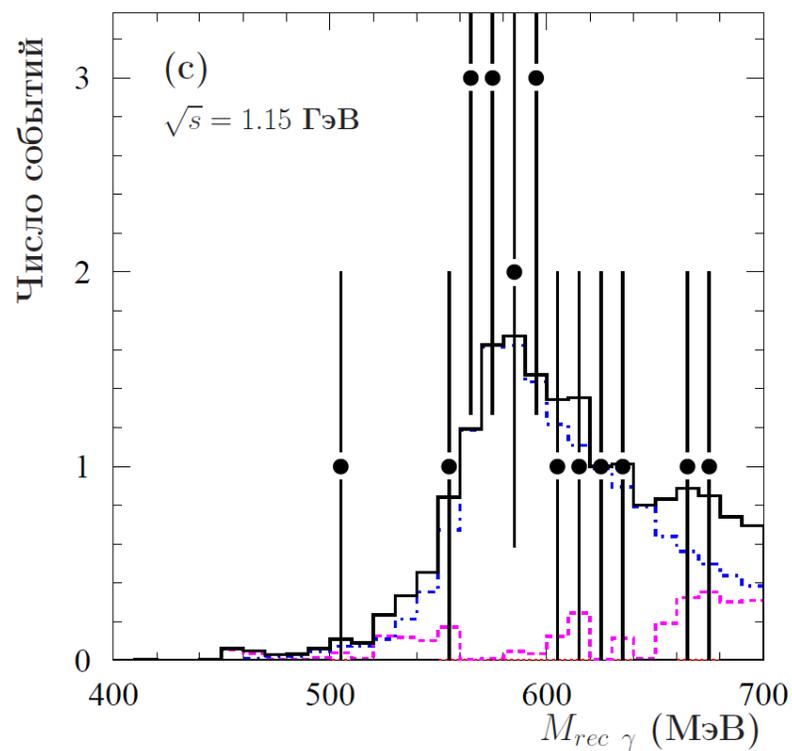


Моделирование
 $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma\gamma$

Моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ (без r.c. γ)

ожидаемый вклад всех фоновых процессов

Число событий



Аппроксимация данных

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s_i}) = N_{\eta\gamma,i}/IL_i$$

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s}) = \int_0^{x_{max}} \varepsilon\left(\sqrt{s}, \frac{x\sqrt{s}}{2}\right) F(x, \sqrt{s}) \sigma\left(\sqrt{s(1-x)}\right) dx$$

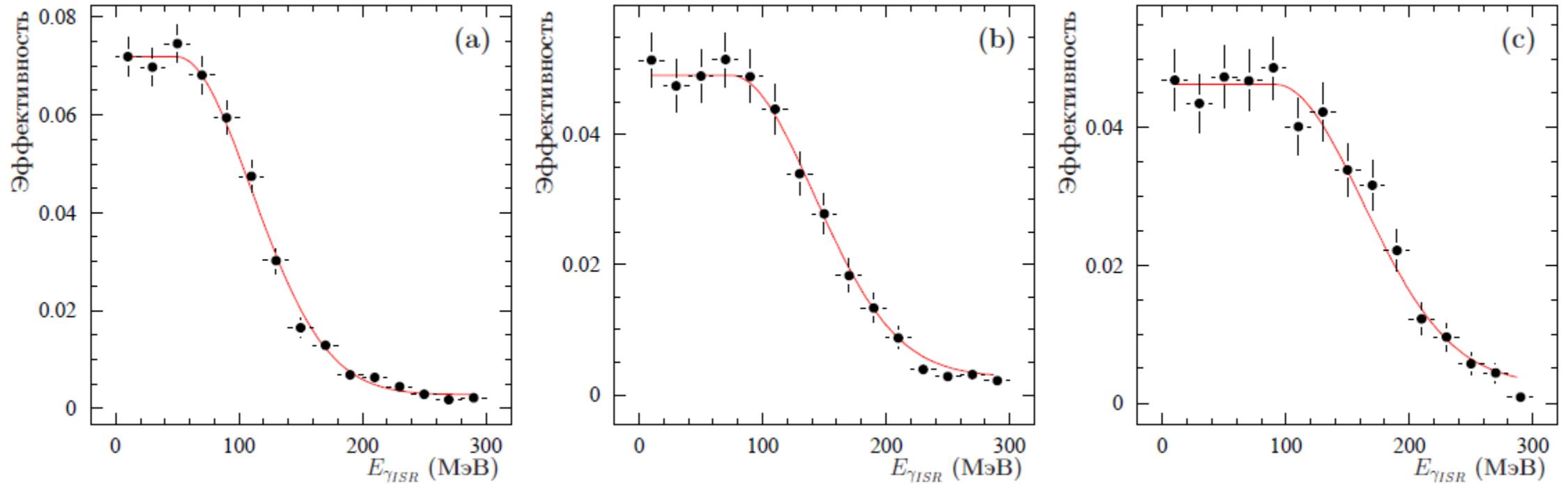
$$\sqrt{s'} = \sqrt{s(1-x_{max})} < 1.03 \text{ ГэВ}$$

