

Результаты экспериментов с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М

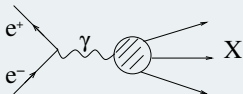
Тодышев Корнелий Юрьевич

ИЯФ СО РАН

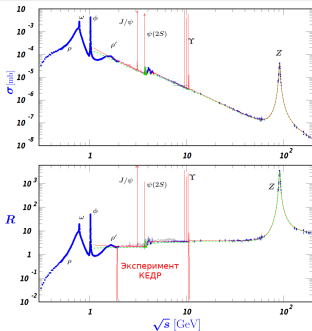
18 ноября 2025, ИЛФ СО РАН

Эксперимент КЕДР

Процесс e^+e^- -аннигиляции



- – Исследование эксклюзивных процессов
- – Измерение полного инклюзивного сечения e^+e^- -аннигиляции



Физическая программа эксперимента КЕДР

- Измерение масс элементарных частиц
 - Низкая энергия: J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$, D^0 , $D^\pm$, τ
 - Высокая энергия: $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$...
- Измерение лептонных ширин ψ - и Υ - мезонов
- Измерение R в области $2E = 2 \div 10$ ГэВ
- Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow \text{адроны}$
- Исследование ряда других процессов

ВЭПП-4М и КЕДР

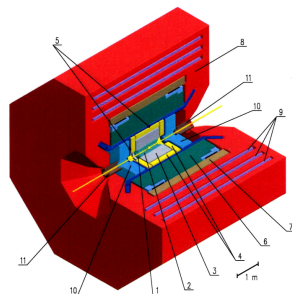
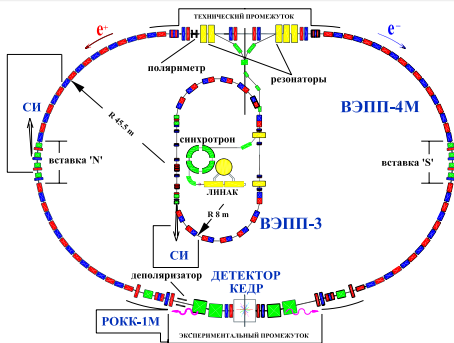


Рис. 1: Центральная часть детектора КЕДР. 1 - вакуумная труба ускорителя, 2 - вершинный детектор, 3 - дрейфовая камера, 4 - азотелые пороговые счетчики, 5 - времяпролётные счетчики, 6 - баррельный жидкокритионовый калориметр, 7 - сверхпроводящая катушка, 8 - ядро, 9 - мюонные камеры, 10 - торцевой CsI калориметр, 11 - компенсирующая катушка

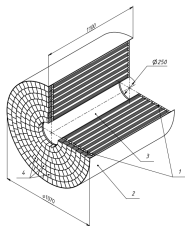
Энергия	$0.9 \div 5 \text{ ГэВ}$
Число сгустков	2×2
Светимость ($E = 1.8 \text{ ГэВ}$)	$1.5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Измерение энергии методом резонансной деполяризации:

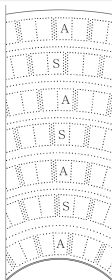
Тушековский поляриметр (внутрисгустковое рассеяние), точность измерения $\sim 1 \times 10^{-6}$, точность интерполяции (10-50 кэВ).

Лазерный поляриметр при $E > 3 \text{ ГэВ}$: Измерение асимметрии рассеяния поляризованных фотонов лазерного излучения, $\sim 1.5 \times 10^{-6} / 20 \text{ мин}$, систематическая неопределённость $\sim 10 \text{ кэВ}$.

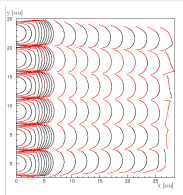
Калибровка дрейфовой камеры



1512 анодных
проволочек

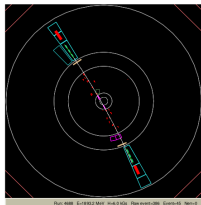


4 аксиальных (А)
+3 стереослоя (S)

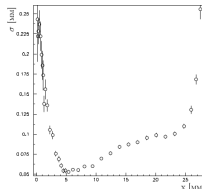


6 анодных
проволочек в ячейке.

