



Измерение вероятностей переходов между состояниями системы боттомония с излучением псевдоскалярных мезонов в эксперименте Belle

Евгений Коваленко, ИЯФ СО РАН

семинар ОФВЭ, ИЯИ РАН

Научный руководитель: д. ф.-м. н. Гармаш А.Ю.

План выступления

1. Введение
2. Эксперимент Belle
3. Изучение $Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$
4. Изучение $h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\eta(\pi^0)$
5. Эксперимент Belle II
6. Измерение светимости
7. Заключение

Положения выносимые на защиту

1. Относительная вероятность $Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta$ значительно больше ожидаемой в приближении симметрии тяжелых кварков.
2. Относительная вероятность $h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta$ значительно меньше ожидаемого значения, основанного на сравнении с вероятностью перехода $Y(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0$.
3. Отношение вероятности перехода $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$ к $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta$ значительно меньше ожидаемого в предположении о чисто кварк-антикварковой структуре $Y(5S)$.
4. Вероятность переходов $h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\pi^0$ с нарушением изоспина подавлена относительно $h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta$, в согласии с ожидаемым.
5. Точность измерений Монитора светимости детектора Belle II лучше 1%, а влияние фона пренебрежимо мало.

Список публикаций по теме работы

в рецензируемых научных изданиях:

1. Study of $e^+e^- \rightarrow Y(1S, 2S)\eta$ and $e^+e^- \rightarrow Y(1S)\eta'$ at $\sqrt{s} = 10.866$ GeV with the Belle detector / E. Kovalenko, A. Garmash, P. Krokovny, [et al.] – Текст : электронный // Physical Review D. — 2021. — Vol. 104, issue 11. — P. 112006. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.112006>. – Дата публикации: 15.12.2021.
2. Evidence of $h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta$ decay and search for $h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\pi^0$ with the Belle Detector / E. Kovalenko [et al.] – Текст : электронный // Physical Review Letters. — 2024. — Vol. 133, no. 26. — P. 261901. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.261901>. – Дата публикации: 24.12.2024.
3. Luminosity online monitor for the Belle II detector / E. Kovalenko [et al.] – Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2025. — Vol. 1079C. — P. 170614. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170614>. – Дата публикации: 20.05.2025.

в сборниках трудов научных конференций:

1. Kovalenko, E. On-line luminosity measurements at Belle II / E. Kovalenko – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. — 2020. — June. — Vol. 15, no. 06. — P. C06067—C06067. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/c06067>. – Дата публикации: 30.06.2020
2. Kovalenko, E. Study on $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ and $Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$ / E. Kovalenko – Текст : электронный // Proceedings of Science. — 2022. — Vol. EPS—HEP2021. — P. 348. – URL: <https://doi.org/10.22323/1.398.0348>. – Дата публикации: 12.05.2022.
3. Kovalenko, E. Online Luminosity Monitor at Belle II / E. Kovalenko – Текст : электронный // Proceedings of Science. — 2025. — Vol. TIPP2023. — P. 018— URL: <https://doi.org/10.22323/1.468.0018>. – Дата публикации: 29.07.2025

Апробация и личный вклад

Основные результаты работы докладывались на конференциях:

- Instrumentation for Colliding Beam Physics Conference (INSTR20, г. Новосибирск, Россия, 2020)
- The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS HEP 2021, онлайн, 2021)
- Technology & Instrumentation in Particle Physics (TIPP2023, г. Кейптаун, ЮАР, 2023)
- The 7th international conference on particle physics and astrophysics (ICPPA-2024, г. Москва, Россия, 2024)

Авторский вклад:

Все основные результаты по теме исследования получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных с использованием собственных программ на языках C++, Python и библиотеке ROOT CERN, проведении расчетов и моделирования, в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, представлении их на научных конференциях, а также в подготовке научных публикаций.

в статьях 1 и 2 - в проведении всех этапов изучения процессов, включая анализ фоновых процессов, выделение сигнальных событий, определение эффективности регистрации событий на основе Монте-Карло моделирования, изучение систематических погрешностей, аппроксимацию экспериментальных сигнальных распределений, вычисление сечений и относительных вероятностей распадов, подготовке графиков и написании текста публикаций

в статье 3 - в реализации Монте-Карло моделирования Монитора светимости, оптимизации его рабочих параметров, реализации процедуры энергетической калибровки и временной синхронизации, определении видимого сечения регистрации сигнальных процессов, изучении систематических погрешностей, анализе экспериментальных данных, изучении влияния фоновых процессов и написании текста публикаций.

Введение / Переходы с η

■ $Y(4S)$:

$$B[Y(4S) \rightarrow Y(1S)\eta] = (1.70 \pm 0.23 \pm 0.08) \times 10^{-4}$$

$$B[Y(4S) \rightarrow Y(1S)\eta'] = (3.43 \pm 0.88 \pm 0.21) \times 10^{-5}$$

$$R_{\eta/\pi\pi} = 2.07 \pm 0.24 \quad (1/m_b^2 \text{ подавление для } b\bar{b})$$

$$R_{\eta'/\eta} = 0.20 \pm 0.06 \quad (\sim 5 \text{ для чистого } b\bar{b})$$

$$B[Y(4S) \rightarrow h_b(1P)\eta] = (2.18 \pm 0.21) \times 10^{-3}$$

■ $Y(5S)$, инклюзивный анализ:

$$B[Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta] < 10^{-3}$$

$$B[Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta] = (2.0 \pm 0.7) \times 10^{-3}$$

$$R_{\eta/\pi\pi}(2S) \sim 0.25 \quad (1/m_b^2 \text{ подавление для } b\bar{b})$$

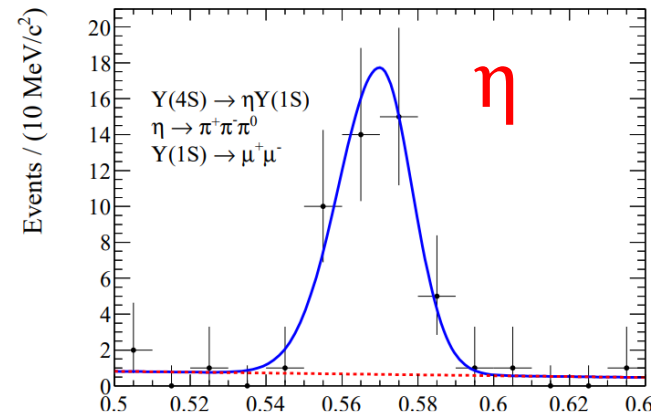
$$B[Y(5S) \rightarrow h_b(1P)\eta] < 1.5 \times 10^{-3}$$

$$B[Y(5S) \rightarrow h_b(2P)\eta] < 1.3 \times 10^{-3}$$

Задача исследования — эксклюзивный анализ:

1. $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta$
2. $Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta$
3. $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$

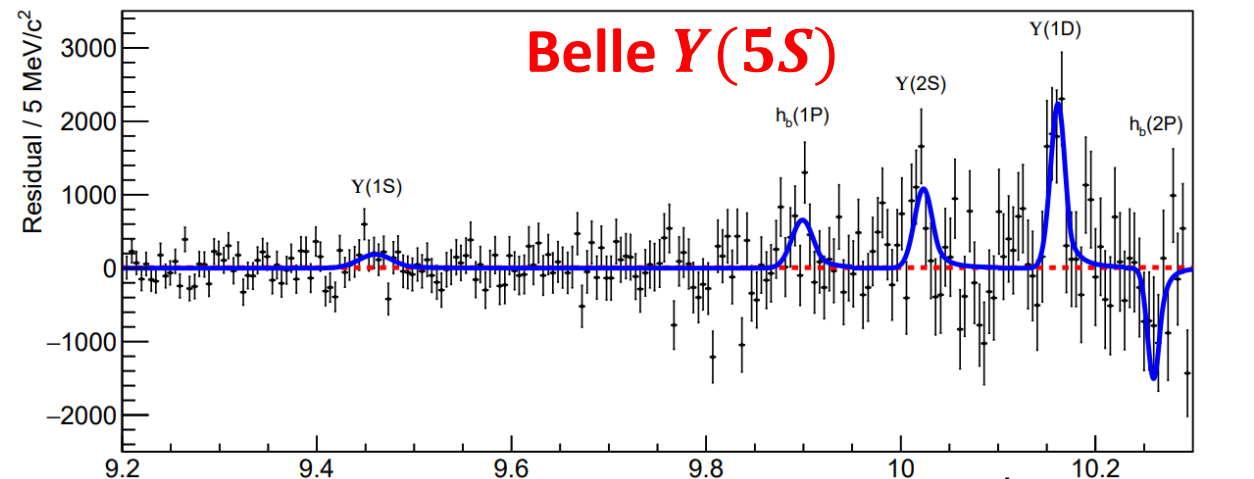
Belle $Y(4S)$



$$\Delta M_{\eta^{(\prime)}} = M(Y(4S)) - M(Y(1S)) - M(\eta^{(\prime)}), \text{ GeV}/c^2$$

PRD 96 (2017) 5, 052005

PRL 121 (2018) 6, 062001



Eur.Phys.J.C 78 (2018) 8, 633 $M_{YY}^{miss}, \text{ GeV}/c^2$

Эксперимент Belle

Проводился на ускорителе КЕКВ, Япония, с 1999 по 2010 год.

- Асимметричный e^+e^- коллайдер с e^+ (3.5 GeV) и e^- (8 GeV)
- Энергия в системе центра масс преимущественно на 10.58 ГэВ ($Y(4S)$)

- $L_{peak} = 2.1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

- $\int L dt = \begin{cases} 711 \text{ фб}^{-1} @ Y(4S) \\ 21 \text{ фб}^{-1} \text{ скан.} \\ 121 \text{ фб}^{-1} @ Y(5S) \end{cases}$

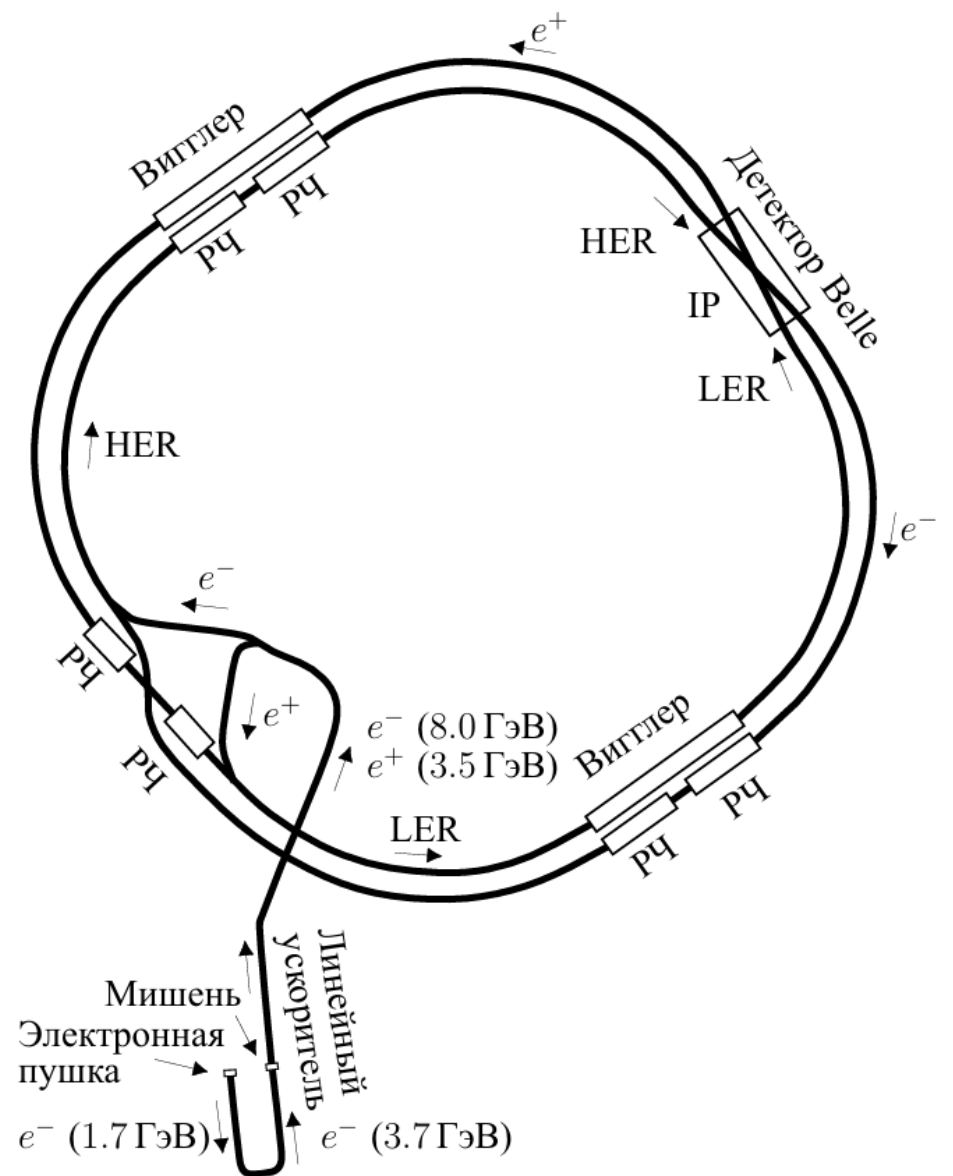
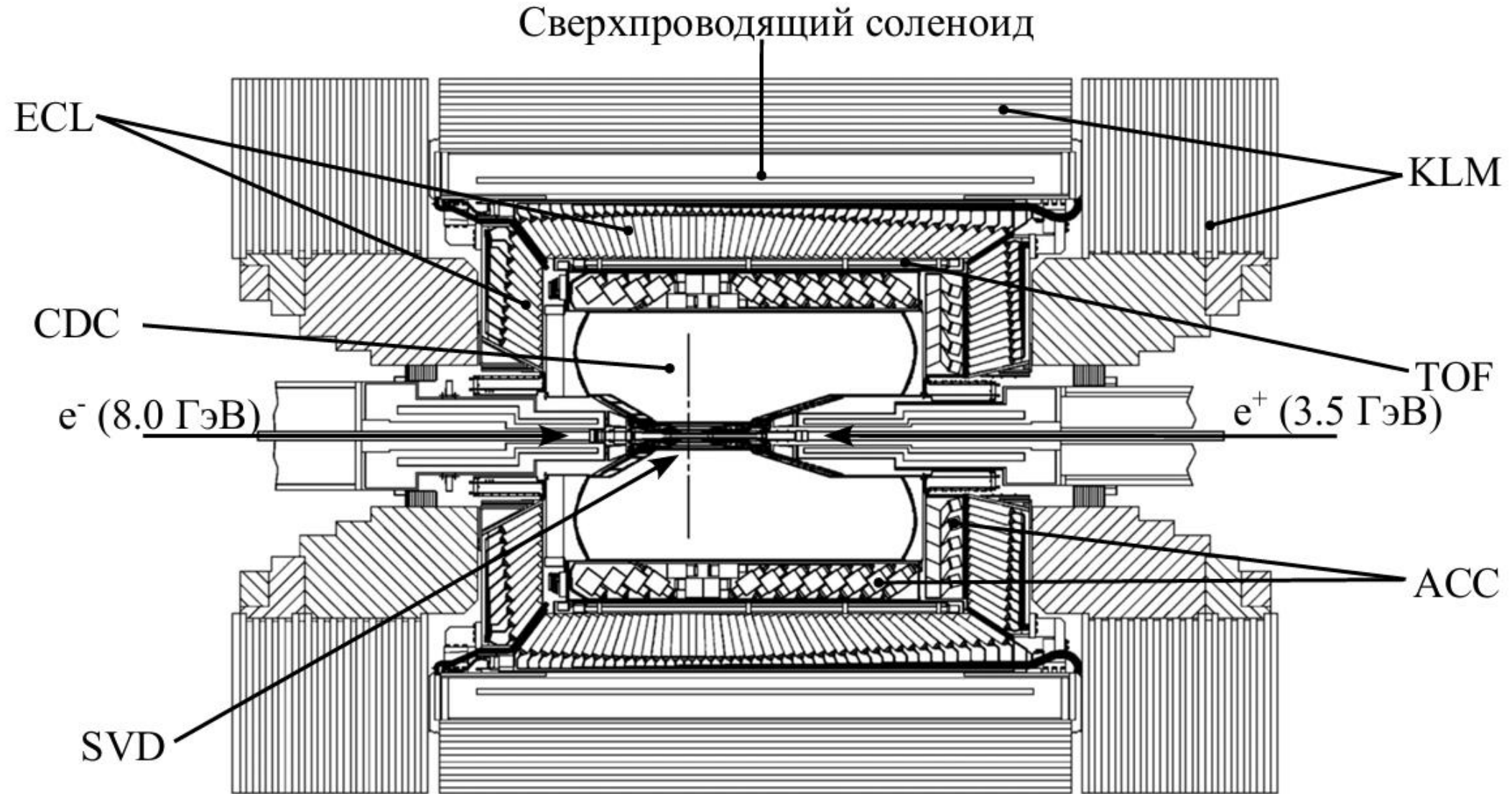


Схема ускорительного комплекса КЕКВ

Детектор Belle



$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(')}$$

Все процессы изучаются в конечном состоянии $\mu^+\mu^-\pi^+\pi^-\gamma(\gamma)$:

- $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta$:

1. $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0[\gamma\gamma]$ и $Y(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

- $Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta$:

1. $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0[\gamma\gamma]$ и $Y(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

2. $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ и $Y(2S) \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-$, $Y(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

- $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$:

1. $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta[\gamma\gamma]$ и $Y(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

2. $\eta' \rightarrow \rho[\pi^+\pi^-]\gamma$ и $Y(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

Сигнальное распределение: $M_{\eta^{(')}}$ ($M_{\gamma\gamma}$, $M_{\pi^+\pi^-\gamma\gamma}$ или $M_{\pi^+\pi^-\gamma}$)

Критерии отбора

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta$$

Критерий	$\Upsilon(2S)\eta[3\pi]$	$\Upsilon(2S)\eta[\gamma\gamma]$	$\Upsilon(1S)\eta[3\pi]$
$M_{\mu\mu}$ (ГэВ/ c^2)	(9.76; 10.28)	(9.235; 9.685)	(9.235; 9.685)
Ψ (рад)	≥ 2	≥ 2.8	≥ 2.7
E_{tot} (ГэВ)	(10.775; 10.92)	(10.80; 10.955)	(10.75; 10.94)
$M_{\gamma\gamma}$ (МэВ/ c^2)	(110; 155)	—	(110; 155)
δM (МэВ/ c^2)	—	$ \delta M - \Delta M_2 < 18$	$ \delta M - \Delta M_2 > 10$
$\theta_{\pi\pi}$ (рад)	≥ 0.3	—	≥ 0.18
E_γ^* (МэВ)	—	> 100	—
ε (%)	10.25 ± 0.03	20.73 ± 0.04	17.02 ± 0.03

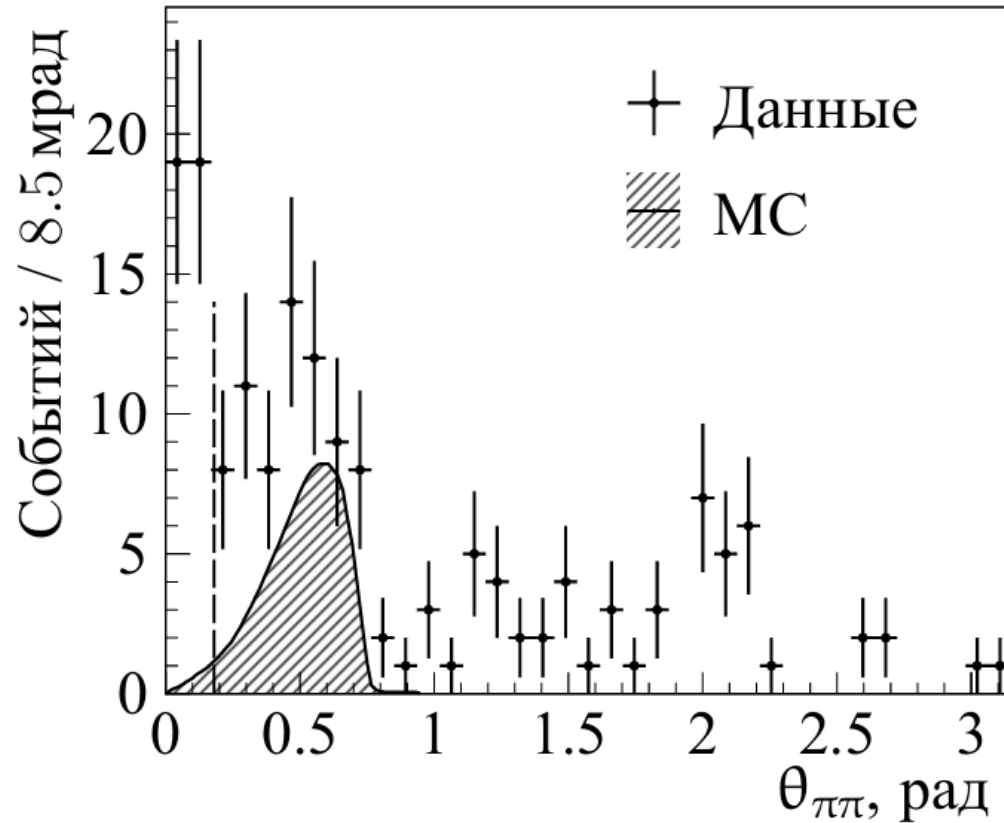
$$Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$$

Критерий	$\Upsilon(1S)\eta'[\pi\pi\eta]$	$\Upsilon(1S)\eta'[\rho\gamma]$
$M_{\mu\mu}$ (ГэВ/ c^2)	(9.235; 9.685)	(9.235; 9.685)
Ψ (рад)	≥ 2.8	≥ 2.5
E_{tot} (ГэВ)	(10.75; 10.94)	(10.75; 10.94)
$M_{\gamma\gamma}$ (МэВ/ c^2)	(450; 625)	—
δM (МэВ/ c^2)	$ \delta M - \Delta M_2 > 10$	$ \delta M - \Delta M_{2,3} > 10$
E_γ^* (МэВ)	—	> 80
$M_{\pi\pi}$ (МэВ/ c^2)	—	(450; 950)
$M_{\pi\pi}^{rec}$ (МэВ/ c^2)	—	$ M_{\pi\pi}^{rec} - M_{\Upsilon(2S)} > 20$
ε (%)	13.35 ± 0.03	29.25 ± 0.05

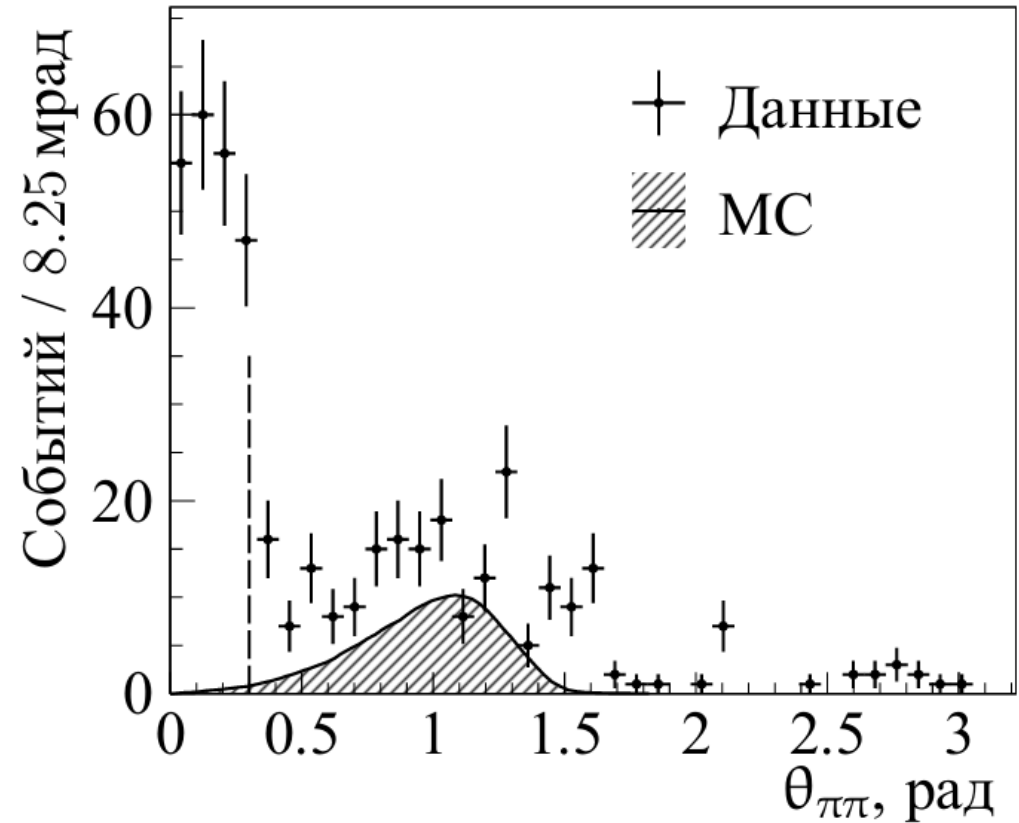
- $M_{\mu\mu}: Y(1S/2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- $\Psi = \angle(\vec{P}_{Y(\gamma)}, \vec{P}_{\pi\pi\mu\mu}) \rightarrow \pi$
- $E_{tot} = E_{\pi\pi\gamma\gamma} + \sqrt{M_{Y(1S,2S)}^2 + \vec{P}_{\mu\mu}^2}$
- $\delta M = M_{\pi\pi\mu\mu} - M_{\mu\mu}: Y(nS) \rightarrow Y(mS)\pi^+\pi^-$
- $M_{\gamma\gamma}: \eta/\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Конверсия фотона