$$\sigma_{vis}(\sqrt{s}) = \varepsilon_0(\sqrt{s}) \sigma(\sqrt{s}) (1 + \delta(\sqrt{s}))$$

$$\varepsilon_0(\sqrt{s}) \equiv \varepsilon(\sqrt{s}, 0)$$

$$\delta(\sqrt{s}) = \frac{\int_0^{x_{max}} \varepsilon\left(\sqrt{s}, \frac{x\sqrt{s}}{2}\right) F(x, \sqrt{s}) \sigma\left(\sqrt{(1-x)s}\right) dx}{\varepsilon_r(\sqrt{s}, 0)\sigma(\sqrt{s})} - 1$$

Эффективность регистрации



$\sqrt{s} = 1.15$ ГэВ (a), 1.6 ГэВ (b) и 1.9 ГэВ (c)

Борновское сечение

$$\sigma_{\eta\gamma}(\sqrt{s}) = \left(\frac{k_\gamma(\sqrt{s})}{\sqrt{s}} \right)^3 \left| \sum_{V=\rho, \omega, \phi, \dots} A_V(\sqrt{s}) \right|^2$$

$$A_V(\sqrt{s}) = \frac{m_V \Gamma_V(m_V) e^{i\varphi_V}}{D_V(\sqrt{s})} \sqrt{\frac{m_V^3}{k_\gamma(m_V)^3} \sigma_{V\eta\gamma}}$$

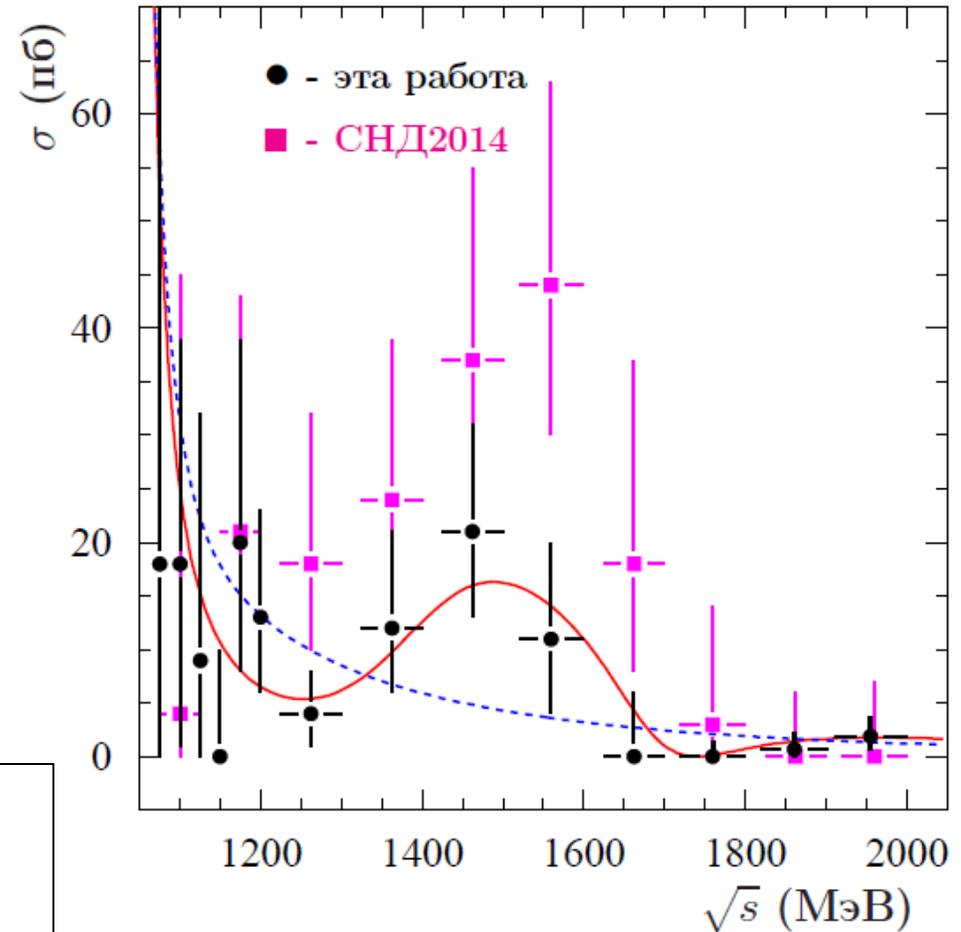
$$D_V(\sqrt{s}) = m_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(\sqrt{s})$$

