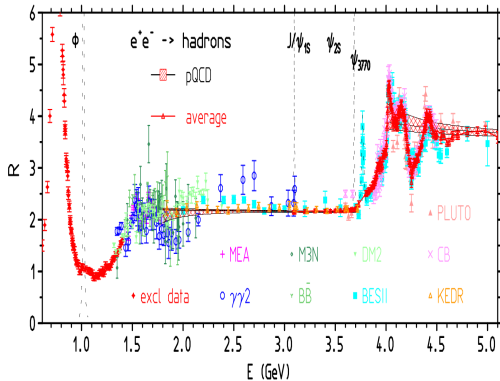


**Прецизионное измерение  $R$  в  
эксперименте КЕДР в диапазоне  
энергии от 3.08 до 3.72 ГэВ.**

*Корнелий Тодышев*

КЕДР, ВЭПП-4М

# Измерение $R(s)$



$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)} \approx \frac{\text{diagram with } q, \bar{q}}{\text{diagram with } \mu^-, \mu^+}$$

The diagram shows two Feynman diagrams for the ratio R. The numerator diagram shows an electron-positron pair annihilating into a virtual photon (gamma\*) which then decays into a quark-antiquark pair (q, q-bar). The denominator diagram shows an electron-positron pair annihilating into a virtual photon (gamma\*) which then decays into a muon-antimuon pair (mu-, mu+).

В первом приближении:

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

$R(s)$  используется для вычисления:

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

F. Jegerlehner arXiv:1705.00263

Работы КЕДРa

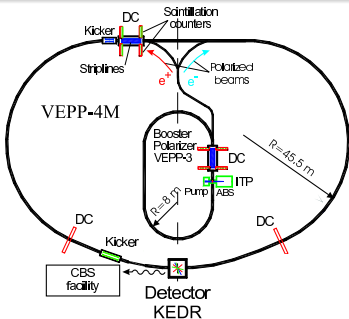
3.12-3.72 ГэВ, данные 2011,  $\int \mathcal{L} dt \sim 1.4 \text{ пкб}^{-1}$

*Phys. Lett. B* **753**, 533 (2016)

1.84-3.05 ГэВ, данные 2010,  $\int \mathcal{L} dt \sim 0.65 \text{ пкб}^{-1}$

*Phys. Lett. B* **770**, 174 (2017)

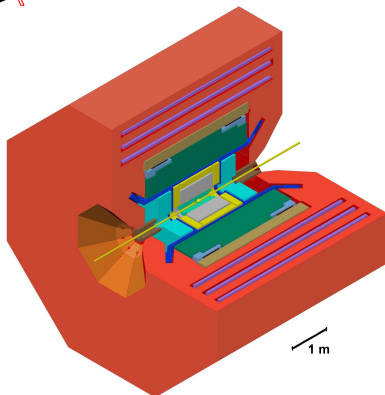
# ВЭПП-4М и КЕДР



Энергия	$1 \div 5$ ГэВ
Число сгустков	$2 \times 2$
Светимость $1.8$ ГэВ	$1.5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Измерение энергии:

- Методом резонансной деполяризации  $10 \div 30$  кэВ



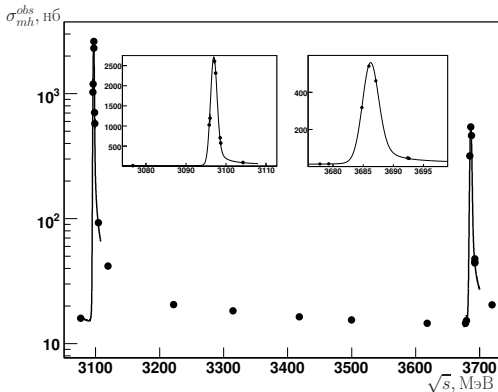
- Vertex detector
- Drift chamber
- Aerogel threshold counters
- ToF counters
- Lkr calorimeter
- Superconducting coil
- Yoke
- Muon chambers
- CsI calorimeter
- Compensating solenoid

