

# Однофотонная физика с детектором КЕДР на ВЭПП-4М

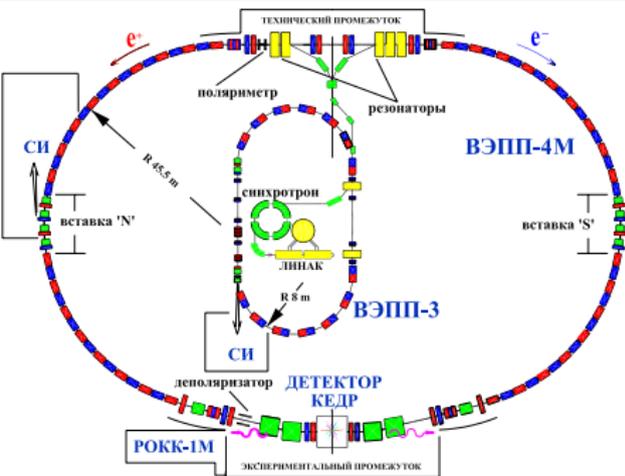
А.Г. Шамо́в

ИЯФ СО РАН  
08.04.2021

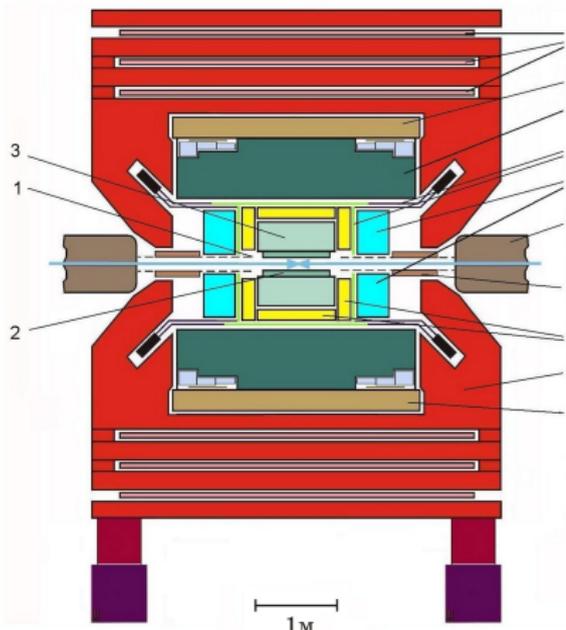
## Содержание

- Ускорительный комплекс ВЭПП-4М и детектор КЕДР
- Результаты
  - Измерение величины  $R$ .
  - Измерение масс и ширин  $\psi$ - резонансов.
- Планы
  - Измерение масс и ширин  $\Upsilon$ - резонансов.
  - Двухфотонная физика +  $R$  выше 7 ГэВ

# ВЭПП-4М и КЕДР



## Детектор КЕДР



- |                                    |                               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 1 - Вакуумная камера               | 7 - Сверхпроводящая катушка   |
| 2 - Вершинный детектор             | 8 - Ядро магнита              |
| 3 - Дрейфовая камера               | 9 - Мюонные камеры            |
| 4 - Пороговые азотгелевые счётчики | 10 - Цезий-йодовый калориметр |
| 5 - Время-пролетные счётчики       | 11 - Компенсирующий соленоид  |
| 6 - Жидко-криптоновый калориметр   | 12 - Квадруполь               |

Энергия  $0.9 \div 5$  ГэВ  
 Число сгустков  $2 \times 2$   
 Пиковая светимость, 3.5 ГэВ  $1 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$   
 Точность измерения энергии ниже 2 ГэВ:

- Методом резонансной деполяризации  $10 \div 30$  кэВ
- Методом обратного комптоновского рассеяния  $\sim 100$  кэВ

Лазерный поляриметр для измерения энергии выше 2 ГэВ (стадия разработки)

# Мотивация измерения величины $R(s)$

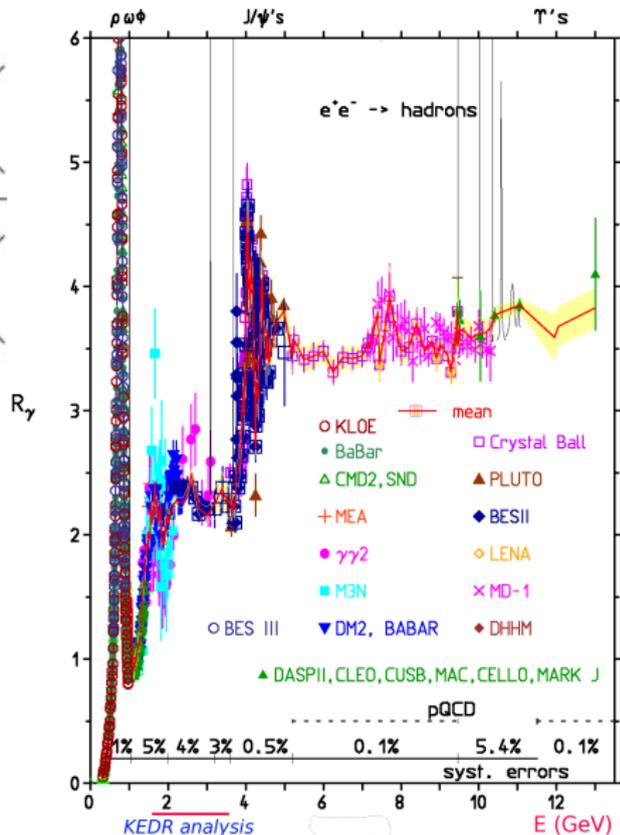
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)} \approx \frac{\text{[Diagram 1]}}{\text{[Diagram 2]}}$$

В первом приближении:

$$R(s) \simeq 3 \sum_f Q_f^2$$

$R(s)$  используется для вычисления:

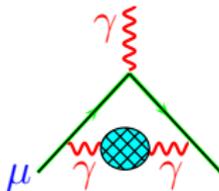
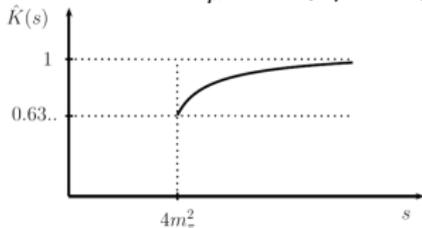
- $\alpha(M_Z^2)$
- $(g_\mu - 2)/2$
- $\alpha_s(s)$
- Масс тяжёлых кварков



F. Jegerlehner arXiv:1511.0447

# Вклад $R$ в измерение $a_\mu$ и $\alpha(M_Z^2)$

$$a_\mu^{\text{exp}} = (g_\mu - 2)/2$$

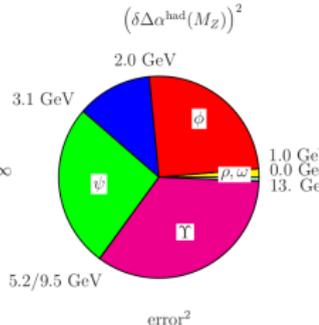
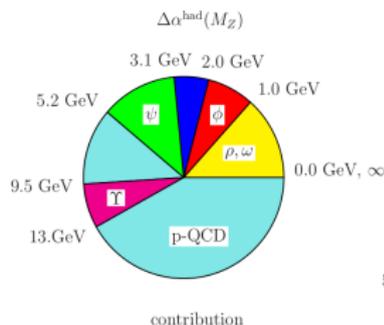
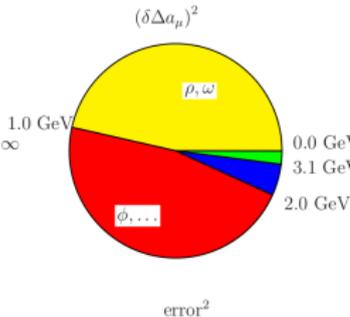
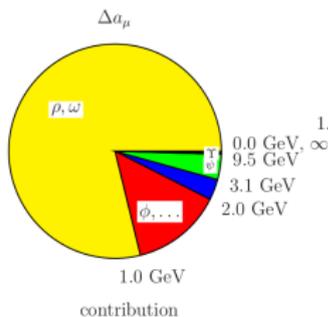


$$a_\mu^{\text{LO VP}} = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{\hat{K}(s)R(s)}{s^2} ds$$

$$\alpha(s) = \frac{\alpha}{1 - \Delta\alpha(s)}$$

$$\Delta\alpha = \sum_f \text{loop} = \Delta\alpha_{\text{lep}}(s) + \Delta\alpha_{\text{had}}(s)$$

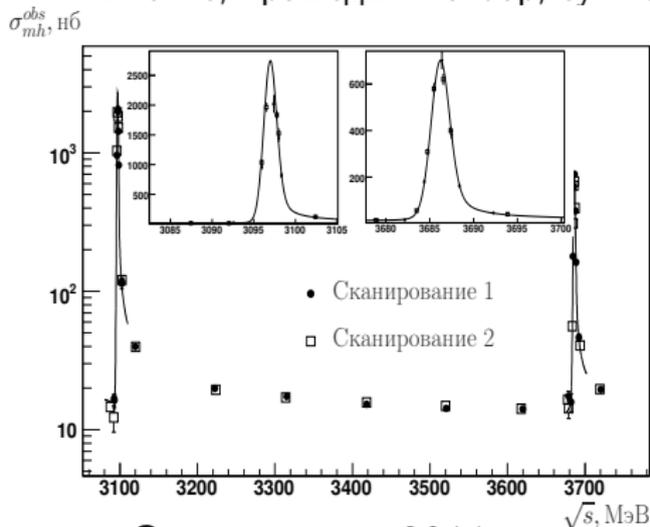
$$\Delta\alpha^{(5)}(M_Z^2) = -\frac{\alpha M_Z^2}{3\pi} \text{Re} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{R(s)ds}{s(s - M_Z^2 - i\epsilon)}$$



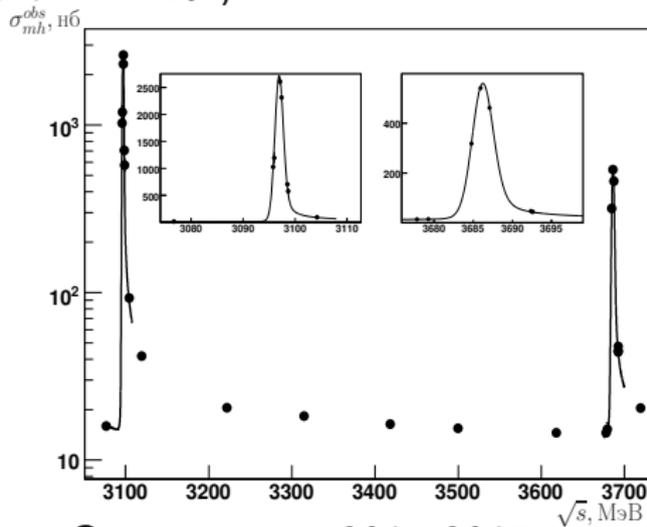
A. Blondel и др. arXiv:1905.05078.