$$k_\gamma(\sqrt{s}) = \frac{\sqrt{s}}{2} \left(1 - \frac{m_\eta^2}{s} \right)$$

$$\sigma_{\rho'\eta\gamma} = 16_{-10}^{+15} \pm 2 \text{ пб}$$

$$\sigma_{\phi'\eta\gamma} = 14_{-10}^{+14} \pm 2 \text{ пб}$$

$$\chi^2 / \text{ndf} = 4.7/10$$



$$\chi^2 / \text{ndf} = 11.4/14$$

Борновское сечение

\sqrt{s} (ГэВ)	L (пб ⁻¹)	$N_{\phi\gamma}$	$N_{\text{bkg}}(\alpha_{\text{bkg}})$	ε_0 (%)	$N_{\eta\gamma}$	$\delta + 1$	σ (пб)
1.075	1.10	28	2.9 (1.36 ± 0.27)	8.1	2.0 ^{+7.0} _{-2.0}	1.26 ± 0.04	18 ⁺⁶³ ₋₁₈ ± 1
1.100	3.38	51	6.4 (1.36 ± 0.27)	8.0	7.0 ^{+8.1} _{-6.5}	1.43 ± 0.12	18 ⁺²¹ ₋₁₇ ± 1
1.125	1.32	11	1.4 (1.36 ± 0.27)	8.2	1.5 ^{+3.7} _{-1.5}	1.48 ± 0.19	9 ⁺²³ ₋₉ ± 1
1.150	3.21	15	2.8 (1.36 ± 0.27)	8.1	0.0 ^{+3.8}	1.44 ± 0.22	0 ⁺¹⁰ ± 0.1
1.175	1.73	4	1.1 (1.36 ± 0.27)	7.9	3.6 ^{+3.5} _{-2.2}	1.35 ± 0.20	20 ⁺¹⁹ ₋₁₂ ± 2
1.200	4.30	4	2.2 (1.36 ± 0.27)	7.7	5.3 ^{+4.2} _{-2.9}	1.25 ± 0.16	13 ⁺¹⁰ ₋₇ ± 1
1.225–1.300	21.0	5	20 (1.35 ± 0.15)	7.0	5.9 ^{+5.4} _{-3.9}	1.01 ± 0.01	4 ⁺⁴ ₋₃ ± 0.2
1.325–1.400	10.0	1	16 (1.35 ± 0.15)	6.6	6.9 ^{+5.1} _{-3.7}	0.90 ± 0.08	12 ⁺⁹ ₋₆ ± 1
1.425–1.500	11.0	0	22 (1.01 ± 0.11)	6.3	13.0 ^{+6.6} _{-5.2}	0.91 ± 0.07	21 ⁺¹⁰ ₋₈ ± 2
1.520–1.600	11.3	0	34 (1.12 ± 0.08)	6.0	6.8 ^{+5.9} _{-4.4}	0.95 ± 0.03	11 ⁺⁹ ₋₇ ± 0.4
1.625–1.700	12.4	0	58 (1.28 ± 0.07)	5.6	0.0 ^{+4.9}	1.18 ± 0.20	0 ⁺⁶ ± 0.3
1.720–1.800	15.0	0	25 (1.13 ± 0.08)	5.4	0.0 ^{+3.8}	2.94 ± 1.94	0 ^{+1.5} ± 0.2
1.820–1.902	63.5	0	43 (1.01 ± 0.05)	4.9	1.9 ^{+4.6} _{-1.9}	0.92 ± 0.06	0.7 ^{+1.6} _{-0.7} ± 0.1
1.910–2.000	83.2	0	38 (0.97 ± 0.05)	4.6	6.7 ^{+6.3} _{-4.7}	0.94 ± 0.05	1.9 ^{+1.8} _{-1.3} ± 0.1

