

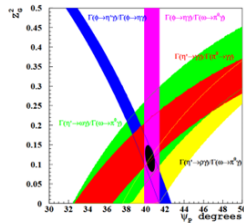
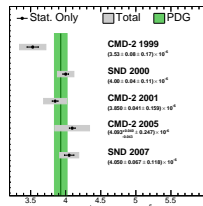
Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ вблизи $\phi(1020)$ резонанса на детекторе SND

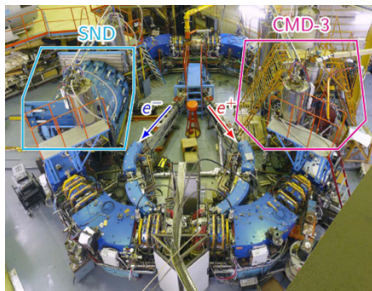
Сунгуров К. Д.

ИЯФ СО РАН

10 Марта, 2026

- Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \eta \rightarrow \gamma\gamma$ в области энергии $E = 0.98 - 1.06$ ГэВ
- Основной вклад в сечение $\phi(1020) \rightarrow \eta\gamma$
- Интерференция с $\rho(770)$ и вышележащими резонансами является основным источником модельной ошибки
- Измерение ширин магнитодипольных радиационных переходов между скалярными и векторными мезонами используются для изучения смешивания $\eta - \eta'$
- Изучение нарушения SU(3) симметрии
- Проверка феноменологических моделей

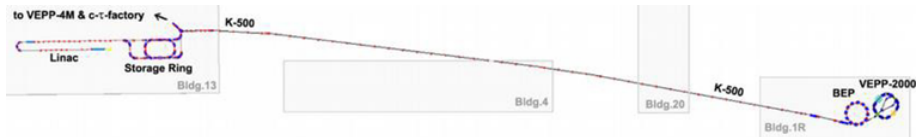




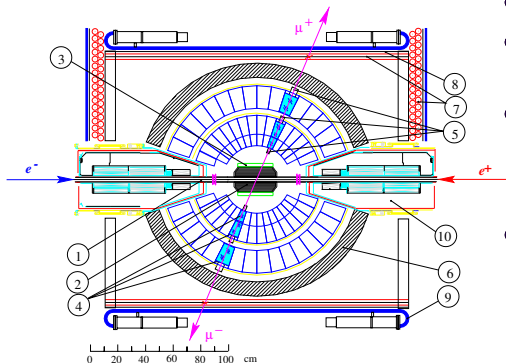
Основные параметры ВЭПП-2000:

- Диапазон энергии 0.3 – 2.0 ГэВ
- Периметр - 24.4 м
- Светимость на 1.8 ГэВ $0.9 \cdot 10^{32}$
 $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$

Набрано больше 1 фб⁻¹ с 2010



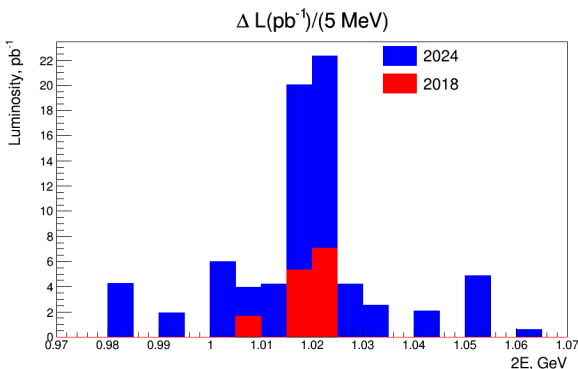
Детектор Снд



- Нет магнитного поля
- 9 слойная дрейфовая камера
- Аэрогелевый счетчик для K/π разделения ($p > 300 \text{ MeV}$)
- Электромагнитный калориметр
 - 1640 кристаллов NaI(Tl)
 - $18^\circ < \theta < 162^\circ$ (95% телесного угла)
- Мюонная система

Интегральная светимость

- Измерение проводилось в диапазоне энергии от 980 МэВ до 1060 МэВ
- Суммарная интегральная светимость составила 73 пб^{-1}
- В 7 раз больше в пике по сравнению с предыдущим измерением

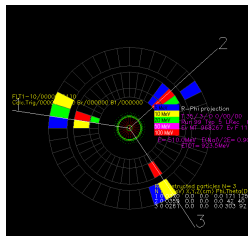
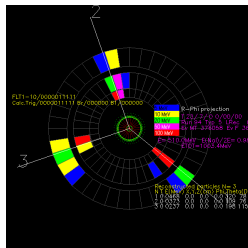