# Эксперимент по измерению величины $R$ в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ

- В диапазоне энергий от 1.84 до 3.05 ГэВ интеграл светимости  $0.66 \text{ пб}^{-1}$  набран в 13 точках с шагом  $\sim 0.1 \text{ ГэВ}$ ,  $\sim 10^3$  событий в точке (суммарно  $1.5 \times 10^4$ ).
- В диапазоне энергий от 3.08 до 3.72 ГэВ интеграл светимости  $2.7 \text{ пб}^{-1}$  набран в 9 точках по энергии.  $2 \div 6 \times 10^3$  число многоадронных событий в точке, прошедших отбор, суммарно  $\sim 4 \times 10^4$



Эксперимент 2011 г.



Эксперимент 2014-2015 гг.

# Процедура определения $R$

Способ измерения  $R$ :

$$R = \frac{\sigma_{obs}(s) - \sum \varepsilon_{\psi}^{tail}(s)\sigma_{\psi}^{tail}(s) - \sum \varepsilon_{bg}^i(s)\sigma_{bg}^i(s)}{\varepsilon(s)(1 + \delta(s))\sigma_{\mu\mu}^0}$$

$$\text{где } \sigma_{obs}(s) = \frac{N_{mh} - N_{res.bg.}}{\int \mathcal{L} dt}, \quad \sigma_{\mu\mu}^0(s) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s},$$

$N_{mh}$  — число событий, прошедших условия отбора,

$N_{res.bg.}$  — вклад пучкового фона,  $\varepsilon(s)$  — эффективность регистрации,

$\sum \varepsilon_{\psi}^{tail}(s)\sigma_{\psi}^{tail}(s)$  — вклад  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов,

$\sum \varepsilon_{bg}^i(s)\sigma_{bg}^i(s)$  — вклад процессов:  $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$ ,  $e^+e^-X$ .

$$1 + \delta(s) = \int \frac{dx}{1-x} \frac{\mathcal{F}(s,x)}{|1 - \tilde{\Pi}((1-x)s)|^2} \frac{\tilde{R}((1-x)s)\varepsilon((1-x)s)}{R(s)\varepsilon(s)}$$

$\mathcal{F}(s,x)$  — функция радиационных поправок (Э.А.Кураев, В.С.Фадин  
Sov.J.Nucl.Phys.41 (466-472) 1985)

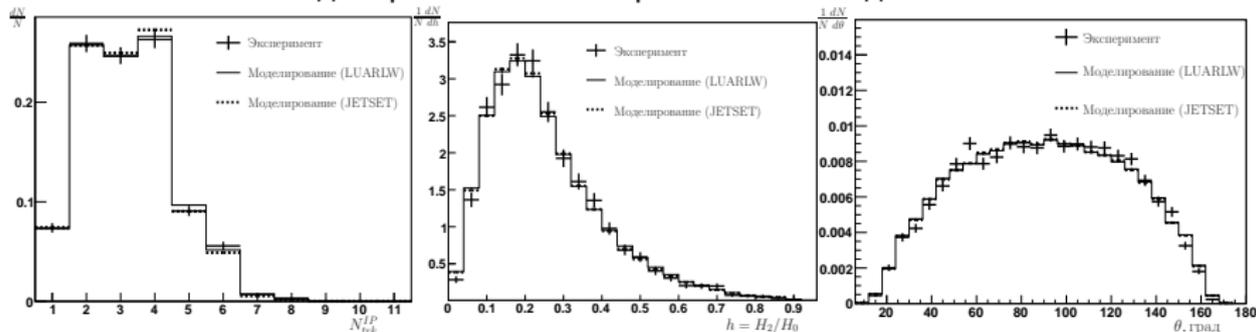
Здесь  $\tilde{\Pi}$  и  $\tilde{R}$  не включают вклад  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов.

**Измеряемая величина  $R_{uds}$  !**

# Основные особенности анализа

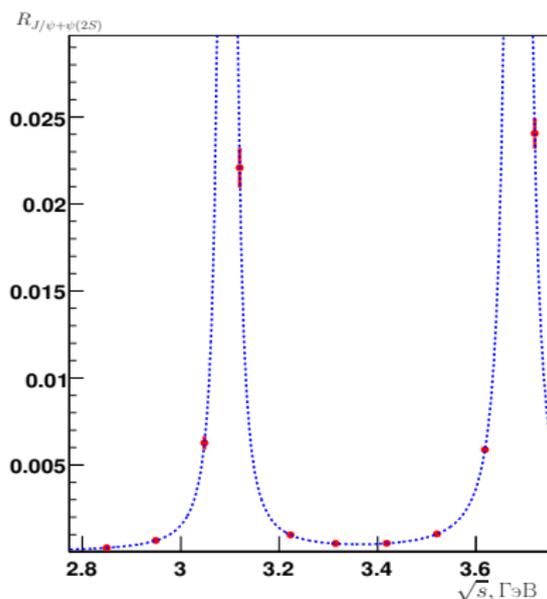
- Учёт вклада узких резонансов, исходя из непосредственного определения их параметров.
- Для оценки систематической неопределённости эффективности регистрации адронных событий проводилось
  - Моделирование генераторами JETSET и LUARLW
  - Вариация критериев отбора
  - Оценка методом разложения по компонентам (МПК).
  - Замена моделирования ряда известных мод распадов на моделирование их генератором PHOKHARA в области 1.8-2.0 ГэВ.

Свойства адронных событий на энергии 3.12 ГэВ, сравнение двух вариантов моделирования и экспериментальных данных.



# Результаты измерения величины R

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$R_{uds}(s)\{R(s)\}$	$\frac{\delta R}{R} \left( \frac{\delta R_{\text{sys}}}{R} \right), \%$
1.841	$2.226 \pm 0.139 \pm 0.158$	9.5(7.1)
1.937	$2.141 \pm 0.081 \pm 0.073$	5.1(3.4)
2.037	$2.238 \pm 0.068 \pm 0.072$	4.4(3.2)
2.134	$2.275 \pm 0.072 \pm 0.055$	4.0(2.4)
2.239	$2.208 \pm 0.069 \pm 0.053$	3.9(2.4)
2.340	$2.194 \pm 0.064 \pm 0.048$	3.7(2.2)
2.444	$2.175 \pm 0.067 \pm 0.048$	3.8(2.2)
2.543	$2.222 \pm 0.070 \pm 0.047$	3.8(2.1)
2.645	$2.220 \pm 0.069 \pm 0.049$	3.8(2.2)
2.745	$2.269 \pm 0.065 \pm 0.050$	3.6(2.2)
2.850	$2.223 \pm 0.065 \pm 0.047$	3.6(2.1)
2.949	$2.234 \pm 0.064 \pm 0.051$	3.7(2.3)
3.048	$2.278 \pm 0.075 \pm 0.048$	3.9(2.3)
3.077	$2.188 \pm 0.056 \pm 0.042$	3.2(2.1)
3.120	$2.212\{2.235\} \pm 0.042 \pm 0.049$	2.9(2.2)
3.223	$2.194\{2.195\} \pm 0.040 \pm 0.035$	2.4(1.6)
3.315	$2.219\{2.219\} \pm 0.035 \pm 0.035$	2.2(1.6)
3.418	$2.185\{2.185\} \pm 0.032 \pm 0.035$	2.2(1.6)
3.500	$2.224\{2.224\} \pm 0.054 \pm 0.040$	3.0(1.8)
3.521	$2.200\{2.201\} \pm 0.050 \pm 0.044$	3.0(2.0)
3.618	$2.212\{2.218\} \pm 0.038 \pm 0.035$	2.3(1.6)
3.720	$2.204\{2.228\} \pm 0.039 \pm 0.042$	2.6(1.9)



Используя параметры  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов, находим

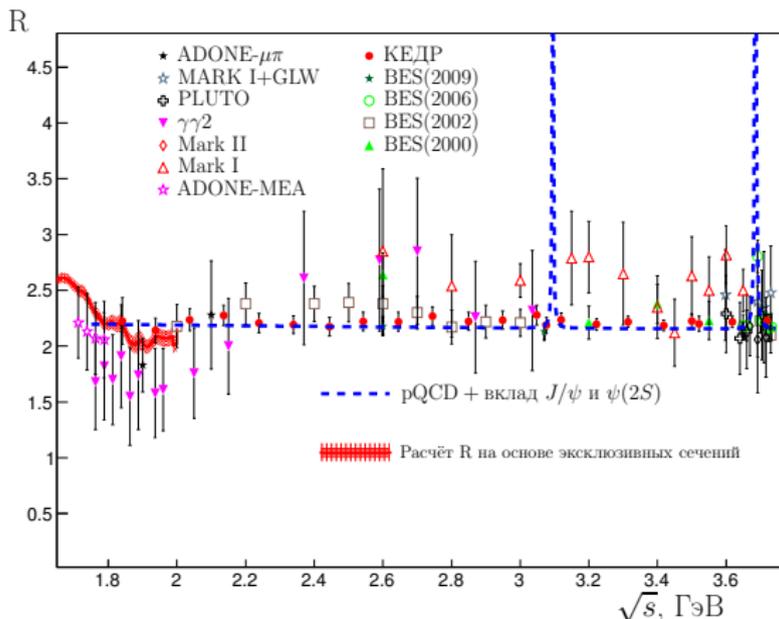
$$R_{uds}(s) + R_{J/\psi + \psi(2S)} \Rightarrow R(s)$$

V. V. Anashin et al., Phys.Lett. B 770C, 174 (2017). [arXiv:1610.02827]

V. V. Anashin et al., Phys.Lett. B 753, 533 (2016). [arXiv:1510.02667]

V. V. Anashin et al., Phys.Lett. B 788, 42 (2019). [arXiv:1805.06235]

# Результаты измерения R

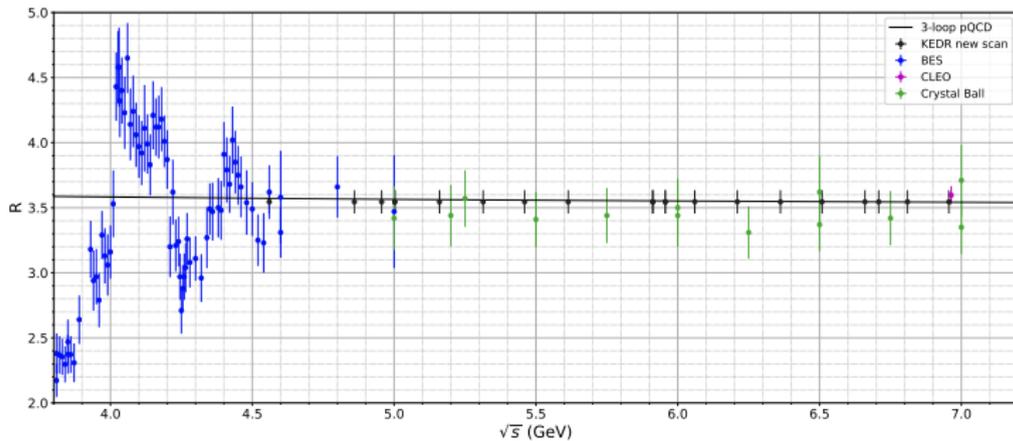


Величина  $R$  в зависимости от энергии с.ц.м.(УФН 190, 995)

- $\sqrt{s} = 3.07 \div 3.72$  ГэВ, точность 3.9% при сист. ошибке 2.4%.  
 $\overline{R}_{uds}^{\text{КЕДР}} = 2.204 \pm 0.014 \pm 0.026$ , при  $R_{uds}^{\text{pQCD}} = 2.16 \pm 0.01$ .
- $\sqrt{s} = 1.84 \div 3.05$  ГэВ, точность 2.6% при сист. ошибке 1.9%.  
 $\overline{R}_{uds}^{\text{КЕДР}} = 2.225 \pm 0.020 \pm 0.047$ , при  $R_{uds}^{\text{pQCD}} = 2.18 \pm 0.02$ .