1 m

# Эксперименты с детектором КЕДР

Область набора	Период времени	$\int Ldt, \text{пкб}^{-1}$	Статус результата
Сканирование $J/\psi, \psi(2S)$	06/02/01-18/05/01	0.13	опубликован
Сканирование $\psi(2S), \psi(3770)$	09/02/04-20/06/04	0.7	опубликован
Набор в пике $\psi(3770)$	30/10/04-02/01/05	0.9	опубликован
Набор в пике $\psi(2S)$	03/01/05-15/03/05	0.7	опубликован
Набор на пороге рождения $\tau$	16/03/05-08/04/05	0.6	опубликован
Сканирование $J/\psi$	09/04/05-25/04/06	0.2	опубликован
Набор на пороге рождения $\tau$	26/04/05-25/04/06	5.2	опубликован
Сканирование $\psi(2S), \psi(3770)$	18/04/06-25/05/06	1.7	опубликован
Набор в пике $\psi(2S)$	26/05/06-01/06/06	0.6	опубликован
Сканирование $\psi(2S), \psi(3770)$	02/06/06-15/06/06	0.5	опубликован
Набор на пороге рождения $\tau$	07/10/06-01/02/07	5.9	опубликован
Набор в $\psi(2S)$	11/10/07-17/12/07	2.2	опубликован
Набор в $J/\psi$	18/12/07-27/01/09	2.3	опубликован
Поиск узких резонансов	27/01/09-02/04/09	0.35	опубликован
$R$ ниже $J/\psi$	18/01/10-24/05/10	0.65	опубликован
Набор в $\psi(2S)$	29/05/10-11/01/11	2.4	опубликован
$R$ выше $J/\psi$	14/01/11-20/02/11	1.4	опубликован
ремонт детектора			
Набор в $J/\psi$	09/05/14-20/05/14	0.1	-
$R$ выше $J/\psi$	17/10/14-08/01/15	1.3	подготовка публикации

# Адронное сечение в диапазоне энергии 3.08–3.72 ГэВ



Точка	$\sqrt{s}$ , МэВ	$\int \mathcal{L} dt$ , нб $^{-1}$
1	$3076.7 \pm 0.2$	$103.45 \pm 0.98 \pm 0.93$
2	$3119.2 \pm 0.2$	$77.15 \pm 0.86 \pm 0.69$
3	$3221.8 \pm 0.2$	$93.18 \pm 0.98 \pm 0.84$
4	$3314.7 \pm 0.4$	$157.69 \pm 1.31 \pm 1.42$
5	$3418.3 \pm 0.8$	$150.46 \pm 1.33 \pm 1.35$
6	$3499.6 \pm 1.1$	$125.76 \pm 1.23 \pm 1.13$
7	$3618.1 \pm 0.4$	$159.97 \pm 1.43 \pm 1.44$
8	$3719.6 \pm 0.2$	$130.90 \pm 1.34 \pm 1.18$

■  $\sim 0.34$  пкб $^{-1}$  набрано в области узких резонансов

$\epsilon_{J/\psi}$ , %	$\sigma_W(J/\psi)$ , МэВ	$P(\chi^2)$ , %	$\epsilon_{\psi(2S)}$ , %	$\sigma_W(\psi(2S))$ , МэВ	$P(\chi^2)$ , %
$78.72 \pm 0.89$	$0.7852 \pm 0.0036$	53.5	$80.6 \pm 1.95$	$1.261 \pm 0.0454$	99.4

# Процедура определения $R$

Способ измерения  $R$ :

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

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

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

$N_{res.bg.}$  – ускорительный фон,  $\varepsilon(s)$  – 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:  $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$ ,  $e^+e^- X$ -процессы.

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

$\mathcal{F}(s,x)$  – 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  $R_{uds}$  !**

# Условия отбора адронных событий

Критерии отбора адронных событий

$\tilde{N}_{\text{track}}^{\text{IP}}$  – число треков, удовлетворяющих условию  $E/p < 0.6$ .

Параметр	Допустимый интервал
$N_{\text{particles}} \geq 3$ OR $\tilde{N}_{\text{track}}^{\text{IP}} \geq 2$	
$N_{\text{track}}^{\text{IP}}$	$\geq 1$
$E_{\text{obs}}$	$> 1.6$ ГэВ
$E_{\gamma}^{\text{max}}/E_{\text{beam}}$	$< 0.82$
$E_{\text{cal}}$	$> 0.65$ ГэВ
$H_2/H_0$	$< 0.9$
$ p_z^{\text{miss}}/E_{\text{obs}} $	$< 0.6$
$E_{\text{LKr}}/E_{\text{cal}}$	$> 0.15$
$ Z_{\text{vertex}} $	$< 15.0$ см