Вклады в систематическую ошибку:

- эффективность регистрации (3 %)
- конверсия фотона перед трековой системой (1.3 %)
- светимость (2.2 %)
- вычисление радиационной поправки (приведены в таблице)

Исследуемый процесс $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$

Канал распада: $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$, $\eta \rightarrow \gamma \gamma$, $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$

Фоновые процессы:

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

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

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

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

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

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

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0 \pi^0 \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

$$e^+e^- \rightarrow K_S K_L \eta \text{ с распадом } K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

Условия отбора

Предварительные:

- $N_{\text{ch}} = 0 ; N_{\gamma} = 7$
- Не сработала мюонная система
- $0.7 < E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} < 1.2 ; P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} < 0.3$
- $E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} - P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} > 0.7$

Кинематическая реконструкция:

- $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^0\pi^0\gamma$
- $e^+e^- \rightarrow 7\gamma$

Окончательные:

- $\chi^2(\eta\pi^0\pi^0\gamma) < 50$
- Для гипотезы $e^+e^- \rightarrow 7\gamma$ не нашлись комбинации трех пар фотонов для которых:
$$|M_{\gamma\gamma} - M_{\pi^0}| < 35 \text{ МэВ}$$
- Для гипотезы $e^+e^- \rightarrow 7\gamma$ не нашлись комбинации трех фотонов для которых:

$$|M_{3\gamma} - M_{\omega}| < 35 \text{ МэВ} \text{ и } |M_{\gamma\gamma} - M_{\pi^0}| < 35 \text{ МэВ}$$

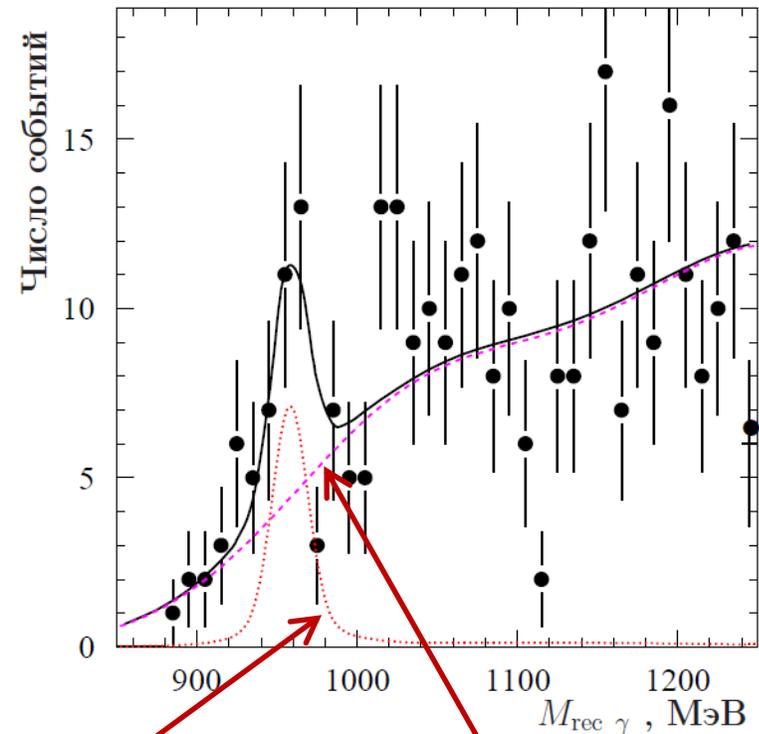
Число событий

Аппроксимация распределения $M_{\text{rec } \gamma}$:

- моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$ (без r.c.γ)
- ожидаемый вклад всех фоновых процессов, определенный по моделированию

свободные параметры: $N_{\eta' \gamma}$ и N_{bkg} .