Рабочий газ диметиловый эфир.



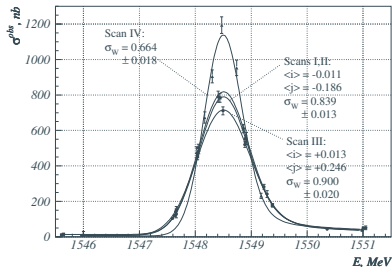
Событие от космической
частицы в детекторе КЕДР.



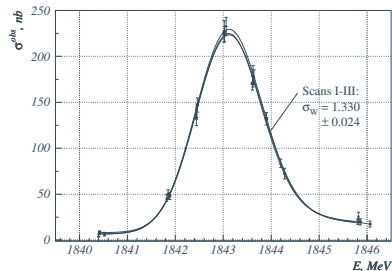
Пространственное разрешение
от расстояния дрейфа ионизации.

- Разработано моделирование срабатываний дрейфовой камеры и вершинного детектора.
- Разработана процедура калибровки ДК.
- Достигнуто пространственное разрешение около 100 мкм.
- Проведено более 600 калибровок ДК на протяжении всего эксперимента КЕДР.

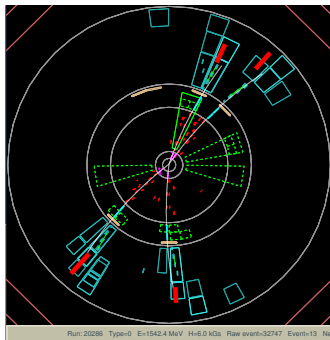
Измерение массы J/ψ - и $\psi(2S)$ - мезонов



Сканирование J/ψ -резонанса 2002 г.

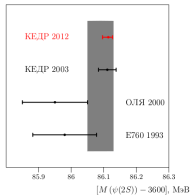
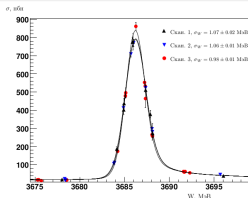


Сканирование $\psi(2S)$ -резонанса 2002 г.



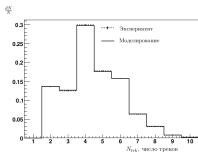
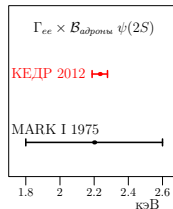
Событие рождения адронов в детекторе КЕДР (сканирование J/ψ -резонанса)

Измерение параметров $\psi(2S)$ - мезона



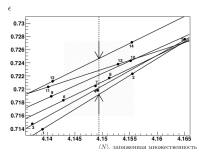
Сканирования 2004 и 2006 гг. $\int \mathcal{L} dt \simeq 0.6 \text{ пкбн}^{-1}$

$$M = 3686.114 \pm 0.007(\text{стат.}) \pm 0.011(\text{сист.})^{+0.002}_{-0.012}(\text{мод.}) \text{ МэВ}$$



Настройка моделирования $\psi(2S) \rightarrow \text{hadrons}$

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

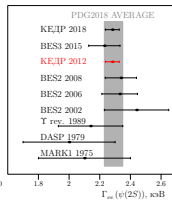
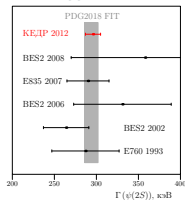


Основные систематические неопределённости (упрощённый список)