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta[\pi^+\pi^-\pi^0]$$



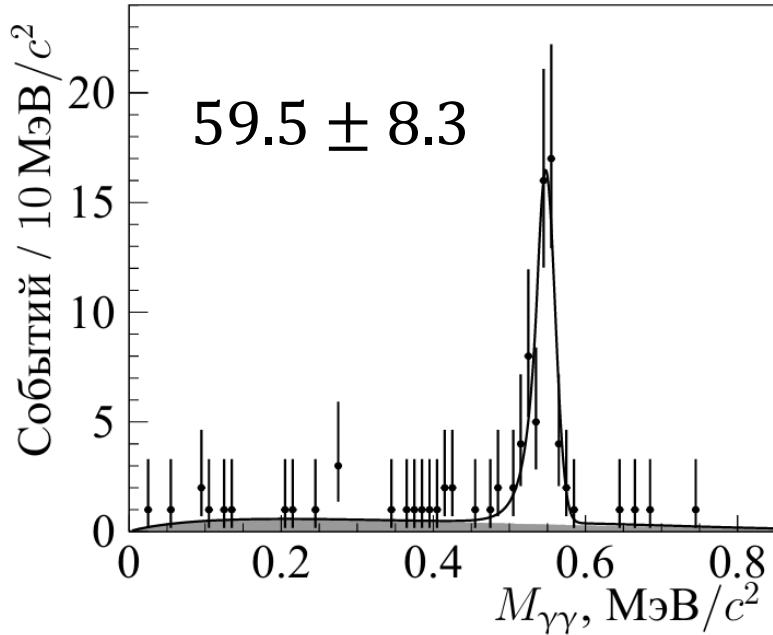
$$Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta[\pi^+\pi^-\pi^0]$$



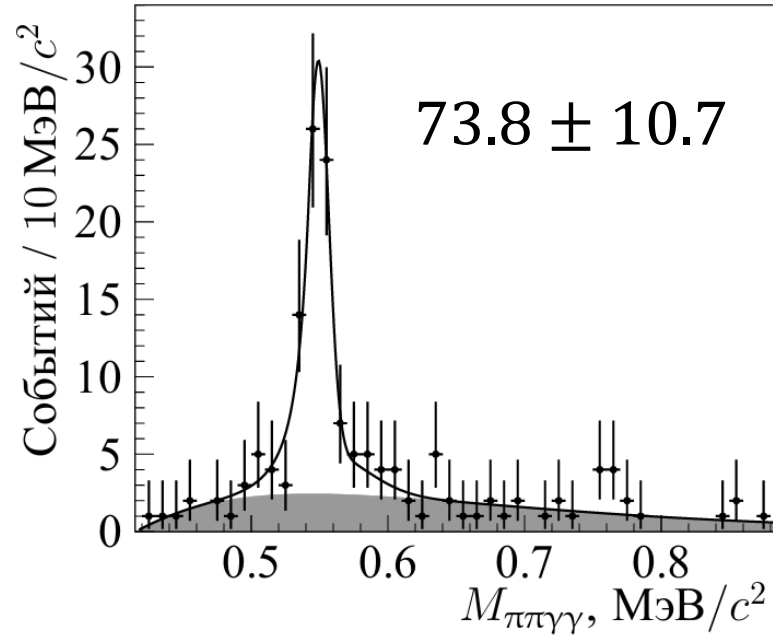
Фотон на веществе SVD конвертируется в почти коллинеарную e^+e^- пару, которая идентифицируется как пара $\pi^+\pi^-$

Сигнальные распределения $Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta$

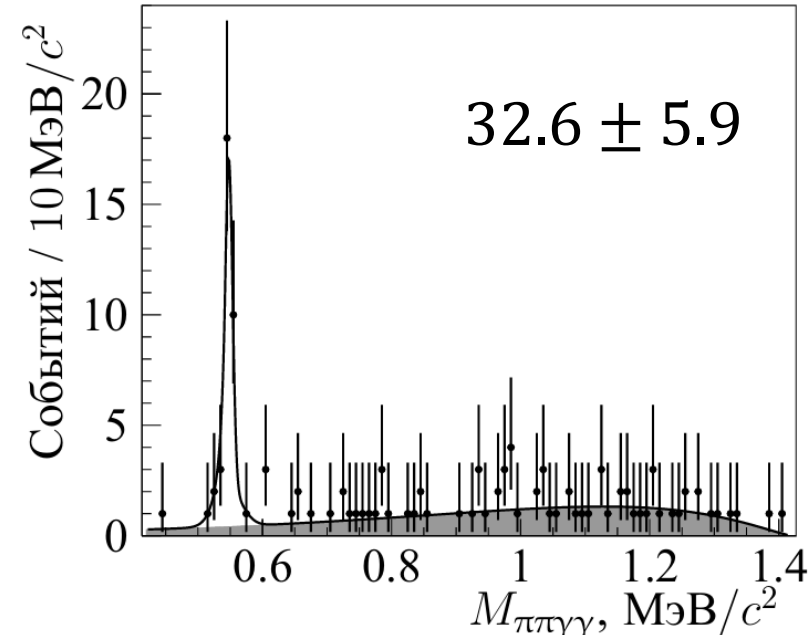
$Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta[\gamma\gamma]$



$Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta[\pi^+\pi^-\pi^0]$



$Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta[\pi^+\pi^-\pi^0]$



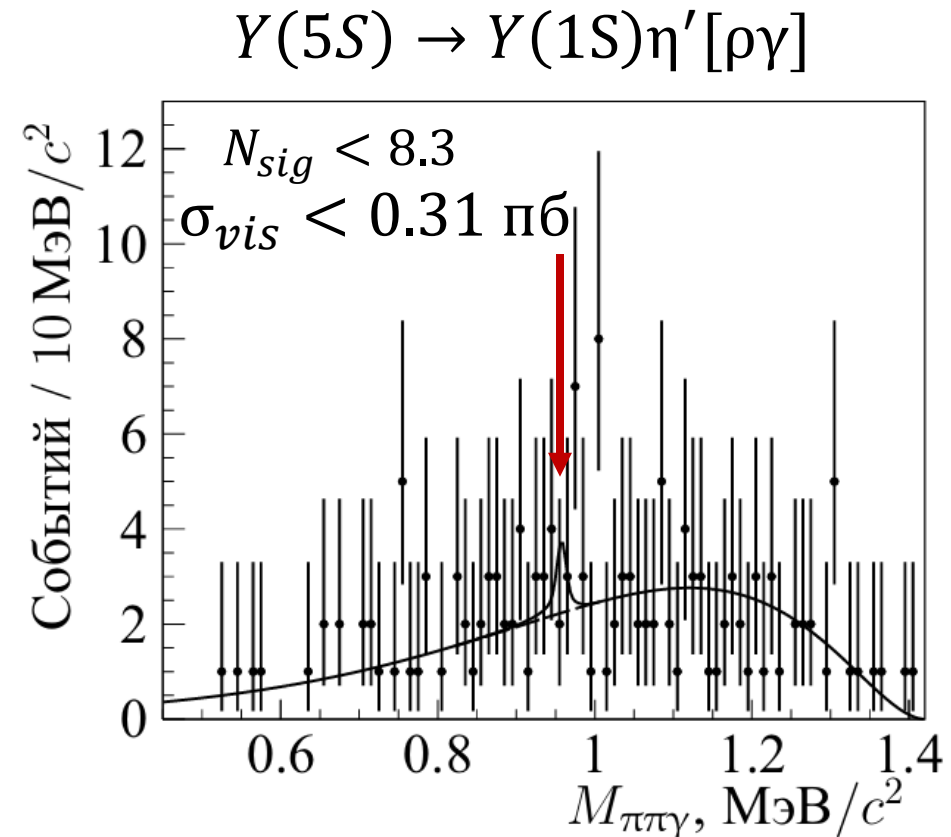
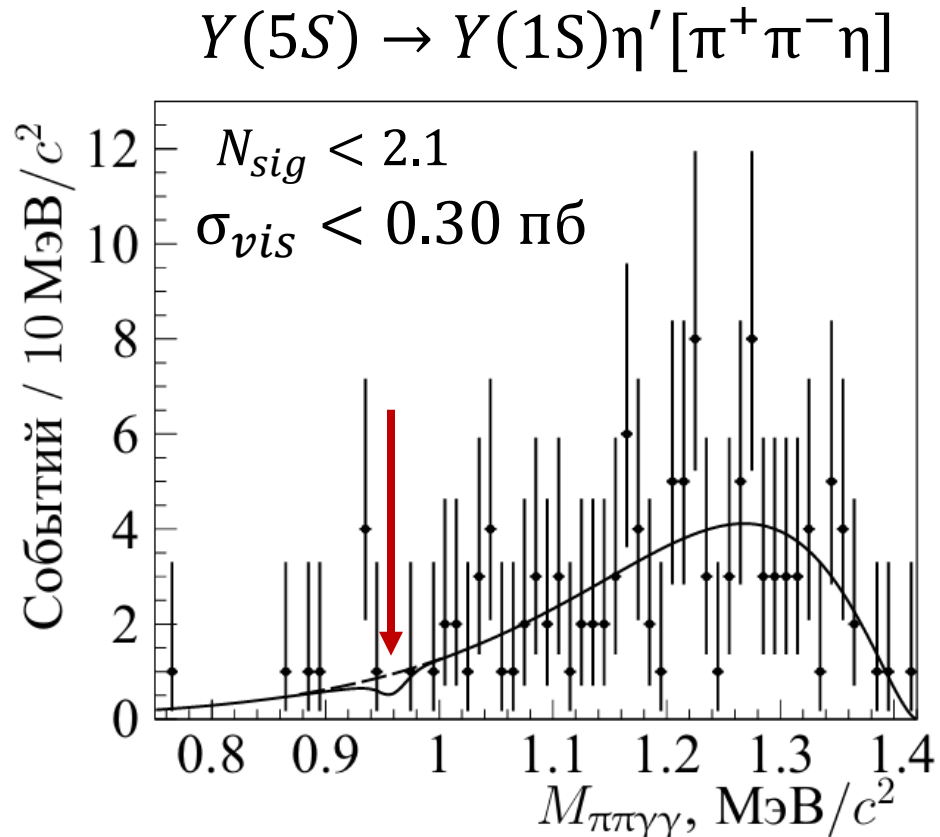
Видимое сечение $\sigma_{vis} = \frac{N_{sig}}{LB\epsilon}$

$\sigma_{vis} = 1.39 \pm 0.19 \text{ пб}$

$\sigma_{vis} = 1.39 \pm 0.20 \text{ пб}$

$\sigma_{vis} = 0.29 \pm 0.05 \text{ пб}$

Сигнальные распределения $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$



Верхние пределы определены методом псевдо-экспериментов

Проверка наличия $Y(5S)$ резонанса

Используя данные сканирования:

- 3.8 фб^{-1} в диапазоне $10.63 - 10.77 \text{ ГэВ}$
- 7.1 фб^{-1} в диапазоне $10.93 - 11.02 \text{ ГэВ}$

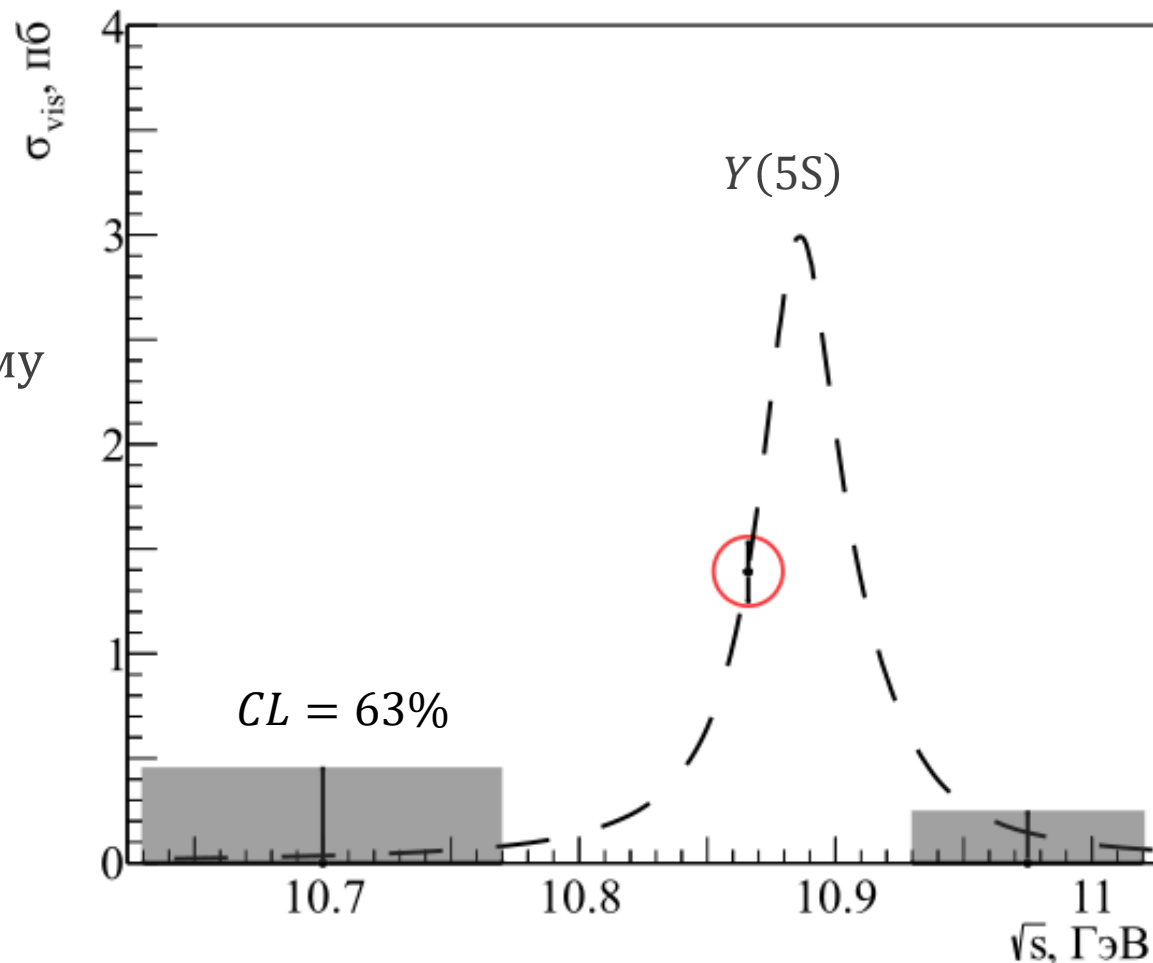
Результаты не противоречат чисто резонансному рождению.

Борновское сечение вычисляется как:

$$\sigma_B = \sigma_{vis} \frac{|1 - \Pi|^2}{1 + \delta},$$

$1 + \delta \approx 0.63 - 0.64$ – радиационная поправка

$|1 - \Pi|^2 = 0.929$ – фактор поляризации вакуума



Видимое сечение $e^+e^- \rightarrow Y(2S)\eta$ с наложением пика $Y(5S)$

Систематические погрешности

Относительная вероятность перехода:

$$B[Y(5S) \rightarrow X] = \frac{\sigma_{vis}(e^+e^- \rightarrow X)}{\sigma_{vis}(e^+e^- \rightarrow Y(5S))'}$$

$$\sigma_{vis}(e^+e^- \rightarrow Y(5S)) = (0.340 \pm 0.016) \text{ нб}$$

Источник	Погрешность, %	
	$\Upsilon(1S)\eta'[\pi\pi\eta]$	$\Upsilon(1S)\eta'[\rho\gamma]$
Сечение рождения $\Upsilon(5S)$ *	4.7	
Реконструкция треков	2.7	
Идентификация мюонов	2.0	
Светимость \mathcal{L} **	1.4	
PHOTOS	1.0	
Радиационная поправка **	5.7	
Критерии отбора ***	5.6	
Разрешение M_η ***	1.1	
Параметризация сигнала ***	1.4	
Параметризация фона ***	1.1	
Бинирование ***	0.8	
Реконструкция фотонов	3.0	1.5
Промежуточные бранчинги	2.7	2.4
Итоговая погрешность \mathcal{B}	9.3	8.8
Итоговая погрешность $\sigma_{\mathcal{B}}$	10.0	9.5

Источник	Погрешность, %		
	$\Upsilon(2S)\eta[\gamma\gamma]$	$\Upsilon(2S)\eta[3\pi]$	$\Upsilon(1S)\eta[3\pi]$
Сечение рождения $\Upsilon(5S)$ *	4.7		
Реконструкция треков	2.7		
Идентификация мюонов	2.0		
Светимость \mathcal{L} **	1.4		
PHOTOS	1.0		
Радиационная поправка **	4.3	5.1	5.7
Реконструкция фотонов	3.0	3.0	3.0
Промежуточные бранчинги	2.5	8.9	2.4
Критерии отбора	6.0	6.6	5.6
Разрешение M_η	2.1	1.4	1.1
Параметризация сигнала	1.0	1.4	1.4
Параметризация фона	1.5	1.0	1.1
Бинирование	0.3	2.1	0.8
Итоговая погрешность \mathcal{B}	9.7	13.2	9.2
Итоговая погрешность $\sigma_{\mathcal{B}}$	9.6	13.4	9.8

Результаты

Получены относительные вероятности:

- $B[Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta] = (4.13 \pm 0.41 \pm 0.37) \times 10^{-3}$
- $B[Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta] = (0.85 \pm 0.15 \pm 0.08) \times 10^{-3}$
- $B[Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'] < 7.3 \times 10^{-5}, CL = 90\%$

Борновские сечения:

- $\sigma_B[Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta] = 2.07 \pm 0.21 \pm 0.19$ пб
- $\sigma_B[Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta] = 0.42 \pm 0.08 \pm 0.04$ пб
- $\sigma_B[Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'] < 0.037$ пб, $CL = 90\%$

Отношения:

- $\frac{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta')}{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta)} < 0.1, CL = 90\%$

- Ожидается ~ 10 для $b\bar{b}$
- $\lesssim 0.5$ при наличии примеси легких кварков

- $\frac{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta)}{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(2S)\pi^+\pi^-)} = 0.52 \pm 0.06 \pm 0.04$

- $\frac{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta)}{\Gamma(Y(5S) \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-)} = 0.19 \pm 0.04 \pm 0.01$
 - $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ для $b\bar{b}$

- $\frac{\Gamma(Y \rightarrow h_b(1P)\eta)}{\Gamma(Y \rightarrow Y(1S)\eta)} = \begin{cases} 12.8 & @ Y(4S) \\ < 1.8 & @ Y(5S) \end{cases}$

$h_b(1P, 2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$

- По текущим данным о распадах $h_b(1P, 2P)$ и $\chi_{b1}(1P, 2P)$ можно оценить [1207.5757] следующее соотношение на ширины аннигиляции в адроны:

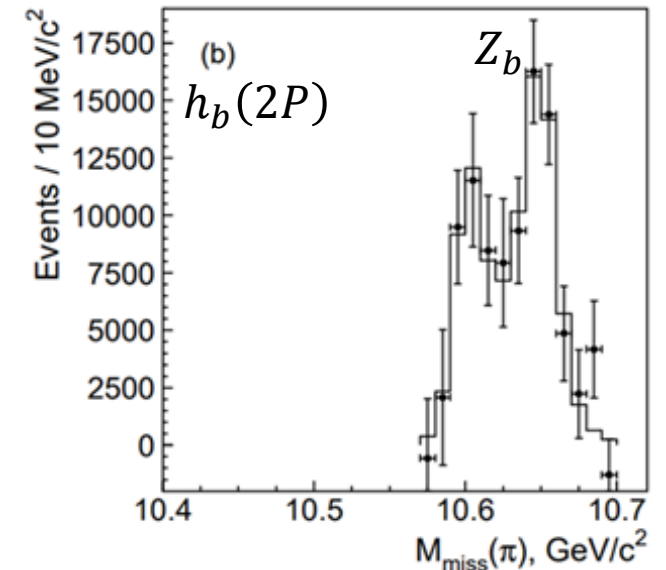
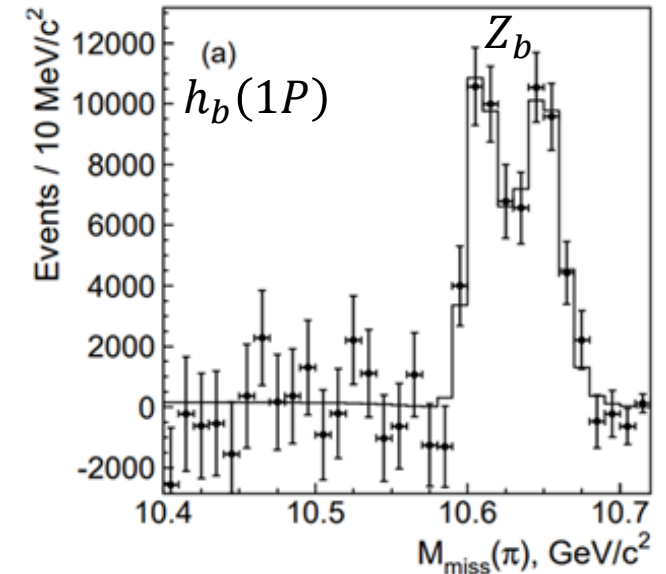
$$\frac{\Gamma_{ann}[h_b(2P)]/\Gamma_{ann}[h_b(1P)]}{\Gamma_{ann}[\chi_{b1}(2P)]/\Gamma_{ann}[\chi_{b1}(1P)]} = 0.25 \pm 0.25 [0.24^{+0.47}_{-0.24}]$$

(ожидается 1)

- Противоречие усиливается при наличии значительной вероятности перехода $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$, которую можно оценить из сравнения с $\Upsilon(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0$:

$$\frac{\Gamma(h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta)}{\Gamma(\Upsilon(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0)} \sim 140 \div 320$$

- Соответствует $B \sim 5\%$



Масса отдачи к пиону в процессах $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(1P, 2P)\pi^+\pi^-$ (1110.2251)

Реконструкция сигнала

Полная реконструкция процесса $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(1P, 2P)\pi^+\pi^-$

где $h_b(1P, 2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$

Исследуемые каналы:

- $\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$, $\eta(\pi^0) \rightarrow \gamma\gamma$
- $\Upsilon(1S) \rightarrow e^+e^-$, $\eta(\pi^0) \rightarrow \gamma\gamma$

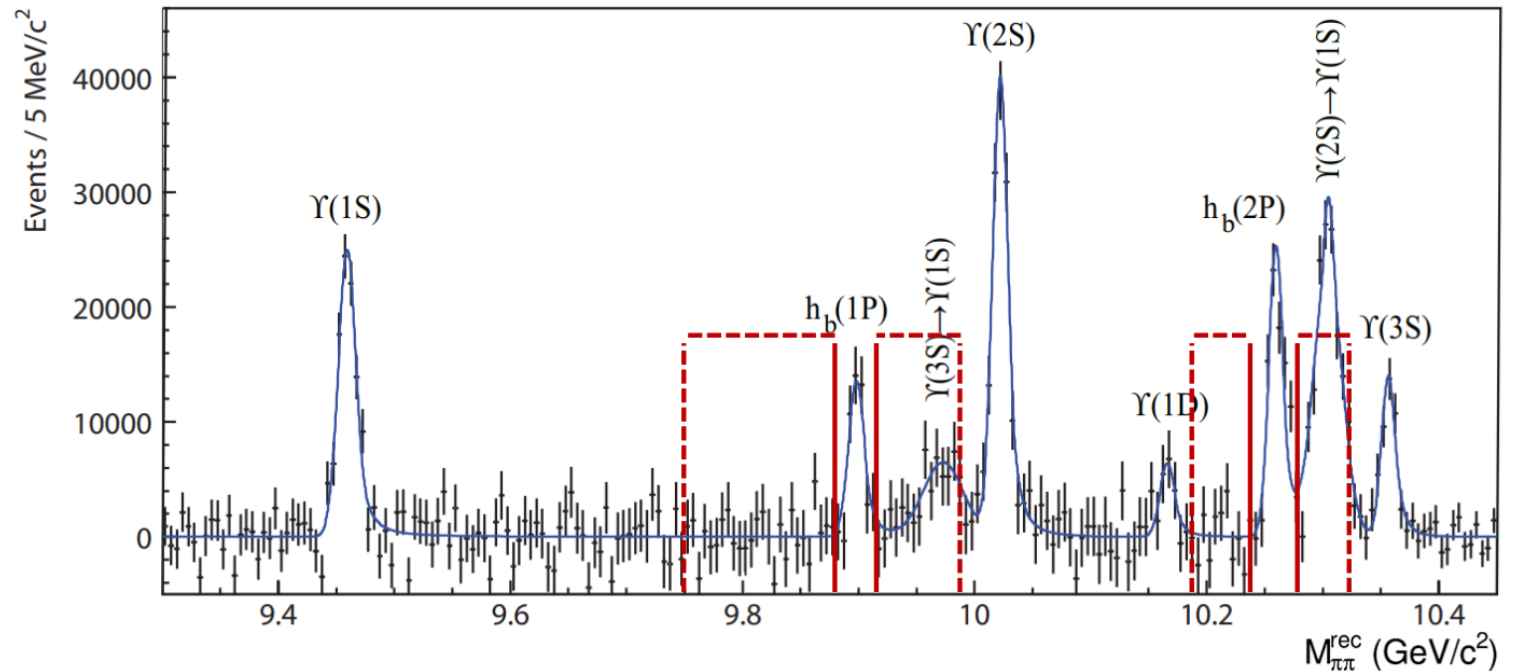
Сигнальное распределение: $M_{\Upsilon\Upsilon}$ vs $M_{\pi\pi}^{rec}$

Критерии отбора пионов включают все, использованные в инклюзивном анализе радиационных переходов ([1205.6351](#)).