# Планы по измерению величины $R$

Положение точек по энергии и ожидаемая ошибка в сравнении с имеющимися данными, для иллюстрации значение точек по pQCD:



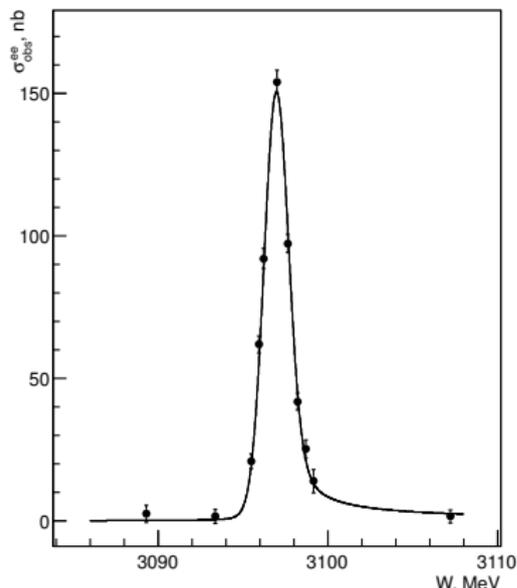
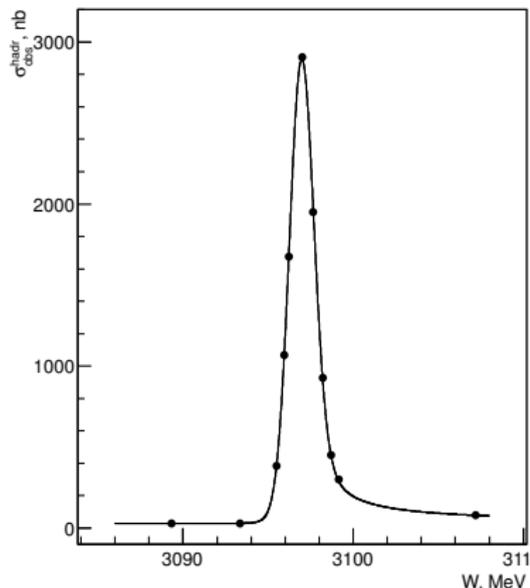
Проведено сканирование  $R$  в диапазоне 4.69-6.98 ГэВ.

Интеграл светимости  $\sim 13 \text{ пб}^{-1}$  набран в 17 точках по энергии.

Ожидаемая статистическая точность  $\lesssim 2.5\%$ .

При планируемом наборе большой статистики для двухфотонной физики можно с высокой точностью измерить  $R$  при двух-трех значениях энергии.

# Измерения ширины $J/\psi$ -резонанса

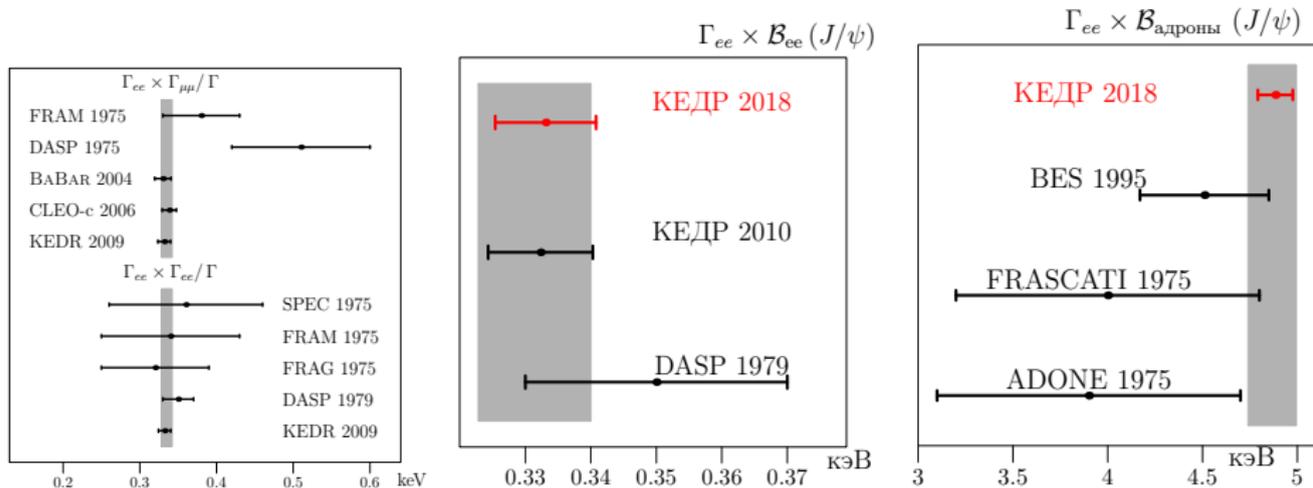


Сканирование  $J/\psi$  2005 г.  $\int \mathcal{L} dt \simeq 0.23 \text{ пб}^{-1}$  ( $2.5 \times 10^5$  событий).

Анализ лептонных каналов (2010,2014), совместная подгонка адронного и электронного каналов (2018), свободные параметры

$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h(J/\psi)$  или  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  (+  $m(J/\psi), \sigma_W \dots$ )

# Результаты измерения ширины $J/\psi$ -резонанса



$$\Gamma_{ee}(J/\psi) \times \mathcal{B}_{ee} = 0.3331 \pm 0.0066 \pm 0.0040 \text{ кэВ}$$

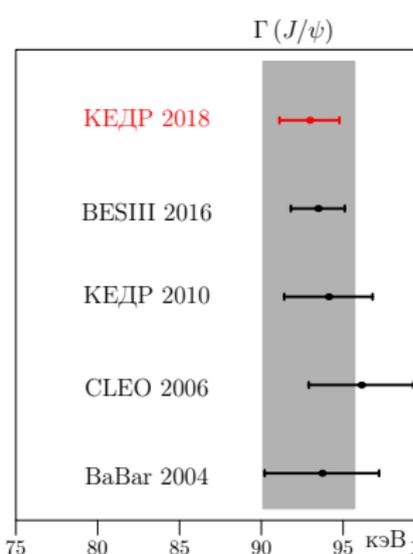
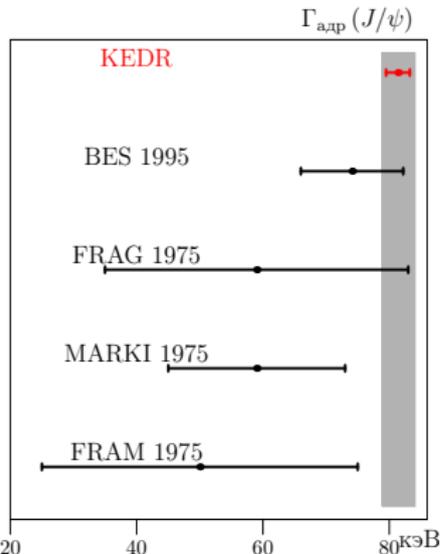
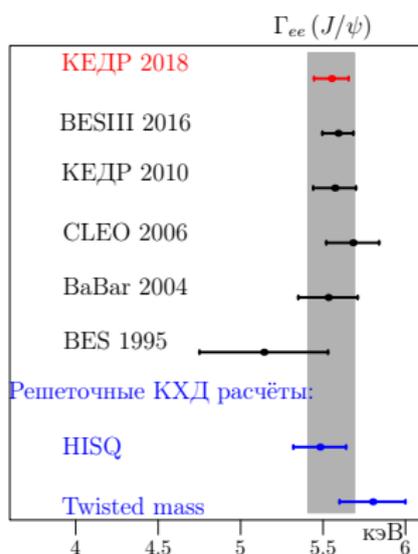
$$\Gamma_{ee}(J/\psi) \times \mathcal{B}_{\mu\mu} = 0.3318 \pm 0.0052 \pm 0.0063 \text{ кэВ}$$

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{адр} = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \text{ кэВ}$$

Phys. Lett. B 685, 134 (2010).

J. High Energ. Phys. (2018) 119.

# Результаты измерения ширины $J/\psi$ -резонанса



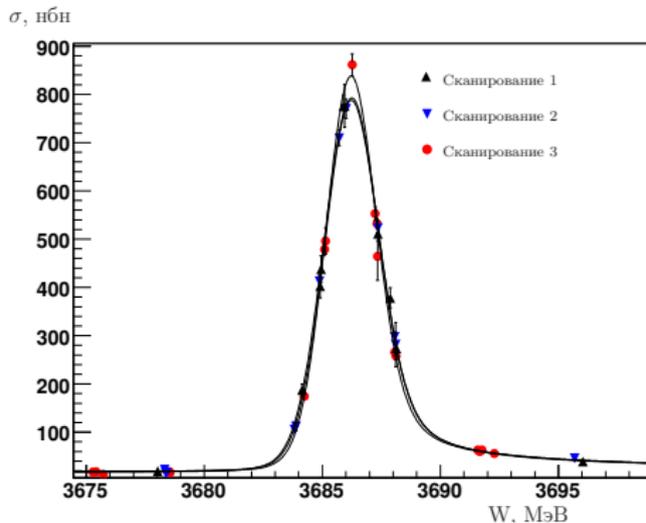
$$\Gamma_{ee}(J/\psi) = 5.550 \pm 0.056 \pm 0.089 \text{ кэВ}$$

$$\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi) = 81.37 \pm 1.36 \pm 1.30 \text{ кэВ}$$

$$\Gamma(J/\psi) = 92.45 \pm 1.40 \pm 1.48 \text{ кэВ}$$

Phys. Lett. B 685, 134 (2010)    J. High Energ. Phys. (2018) 119

# Измерение величины $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{\text{адр}}(\psi(2S))$



Сканирования  $\psi(2S)$ , выполненные в 2004 и 2006 гг.  $\int \mathcal{L} dt \simeq 0.6 \text{ пб}^{-1}$  ( $1.6 \times 10^5$  событий)

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ}$$

Phys. Lett. B 711, 280 (2012).