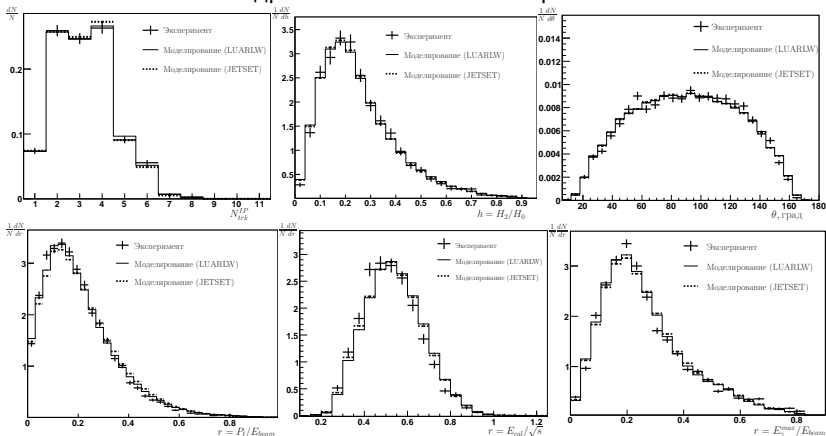
Измеренная энергия  $E_{\text{obs}}$  определена как сумма энергий фотонов в калориметре и энергии заряженных частиц в предположении, что они пионы.

$E_{\gamma}^{\text{max}}$  энергия наиболее энергичного фотона.

$H_2$  and  $H_0$  моменты Фокса-Вольфрама.

$p_z^{\text{miss}}$  – сумма z компонент импульсов частиц

## Свойства адронных событий на энергии 3.12 ГэВ



Эффективность регистрации событий континуума  $uds$ , %

Точка	$\epsilon_{JETSET}$	$\epsilon_{LUARLW}$	$\delta\epsilon/\epsilon$
1	$76.91 \pm 0.13$	$76.77 \pm 0.13$	$-0.2 \pm 0.2$
2	$76.77 \pm 0.13$	$76.95 \pm 0.13$	$+0.2 \pm 0.2$
3	$77.09 \pm 0.13$	$76.96 \pm 0.13$	$-0.2 \pm 0.2$
4	$79.22 \pm 0.13$	$80.11 \pm 0.13$	$-1.1 \pm 0.2$
5	$80.38 \pm 0.13$	$80.34 \pm 0.13$	$-0.0 \pm 0.2$
6	$80.47 \pm 0.13$	$79.98 \pm 0.13$	$-0.6 \pm 0.2$
7	$80.56 \pm 0.13$	$80.73 \pm 0.13$	$+0.2 \pm 0.2$
8	$84.03 \pm 0.12$	$83.84 \pm 0.12$	$-0.2 \pm 0.2$



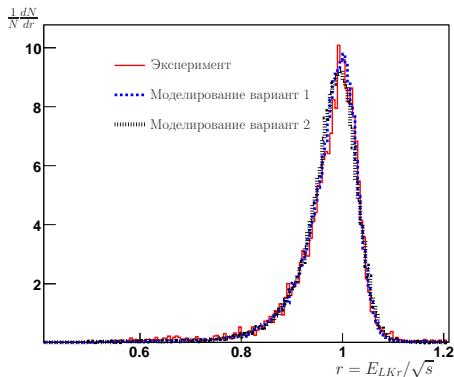
# Список систематических неопределённостей

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
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
$e^+e^-X$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$l^+l^-$	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
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
Ускорительный 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

# Определение светимости

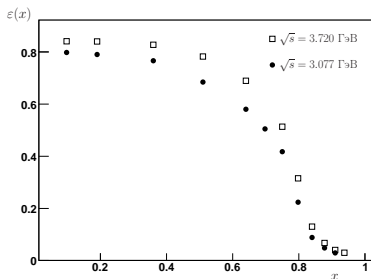
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  события зарегистрированные LKR калориметром  
 $44^\circ < \theta < 136^\circ$



Систематическая  
неопределён-  
ность %.

Источник	Неопр., %
Вычисление сечения	0.4
Отклик калориметра	0.4
Выставка калориметра	0.2
Угловое разрешение	0.1
Фон	0.1
Статистика моделирования	0.1
Изменение условий отбора	0.7
Квадратичная сумма	0.9

# Вычисление радиационных поправок



Зависимость  $\varepsilon(x)$ .