Это позволяет вычислять относительную вероятность перехода как

$$B = \frac{N_{sig}}{N_{h_b(1P,2P)}^{tot} (\varepsilon_{h_b}^{\mu\mu} B_{int}^{\mu\mu} + \varepsilon_{h_b}^{ee} B_{int}^{ee})}$$

Масса отдачи к паре пионов, $M_{\pi\pi}^{rec}$



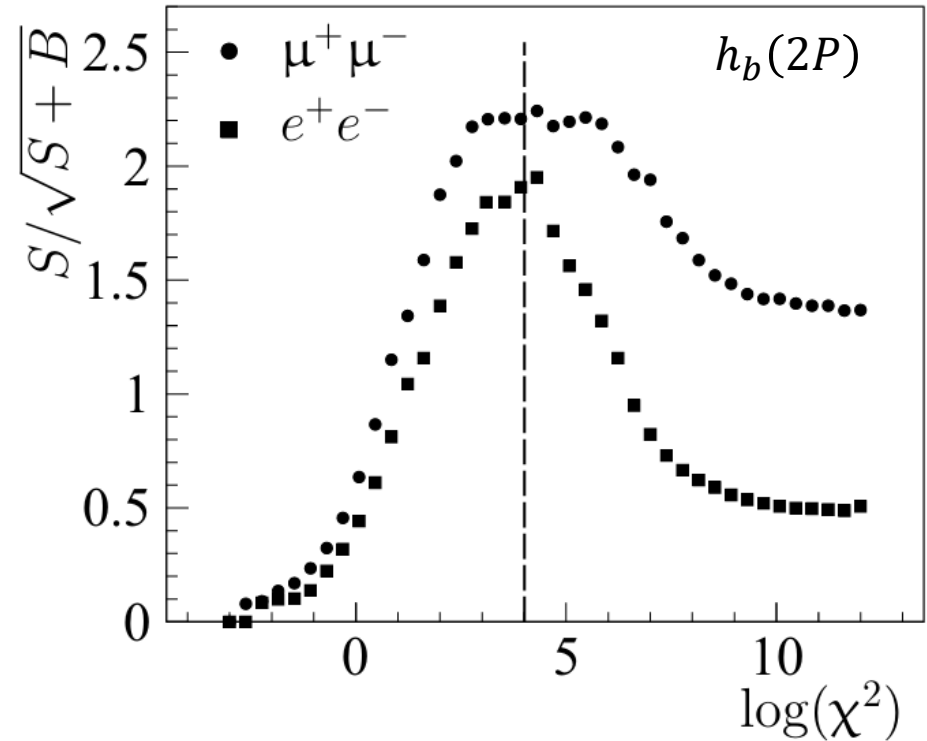
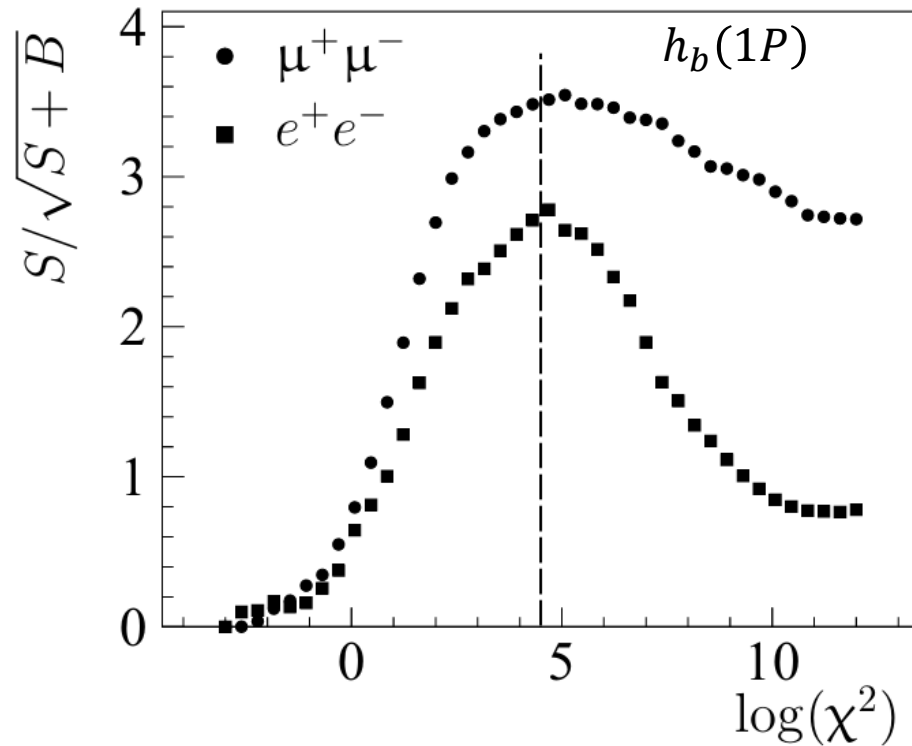
Из статьи про обнаружение $h_b(1P, 2P)$ ([1103.3419](#))

Критерии отбора

Критерий	$h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$	$h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$
$Y(5S) \rightarrow Z_b^\pm [h_b \pi^\pm] \pi^\mp$	$M_{\pi^\pm}^{\text{rec}}$ (ГэВ/ c^2)	(10.59; 10.67)
$Y(1S) \rightarrow l^+ l^-$	$M_{\ell\ell}$ (ГэВ/ c^2)	(9.235; 9.685)
$h_b(1P, 2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\gamma\gamma$	$\delta M_{\gamma\gamma}$ (МэВ/ c^2)	(761; 833)
Вето $Y(2S) \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-$	$\delta M_{\pi\pi}$ (МэВ/ c^2)	> 581
Вето $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	$M_{\pi\pi\gamma\gamma}$ (МэВ/ c^2)	> 810
Подавление конверсии	$\cos \theta_{\pi\pi}$	< 0.95
Кин. реконструкция	χ^2	< 55
	$\varepsilon_{h_b}^{\mu\mu}$ (%)	33.1 ± 0.3 (25.6 ± 0.2)
	$\varepsilon_{h_b}^{ee}$ (%)	23.7 ± 0.2 (18.8 ± 0.2)

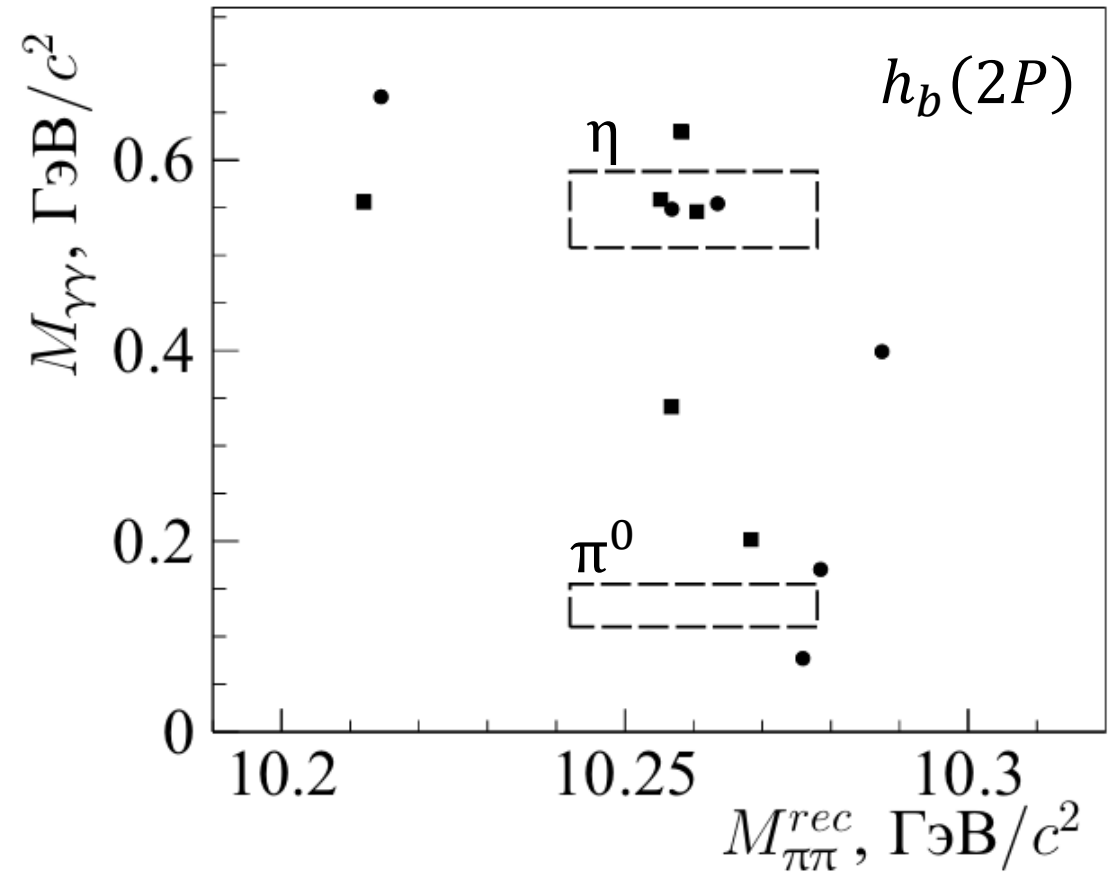
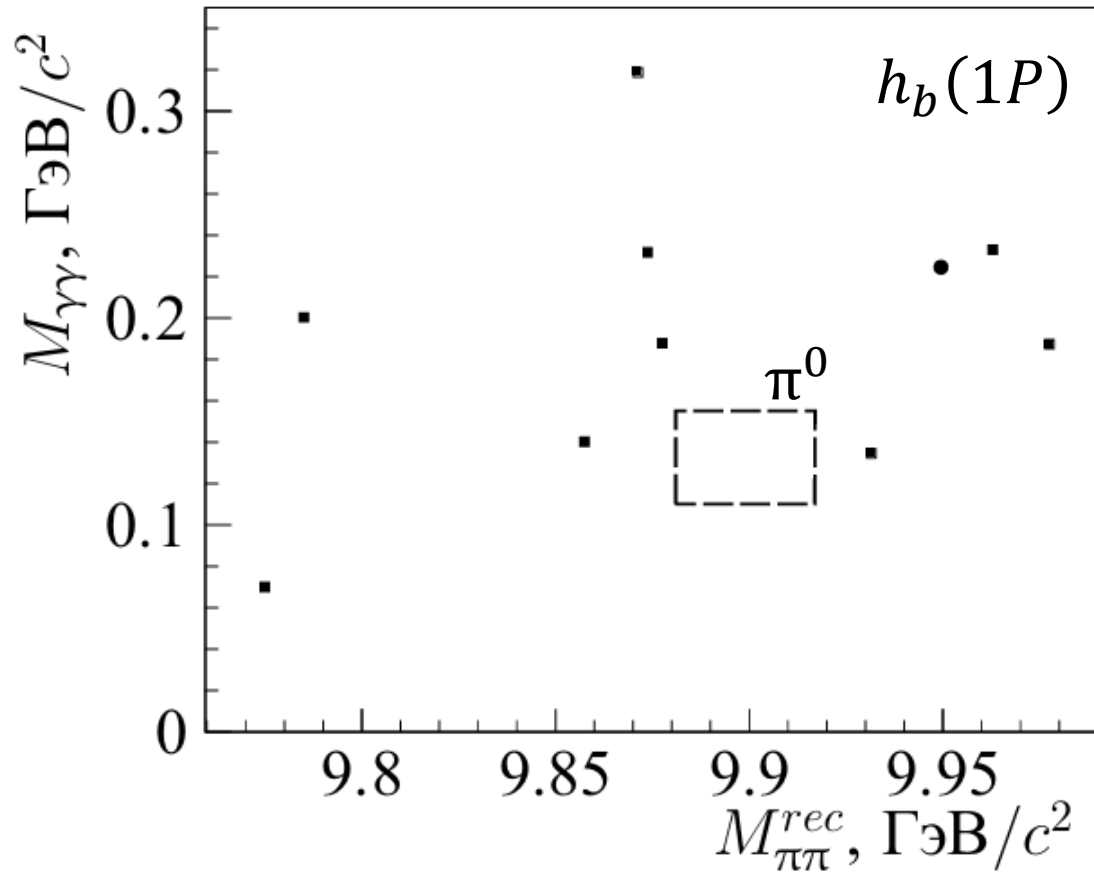
Кинематическая реконструкция

Для улучшения разрешения и подавления фона,
проводится процедура 4C кинематической реконструкции



Оптимизация критерия на χ^2 с помощью Figure-of-Merit.
Дополнительно используется для выбора лучшего кандидата

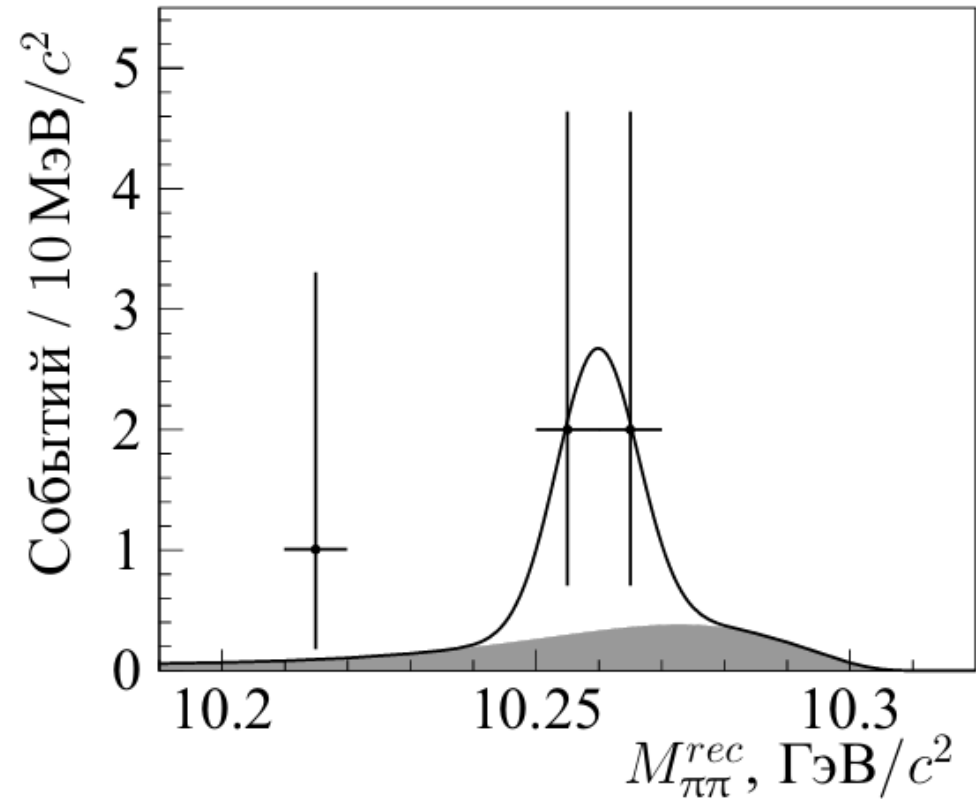
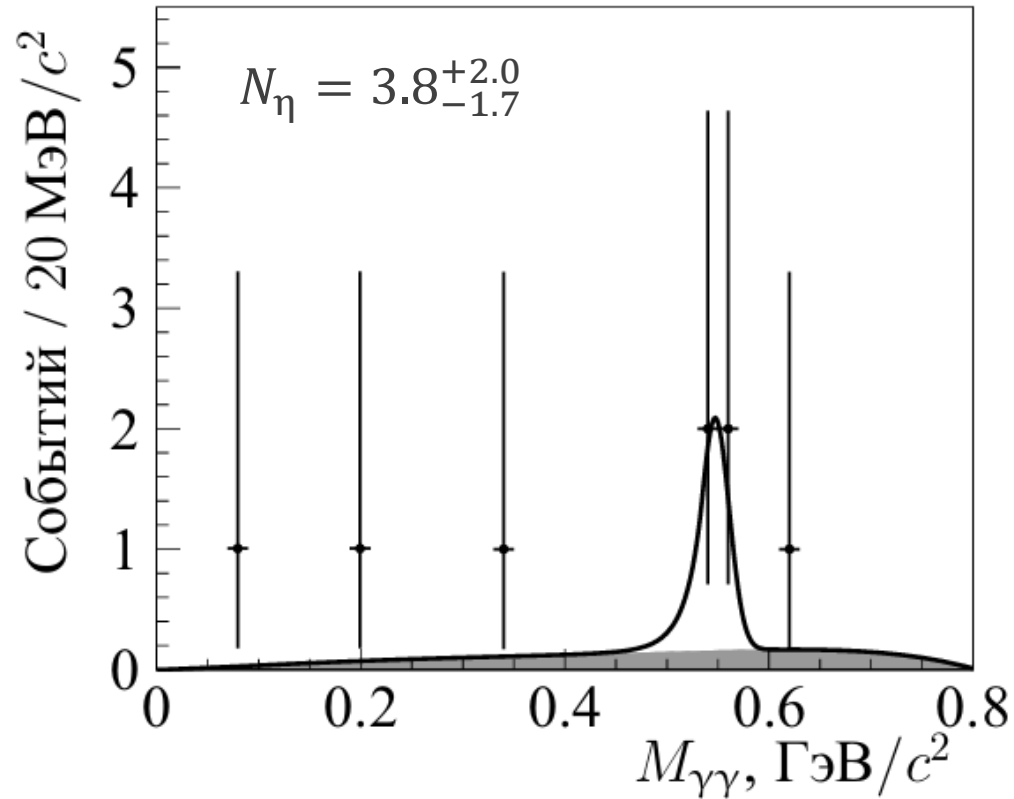
Сигнальные распределения



Для π^0 поставлены верхние пределы на $B[h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\eta(\pi^0)]$ методом Ролке (Rolke), учитывая фон и систематические погрешности

Аппроксимация

Проекции сигнальных областей после двумерной аппроксимации



Статистическая значимость определяется как $\sqrt{2\log(L(N_{sig})/L(0))}$ и составляет 4.0 σ без систематических погрешностей и 3.5 σ с ними

Систематические погрешности

Источник	Погрешность, %		
	$h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$	$h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$	$h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$
Реконструкция фотонов	3.0		
Идентификация лептонов	1.7; 3.4		
PHOTOS	1.0		
Реконструкция треков	0.7		
$N_{h_b(1P,2P)}^{\text{tot}}$	10.2	10.2	5.6
Параметризация фона	3	—	—
Промежуточные бранчинги	2.1; 2.2	2.0; 2.1	2.0; 2.1
Эффективность	0.7; 0.8	0.8; 1.1	0.8; 1.1
Итоговая	11.3	10.9	6.5

Результаты

Получены относительные вероятности:

- $B[h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta] = (7.1_{-3.2}^{+3.7} \pm 0.8) \times 10^{-3}$
- $B[h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\pi^0] < 1.8 \times 10^{-3}, CL = 90\%$
- $B[h_b(1P) \rightarrow Y(1S)\pi^0] < 1.8 \times 10^{-3}, CL = 90\%$

Отношение:

- $\frac{\Gamma(h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta)}{\Gamma(Y(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0)} = 30_{-18}^{+20} \pm 10$ (ожд. $\sim 140 \div 320$)

Эксперимент Belle II

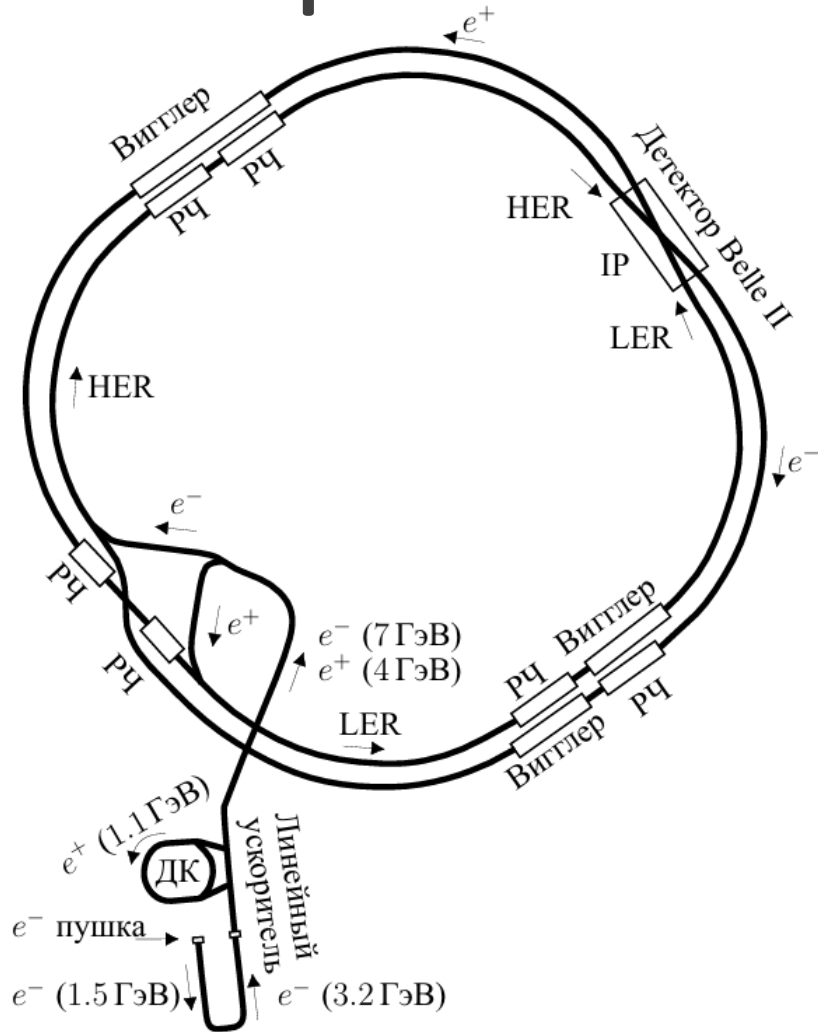


Схема ускорительного комплекса SuperKEKB

SuperKEKB

2018 – ...