	$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ , кэВ	$P(\chi^2)$ , %
Скан. 1	$2.258 \pm 0.033$	15.8
Скан. 2	$2.229 \pm 0.024$	29.5
Скан. 3	$2.226 \pm 0.022$	79.5

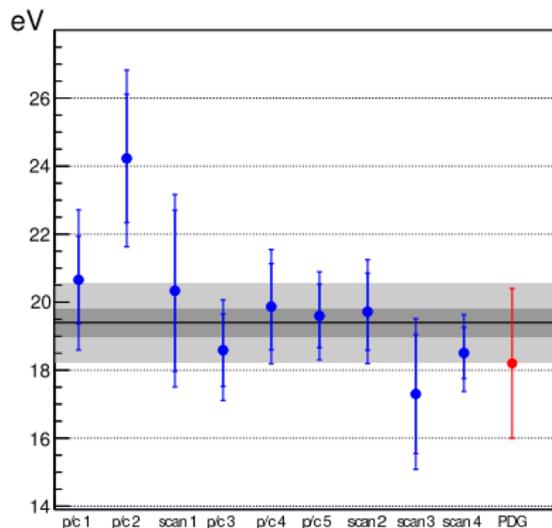
## Основные систематические неопределённости (упрощённый список)

Абс. ошибка светимости	$\sim 1.2\%$
Моделирование распадов $\psi(2S)$	$\sim 1.0\%$
Отклик детектора	$\sim 0.5\%$
Ускорительные эффекты	$\sim 0.3\%$
Другие источники	$\sim 0.3\%$
Квадратичная сумма	$\sim 1.7\%$

# Определение $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma (\psi(2S))$

Интеграл светимости  $7 \text{ пкб}^{-1}$ ,  $\sim 3.5 \times 10^6 \psi(2S)$ , пять наборов пик/подложка и четыре сканирования для определения энергетического разброса:

$$\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma = 19.4 \pm 0.4 \pm 1.1 \text{ эВ}$$



Синие точки – индивидуальные измерения (КЕДР), серая полоса соответствует результату КЕДР (Phys. Lett. B 781, 174 (2018)).

Красным выделено значение, полученное по данным PDG ( $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{\mu^+\mu^-}$ ).

# Параметры $\psi(2S)$

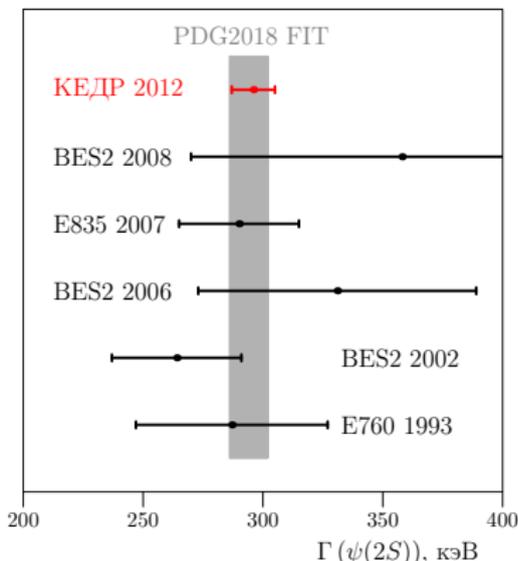
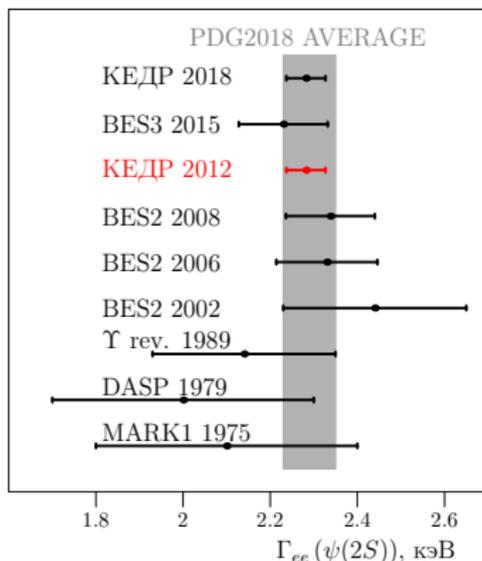
Используя  $\mathcal{B}_h^{PDG} = 0.9785 \pm 0.0013$  и  $\mathcal{B}_{ee}^{PDG} = 0.00772 \pm 0.00017$ , по  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{др}$  получили в 2012 году

$$\Gamma_{ee} = 2.282 \pm 0.015 \pm 0.038 \pm 0.021 \text{ кэВ}$$

$$\Gamma = 296 \pm 2 \pm 8 \pm 3 \text{ кэВ (2012)}$$

В 2018 лептонная ширина была получена суммированием результатов в адронном и лептонных каналах

$$\Gamma_{ee} = 2.282 \pm 0.015 \pm 0.042 \text{ кэВ}$$



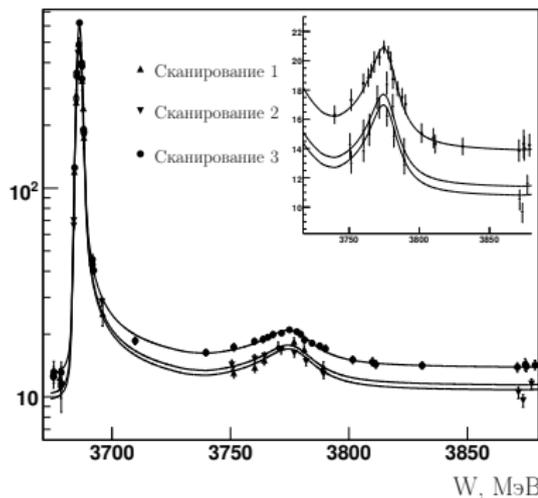
# Определение параметров $\psi(3770)$ - резонанса

Три сканирования области  $\psi(2S)$ - $\psi(3770)$ ,  $\int \mathcal{L} dt \simeq 2.6 \text{ пб}^{-1}$

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<b>3773.7 ± 0.4</b>	<b>OUR FIT</b>	Error includes scale factor of 1.4.		
<b>3778.1 ± 0.7</b>	<b>OUR AVERAGE</b>			
3778.1 ± 0.7 ± 0.6		1 AAJ	2019M	LHCB $p p \rightarrow D\bar{D}^+$ anything
3779.2 $^{+1.1}_{-1.1} \pm 0.8$		2 ANASHIN	2012A	KEDR $e^+ e^- \rightarrow D\bar{D}$
3775.5 ± 2.4 ± 0.5	57	AUBERT	2008B	BABR $B \rightarrow D\bar{D}K$
3776 ± 5 ± 4	68	BRODZICKA	2008	BELL $B^+ \rightarrow D^0 \bar{D}^0 K^+$
3778.8 ± 1.9 ± 0.9		AUBERT	2007BE	BABR $e^+ e^- \rightarrow D\bar{D}\gamma$
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •				
3779.8 ± 0.6		3 SHAMOV	2017	RVUE $e^+ e^- \rightarrow D\bar{D}$ , hadrons
3772.0 ± 1.9		4, 5 ABLIKIM	2008D	BES2 $e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
3778.4 ± 3.0 ± 1.3	34	CHISTOV	2004	BELL Sup. by BRODZICKA 20

1 Measured in prompt hadroproduction.  
 2 Taking into account interference between the resonant and non-resonant  $D\bar{D}$  production.  
 3 From the joint analysis of the data on the  $D\bar{D}$  and inclusive hadronic cross sections in the  $\psi(3770)$  region from BaBar, Belle, BES-II, CLEO and KEDR.  
 4 Reanalysis of data presented in BAI 2002C. From a global fit over the center-of-mass energy region 3.7 – 5.0 covering the  $\psi(3770)$ ,  $\psi(4040)$ ,  $\psi(4160)$ , and  $\psi(4415)$  resonances. Phase angle fixed in the fit to  $\delta = 0^\circ$ .  
 5 Interference between the resonant and non-resonant  $D\bar{D}$  production not taken into account.

$\sigma_{mh}^{obs}$ , нОб



$$M = 3779.2 \begin{matrix} +1.8 & +0.5 & +0.3 \\ -1.7 & -0.7 & -0.3 \end{matrix} \text{ МэВ}$$

$$\Gamma = 24.9 \begin{matrix} +4.6 & +0.5 & +0.2 \\ -4.0 & -0.6 & -0.9 \end{matrix} \text{ МэВ}$$

$$(1) \Gamma_{ee} = 154 \begin{matrix} +79 & +17 & +13 \\ -58 & -9 & -25 \end{matrix} \text{ эВ}, \quad \phi = 171 \pm 17^\circ$$

$$(2) \Gamma_{ee} = 414 \begin{matrix} +72 & +24 & +90 \\ -80 & -26 & -10 \end{matrix} \text{ эВ}, \quad \phi = 240 \pm 9^\circ$$

Phys. Lett. B711, 292 (2012)

$$\sigma_{mh}^{obs} = \epsilon_{\psi(2S)} \sigma_{\psi(2S)} + \epsilon_{J/\psi} \sigma_{J/\psi} +$$

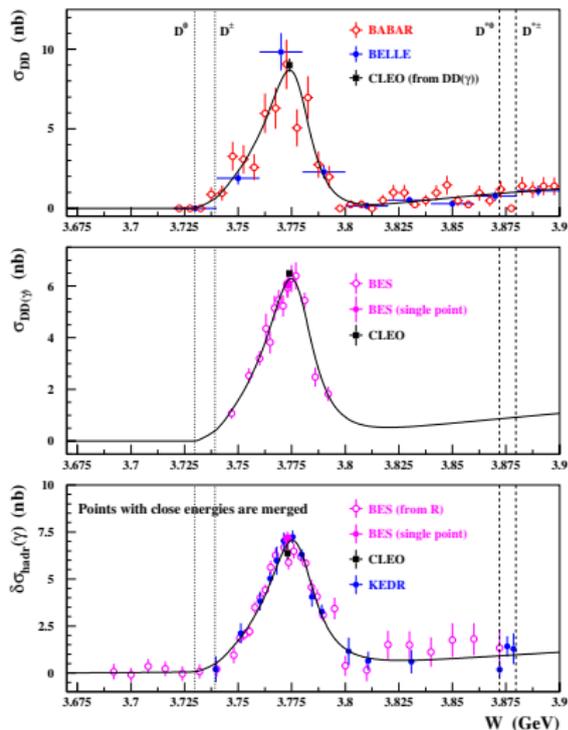
$$\epsilon_{\tau\tau} \sigma_{\tau\tau} + \sigma_{uds} +$$

$$\epsilon_{D^+D^-} \sigma_{D^+D^-} + \epsilon_{D^0\bar{D}^0} \sigma_{D^0\bar{D}^0} +$$

$$\epsilon_{nD\bar{D}} \mathcal{B}_{nD\bar{D}} \sigma_{\psi(3770)} +$$

$$\sigma_{D\bar{D}\pi}$$

# Совместная обработка данных по $\psi(3770)$



Shamov & Todyshev  
Phys.Lett. B769 (2017) 187

Использовались данные BaBar, Belle, BES-II, CLEO и КЕДР.