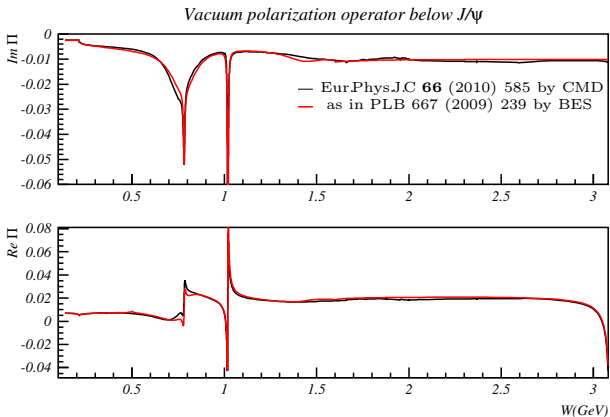
$$1 + \delta(s) = \int \frac{dx}{1-x} \frac{\mathcal{F}(s, x)}{|1 - \tilde{\Pi}((1-x)s)|^2} \frac{\tilde{R}((1-x)s)\varepsilon((1-x)s)}{R(s)\varepsilon(s)}$$

$$R(s) = -\frac{3}{\alpha} \text{Im} \Pi_{\text{hadr}}(s)$$

Сборка данных по вакуумной поляризации КМД-2:  
Eur. Phys. J. C66 (2010) 585

Точка	$1 + \delta$	Неопределённость, %				Квадр. сумма
		$\Pi(s)$	$\delta R$	$\delta \varepsilon$	$\delta_{calc.}$	
1	$1.1091 \pm 0.0089$	0.7	0.2	0.4	0.1	0.8
2	$1.1108 \pm 0.0089$	0.7	0.1	0.4	0.1	0.8
3	$1.1120 \pm 0.0056$	0.2	0.1	0.4	0.1	0.5
4	$1.1130 \pm 0.0078$	0.5	0.1	0.4	0.1	0.7
5	$1.1133 \pm 0.0067$	0.4	0.1	0.4	0.1	0.6
6	$1.1151 \pm 0.0056$	0.2	0.1	0.4	0.1	0.5
7	$1.1139 \pm 0.0078$	0.5	0.1	0.4	0.1	0.7
8	$1.1137 \pm 0.0056$	0.1	0.2	0.4	0.1	0.5

# Вычисление $\Pi(s)$



# Фон дилептонных и двухфотонных процессов

Точка	Вклад в наблюдаемое сечение в %		
	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$	$\tau^+\tau^-$
1	$5.06 \pm 0.24$	$1.29 \pm 0.27$	
2	$1.67 \pm 0.09$	$0.42 \pm 0.12$	
3	$3.34 \pm 0.17$	$0.72 \pm 0.19$	
4	$4.03 \pm 0.19$	$0.72 \pm 0.15$	
5	$4.01 \pm 0.20$	$0.69 \pm 0.16$	
6	$3.42 \pm 0.19$	$0.49 \pm 0.16$	
7	$4.14 \pm 0.21$	$0.53 \pm 0.15$	$3.37 \pm 0.17$
8	$2.34 \pm 0.13$	$0.33 \pm 0.11$	$4.05 \pm 0.20$

Вклад  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$  в сечение  $uds$  континуума  $\sim 0.5\%$ ,  
неопределённость в  $R$   $0.2\%$

# Остаточный фон накопителя

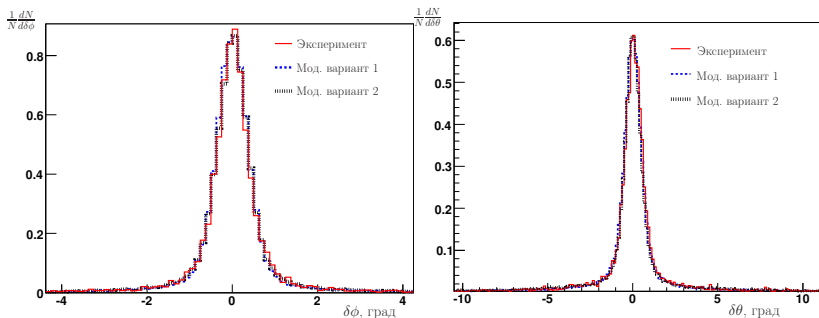
- Вклад остаточного фона накопителя оценивался на основе данных с заходов с разведёнными  $e^+$ - и  $e^-$ -сгустками.
- Основной способ: вычисление в предположении пропорциональности фона интегралу произведения тока на остаточное давление в вакуумной камере.

Альтернативный способ: вычисление в предположении пропорциональности фона заряду.