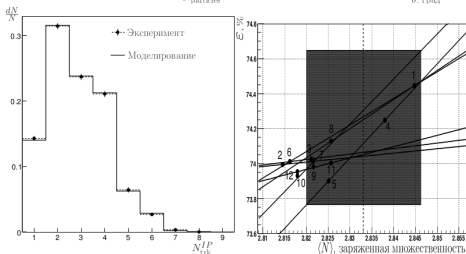
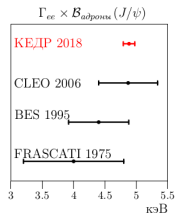
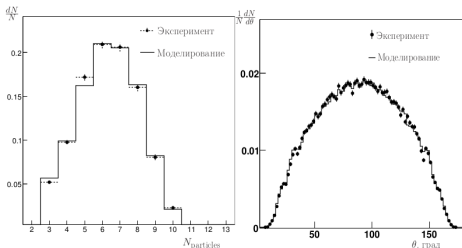
- Ошибка абсолютной светимости $\sim 1.3\%$
- Моделирование распадов $\psi(2S)$ $\sim 1.0\%$
- Отклик детектора $\sim 0.5\%$
- Ускорительные эффекты $\sim 0.3\%$
- Другие источники $\sim 0.3\%$

$$\Gamma_{ee} \times B_{\text{hadrons}} = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ}$$

Используя данные $B_{\text{hadrons}}^{\text{PDG}}$ и B_{ee}^{PDG} , были определены Γ и Γ_{ee} .



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

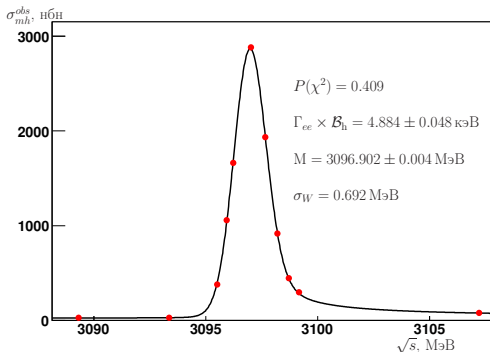


$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \kappa\text{эВ}$$

Основные систематические неопределённости (упрощённый список)

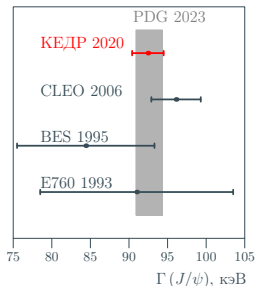
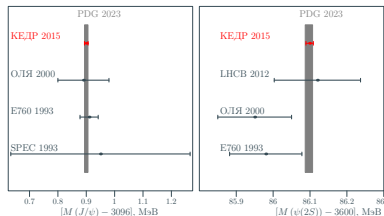
Ошибка абсолютной светимости	$\sim 1.0\%$
Моделирование распадов J/ψ	$\sim 0.7\%$
Отклик детектора	$\sim 0.8\%$
Ускорительные эффекты	$\sim 0.4\%$
Другие источники	$\sim 0.4\%$
Квадратичная сумма	$\sim 1.6\%$

Измерение масс и ширин J/ψ - и $\psi(2S)$ - мезонов



Наблюдаемое сечение рождения адронов в зависимости от энергии при сканировании J/ψ -резонанса.

Измеряемые параметры: масса, полная и парциальные ширины резонанса.

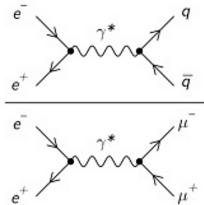


Для J/ψ и $\psi(2S)$ с наилучшей точностью измерены величины:

$M, \Gamma, \Gamma_{ee}, \Gamma_{hadrons}, \Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{hadrons}, \Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{ee}, \Gamma_{\mu\mu} \times \mathcal{B}_{ee}$.

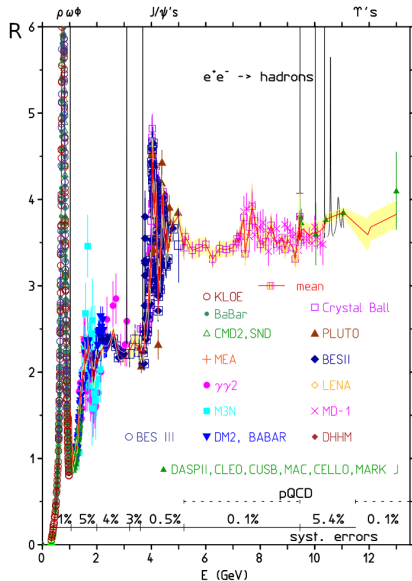
Мотивация эксперимента по измерению величины $R(s)$