Подтверждены результаты детектора КЕДР, рассмотрено несколько моделей, не давших выигрыша в описания данных.

Не удалось решить проблему не- $DD\bar{D}$  распадов  $\psi(3770)$ .

	M (MeV)	$\Gamma$ (MeV)	$\mathcal{B}_{nD\bar{D}}$	$\Gamma_{ee}$ (eV)	$\phi$ (deg)
1:	$3779.8 \pm 0.6$	$25.8 \pm 1.3$	$0.164 \pm 0.049$	$196 \pm 18$	$187 \pm 5$
2:	$3779.9 \pm 0.6$	$25.9 \pm 1.3$	$0.099 \pm 0.030$	$328 \pm 18$	$227 \pm 3$

# Измерение масс узких резонансов

## Инклюзивное сечение узкого резонанса в адронном канале

Достаточную точность обеспечивает мягкофотонное приближение:

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadr}}(s) = \sigma_{\text{continuum}}^{e^+e^- \rightarrow \text{hadr}} + \frac{12\pi}{s} (1 + \delta) \left[ \frac{\Gamma_{ee} \tilde{\Gamma}_h}{\Gamma M} \text{Im} f(s) - \frac{2\alpha \sqrt{R} \Gamma_{ee} \tilde{\Gamma}_h}{3\sqrt{s}} \lambda \text{Re} \frac{f^*(s)}{1 - \Pi_0} \right]$$

$$f(s) = \frac{\pi\beta}{\sin \pi\beta} \left( \frac{s}{M^2 - s - iM\Gamma} \right)^{1-\beta}$$

$$\delta = \frac{3}{4}\beta + \frac{\alpha}{\pi} \left( \frac{\pi^2}{3} - \frac{1}{2} \right) + \beta^2 \left( \frac{37}{96} - \frac{\pi^2}{12} - \frac{L}{72} \right), \quad L = \ln(s/m_e^2), \quad \beta = \frac{2\alpha}{\pi} (L - 1),$$

Формулы восходят к работе Я.И. Азимов и др. Письма в ЖЭТФ **21** (1975) 378

$\Gamma_{ee}$ ,  $\Gamma$ ,  $M$  — “одетые” параметры резонанса, включающие поправки на поляризацию вакуума,  $\Gamma_{ee} = \Gamma_{ee}^{(0)} / |1 - \Pi_0|^2$

$\lambda$  - параметр интерференции, характеризующий сходство конечных состояний резонансного и нерезонансного каналов аннигиляции,  $\tilde{\Gamma}_h \neq \Gamma_h$ .

При расчёте сечения требуется учет энергетического разбросом пучков

$$G(W, W') = \frac{g(W - W')}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} \exp\left(-\frac{(W - W')^2}{2\sigma_W^2}\right), \quad g(\Delta) = \frac{1 + a\Delta + b\Delta^2}{1 + b\sigma_W^2}$$

# Интерференция в адронном сечении

Результаты по ширинам и массам получены при фиксированном значении параметра интерференции в инклюзивном адронном сечении

$$\lambda = \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{\mu\mu}}{\mathcal{B}_h}} \approx 0.13 \quad \text{для } \psi(2S), 0.39 \quad \text{для } J/\psi, \text{ для } \Upsilon(1\div 3S) 0.31\div 0.27$$

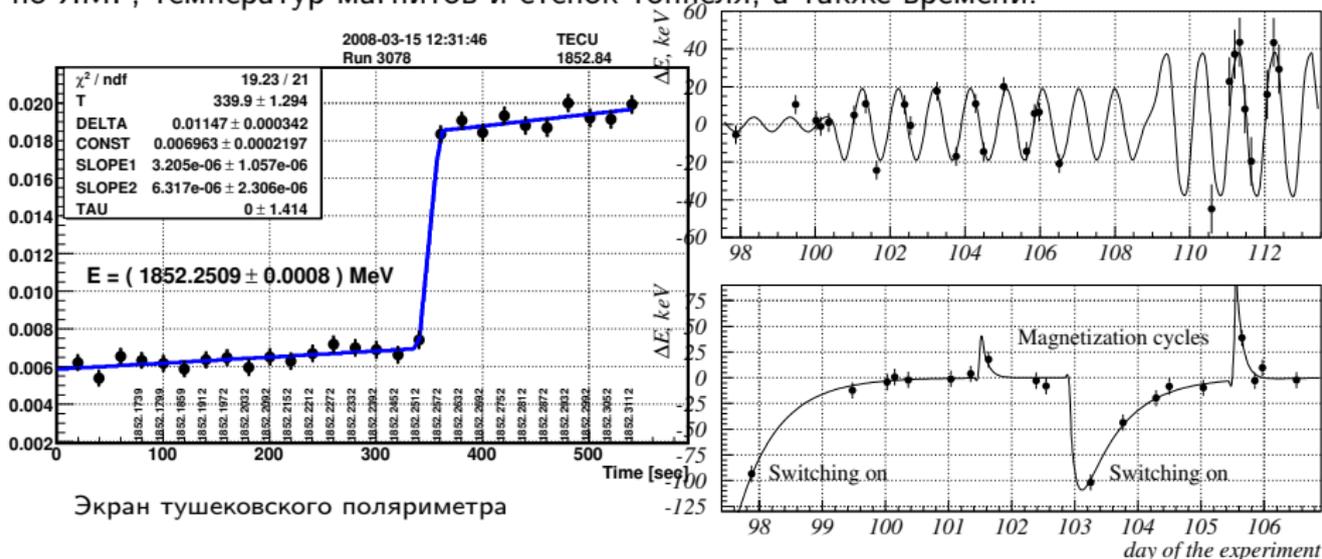
Это соответствует партонной модели с не интерферирующими распадами на три глюона или кварк-антикварк пары. В общем случае:

$$\lambda = \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{ee}}{\mathcal{B}_h}} + \sqrt{\frac{1}{\mathcal{B}_h}} \sum_m \sqrt{b_m \mathcal{B}_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle_{\Theta},$$
$$\tilde{\Gamma}_h = \Gamma_h \times \left( 1 + \frac{2\alpha}{3(1 - \text{Re} \Pi_0) \mathcal{B}_h} \sqrt{\frac{R}{\mathcal{B}_{ee}}} \sum_m \sqrt{b_m \mathcal{B}_m^{(s)}} \langle \sin \phi_m \rangle_{\Theta} \right).$$

$\tilde{\Gamma}_h$  — адронная парциальная ширина, получаемая подгонкой сечения при истинном значении  $\Gamma_h$ ,  $b_m = R_m/R$  — вклад заданной моды в сечение континуума,  $\phi_m$  — фаза интерференции для неё, а  $\mathcal{B}_m^{(s)} = \Gamma_m^{(s)}/\Gamma$  (индекс  $(s)$  — вклад сильного взаимодействия).  $\langle \rangle_{\Theta}$  — усреднение по углам и импульсам конечных частиц.

# Определение энергии пучка во время набора статистики

Калибровка энергии пучка методом резонансной деполяризации в специальных заходах и интерполяция результатов с использованием измерений ведущего поля по ЯМР, температур магнитов и стенок туннеля, а также времени:



Вариация энергии ВЭПП-4М в 2002 году при воздушном охлаждении кольца, периодическая и непериодическая компоненты, При водяном охлаждении вариации энергии меньше, но менее предсказуемы.

# Определение энергии столкновений

В 2002 году был проведен подробный анализ множества источников ошибок в массе резонанса (Г.М. Тумайкин, С.А. Никитин, А.В. Богомягков и др.). Вот два из них:

Обычно измеряет энергию электронного пучка, а нужно знать энергию обоих:

$$\langle W \rangle_p \approx \langle E_+ + E_- \rangle - \frac{1}{2}(\theta_x^2 + \theta_y^2)E - \frac{\sigma_E^2}{2E} - \frac{(\langle E_+ \rangle - \langle E_- \rangle)^2}{4E}.$$

На ВЭПП-4М в области  $\psi$ -мезонов разность энергий  $< 2$  кэВ.

Распределение светимости по энергии не гауссово из-за зависимости размера пучков  $\sigma_x^*$ ,  $\sigma_y^*$  от энергии (хроматизм  $\beta$ -функций):

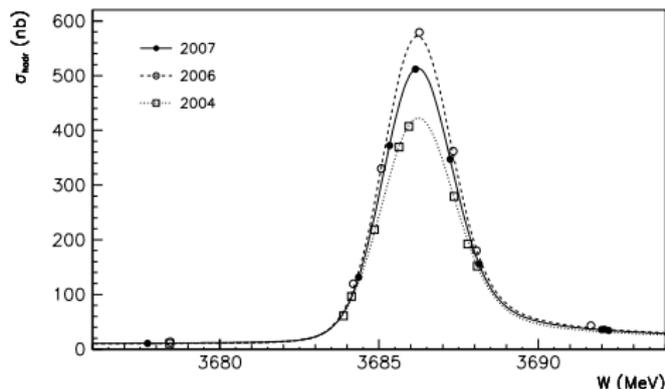
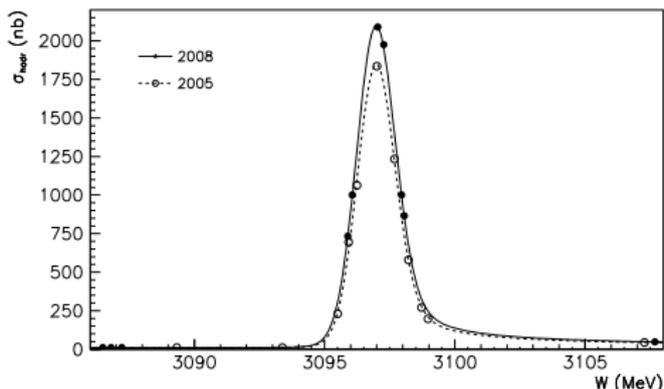
$$\frac{dL(E, W)}{dW} = \frac{f_R N_+ N_-}{4\pi\sigma_x^*(W/2)\sigma_y^*(W/2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{W - 2E}{\sigma_W} - \frac{\sigma_W \psi_y^* \Delta_y}{2E\sigma_y^2} \right)^2 - \frac{\Delta_y^2}{4\sigma_y^2} \right\},$$

из-за наличия электростатической  $\psi$ -функции  $\psi_y^*$  энергия смещается при столкновении пучков с ненулевым прицельным параметром  $\Delta_y$ . Эффект может достигать десятка кэВ без автоматической подстройки сведения пучков.