Остаточный фон накопителя в наблюдаемом сечении, %.

Точка	Вариант 1	Вариант 2
1	$1.35 \pm 0.27$	$1.29 \pm 0.27$
2	$0.65 \pm 0.14$	$0.80 \pm 0.15$
3	$0.81 \pm 0.20$	$0.86 \pm 0.21$
4	$3.80 \pm 0.35$	$4.08 \pm 0.36$
5	$2.33 \pm 0.30$	$2.19 \pm 0.29$
6	$1.09 \pm 0.23$	$1.15 \pm 0.24$
7	$0.75 \pm 0.17$	$0.76 \pm 0.18$
8	$1.82 \pm 0.25$	$1.94 \pm 0.26$

# Моделирование пространственного разрешения ДК



Расколлинearность по  $\phi$  и по  $\theta$  для треков событий  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ .  
Использовалось два способа моделирования пространственного разрешения.

Разница в определяемом значении  $R$  0.3%.

# Влияние вариации условий отбора

Критерий	Вариация	Изменение $R$ %
$N_{\text{particles}} \geq 3$ OR $\tilde{N}_{\text{track}}^{\text{IP}} \geq 2$	$N_{\text{particles}} \geq 4$ OR $\tilde{N}_{\text{track}}^{\text{IP}} \geq 2$	0.1
$N_{\text{track}}^{\text{IP}}$	$\geq 1$ OR no cut	0.1
$E_{\text{obs}}$	$> 1.4 \div 1.8$ ГэВ	0.3
$E_{\gamma}^{\text{max}}/E_{\text{beam}}$	$< 0.6 \div 0.9$	0.3
$E_{\text{cal}}$	$> 0.5 \div 0.75$ ГэВ	0.2
$H_2/H_0$	$< 0.7 \div 0.93$	0.2
$ p_z^{\text{miss}}/E_{\text{obs}} $	$< 0.6 \div 0.8$	0.2
$E_{\text{LKr}}/E_{\text{cal}}$	$> 0.15 \div 0.25$	0.1
$ Z_{\text{vertex}} $	$< 20.0 \div 13.0$ см	0.2
Квадратичная сумма		0.6



# Список систематических неопределённостей

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

	1	2	3	4	5	6	7	8
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
$e^+e^-X$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$l^+l^-$	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
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
Ускорительный 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

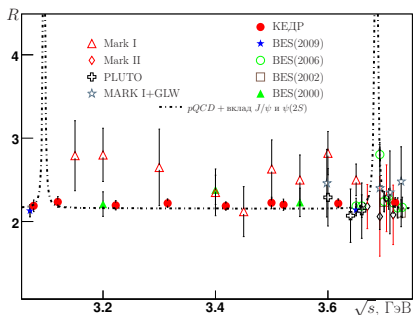
# Измеренные значения $R_{uds}(s)$

Данные 2011		Данные 2014	
$\sqrt{s}$ , МэВ	$R_{uds}(s)$	$\sqrt{s}$ , МэВ	$R_{uds}(s)$
-	-	$3076.7 \pm 0.2$	$2.188 \pm 0.056 \pm 0.042$
$3119.9 \pm 0.2$	$2.215 \pm 0.089 \pm 0.066$	$3119.2 \pm 0.2$	$2.211 \pm 0.046 \pm 0.060$
$3223.0 \pm 0.6$	$2.172 \pm 0.057 \pm 0.045$	$3221.8 \pm 0.2$	$2.214 \pm 0.055 \pm 0.042$
$3314.7 \pm 0.7$	$2.200 \pm 0.056 \pm 0.043$	$3314.7 \pm 0.4$	$2.233 \pm 0.044 \pm 0.042$
$3418.2 \pm 0.2$	$2.168 \pm 0.050 \pm 0.042$	$3418.3 \pm 0.4$	$2.197 \pm 0.047 \pm 0.040$
-	-	$3499.6 \pm 0.4$	$2.224 \pm 0.054 \pm 0.040$
$3520.8 \pm 0.4$	$2.200 \pm 0.050 \pm 0.044$	-	-
$3618.2 \pm 1.0$	$2.201 \pm 0.059 \pm 0.044$	$3618.1 \pm 0.4$	$2.220 \pm 0.049 \pm 0.042$
$3719.4 \pm 0.7$	$2.187 \pm 0.068 \pm 0.060$	$3719.6 \pm 0.2$	$2.213 \pm 0.047 \pm 0.049$

Коррелированные систематические неопределённости  $R$  2011/2014.