- e^+ (4 ГэВ) e^- (7 ГэВ)
- $L_{peak} = 5.1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

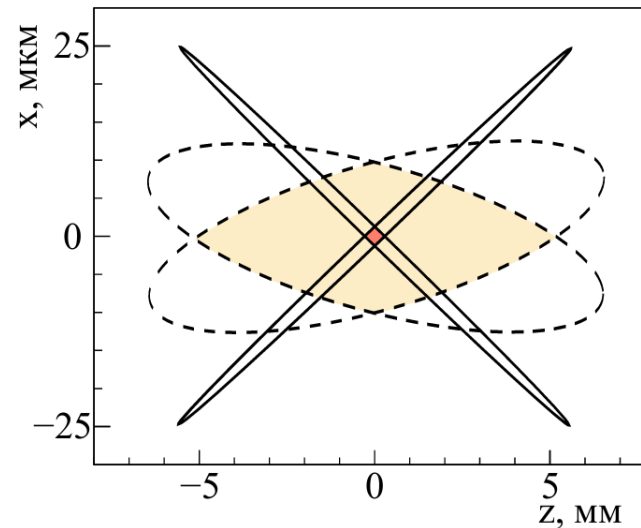
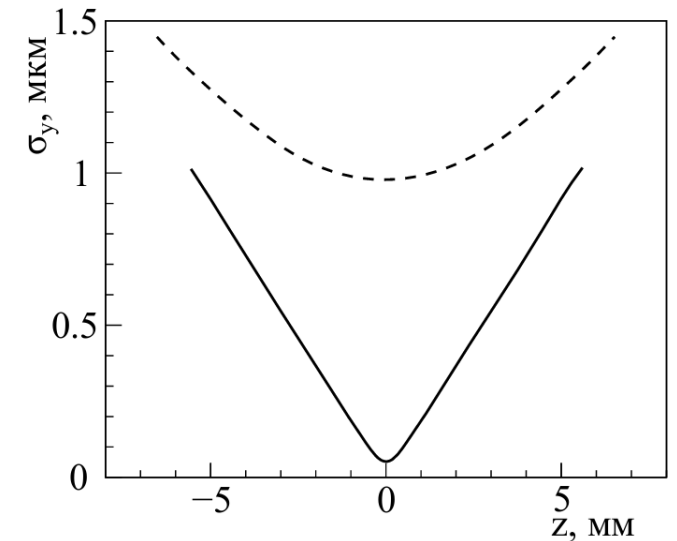


Схема встречи пучков и их вертикальный размер для SuperKEKB и KEKB

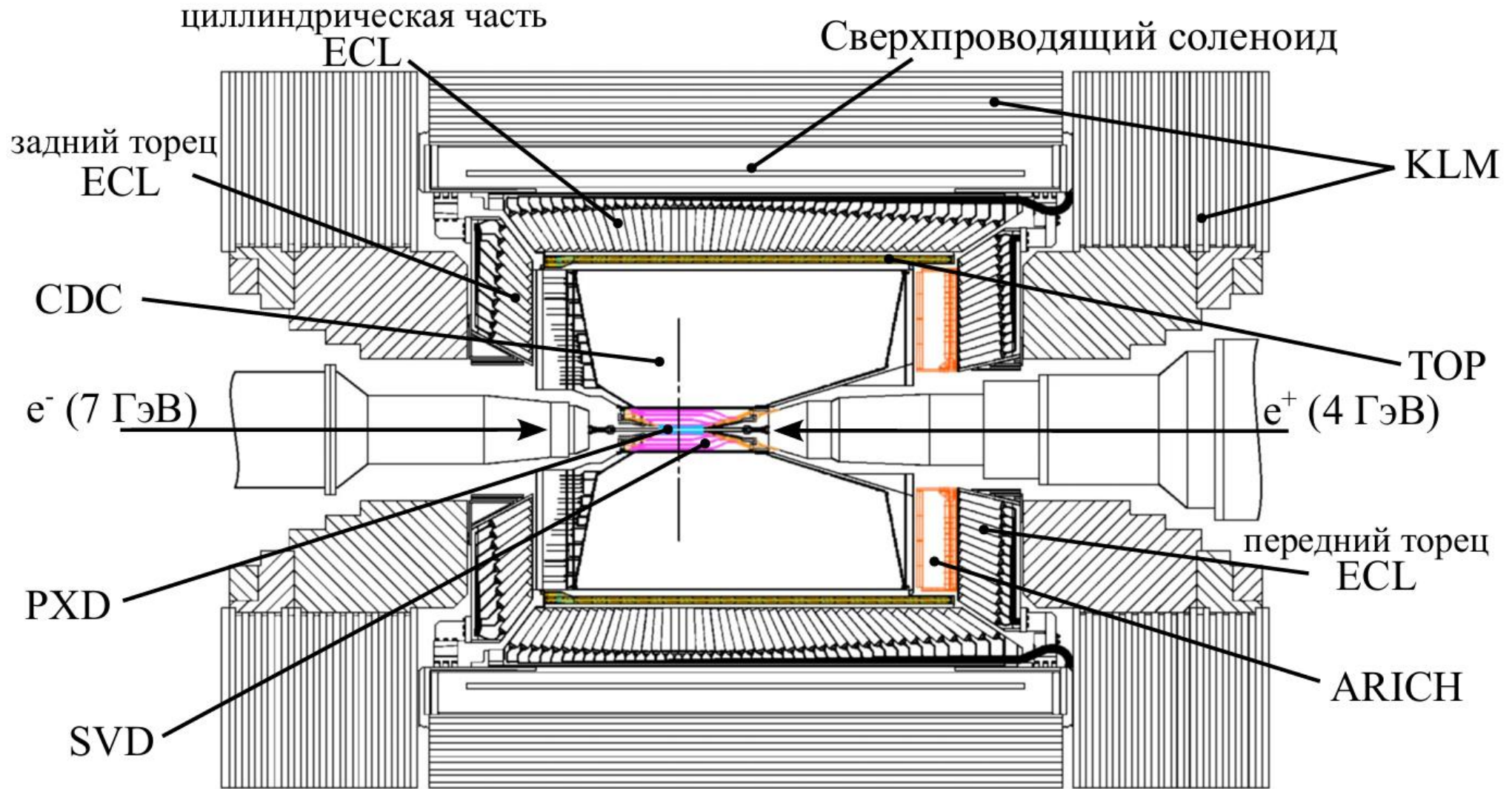
- $L_{target} = 6 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

- $\int L dt = \begin{cases} > 430 \text{ фб}^{-1} @ Y(4S) \\ 20 \text{ фб}^{-1} @ Y(10753) \end{cases}$

- Цель $\int L dt \sim 50 \text{ аб}^{-1}$



Детектор Belle II

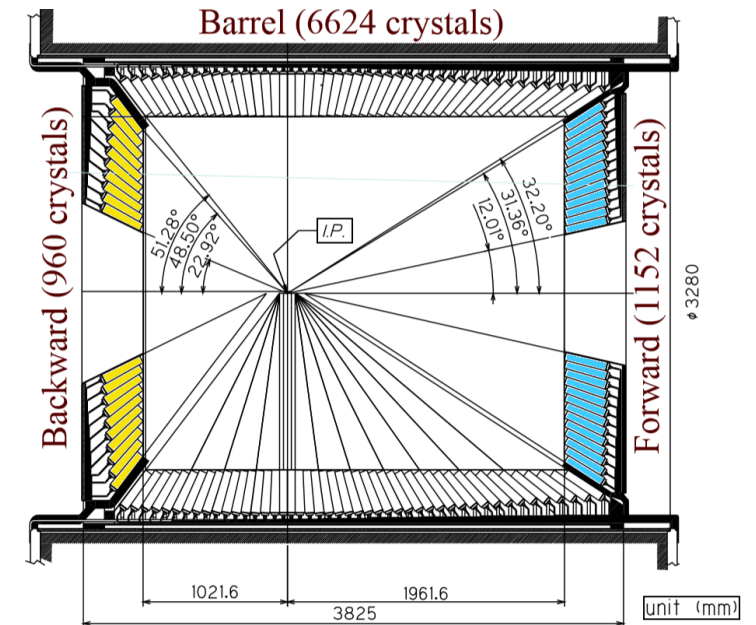


Измерение светимости

- Обратная связь для настройки параметров коллайдера и предварительные результаты об интегральной светимости
- Один из методов – измерение количества событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
 - Большое сечение и наличие точного генератора
 - Простая back-to-back сигнатура
 - Для реконструкции достаточно эл.-маг. калориметра

■ Мгновенная светимость $L = \frac{dN/dt}{\sigma}$

- В ИЯФ СО РАН был разработан модуль, измеряющий светимость по скорости счета событий на основе только торцевых частей ECL ($18^\circ < \theta_{\text{сцм}} < 32^\circ$)
- Работает независимо от основной системы сбора данных



Логика отбора событий

Сигнатура события:

- Большое энерговыделения в противоположных секторах* торцов
- Не более чем в двух соседних секторах каждого торца энерговыделение превышает порог качества
- Совпадение в пределах 500 нс

* Вместо одного сектора, i , используется бегущая сумма: $S_i = E_i + E_{i+1}$

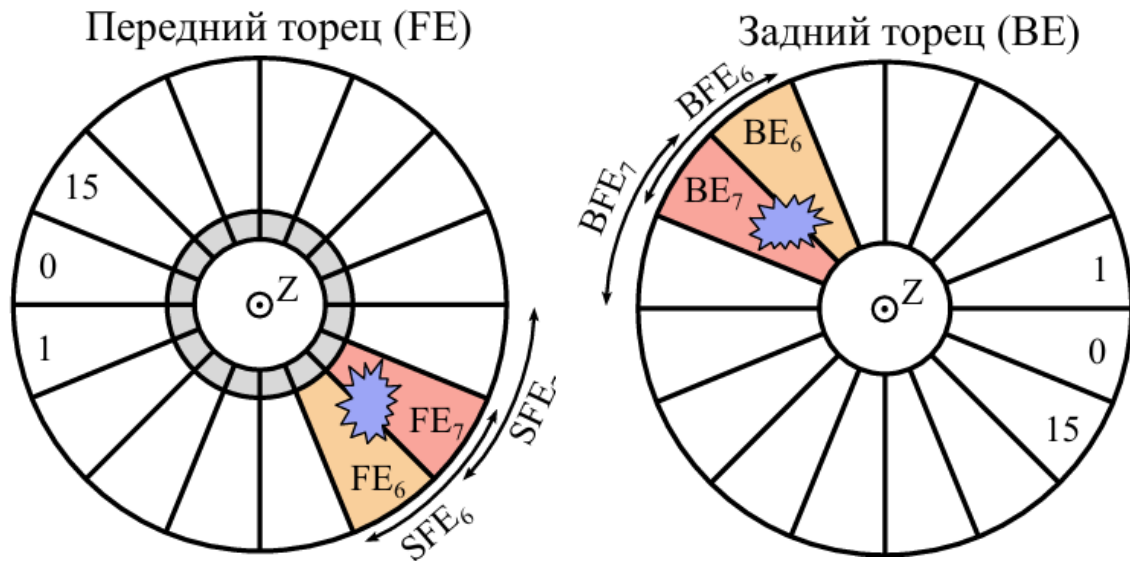
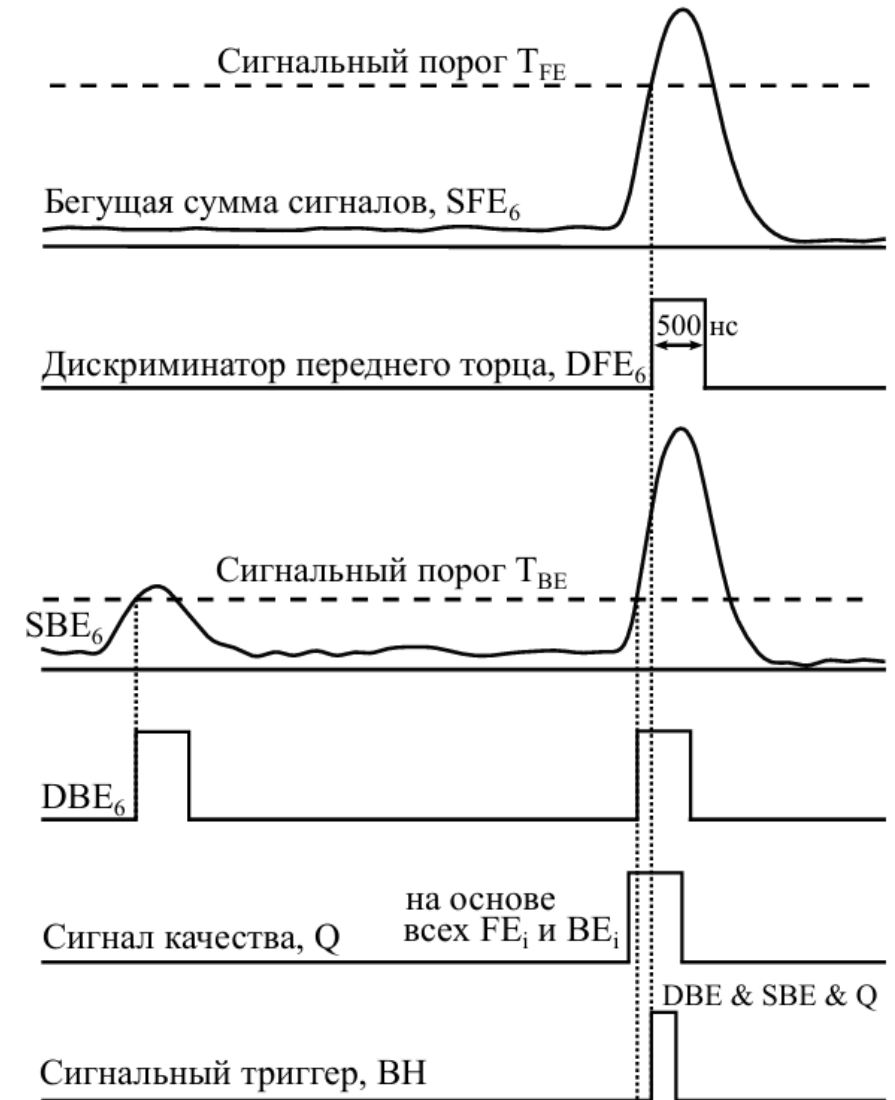


Иллюстрация сигнатуры события



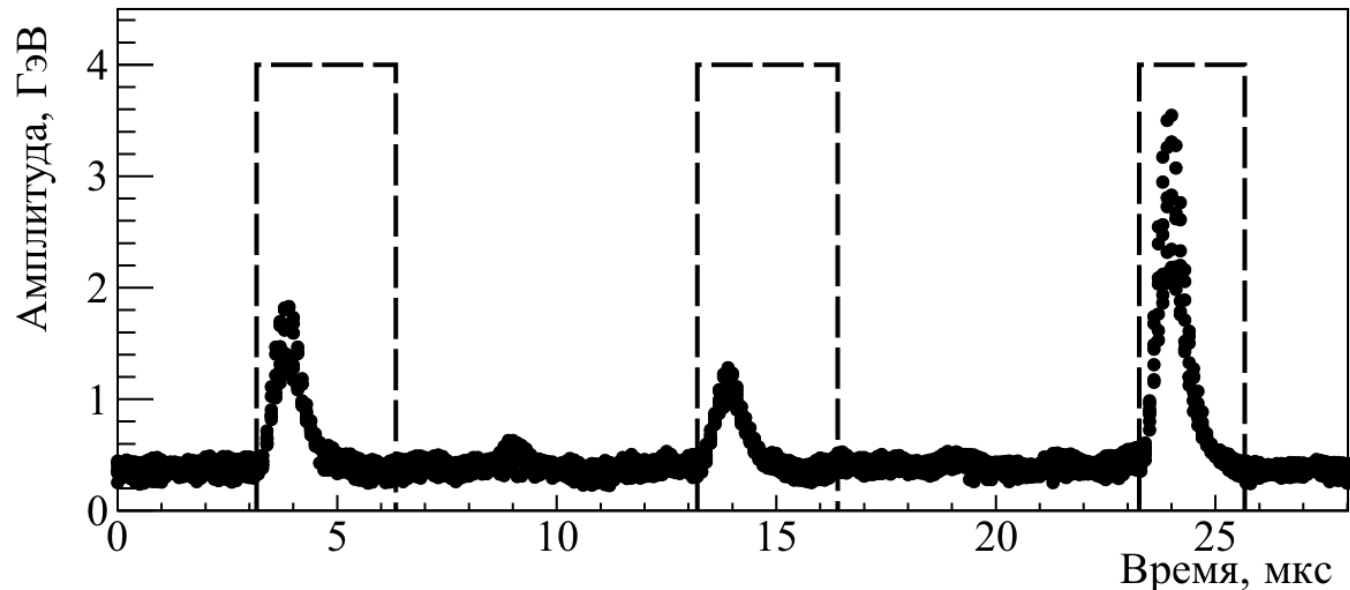
Временная диаграмма модуля

Временная синхронизация

- Инжекция сгустка сопровождается большими энерговыделениями в калориметре (с периодом 10 мкс на протяжении до 30 мс)
- Теряется вплоть до 10% сигнальных событий
- Глобальный триггер рассылает вето инъекции, однако необходима синхронизация сигналов в Мониторе светимости с приходящим вето для правильного учета.

Сравниваем относительное положение сигнала ЕСЛ и вето инъекции в Мониторе и глобальном триггере (при установленном нерегулярном паттерне вето)

- Доля фоновых событий падает с 30 – 100% до 0.6% - уровень фона без инъекции



Сигнал с фоном, ассоциированным с пролетом инжектированного сгустка и синхронизированное вето инъекции

Монте-Карло моделирование

- Мгновенная произведенная светимость $L = \frac{N}{\sigma_{vis}(\tau - t_{injV})}$ (аналогично, записанная детектором)
- $\sigma_{vis} = \sigma \epsilon$ – эффективное сечение регистрации процессов модулем
- BabaYaga@NLO → GEANT4 → Скрипт с логикой отбора
- Зависимость от энергии: $\sigma_{vis}(s) = \sigma_{vis}(s_0) \frac{s_0}{s} (1 + 0.014 \frac{\sqrt{s} - \sqrt{s_0}}{1 \text{ GeV}})$
- $\sigma_{vis}(s_0) = 29.2 \text{ нб @ } Y(4S)$

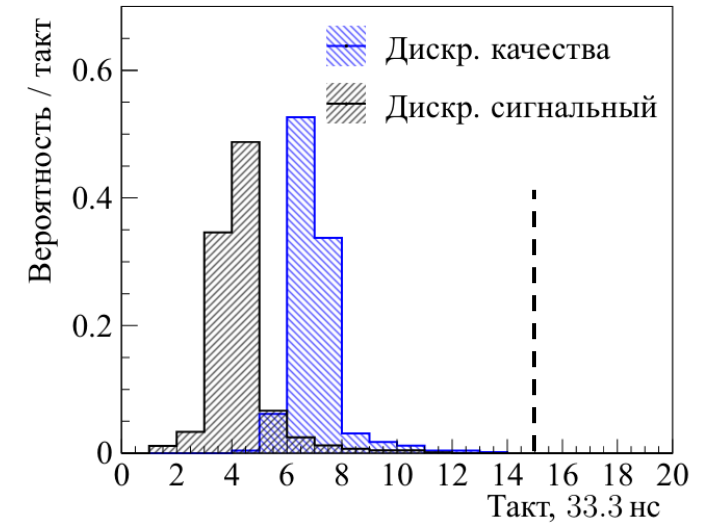
$L, \text{ см}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$	Н ожид., Гц	Погрешность, %	Мертвое время, %
10^{34}	292	5.8	0.04
4.7×10^{34}	1372	2.7	0.19
10^{35}	2920	1.8	0.40
6×10^{35}	17 520	0.7	2.42

Процесс	$\sigma, \text{ нб}$	$\sigma_{vis}, \text{ нб}$
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	295.38	28.24
$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$	5.07	0.94
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$	39.55	1.26×10^{-3}
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$	18.83	0.2×10^{-3}
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	1.15	0.02×10^{-3}
$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	0.92	0.6×10^{-3}
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	3.72	3.26×10^{-3}

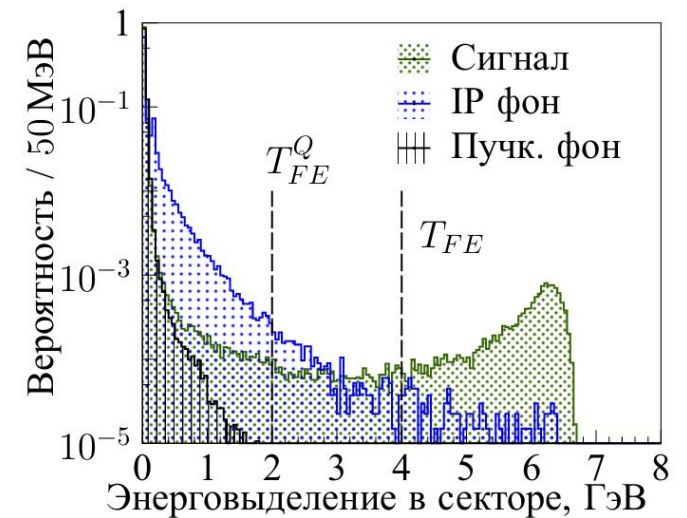
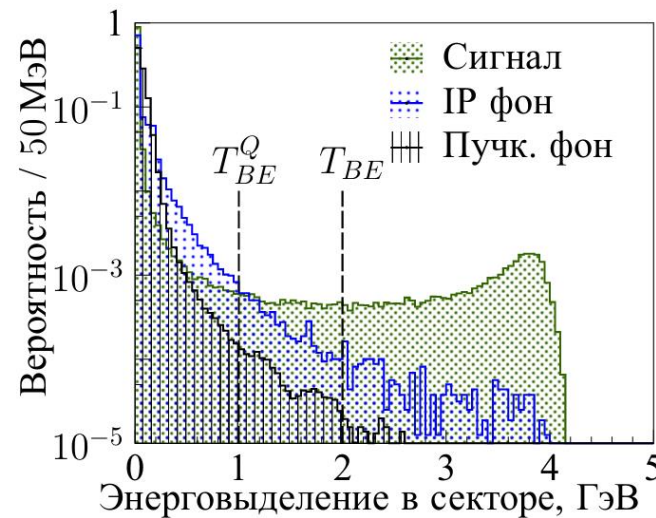
Видимое сечение регистрации различных процессов на энергии $Y(4S)$ резонанса

Выбор рабочих параметров

- Длительность дискриминаторов – максимальная задержка между превышениями порогов сигналами.
 - Выбирается минимальной, но не влияющей на эффективность
 - Взято 500 нс
- Сигнальные пороги, минимизируем:
 - Систематическую погрешность
 - Вклад фоновых процессов
 - Выбрано $T_{BE} = 2$ ГэВ, $T_{FE} = 4$ ГэВ



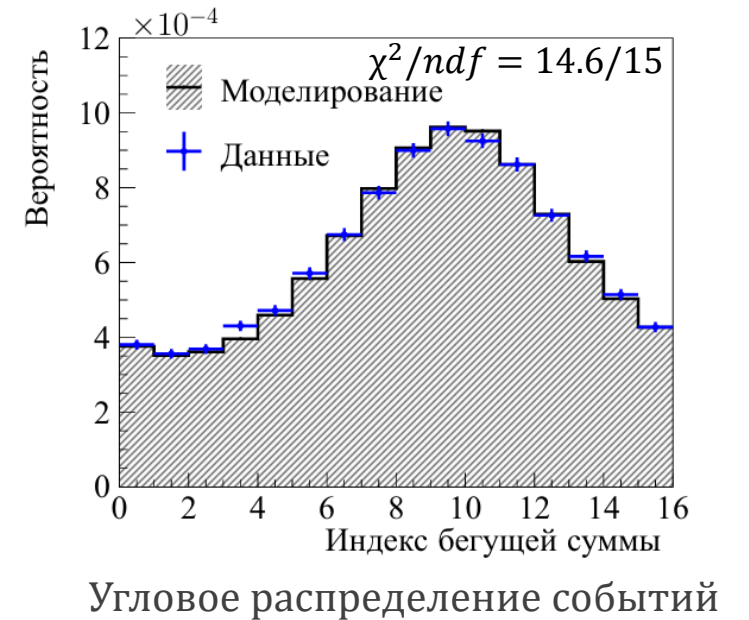
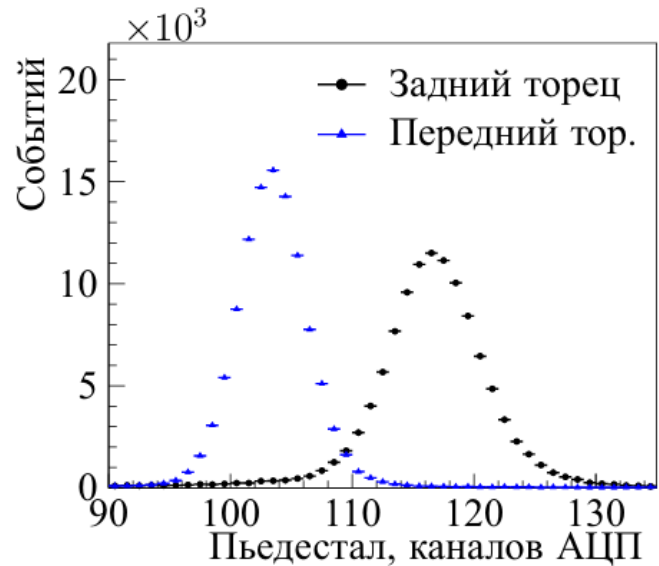
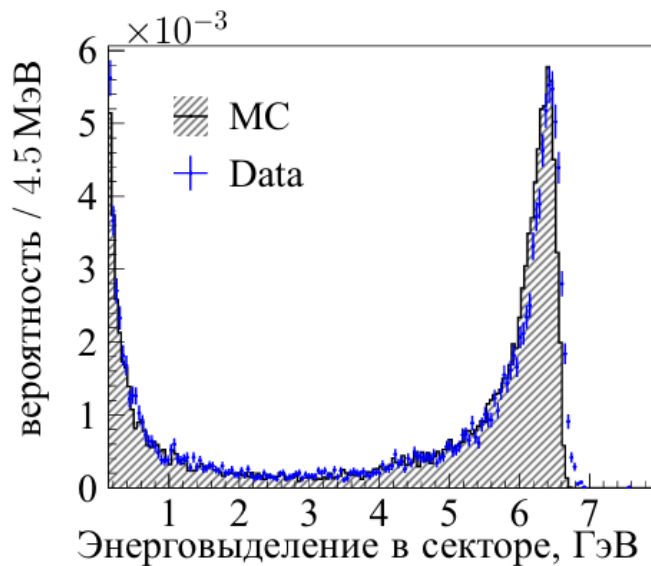
- Пороги качества – проверка сигнатуры по всему торцу. Должны быть:
 - Максимальными, но не больше половины сигнальных
 - Взяты $T_{BE}^Q = 1$ ГэВ, $T_{FE}^Q = 2$ ГэВ