Список наиболее существенных систематических ошибок будет представлен позже

# Измерения масс $J/\psi$ и $\psi(2S)$ с 2002 по 2008 гг

Было проведено шесть полноценных сканирований  $J/\psi$  - резонанса и семь сканирований  $\psi(2S)$ - резонанса. Результирующие значения масс с учетом корреляции систематических неопределённостей были получены в работе Phys.Lett. B749 (2015).



Наблюдаемое сечение в зависимости от энергии с.ц.м. в области узких резонансов для сканирований, начиная с 2004 года. Сканирования 2002 года представлены в Phys.Lett. B573 (2003) 63.

# Список систематических неопределённостей

Пример из Phys.Lett. B749 (2015), неопределенности превышающие 1 кэВ:

Systematic uncertainties on the  $J/\psi$  mass (keV).

<i>Uncertainty source</i>	2002	2005	2008	Common
Energy spread variation	3.0	1.8	1.8	1.8
Energy calibration accuracy	1.6	1.9	1.9	1.6
Energy assignment to DAQ runs	3.7	3.5	3.5	2.5
Beam separation in parasitic I.P.s*	0.9	1.7	1.7	0.9
Beam misalignment in the I.P.	1.8	1.5	1.5	1.5
$e^+$ -, $e^-$ -energy difference	1.2	1.3*	1.2	1.2
Symmetric distortion of the energy distribution	1.5	1.3	2.1	1.3
Asymmetric distortion of the energy distribution*	2.1	1.9	1.9	1.9
Beam potential	1.9	1.9	1.9	1.9
Detection efficiency instability	2.3	1.7	1.8	<0.1
Residual machine background	1.0	0.7	0.7	<0.1
Luminosity measurements	2.2	1.7	1.7	1.1
Interference in the hadronic channel	2.7	2.7	2.7	2.7
<i>Sum in quadrature</i>	$\approx 7.7$	$\approx 7.0$	$\approx 7.2$	$\approx 5.8$

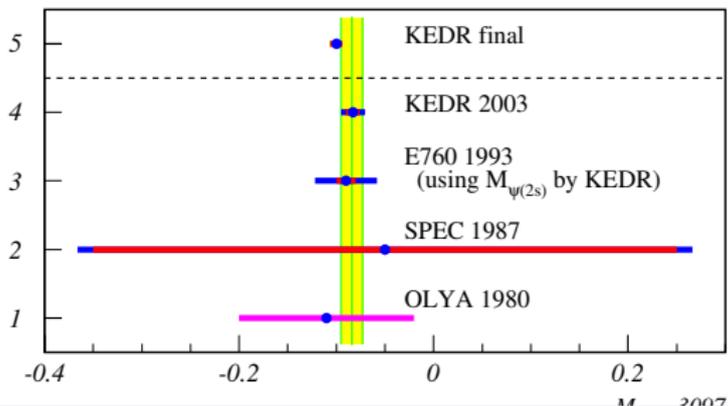
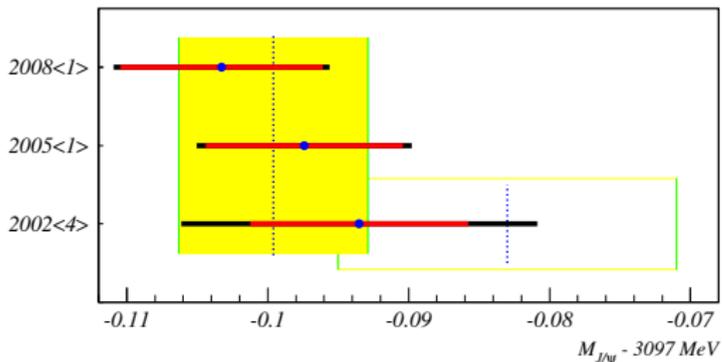
\* — correction uncertainty

Точность калибровки (строка 2) включает эффект вертикальных искажений орбиты и точность компенсации продольного поля КЕДР.

# Результаты измерения массы $J/\psi$ -резонанса

$$M_{J/\psi}^{\text{КЕДР}} = 3096.900 \pm 0.002 \pm 0.006 \text{ МэВ}$$

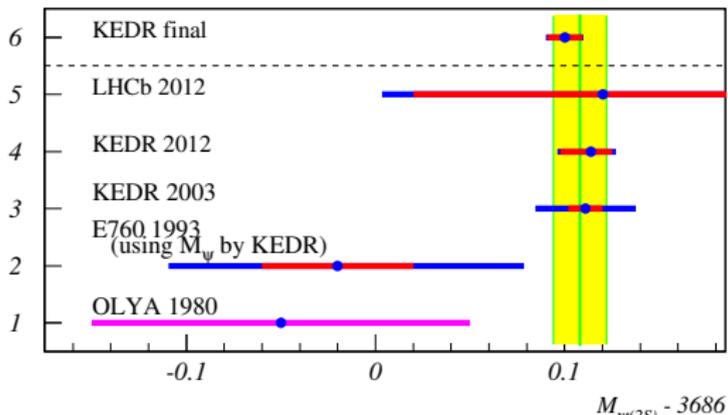
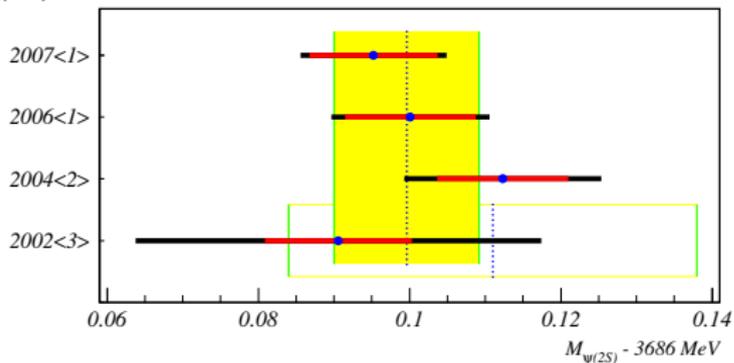
$$\lambda_{J/\psi} = 0.45 \pm 0.07 \pm 0.04 \text{ (ожидаемое значение 0.39)}$$



# Результаты измерения массы $\psi(2S)$ -резонанса

$$M_{\psi(2S)}^{\text{КЕДР}} = 3686.100 \pm 0.004 \pm 0.009 \text{ МэВ}$$

$$\lambda_{\psi(2S)} = 0.17 \pm 0.05 \pm 0.05 \quad (\text{ожидаемое значение } 0.13)$$



# Массы $\Upsilon(1 \div 3S)$

# Результаты по массам $\Upsilon(1 \div 3S)$

## $\Upsilon(1S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
<b>9460.30 ± 0.26 OUR AVERAGE</b>	Error includes scale factor of 3.3.		
9460.51 ± 0.09 ± 0.05	<sup>1</sup> ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
9459.97 ± 0.11 ± 0.07	MACKAY 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons

Противоречие 3.25 $\sigma$ !

## $\Upsilon(2S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
<b>10023.26 ± 0.31 OUR AVERAGE</b>			
10023.5 ± 0.5	<sup>1</sup> ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons
10023.1 ± 0.4	BARBER 84	REDE	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons

## $\Upsilon(3S)$ MASS

<u>VALUE (MeV)</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
<b>10355.2 ± 0.5</b>	<sup>1</sup> ARTAMONOV 00	MD1	$e^+ e^- \rightarrow$ hadrons

<sup>1</sup> Reanalysis of BARU 92B and ARTAMONOV 84 using new electron mass (COHEN 87).

Семинар 05.06.2021:

- Неправильный учет радиационных поправок работах Mackay *et al.* [CUSB @ CESR] и Barber *et al.* [ARGUS+CrystalBall @ DORIS]
- Устаревшее значение массы электрона (там же)
- Неучет интерференцию распадов резонанса и подложки (всюду)
- Ошибка в подгонке резонанса в Mackay *et al.*

Результаты переобработки:

$\Upsilon(1S)$ :	$9460.51 \pm 0.09 \pm 0.05$	→	$9460.40 \pm 0.09 \pm 0.04$	MD-1
	$9559.97 \pm 0.11 \pm 0.07$		$9460.11 \pm 0.11 \pm 0.07$	CUSB
$\Upsilon(2S)$ :	$10023.5 \pm 0.5$	→	$10023.4 \pm 0.5$	MD-1
	$10023.1 \pm 0.4$		$10022.7 \pm 0.4$	ARGUS+CB
$\Upsilon(3S)$ :	$10355.2 \pm 0.5$	→	$10355.1 \pm 0.5$	MD-1

Разница в результатах МД-1 и CUSB по массе  $\Upsilon(1S)$  уменьшилась с  $3.25\sigma$  до  $1.83\sigma$

# О планируемом эксперименте на $\Upsilon(1S)$ (1)

Предлагается уменьшить статистическую ошибку массы  $\Upsilon(1S)$  до 50 кэВ, требуемый интеграл светимости 6-9 пб<sup>-1</sup> в зависимости от того, какой будет энергетический разброс ВЭПП-4М (требуемая для заданной ошибки в массе светимость пропорциональна разбросу энергии в кубе,  $\delta M \simeq \sigma_W / \sqrt{N}$ ,  $N \propto L \cdot \Gamma / \sigma_W$ ,  $L \propto \sigma_W^3 / \delta M^2$ ).

При этом статистическая ошибка лептонной ширины будет около 1% (полная ошибка в PDG 1.3%)

Оптимистическая оценка времени набора – 1.5-2.5 месяца без учета затрат на калибровку энергии. Число заходов – 350–500.