Источник	Неопределённость в %
Определение светимости	
Вычисление сечения	0.4
Рад. поправки	
П аппроксимация	$0.1 \div 0.3$
$\delta R(s)$	$0.1 \div 0.2$
$\delta \epsilon(s)$	0.2
Моделирование	1.1
Вклад $e^+ e^- X$	0.1
Вклад $I^+ I^-$	0.2
Эффективность триггера	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2
Квадратичная сумма	1.3

# Результаты КЕДР в области 3.08 – 3.72 ГэВ



Используя параметры  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ - резонансов, находим  $R_{uds}(s) + R_{J/\psi+\psi(2S)} \Rightarrow R(s)$

$\sqrt{s}$ , МэВ	$R_{uds}(s)\{R(s)\}$
$3076.7 \pm 0.2$	$2.188 \pm 0.056 \pm 0.042$
$3119.6 \pm 0.4$	$2.212\{2.235\} \pm 0.042 \pm 0.050$
$3222.5 \pm 0.8$	$2.194\{2.195\} \pm 0.040 \pm 0.037$
$3314.7 \pm 0.6$	$2.220\{2.220\} \pm 0.035 \pm 0.036$
$3418.3 \pm 0.3$	$2.186\{2.186\} \pm 0.032 \pm 0.036$
$3499.6 \pm 0.4$	$2.224\{2.224\} \pm 0.054 \pm 0.040$
$3520.8 \pm 0.4$	$2.200\{2.201\} \pm 0.050 \pm 0.044$
$3618.2 \pm 0.7$	$2.212\{2.218\} \pm 0.038 \pm 0.037$
$3719.5 \pm 0.5$	$2.204\{2.228\} \pm 0.039 \pm 0.043$

$$\bar{R}_{uds} = 2.204 \pm 0.013 \pm 0.030$$

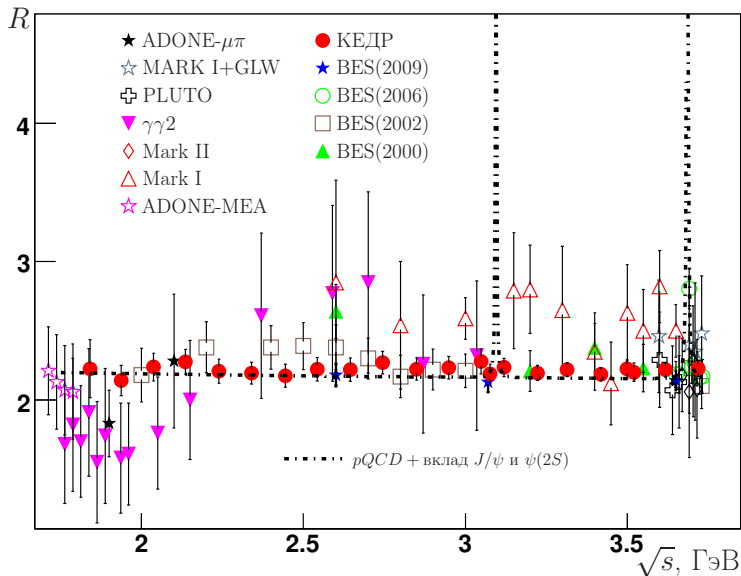
$$R_{pQCD} = 2.16 \pm 0.01$$

В эксперименте КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М проведено измерение величины  $R$  в девяти точках в диапазоне энергии центра масс от 3.08 до 3.72 ГэВ.

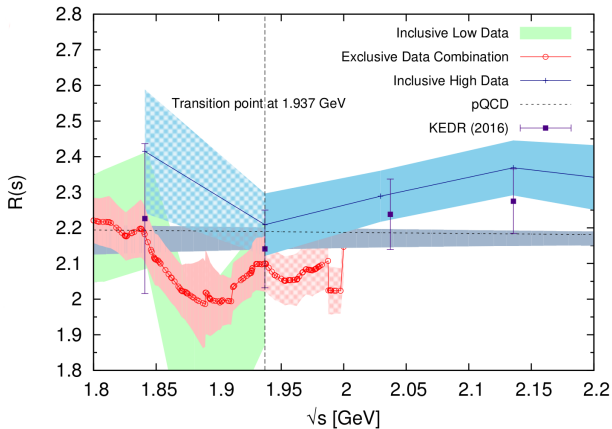
Достигнутая точность измерения в большинстве точек лучше либо равна 2.6% при систематической ошибке 1.9%. В настоящее время это наиболее точное измерение величины  $R$  для данной области энергии.