Систематические погрешности

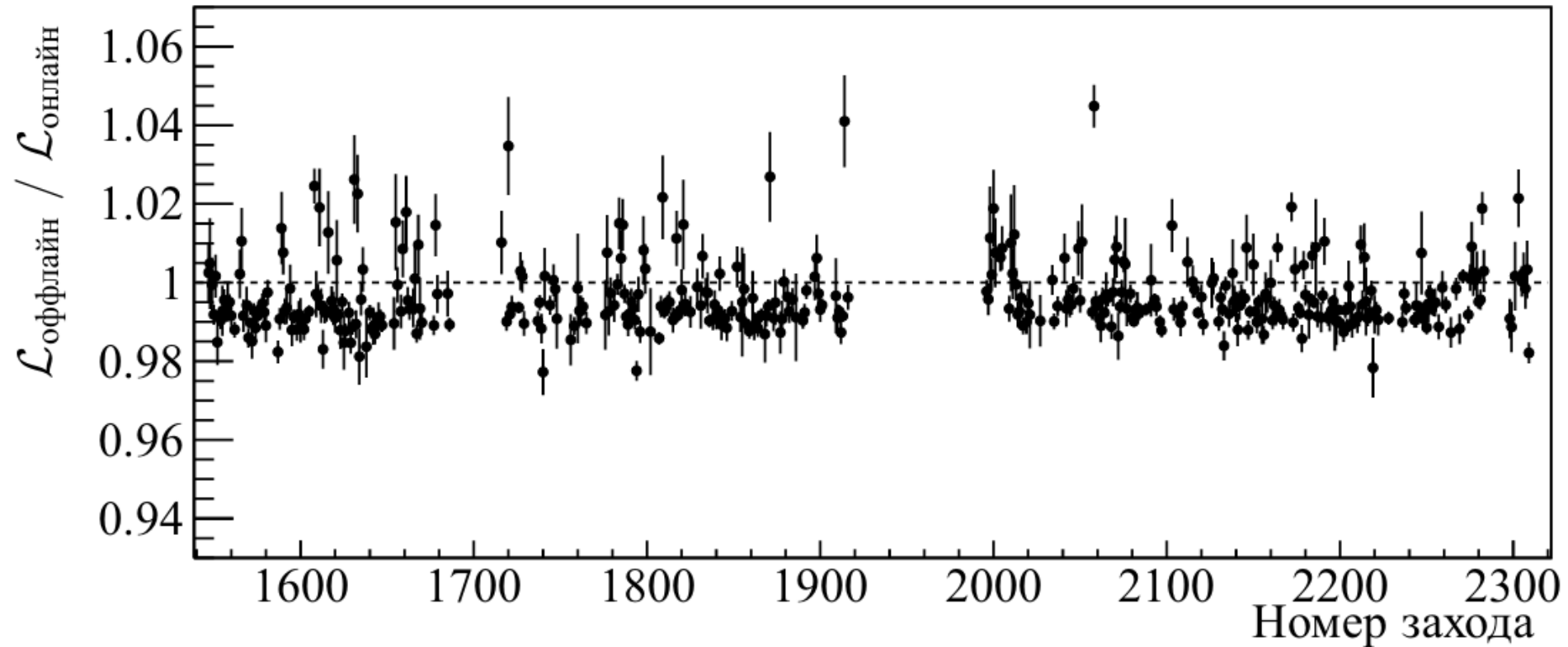
Источник	Погрешность, %
Положение IP относительно ECL	0.78
Энергетическая калибровка и пьедесталы	0.26
VabaYaga@NLO	0.14
Суммарная	0.83

- ECL: ± 4 мм по x , y и ± 5 мм по z
- Калибровка – 1%
- Пьедесталы – 30 МэВ и 15 МэВ



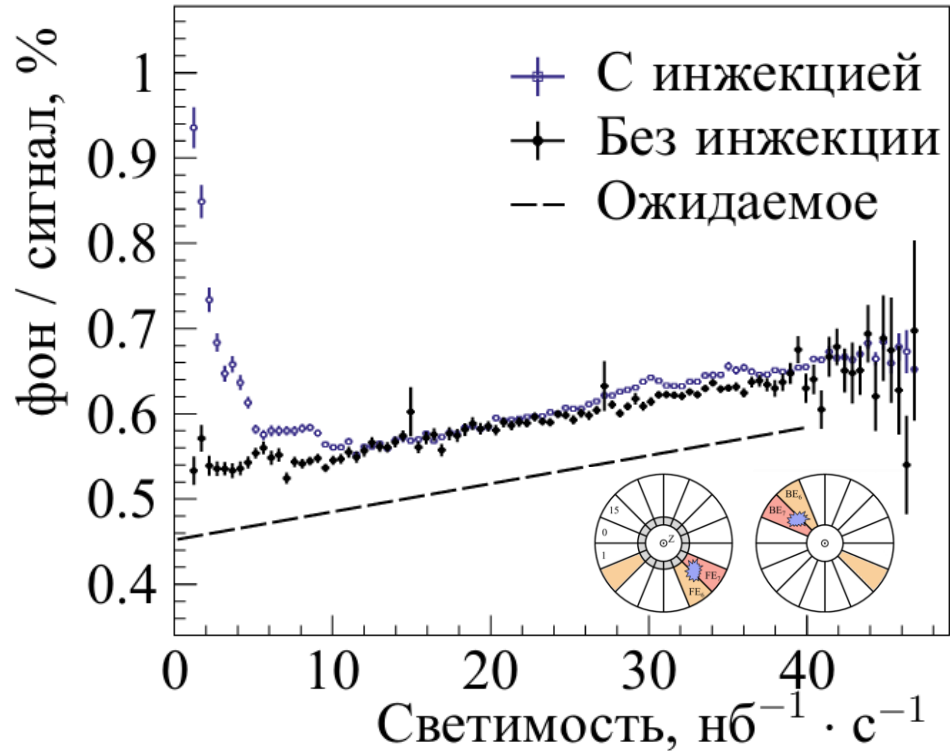
Сравнение с оффлайн измерениями

- Полная реконструкция событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ (сист. погр. 0.6%)
- Использует цилиндрическую часть ECL (независимо от Монитора светимости)
- Согласие в пределах 0.8% (сист. сдвиг $-0.8 \pm 0.1\%$)



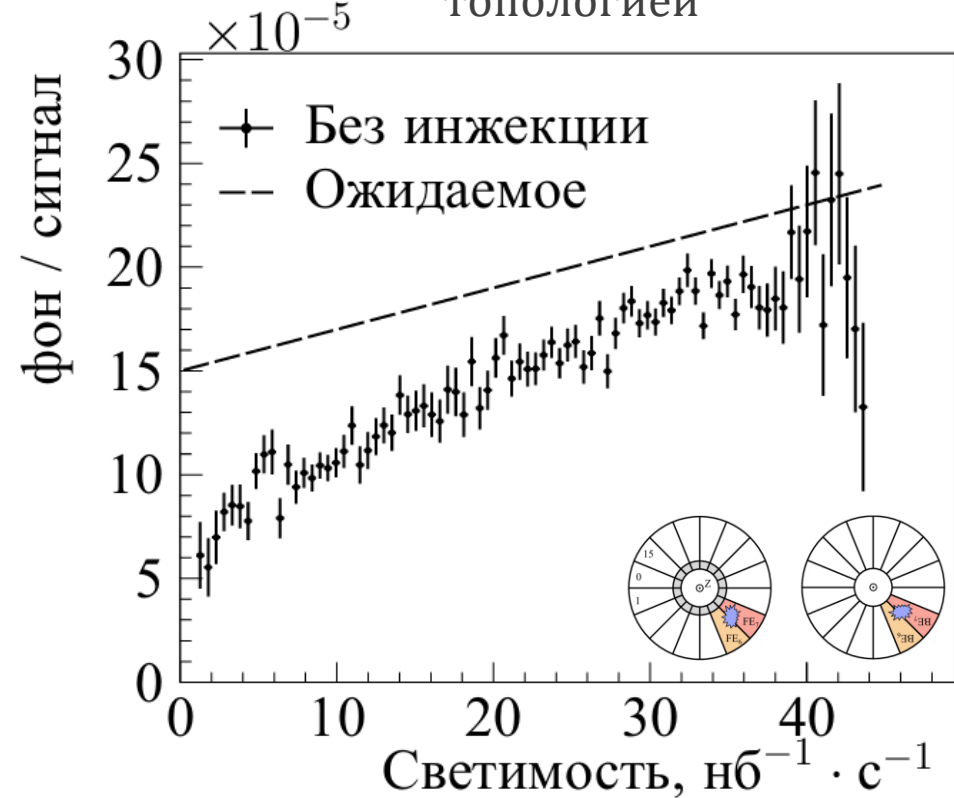
Влияние фона

Доля событий с нарушенной топологией



- Фон инъекции эффективно подавлен
- Рост обусловлен наложением сигнальных событий

Доля событий со сдвинутой топологией

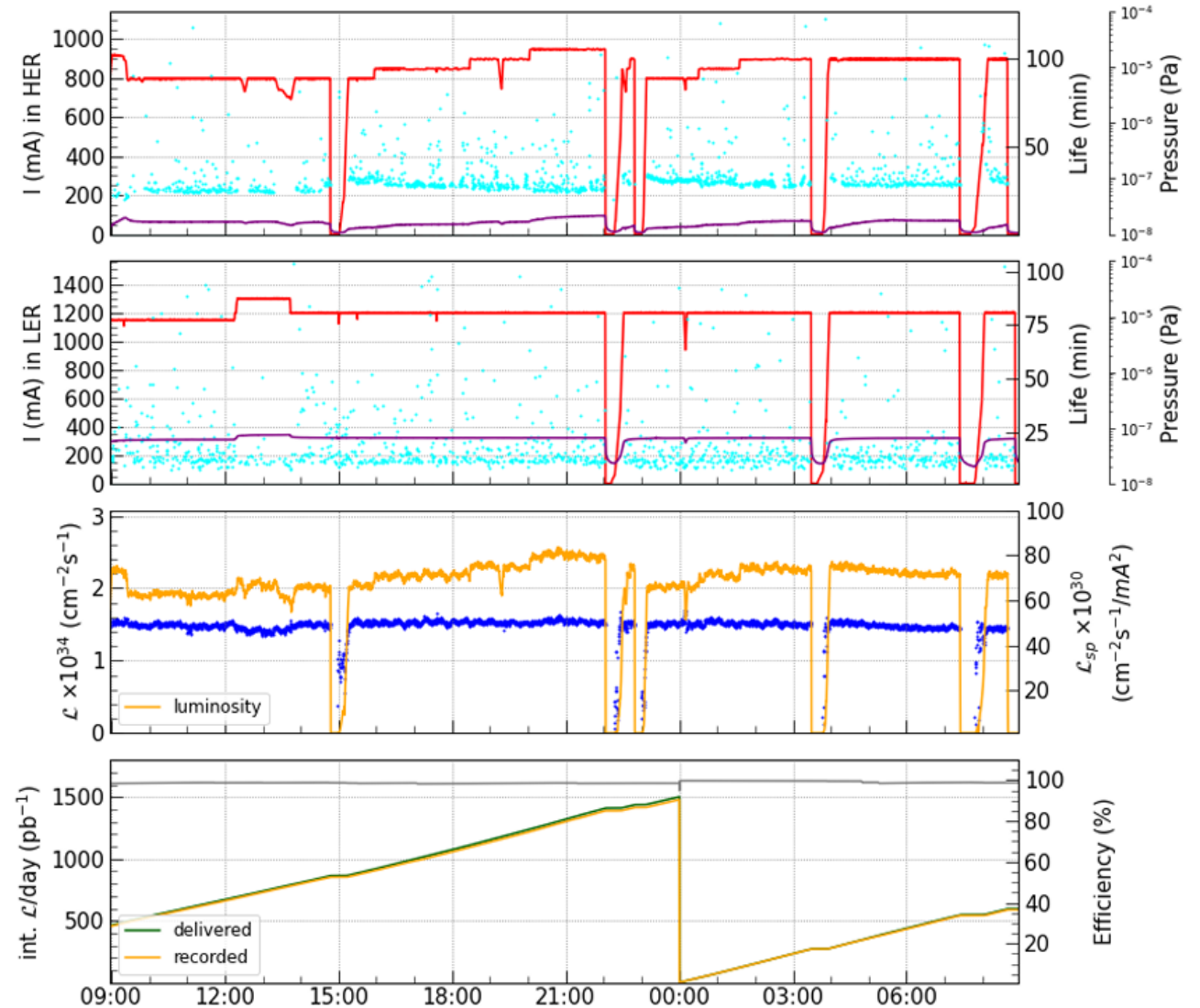


- Позволяет оценить вероятность случайной имитации сигнальной сигнатуры
- Влияние меньше 2×10^{-4} (0.02%)

Результаты

Монитор светимости

- Измеряет абсолютную светимость в реальном времени с систематической точностью лучше 1%
- Демонстрирует стабильную работу, независимую от системы сбора данных
- Играет важную роль в настройке параметров пучков и предоставляет данные о светимости для коллаборации Belle II



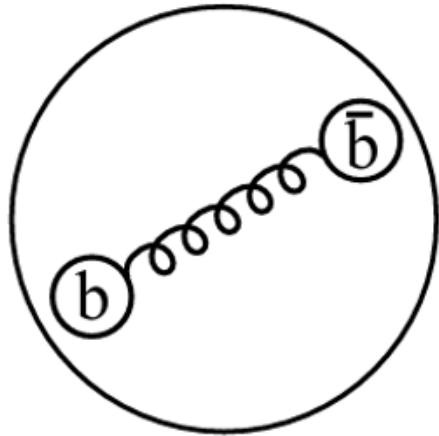
Ежедневный снимок производительности комплекса SuperKEKB

Заключение

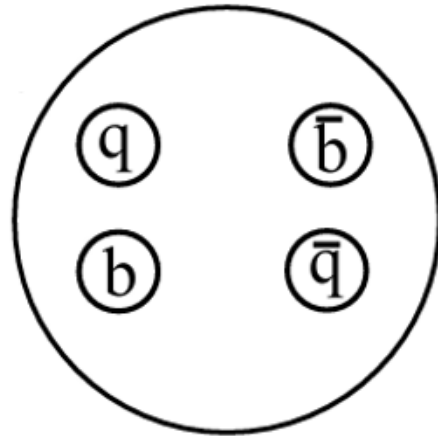
1. Впервые измерены относительные вероятности распадов $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta$ и $Y(5S) \rightarrow Y(2S)\eta$.
2. Получены борновские сечения процессов $e^+e^- \rightarrow Y(1S)\eta$ и $e^+e^- \rightarrow Y(2S)\eta$ на $Y(5S)$ -резонансе, и верхние пределы вне $Y(5S)$, не противоречащие чисто резонансному рождению состояний.
3. Впервые измерена относительная вероятность перехода $h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta$, которая значительно меньше ожидаемого значения
4. Впервые поставлены верхние пределы на относительные вероятности переходов $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$, $h_b(1P) \rightarrow Y(1S)\pi^0$ и $h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\pi^0$. Переход $Y(5S) \rightarrow Y(1S)\eta'$ оказался подавленным относительно $Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta$.
5. Реализована процедура и проведено Монте-Карло моделирование Монитора светимости для эксперимента Belle II. Получен коэффициент пересчета измеряемой скорости счета событий в абсолютную величину мгновенной светимости, изучены систематические погрешности, определены оптимальные параметры работы.
6. Реализована процедура энергетической калибровки и временной синхронизации Монитора светимости Belle II.
7. Достигнута систематическая точность измерений Монитором светимости лучше 1%.

BACKUP

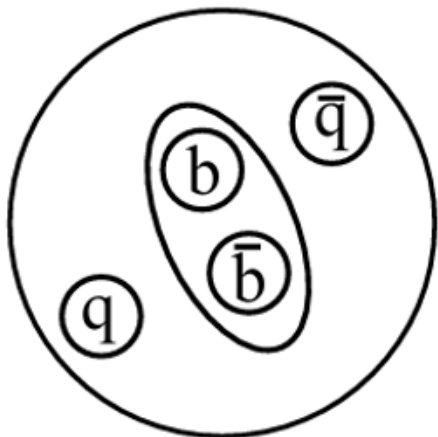
Введение / Экзотические состояния



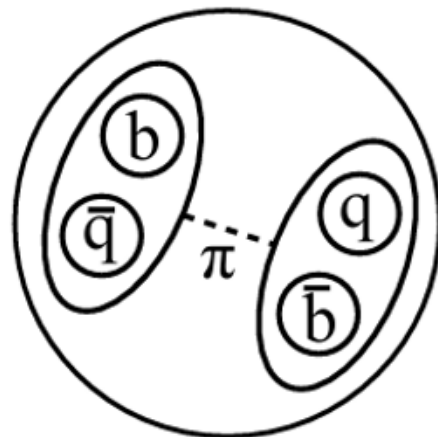
Гибрид



Компактный
тетракварк



Адро-кварконий

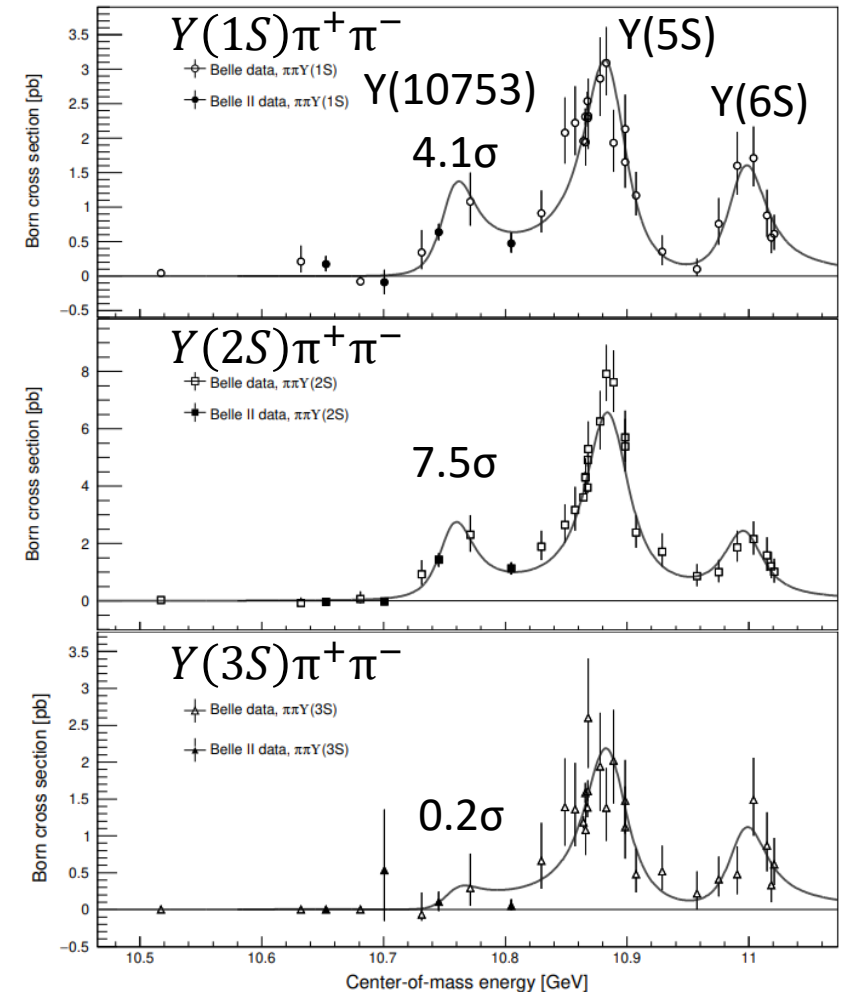


Молекула

- Неожиданные резонансы обнаружены и в семействе чармония (например $X(3872), Y(4260)$)
- Кроме $Y(10753)$, под вопросом и структура $Y(4S), Y(5S)$
- Общая четкая интерпретация отсутствует
- Необходимо проводить дальнейшее изучение этих состояний, включая переходы с излучением легких адронов

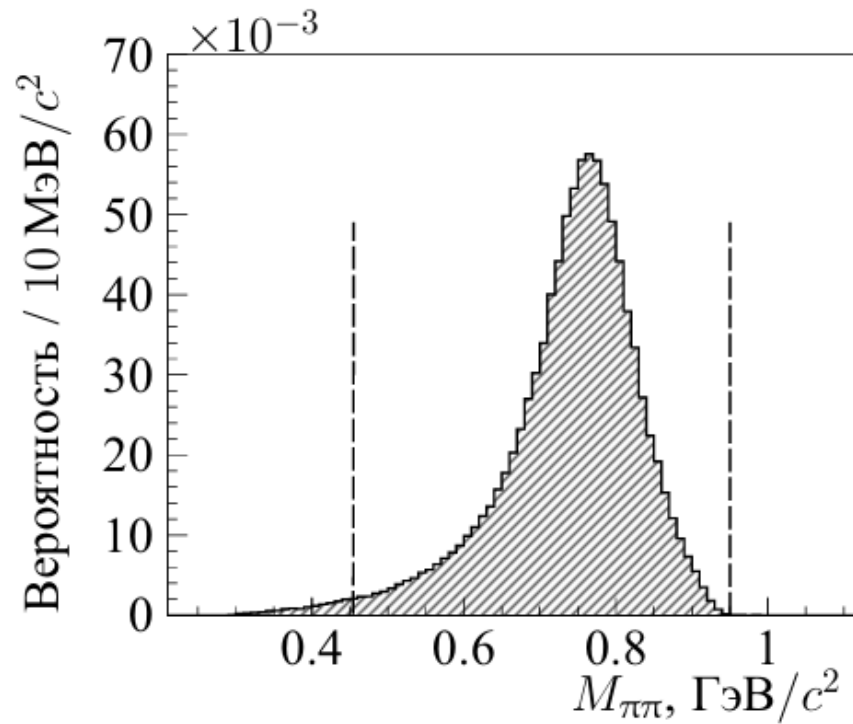
Введение / Дипионные переходы

- $Y(2S) \rightarrow Y(4S)$: $\Gamma \sim 5 \div 0.5$ КэВ, согласуется с $b\bar{b}$ структурой
- $Y(5S)$: обнаружен промежуточный Z_b
 $\Gamma \approx 180 \div 300$ КэВ
За вычетом Z_b , ширина переходов все ещё на два порядка выше, чем для $Y(2S) \rightarrow Y(4S)$
- $Y(10753)$: резонанс подтвержден, структура - ?