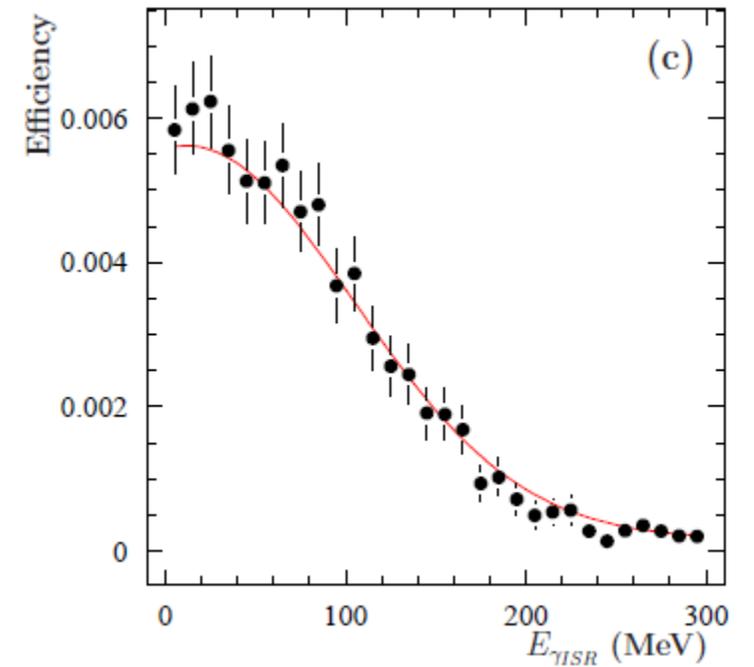
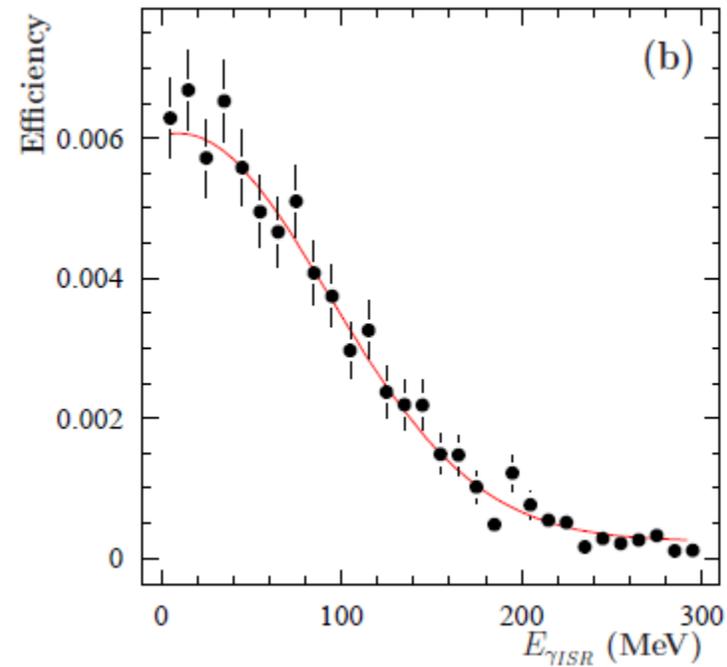
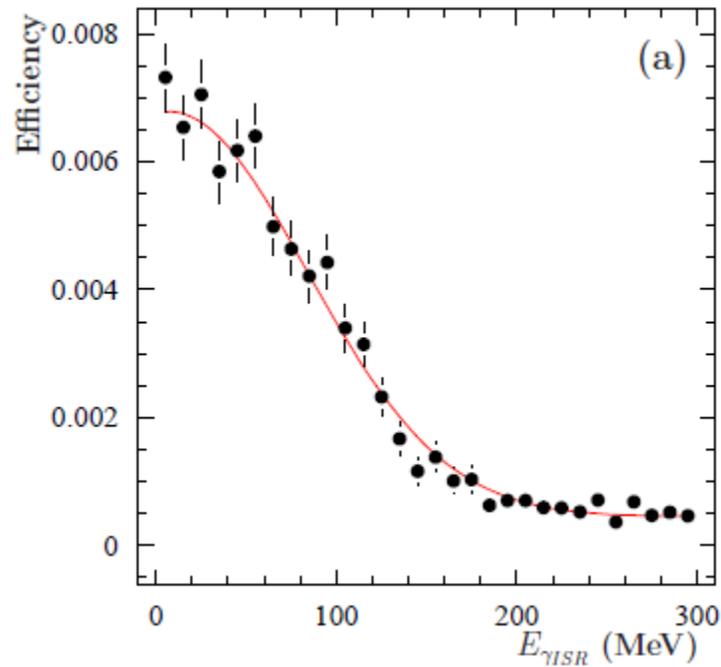
$$P(M_{\text{rec}}) = N_{\eta' \gamma} P_{\eta' \gamma}(M_{\text{rec}}) + N_{\text{bkg}} P_{\text{bkg}}(M_{\text{rec}})$$



Моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$ (без r.c.γ)

ожидаемый вклад всех фоновых процессов

Эффективность регистрации



$\sqrt{S} = 1.5$ ГэВ (a), 1.72 ГэВ (b) и 1.878 ГэВ (c)

Исследуемый процесс $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$

Канал распада: $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$, $\eta \rightarrow 3\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

$$\sqrt{s} > 1.4 \text{ ГэВ}$$

Условия отбора

Предварительные:

- $N_{\text{ch}} = 0$; $N_{\gamma} = 7$
- Не сработала мюонная система
- $0.7 < E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} < 1.2$; $P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} < 0.3$
- $E_{\text{tot}}/E_{\text{cm}} - P_{\text{cal}}/E_{\text{cm}} > 0.7$

Кинематический фит:

$$\text{➤ } e^+e^- \rightarrow 11\gamma$$

Окончательные:

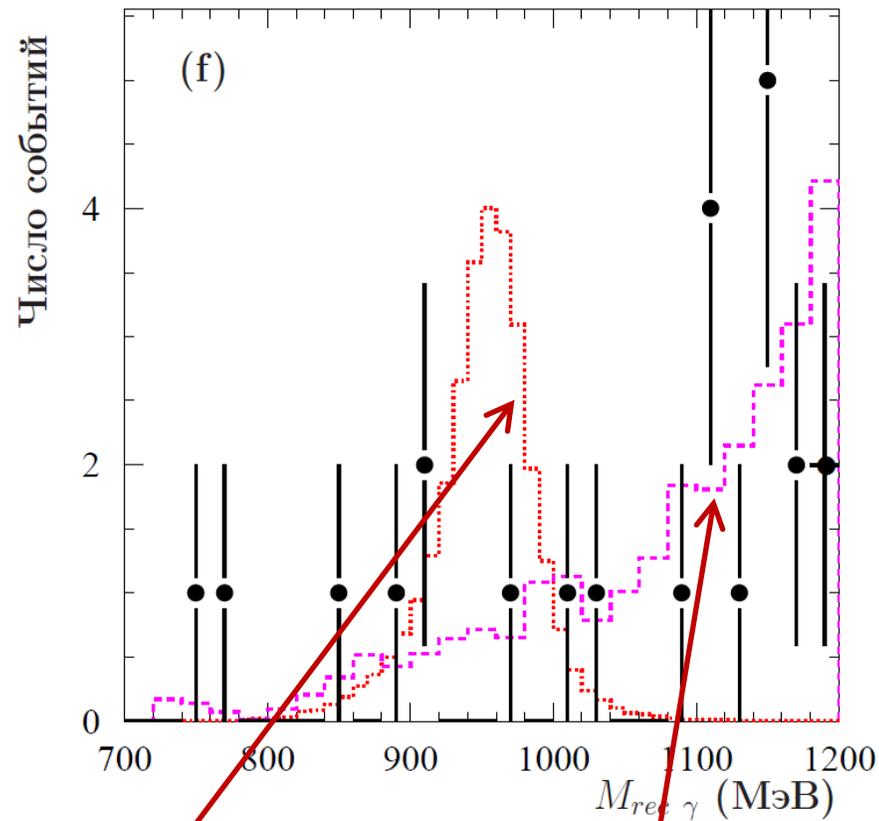
- $\chi^2(11\gamma) < 50$
- Для гипотезы $e^+e^- \rightarrow 11\gamma$ не нашлись комбинации трех фотонов для которых:

$$|M_{3\gamma} - M_{\omega}| < 35 \text{ МэВ} \text{ и } |M_{\gamma\gamma} - M_{\pi^0}| < 35 \text{ МэВ}$$

Число событий

Распределение $M_{rec \gamma}$:

- моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$ (без г.с.γ)
- ожидаемый вклад всех фоновых процессов, определенный по моделированию