# Дополнительные слайды

# Измерение $R$ от порога рождения $p\bar{p}$ до порога рождения $D\bar{D}$

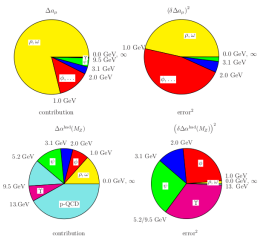


# Измерение $R$ ниже 2.2 ГэВ



A.Keshavarzi, D.Nomura, T. Teubner arXiv:1802.02995

## Correlation between different contributions to $a_\mu^{\text{had}}$ and $\Delta\alpha^{\text{had}(5)}$



Contributions from  $e^+e^-$  data ranges and from pQCD to  $a_\mu^{\text{had}}$  and  $\Delta\alpha^{\text{had}(5)}$ .



Document Viewer  
 MTPgm1HV18.pdf - Summary of Theory Workshop pdfsubject-hadronic effects in precision observables  
 18 (19 of 40) 133.07% (d)

Of  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2)$  22% data, 78% pQCD!

Contributions from  $e^+e^-$  data ranges and form pQCD to  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(-M_0^2)$  vs.  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2)$ .

F. Jegerlehner      muonLOHCws@MTP, JGU Mainz, February 19-23, 2018      38

# Вычисление $R$ в рамках pQCD

Аналитическое выражение для  $R(s)$ , полученное в работе  
**P.A.Baikov et al. Nucl. and Part. Phys. Proceed. 261-262(2015):**

$$R^{n_f=3}(s) = 2 \left[ 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + 1.6398 \left( \frac{\alpha_s}{\pi} \right)^2 - 10.2839 \left( \frac{\alpha_s}{\pi} \right)^3 - 106.8798 \left( \frac{\alpha_s}{\pi} \right)^4 \right].$$

$\alpha_s$  вычислено в работе **K.G.Chetyrkin et al. PRL 79 (1997)**

$$\alpha_s = \frac{1}{\beta_0 L} - \frac{1}{(\beta_0 L)^2} \frac{\beta_1}{\beta_0} \ln L + \frac{1}{(\beta_0 L)^3} \left[ \left( \frac{\beta_1}{\beta_0} \right)^2 (\ln^2 L - \ln L - 1) + \frac{\beta_2}{\beta_0} \right] \\ + \frac{1}{(\beta_0 L)^4} \left[ \left( \frac{\beta_1}{\beta_0} \right)^3 \left( -\ln^3 L + \frac{5}{2} \ln^2 L + 2 \ln L - \frac{1}{2} \right) - 3 \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_0^2} \ln L + \frac{\beta_3}{2\beta_0} \right]$$

Для  $n_f = 3$   $\beta_0 = \frac{9}{4}$ ,  $\beta_1 = 4$ ,  $\beta_2 = \frac{3863}{384}$ ,  $\beta_3 = \frac{445}{32} \zeta(3) + \frac{140599}{4608}$ ,  $L = \ln^2 \frac{Q^2}{\Lambda_{MS}^2}$

$\alpha_s(m_\tau^2) = 0.331 \pm 0.013$  **A.Pich Nucl. and Part. Phys. Proceed. 260 (2015)**  
позволяет получить  $R_{uds}^{pQCD} = 2.16 \pm 0.01$  в интервале энергии от 3.1 до 3.7 ГэВ.

# Условия отбора событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ .

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  события зарегистрированные LKR калориметром  
 $44^\circ < \theta < 136^\circ$

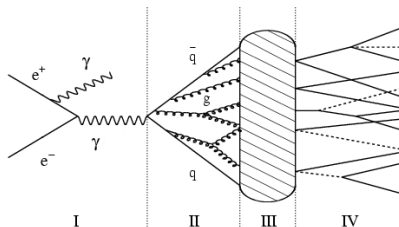
- два кластера с энергией более 20% энергии пучка;
- расколлинearности  $\delta\theta$  и  $\delta\phi$  углу менее  $18^\circ$ ;
- полная энергия кластеров больше энергии пучка;
- энерговыделение вне данных кластеров не более 20% от полного энерговыделения;
- отношение моментов Фокса-Вольфрама  $H_2/H_0 > 0.6$ .