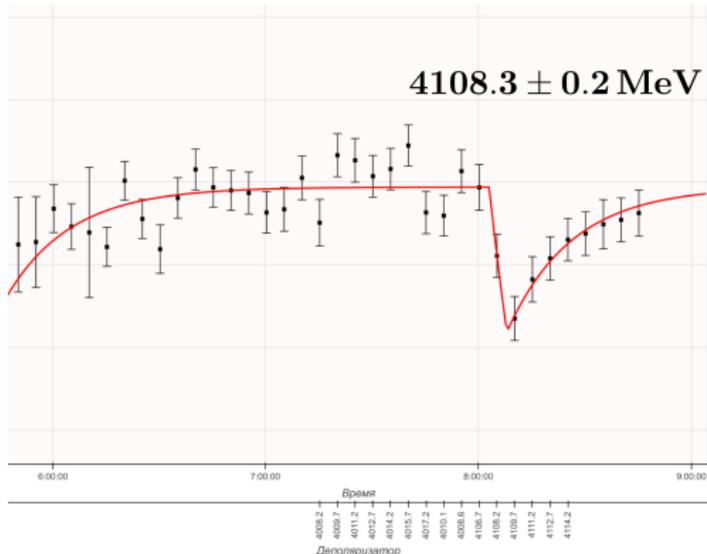
На данный момент

- Разработан и испытан лазерный поляриметр (И.Николаев, В.Каминский С.Захаров и др.), ведутся работы по его усовершенствованию
- Выставлены приемники СИ для работы выше 4.5 ГэВ в пучке
- Получена поляризация пучков на энергии 4.1 ГэВ, на 4.73 ГэВ поляризации пока нет, требуется подстройка режима ВЭПП-4М
- Идет выбор схемы эксперимента, минимизирующий систематические ошибки

# О планируемом эксперименте на $\Upsilon(1S)$ (2)

Набор статистики предполагается проводить в 5-7 точка на резонансе и в двух точках вне его.

Пример калибровки энергии:



К выбору схемы эксперимента:

На ВЭПП-4 калибровка энергии делалась или до начала набора статистики, или после него. Во время набора **был включен деполяризатор**, чтобы избежать вариации эффективности регистрации событий в зависимости от угла  $\varphi$ , что добавляло время поляризации к продолжительности захода. Хотелось бы оценить, насколько существенным могут быть вариации эффективности,

и по возможности **отказаться от принудительной деполяризации**.

**Требуется помощь теоретиков, чтобы получить угловые распределения для  $e^+e^- \rightarrow 3g$  с учетом поляризации пучков.**

# О планируемом эксперименте на $\Upsilon(1S)$ (3)

Основные систематических эффекты, учитывавшихся при измерении массы  $\Upsilon(1S)$  на ВЭПП-4, с указанием их величины:

- 1 Точность знания масс электрона -  $\pm 26$  кэВ, теперь  $\pm 3$  кэВ.
- 2 Точность измерения частоты деполяризации и частоты обращения  $\pm 14$  кэВ, теперь пренебрежимо.
- 3 Вертикальные искажения орбиты  $-9 \pm 7$  кэВ, при оценке не учитывалась замкнутость орбиты, завышено. Потребуется изучения.
- 4 Движение рожденного  $\Upsilon$ -мезона  $-4.1 \pm 0.2$  кэВ, ошибка, было  $-1.1 \pm 0.1$  кэВ, ожидается  $-1.3 \pm 0.2$  кэВ.
- 5 Разница энергии позитронов и электронов, пренебрежимо. Не рассматривалось влияние электрических полей, будет  $< 10$  кэВ?
- 6 Смещение пика из-за зависимости размера пучка от энергии из-за хроматизма  $\beta$ -функций  $-25 \pm 10$  кэВ, нужно измерять хроматизм.
- 7 Детекторные нестабильности  $\pm 15$  кэВ, требуется изучения.
- 8 Стабильность энергетического разброса  $\pm 25$  кэВ, требуется изучения.
- 9 Точность вычисления сечения  $\pm 10$  кэВ, теперь  $\pm 3$  кэВ.
- 10 Не рассматривалось наличие электростатически наведенной вертикальной дисперсии. Требуется изучения, ОПАСНО!
- 11 Влияние потенциала пучка не рассматривалось, ожидается  $-5 \pm 3$  кэВ.

В сумме было  $-40 \pm 50$  кэВ. Нужно бороться за уменьшение ошибки!

Чтобы довести статистическую ошибку массы до 100 кэВ потребуется 6-10 пб<sup>-1</sup> на  $\Upsilon(2S)$  и 12-22 пб<sup>-1</sup> на  $\Upsilon(3S)$ , при этом результаты по лептонным ширинам будут в 1.5 раза уступать по точности уже имеющимся.

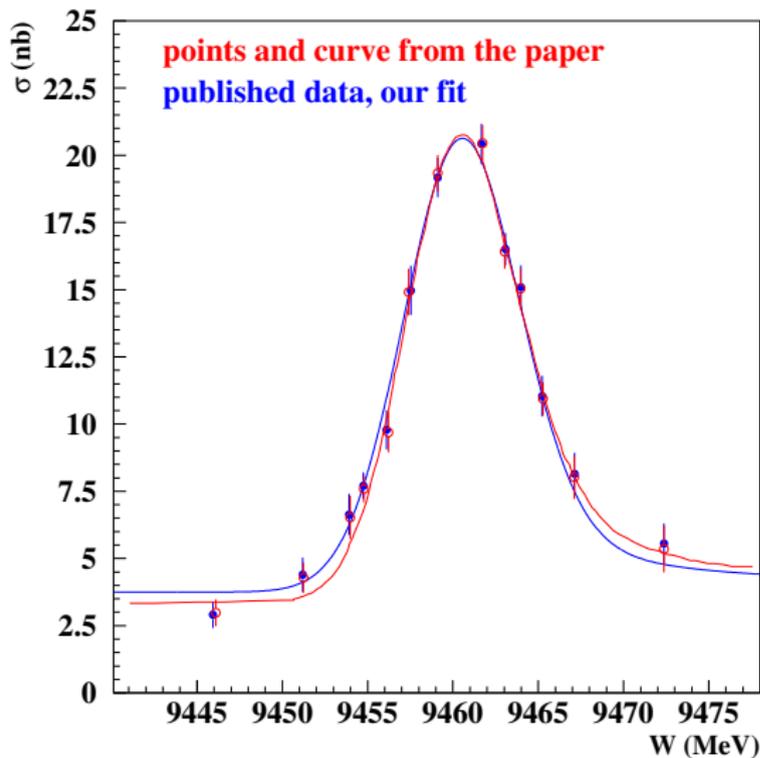
Эксперимент на  $\Upsilon(2S)$  существенно сложнее, чем на  $\Upsilon(1S)$ , поскольку он располагается на целом спиновом резонансе. Калиброваться придется выше и ниже пика, затем перестраивать энергию, ориентируясь на ЯМР.

При планируемом наборе большой статистики для двухфотонной физики можно с высокой точностью измерить  $R$  при двух-трех значениях энергии. Подробное сканирование области выше 7 ГэВ не оправдано, так как там имеются точные результаты CLEO.

- Представлены основные результаты КЕДР в канале однофотонной аннигиляции  $e^+e^-$ -пар:
  - Измерение  $R$  в области от 1.84 до 3.72 ГэВ
  - Измерение ширин  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ -мезонов
  - Высокоточное измерение масс  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ -мезонов
  - Измерение параметров  $\psi(3770)$ -мезона
  - Набрана статистика для измерения  $R$  в области 4.69-6.98 ГэВ
- Проведена ревизия опубликованных значений масс  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$
- Рассмотрен эксперимент по измерению массы и лептонной ширины  $\Upsilon(1S)$ , приведены оценки требуемого интеграла светимости для уточнению масс  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$

Спасибо за внимание!

# Дополнительные слайды



Наша подгонка опубликованных данных с соответствующим учетом радипоправок дает массу на 0.375 МэВ выше опубликованного значения

Опечатка в данных?

Максимально точно восстановили данные с рисунка в статье, точки совпадают

Разница в массах связана с вычислением подгоночной функции. Мы вычисляем правильно (независимо А.Д.Букин, Тодышев, Шамов)

Одна опечатка была найдена (Резанова), но не уменьшила разницу масс!

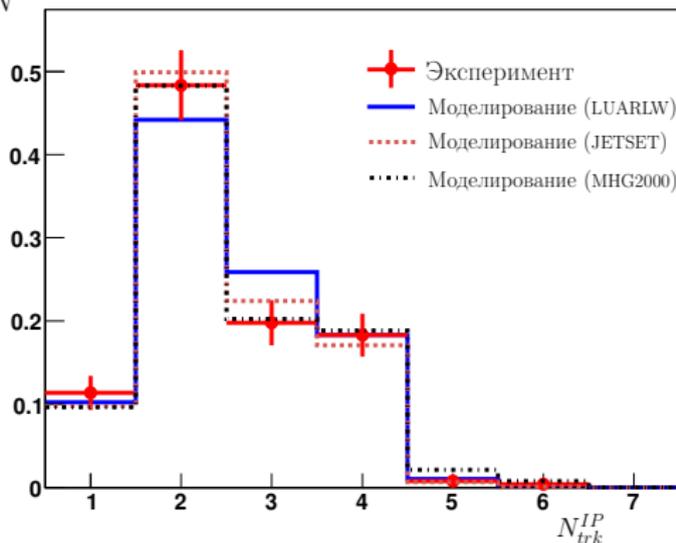
# Оценка систематической неопределённости в области энергий $\sqrt{s} = 1.84 \div 3.05$ ГэВ

- Использование LUARLW и JETSET
- Метод разложения по компонентам (МПК)
  - Матрица  $p_{ij}$  соответствует вероятности события, имеющего  $j$  заряженных треков, дать  $i$  восстановленных треков
  - Распределение  $N_i^{obs}$  определяется в эксперименте. Процедура нахождения исходного распределения заряженной множественности  $N_j$  сводится к минимизации

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=8} \frac{N_i^{obs} - \sum_{j=1}^{j=8} p_{ij} \times N_j}{N_i^{obs}},$$

что даёт оценку эффективности регистрации даже при не совсем точной настройке моделирования.

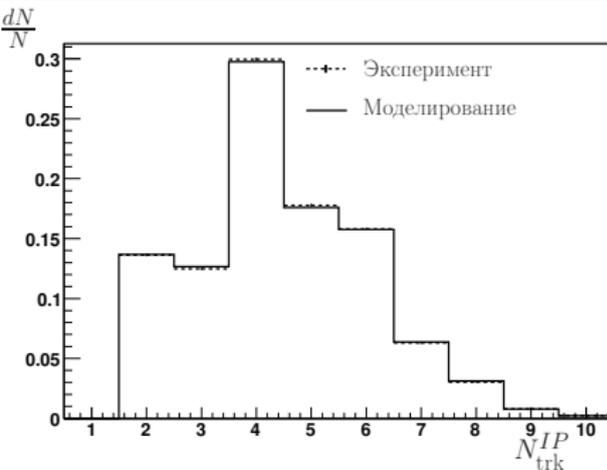
- При энергии 1.84 ГэВ сравнение MHG2000.