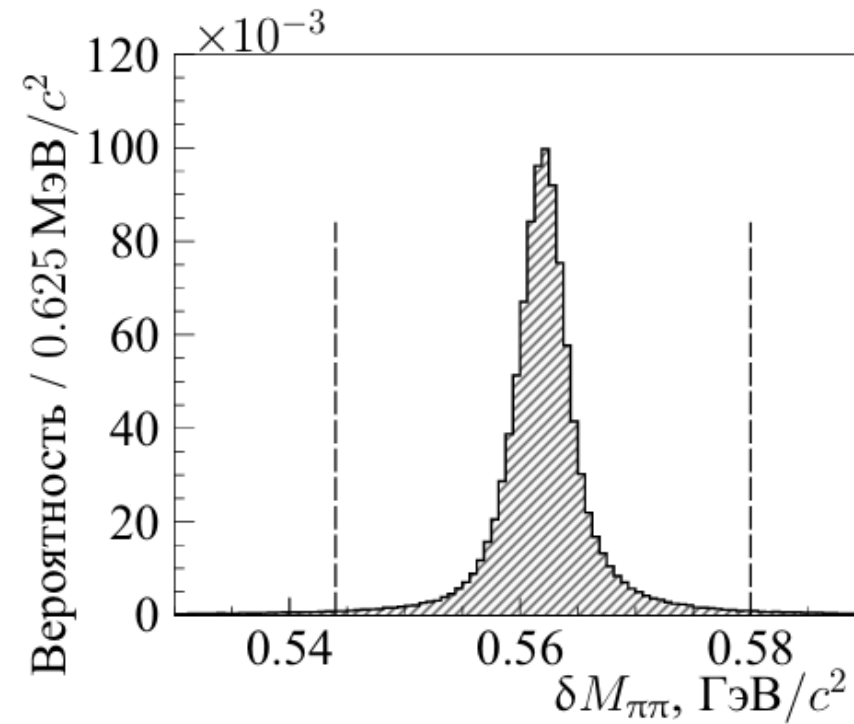


Зависимость сечения от энергии
JHEP 07 (2024) 116

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$$



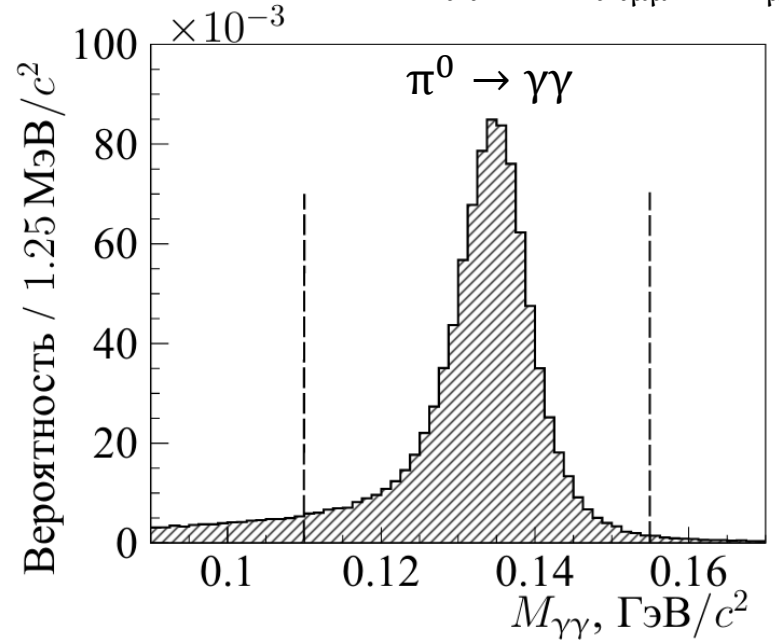
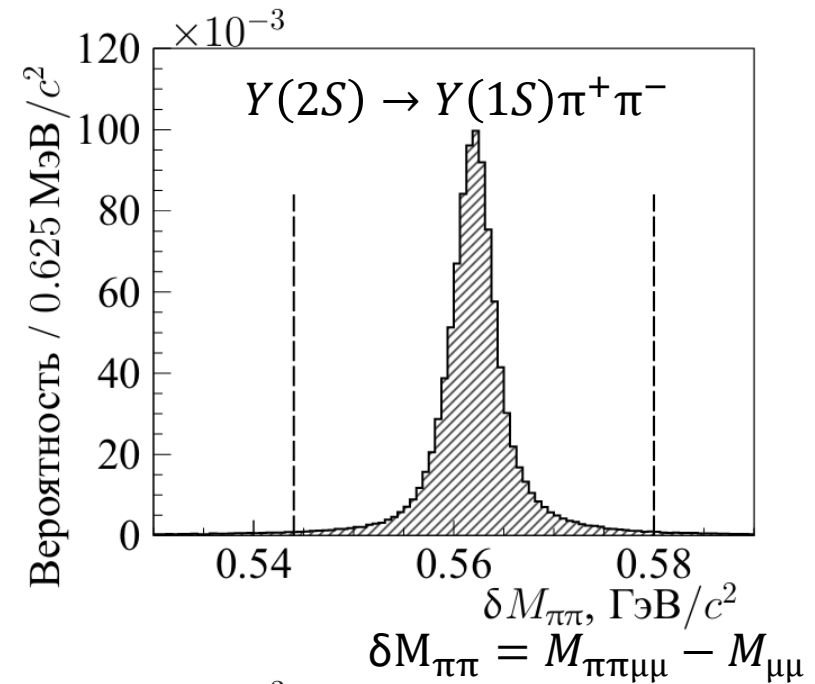
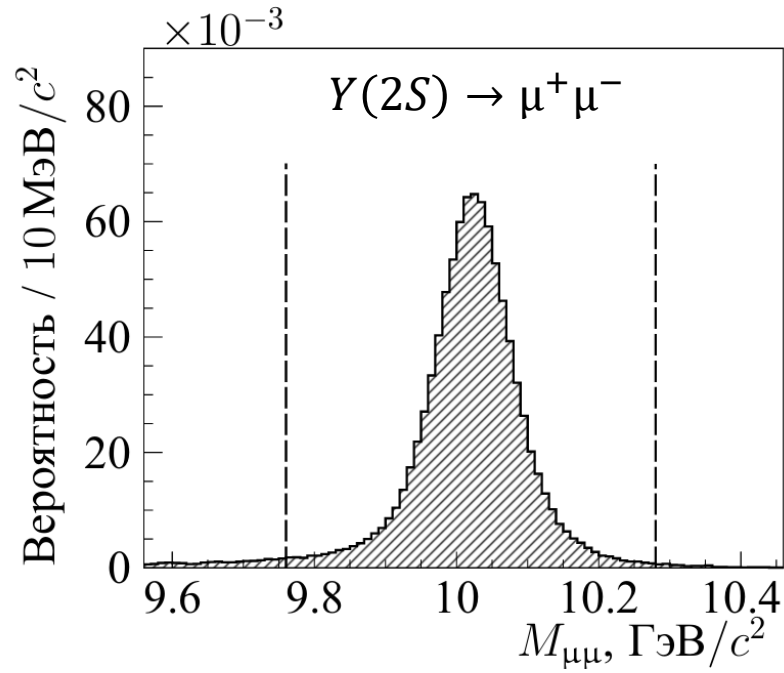
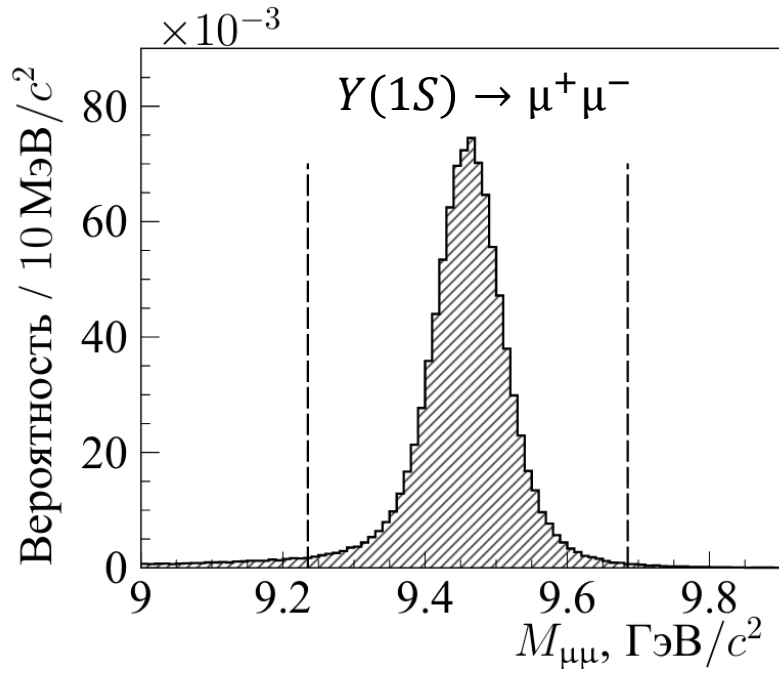
а)



б)

Рисунок 4.4 — Пример Монте-Карло распределений: а) инвариантная масса двух пионов, $M_{\pi\pi}$, для ρ^0 -мезона в моде $\Upsilon(1S)\eta'[\rho\gamma]$; б) параметр $\delta M_{\pi\pi} = M_{\mu\mu\pi\pi} - M_{\mu\mu}$ для моды $\Upsilon(2S)\eta[\gamma\gamma]$

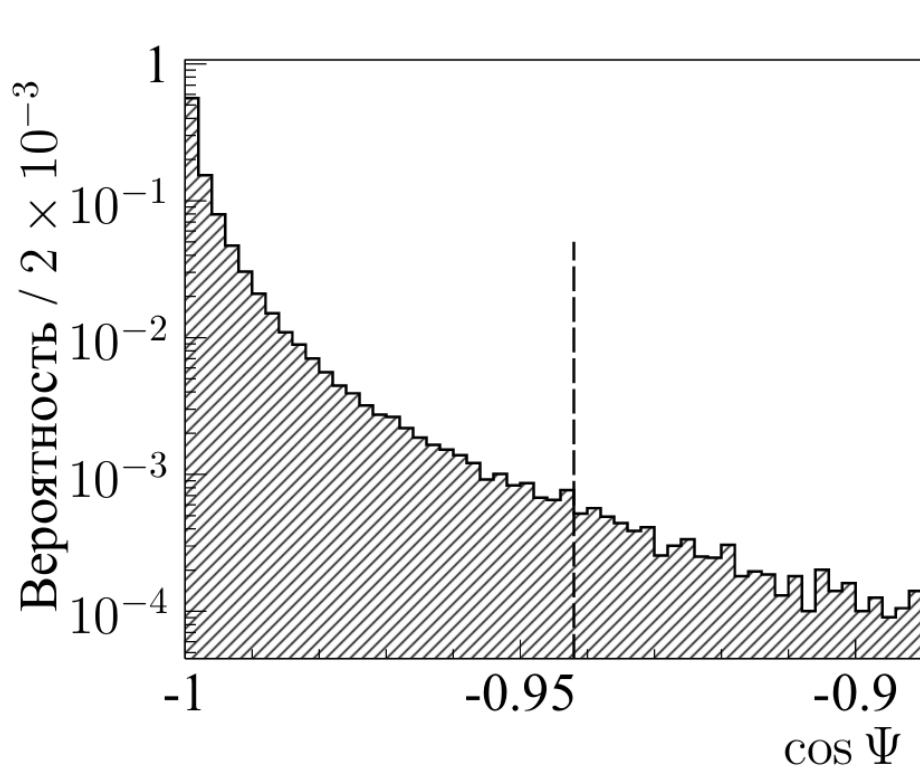
Монте-Карло моделирование



Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S) $\eta^{(\prime)}$

Монте-Карло моделирование (2)

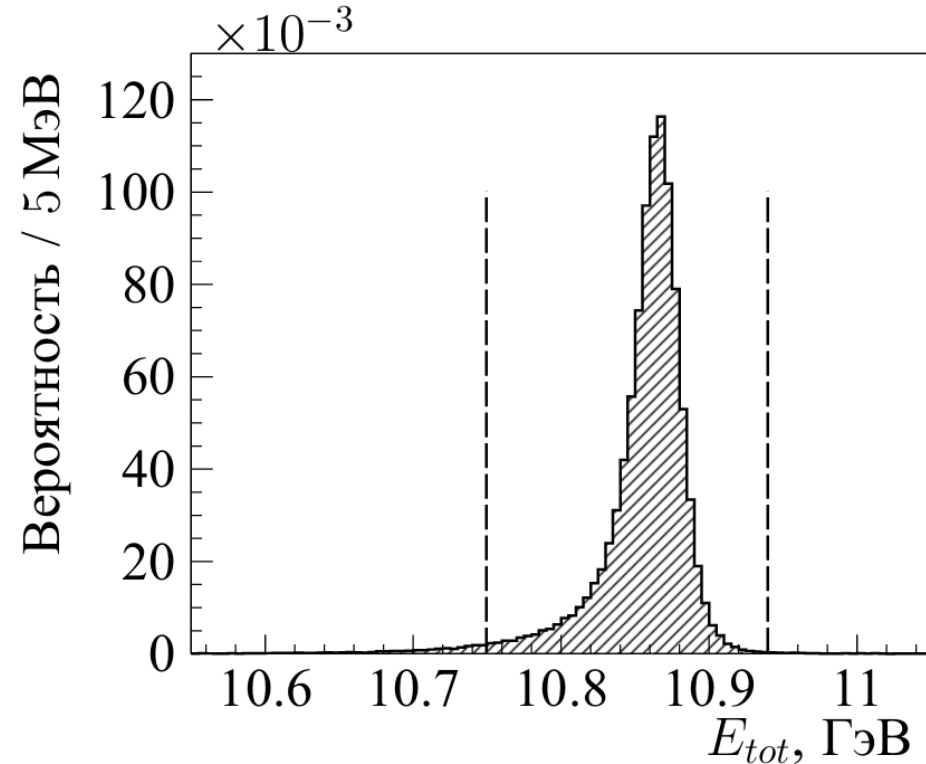
Пример распределений, отвечающих за сохранение четырех-импульса



Угол расколлинеарности

$$\Psi = \angle(\vec{P}_{\gamma\gamma}, \vec{P}_{\pi\pi\mu\mu})$$

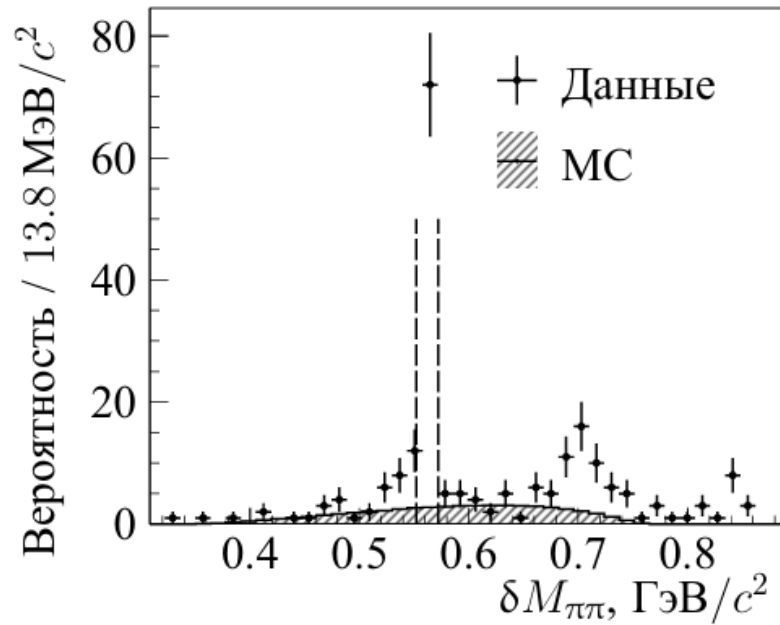
Дополнительно используется для
выбора лучшего кандидата



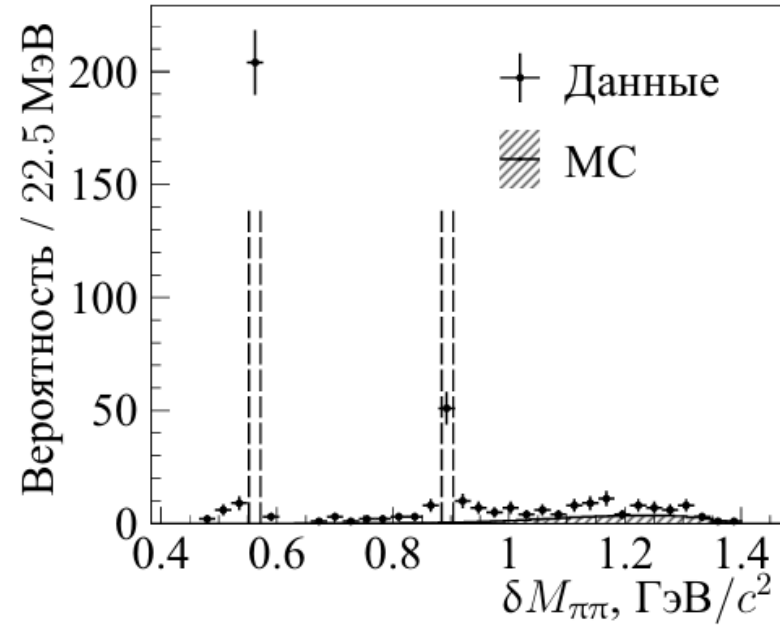
Полная энергия

$$E_{tot} = E_{\pi\pi\gamma\gamma} + \sqrt{M_{Y(1S,2S)}^2 + \vec{P}_{\mu\mu}^2}$$

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$$



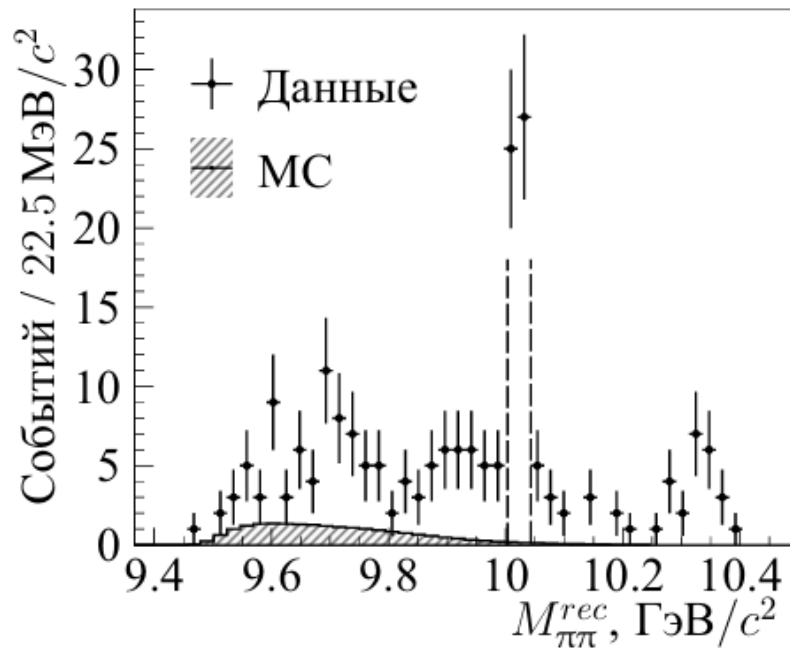
а)



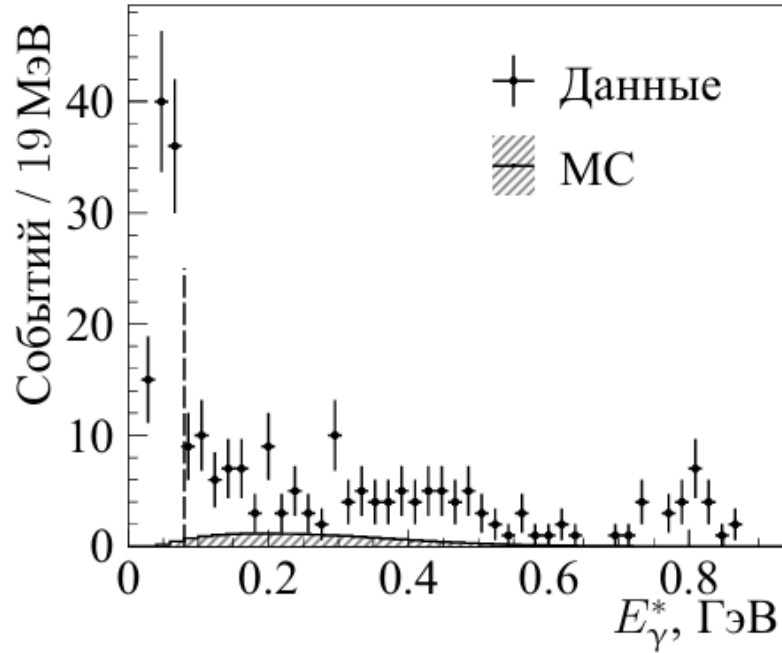
б)

Рисунок 4.5 — Экспериментальное распределение параметра $\delta M_{\pi\pi}$ для мод а) $\Upsilon(1S)\eta'[\pi\pi\eta]$ и б) $\Upsilon(1S)\eta'[\rho\gamma]$ в сравнении с Монте-Карло моделированием, нормированным на 50 сигнальных событий. Вертикальными линиями показаны исключаемые области.

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$$



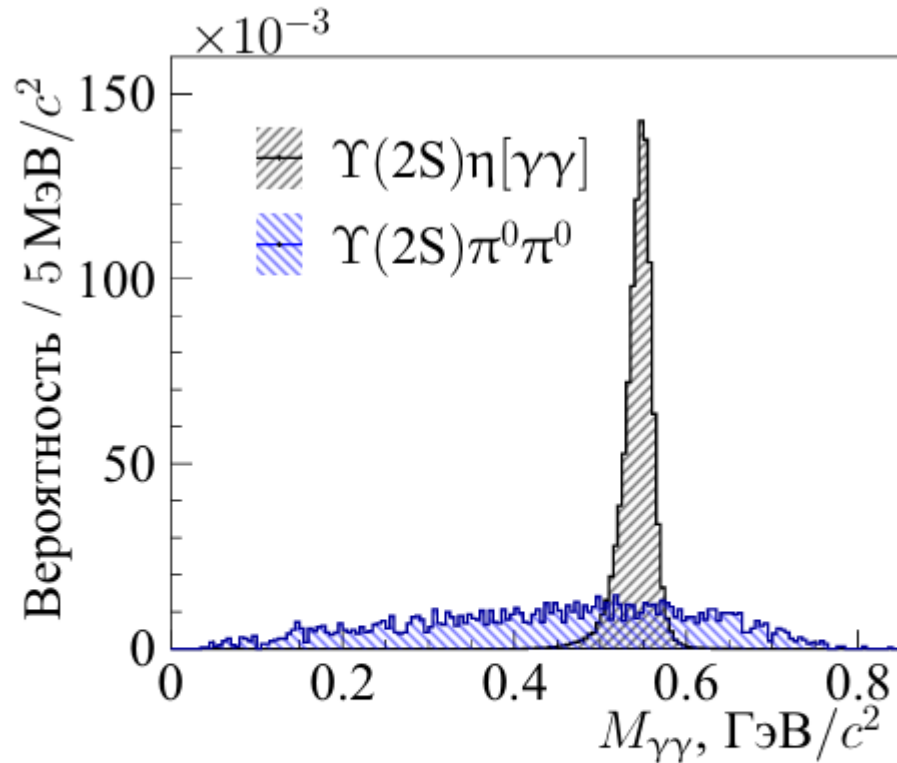
а)



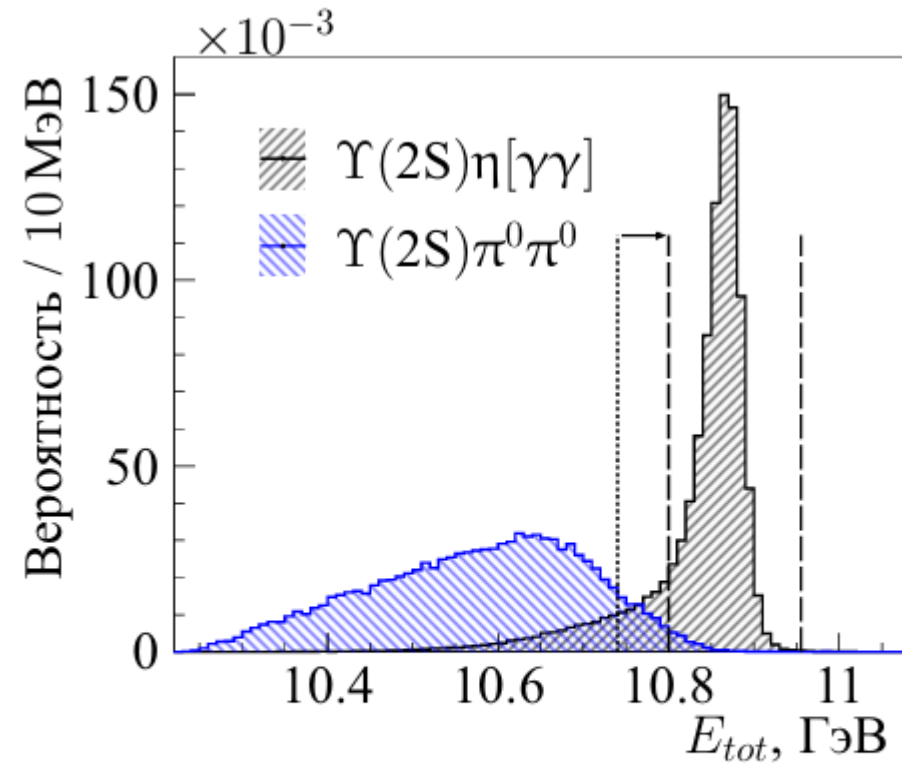
б)

Рисунок 4.6 — Экспериментальные распределения а) $M_{\pi\pi}^{rec}$ и б) E_{γ}^* для моды $\Upsilon(1S)\eta^{(\prime)}[\rho\gamma]$ в сравнении с Монте-Карло моделированием, нормированным на 20 сигнальных событий. Для а) вертикальными линиями показаны исключаемые области; для б) исключается область левее вертикальной линии.

$$Y(5S) \rightarrow Y(1S, 2S)\eta^{(\prime)}$$



а)