# Вариации условия отбора событий

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma).$$

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  события зарегистрированные LKR калориметром  
 $30^\circ < \theta < 150^\circ$ ,  $40^\circ < \theta < 140^\circ$  (0.5%)

- два кластера с энергией более  $20 \div 30\%$  энергии пучка (0.2%)
- расколлинearности  $\delta\theta$  и  $\delta\phi$  углу менее  $8^\circ \div 20^\circ$  (0.2%);
- полная энергия кластеров больше  $90 - 140\%$  энергии пучка (0.2%);
- энерговыделение вне данных кластеров не более  $25 \div 10\%$  от полного энерговыделения(0.3%);
- отношение моментов Фокса-Вольфрама  $H_2/H_0 > 0.6 \div 0.85$  (0.2%).



## Моделирование адронных событий

- I. Формирование исходной конфигурации партонов.
- II. Излучение жёстких глюонов и/или их конверсия в  $q\bar{q}$ -пары (ТВ КХД).
- III. Фрагментация партонов в адроны (феноменологический подход).
- IV. Распад нестабильных частиц.

Analytical expression for the annihilation cross section nearby a narrow resonance in the soft photon approximation was first obtained in

**Ya.I. Azimov et al. JETP Lett. 21 (1975) 172**

With up-to-day modifications one has

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

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{ee \rightarrow ee} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{QED}}^{ee \rightarrow ee} + \frac{1}{s} \left\{ \frac{9}{4} \frac{\Gamma_{ee}^2}{\Gamma M} (1 + \cos^2 \theta) (1 + \delta_{sf}) \text{Im} f - \frac{3\alpha}{2} \frac{\Gamma_{ee}}{M} \left[ (1 + \cos^2 \theta) - \frac{(1 + \cos^2 \theta)^2}{(1 - \cos \theta)} \right] \text{Re} \frac{f^*}{1 - \Pi_0} \right\}$$

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

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

$\Gamma_{ee}$ ,  $\Gamma$ ,  $M$  – 'dressed' parameters including corrections to the vacuum polarization,

$\Gamma_{ee} = \Gamma_{ee}^{(0)} / |1 - \Pi_0|^2$ ,  $\lambda$ –parameter controls the resonance–continuum interference,  $\tilde{\Gamma}_h \neq \Gamma_h$

Numerical convolution with the collision energy distribution is used to fit resonance.

# Interference effects in the inclusive hadronic cross section

If strong and electromagnetic decays of the resonance do not interfere  $\lambda = \sqrt{R\mathcal{B}_{ee}/\mathcal{B}_h}$  otherwise for an exclusive mode  $m$  contributing  $R_m$  to the  $R$  ratio the partial width is

$$\Gamma_m = R_m\Gamma_{ee} + \Gamma_m^{(s)} + 2\sqrt{R_m\Gamma_{ee}\Gamma_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle_{\Theta},$$

The brackets  $\langle \rangle_{\Theta}$  denote averaging over the phase space.

$$\lambda = \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{ee}}{\mathcal{B}_h}} + \sqrt{\frac{1}{\mathcal{B}_h}} \sum_m \sqrt{b_m\mathcal{B}_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle_{\Theta}$$

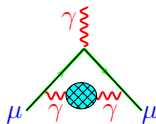
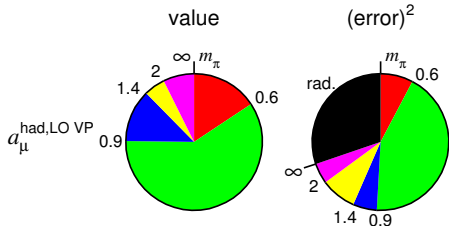
where  $b_m = R_m/R$  is the branching fraction for the continuum,  $\mathcal{B}_m^{(s)} = \Gamma_m^{(s)}/\Gamma$ .

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

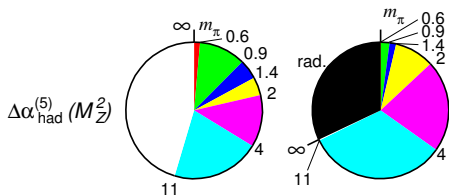
$\Gamma_m$  ambiguity: fit gives  $\tilde{\Gamma}_m$  and  $\cos \phi_m$ , the sign of  $\sin \phi_m$  required for  $\Gamma_m$  determination is not known

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

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



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



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

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

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

K.Hagiwara et al. arxiv:1105.3149