$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)} \approx$$

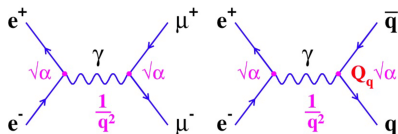


$R(s)$ используется для вычисления:

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



Величина R и поляризация вакуума



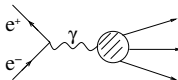
$$\sigma_0^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}(s) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}$$

Естественно определить:

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}}(s)}{\sigma_0^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}(s)}$$

В первом приближении:

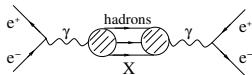
$$R(s) \simeq 3 \sum Q_q^2$$



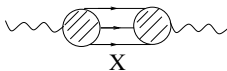
X – адронное состояние.

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}}(s) = R\sigma_0^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}(s)$$

Диаграмма процесса
 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

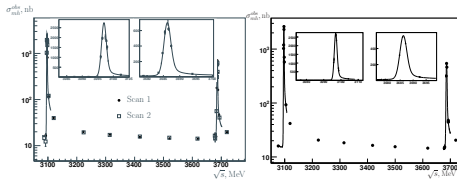


Соотношение между величиной R
и вакуумной поляризацией



$$R = -\frac{3}{\alpha} \text{Im}_h \Pi(s)$$

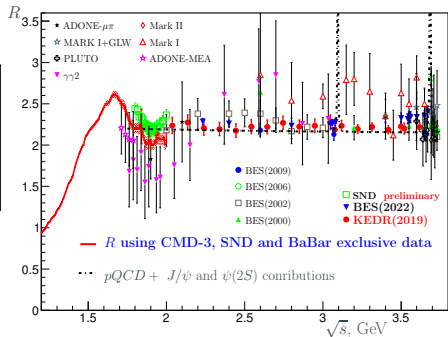
Измерение величины R в диапазоне энергии от 1.84 до 3.72 ГэВ



2010-2011

2014-2015

Скан.	Диапазон энергии	N_{points}	$\int L dt$ пкбн $^{-1}$
2010	1.84-3.05	13	0.66
2011	3.08-3.72	9	2.7
2014-2015			
2019-2020	4.56-6.96	17	13.7



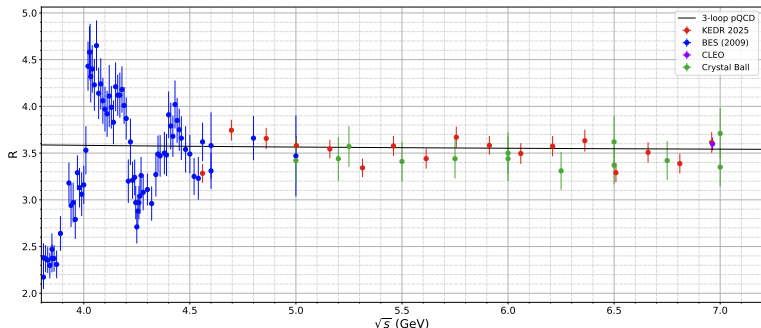
Сравнение результатов измерения R различных экспериментов

$$1.84-3.08 \text{ ГэВ: } \bar{R}_{uds}^{\text{КЕДР}} = 2.213 \pm 0.013 \pm 0.037 \quad (R_{uds}^{\text{pQCD}} = 2.17 \pm 0.02)$$

$$3.11-3.72 \text{ ГэВ: } \bar{R}_{uds}^{\text{КЕДР}} = 2.205 \pm 0.014 \pm 0.026 \quad (R_{uds}^{\text{pQCD}} = 2.16 \pm 0.01)$$

Предварительные результаты измерения R при $2E = 4.56 \div 6.96$ ГэВ

- Интегральная светимость 13.7 пб^{-1} набрана в 17-ти точках по энергии.