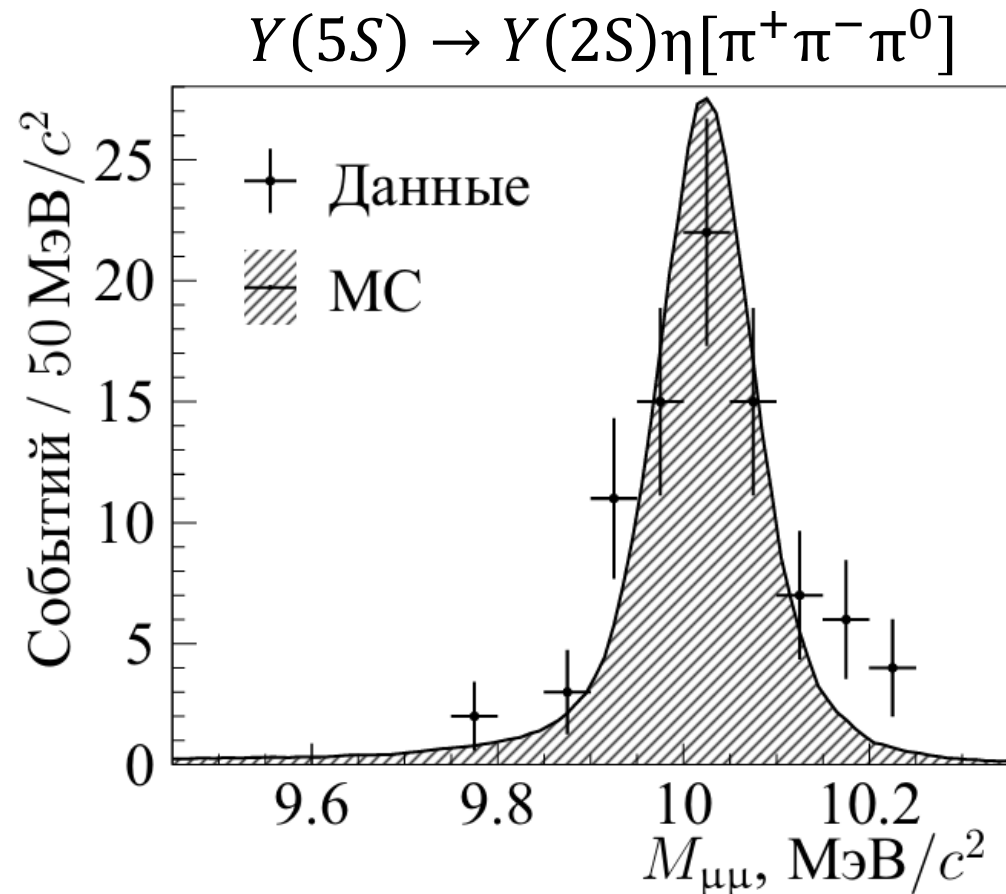
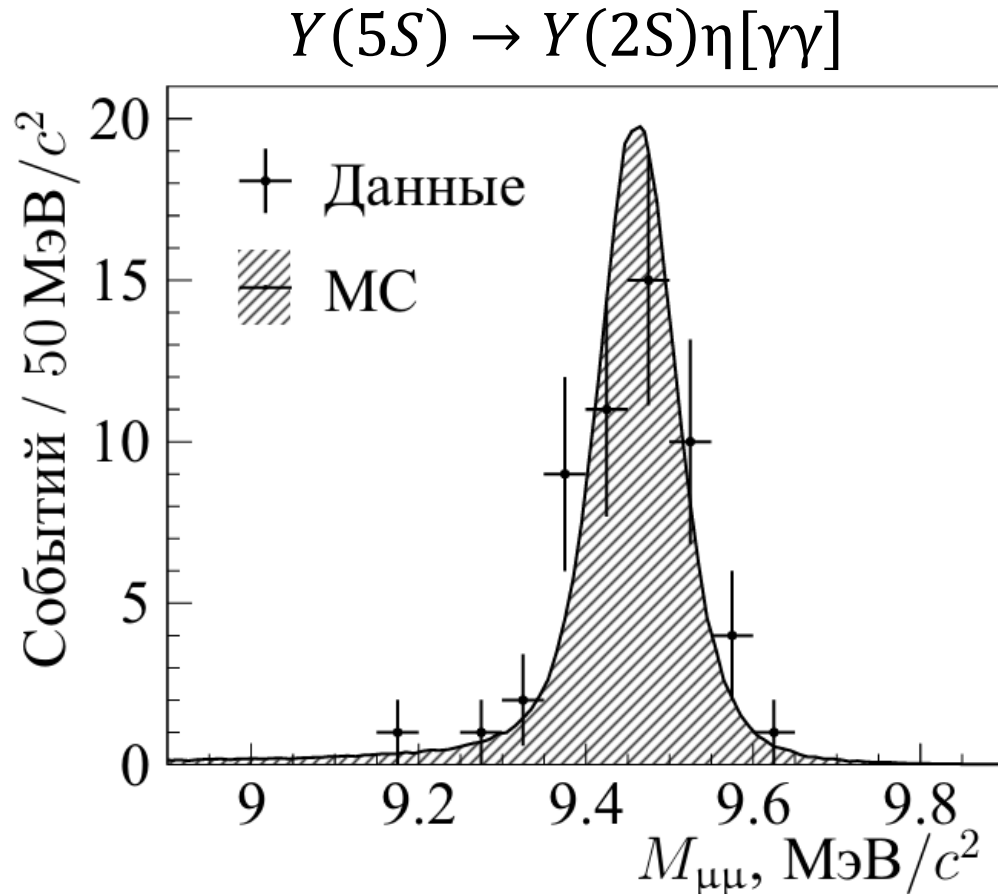


б)

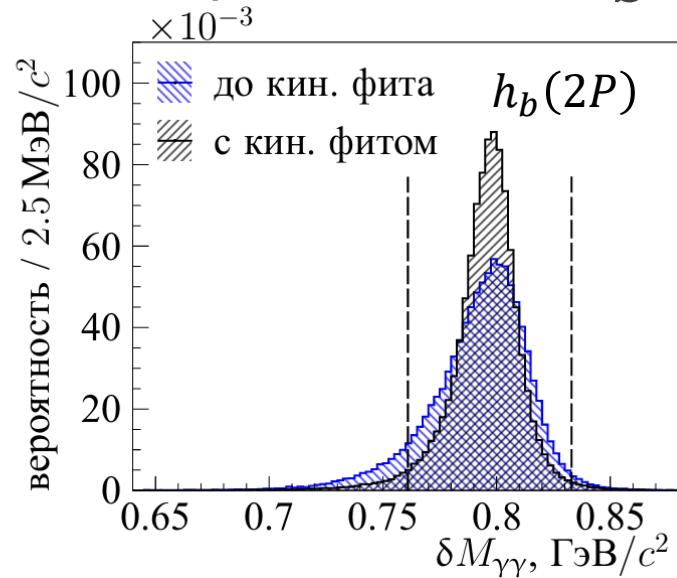
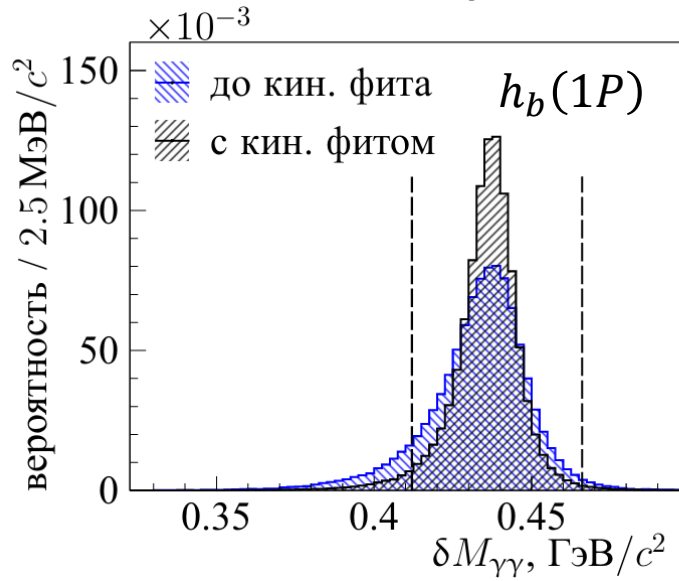
Рисунок 4.7 — Монте-Карло распределение по переменным а) $M_{\gamma\gamma}$ и б) E_{tot} для сигнальной моды $\Upsilon(2S)\eta[\gamma\gamma]$ и процесса $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(2S)\pi^0\pi^0$

Проверка наличия $Y(1S, 2S)$ резонансов

Для событий в сигнальном диапазоне $520 < M_\eta < 580 \text{ МэВ}/c^2$

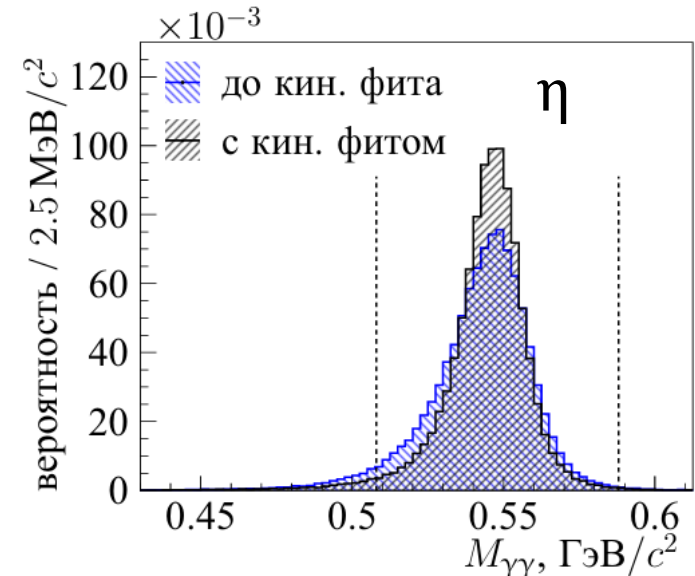
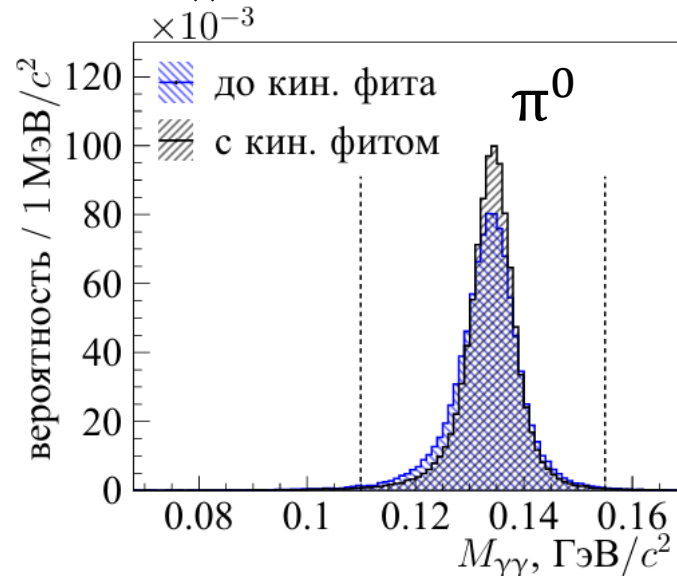


Монте-Карло моделирование $h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\eta(\pi^0)$

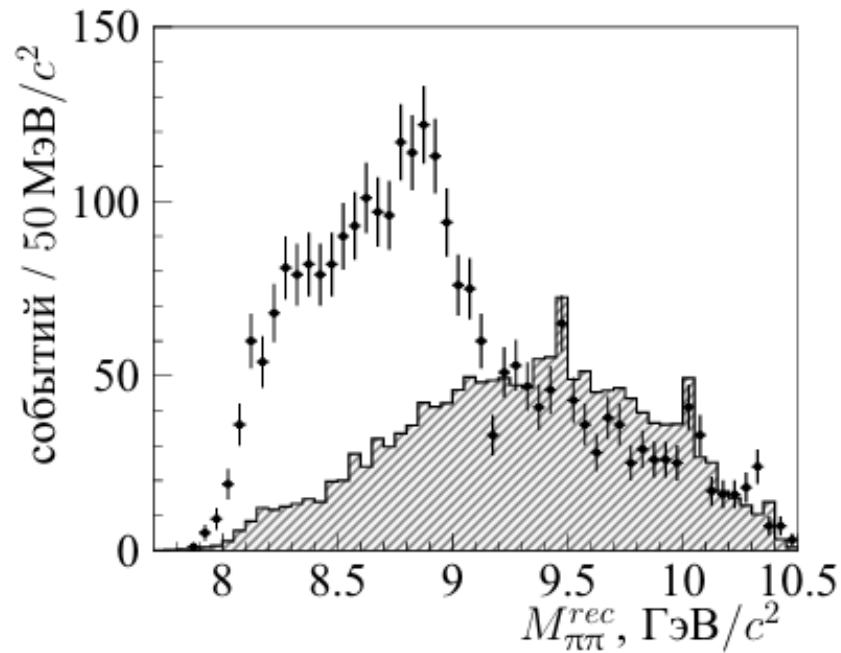


■ $\delta M_{\gamma\gamma} = M_{\gamma\gamma\text{II}} - M_{\text{II}}$ восстанавливает переход $h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\gamma\gamma$

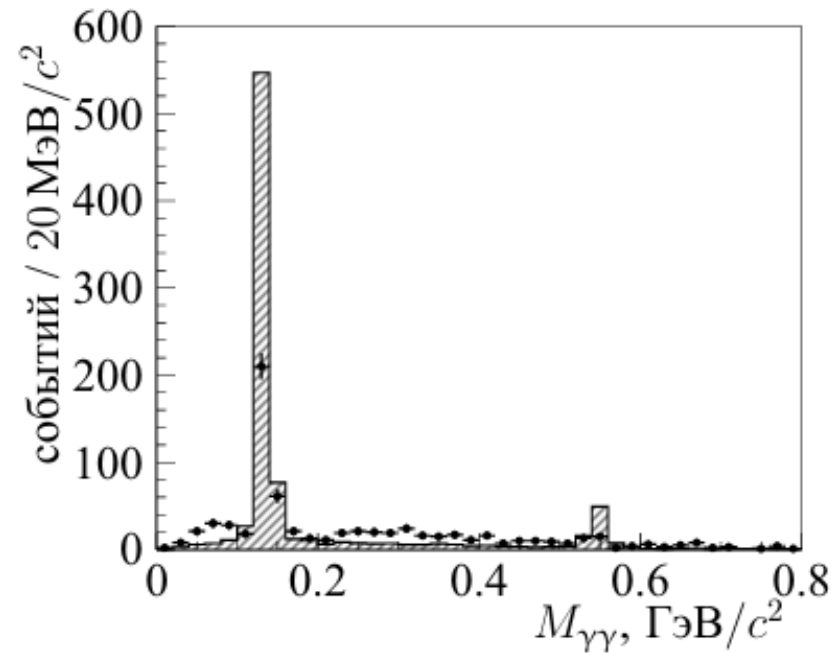
■ Одна из проекций сигнального распределения $M_{\gamma\gamma} \rightarrow M_{\eta(\pi^0)}$



$$h_b(1P, 2P) \rightarrow Y(1S)\eta(\pi^0)$$



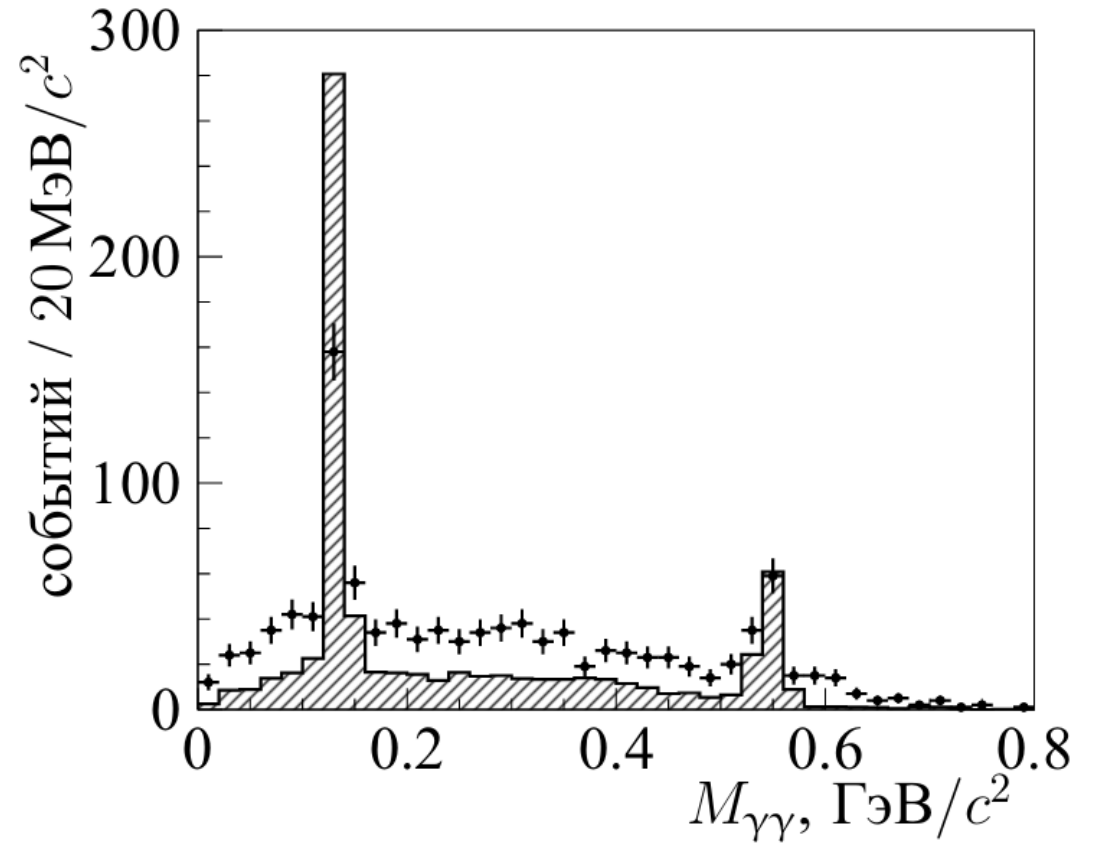
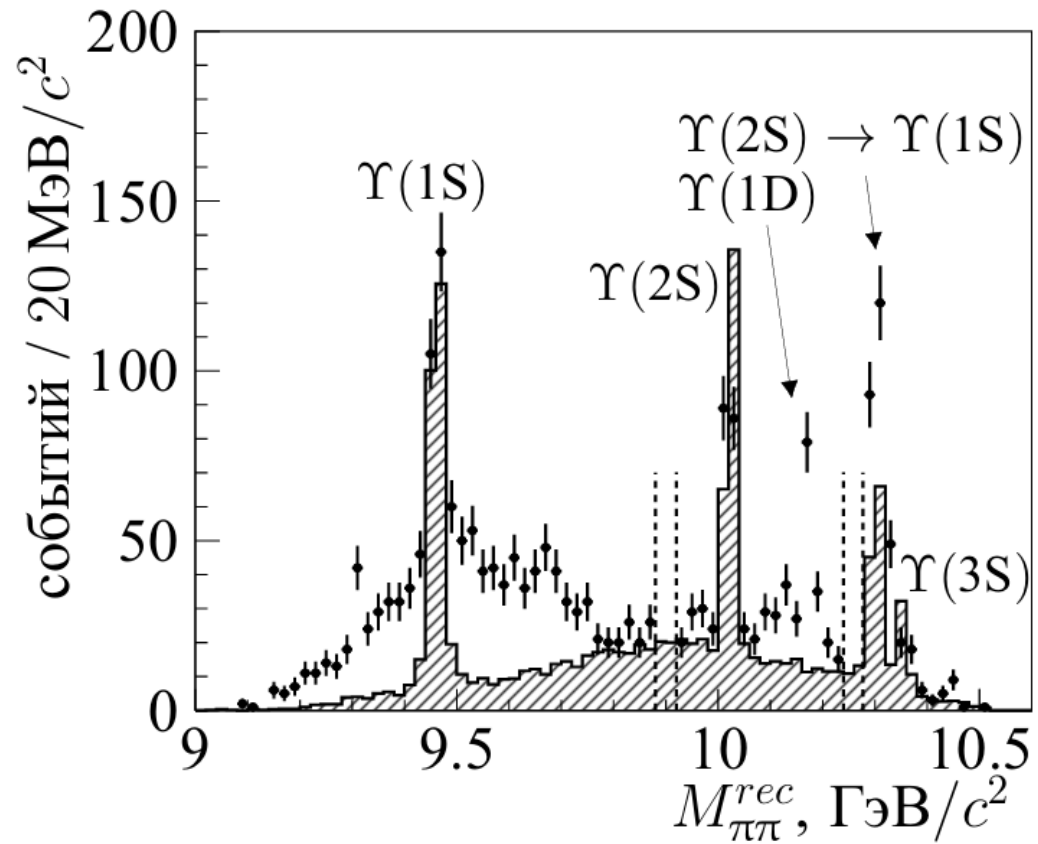
а)



б)

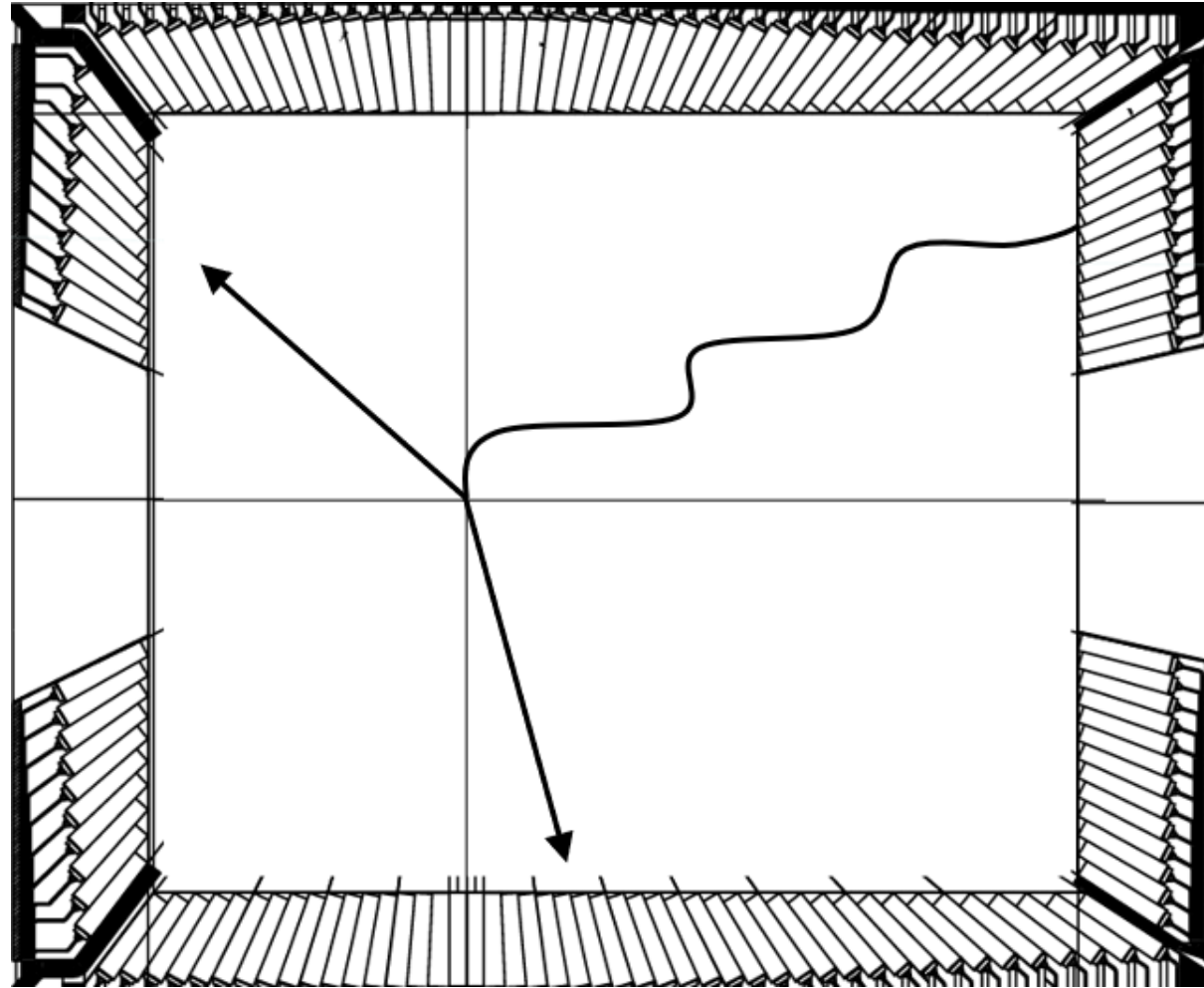
Рисунок 5.5 — Экспериментальные распределения а) $M_{\pi\pi}^{rec}$ и б) $M_{\gamma\gamma}$ (при $M_{\pi\pi}^{rec} > 9.25 \text{ ГэВ}/c^2$) в сравнении с ожидаемым фоном из моделирования для диапазона $8 \text{ ГэВ}/c^2 < M_{e\ell} < 9 \text{ ГэВ}/c^2$. Точками изображены данные, а гистограмма — результаты Монте-Карло моделирования.