 $\frac{dN}{N}$ 


Сравнение эффективности регистрации

Энергия, МэВ	$\delta\epsilon/\epsilon$		
	LUARLW JETSET	LUARLW МПК	LUARLW MHG2000
1841.0	6.6%	3.6%	3.8%
1937.0 ÷ 2135.7	2.5%	1.9%	—
2135.7 ÷ 3048.1	1.2%	0.5%	—

# Измерение $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h \psi(2S)$ -резонанса

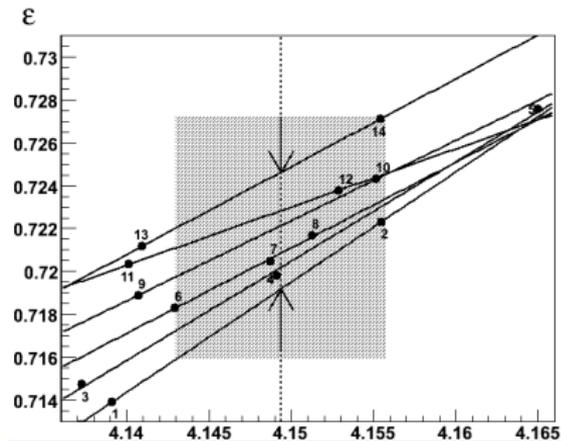


## Настройка моделирования $\psi(2S) \rightarrow$ адроны

- 1 выбор существенной опции или параметра, исходя из интуитивных предположений;
- 2 выбор дополнительного параметра и его изменение до достижения согласия с экспериментально наблюдаемой множественностью;
- 3 вычисление эффективности регистрации и сравнение результатов при оценке неопределённости.

## Основные систематические неопределённости (упрощённый список)

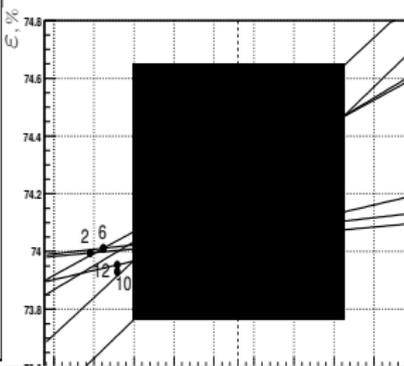
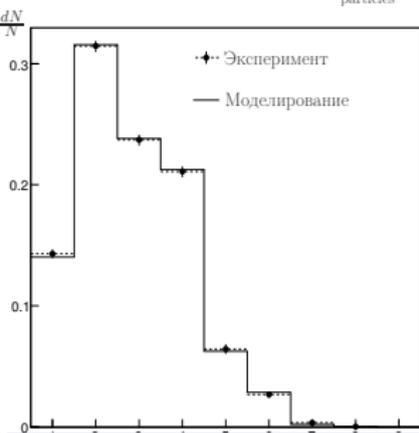
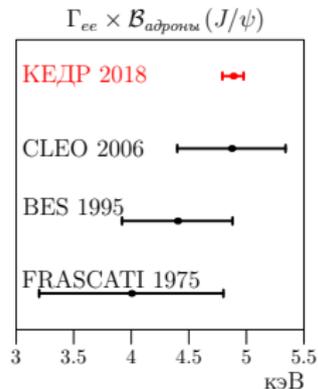
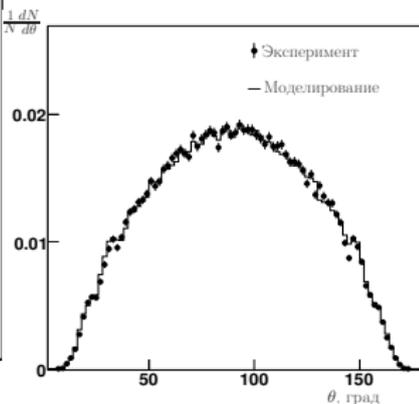
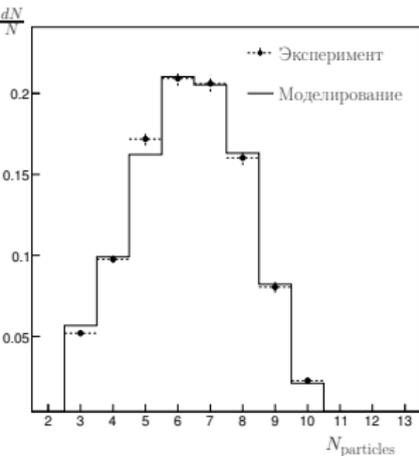
Ошибка абсолютной светимости	$\sim 1.2\%$
Моделирование распадов $\psi(2S)$	$\sim 1.0\%$
Отклик детектора	$\sim 0.5\%$
Ускорительные эффекты	$\sim 0.3\%$
Другие источники	$\sim 0.3\%$
Квадратичная сумма	$\sim 1.7\%$



Однофотонная физика с детектором КЕДР на ВЭПП-4М

$$\Gamma \times \mathcal{B}_h = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ}$$

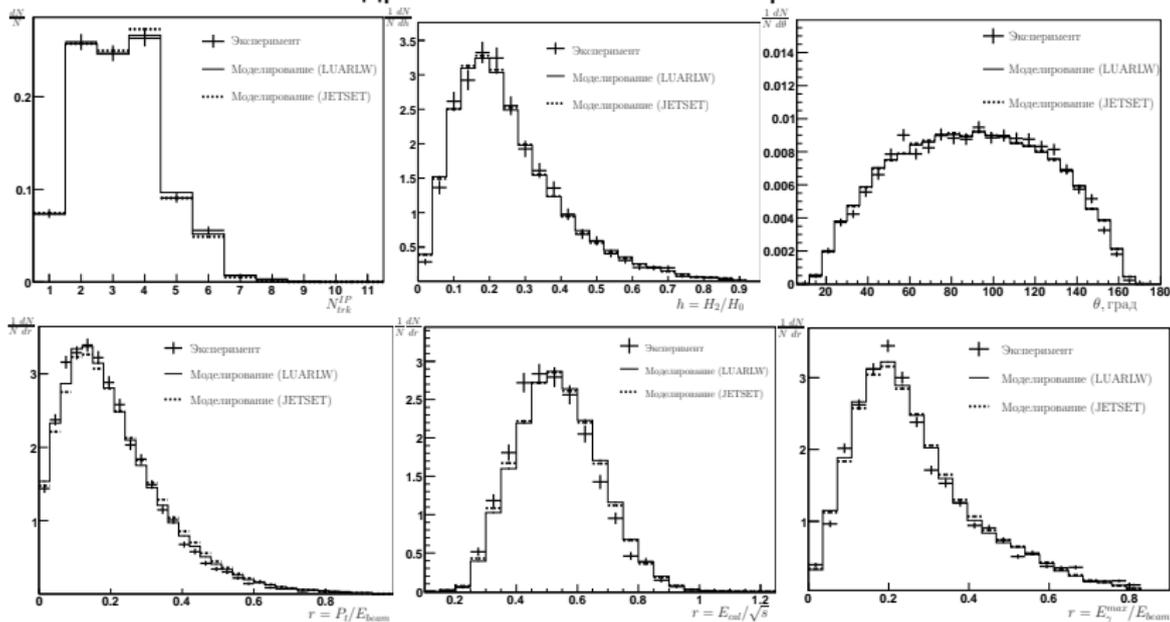
# Измерение $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h J/\psi$ -резонанса



## Основные систематические неопределённости (упрощённый список)

Ошибка абсолютной светимости	$\sim 1.0\%$
Моделирование распадов $J/\psi$	$\sim 0.7\%$
Отклик детектора	$\sim 0.8\%$
Ускорительные эффекты	$\sim 0.4\%$
Другие источники	$\sim 0.4\%$
<b>Итого</b>	<b><math>\sim 1.6\%</math></b>

## Свойства адронных событий на энергии 3.12 ГэВ



# Список систематических неопределённостей. Эксперимент 2010 г.

Систематические неопределённости  $R_{uds}$  для точек по энергии

Энергия, ГэВ	1.841	1.937	2.037	2.136	2.239	2.340	2.444
Светимость	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Радиационные поправки	2.0	1.5	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6
Мод. $uds$ -континуума	6.6	2.5	2.5	1.2	1.2	1.2	1.2
Реконструкция треков	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$l^+l^-$	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
$e^+e^-X$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Ядерное взаимодействие	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Вариации условий отбора	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Нейтральные события	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Пучковый фон	0.6	0.5	0.4	0.7	0.8	0.6	0.8
Определение энергии	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Квадратичная сумма	7.1	3.4	3.2	2.4	2.4	2.2	2.2
Энергия, ГэВ	2.543	2.645	2.745	2.850	2.949	3.048	
Светимость	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
Радиационные поправки	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Мод. $uds$ -континуума	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
Реконструкция треков	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
$l^+l^-$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
$e^+e^-X$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Эффективность триггера	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
Ядерное взаимодействие	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
Нейтральные события	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Вариации условий отбора	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
Пучковый фон	0.4	0.6	0.8	0.4	0.9	0.5	
Определение энергии	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Квадратичная сумма	2.1	2.2	2.2	2.1	2.3	2.1	

# Список систематических неопределённостей. Эксперимент 2011 г.

Систематические неопределённости  $R_{uds}$  для точек по энергии

Энергия, ГэВ	3.120	3.223	3.315	3.418	3.521	3.618	3.719
<i>Сканирование 1</i>							
Светимость	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Радиационные поправки	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
Мод. $uds$ -континуума	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	2.1
Вклад $J/\psi$	2.7	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
Вклад $\psi(2S)$							1.4
$I^+I^-$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
$e^+e^-X$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вариация условий отбора	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Пучковый фон	1.1	0.8	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7
Квадратичная сумма	3.5	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1	3.0
<i>Сканирование 2</i>							
Светимость	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Радиационный поправки	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
Мод. $uds$ -континуума	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	2.1
Вклад $J/\psi$	2.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
Вклад $\psi(2S)$							1.3
$e^+e^-X$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
$I^+I^-$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вариация условий отбора	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Пучковый фон	1.1	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5
Квадратичная сумма	3.6	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.9
Коррелированная часть	2.3	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	2.5

# Список систематических неопределённостей. Эксперимент 2014-2015 гг.

Систематические неопределённости  $R_{uds}$  для точек по энергии

Энегия, ГэВ	3.077	3.119	3.222	3.315	3.418	3.500	3.618	3.720
Светимость	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Радиационные поправки	0.8	0.8	0.5	0.7	0.6	0.5	0.7	0.5
Мод. $uds$ континуума	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Реконструкция треков	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$I^+I^-$	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
$e^+e^-X$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вариации условий отбора	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Вклад $J/\psi$ и $\psi(2S)$	0.1	1.8	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	1.1
Пучковый фон	0.4	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6
Квадратичная сумма	1.9	2.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	2.2