Отбор событий $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$

- Три и более фотона в детекторе
- Отсутствие треков
- Хороший χ^2 кинематической реконструкции

Основные фоновые процессы:

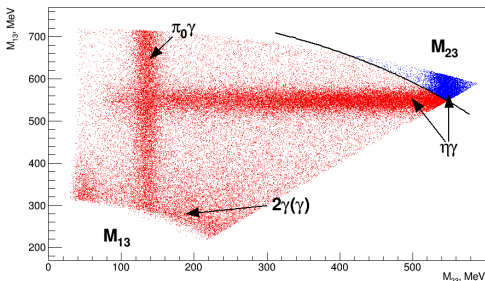
- $e^+e^- \rightarrow 2\gamma(\gamma)$
- $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$



Выбор пары фотонов от распада η

- Равномерно распределённые точки: $e^+e^- \rightarrow 2\gamma(\gamma)$
- Инвариантная масса пары фотонов от $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \pi_0\gamma$ группируются вблизи масс η и π_0 соответственно

Распределение Далитца в пике резонанса

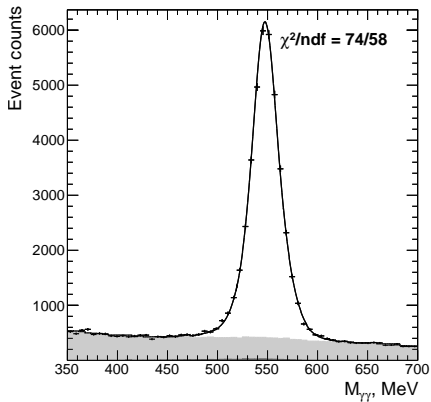


Подгонка распределения по $M_{\gamma\gamma}$

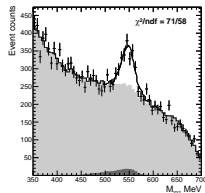
- Для подгонки использовалась функция, составленная из распределения сигнала и фона

$$N_{sig} F_{sig} + F_{bkg}$$

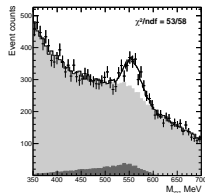
E = 1020 MeV



E = 1000 MeV



E = 1050 MeV



Аппроксимация сечения

- Добавлено измеренное сечение в области $E=1.07-2.0$ ГэВ
SND Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 6, 1157
- Подгонка сечения проводилась в модели векторной доминантности
- Вклад $\rho(770), \omega(782), \phi(1020), \rho(1450), \phi(1680)$ учитывался в подгонке
- $\varphi_\omega = 0^\circ, \varphi_{\phi(1680)} = \varphi_{\rho(1450)} + 180^\circ$

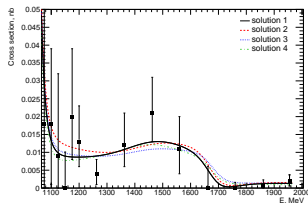
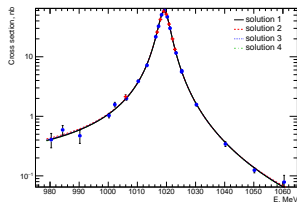
$$\sigma_{\eta\gamma}(E) = \frac{q(E)^3}{E^3} \left| \sum_{V=\rho,\omega,\phi,\rho',\phi'} A_V(E) \right|$$

$$A_V(E) = \frac{m_V \Gamma_V e^{i\phi_V}}{D_V(E)} \sqrt{\frac{m_V^3}{q(m_V)^3}} \sigma_{V\eta\gamma}$$

$$D_V(E) = m_V^2 - E^2 - iE\Gamma_V(E),$$

$$q(E) = \frac{E}{2} \left(1 - \frac{m_\eta^2}{E^2} \right),$$

Аппроксимация сечения



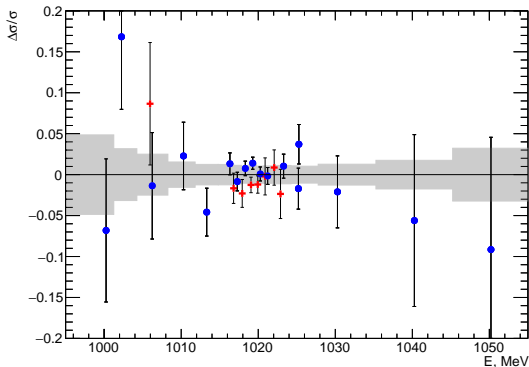
- Получено четыре различных решения
- Хорошее качество подгонки
- Неоднозначность в выборе решения