Величина R в зависимости от энергии. Полная ошибка около 3% (систематическая неопределённость 2.4%).

$$4.56\text{-}6.96 \text{ ГэВ } \bar{R}_{\text{предварительно}}^{\text{КЕДР}} = 3.51 \pm 0.02 \pm 0.05, \quad R^{\text{pQCD}} = 3.56 \pm 0.02$$

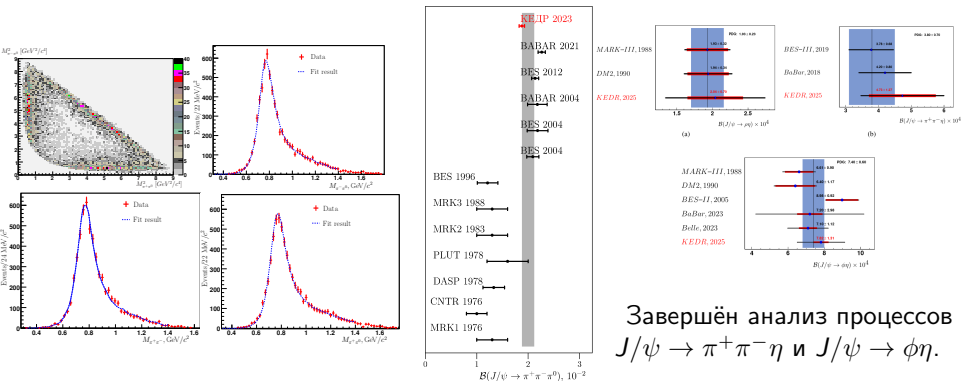
Измерение вероятностей распадов

$$J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \text{ и } J/\psi \rightarrow \rho \pi$$

- Измерены величины вероятностей процессов $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ и $J/\psi \rightarrow \rho \pi$. Получены следующие результаты:

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho \pi) = (2.072 \pm 0.017 \pm 0.062) \times 10^{-2}$$

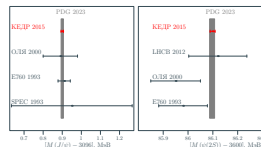
$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) = (1.878 \pm 0.013 \pm 0.051) \times 10^{-2}$$



Завершён анализ процессов $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ и $J/\psi \rightarrow \phi \eta$.

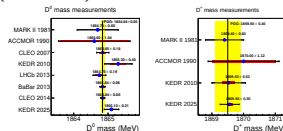
Результаты эксперимента КЕДР на ВЭПП-4М

✓ С лучшей в мире точностью измерены величины: M , Γ , Γ_{ee} , $\Gamma_{hadrons}$, $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{hadrons}$, $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{ee}$, $\Gamma_{\mu\mu} \times \mathcal{B}_{ee}$ для J/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов, параметры $\psi(3770)$ - мезона.

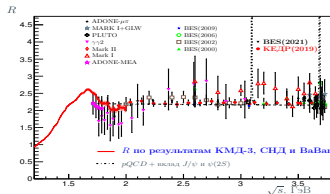


✓ Наиболее точное измерение массы τ -лептона (2007 г.)

✓ Измерение масс D -мезонов. С лучшей в мире точностью определена масса D^+ -мезона. УФН 184, 75-88 (2014)



✓ Определение величины R в диапазоне энергий 1.84-3.72 ГэВ. Наиболее высокая точность измерений по систематической неопределённости в настоящее время. УФН 190, 995-1005(2020)



✓ Измерение ряда бранчингов в распадах J/ψ .

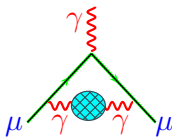
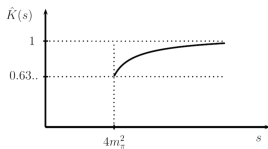
✓ Всего выполнено 22 измерения с лучшей в мире точностью.

Спасибо за внимание!