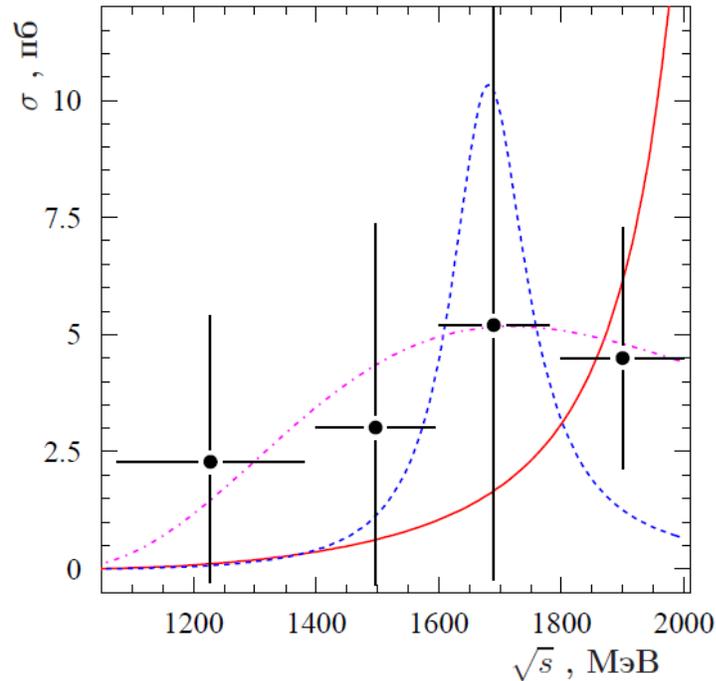


Моделирование $e^+e^- \rightarrow \eta' \gamma$ (без г.с.γ)

ожидаемый вклад всех фоновых процессов

Борновское сечение

- только канал распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$
- аппроксимация только вкладом одного ϕ (2170)



Предыдущий результат
(верхний предел):

- 28 пб при \sqrt{s} меньше 1.39 ГэВ
- 12 пб при \sqrt{s} больше 1.39 ГэВ

\sqrt{s} , ГэВ	L , пб ⁻¹	$N_{\eta'\gamma}$	N_{bkg}	ϵ_0 , %	$1 + \delta$	$\sigma_{\eta'\gamma}$, пб
1.075 – 1.38	201.4	$3.8^{+5.2}_{-4.3}$	$69.2^{+9.3}_{-9.0}$	0.89	0.86 ± 0.01	$2.3^{+3.1}_{-2.6} \pm 0.1$
1.4 – 1.594	119.5	$2.5^{+3.6}_{-2.8}$	$44.5^{+7.2}_{-6.9}$	0.74	0.86 ± 0.06	$3.0^{+4.3}_{-3.4} \pm 0.2$
1.6 – 1.78	98.7	$2.4^{+3.3}_{-2.5}$	$38.6^{+6.7}_{-6.3}$	0.60	0.88 ± 0.01	$5.2^{+7.2}_{-5.4} \pm 0.2$
1.8 – 2.0	326.3	$8.2^{+5.1}_{-4.3}$	$138.9^{+12.4}_{-12.0}$	0.54	1.02 ± 0.16	$4.5^{+2.8}_{-2.4} \pm 1.0$

Заключение

- Для семифотонного конечного состояния были измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$.
- Новые результаты лежат значительно ниже предыдущих при $\sqrt{s} > 1.25$ ГэВ. Отличие объясняется существенной недооценкой фона в предыдущей работе. Новое измерение замещает сечение, приведенное в статье 2014 года.
- В результате аппроксимации сечения в модели векторной доминантности получены значения сечений в максимумах резонансов:

$$\sigma_{\rho' \rightarrow \eta\gamma} = 16_{-10}^{+15} \pm 2 \text{ пб},$$

$$\sigma_{\phi' \rightarrow \eta\gamma} = 14_{-10}^{+14} \pm 2 \text{ пб},$$

которые согласуются с оценками $\sigma_{\rho' \rightarrow \eta\gamma} \approx 15$ пб, $\sigma_{\phi' \rightarrow \eta\gamma} \approx 10$ пб,

сделанными на основе предсказаний кварковой модели $\Gamma_{\rho' \rightarrow \eta\gamma} \approx \Gamma_{\phi' \rightarrow \eta\gamma} \approx 100$ кэВ

Заключение

- В одиннадцатифотонном конечном состоянии событий процесса $e^+e^- \rightarrow \eta'\gamma$ не обнаружено.
- Для семифотонного конечного состояния есть порядка 17 кандидатов в события процесса $e^+e^- \rightarrow \eta'\gamma$ из которых 8 наблюдаются в диапазоне энергий в системе центра масс выше 1.8 ГэВ.