Parameter	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
σ_ϕ, nb	$60.69^{+0.36}_{-0.39}$	$56.39^{+0.35}_{-0.31}$	$57.24^{+0.42}_{-0.50}$	$61.19^{+0.34}_{-0.38}$
$\phi_\phi, deg.$	192 ± 6	124 ± 5	150 ± 8	215 ± 5
$\sigma_{\rho'}, pb$	$3.6^{+3.0}_{-2.2}$	$1.5^{+2.2}_{-1.5}$	$28.5^{+6.6}_{-6.8}$	$32.7^{+8.0}_{-8.2}$
$\sigma_{\phi'}, pb$	$5.4^{+8.7}_{-3.5}$	$4.6^{+6.2}_{-3.0}$	$3.5^{+2.7}_{-3.5}$	$3.0^{+4.5}_{-3.0}$
$\phi_{\rho'}, deg.$	28 ± 31	39 ± 28	-103 ± 9	-147 ± 8
$\Delta E_{18}, keV$	40 ± 10	41 ± 10	40 ± 10	40 ± 10
$\Delta E_{24}, keV$	-213 ± 15	-208 ± 15	-211 ± 14	-214 ± 15
χ^2/ndf	$35.2/37$	$37.4/37$	$37.6/37$	$36.5/37$

Точность измеренного сечения

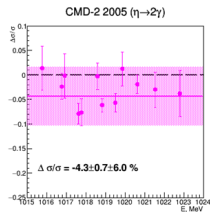
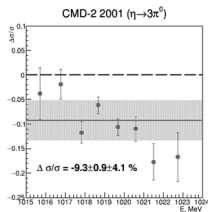
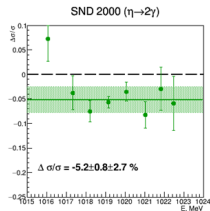
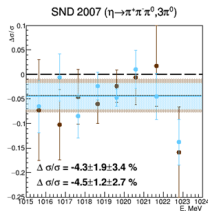
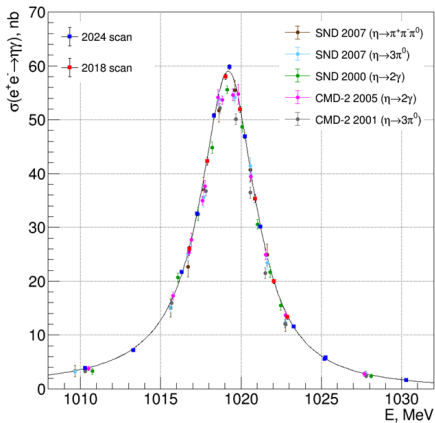
- В пике резонанса стат. ошибка составляет 0.7%
- На границе стат. ошибка составляет 33%
- Два сканирования согласуются между собой

Источник сист. неоп.	$\Delta\sigma/\sigma, \%$
Светимость	0.6
Угол θ	0.6
χ^2 кин. фита	0.3 - 0.6
$B(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
Разброс энергии σ_E	0 - 0.7
N сиг. событий	0.1 - 15
Итого	1.0 - 15



Сравнение с предыдущими результатами

Полученное сечение $\sim 5\%$ выше по сравнению с предыдущими измерениями



$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma)$

- $\sigma_\phi = 12\pi B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma)/m_\phi^2$

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma) = (4.297_{-0.025}^{+0.022} \pm 0.050) \cdot 10^{-6}$$

(Решение 1)

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma) = (3.993_{-0.021}^{+0.024} \pm 0.047) \cdot 10^{-6}$$

(Решение 2)

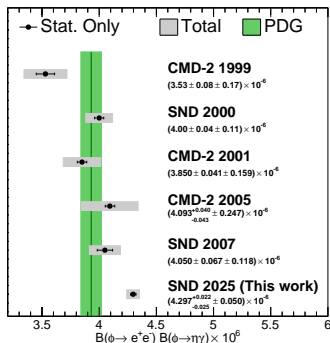
$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma) = (4.053_{-0.028}^{+0.034} \pm 0.052) \cdot 10^{-6}$$

(Решение 3)

$$B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma) = (4.332_{-0.027}^{+0.024} \pm 0.050) \cdot 10^{-6}$$

(Решение 4)

Вклад	$\Delta B/B, \%$
Сечение	1.1 - 1.2
σ_ρ	0.4 - 0.6
Γ_ϕ	0.2
$\Delta E_{18}, \sigma_\rho, \sigma_{\phi'}, \phi_{\rho'}$	0.4
Всего	1.2 - 1.4