BACKUP

Вклад R в a_μ и $\alpha(M_Z^2)$

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

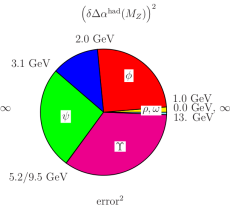
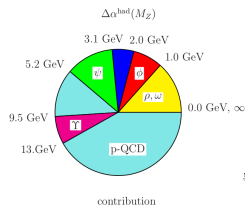
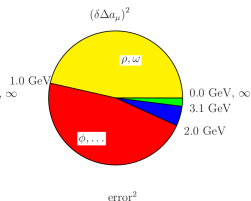


$$a_\mu^{\text{LO VP}} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{\hat{K}(s)R(s)}{s^2} ds$$

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

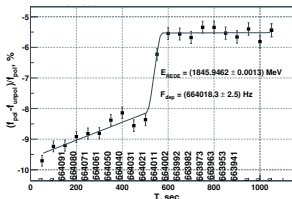
$$\Delta\alpha = \sum_f \text{[Feynman diagram: fermion loop with photon lines]} = \Delta\alpha_{\text{lep}}(s) + \Delta\alpha_{\text{had}}(s)$$

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

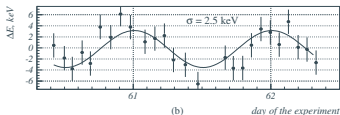
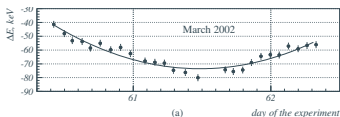


A. Blondel и др. arXiv:1905.05078.

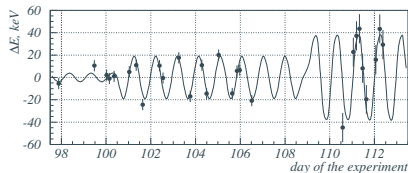
Измерение энергии в эксперименте КЕДР



Изменение скоростей счёта для поляризованного и неполяризованного пучков.



Верхний рисунок — энергия в зависимости от времени, нижний тоже самое после вычитания «медленной» временной компоненты.

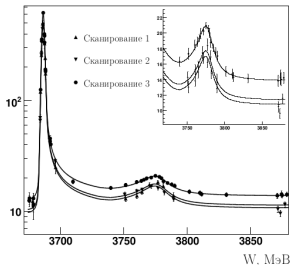


Интерполяция энергии после удаления всех аperiодических зависимостей.

- Точность интерполяции энергии составляет 10-30 кэВ.
- В течение эксперимента проведено более 3000 калибровок энергии.

Измерение параметров $\psi(3770)$

σ_{mh}^{obs} , нбн

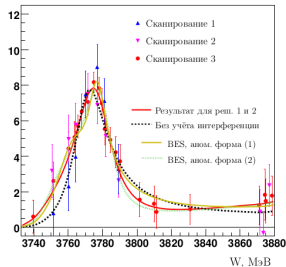


Сканирования 2004 и 2006 гг.

$\int \mathcal{L} dt \sim 1.9 \text{ пкбн}^{-1}$.

Наблюдаемое адронное сечение как функция энергии в системе центра масс для трёх сканирований. Кривые соответствуют подгонке по векторной доминантности.

$\delta\sigma^{RC}$, нбн

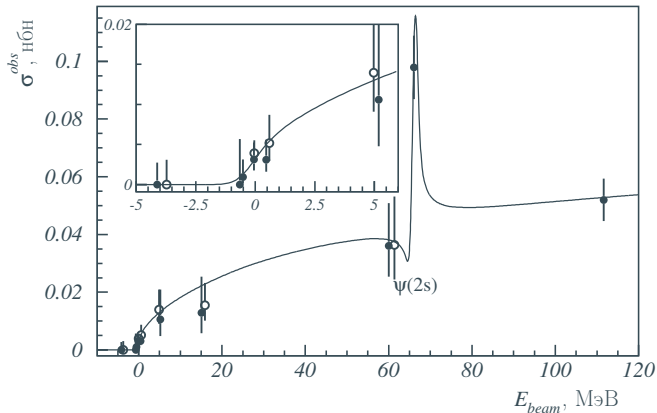


Избыток в адронном сечении в области $\psi(3770)$ - резонанса, ассоциированный с рождением $D\bar{D}$ - пар. Кривые соответствуют подгонкам. Данные эксперимента приведены с учётом эффективности регистрации событий.