ФОН



Сравнение экспериментальных распределений с ожидаемым фоном.
Требуется только наличие $\Upsilon(1S)$, критерий χ^2 и $\theta_{\pi\pi}$

Монитор светимости



Событие $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, которое засчитается
как событие со смещенной топологией

Монитор светимости

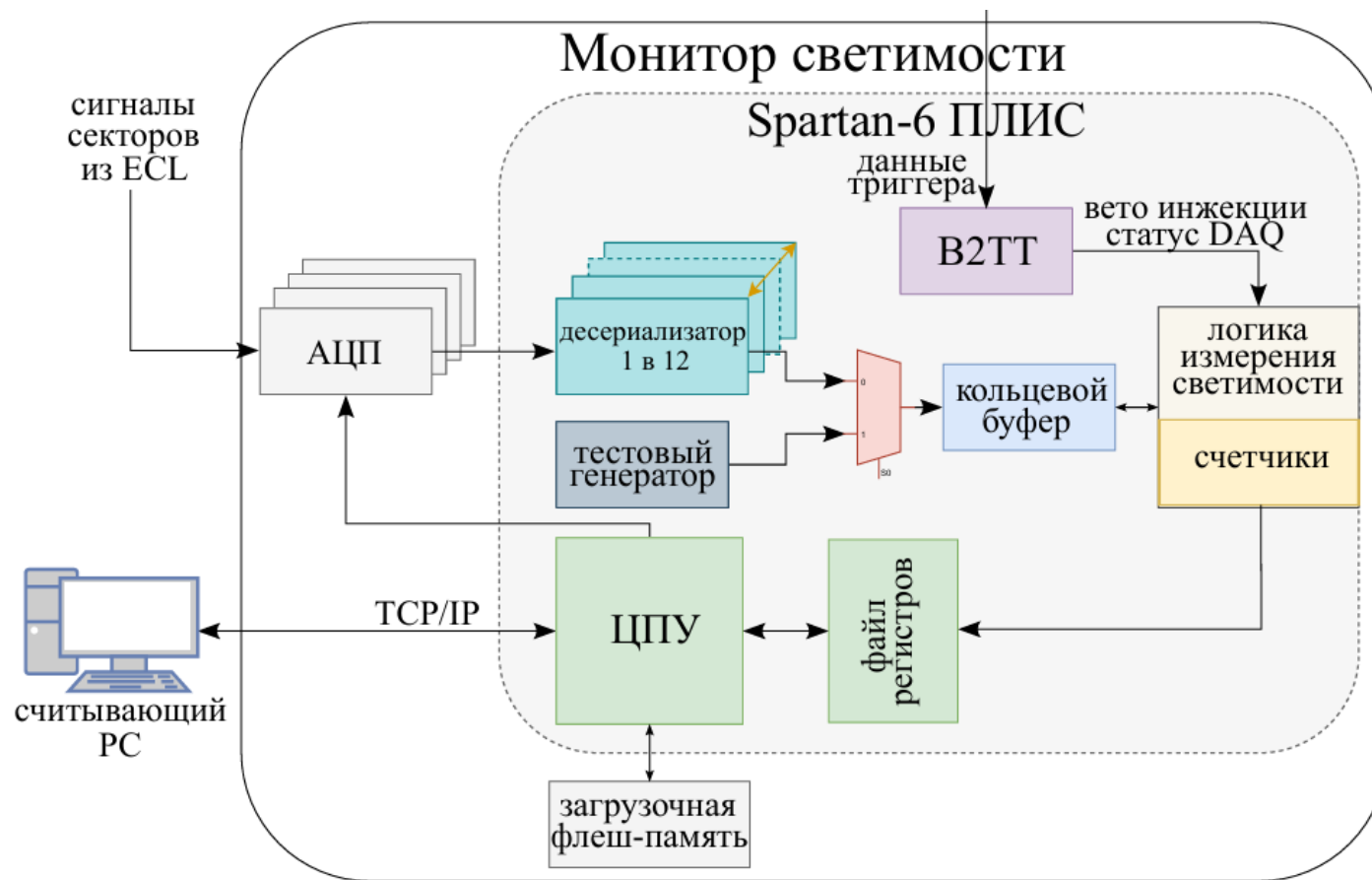


Рисунок 3.4 – Схема прошивки Монитора светимости

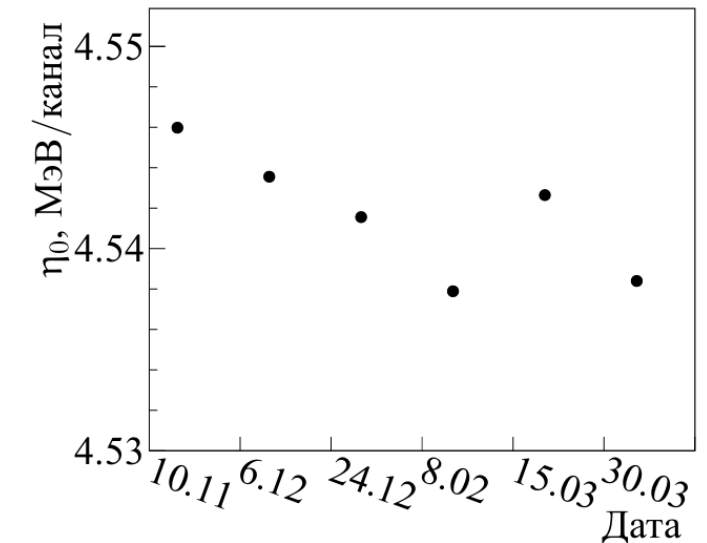
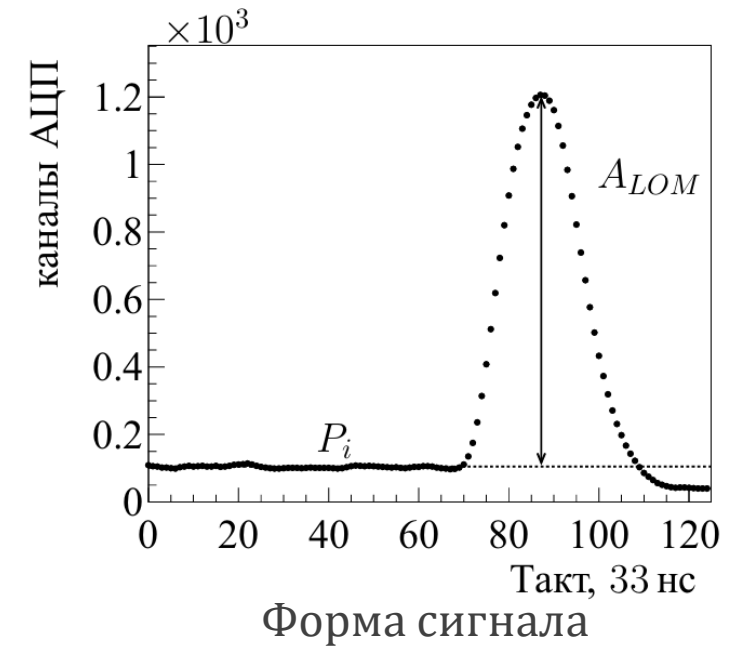
Энергетическая калибровка

Для правильной установки порогов необходимо регулярно проводить калибровку и определять:

- Пьедесталы
- Коэффициент перевода «каналы АЦП» → МэВ

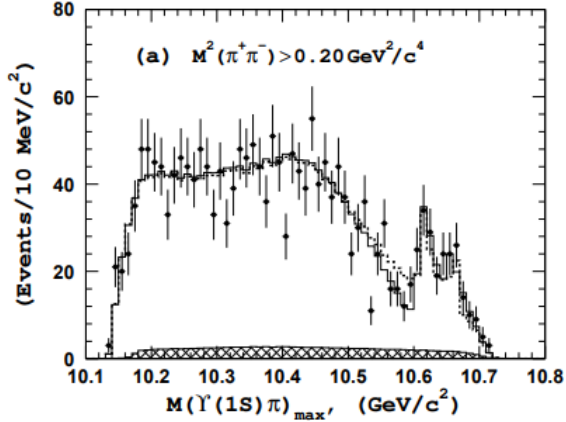
Сравнивая среднюю амплитуду тестовых импульсов в Мониторе светимости и в DAQ:

- $\eta_i = \frac{A_{DAQ}(\text{ГэВ})}{A_{LOM}(\text{каналов АЦП})}$
- Стабильность во времени лучше 0.5%

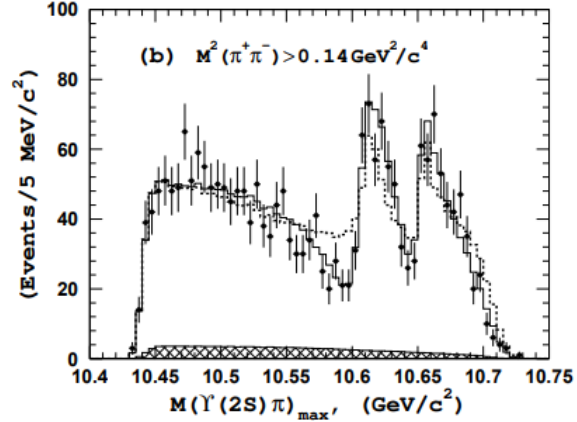


Z_b в дипионных переходах

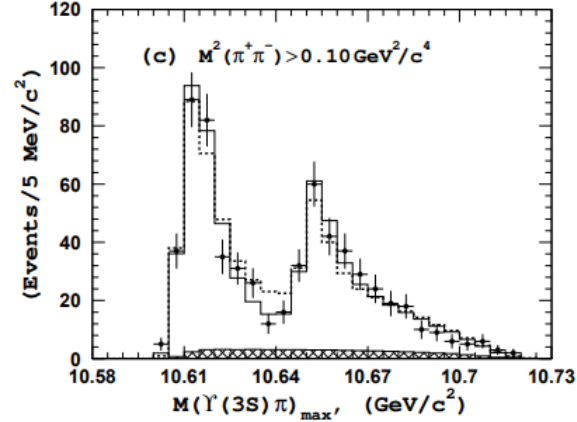
$Y(5S) \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-$



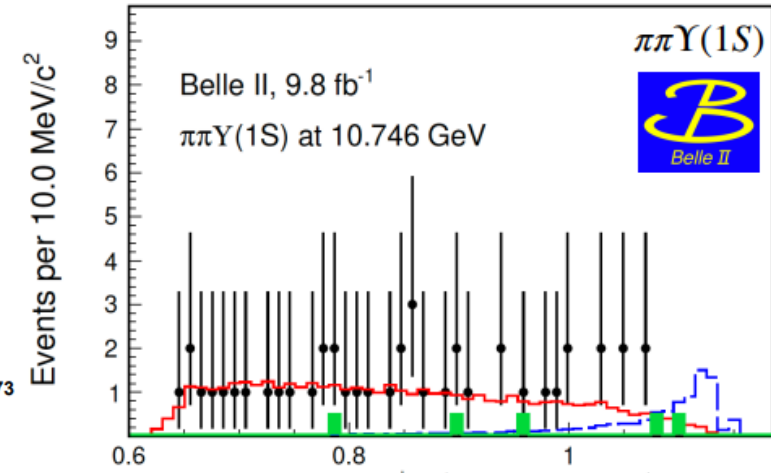
$Y(5S) \rightarrow Y(2S)\pi^+\pi^-$



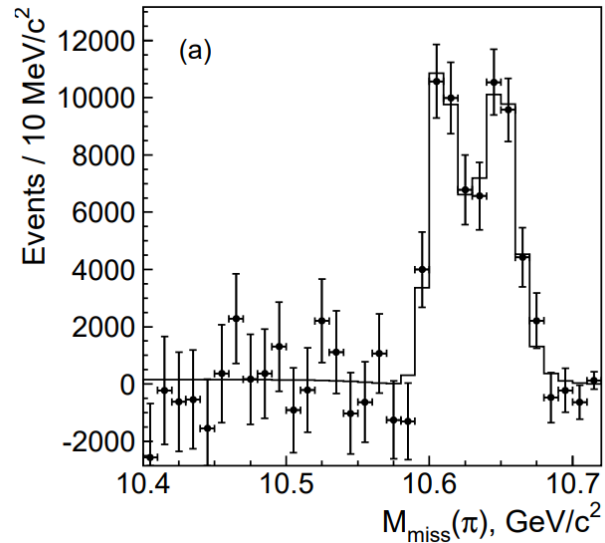
$Y(5S) \rightarrow Y(3S)\pi^+\pi^-$



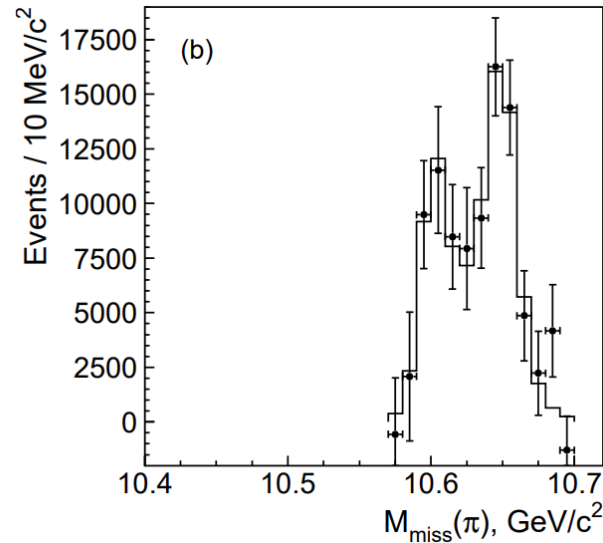
$Y(10753) \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-$



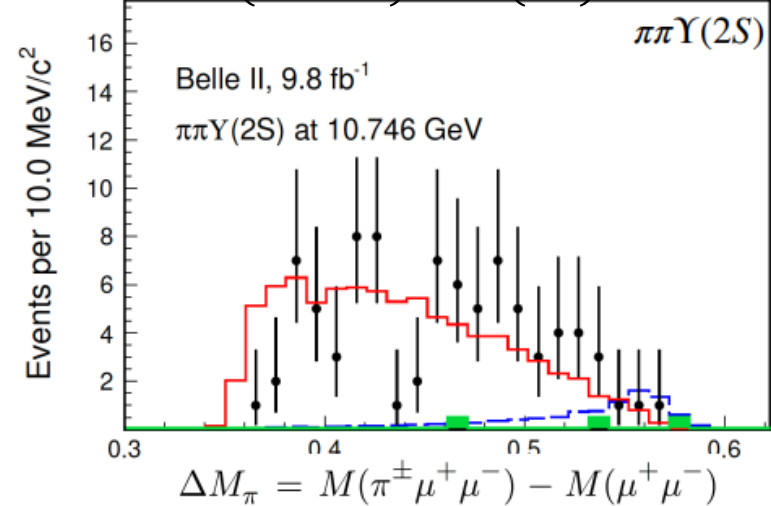
$Y(5S) \rightarrow h_b(1P)\pi^+\pi^-$



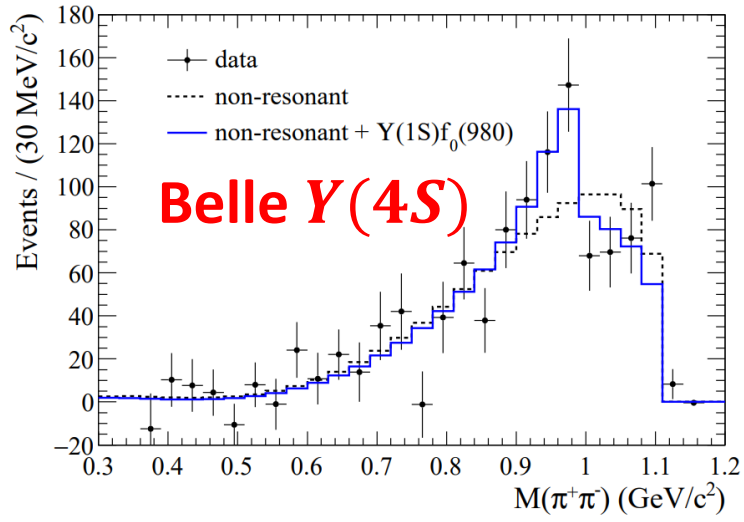
$Y(5S) \rightarrow h_b(2P)\pi^+\pi^-$



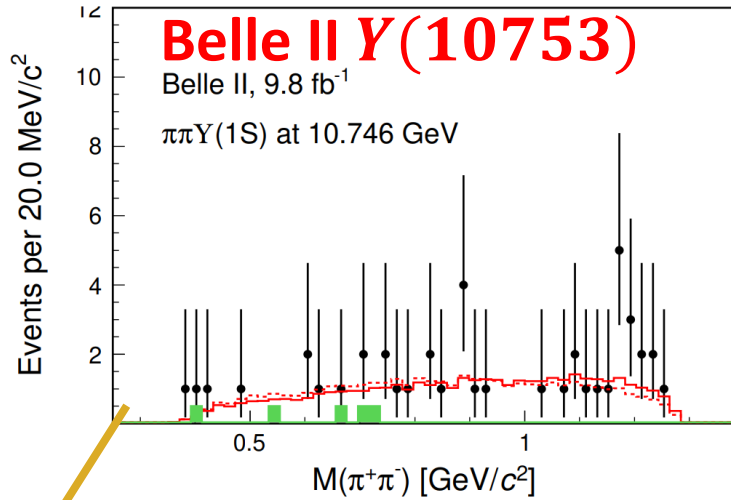
$Y(10753) \rightarrow Y(2S)\pi^+\pi^-$



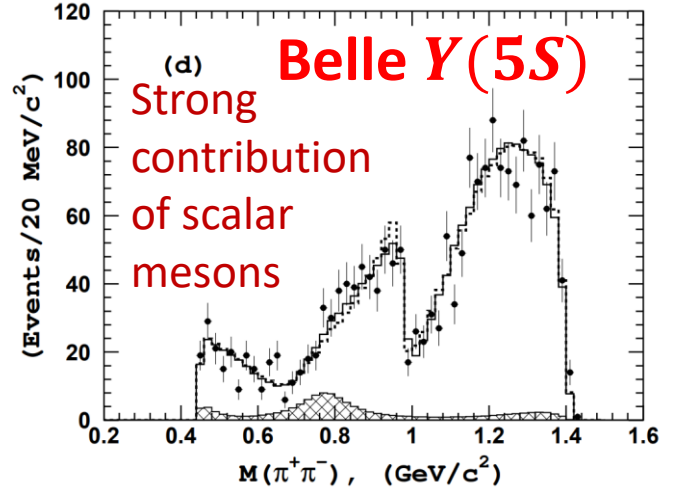
Спектр дипионной массы $Y(1S)\pi^+\pi^-$



PRD 96 (2017) 5, 052005

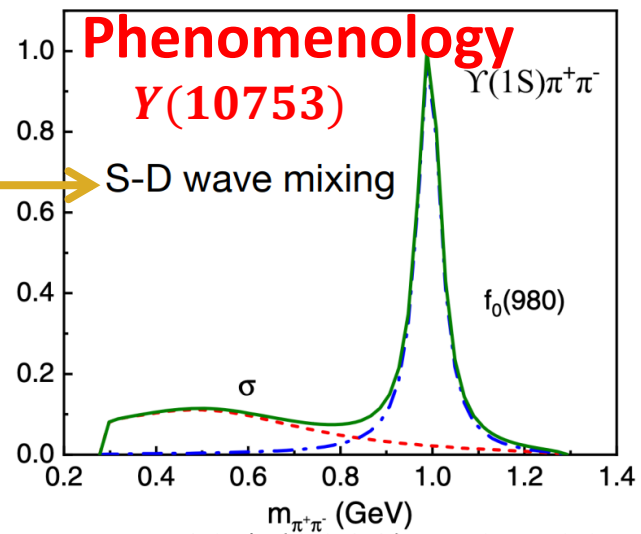


JHEP 07 (2024) 116

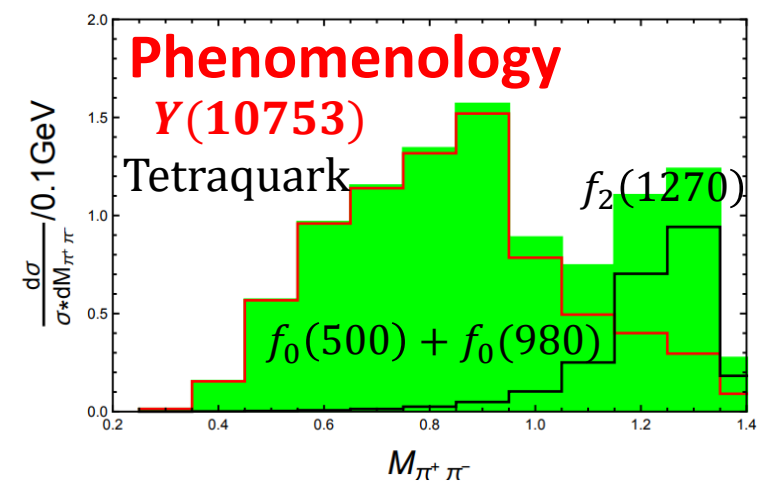


PRD 91 (2015) 7, 072003

- $Y(4S)$: указание на $f_0(980)$
- $Y(10753)$: нет $f_0(980)$, нет S-D смешивания, согласуется компактным тетракварком?
- $Y(5S)$: $Z_b, f_0(980), (\pi^+\pi^-)_{D \text{ wave}}$



PRD 105 (2022) 7, 074007

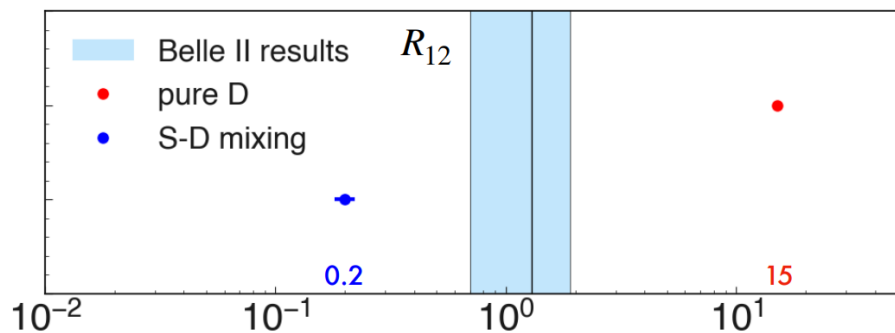


PLB 802 (2020) 135217

$Y(10753, 5S) \rightarrow \chi_{bJ}(1P)\omega$

■ $Y(10753)$: наблюдались ($J = 1, 2$)

$$R_{12} = \frac{\Gamma_{ee} \times B[Y(10753) \rightarrow \chi_{b1}(1P)\omega]}{\Gamma_{ee} \times B[Y(10753) \rightarrow \chi_{b2}(1P)\omega]} = 1.3 \pm 0.6$$



PRD 104, 034036 (2021)

PLB 2014.09.043

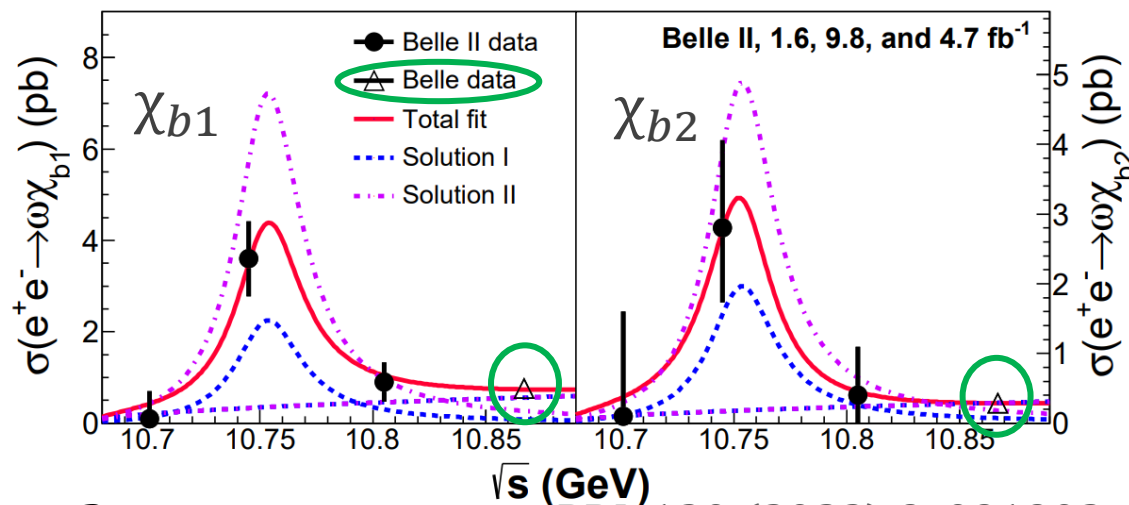
Не согласуется с 3D, 1.8σ отклонение от S-D смешивания

■ $Y(5S)$: наблюдались ($J = 1, 2$)

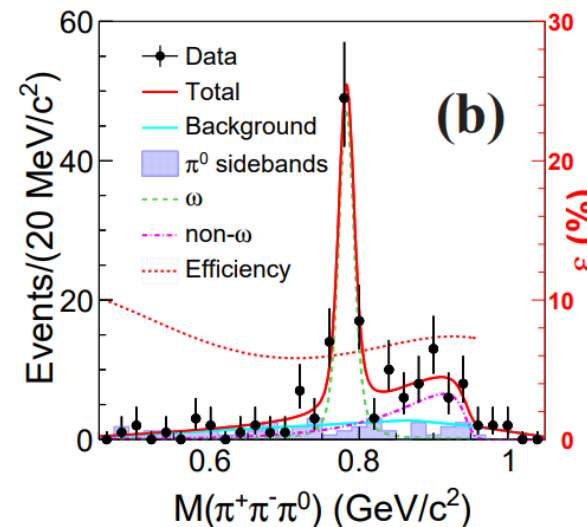
$$R_{12} = 2.6 \pm 1.1 \quad (0.63 \text{ ожидается для } b\bar{b} 5S)$$

$$\frac{\sigma[e^+e^- \rightarrow \chi_{b1}(1P)\omega]}{\sigma[e^+e^- \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-]} \approx \begin{cases} 5.6 @ Y(10753) \\ 0.3 @ Y(5S) \end{cases}$$

Различная структура? Хвост от $Y(10753)$?



Зависимость сечения PRL 130 (2023) 9, 091902



Распределение на $Y(5S)$ PRL 113 (2014) 14, 142001

$Y(4S, 10753, 5S) \rightarrow \eta_b(1S)\omega$

- $Y(4S)$: PRD 102 (2020) 9, 092011
 $B[Y(4S) \rightarrow \eta_b(1S)\omega] < 1.8 \times 10^{-4}$
 $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \eta_b(1S)\omega)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow Y(1S)\pi^+\pi^-)} < 2.2$
- $Y(10753)$: PRD 109 (2024) 7, 072013
 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \eta_b(1S)\omega) < 2.5 \text{ pb}$
 $R < 1.25$
- $Y(5S)$: PRD 102 (2020) 9, 092011
 $B[Y(5S) \rightarrow \eta_b(1S)\omega] < 1.3 \times 10^{-3}$
 $B[Y(5S) \rightarrow \eta_b(2S)\omega] < 5.6 \times 10^{-3}$
 $R < 0.25$

Не согласуется с компактным тетракварком?