- Было измерено сечение $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ в области энергии 980-1060 МэВ
- Суммарная ошибка измеренного сечения в максимуме $\phi(1020)$ резонанса составила 1.5%
- Измеренное сечение имеет наилучшую точность на данный момент и лежит выше по сравнению с предыдущими измерениями
- Из подгонки сечения в модели векторной доминантности было получено произведение $B(\phi \rightarrow e^+e^-)B(\phi \rightarrow \eta\gamma)$
- Опубликована статья в Phys.Rev.D 113 (2026) 052003

- Для измерения светимости использовался процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
- Процедура измерения светимости взята из работы СНД PRD 110 (2024)7, 072001 ($e^+e^- \rightarrow K_S K_L$)

Selection criteria:

- Нет заряженных треков;
- Не менее 2 фотона;
- $E_2 > 0.3\sqrt{s}$;
- $|\Delta\phi| = ||\phi_1 - \phi_2| - 180^\circ| < 15^\circ$;
- $|\Delta\theta| = |\theta_1 + \theta_2 - 180^\circ| < 25^\circ$;
- $\theta^* = (180^\circ - |\theta_1 - \theta_2|)/2 > 45^\circ$;

Вклад	$\Delta IL, \%$
Условие $\theta^* > 45^\circ$	0.5
Условие $ \Delta\theta < 25^\circ$	0.04
Условие $E_1, E_2 > 0.3E$	0.04
Фон от распада ϕ	0.2
Теоритическая	0.1
Космический фон	< 0.1
Всего	0.6

Приложение

Выбор пары фотонов от распада η

Процедура выбора пары фотонов ($E_1 > E_2 > E_3$):

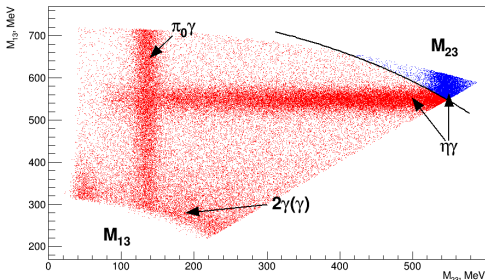
CMD-2 Phys.Lett.B605 (2005) 26-36

- $E_3 < \frac{m_\eta^2}{\sqrt{s}} \rightarrow M_{\gamma\gamma} = M_{13} = \sqrt{4E_b(E_b - E_2)}$
- $E_3 > \frac{m_\eta^2}{\sqrt{s}} \rightarrow M_{\gamma\gamma} = M_{23} = \sqrt{4E_b(E_b - E_1)}$

Дополнительное условие отбора
 $350 \text{ МэВ} < M_{\gamma\gamma} < 750 \text{ МэВ}$

Граница областей

$$M_{13}^2 + M_{23}^2 = 4E^2 - M_{12}^2 = 2M_\eta^2$$

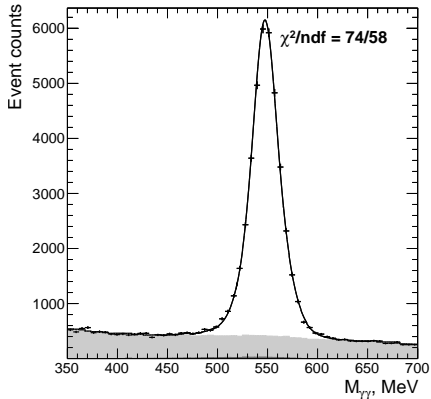


Приложение

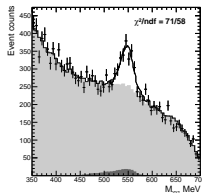
Подгонка распределения по M_η

$$F_{bkg} = \alpha \left[\beta \cdot F_{bkg}^I + ((1 - \beta) \cdot D + 1) \cdot F_{bkg}^{II} \right]$$

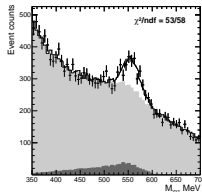
$E = 1020$ MeV



$E = 1000$ MeV



$E = 1050$ MeV



Приложение

Аппроксимация сечения

$$\mathcal{J}^{el} = \frac{2}{3}\mathcal{J}^u - \frac{1}{3}\mathcal{J}^d - \frac{1}{3}\mathcal{J}^s$$
$$\mathcal{J}^{el} = \frac{1}{\sqrt{2}}\mathcal{J}^\rho + \frac{1}{3\sqrt{2}}\mathcal{J}^\omega - \frac{1}{3}\mathcal{J}^\phi$$