$$M = 3779.2^{+1.8}_{-1.7} {}^{+0.5}_{-0.7} {}^{+0.3}_{-0.3} \text{ МэВ}$$

$$\Gamma = 24.9^{+4.6}_{-4.0} {}^{+0.5}_{-0.6} {}^{+0.2}_{-0.9} \text{ МэВ}$$

Измерение массы τ -лептона



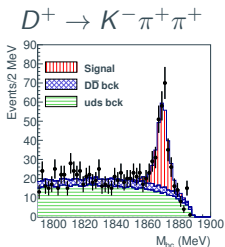
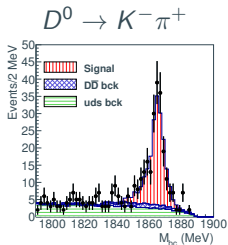
Наблюдаемое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ в зависимости от энергии.

Наиболее точное измерение массы τ -лептона

$$\text{КЕДР 2007 г. : } M_{\tau}^{\text{КЕДР 2007}} = 1776.81^{+0.25}_{-0.23} \pm 0.15 \text{ МэВ}$$

$$\text{BESIII 2014 г. : } M_{\tau}^{\text{BESIII 2014}} = 1776.91 \pm 0.12^{+0.10}_{-0.13} \text{ МэВ}$$

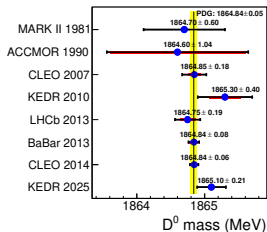
Измерение масс D -мезонов



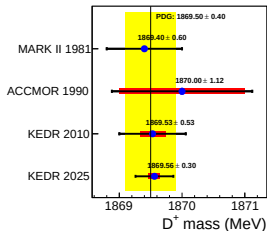
Анализ данных 2004 г. и 2016-2017 гг. ($\int L dt \simeq 4.9 \text{ пб}^{-1}$)

- Набор статистики в области $\psi(3770)$ -резонанса, который в распадается на $D\bar{D}$ -пару.
- Кинематическая реконструкция процессов $D^0 \rightarrow K^- \pi^+, D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$.

D^0 mass measurements



D^+ mass measurements



Результаты эксперимента КЕДР в сравнении с
данными других экспериментов

Форма сечения узкого резонанса

В случае рождения узких векторных мезонов в реакции

$$e^+e^- \rightarrow V \rightarrow \text{адроны:}$$

$$\sigma_{\psi(2S)}(W) = \frac{12\pi}{W^2} \left(1 + \delta\right) \left[\frac{\Gamma_{ee}\Gamma_h}{\Gamma M} \operatorname{Im} f(W) - \frac{2\alpha\sqrt{R\Gamma_{ee}\Gamma_h}}{3W} \lambda \operatorname{Re} \frac{f^*(W)}{1 - \Pi_0} \right] + \dots,$$

где Γ , Γ_{ee} и Γ_h – полная и парциальная ширины мезона, M – его масса. Здесь α – постоянная тонкой структуры, $R = \sigma^{(h)}/\sigma^{(\mu\mu)}$,

$\delta = \frac{3}{4}\beta + \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\pi^2}{3} - \frac{1}{2} \right) + \beta^2 \left(\frac{37}{96} - \frac{\pi^2}{12} - \frac{\ln(W^2/m_e^2)}{72} \right)$, λ – доля событий, интерферирующих с нерезонансным адронным сечением и

$$\beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left(\ln \frac{W}{m_e} - \frac{1}{2} \right), \quad f = \frac{\pi\beta}{\sin \pi\beta} \left(\frac{M^2}{s} - 1 - i \frac{\Gamma M}{s} \right)^{\beta-1}$$

Приведенная формула восходит к работе

Я.И. Азимов и др. Письма в ЖЭТФ **21**, вып. 6, 1975

Кроме массы при подгонке определяется комбинация

$$\frac{\Gamma_{ee}\Gamma_h}{\Gamma} = \Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{hadrons}$$